



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

**Análisis teórico de la GBAS y diseño de
procedimientos en el aeropuerto de
Alicante/Elche**

Realizado por: Alejandro Lidón González

Tutorizado por:

Israel Quintanilla García y Pedro Yuste Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Resumen

El presente documento tiene como objetivo la descripción teórica de la tecnología GBAS y su implantación y la generación de una carta aeronáutica de aproximación por instrumentos de GBAS en el Aeropuerto de Alicante/ Elche. Este aeropuerto tiene actualmente un sistema ILS para las fases de aproximación y aterrizaje. El proyecto engloba todos los pasos necesarios para la creación de una carta aeronáutica GBAS basada en el procedimiento ILS Z.

Se comienza con el estudio teórico de la tecnología GBAS que incluye explicaciones de los sistemas GNSS, los sistemas de aumentación, el concepto PBN, el GBAS y su implantación en aeropuertos. Esta información se ha recopilado de fuentes académicas y oficiales de la OACI.

Para la generación de la carta aeronáutica el primer paso es realizar el franqueamiento de obstáculos de las distintas partes del procedimiento: el circuito de espera, las OCA/H y la aproximación visual, las aproximaciones inicial e intermedia, la protección de viraje y las VSS. Esto se realiza mediante la importación a Google Earth de dibujos de Civil 3d, realizados de acuerdo con las normas de OACI.

El siguiente paso es el diseño de los símbolos de la carta en Civil 3d. Se estudia la simbología presente en las cartas publicadas y en la normativa y se recrea en Civil 3d con las características y alturas del procedimiento diseñado.

Por último, se utiliza ArcGIS para generar las curvas de nivel, importar el dibujo de Civil 3d y añadir los elementos de texto y tablas que sean necesarios para completar la tabla. Las páginas posteriores se diseñan directamente en Microsoft Word.

Abstract

The aim of this document is double: to explain the theory of the GBAS and its theoretical installation in an airport and to develop an aeronautical chart for an instrumental approach procedure with GBAS in the Airport of Alicante/Elche.

Firstly, the theoretical part is explained, thanks to information extracted from official and academic sources. For the creation of the aeronautical chart, the first step is the obstacle clearance, which is done through the use of Civil 3d designs and Google Earth. Then the symbology for the procedure is created in Civil 3d, with the other instrumental approach charts and the official normative in mind. Finally, ArcGIS is used to make the contour lines, to import the Civil 3d drawing and to add any necessary element that remains. The following pages of the chart are written in Microsoft Word.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que me han ayudado o apoyado de una manera u otra durante este período universitario y durante la realización de este Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, D. Israel Quintanilla García, por hacerme coger interés durante sus clases de 3º por el mundo de la navegación por satélite. Sin él no hubiera escogido este tema para el trabajo, y me ayudó durante mi período de dudas sobre el cambio de tema del proyecto, además de sentar las bases sobre qué debía explicar en la parte teórica del proyecto. Agradezco también a mi cotutor, D. Pedro Yuste Pérez, por sus clases de 4º y los proyectos que mandaba, que tanto me han servido para aprender sobre el franqueamiento de obstáculos de este proyecto, y por guiarme durante el desarrollo del proyecto. Gracias por guiarme en las múltiples tutorías que hemos tenido cuando no tenía claro cómo funcionaba una parte del diseño de procedimientos o me había equivocado en una de las fases.

Agradezco también a Dña. Áurea Cecilia Gallego Salguero que me ayudase a ponerme al día con ArcGIS, aun cuando no era mi tutora para el proyecto.

Agradezco también a la Universitat Politècnica de València y a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño por haberme proporcionado tantos conocimientos durante estos 4 años de Grado en Ingeniería Aeroespacial, que tanto me ha hecho aprender.

Le agradezco también efusivamente a mi familia. A mis padres, por su gran educación, por haberme forjado como persona y por haberme dado tanto. A mi hermano, por estar siempre ahí para ayudarme a pensar en otras cosas cuando estoy estresado. Y al resto de mi familia, por todo su aprecio y confianza.

Agradezco también a mis amigos de clase, por aceptarme y ayudarme cuando lo he necesitado. En especial quiero agradecerles a Arnau y a Carles por haber estado conmigo de forma tan leal estos últimos años. Me ha encantado hacer todos esos proyectos con vosotros, y me ha hecho muy feliz vuestra compañía durante estos años.

Por último, me gustaría agradecer a mis amigos de Elche, por todos los momentos que hemos pasado. En especial quiero agradecer a Sergio y a Adrián Lillo, por conectarse conmigo todas esas noches y alegrarme los días. Mantener ese contacto con vosotros me ha ayudado mucho a mantenerme alegre y con energías, y ojalá sigamos conectándonos mucho más. También agradecer a Juan, que aunque no nos hemos visto mucho estos últimos 2 años por culpa de los estudios y la situación sanitaria, ha sido siempre un gran amigo, en el futuro quedaremos mucho más a menudo.

Índice

Resumen	II
Abstract	III
Agradecimientos	IV
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
Glosario	XIII
I. MEMORIA	1
1. Introducción	2
1.1. Contexto histórico.....	2
1.2. Sistema precedente: el ILS.....	3
1.3. El sistema GBAS	3
1.4. Construcción de una carta aeronáutica.....	4
1.5. Aeropuerto de Alicante/Elche.....	6
1.6. Objetivos, motivación y descripción.....	7
Parte 1. GBAS	10
2. Sistemas GNSS	10
2.1. Estructura.....	10
2.2. Funcionamiento.....	10
2.3. GPS.....	12
2.4. GLONASS.....	12
2.5. BeiDou.....	13
2.3. Galileo.....	13
2.7. Sistemas Regionales.....	14
2.7.1. IRNSS.....	14
2.7.2. QZSS.....	14
3. Sistemas de aumentación	15
3.1. Fundamentos matemáticos de DGNSS.....	15

3.2. Sistema de aumentación basado en la aeronave (ABAS).....	17
3.3. Sistema de aumentación basado en satélites (SBAS).....	17
3.4. Sistema de aumentación basado en tierra (GBAS).....	18
3.4.1. Subsistemas del GBAS.....	19
3.4.1.1. Subsistema satélite.....	19
3.4.1.2. Subsistema aeronave.....	19
3.4.1.3. Subsistema terrestre.....	20
3.4.2. Señal del GBAS.....	23
3.4.3. Beneficios del GBAS.....	23
3.4.4. Niveles de protección y alerta.....	24
4. Validación PBN	25
4.1. Concepto PBN.....	25
4.2. Validación de sistemas PBN.....	26
4.2.1. Primera fase: Evaluación GNSS a largo plazo.....	26
4.2.2. Segunda fase: Campaña sobre el terreno.....	27
4.2.3. Tercera fase: Ensayo de vuelo.....	27
5. Implementación de una estación terrestre GBAS	28
5.1. Requisitos normativos para la implantación del GBAS.....	28
5.2. Instalación de antena GNSS.....	29
5.3. Instalación de antena VDB.....	31
5.4. Instalación de la unidad de procesamiento.....	31
5.5. Ejemplos de implantación	32
5.5.1. Aeropuerto de Málaga.....	32
5.5.2. Aeropuerto Internacional de Bremen.....	33
Parte 2. Carta aeronáutica	34
6. Conceptos relevantes	34
6.1. Aproximación.....	34
6.2. Margen de franqueamiento de obstáculos.....	34

6.3. Puntos de referencia o waypoints.....	35
6.4. Circuito de espera.....	36
6.5. DME y VOR.....	37
6.6. Zonas prohibidas, restringidas o peligrosas	36
7. Inicio del proyecto	38
7.1. Información disponible.....	38
7.2. Programas utilizados.....	38
7.3. Creación de los waypoints.....	39
8. Franqueamiento de obstáculos	42
8.1. Franqueamiento de obstáculos de la espera.....	42
8.1.1. Construcción de la plantilla.....	45
8.1.2. Construcción del área básica y el área tope.....	46
8.1.3. Inserción en Google Earth.....	50
8.2. Franqueamiento de obstáculos en la aproximación visual.....	52
8.2.1. Dibujo en Civil 3d.....	53
8.2.2. Inserción de los obstáculos y el dibujo en Google Earth.....	55
8.3. OCA/H de aproximación.....	60
8.3.1. Dibujo de la plantilla en Civil 3d e inserción en Google Earth.....	62
8.3.2. Perforación de los obstáculos en Excel.....	62
8.4. Aproximación inicial.....	65
8.5. Aproximación intermedia.....	67
8.6. Protección de viraje.....	69
8.7. Resultados del franqueamiento de obstáculos de la aproximación.....	70
8.8. Superficies VSS.....	72
9. Dibujo de la carta en Civil 3d	74
9.1. Elementos restantes	74
9.2. Simbología.....	74
9.3. Dibujo en Civil 3d.....	74

10. Diseño de la carta en ArcGIS	79
10.1. Modelos del terreno.....	79
10.2. Funcionamiento de ArcMap.....	79
10.3. Importar el dibujo de Civil 3d.....	82
10.4. Diseño en ArcMap.....	82
10.5. Modo Layout.....	84
10.5.1 Perfil de la aproximación.....	85
10.5.1 Resto de elementos y páginas 2 y 3.....	86
11. Resultado final	87
12. Conclusiones y valoración	91
II. PLIEGO DE CONDICIONES	94
13. Pliego de condiciones	95
13.1. Objeto.....	95
13.2. Condiciones de ejecución.....	95
13.2.1. Supervisión.....	95
13.2.2. Supervisión.....	95
13.3. Conocimientos del ingeniro.....	95
13.3.1. Software.....	95
13.3.2. Hardware.....	96
13.3.3. Material adicional.....	96
III. PRESUPUESTO	97
14. Presupuesto	98
14.1. Coste del material.....	98
14.2. Costes de oficina.....	98
14.3. Costes de personal.....	99
14.4. Presupuesto total.....	99
Referencias bibliográficas	100

Índice de figuras

1. Plano de aeródromo OACI. Aeropuerto de Alicante/Elche.....	7
2. Arquitectura de un SBAS.....	18
3. Arquitectura del GBAS.....	19
4. Subsistema aeronave del GBAS.....	20
5. Antena RRA GBAS del Aeropuerto de Melbourne.....	21
6. Caseta de unidad central del subsistema terrestre.....	22
7. Antena VDB GBAS. Aeropuerto de Málaga.....	23
8. LPL y LAL.....	24
9. VPL y VAL.....	24
10. Volúmenes LOCA.....	30
11. Distribución de los elementos de la instalación GBAS en el Aeropuerto de Málaga.....	32
12. Distribución de los elementos de la instalación GBAS en el Aeropuerto Internacional de Bremen.....	33
13. Fases de la aproximación.....	34
14. Margen de franqueamiento de obstáculos.....	35
15. Sectores de entrada a la espera.....	36
16. MOC del circuito de espera.....	37
17. Waypoints del IAC ILS Z LEAL.....	39
18. Circuito de espera en la carta.....	42
19. Plantilla de la espera.....	46
20. Área básica.....	48
21. Área tope.....	49
22. Visualización del área en Google Earth.....	50
23. Comprobaciones de altitud.....	51
24. Punto más alto del área central.....	51
25. No en circuito.....	53
26. Diferentes etapas del dibujo del área en circuito.....	55

27. Obstáculos y área I.....	57
28. Obstáculos y área II.....	59
29. OAS (a) y ejemplo OAS (b)	62
30. Área primaria de la aproximación inicial.....	66
31. Áreas primaria y secundaria de la aproximación inicial.....	67
32. Punto de aproximación final definido por el punto de referencia de descenso.....	68
33. Áreas primaria y secundaria de la aproximación intermedia.....	69
34. Protección de viraje.....	70
35. Obstáculos relevantes en la aproximación.....	71
36. VSS.....	72
37. Waypoints y tramos.....	75
38. Sombreados. Casos a y b.....	77
39. Simbología dibujada en Civil 3d.....	78
40. Merge.....	80
41. Clip.....	80
42. Feature to Polygon.....	81
43. Select Layer by Attribute.....	81
44. Query Builder.....	82
45. Diseño de la carta en ArcMap.....	84
46. a) Perfil ILS Z LEAL b) Perfil GBAS Z LEMG c) Perfil diseñado.....	85

Índice de tablas

1. Estructura del mensaje digital VDB transmitido por el GBAS.....	23
2. Especificaciones exigidas para sistemas de ayuda a la navegación según el tipo de operación.....	26
3. Criterios de emplazamiento para los elementos terrestres del GBAS.....	29
4. Coordenadas de los waypoints.....	41
5. Factores de conversión.....	43
6. Velocidades para la construcción del área de espera.....	44
7. Cálculos asociados con la construcción de la plantilla de la espera.....	45
8. Distancias desde el VOR.....	47
9. Datos para la construcción del área de tolerancia del IAF.....	47
10. Margen mínimo de franqueamiento de obstáculos en el área tope.....	49
11. Resultados de los cálculos según la categoría.....	53
12. Datos de los umbrales.....	53
13. Ejemplo de obtención de latitud y longitud decimal.....	55
14. Obstáculo más alto para cada categoría I.....	57
15. MOC y OCA/H para aproximación visual.....	58
16. OCA visual I.....	58
17. Obstáculo más alto para cada categoría II.....	59
18. OCA visual II.....	60
19. Datos para obtener las OAS.....	61
20. Constantes de las OAS.....	61
21. OCA/H.....	64
22. Semianchura del área en metros.....	65
23. Resultados de las operaciones para la protección de viraje.....	70
24. Franqueamiento de obstáculos en aproximaciones inicial e intermedia.....	71
25. Obstáculos que penetran las VSS.....	73
26. Coste de material.....	97

27. Costes de oficina.....98

28. Costes de personal.....98

29. Coste total del proyecto.....98

Glosario

- ABAS. Aircraft Based Augmentation System
- APV. Approach Procedure With Vertical Guidance
- BeiDou. BeiDou Navigation Satellite System
- CDMA. Code Division Multiple Access
- CNIG. Centro Nacional de Información Geográfica
- DGNSS. Differential Global Navigation Satellite System
- DGPS. Differential Global Positioning System
- DME. Distance Measuring Equipment
- EGNOS. European Geostationary Navigation Overlay Service
- ESSP. European Satellite Services Provider
- ETRS89. European Terrestrial Reference System 1989
- FAA. Federal Aviation Administration
- FAP. Final Approach Point
- FAS. Final Approach Segment
- FDE. Fail Detection and Exclusion
- FDMA. Frequency Division Multiple Access
- FPAP. Flight Path Alignment Point
- GARP. GBAS Azimuth Reference Point
- GBAS. Ground Based Augmentation System
- GDOP. Geometric Dilution Of Precision
- GLONASS. Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
- GNSS. Global Navigation Satellite System
- GPS. Global Positioning System
- HAL (Horizontal Alert Limit)
- HAS. High Accuracy Service
- IAF. Initial Approach Fix
- ICN. Institut Cartogràfic Valencià
- IF. Intermediate Fix
- ILS. Instrument Landing System
- IRNSS. Indian Regional Navigation Satellite System
- KLM. Koloniale Luchtverkeer Maatschappij
- LAL. Lateral Alert Limit
- LEAL. Código OACI del Aeropuerto Alicante/Elche
- LOCA. Local Object Consideration Area
- LPL. Lateral Protection Level
- MAPt. Missed Approach Point
- MMR. Multi-Mode Receiver
- MOC. Minimum Obstacle Clearance
- MSA. Minimum Sector Altitude

- NAVAID. Navigational Aid
- NSE. Navigation System Error
- OACI. Organización de Aviación Civil Internacional
- OAS. Obstacle Assessment Surfaces
- OCA. Obstacle Clearance Altitude
- OCH. Obstacle Clearance Height
- ONU. Organización de Naciones Unidas
- OS. Open Service
- PBN. Performance Based Navigation
- PL. Protection Level
- PPS. Precision Positioning Service
- PRC. Pseudo-Range Corrections
- PRS. Public Regulated Service
- QZSS. Quasi-Zenith Satellite System
- RAE. Real Academia Española
- RAIM. Receiver Autonomous Integrity Monitoring
- RIMS. Ranging and Integrity Monitoring Stations
- RNAV. Area Navigation
- RNP. Required Navigation Performance
- RRA. Reference Receiver Antenna
- RRC. Range Rate Corrections
- RWY. Runway
- SAR. Search And Rescue
- SARPs. Standard and Recommended Practices
- SBAS. Satellite Based Augmentation System
- SCF. Satellite Control Facility
- SIS. Signal In Space
- SoL. Safety of Life
- SPS. Standard Positioning System
- TAS. True Air Speed
- TT&C. Telemetry, Tracking and Command
- UPV. Universitat Politècnica de València
- VAL. Vertical Alert Limit
- VDB. VHF ground-air Data Broadcast
- VHF. Very High Frequency
- VOR. VHF Omnidirectional Range
- VPL. Vertical Protection Level
- VSS. Visual Segment Surface
- WGS84. World Geodetic System 1984

I MEMORIA

1. Introducción

1.1. Contexto histórico

La constante carrera tecnológica que supusieron las dos guerras mundiales y la Guerra Fría después hizo avanzar al mundo científico a una velocidad nunca vista anteriormente. Si bien la invención del avión precede a la Primera Guerra Mundial, fue durante esta cuando las capacidades bélicas de este comenzaron a comenzar a vislumbrarse, y con ellas el interés de las grandes potencias en perfeccionar su tecnología. El avión despertó mucho escepticismo en un principio, pero los resultados que generaba y el importantísimo papel propagandístico de los ases aéreos fueron cambiando la mentalidad de los gobiernos y popularizando la tecnología. Los números muestran este desarrollo a la perfección: en el caso de Reino Unido, tenía al principio de la guerra en su arsenal 110 aeronaves; al final de esta contaba con “290.000 militares y 22.000 aeronaves en el ama aérea” [1]. En 1919 se funda en los Países Bajos la primera gran compañía aérea, KLM, que sigue operando actualmente.

Durante la Segunda Guerra Mundial la producción de aviones experimenta un drástico crecimiento y la tecnología de la aviación se desarrolla a una velocidad extraordinaria, desarrollando entre otras cosas el primer avión de reacción de utilización práctica. En 1944 se crea la OACI en la conferencia de Aviación Civil Internacional celebrada en Chicago. Esta organización es una agencia de la ONU que se encarga de estudiar los problemas de la aviación internacional y promover el uso de una normativa común en sus miembros.

En este contexto de avances tecnológicos y desarrollo de la aviación comienza la Guerra Fría, en el marco de las tensiones provocadas en Europa por las zonas de influencia soviéticas creadas por el deseo de Stalin de crear una barrera a lo largo de la frontera soviética de países con gobiernos afines por el temor a una invasión capitalista. Esto acabaría creando lo que se conoce como el Telón de Acero. Esto, junto con otros eventos como la invasión china de Manchuria, la victoria comunista en la respectiva guerra civil, la Guerra civil griega y la guerra en Corea aumentaron la tensión entre las grandes potencias. Es esta tensión la que causa la gran carrera tecnológica de la Guerra Fría entre Estados Unidos y la Unión Soviética, y que como tantas otras potenciaría sobremanera los descubrimientos tecnológicos de su era. En este contexto, en 1964, 7 años después de que la Unión Soviética lanzase el primer satélite artificial de la historia, el Sputnik 1, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos diseña el primer sistema de posicionamiento global por satélite, antecesor del posterior GPS, que supondría un avance extraordinario en la navegación. En principio el sistema era de uso exclusivamente militar, hasta que, en 1991, con la situación global mucho menos tensa ante el desplome del bloque soviético, el gobierno estadounidense ofreciera el GPS a la navegación civil internacional si ningún coste, aunque con la señal degradada. Esta degradación selectiva fue eliminada en el año 2000.

Desde entonces, otros países han ido desarrollando sistemas de navegación global o GNSS, como el GLONASS de la Federación Rusa. Sistemas en desarrollo son el BeiDou de la República Popular de China, el IRNSS de la India o el Galileo, que es el desarrollado por la Agencia Espacial Europea.

Para cumplir con los requerimientos de seguridad que deben tener los equipos de navegación aérea se han ido desarrollando sistemas de aumentación de las señales GNSS. Uno de ellos, en el que se centra este proyecto, es el GBAS.

1.2. Sistema precedente: el ILS

El sistema de aterrizaje instrumental o ILS es el sistema que la OACI estableció como normalizado en todo el mundo para procedimientos de aproximación y aterrizaje. Basado en el concepto del haz de Lorentz patentado en 1932, ha sido utilizado por los aeropuertos de todo el mundo para proporcionar el guiado necesario en los procedimientos de llegada.

El ILS está formado por una serie de antenas localizadoras situadas a unos 1000 pies o unos 300 m del final de la pista. El ILS proporciona dos servicios, que son:

- Guiado vertical, a través de una senda de planeo garantizada por una radiobaliza.
- Guiado horizontal, mediante un localizador que permite conocer la posición horizontal respecto al eje de la pista.

Las señales de guiados vertical y horizontal son percibidas por el receptor VHF instalado en las aeronaves, lo que permite al piloto guiar estas con gran precisión durante la fase de aproximación.

El ILS ha demostrado tener una gran fiabilidad desde que se popularizara en la década de los 60. Sin embargo, la gran expansión que la tecnología de posicionamiento ha experimentado en los tiempos recientes permiten comenzar la progresiva implementación de sistemas de aproximación por satélite que sustituyan al ILS, que es donde entra el GBAS.

1.3. El sistema GBAS

El GBAS es uno de los sistemas de aumentación que permiten a los sistemas GNSS proporcionar la información que necesitan las aeronaves dentro de los límites establecidos por la OACI. Muy pocos aeropuertos en el mundo tienen GBAS instalados, siendo el de Málaga el único en el caso de España, lo cual demuestra que la tecnología por una parte que es una tecnología aun naciente, pero que ya está siendo implementada y funcionando con éxito.

Proporciona aumentación a las constelaciones de satélites principales para garantizar las aproximaciones de precisión hasta la Categoría III mediante el uso de correcciones diferenciales que permitan satisfacer los requisitos de estas aproximaciones de precisión. Es uno de los sistemas de aumentación que permiten a los sistemas GNSS proporcionar la información que necesitan las aeronaves dentro de los límites establecidos por la OACI

La operación del GBAS se basa en tres segmentos: la constelación de satélites, la estación terrestre y el receptor de la aeronave. Una breve explicación del

La estación terrestre del GBAS se compone de receptores de referencia con antenas instaladas en zonas con un levantamiento topográfico preciso. La información generada se envía a un procesador que calcula y transmite las correcciones diferenciales, los parámetros de integridad y los datos sobre los puntos de la trayectoria a través de una Transmisión de Datos de Muy Alta Frecuencia (VDB).

La información la reciben las aeronaves bajo VHF junto con información de los satélites de navegación, luego con las correcciones diferenciales se calcula la posición precisa.

1.4. Construcción de una carta aeronáutica

Para poder completar con seguridad las diferentes operaciones aéreas es necesario contar en todo momento con una fuente completa oficial de datos de navegación. Las cartas aeronáuticas suplen esta función de manera sencilla, condensada y coordinada. Las cartas son muy utilizadas en los diferentes campos de la aviación, con fines de control de tránsito aéreo, de planificación y de navegación. Extensa información sobre cartas aeronáuticas se puede obtener en [3].

Las cartas aeronáuticas se pueden dividir en 3 grupos según su obligatoriedad:

- Cartas obligatorias. Son 6: el Plano de obstáculos de aeródromo Tipo A, la Carta topográfica para aproximaciones de precisión, la Carta de navegación en ruta, la Carta de aproximación por instrumentos, el Plano de aeródromo/heliporto y la Carta aeronáutica mundial.
- Cartas opcionales. Deben producirse si tenerlas contribuye a la seguridad, regularidad y eficiencia de las operaciones de las aeronaves. Son 6: el Plano de obstáculos de aeródromo Tipo B, el Plano de aeródromo para movimientos en tierra, el Plano de estacionamiento y atraque de aeronaves, las Cartas aeronáuticas 1:500 000, la Carta de navegación aeronáutica y la Carta de posición
- Cartas condicionalmente necesarias. Solamente serían necesarias bajo condiciones o circunstancias determinadas. Son: el Plano de obstáculos de aeródromo Tipo C, la Carta de área, la Carta de salida normalizada - vuelo

por instrumentos, la Carta de Llegada normalizada - vuelo por instrumentos y la Carta de aproximación visual.

Estas cartas están clasificadas en 4 grupos, según se puede observar en este extracto de [3]:

a) Grupo 1: Cartas destinadas exclusivamente a La planificación

- 1) Plano de obstáculos de aeródromo - OACI, Tipo A*
- 2) Plano de obstáculos de aeródromo - OACI, Tipo B*
- 3) Plano de obstáculos de aeródromo - OACI, Tipo C*
- 4) Carta topográfica para aproximaciones de precisión - OACI*

b) Grupo 2: Cartas destinadas a las fases del vuelo comprendidas entre el despegue y el aterrizaje

- 5) Carta de navegación en ruta - OACI*
- 6) Carta de área - OACI*
- 7) Carta de salida normalizada - vuelo por instrumentos (SID) -OACI*
- 8) Carta de Llegada normalizada - vuelo por instrumentos (STAR) -OACI*
- 9) Carta de aproximación por instrumentos - OACI*
- 10) Carta de aproximación visual – OACI*

c) Grupo 3: Cartas destinadas a los, movimientos de Las aeronaves en La superficie del aeródromo

- 11) Plano de aeródromo/helipuerto - OACI*
- 12) Plano de aeródromo para movimientos en tierra - OACI*
- 13) Plano de estacionamiento y atraque de aeronaves - OACI*

d) Grupo 4: Cartas destinadas a la navegación aérea visual planificación y determinación de la posición

- 14) Carta aeronáutica mundial - OACI 1:1 000 000*
- 15) Carta aeronáutica - OACI 1:500 000*
- 16) Carta de navegación aeronáutica - OACI, escala pequeña*
- 17) Carta de posición – OACI*

Este proyecto se centrará en la elaboración de una Carta de aproximación por instrumentos para GBAS, específicamente la equivalente a la ILS Z del Aeropuerto de Alicante/Elche. Esta carta según las clasificaciones vistas antes es una carta obligatoria de Grupo 2.

1.5. Aeropuerto de Alicante/Elche

El Aeropuerto Internacional de Alicante-Elche Miguel Hernández, cuyo nombre fue adaptado para incluir a Elche y no solo a Alicante con la Orden FOM/1316/2013 [4], es el 5º aeropuerto más transitado de España y está dentro de los 50 de mayor tránsito en Europa, funcionando como puerta de entrada a la Costa Blanca, la Comunidad Valenciana y la Región de Murcia. Su código OACI es LEAL.

Está situado entre Torrellano y El Altet, dentro del municipio de Elche, 8 km al suroeste de Alicante y 10 km al este de Elche ciudad. Es una zona densamente poblada.

El aeropuerto se encuentra a 43 metros sobre el nivel del mar, con varios grupos montañosos al oeste, aunque la zona inmediatamente cercana no tiene importantes montañas. Los vientos no suelen ser de gran intensidad. Tiene una sola pista, de inclinación magnética de 100° (100.04 geográfica) [5].

El aeropuerto es de categoría 4E, según se puede comprobar en la Orden FOM/1316/2013 [4]:

“El Aeropuerto de Alicante, de interés general del Estado según el artículo 149.1.20.ª de la Constitución Española y el Real Decreto 2858/1981, de 27 de noviembre, sobre calificación de aeropuertos civiles, modificado por el Real Decreto 1150/2011, de 29 de julio, es un aeropuerto civil internacional con categoría OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) «4-E»”

En la Figura 1 se puede observar el Plano del aeródromo:

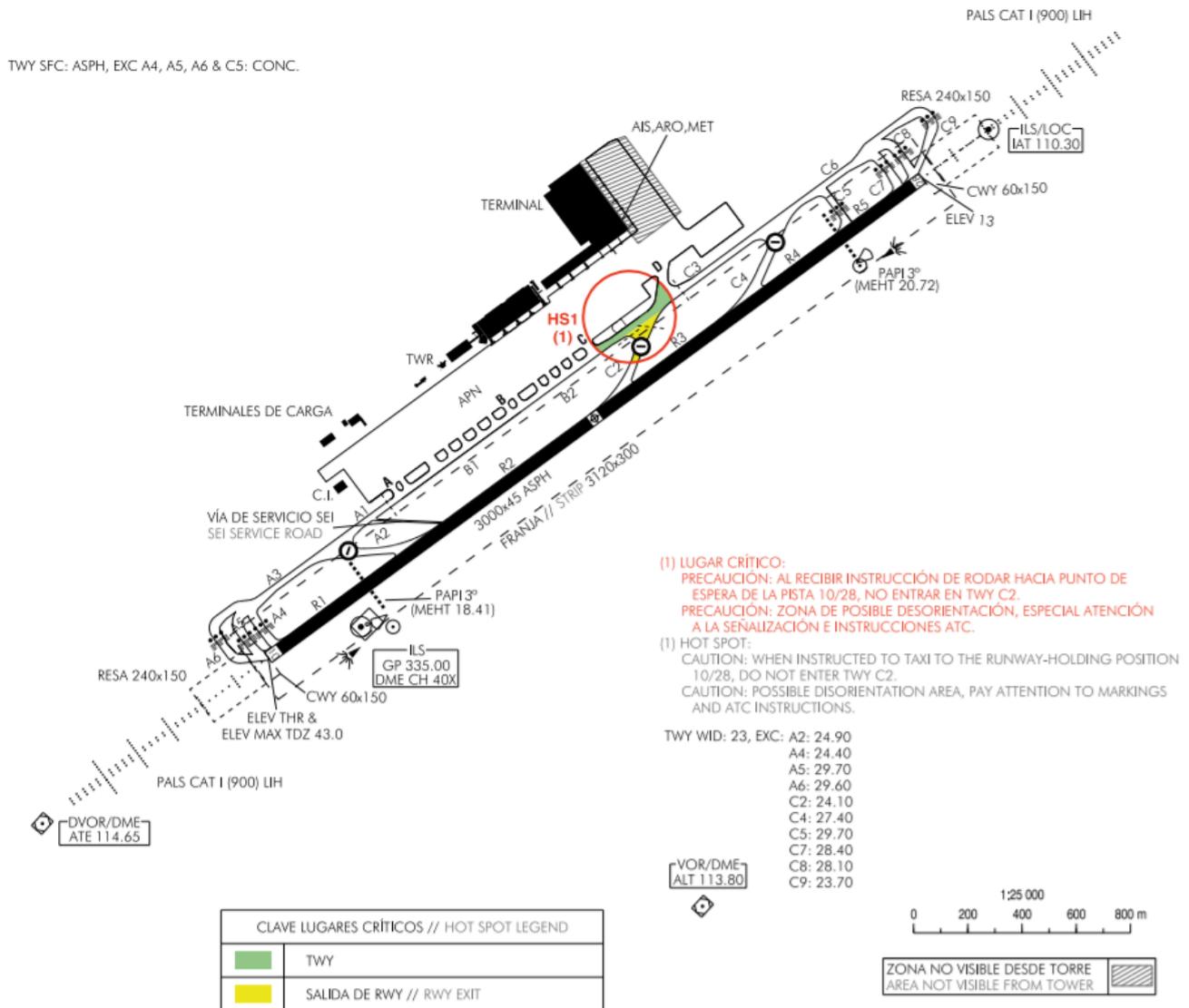


Figura 1: Plano de aeródromo OACI. Aeropuerto de Alicante/Elche (Obtenido del AIP España)

1.6. Objetivos, motivación y descripción

Una vez introducido el GBAS, las cartas aeronáuticas y el Aeropuerto de Alicante/Elche, es necesario introducir los objetivos de este proyecto, que están comprendidos dentro de los conceptos que han sido introducidos en las secciones anteriores.

Este proyecto está dedicado a estudiar el caso de una supuesta instalación de una estación GBAS en el Aeropuerto de Alicante/Elche. Un trabajo de este estilo se puede enfocar de diferentes maneras, como podrían ser la validación de la tecnología o la instalación de la estación física del GBAS en el aeropuerto. Sin embargo, estos temas ya han sido tratados en diversos trabajos, sea específicamente el caso del GBAS o sobre todo con el SBAS.

En especial hay que destacar el Trabajo Fin de Máster *Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria* de Álvaro Jiménez González, que trata de manera extensa la posible instalación de una estación terrestre GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria. Sobre la tecnología SBAS, se pueden encontrar trabajos sobre validación como el Trabajo Fin de Grado de José Rizo Cerdán: *Diseño y validación de procedimientos SBAS en el Aeropuerto de Alicante según requerimientos ESSP año 2020*.

Entre las ideas iniciales para la elaboración de este proyecto estaban la validación y la implementación del GBAS en el aeropuerto junto con el comienzo del diseño de procedimientos sin llegar a generar la carta aeronáutica. Sin embargo, dado que estos temas han sido cubiertos, junto a un repentino interés por mi parte en completar la carta de navegación, el enfoque pasó a estar fuertemente centrado en este último paso, pero ampliado, la elaboración de una carta aeronáutica completa, junto con una explicación teórica contextualizada y resumida del GBAS y su implementación, con información extraída de documentos oficiales y trabajos académicos como el mencionado anteriormente.

Se puede entonces normal de forma clara el objetivo de este proyecto: El resumen teórico de una supuesta implementación de la tecnología GBAS en el Aeropuerto de Alicante/Elche, junto con la creación de una carta de aproximación por instrumentos completa, que sea igual que una que se pueda encontrar en el AIP España, más específicamente, la única con GBAS, es decir, la de Málaga. El procedimiento que se adaptará a la tecnología GBAS es el ILS Z, por lo que la carta sería GBAS Z.

Para lograr el objetivo que se ha propuesto dividir el trabajo en dos partes.

La primera es una parte teórica descriptiva sobre la tecnología GBAS, en la que se describirá de manera resumida, explicando todos los conceptos previos que se consideran pertinentes, junto con la posterior explicación resumida de validación de procedimientos PBN y de implementación de una instalación física GBAS en un aeropuerto, basada en la extensa explicación que hace Álvaro Jiménez González en su proyecto. Esta parte hace referencia a la primera mitad del título: *Análisis teórico de la GBAS*. La palabra análisis puede parecer mal escogida para describir el procedimiento que se ha descrito, por lo que puede resultar interesante explicar la elección del título. La segunda acepción de la palabra análisis en la rae dice lo siguiente:

Estudio detallado de algo, especialmente de una obra o de un escrito

En este caso el estudio es sobre el GBAS y su implementación, y como dice el título es detallado, siendo el verbo detallar según la RAE:

Tratar o referir algo por partes, minuciosa y circunstanciadamente

Es decir, que el estudio se realiza por partes, con la explicación estando expresada en sus circunstancias.

Con esto tenemos que la primera parte se dedicará a estudiar por partes en su contexto la tecnología GBAS. Este estudio será breve, ya que el enfoque del proyecto es la generación de una carta aeronáutica, como se ha establecido, tal como está descrito en este fragmento del resumen oficial del proyecto:

Se definirán los aspectos teóricos de la tecnología GBAS y se analizará brevemente su implementación de manera teórica.

La segunda parte del proyecto es sencilla de explicar: consiste en realizar todos los pasos necesarios para generar la carta aeronáutica. El primer paso es establecer los waypoints del trayecto. Lo siguiente es establecer el franqueamiento de obstáculos de cada tramo para poder definir la altura en cada punto. Sigue el diseño gráfico de la ruta. Después se debe conseguir un modelo del relieve y la costa para utilizar de fondo en la capa, modificándolo de forma que resulte estético y parecido a los publicados en el AIP. Por último, se junta todo y se añaden los elementos que falten con respecto a las cartas publicadas en el AIP. Este resumen es bastante simplista, pero resulta lo suficientemente comprensible como para introducir el proceso, que es la intención de esta sección.

Una decisión de diseño del proyecto que cabe resaltar es la ausencia de anexos. El razonamiento que explica esta decisión es que los cálculos presentes en el proyecto están siempre realizados en Excel o en MatLAB, y son siempre cálculos relativamente sencillos: resoluciones de ecuaciones simples y conjuntos de operaciones básicas. Además, estos cálculos forman parte del proceso mismo que se estará explicando en la parte correspondiente del proyecto, por lo que explicarlo todo junto hace la lectura más comprensible.

Tampoco se incorpora una sección de Planos, ya que las cartas aeronáuticas referenciadas se utilizan como fuentes de información de la misma manera que el resto de documentos del AIP y no aporta a la memoria incluirlas físicamente por el espacio que se ocuparía y la poca función que serviría, dado que ver las cartas en la AIP es un proceso rápido que el lector puede realizar fácilmente. La carta aeronáutica producida en el proyecto se expone en la sección Resultado final en lugar de una sección de Planos debido a que así se remarca más su carácter de objetivo a conseguir en el proyecto.

Parte I. GBAS

2. Sistemas GNSS

El gran aumento que experimentó el tráfico aéreo propició que las NAVAID convencionales no fueran capaces de ofrecer la flexibilidad necesaria en el espacio aéreo para absorber el crecimiento y a la vez satisfacer los requisitos de seguridad.

La alternativa a las NAVAID surge con el desarrollo de un sistema mundial de determinación de la posición y la hora por parte de Estados Unidos y otros países más adelante. Esta permite la aplicación de la tecnología satelital para aplicar nuevos conceptos en la navegación aérea que satisficieran las necesidades que el mundo aeronáutico exigía.

La OACI introdujo el GNSS a partir de los avances tecnológicos conseguidos hasta entonces, que permite la navegación en todas las fases del vuelo, junto con las aproximaciones de precisión. Según el Volumen I del Anexo 10 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, el GNSS se compone de [2]:

- El Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS), que ofrece el Sistema de Determinación de la Posición Normalizado (Standard Positioning System - SPS).
- El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS), que ofrece la señal de navegación.
- del Canal de Exactitud Normal (Channel of Standard Accuracy - CSA).
- El sistema de navegación basado en la aeronave (ABAS).
- El sistema de navegación basado en tierra (GBAS).
- El sistema regional de aumentación basado en tierra (GRAS).
- Los receptores GNSS de a bordo.

Esta lista incluye las constelaciones principales de generación de posición, los receptores y los sistemas de aumentación, que permiten a las constelaciones cumplir los requisitos de las fases de vuelo. La OACI ha desarrollado una serie de documentos, los SARPs, que estandarizan la normativa y el procedimiento para implementar los sistemas GNSS.

2.1. Estructura

Las constelaciones GNSS siguen la siguiente estructura [6]:

- Segmento espacial. Está formado por los satélites que forman la constelación y que están distribuidos en diferentes planos para conseguir una cobertura global. Es necesario que haya satélites visibles que permitan obtener las 4 incógnitas: posición X, Y, Z y tiempo. El segmento de control recibe la señal para proporcionar permanentemente información de posición a cualquier usuario.
- Segmento terrestre o de control. Aplica las correcciones que sean necesarias a las órbitas, relojes y osciladores de los satélites de la constelación. Estas correcciones son las efemérides, que tienen una precisión que permite el cálculo preciso característico de las constelaciones GNSS. Consta de varias estaciones:
 - Instalaciones de control de satélites (SFC). Comprueban que los satélites funcionan correctamente y envían correcciones.
 - Estaciones de Monitoreo de Distancia e Integridad (RIMS). En ellas se procesa la información que envía los satélites y se generan correcciones.
 - Centro de Telemetría, Seguimiento y Control (TT&C). Garantiza que las transmisiones se realizan correctamente.
- Segmento usuario. Receptores de la señal GNSS. Reciben la señal de las antenas GNSS y resuelven las ecuaciones recibidas para calcular la posición.

2.2. Funcionamiento

Los sistemas GNSS emplean modelos matemáticos estandarizados que representan el geode terrestre para el cálculo de posicionamiento, siendo el WGS84 (World Geodetic System 1984) el más utilizado, permitiendo georreferenciar la Tierra en coordenadas cartesianas y en forma de elipsoide. En Europa se utiliza en su lugar el ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989)

Las constelaciones como GPS proporcionan información de posicionamiento en tiempo real mediante trilateración esférica. Este método se basa en lo siguiente, según lo descrito en [7]:

- Se utilizan 3 satélites para proporcionar la información, trazando esferas con centro en el satélite y radio igual a su distancia al receptor ρ . La intersección de las 3 esferas crea un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas que proporcionan la posición en coordenadas cartesianas.
- Este cálculo se ve afectado por posibles errores, dado que el reloj del receptor de la Tierra suele tener menor precisión a los de los satélites, lo que hace que la distancia ρ no sea la verdadera. Entonces se emplea un cuarto satélite para representar esta desviación, y es por esto que se habla de pseudodistancias.

- Reducir o eliminar los errores solo es posible con una geometría satelital favorable, de forma que demasiada cercanía entre los satélites causa una mayor incertidumbre. Se mide con la GDOP (Geometric Dilution Of Precision).

Una vez explicado el funcionamiento general de la tecnología GNSS, se pasará a describir brevemente a las diferentes constelaciones.

2.3. GPS

Como se ha visto en el apartado de contexto histórico, el GPS fue desarrollado a partir del sistema TRANSIT en el contexto de la Guerra Fría, siendo puesta a disposición de los demás países para uso civil en el año 1991 y retirando la Disponibilidad Selectiva en el año 2000. En la actualidad cuenta con 24 satélites distribuidos en 6 planos orbitales inclinados 55° con respecto al plano ecuatorial, lo que permite cumplir con el GDOP., haciendo que todos los puntos del planeta estén cubiertos en todo momento por al menos 4 satélites [8]. Tiene los siguientes servicios:

- Servicio de Posicionamiento estándar (SPS). Servicio de uso civil que proporciona posicionamiento en tiempo real. Utiliza la frecuencia L1 (1575.42 MHz).
- Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS). Servicio de uso militar que además de posicionamiento a tiempo real ofrece información de velocidad. Utiliza las frecuencias L1 y L2 (1227.60 MHz).

El GPS utiliza el sistema CDMA (división de código en 2 frecuencias) para transmitir la señal. De las 2 frecuencias utilizadas por GPS, L1 es la portadora principal, y está modulada por dos códigos: el *code/acquisition* civil y el *pressure/secure* militar. La frecuencia L2 se utiliza para redundancia y solo cuenta con el código de precisión. En 2005 se añadieron las señales L2C y L5 para uso civil y M para uso militar (solucionar problemas de interferencias).

2.4. GLONASS

La Unión Soviética desarrolló GLONASS como contrapartida al GPS en 1983. Pruebas de alta altitud comenzaron en 1982 con el lanzamiento del Kosmos-1413, el Kosmos-1414 y el 1415. La Federación Rusa anunció que el proyecto se había completado en 1993 y llegó a tener 24 satélites operacionales en 1995. El colapso de la economía rusa hizo que el sistema cayera en mal estado, situación que se empezó a solucionar en el año 2000 con más fondos destinados al proyecto [9].

GLONASS tiene 24 satélites repartidos en 3 planos orbitales. 8 satélites están igualmente repartidos en cada plano con inclinación de 64.8°.

Los servicios que proporciona son los mismos que GPS.

Utiliza el sistema de acceso FDMA (división de frecuencia). Esto significa que la información se transporta en la propia portadora de señal. Las dos bandas principales son G1 (1.6 GHz) y G2 (1.25 GHz), siendo G3 una nueva banda en desarrollo.

2.5. BeiDou

BeiDou es el sistema GNSS desarrollado por la Republica Popular China, que lanzó su último satélite en junio de 2020, con lo que el proyecto completó su desarrollo.

Se diseñó primero como una constelación de carácter regional para dar cobertura limitada con 10 satélites (5 geoestacionarios), pero se amplió hasta el total de 35, que alcanzó el año pasado [10].

Los servicios que proporciona son [11]:

- Servicio abierto. Servicio de libre acceso que proporciona posición, velocidad y tiempo.
- Servicio Autorizado. Servicio para tareas específicas que requieran mejores prestaciones.
- Servicios Diferenciales de Área Extensa. Servicio regional abierto para la población china con error de precisión de 1 m.
- Servicios de mensajería corta. Servicio de mensajes que sirve para intercambiar información entre la estación y el usuario.

Utiliza las bandas E6, E5a, E5b y E1.

2.6. Galileo

Galileo es la iniciativa de la Unión Europea para construir una constelación GNSS de uso exclusivamente civil y que no esté ligada al sector militar como GLONASS o GPS. La constelación se encuentra en desarrollo, pero cuando se complete contará con 30 satélites repartidos en 3 planos orbitales con una inclinación de 56° respecto al plano ecuatorial. [12]

Los servicios que Galileo planea proporcionar son los siguientes [13]:

- Servicio Abierto (OS). Servicio al que pueda acceder cualquier usuario que proporciona información de posición y navegación para vehículos terrestres con un error de 1 m.

- Servicio Público Regulado (PRS). Servicio más restringido que proporciona más seguridad por la encriptación del mensaje.
- Servicio de Búsqueda y Rescate (SAR). Servicio que permite buscar a nivel global señales de baliza para tareas de rescate y que permite enviar mensajes.
- Servicio de Alta Precisión (HAS). Servicio complementario al OS que presenta una señal de navegación adicional en una banda de frecuencia diferente.
- Safety of Life (SoL). Servicio que extendería las prestaciones del OS para emplearse en la navegación aérea junto con EGNOS.

Utiliza las mismas bandas que BeiDou.

2.7. Sistemas Regionales

2.7.1. IRNSS

Constelación desarrollada en India para proporcionar cobertura regional que constará de 7 satélites. Transmitiría en las bandas L5 (1176.45 MHz) y S (2492.08 MHz) y proporcionaría un servicio de posicionamiento especial y otro restringido de mayor precisión. [14]

2.7.2. QZSS

Constelación desarrollada por Japón que proporcionará cobertura a Japón y aparte del Sudeste asiático y de Oceanía. Tendrá 7 satélites en órbitas de alta inclinación que daría preferencia a la zona de Japón.

3. Sistemas de aumentación

Las constelaciones GNSS permiten obtener la posición actual en cualquier lugar con un error razonable con receptores simples como un teléfono móvil. Sin embargo, las altas exigencias de la navegación aérea hacen necesario el uso los sistemas de aumentación, que permiten mejorar las prestaciones de las constelaciones GNSS para que lleguen a los estándares pedidos por OACI.

OACI define los requisitos de navegación basada en prestaciones (PBN) según los siguientes 4 conceptos, como se pueden ver en [6] y en [16]:

- **Precisión.** Grado de similitud entre el valor obtenido con respecto al real en un tiempo dado, sea el valor la velocidad, posición o tiempo. Se expresa con probabilidad al ser un parámetro estadístico, normalmente como un percentil. Un porcentaje de posiciones tendrá un nivel de incertidumbre.
- **Disponibilidad.** Expresa la probabilidad de que un usuario, en un lugar y un tiempo determinados, pueda utilizar el servicio de navegación, por lo que indica la habilidad del sistema para proveer servicios en una zona determinada. La disponibilidad de señal es el porcentaje que las señales de navegación transmitidas por fuentes externas están disponibles.
- **Continuidad.** Es la capacidad de un sistema de navegación de realizar sus funciones sin que haya interrupciones.
- **Integridad.** Se refiere a la probabilidad que tiene el sistema de que el servicio de navegación cumpla con la precisión especificada y que, en caso de no cumplirse, el usuario reciba avisos de que la información que recibe del sistema no es utilizable.

3.1. Fundamentos matemáticos del DGNSS

El posicionamiento diferencial con GNSS (DGNSS) con pseudodistancias de código es la técnica que utilizan sistemas como el GBAS y el SBAS, por lo que es importante hacerle una breve mención. La información de esta sección está obtenida de [17], que trata el DGPS, pero se puede extrapolar para el resto, ya que los principios son los mismos:

En el posicionamiento diferencial con GPS se utilizan dos o más receptores. Uno, que suele ser fijo, en el punto de referencia A de coordenadas conocidas y un receptor remoto móvil B. La estación base calcula las correcciones a las pseudodistancias (PRC) junto con las correcciones de la variación de la distancia (RRC). Estas se transmiten a B en tiempo real. En el receptor remoto B se aplican correcciones a las pseudodistancias medidas y se calculan las posiciones reales.

La pseudodistancia entre la estación A y un satélite j para una época t_o se calcula utilizando la ecuación (3.1). En ella, R es la pseudodistancia, ρ es la distancia entre satélite y estación, $\Delta\rho^j_A$ es el efecto del error radia de la órbita y la refracción ionosférica, δ^j es el error de reloj del satélite y δ_A el de la estación y c es la velocidad de la luz en el vacío.

$$R^j_A(t_o) = \rho^j_A(t_o) + \Delta\rho^j_A(t_o) - c\delta^j(t_o) + c\delta_A(t_o) \quad (3.1)$$

Se define la corrección de la pseudodistancia para j en t_o con la ecuación (3.2):

$$PRC^j(t_o) = -R^j_A(t_o) + \rho^j_A(t_o) = -\Delta\rho^j_A(t_o) + c\delta^j(t_o) - c\delta_A(t_o) \quad (3.2)$$

A través de una serie temporal de datos obtenidos de correcciones de pseudodistancias se calcula $RRC^j(t_o)$ mediante derivación numérica. Así se tiene que la corrección de pseudodistancias en una época cualquiera t se aproxima con la ecuación (3.3):

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_o) + RRC^j(t_o) (t - t_o) \quad (3.3)$$

El intervalo $(t - t_o)$ se utiliza para conseguir la mayor exactitud posible. Se aplica el mismo principio a la estación remota B, quedando:

$$R^j_B(t_o) = \rho^j_B(t_o) + \Delta\rho^j_B(t_o) - c\delta^j(t_o) + c\delta_B(t_o) \quad (3.4)$$

Entonces se aplican las correcciones calculadas a la pseudodistancia medida:

$$R^j_{B(t)_{corr}} = R^j_B(t) + PRC^j(t) = \rho^j_B(t) + (\Delta\rho^j_B(t) - \Delta\rho^j_A(t)) + (c\delta_B(t) - c\delta_A(t)) \quad (3.5)$$

Simplificando la ecuación, se tiene que el error de satélite se cancela y se desprecia la diferencia de errores radiales para baselíneas de longitud moderada. Con estos cambios se tendría:

$$R^j_{B(t)_{corr}} = \rho^j_B(t) + c\Delta\delta_{AB}(t) \quad (3.6)$$

Siendo $c\Delta\delta_{AB}(t)$ el error combinado de los relojes de A y B.

3.2. Sistema de aumentación basado en la aeronave (ABAS)

El Sistema de aumentación basado en la aeronave (ABAS) es un sistema en el que la propia aeronave es la que realiza la propia aumentación, debida a que cuenta con los sensores y el resto del equipo necesario. Es utilizada en ruta y en aproximaciones de no precisión.

Existen dos técnicas ABAS:

- La técnica ABAS más común es el RAIM o vigilancia autónoma de la integridad en el receptor. El RAIM necesita mediciones redundantes de distancia de los satélites para poder detectar mediciones erróneas y avisar al piloto. La necesidad de redundancia hace que el RAIM no pueda estar disponible en todo momento. Su disponibilidad varía según el tipo de operación. El RAIM necesitan un mínimo de 5 satélites.
- La técnica FDE o detección y exclusión de fallas. Consiste en detectar el satélite defectuoso mediante el RAIM, excluirlo y continuar proveyendo la guía, mientras exista un mínimo de satélites disponibles. La FDE necesita un mínimo de 6 satélites.

3.3. Sistema de aumentación basado en satélites (SBAS)

El SBAS consiste en un aumento de las constelaciones principales de satélites utilizables al suministrar información telemétrica, de integridad y corrección mediante satélites geoestacionarios. El sistema, según [2], contiene:

- Una red de estaciones terrestres que se encargan de monitorear las señales de los satélites.
- Una serie de estaciones maestras que recogen los datos de las otras estaciones y producen mensajes SBAS.
- Estaciones que transmiten los mensajes SBAS a los geoestacionarios.
- Los transpondedores de los satélites geoestacionarios transmiten los mensajes del SBAS.

Gracias a esta estructura el SBAS tiene un servicio más disponible que el del ABAS. Es posible en algunas configuraciones utilizar SBAS para aproximaciones con guía vertical (APV) sin tener instalaciones SBAS en el aeropuerto.

El SBAS permite apoyar cualquier operación SBAS que ocurra en ruta y en un área terminal. Las huellas de los satélites geoestacionarios establecen la cobertura SBAS.

En la Figura 2 se puede observar la arquitectura de un SBAS:

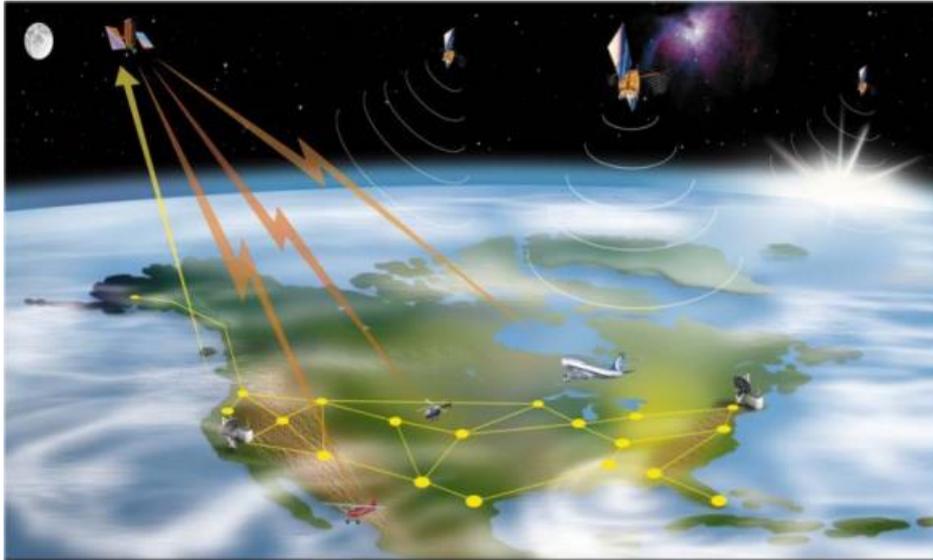


Figura 2. Arquitectura de un SBAS [2]

3.4. Sistema de aumentación basado en tierra (GBAS)

El GBAS emplea correcciones diferenciales para aumentar la señal de los satélites y así poder satisfacer los requisitos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. Gracias a conocer las coordenadas exactas de la posición de la estación terrestre se compara la posición real de la estación con la que ha sido estimada y se obtiene el error de posicionamiento.

Existen 3 segmentos en base a los cuales se estructura el GBAS: la constelación de satélites, la estación terrestre y el receptor de la aeronave. La Figura 3 contiene una representación de la estructura de la aeronave.

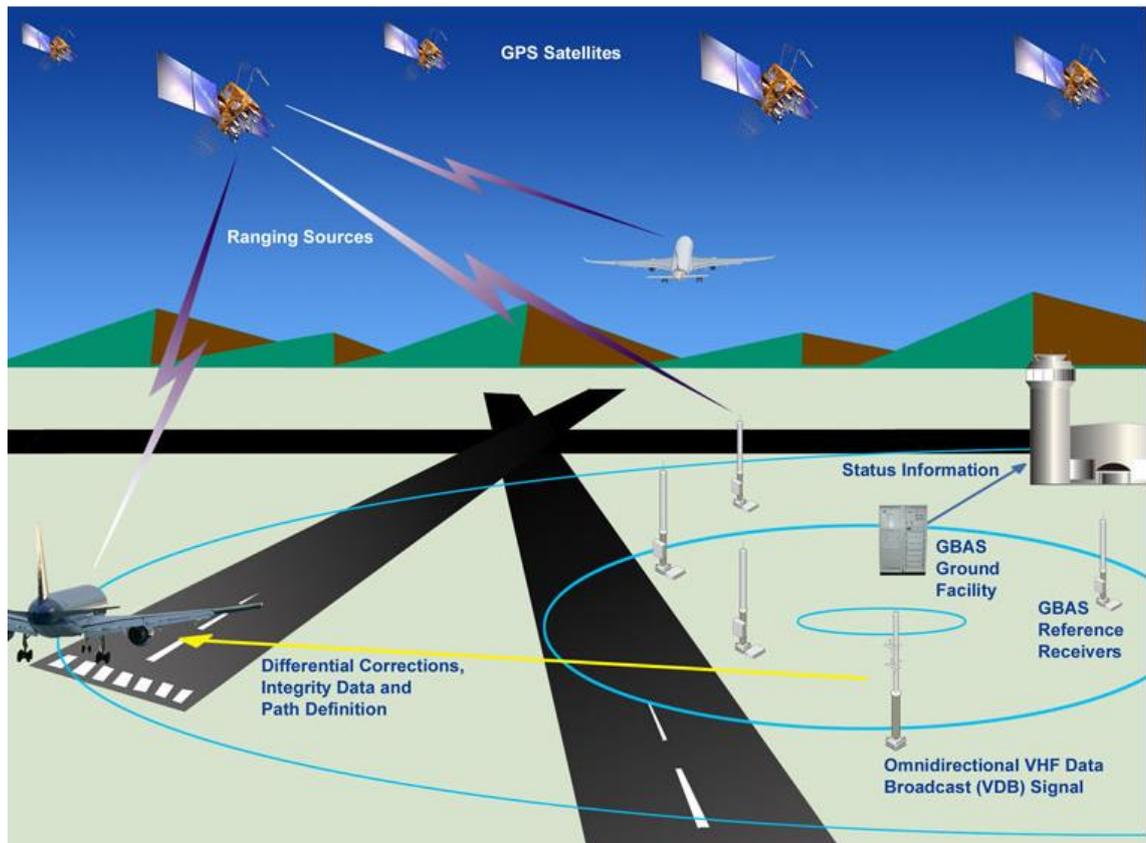


Figura 3. Arquitectura del GBAS (Obtenido de la FAA)

3.4.1. Subsistemas del GBAS

La información de los subsistemas del GBAS está muy bien explicada en

3.4.1.1. Subsistema satélite

El subsistema satélite lo forman las distintas constelaciones GNSS, es decir, el conjunto de satélites que envían los mensajes de navegación.

3.4.1.1. Subsistema aeronave

El subsistema aeronave está formado por la aviónica que se utiliza para realizar el procedimiento de aproximación GBAS. Tiene las siguientes funciones:

- Recibe las señales GNSS, la señal VDB (emitida por el GBAS) y las decodifica.
- Evalúa la disponibilidad del sistema.
- Realiza posicionamiento en tiempo real del avión.
- Obtiene las desviaciones respecto a la trayectoria establecida (segmento de aproximación final, FAS).

- Da instrucciones para poder seguir la trayectoria del FAS.

Un esquema del subsistema aeronave se puede apreciar en la Figura 4.

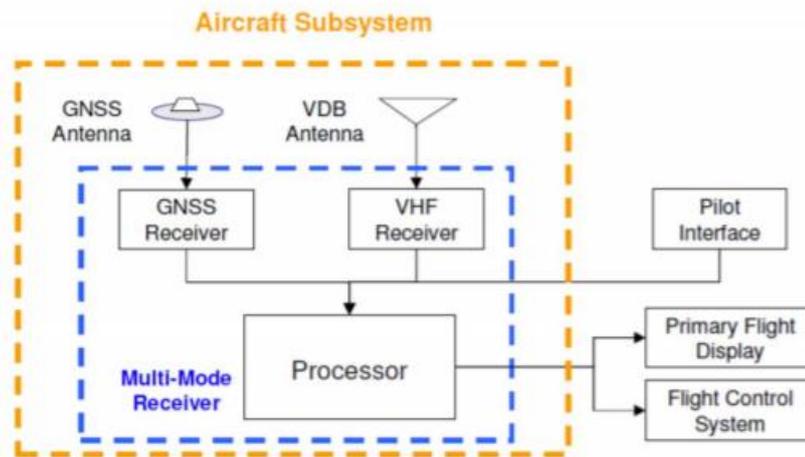


Figura 4. Subsistema aeronave del GBAS [18]

Físicamente consta de una antena receptora, una antena VDB y un MMR (Multi-Mode Receiver) encargado de recibir y procesar la señal.

3.4.1.1. Subsistema terrestre

El subsistema terrestre es la instalación GBAS que hay en tierra. Es importante conocerla para poder analizar la implementación en un aeropuerto, por lo que se procederá a mostrar imágenes de todas las estructuras que conforman el subsistema, que ayudarán al lector a tener una referencia visual que será de utilidad cuando se explique la implementación de la instalación GBAS en un aeropuerto. Está compuesta por 3 elementos:

- Unidad de recepción de la señal. Consta de diferentes antenas RRA que actúa como receptores de referencia. Sirven para recolectar todas las señales que lleguen de los satélites. Las posiciones de las antenas son conocidas.

Una estación GBAS suele tener 4 antenas de este tipo, que están conectas a la unidad central terrestre mediante cables subterráneos. Estas antenas transmiten a la central las señales GNSS que están constantemente recibiendo de los diferentes satélites disponibles, y la central procesa estas señales y determina la posición de las antenas.

En la figura 5 se puede observar una RRA del aeropuerto de Melbourne.



Figura 5. Antena RRA GBAS del Aeropuerto de Melbourne (Obtenido de australianaviation.com)

- Unidad central terrestre. Como se ha explicado antes, la unidad central recibe las señales de las antenas RRA, las procesa y determina la posición de las antenas. Con ello se calculan las correcciones diferenciales que son enviadas a los satélites.

La unidad central terrestre está compuesta de una central de procesamiento (*Processing Unit*) y una unidad de monitorización de integridad (*Integrity Monitoring*).

El funcionamiento de esta unidad se efectúa en los siguientes pasos:

1. Cálculo de correcciones diferenciales.
2. Evaluación continua de las correcciones diferenciales entre ellas para detectar errores y descartar satélites, para garantizar la integridad.
3. Cálculo de una corrección media.
4. Generación de diferentes señales que contienen una trayectoria FAS cada una.
5. Emisión de la señal hacia la aeronave.

En la Figura 6 se ve cómo es físicamente una unidad central.



Figura 6. Caseta de unidad central del subsistema terrestre (Obtenido de aviationbenefits.org)

- Unidad de transmisión. Se encarga de emitir la información que genera la unidad central mediante el uso de un VDB en banda VHF.

La ubicación de la antena VDB debe ser adecuada para que haya una línea directa de visión con todos los puntos del área tridimensional en la que se pretenda suministrar información para la aproximación. Las transmisiones VDB deben tener un alcance de un mínimo de 23 NM y deben ser omnidireccionales.

El aspecto físico de la antena VDB se puede observar en la Figura 7.



Figura 7. Antena VDB GBAS. Aeropuerto de Málaga ((Obtenido de enaire.es)

3.4.2. Señal del GBAS

La señal GBAS es VHF, variando entre 108 y 117.975 MHz, teniendo una separación entre canales de 25 KHz. A cada aproximación se le asocia un número de canal entre 20001 y 39999. El piloto introduce ese valor en el MMR y sintoniza con este canal.

El mensaje GBAS contiene diferentes paquetes de información que tienen un identificador para distinguirse. En la Tabla 1, extraída de [17], se pueden observar todos los tipos de paquetes y sus identificadores.

Identificador de tipo	Contenido del mensaje
0	Espacio extra
1	Correcciones diferenciales GBAS
2	Datos relacionados con GBAS
3	Reservado para la unidad de transmisión terrestre
4	Datos del Segmento final de Aproximación (FAS)
5	Disponibilidad de la unidad de transmisión terrestre
6	Reservado
7	Reservado para aplicaciones nacionales
8	Reservado para pruebas
9-255	Espacio extra

Tabla 2. Estructura del mensaje digital VDB transmitido por el GBAS

3.4.3. Beneficios del GBAS

La *Guía para la implementación de sistemas de aumentación basados en tierra* publicada por OACI [2] cita los siguientes beneficios de la tecnología GBAS:

- Reducción de las zonas críticas y sensibles
- Aproximación en curva
- Servicio de determinación de la posición
- Suministro del servicio en varias pistas del mismo aeropuerto
- Reducción de las zonas críticas y sensibles
- Aproximación en curva
- Servicio de determinación de la posición
- Suministro del servicio en varias pistas del mismo aeropuerto

3.4.4. Niveles de protección y alerta

Las correcciones diferenciales que emplea GBAS no eliminan todos los errores posibles, lo que amenaza el nivel de integridad del GBAS. Para asegurar el cumplimiento de los niveles de integridad requeridos se establecen modelos de protección lateral y vertical. Se construye una funcionalidad de protección y alerta mediante niveles de protección:

- LPL: Lateral Protection Level
- VPL: Vertical Protection Level
- LAL: Lateral Alert Limit
- VAL: Vertical Alert Limit

Los niveles de protección son los límites de confianza y los niveles de alerta son los límites que marcan el nivel que no deben rebasar los niveles de protección para poder utilizar el GBAS. Esto se ilustra en la Figuras 8 y 9.

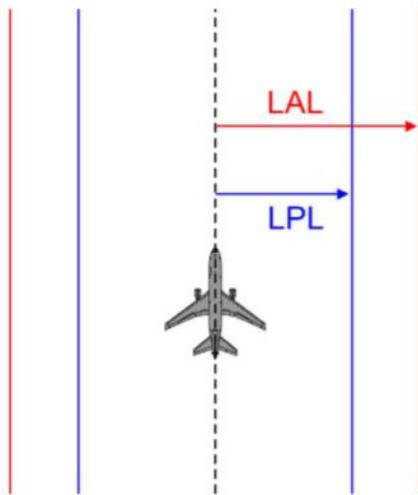


Figura 8. LPL y LAL [18]

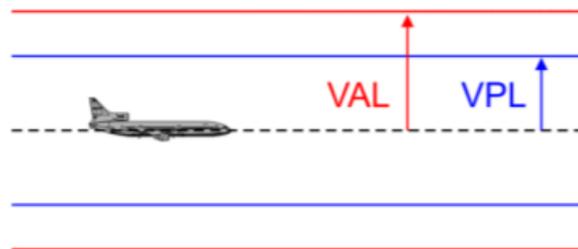


Figura 9. VPL y VAL [18]

4. Validación PBN

4.1. Concepto PBN

El PBN es un concepto de navegación promovido por la OACI. El aumento del tráfico aéreo y de la congestión del espacio aéreo ha conllevado la necesidad de conseguir mejorar la eficiencia en las operaciones aeronáuticas. La metodología de navegación ha evolucionado desde la navegación convencional, basada en normas restrictivas, en la que las aeronaves encontraban su libertad restringida a la hora de trazar sus propias trayectorias, a una navegación de área, conocida como RNAV.

RNAV es un método de navegación que hace posible la operación de las diferentes aeronaves en diferentes trayectorias de vuelo que se encuentren en las zonas de cobertura de las ayudas disponibles y de las capacidades de las distintas aeronaves. Las rutas se construyen mediante el uso de puntos de recorrido o waypoints, que son definidos mediante coordenadas geográficas y no utilizando estaciones fijas terrestres como ocurría en la navegación convencional. Gracias a esto crece enormemente la libertad para dirigir las operaciones.

El concepto RNAV evoluciona entonces en la navegación RNP, “Required Navigation Performance”, que se basa en los mismos principios que la RNAV, pero utiliza una nueva funcionalidad de vigilancia y alerta de conflictos. Gracias a esta nueva funcionalidad es posible trazar trayectorias más complejas con los mismos niveles de seguridad y una mayor optimización del espacio aéreo.

Para emplear RNAV o RNP, se utilizan sistemas que puedan cumplir una serie de funciones necesarias, lo que significa cumplir con las especificaciones RNAV o RNP establecidas.

Antes los requisitos de navegación estaban basados en la necesidad de utilizar un conjunto de sensores determinados. Sin embargo, con los conceptos RNAV y RNP se entiende que basar los requisitos exigidos para la navegación en la forzosa utilización de unos sensores específicos era menos eficiente. Con este cambio de mentalidad y normativa es cuando se define finalmente el concepto PBN.

El concepto PBN es una evolución en la manera de proceder y establecer los requisitos. Se pasa a especificar los requisitos en función de prestaciones. Estos requisitos son los explicados anteriormente de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. Estos requisitos se pueden observar en la Tabla 2.

Tipo de Operación	Precisión Horizontal 95%	Precisión Vertical 95%	Integridad	Tiempo de alerta	Continuidad	Disponibilidad
En Ruta	3.7 km (2.0 NM)	N/A	1-1·10-7/h	5 min	1-1·10-4/h hasta 1-1·10-8/h	0.99 hasta 0.99999
En ruta, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	1-1·10-7/h	15 s	1-1·10-4/h hasta 1-1·10-8/h	0.99 hasta 0.99999
Aproximación inicial/intermedia, Aproximación de no Precisión, Salida	220 m (720 ft)	N/A	1-1·10-7/h	10 s	1-1·10-4/h hasta 1-1·10-8/h	0.99 hasta 0.99999
Aproximación de precisión con guía vertical (APV-I)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	1-2·10-7/h	10 s	1-8·10-6 cada 15 s	0.99 hasta 0.99999
Aproximación de precisión con guía vertical (APV-II)	16.0 m (52 ft)	8.0 m (26 ft)	1-2·10-7/h	6 s	1-8·10-6 cada 15 s	0.99 hasta 0.99999
Aproximación de precisión Categoría I	16.0 m (52 ft)	6.0 m hasta 4.0 m (20 ft to 13 ft)	1-2·10-7/h	6 s	1-8·10-6 cada 15 s	0.99 hasta 0.99999

Tabla 2. Especificaciones exigidas para sistemas de ayuda a la navegación según el tipo de operación

4.2. Validación de sistemas PBN

4.2.1. Primera fase: Evaluación GNSS a largo plazo

Para validar procedimientos PBN, la primera fase consiste en realizar una campaña de toma de datos a largo plazo. En ella se verifican los requisitos de integridad, disponibilidad, continuidad y precisión durante 6 meses gracias a los informes mensuales que emite la ESSP (European Satellite Services Provider), que ofrecen estadísticas sobre los requisitos para los tipos de aproximación.

La primera fase consta de las siguientes partes:

1. Análisis de la Disponibilidad

Existen dos diferentes análisis secundarios en esta fase:

- El análisis de la disponibilidad de los satélites que forman el servicio en cuestión (disponibilidad SIS)
- El análisis de la disponibilidad según la aproximación que se vaya a analizar:

- Disponibilidad SIS. Que haya un satélite operativo en todo momento.
- Disponibilidad de operación.

2. Análisis de continuidad

Este análisis se define por el riesgo de continuidad en la operación.

3. Análisis de la precisión

Los informes del ESSP definen la precisión con el percentil 95% de errores de navegación en el mes. Se observan los lugares en que los servicios cumplen los requisitos de disponibilidad. Se recogen los datos durante 6 meses para la estación más cercana al aeropuerto en cuestión.

4. Análisis de Integridad

Se utilizan los eventos de integridad producidos. Sucede un evento de integridad cuando el Error del Sistema de Navegación (NSE) es mayor o igual que el Nivel de Protección (PL). El Índice de Seguridad es el cociente entre el Error del Sistema de Navegación y el Nivel de Protección para 1 s. Cuando el cociente supera 1 se ha producido una situación de falta de información.

4.2.2. Segunda fase: Campaña sobre el terreno

La campaña sobre el terreno se realiza en el mismo lugar en el que se llevarán a cabo las operaciones PBN, teniendo una duración mínima de 36 horas. Se toman datos en formato RINEX: GNSS de observación (o) y navegación (n) y los del servicio (b) como tal desde distintas posiciones alrededor del aeropuerto y junto a la pista de aterrizaje. Se procesa con el software PEGASUS.

4.2.3. Tercera fase: Ensayo de vuelo

Esta etapa se realiza si se han obtenido resultados positivos en las dos anteriores. Se pretende comprobar que todo funciona de manera correcta y sin problemas inesperados. Se realiza una aproximación RNP APCH y se genera la carta de aproximación. Se almacenan los datos brutos que serán procesados con el software PEGASUS.

5. Implementación de una estación terrestre GBAS

La información de esta sección está sacada de [18], que es una de las fuentes de inspiración de este proyecto.

5.1. Requisitos normativos para la implantación del GBAS

Las estaciones terrestres GBAS tienen un cierto nivel de flexibilidad a la hora de realizar el emplazamiento de sus instalaciones terrestres. Esto le da bastante libertad en comparación con otros sistemas tradicionales como el ILS, que necesita lugares específicos y genera áreas críticas.

Las restricciones que poseen los sistemas GBAS para su instalación son en cuanto a las distancias entre los distintos elementos de los subsistemas terrestres, la distancia máxima hasta las cabeceras o las distancias mínimas presentes en las áreas operacionales. Estos requisitos son los únicos que lo afectan, lo que permite que se coloque con facilidad en aeropuertos de gran densidad.

Esto también implica que en la mayoría de aeropuertos en los que se instala no existe una zona reservada para su instalación, lo que causa que para poder implantar el sistema GBAS en un aeropuerto sea necesario modificar la distribución de los diferentes elementos del aeropuerto.

La Tabla, extraída de [18], recoge las normas de la FAA para la implantación de los elementos terrestre del GBAS en el aeropuerto.

Criterio de emplazamiento	Elemento al que aplica
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aspectos de seguridad: Todos los elementos del sistema GBAS deben ser instalados dentro del recinto del aeropuerto, en áreas de seguridad donde el acceso a las mismas esté controlado y restringido. 	Antenas GNSS Antena VDB Unidad de procesamiento
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Servidumbres: La instalación de los nuevos elementos del GBAS debe respetar las existentes servidumbres tanto radioeléctricas como de aeródromo existentes en el aeropuerto. 	Antenas GNSS Antena VDB Unidad de procesamiento
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Volumen de cobertura: Se exige un mínimo de intensidad de señal en las zonas operativas, el cual debe ser analizado. 	Antena VDB
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distancia hasta cabeceras: La distancia máxima desde la antena transmisora VDB hasta cualquiera de las cabeceras por las cual se ofrezcan aproximaciones GBAS debe ser menor de 5000 metros, con el objetivo de mitigar anomalías ionosféricas. 	Antenas GNSS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Máscara de elevación sobre el horizonte: obstáculos por debajo de tres grados con respecto al horizonte de las antenas receptoras deben ser evitados. 	Antenas GNSS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superficies reflectantes: Se deben evitar superficies susceptibles de crear reflexiones de la señal en el entorno de las antenas, como pueden ser aguas estancadas. 	Antenas GNSS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Condiciones climáticas y variaciones estacionales: Debe de evitarse colocar los elementos del GBAS en lugares donde, a consecuencia de las inclemencias meteorológicas, su funcionamiento pueda verse afectado. Por ejemplo, áreas susceptibles de acumulación de nieve o posibles inundaciones. 	Antenas GNSS Antena VDB
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potenciales expansiones del aeropuerto: Se deben de tener en cuenta las posibles expansiones o modificaciones futuras dentro del aeropuerto, como, por ejemplo, la creación de una nueva pista. 	Antenas GNSS Antena VDB Unidad de procesamiento

Tabla 3. Criterios de emplazamiento para los elementos terrestres del GBAS

5.2. Instalación de antenas GNSS

El número concreto de antenas GNSS necesarias no es una variable fija. La norma está en colocar 4 antenas, si se observan las instalaciones ya realizadas en varios aeropuertos (Málaga, Bremen, Frankfurt, Zúrich...). Los receptores GNSS se suelen colocar cerca de las antenas. Para el emplazamiento de las antenas GNSS se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Distancia máxima entre GRP (GBAS Reference Point) y LTP (Landing Threshold Point), siendo el GRP el punto de referencia de la instalación. La distancia máxima es de 5 km.

- Máscara de elevación de horizonte. Es preferible colocar la antena GNSS de forma que esté libre de obstáculos por encima de 3° de elevación en todas las direcciones.
- Reflexiones (multipath) de la señal GNSS y servidumbre LOCA (Local Object Consideration Area). Para evitar los efectos negativos del multipath se procura colocar la antena en una zona libre de obstáculos y se asegura que la distancia entre antenas sea igual o mayor que 105 m.
- GBAS LOCA para RRAs. La LOCA es el volumen que envuelve a una antena receptora RRA o a una emisora VDB, dentro del cual no debe haber obstáculos. La LOCA consta de 3 volúmenes, que también definen una máscara de elevación de horizonte. Estos 3 volúmenes (LOCA interna, intermedia y externa) se pueden apreciar en la Figura 10.

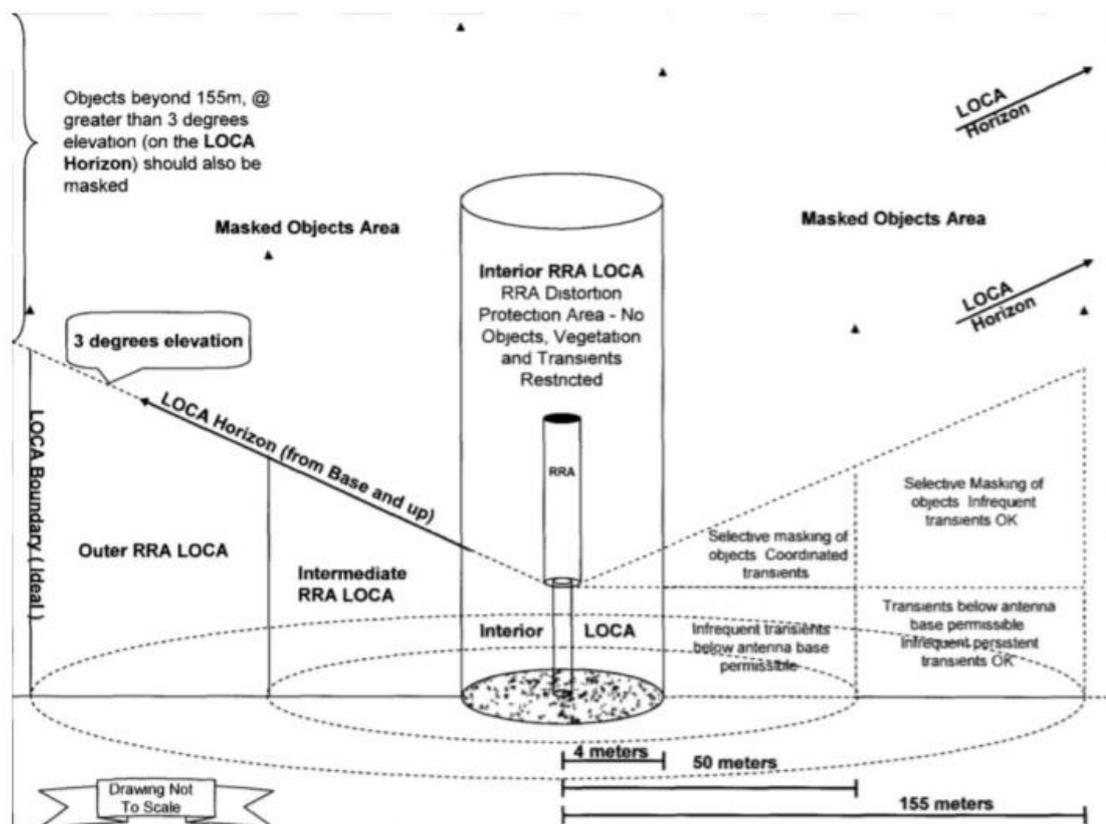


Figura 10. Volúmenes LOCA [18]

- Monitoreo de efectos ionosféricos. Distancia máxima de separación. Una distancia máxima establecida entre las antenas para controlar los efectos ionosféricos.
- Distancia a zonas públicas. Para evitar interferencias radioeléctricas, que puede interferir con la señal de la constelación GNSS.

5.3. Instalación de antenas VDB

En cuanto a las antenas VDB, se pueden emplazar una o dos antenas. En este caso una antena haría la función de transmisora desde la estación a la aeronave y la otra de receptora. Con una segunda antena se consigue dar al sistema la capacidad de recibir señal VDB que él mismo emita, para poder muestrearla y analizarla en el tiempo y así garantizar su calidad. Esta segunda antena se requiere para aproximaciones de precisión CAT II-CAT III. En CAT I solo se necesita una antena. Como la implementación de los sistemas de aproximación CAT I y CAT II está todavía en desarrollo y no se ha implementado en la práctica, nos centraremos en las restricciones a la posición de una única antena VDB. Para emplazar esta antena se tienen las siguientes consideraciones:

- Restricciones por las superficies limitadoras de obstáculos. La antena debe colocarse de manera respetuosa con las superficies limitadoras de obstáculos. Sin embargo, hay excepciones. Para instalar equipos para la ayuda a la navegación, si no es posible respetar las superficies limitadoras de obstáculos, se permite saltarse esta limitación, de acuerdo con lo especificado en el Anexo 14 del Volumen I de OACI.
- Volumen de cobertura de la antena VDB. Se deben cumplir los requisitos de volúmenes mínimos de cobertura que la OACI establece en el Artículo 10. Este criterio establece que la mínima densidad de potencia radiada por la antena de $-99\text{dBW}/\text{m}^2$. Esto se traduce en colocar la antena de manera que las obstrucciones que causen los obstáculos sean las mínimas posibles.
- Máxima densidad de potencia admisible. Este requisito es contrario a los mínimos de cobertura en el sentido de que establece una distancia mínima entre la antena VDB y la aeronave. Al poner esta limitación a la cercanía se impide que los receptores de la aeronave no reciban demasiada potencia y se saturen.
- Local Object Consideration Area (LOCA). Las antenas VDB deben tener a su alrededor una LOCA que restrinja la presencia de obstáculos. Sin embargo, en el caso de las antenas VDB, son los fabricantes los que deben determinar la LOCA, en lugar de la OACI.

5.4. Instalación de la unidad de procesamiento

La unidad de procesamiento es la caseta que contiene los equipos de recepción, procesamiento y transformación de la señal GBAS. Es el cerebro del sistema. Aunque es el elemento con menos restricciones, es necesario considerar aspectos como los siguientes:

- Aspectos de seguridad.
- Superficies limitadoras de obstáculos.
- Condiciones climatológicas y variaciones estacionales.

- Conexiones con antenas RRA y VDB. Los equipos deben estar conectados a ambas antenas. Esto se consigue con cableado subterráneo.

5.5. Ejemplos de implantación

5.5.1. Aeropuerto de Málaga

Este aeropuerto es el número 4 de España en cuanto al número de pasajeros. Posee dos pistas no paralelas. Tiene una instalación de GBAS desde el año 2014. La instalación consta de 4 antenas RRA, una antena VDB y una caseta con la unidad de procesamiento. Todos estos elementos se ubican en un mismo lugar, en la zona próxima a la cabecera 13 de aeropuerto.

Al emplazar todos los elementos del subsistema terrestre en un mismo lugar se consigue un ahorro importante en cableado y se mitigan las pérdidas de señal. La distribución se puede observar en la Figura 11.

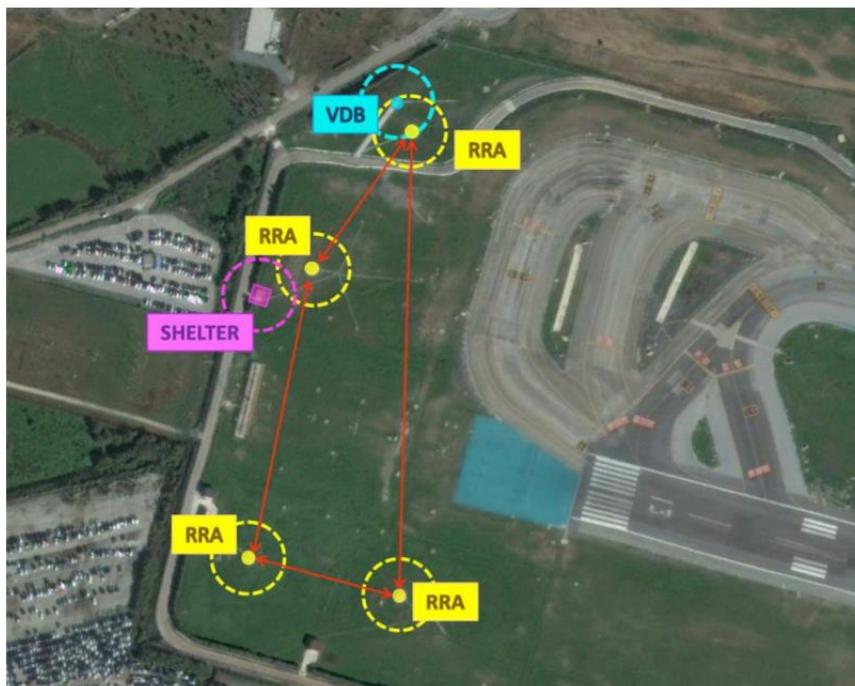


Figura 11. Distribución de los elementos de la instalación GBAS en el Aeropuerto de Málaga [18]

Se puede observar que hay una cierta asimetría en las posiciones de las antenas RRA. Esto es debido a que de esta manera están más alejadas de las zonas de movimientos de aeronaves. Se aprecia también que la antena VDB y el shelter están separados.

5.5.2. Aeropuerto Internacional de Bremen

Este aeropuerto es uno de los aeropuertos alemanes más importantes. Este aeropuerto fue el primero del mundo en proveer servicios de CAT I a vuelos civiles mediante GBAS, en el año 2012. Es por tanto uno de los GBAS más consolidados de Europa. Su instalación se muestra en la Figura 12.

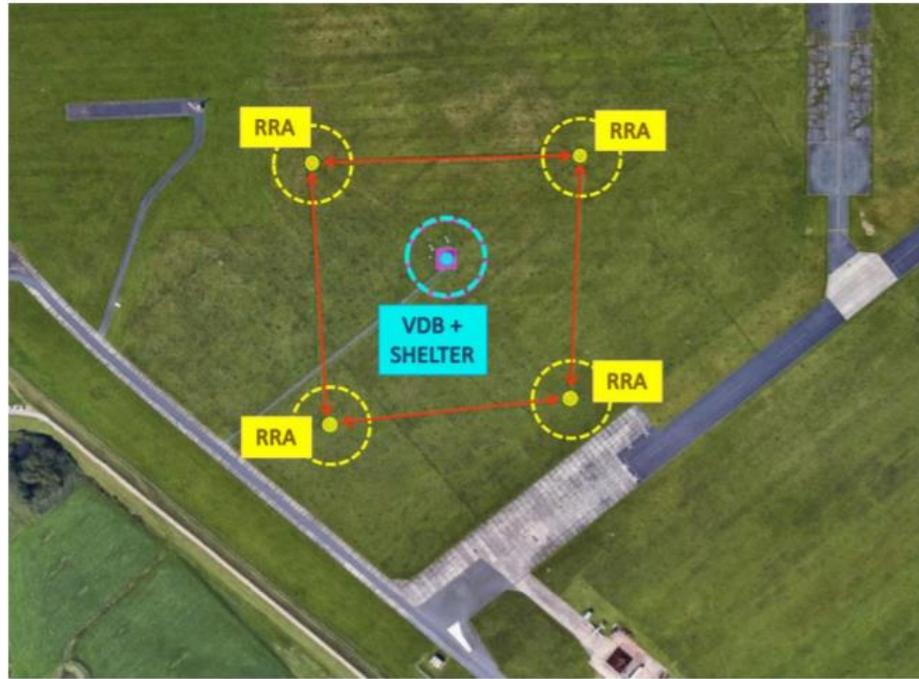


Figura 12. Distribución de los elementos de la instalación GBAS en el Aeropuerto Internacional de Bremen [18]

La distribución de elementos en este aeropuerto es, al contrario que en Málaga, simétrica. Las localizaciones de la antena VDB y del shelter son coincidentes, con las antenas RRA en los extremos de un cuadrilátero. Esto minimiza la longitud del cable necesario al máximo y reduce también al máximo las pérdidas posibles por transmisión a través del cableado.

Parte II. Carta aeronáutica

6. Conceptos relevantes

6.1. Aproximación

La aproximación instrumental es el conjunto de maniobras que se realizan por referencia a los instrumentos de a bordo, ofreciendo protección específica con los obstáculos desde el IAF (Initial Approach Fix), que es donde empieza el procedimiento de aproximación. El procedimiento de aproximación comprende el tramo desde el IAF hasta la pista de aterrizaje, o, alternativamente, hasta realizar una aproximación frustrada. La aproximación se divide en 4 fases: inicial (entre el IAF y el IF), intermedia (entre el IF y el FAF), final (entre el FAF y la pista) y frustrada (circunstancial, entre el MAPt y el circuito de espera). En la Figura 13 se puede ver esto representado.

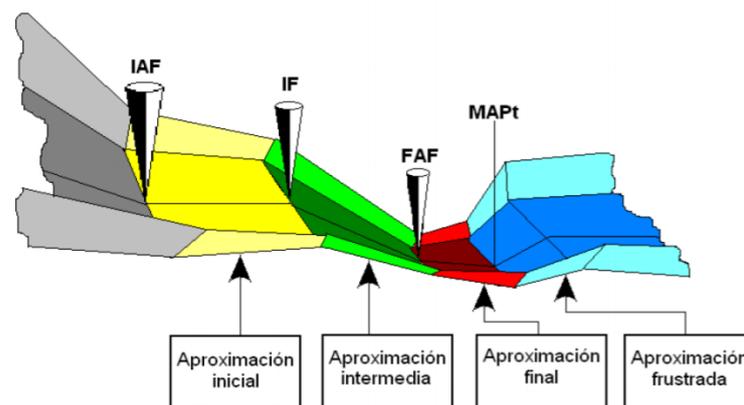


Figura 13. Fases de la aproximación (Obtenido de apuntes)

Una aproximación frustrada ocurre cuando el piloto decide que no es seguro continuar el aterrizaje, ya sea por cuestiones de visibilidad, porque lleva una mala trayectoria, está en una posición incorrecta o por cualquier otra. Tiene que realizarse por encima de la altura de decisión. Consiste en ascender y dirigirse mediante el procedimiento estandarizado a un circuito de espera. Cada procedimiento de aproximación debe tener uno o más procedimientos de aproximación frustrada asignados.

6.2. Margen de franqueamiento de obstáculos

El Margen de franqueamiento de obstáculos (MOC) es la mínima altura que una aeronave debe tener más que la altura del obstáculo más alto de esa parte del trayecto. Para calcular el MOC se utilizan dos áreas, una primaria y una secundaria. El área

primaria es un plano paralelo al suelo, mientras que el área secundaria son dos planos inclinados, uno a cada lado del área primaria.

El margen de franqueamiento de obstáculos se calcula asegurando que ningún obstáculo penetre el plano que sea más elevado en la posición del obstáculo. Esto es porque al haber dos planos inclinados, en ciertas posiciones habrá uno que sea más alto de los demás. La Figura 14 muestra el plano más alto en cada zona visto de frente.

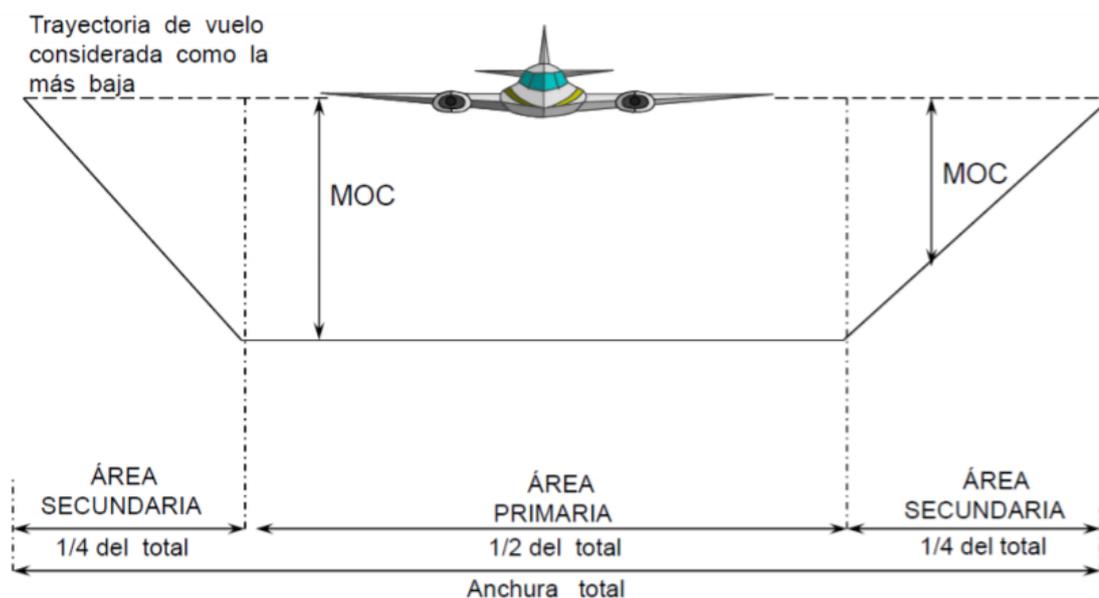


Figura 14. Margen de franqueamiento de obstáculos (Obtenido de apuntes)

En la práctica esto se calcula comprobando la posición de los obstáculos más elevados de cada zona y sumando el MOC que le corresponda a esa zona. La altura mayor obtenida tras sumar los obstáculos y el MOC se convierte en la altura de franqueamiento de obstáculos y, si no hay ninguna otra consideración, en la altura mínima de vuelo.

6.3. Puntos de referencia o waypoints

En navegación tradicional los puntos de referencia se definen sobre la vertical de una instalación o mediante una combinación de radiales de VOR y arcos de DME. Cada uno de estos métodos conlleva un área de tolerancia, debido a las incertidumbres creadas por la naturaleza de estas instalaciones. Esta tolerancia, sin embargo, no es relevante para navegación PBN, pues los waypoints se definen por coordenadas. Esto conlleva, por ejemplo, que en un procedimiento PBN no se defina un giro con un arco de un DME, sino que en su lugar se sitúen waypoints consecutivos que simulen el giro, por ejemplo.

6.4. Circuito de espera

Un circuito de espera es una maniobra determinada de antemano que permite que la aeronave se mantenga dentro de un espacio aéreo identificado, mientras espera una autorización posterior. Las incorporaciones al circuito de espera pueden realizarse por diferentes sectores, como se ve en la Figura 15.

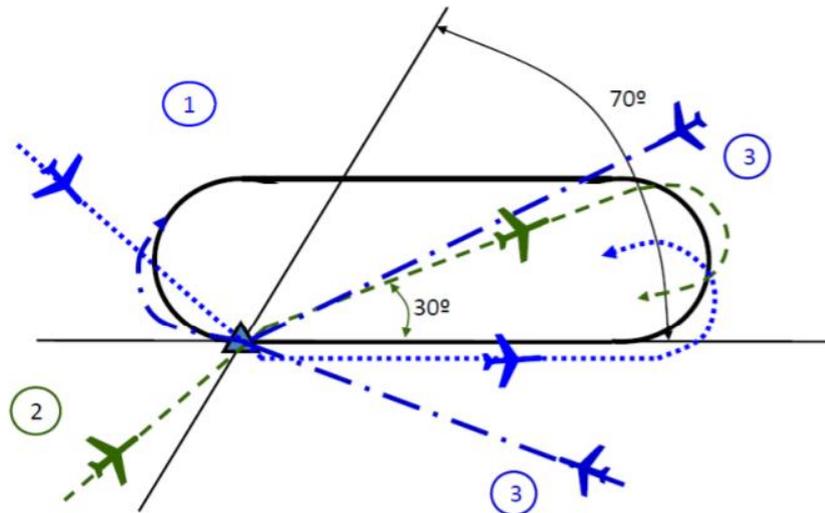


Figura 15. Sectores de entrada a la espera (Obtenido de apuntes)

Debido a las diferentes entradas posibles a la espera, la forma que adquiere el área real que engloba el circuito de espera difiere del que se puede ver en la Figura 15. La construcción de la espera está dividida en varias fases, que son:

- Construir la Plantilla de espera. Se consideran los factores que puedan desviar a la aeronave, salvo los relacionados con el área de tolerancia del punto de referencia.
- Construir el Área Básica de espera. Se desplaza el origen de la plantilla alrededor del área de tolerancia.
- Añadir el Área Tope. Se añade un área secundaria o un margen.

El MOC de la espera se puede observar en la Figura 16. Funciona similar a como se ha explicado el MOC general, se obtiene la altura más alta de las sumas de los obstáculos más su MOC correspondiente.

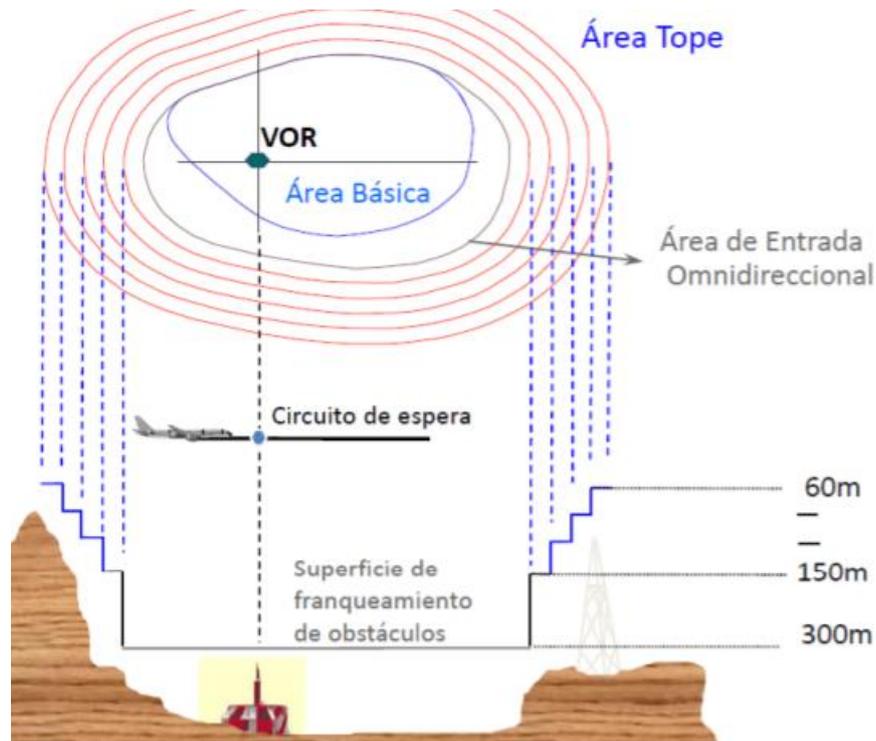


Figura 16. MOC del circuito de espera (Obtenido de apuntes)

6.5. DME y VOR

La teoría sobre el funcionamiento de las instalaciones VOR y DME no es relevante para el desarrollo del proyecto, ya que los únicos puntos de referencia definidos de esta manera en la carta que se va a crear son dos que se mantienen iguales respecto al procedimiento ILS Z al que se imita.

Lo que interesa es conocer el funcionamiento práctico básico. Esto es, su función dentro de la carta aeronáutica. El VOR genera radiales mediante los cuales se definen puntos o trayectorias a seguir para el avión. Mientras que el DME genera circunferencias a una distancia determinada que pueden definir puntos junto con radiales del VOR o definir un giro para el procedimiento.

6.6. Zonas prohibidas, restringidas o peligrosas

A efectos del proyecto, son zonas definidas en las cartas por las que se debe volar a una altura superior a las que marca el límite indicado.

7. Inicio del proyecto

7.1. Información disponible

Para poder realizar la carta aeronáutica que se busca, lo primero que se tiene es la información del documento 8168, tanto la edición de 2014 [19] como la de 1993 [20]. En el proyecto se utilizará siempre la de 2014 salvo para obtener las constantes de los planos de las OAS.

Del AIP España serán de utilidad la carta de aproximación por instrumentos ILS Z de Alicante Elche (LEAL) [21], junto con las cartas de aproximación por instrumentos GBAS Z [22] e ILS Z [23] de Málaga (LEMG). La última sirve para encontrar de manera rápida diferencias que hay en un mismo procedimiento si se utiliza ILS o GBAS, siendo LEMG el único aeropuerto español que sirve en este respecto.

Existen otros documentos oficiales de la OACI disponibles para consultar si resulta necesario durante el proceso, pero en la fase inicial no se consideran.

Con estas 5 referencias es como se ha realizado en su mayoría este proyecto. No se ha utilizado ninguna referencia de alguna otra carta construida por otro autor como referencia, ya que no he podido encontrar ninguna que trate de GBAS, y decidí que por eso mismo debía hacerla solo con referencias oficiales.

7.2. Programas utilizados

Para el desarrollo del proyecto se han usado 5 programas, teniendo 3 de ellos un uso prevalente. Estos programas son:

- MATLAB de Mathworks (uso bajo)
- ArcGIS de ESRI (programa principal)
- Civil 3d de Autodesk (programa principal)
- Google Earth de Google (programa principal)
- Microsoft Word de Microsoft (uso bajo)

MATLAB se ha utilizado para calcular las coordenadas de puntos con la ayuda de librerías utilizadas en algunas de las asignaturas de aeronavegación de la UPV.

En ArcGIS se ha modelado el relieve y se ha montado la primera página de la carta aeronáutica importando el dibujo de Civil 3d.

En Civil 3d se han dibujado los diferentes procedimientos para obtener el franqueamiento de obstáculos y para dibujar el procedimiento de aproximación que se exporta a ArcGIS.

En Microsoft Word (además de redactar la memoria) se han diseñado las demás páginas de la carta aeronáutica que no incluyen el plano.

7.3. Creación de los waypoints

Lo primero que se realizó para el proyecto fue la definición de los waypoints que definirán la aproximación. El criterio de diseño es que debe ser lo más similar posible al procedimiento ILS Z, para facilitar el trabajo de los controladores aéreos del aeropuerto y simplificar el flujo de aviones.

Lo primero es observar los waypoints definidos en la carta ILS Z LEAL. Se pueden observar en la Figura 17.

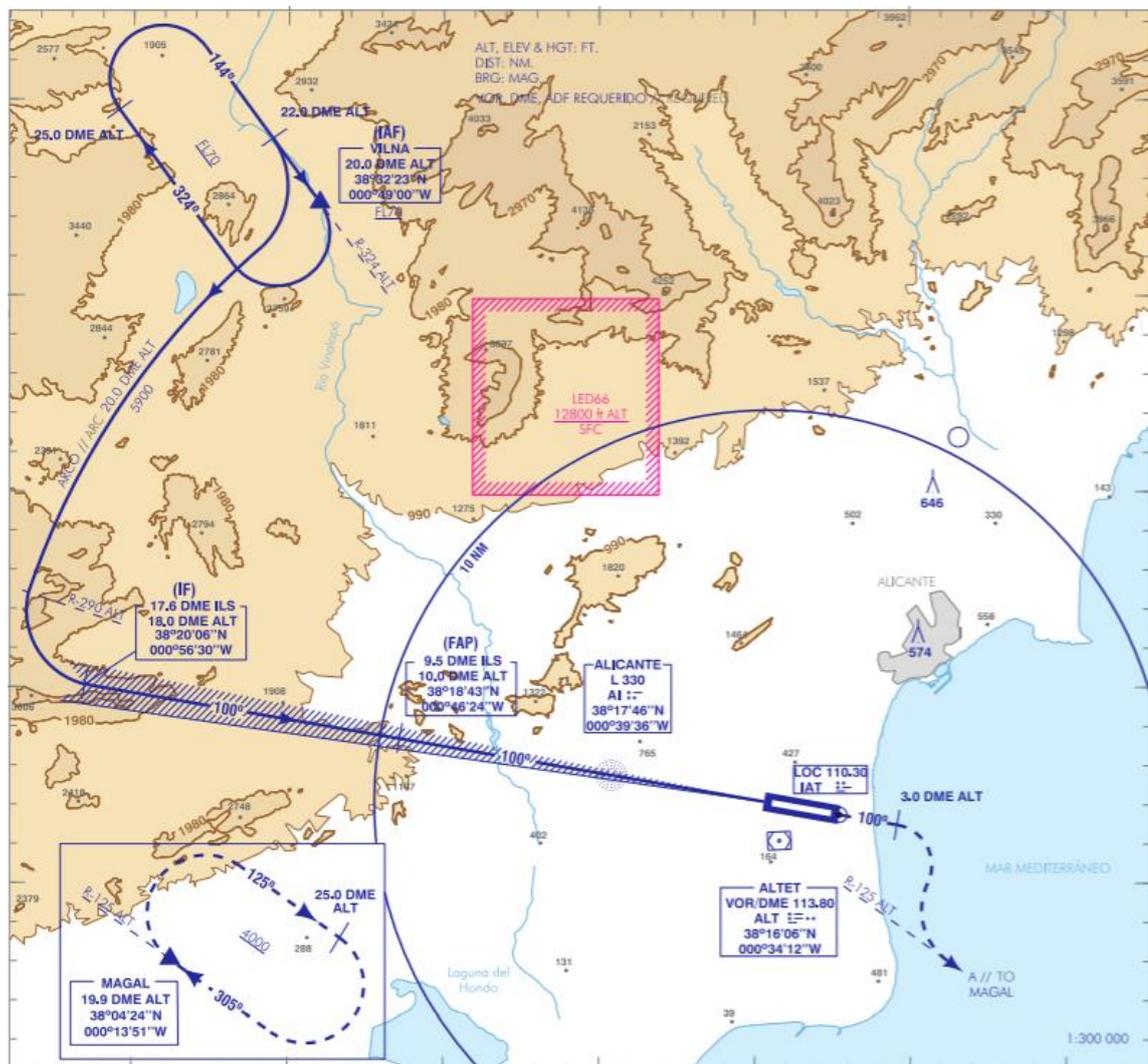


Figura 17. Waypoints del IAC ILS Z LEAL

El procedimiento tiene pocos waypoints definidos, utilizando los arcos del DME y los radiales del VOR en su lugar. Para adaptar esta ruta a PBN es necesario sustituir el

giro por una serie de puntos de referencia que se encuentre 20 NM del DME ALT que simulen este mismo giro, junto con un waypoint con ángulo 100° respecto de la Pista 10 (RWY 10). Esto se puede deducir también comparando las cartas ILS Z Y GBAS Z de LEMG. Para conseguir esto se utiliza la función ortoreckon en MATLA, que tiene la siguiente forma:

```
function [lat2,lon2,a21] = orto_reckon(lat1,lon1,s,a12)
% Travel a given distance along a given azimuth starting at
% a given initial point, using the spherical model.
% Return the endpoint and final azimuth.
%
% USAGE:
% [lat2,lon2] = orto_reckon(lat1, lon1, s, a12)
%
% VARIABLES:
% lat1 = initial latitude (degrees)
% lon1 = initial longitude (degrees)
% s     = distance (meters)
% a12   = initial azimuth (degrees)
% lat2, lon2 = second point (degrees)
% a21   = reverse azimuth (degrees), at final point facing back
toward the
%         initial point
%
% Spherical formula:
% lat2= asin(sin(lat1)*cos(s/R) + cos(lat1)*sin(s/R)*cos(a12))
% lon2 = lon1+ atan2(sin(a12)*sin(s/R)*cos(lat1), cos(s/R)-
sin(lat1)*sin(lat2))

R = 6371000;

lat2 = asind(sind(lat1)*cos(s/R) + cosd(lat1)*sin(s/R)*cosd(a12));
lon2 = lon1 + atan2(sind(a12)*sin(s/R)*cosd(lat1), cos(s/R)-
sind(lat1)*sind(lat2))*180/pi;

lat2 = mod(lat2,360);
lon2 = mod(lon2,360);
if lat2>180
    lat2=lat2-360;
end
if lon2>180
    lon2=lon2-360;
end

if nargin > 2
    dlon = lon1 - lon2;
    y = sind(dlon) * cosd(lat1);
    x = cosd(lat2) * sind(lat1) - sind(lat2)* cosd(lat1)*
cosd(dlon);
    a21=atan2(y, x)*180/pi;
    a21 = mod(a21,360);
end
```

Con esta función se pueden obtener coordenadas de puntos a una distancia en un ángulo de ALT. Con esta función se crean 4 puntos intermedios en el arco y 1 punto para marcar el final del giro a 100° de RWY 10. Los 4 primeros puntos se pueden ajustar una vez se insertan en Civil 3d para que aparezcan en posiciones que queden más comprensibles en el mapa. Estos waypoints están diseñados como fly-by, es decir, que no es necesario pasar por ellos antes de iniciar el giro, por lo que no entorpecen la simulación del arco del DME.

El IF y el FAP se introducen en las mismas coordenadas que en el ILS Z, por lo que ya se tienen todos los puntos. Las coordenadas finales se pueden observar en la Tabla 4.

COORDENADAS WAYPOINTS	
WPT	COORD
VILNA (IAF)	38°32'23.0"N 000°49'00.0"W
AL407	38°29'41.6"N 000°53'36.1"W
AL406	38°27'36.6"N 000°55'29.9"W
AL405	38°25'21.3"N 000°57'02.0"W
AL404	38°22'57.8"N 000°58'11.3"W
AL403	38°20'28.6"N 000°58'56.6"W
AL402 (IF)	38°20'06.0"N 000°56'30.0"W
AL401 (FAP)	38°18'43.0"N 000°46'24.0"W
RWY10 (LTP)	38°17'04.3"N 000°34'30.0"W

Tabla 4. Coordenadas de los waypoints

Una vez se tienen los waypoints definidos, se puede pasar al franqueamiento de obstáculos.

8. Franqueamiento de obstáculos

El cálculo de las altitudes mínimas por franqueamiento de obstáculos es el que se utilizará para definir las altitudes mínimas generales de la aproximación, ya que es el único elemento que se puede tener en cuenta con los medios y la ambición de este proyecto

En las dos primeras secciones se darán explicaciones más extensas para que el procedimiento le quede claro al lector, con todas las gráficas y tablas que se han utilizado. Sin embargo, como el procedimiento es similar en todas, se omitirán algunos elementos que sean muy parecidos y se puedan deducir en las siguientes

8.1. Franqueamiento de obstáculos de la espera

La espera que se muestra en la carta ILS Z LEAL viene definida por procedimientos anteriores y que se muestran en otras cartas aeronáuticas diferentes, por lo que no se debería cambiar. Sin embargo, se hará una comprobación de que la altura que se muestra en la carta no se debe exclusivamente a franqueamiento de obstáculos y es por tanto superior a la que se obtiene de esta forma.

Del circuito de espera de la carta de ILS Z del aeropuerto de Alicante/Elche podemos obtener bastante información. Se puede observar en la Figura 18.

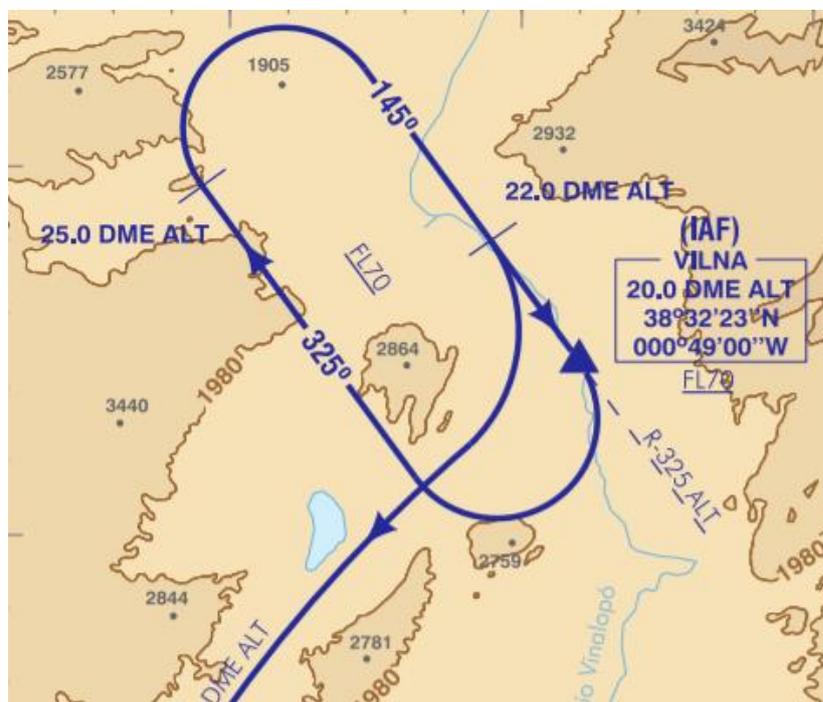


Figura 18. Circuito de espera en la carta [21]

Lo primero que tenemos que resaltar es que el IAF, el punto de referencia para el circuito de espera está definido mediante el DME y un radial del VOR. También se puede notar que el final del tramo de alejamiento está definido mediante DME, lo que permitirá reducir el área de la espera. Otros datos importantes que muestra la carta son que la espera es de acercamiento al aeropuerto y que gira en el sentido convencional. Por supuesto, obtenemos que la altura mínima es de 7000 pies.

Con esta información, se puede obtener los datos para completar la tabla I-4-3-Ap C-4 del Documento 8168 [19]. De las tablas 5 y 6, también obtenidas de [19] se obtiene el factor de conversión y la velocidad.

Altitud (pies)	Factor de conversión							
	ISA-30	ISA-20	ISA-10	ISA	ISA+10	ISA+15	ISA+20	ISA+30
0	0,9465	0,9647	0,9825	1,0000	1,0172	1,0257	1,0341	1,0508
1 000,0	0,9601	0,9787	0,9969	1,0148	1,0324	1,0411	1,0497	1,0667
2 000,0	0,9740	0,9930	1,0116	1,0299	1,0479	1,0567	1,0655	1,0829
3 000,0	0,9882	1,0076	1,0266	1,0453	1,0637	1,0728	1,0818	1,0995
4 000,0	1,0027	1,0225	1,0420	1,0611	1,0799	1,0892	1,0984	1,1165
5 000,0	1,0175	1,0378	1,0577	1,0773	1,0965	1,1059	1,1153	1,1339
6 000,0	1,0327	1,0534	1,0738	1,0938	1,1134	1,1231	1,1327	1,1517
7 000,0	1,0481	1,0694	1,0902	1,1107	1,1307	1,1406	1,1505	1,1699
8 000,0	1,0639	1,0857	1,1070	1,1279	1,1485	1,1586	1,1686	1,1885
9 000,0	1,0801	1,1024	1,1242	1,1456	1,1666	1,1770	1,1872	1,2075
10 000,0	1,0967	1,1194	1,1418	1,1637	1,1852	1,1958	1,2063	1,2270
11 000,0	1,1136	1,1369	1,1597	1,1822	1,2042	1,2150	1,2258	1,2470
12 000,0	1,1309	1,1547	1,1781	1,2011	1,2236	1,2347	1,2457	1,2674
13 000,0	1,1485	1,1730	1,1970	1,2205	1,2435	1,2549	1,2661	1,2884
14 000,0	1,1666	1,1917	1,2162	1,2403	1,2639	1,2755	1,2871	1,3098
15 000,0	1,1852	1,2108	1,2360	1,2606	1,2848	1,2967	1,3085	1,3318
16 000,0	1,2041	1,2304	1,2562	1,2814	1,3062	1,3184	1,3305	1,3544
17 000,0	1,2235	1,2505	1,2769	1,3028	1,3281	1,3406	1,3530	1,3775
18 000,0	1,2434	1,2710	1,2981	1,3246	1,3506	1,3634	1,3761	1,4011
19 000,0	1,2637	1,2921	1,3198	1,3470	1,3736	1,3868	1,3998	1,4254
20 000,0	1,2846	1,3136	1,3421	1,3700	1,3973	1,4107	1,4240	1,4503
21 000,0	1,3059	1,3357	1,3649	1,3935	1,4215	1,4353	1,4489	1,4759
22 000,0	1,3278	1,3584	1,3883	1,4176	1,4463	1,4605	1,4745	1,5021

Tabla 5. Factores de conversión

Tabla II-4-1-2. Velocidades aerodinámicas para la construcción del área de espera

<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
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).		

Tabla 6. Velocidades para la construcción del área de espera

Una vez obtenidos la velocidad y el factor de conversión, se construye en una hoja de cálculo la tabla I-4-3-Ap C-4 utilizando las fórmulas proporcionadas, haciendo las conversiones de unidades necesarias. La tabla 7 muestra los resultados (mismas unidades que la tabla I-4-3-Ap C-4).

Línea	Parámetro	
1	K	1.14060
2	V	484.755
3	v	0.13465417
4	R	1.94586956
5	r	3.96498467
6	h (km)	2.13360
7	w	112.6032
8	w'	0.03127867
9	E45	0.72334756
10	t	60
11	L	8.07925
12	ab	0.67327083
13	ac	1.48119583
14	gi1=gi3	7.40597917
15	gi2=gi4	10.9069875
16	Wb	0.15639333
17	Wc	0.34406533
18	Wd	1.06741289
19	We	1.79076045
20	Wf	2.51410801
21	Wg	3.23745557
22	Wh	3.04978357
23	Wo	3.77313113
24	Wp	4.49647869
25	Wi1=Wi3	4.95778224
26	Wi2=Wi4	5.39568357
27	Wj	6.11903113
28	Wk=Wl	6.84237869
29	Wm	7.56572625
30	Wn3	7.85117248
31	Wn4	8.28907381
32	XE	23.8535033
33	YE	14.2571744

Tabla 7. Cálculos asociados con la construcción de la plantilla de la espera

8.1.1. Construcción de la plantilla

Para la construcción de la plantilla, se utilizan los datos obtenidos anteriormente y representados en la tabla 3, y se siguen las instrucciones del apartado 3.3.2 del Apéndice C de la Sección 4 del Documento 8168 [19]. Estos pasos son comunes para todos los procedimientos de espera, sin importar la definición del punto de referencia. En este caso no se dibujarán los puntos E y R debido a que no son necesarios para el procedimiento

posterior, junto con alguna de las espirales. La plantilla obtenida se puede ver en la figura 19.

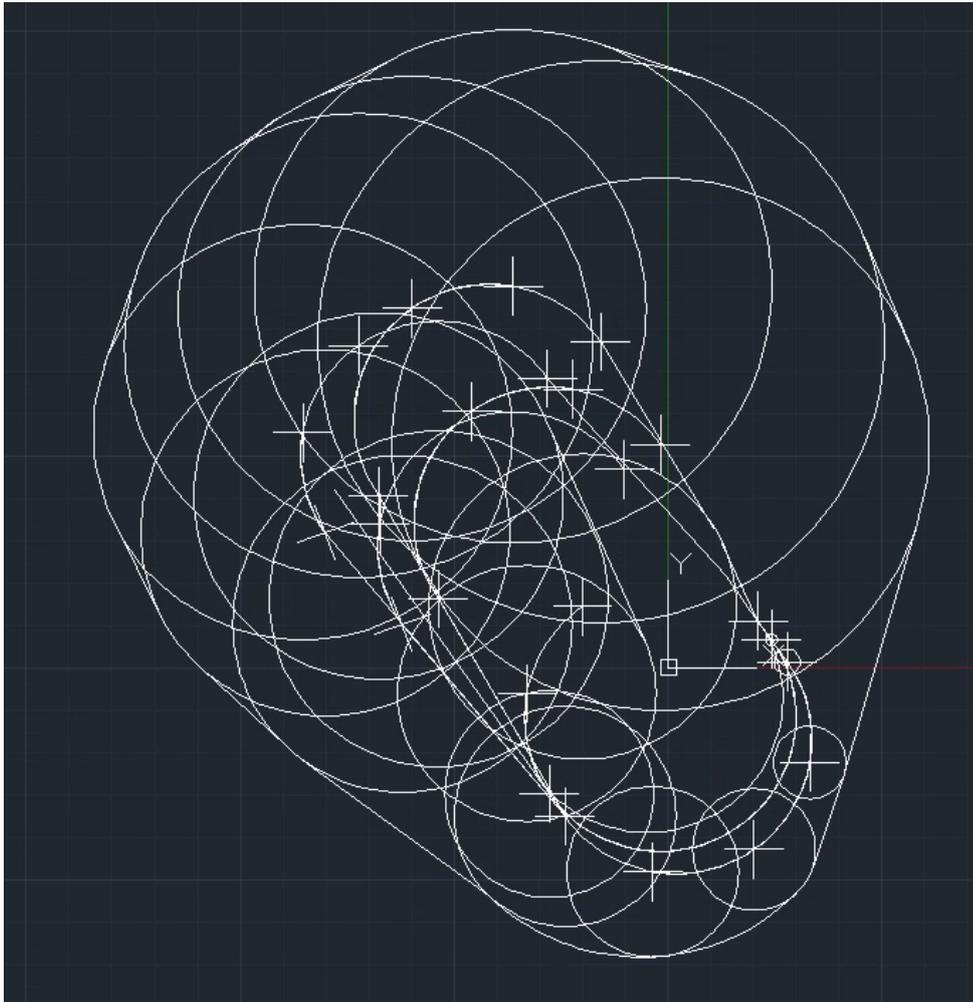


Figura 19. Plantilla

Se puede observar cómo la influencia de los vientos agranda sustancialmente la plantilla.

8.1.2. Construcción del área básica y el área tope

El paso siguiente a la construcción de la plantilla es el área básica. Este es el apartado más complicado y más largo de esta sección. Lo primero que hay que tener en cuenta es que el punto de referencia está definido por VOR/DME, por lo que se utiliza el apartado 3.3.4. Más concretamente, el apartado 3.3.4.1, ya que el procedimiento es hacia la instalación. Las distancias explicadas en el 3.3.4.1.1 se pueden obtener fácilmente de la carta y con cálculos básicos. Los resultados están resumidos en la tabla 8.

	Desde el VOR		
	Distancia oblicua		Distancia proyectada
Elemento	NM	km	km

P. Referencia	20	37.04	36.99
Final alejamiento	25	46.3	46.26

Tabla 8. Distancias desde el VOR

Con estos datos se obtienen los de la Tabla 9, necesarios para crear el área de tolerancia del punto de referencia y la distancia límite de alejamiento.

d1	0.923
d2	1.03875
Ds-d1	36.06277006
Ds+d1	37.90877006
Dls-d2	45.21787749
Dls+d2	47.29537749
d1+d2-0.93	1.03175

Tabla 9. Datos para la construcción del área de tolerancia del IAF

Con estos datos se construye el área de tolerancia del punto definiendo una figura casi rectangular alrededor del punto. Tras esto, se desarrollan los apartados 3.3.4.1.1.3, 3.3.4.1.1.4 a excepción del e (el VOR está muy alejado, no en el punto de referencia) y 3.3.4.1.1.5.

Tras esto se trata el área de entrada. En el caso de este procedimiento, solo se tendrá que realizar el apartado 3.3.4.1.2.6. El procedimiento de entrada por el Sector 2 está garantizado debido a que el alejamiento es de 1 min a 1 min 30 s, debido a que la altura es de 7000 pies. El apartado 3.3.4.1.3 no se realiza porque la entrada directa recíproca tampoco afecta a este procedimiento.

Para concluir con el área básica, se aplica la reducción del área para procedimientos de espera, que se corresponde con el apartado 3.4. Al estar el final del tramo de alejamiento marcado por la distancia del DME y no por un VOR o NDB, el apartado c no afecta a este caso.

El resultado de este apartado se puede observar en la figura 20.

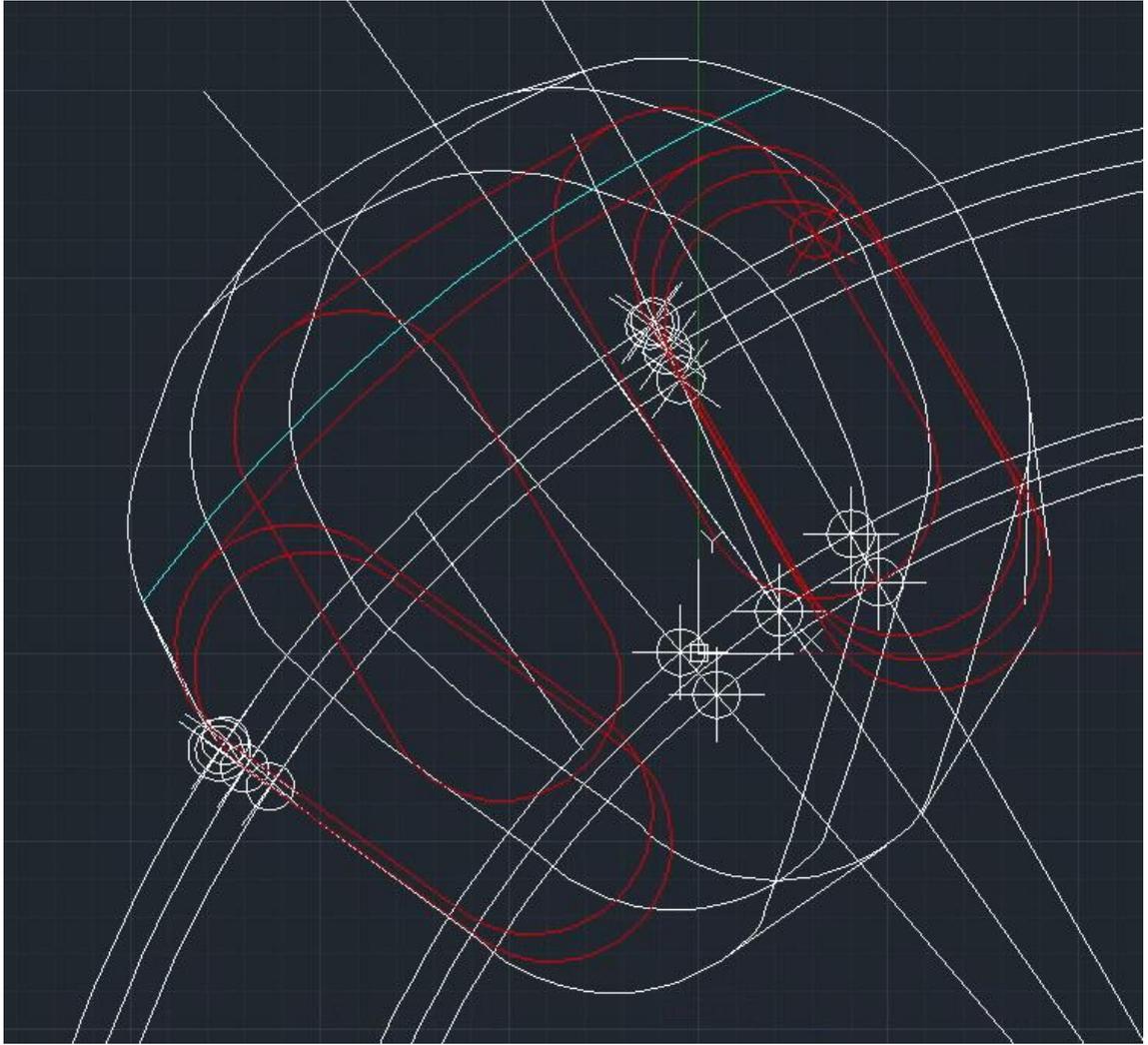


Figura 20. Área básica

Para realizar el área tope, lo primero es limpiar el dibujo, de manera que solo queden los bordes exteriores, suprimiendo el área que permite el DME. Después, se trazan 5 áreas mediante desfase en Civil 3d, separadas 1 NM entre ellas. Cada área representa un valor del MOC diferente, como se puede apreciar en la Tabla 10.

Tabla II-4-1-1. Margen mínimo de franqueamiento de obstáculos en el área tope por encima de terreno bajo y llano

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

Tabla 10. Margen mínimo de franqueamiento de obstáculos en el área tope

El resultado final, y el que se exportará a Google Earth, es el de la Figura 21.

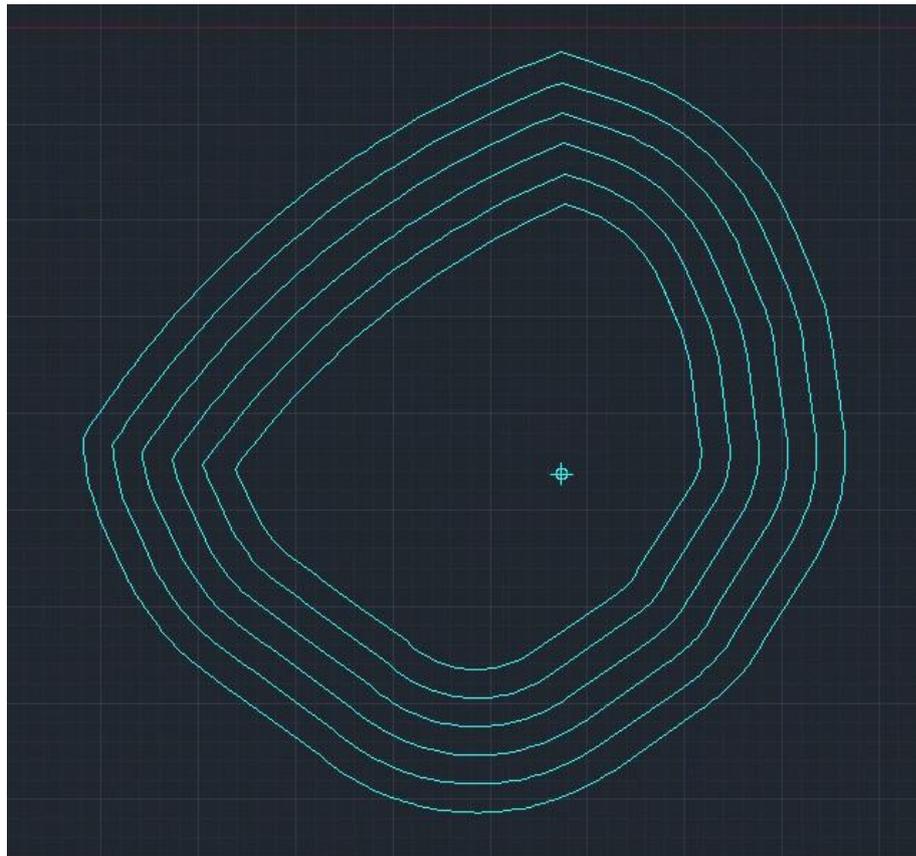


Figura 21. Área tope

8.1.3. Inserción en Google Earth

Para poder importar el resultado a Google Earth, se necesita georreferenciarlo. Esto se realiza mediante las herramientas correspondientes en Civil 3d. Se construye en Google Earth un marcado con las coordenadas del punto de referencia, se guarda y se importa al dibujo de Civil 3d. Entonces se mueve el área tope de modo que el punto de referencia coincida con el punto exportado. Se exporta en formato kmz y se abre en Google Earth. El resultado se puede ver en la Figura 22.

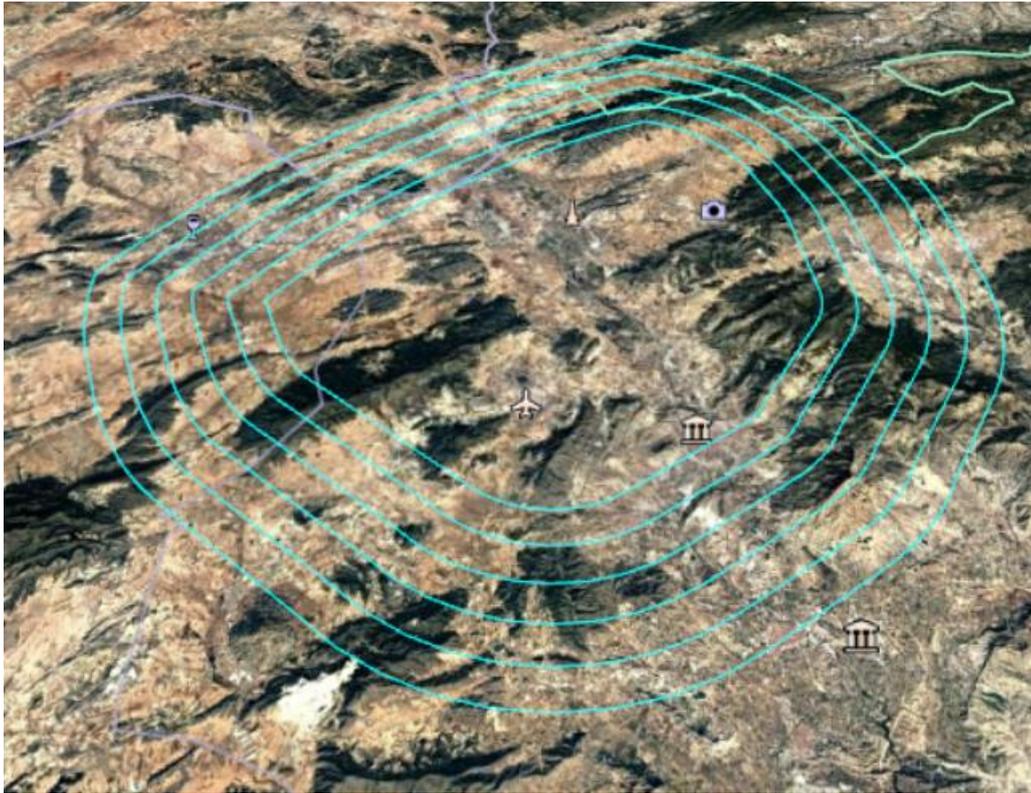


Figura 22. Visualización del área en Google Earth

Con esto ya es posible visualizar de manera cómoda la elevación del terreno en el área que afecta al circuito de espera. Se puede ver que hay bastante terreno montañoso. Para poder obtener los puntos más altos, se utiliza un polígono de Google Earth, variando la altura hasta encontrar los picos. El resultado de este proceso se puede ver en la Figura 23.



Figura 23. Comprobaciones de altitud

Se puede observar que hay varios picos a una altitud similar en torno a 1220-1240. Solo uno de estos picos cae dentro de la zona central del área. Es el que se observa en la Figura 24.



Figura 24. Punto más alto del área central

Esta zona está aproximadamente a 1230 m de altitud. Dado que las alturas de los puntos más altos de las demás áreas no superan por demasiado los 1240 m, ninguno es superior en altura a este una vez se tiene en cuenta que se le suman 300 m, dado que el siguiente valor es ya de 150 m, una diferencia mucho mayor que la que pueda haber entre estos picos. Con esto se obtiene que la altura por franqueamiento de obstáculos es de 1530 m o unos 5020 pies.

La altura de 5020 pies es inferior a la que aparece en la carta, con lo que se puede concluir que la altura presente en la carta está determinada por otros factores. Se utilizará en la carta la cifra de 7000 ft.

8.2. Franqueamiento de obstáculos en la aproximación visual

El siguiente paso que se realiza para el proyecto es la obtención de los datos que aparecen en la carta ILS Z LEAL [21] bajo el nombre de *En circuito (H) sobre 142*.

Para esto se determina la OCA para la aproximación visual en circuito. Para obtenerla, se dibuja el área de maniobra de aproximación visual en Civil 3d, se utilizan los datos de los obstáculos disponibles en el AIP para mediante MATLAB importarlos a Google Earth junto con el dibujo y se determina la OCA para cada una de las áreas según la categoría.

Lo primero que se necesita para dibujar el área de maniobra de aproximación visual es conocer la TAS para los aviones de cada categoría. La IAS depende solo de la categoría, y la TAS se obtiene aplicando un factor que depende de la altura. El factor se obtiene de la Tabla 5 ya mostrada, sumando 300 m a la altitud a la que se encuentra la pista, que según los datos publicados en el documento Datos del aeródromo del AIP [5] es de 43 m. Se multiplica este factor por la IAS de cada categoría y se le suma 46 km/h.

Para obtener el radio de viraje se utilizan las fórmulas de la sección 3.1.2.2. Primero se comprueba si el ángulo de inclinación obtenido para un régimen de viraje es menor que 20° con la fórmula del apartado b. En este caso, en todas las categorías es mayor salvo en A, en que es aproximadamente 20° . Se calcula entonces el régimen de viraje para 20° a cada velocidad y el radio de viraje correspondiente con la fórmula del apartado c. Con esto se puede obtener el radio desde el umbral utilizando la fórmula que aparece en la tabla I-4-7-1 del documento. En la Tabla 11 se pueden observar los resultados.

Categoría de aeronaves/IAS (km/h)	A/185	B/250	C/335	D/380
TAS a 343 m + 46 km/h	238.97 8014	306.78 11	395.44 6674	442.38 7272
Régimen de viraje	3.0808 7163	2.3999 5418	1.8618 4543	1.6642 8971
Radio (r) de viraje (km)	1.2345 3804	2.0344 442	3.3803 7153	4.2305 2073
Tramo recto (km)	0.56	0.74	0.93	1.11
Radio (R) desde el umbral (km)	3.0290 7608	4.8088 8839	7.6907 4306	9.5710 4147

Tabla 11. Resultados de los cálculos según la categoría

8.2.1. Dibujo en Civil 3d

La realización del dibujo del área de maniobras de aproximación visual es muy sencilla, y está explicada en el apartado 7.2 del Documento 8168 [19]. Lo primero es obtener las coordenadas de ambos umbrales del documento Datos del aeródromo [5] e insertarlas en AutoCAD Civil 3d. Las coordenadas se pueden observar en la Tabla 12, extraída directamente del documento referenciado.

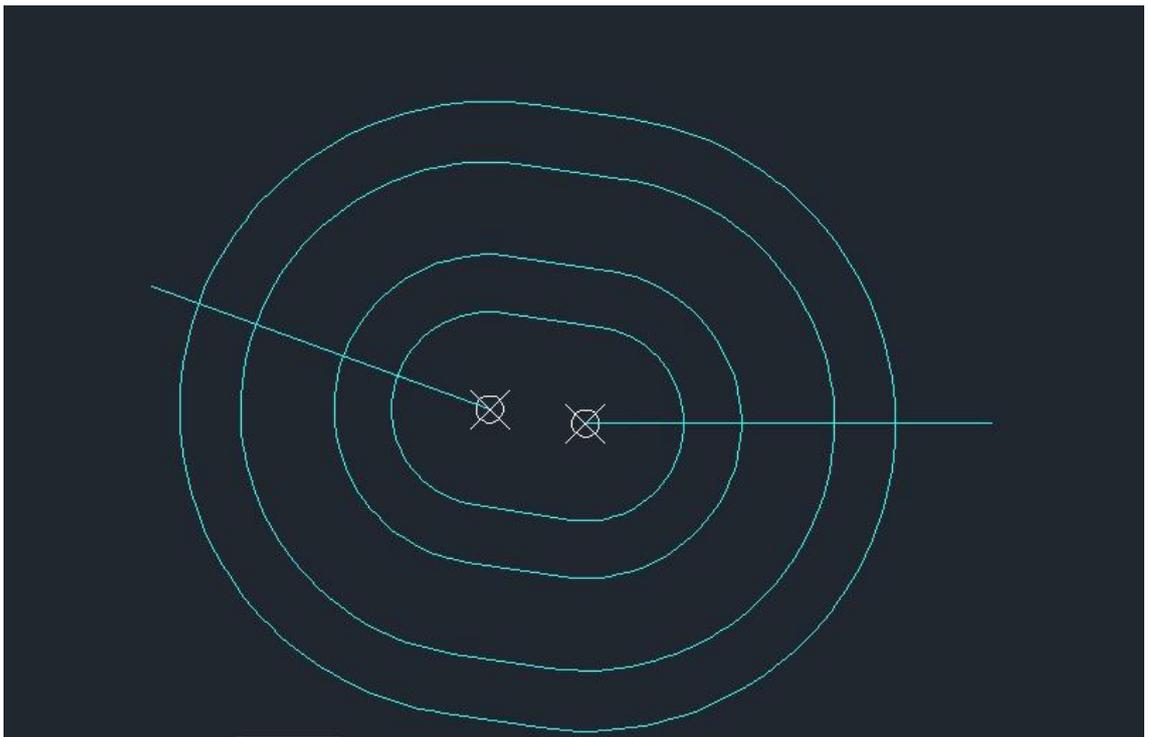
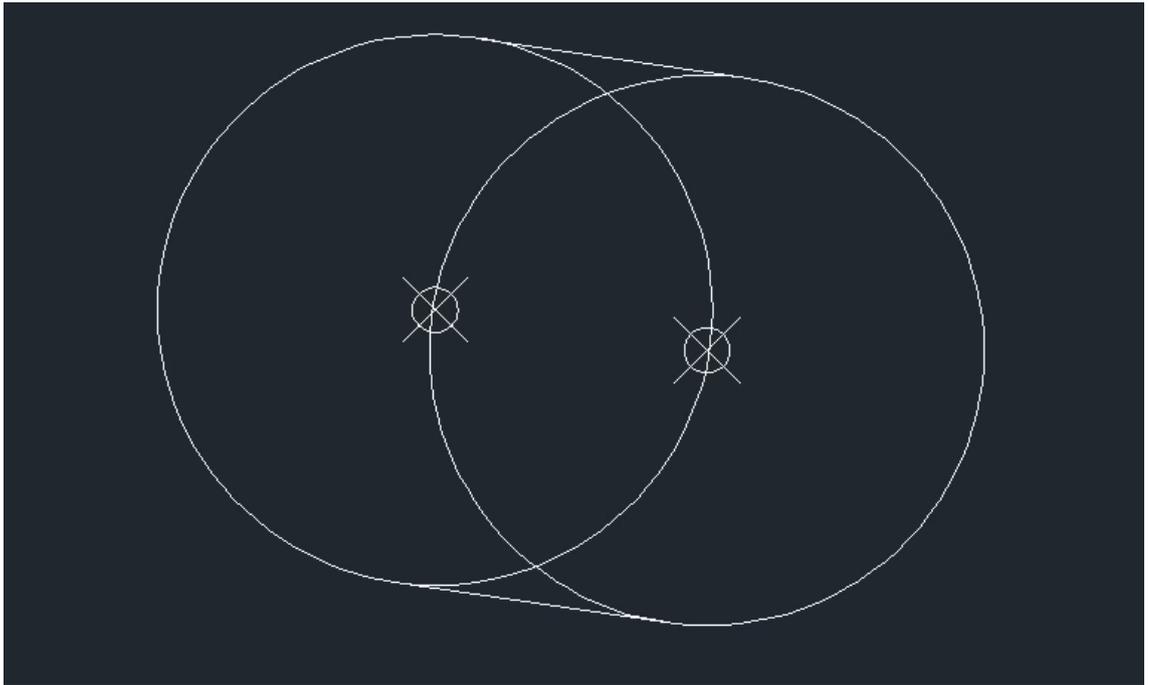
RWY	Orientación Direction	DIM (m)	THR PSN	THR ELEV TDZ ELEV	SWY (m)	CWY (m)	Franje (m) Strip (m)	OFZ	RESA (m)	RWY/SWY SFC PCN
10	100.04° GEO 100° MAG	3000 x 45	381704.27N 0003429.99W	THR: 43.2 m / 142 ft TDZ: 43.2 m / 142 ft	No	60 x 150 (1)	3120 x 300 (2)	Si // Yes	240 x 150 (2)	RWY: ASPH (4) SWY: No
28	280.06° GEO 280° MAG	3000 x 45	381647.30N 0003228.45W	THR: 13 m / 44 ft TDZ: No	No	60 x 150 (3)	3120 x 300 (2)	No	240 x 150 (2)	RWY: ASPH (4) SWY: No

Tabla 12. Datos de los umbrales

Entonces, se procede a crear dos puntos con esas coordenadas, se dibuja un círculo desde cada punto con el radio de a categoría A y se unen ambos círculos con rectas tangentes. Después se realizan varios desfases del contorno obtenido para obtener las áreas de las demás categorías. Por último, se reduce el área según los radiales que se indican en la Figura 25 [21], mostrada en la carta del procedimiento. Las diferentes etapas del dibujo se pueden observar en la Figura múltiple 26.



Figura 25. No en ciercuito



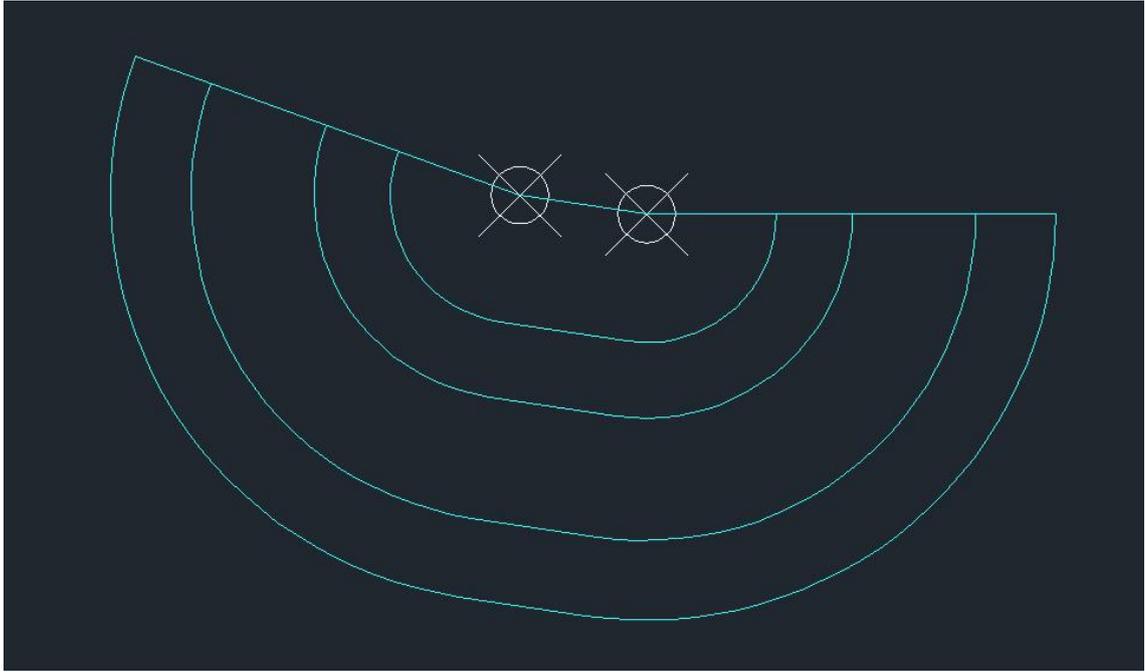


Figura 26. Diferentes etapas del dibujo del área en circuito

8.2.2. Inserción de los obstáculos y el dibujo en Google Earth

Los obstáculos se pueden descargar del AIP, en el documento *Item 10. OBTÁCULOS DEL AERÓDROMO*, obteniendo un archivo csv que se puede abrir en forma de Excel. En la hoja de cálculo se deben separar los términos de la latitud y la longitud en diferentes columnas y crear una columna que contenga el dato en forma decimal, para ser procesada más fácilmente por MATLAB. En la Tabla 13 se puede comprobar el aspecto de la hoja de cálculo tras realizar estos cambios.

Latitud_Latitude	Latitude1	Latitude2	Latitude3	Latitude_dec
381721.5133N	38	17	21.5133	38.2893093

Longitud_Longitude	Longitude1	Longitude2	Longitude3	Longitude_dec
0003628.6535W	0	36	28.6535	-0.60795931

Tabla 13. Ejemplo de obtención de latitud y longitud decimal

Se utiliza MATLAB para poder insertar los datos en Google Earth. Esto se hace mediante el script que se puede observar en la Figura 6. Este script utiliza funciones de la librería kml con la función `kml_write_polyline`.

```
1 - clear
2 - filename='LE_AD_2_10_LEAL_en.csv'
3 - wpt=xlsread(filename);
4
5 - wp(975).name=num2str(0);
6 - wp(975).desc=num2str(0);
7 - wp(975).lat=0;
8 - wp(975).lon=0;
9 - wp(975).alt=0;
10
11 - for i=1:975
12 -     wp(i).name=num2str(i);
13 -     wp(i).desc=num2str(i);
14 -     wp(i).lat=wpt(i,4);
15 -     wp(i).lon=wpt(i,9);
16 -     wp(i).alt=wpt(i,14);
17
18 - end
19
20 - attr=create_attr();
21 - attr.extrude=true;
22 - filename2='waypoints.kml'
23 - kmlwrite_polyline(wp,filename2,attr)
```

Hay que tener en cuenta que, por la manera en que la tabla está estructurada y cómo lee MATLAB los valores con la función `xlsread`, los puntos serán llamados por su número de posición en la tabla restándole 1, y así aparecerán en Google Earth. Teniendo esto en cuenta es fácil localizarlos en la tabla. También hay que mencionar que la función no lee bien las palabras del Excel, por lo que en la descripción se le asigna lo mismo que en el nombre, dado que no afectará a la hora de localizar los puntos en Google Earth.

Una vez en Google Earth, se obtiene lo que se observa en la Figura 27.

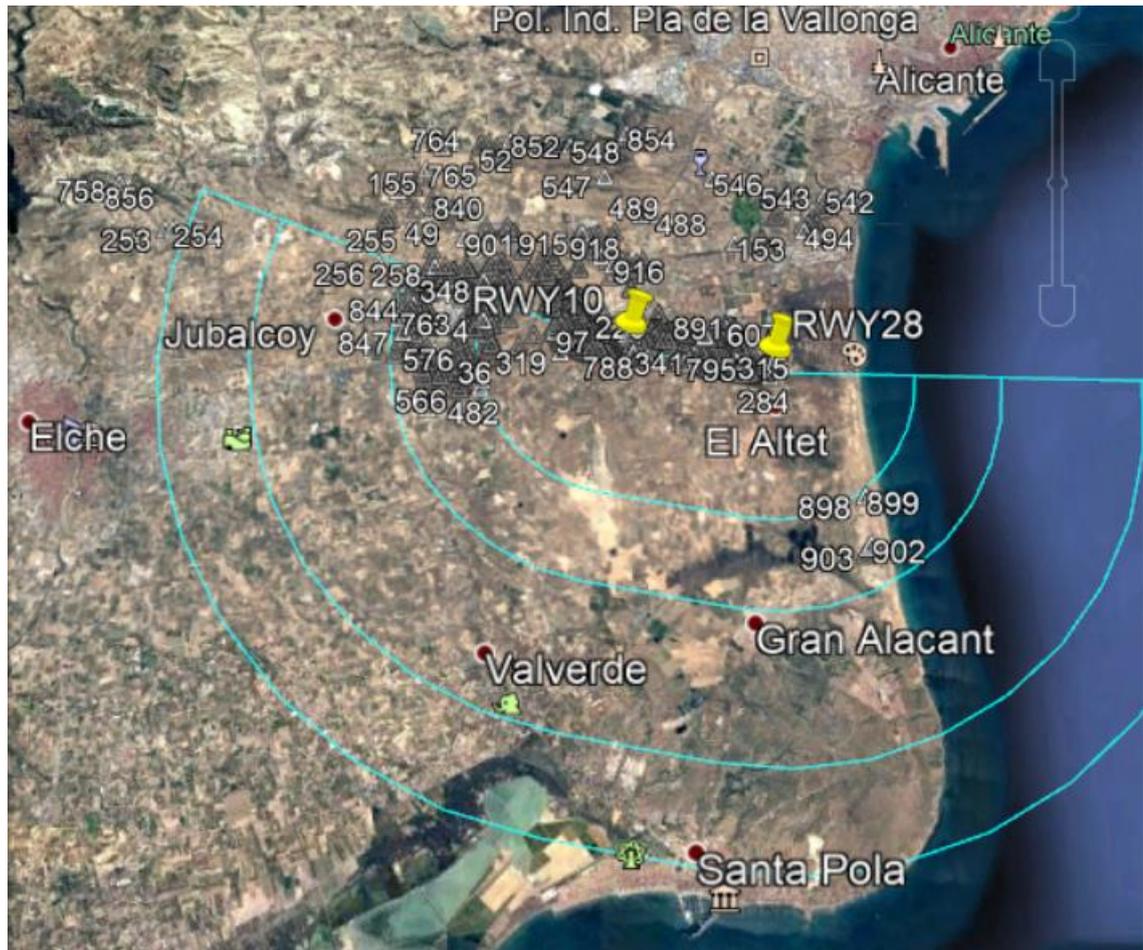


Figura 27. Obstáculos y área I

Mediante la herramienta Polígono se pueden crear diferentes formas de altura ajustable, para así localizar los puntos que sobresalen en cada área. Los resultados de hacerlo se pueden observar en la Tabla 14 (los puntos están nombrados igual que en Google Earth y Matab, no con la fila de Excel).

Categoría	Número	Identificador	Tipo	Latitud	Longitud	Elevación
A	6	LEAL-OBS-00540-002-2014	Antena	381722.7091N	0003631.0641W	94.663
B	844	LEAL-OBS-01187-007-2014	Tendido Eléctrico	381759.8766N	0003714.5980W	129.305
C	256	LEAL-OBS-00701-001-2014	Antena	381802.2143N	0003759.5293W	140.94
D	256	LEAL-OBS-00701-001-2015	Antena	381802.2143N	0003759.5293W	140.94

Tabla 14. Obstáculo más alto para cada categoría I

Utilizando los márgenes de franqueamiento de obstáculos proporcionados en la Tabla I-4-7-3 del Documento 8168, que se puede observar en la Tabla 15, se obtiene la OCA para cada categoría, representada en la Tabla 16.

Tabla I-4-7-3. MOC y OCA/H para aproximación visual (en circuito)

<i>Categoría de aeronaves</i>	<i>Margen de franqueamiento de obstáculos m (ft)</i>	<i>Límite inferior de OCH sobre la elevación del aeródromo m (ft)</i>	<i>Visibilidad mínima km (NM)</i>
A	90 (295)	120 (394)	1,9 (1,0)
B	90 (295)	150 (492)	2,8 (1,5)
C	120 (394)	180 (591)	3,7 (2,0)
D	120 (394)	210 (689)	4,6 (2,5)
E	150 (492)	240 (787)	6,5 (3,5)

Tabla 15. MOC y OCA/H para aproximación visual

Categoría	OCA (m)	OCA (ft)
A	184.663	605.849757
B	219.305	719.504616
C	260.94	856.10239
D	260.94	856.10239

Tabla 16. OCA visual I

Si se comparan estos resultados con los de la carta, se puede ver que son bastante menores. Esto puede ser debido a que se haya considerado también la zona que se ha descartado antes. Por esto, se obtendrá también la OCA considerando la zona descartada. En la Tabla 17 se pueden observar los puntos y en la Tabla 18 las OCAs. La zona en Google Earth se puede ver en la Figura 10.



Figura 28. Obstáculos y área II

Categoría	Número	Identificador	Tipo	Latitud	Longitud	Elevación
A	913	LEAL-OBS-01243-008-2014	Tendido Eléctrico	381815.0948N	0003503.4782W	131.593
B	547	LEAL-OBS-00999-001-2014	Antena	381904.4863N	0003443.8903W	216.955
C	764	LEAL-OBS-01184-001-2014	Tendido Eléctrico	381926.8456N	0003707.2069W	231.196
D	764	LEAL-OBS-01184-001-2014	Tendido Eléctrico	381926.8456N	0003707.2069W	231.196

Tabla 17. Obstáculo más alto para cada categoría II

Categoría	OCA (m)	OCA (ft)	OCA (ft) (sin contar zona restringida)
A	221.59 3	727.01117 8	605.84975 7
B	306.95 5	1007.0702 4	719.50461 6
C	351.19 6	1152.2178 8	856.10239
D	351.19 6	1152.2178 8	856.10239

Tabla 18. OCA visual I

Se puede observar que, si se considera también la zona restringida, la OCA se asemeja más a la que aparece publicada en la carta, aun estando igualmente por debajo. En todo caso, no cabe duda de que se acerca mucho más el resultado si se utilizan ambas zonas para localizar los obstáculos. Esto puede significar que se tuvieron en cuenta puntos de esta área para asegurar que en caso de desvío un avión estaría a salvo, pero aun así restringiendo el vuelo en esa zona. También es posible que exista otro motivo que haga que el área publicada difiera de la obtenida.

8.3. OCA/H de aproximación

El siguiente paso es la obtención de la OCA/H, que garantiza el franqueamiento de obstáculos desde el comienzo de la aproximación final hasta el final del tramo intermedio de aproximación frustrada. Para obtenerla se utilizará el método de las OAS, que es el mismo que se utiliza para las aproximaciones con ILS, tal como se indica en el Capítulo III-3-6. Este consiste en un conjunto de superficies de evaluación de obstáculos (OAS). Hay que analizar que obstáculos atraviesan la superficie más alta en cada punto.

Lo primero que se necesita es obtener los datos necesarios para obtener las constantes de los planos de las OAS. Estos datos pueden ser obtenidos de Datos del aeródromo [5] o de la carta [21] salvo por la anchura de rumbo, que se supone es en la base 210 m.

La colocación del FPAP puede causar problemas, ya que no es sencillo colocarlo, dado que el procedimiento es confuso. El GARP se sitúa 305 m después del FPAP, y la posición del FPAP depende de si hay o no localizador y en qué posición está. De por sí, la distancia entre RWY 10 y el extremo de la pista más 305 m se acerca mucho a 3400 m, y si sobrepasa 3400 m hay que pasar a 3600. Como es preferible proteger de más a proteger de menos, se ha optado por asignar un margen de error a la posición del FPAP y, por tanto, del GARP. Con esto se asume una distancia Umbral-GARP de 3600 m.

	Elevación ARP (m/ft)	Elevación THR (m/ft)	Ángulo GP (º)
m	43	43.2	3
ft	142	142	

Distancia LOC/GARP (m)	Altura Referencia ILS (m)	Pendiente frustrada (%)
3600	15	2.5

Tabla 19. Datos para obtener las OAS

Con estos datos, se buscan en la versión de 1993 del Documento 8168 [20] las tablas que contienen las constantes y coordenadas que se necesitan. Las constantes se utilizan para definir las ecuaciones de los planos que se utilizarán para analizar las intersecciones con los obstáculos. Las ecuaciones de estos planos son de la forma:

$$z = A * x + B * y + C$$

Las constantes del caso se estudio son las de la página III-I-95 de [20] para una frustrada de 2.5°. Los datos que interesan son los de la Tabla 9.

GBAS	A	B	C
W	0.0285	0	-8.01
X	0.028249	0.184514	-16.91
Y	0.024252	0.212726	-21.78
Z	-0.025	0	-22.5

	C	D	E	C''	D''	E''
X	281	-286	-900	10807	5438	-12900
Y	49	135	205	78	892	2983

Tabla 20. Constantes de las OAS.

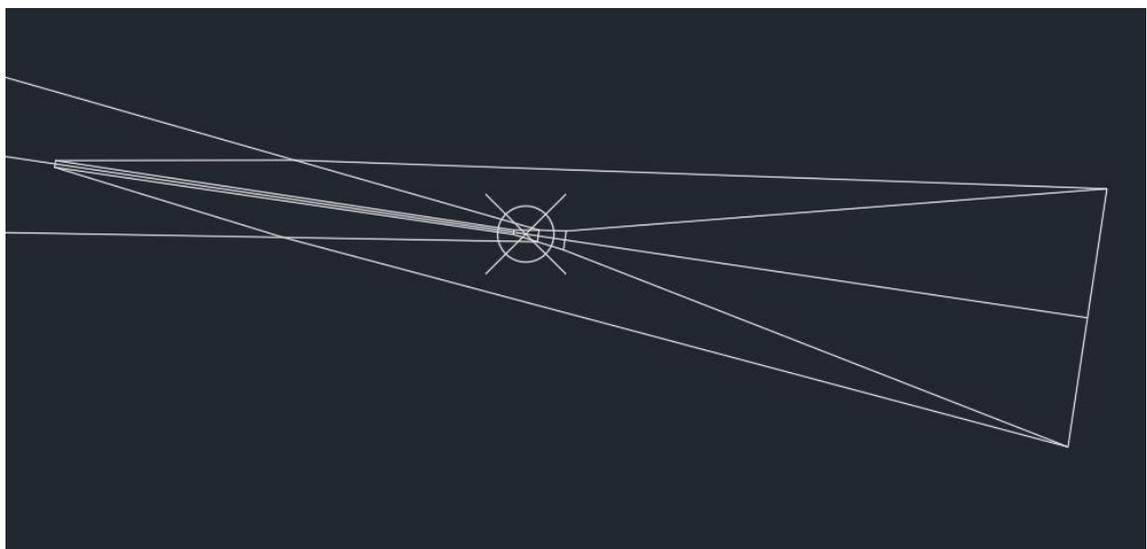
En este caso, la modificación de las constantes no es necesaria por los siguientes motivos:

- Se asumen condiciones normalizadas de aeronaves, por lo que no es obligatorio ajustar el coeficiente según las dimensiones de aeronaves específicas.
- La altura del punto de referencia ILS (RDH) es de 15 m, por lo que siguiendo la fórmula indicada en el documento la modificación se anula.
- Al haberse asumido un ancho de 210 m de base en el umbral no se realiza el ajuste correspondiente.
- Al evaluarse CAT I únicamente, no se necesita el ajuste del piloto automático.

- La pendiente de frustrada es la nominal, por lo que tampoco se aplica el ajuste correspondiente.

8.3.1. Dibujo de la plantilla en Civil 3d e inserción en Google Earth

El siguiente paso es el dibujo en Civil 3d de la plantilla de las OAS. Se puede dibujar mediante las constantes de la Tabla 9, siguiendo las instrucciones de la Figura III-3-6-10 del Doc. 8168 [19]. Para ello se importa el marcador del umbral RW10 de Google Earth a Civil 3d, y a partir de él se sitúan los puntos según sus coordenadas en el sistema de referencia del umbral. El dibujo que resulta de situar las coordenadas y unirlos se muestra en la Figura 29, comparándolo con el de la Figura III-3-6-10.



A. Categoría I/ángulo GP 3°/AZM THR 3 000 m/pendiente de aproximación frustrada de 2,5%.

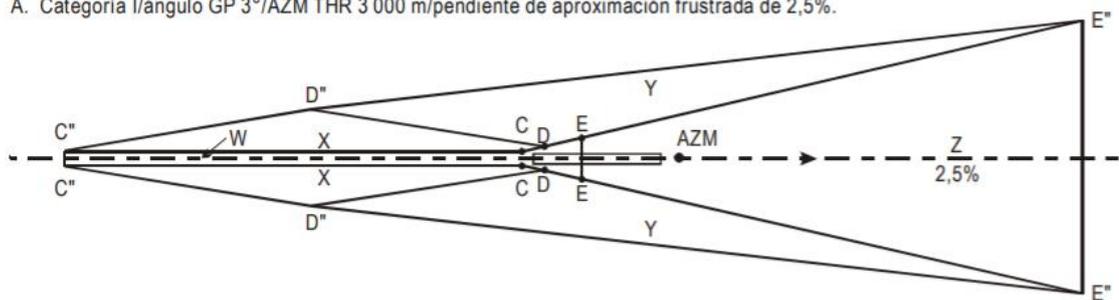


Figura 29. OAS (a) y ejemplo OAS (b) [19]

Una vez se obtiene el dibujo, se exporta a kml y se abre en Google Earth. Con el dibujo se comprobará manualmente que los obstáculos relevantes caen en el área que corresponde.

8.3.2. Perforación de los obstáculos en Excel

Utilizando los datos del archivo csv descargado anteriormente, se procede a calcular las coordenadas de los obstáculos en el sistema de referencia del umbral. Se aprovecha el método de obtención de la longitud y latitud decimales de la sección anterior para facilitar los cálculos. Para realizar el cálculo de coordenadas, se adaptan las fórmulas de la función ortodistazi a Excel. A continuación se muestran la función ortodistazi y el aspecto de la parte en Excel con datos de la primera fila.

```
function [s,a12,a21] = orto_distazi(lat1,lon1,lat2,lon2)
% Compute the distance between two points assumming
% a perfectly spherical earth and Haversine approximation.
% Compute also forward azi se admuth, and backward azimuth.
%
% s = orto_distazi(lat1,lon1,lat2,lon2)
% [s,a12] = orto_distazi(lat1,lon1,lat2,lon2)
% [s,a12,a21] = orto_distazi(lat1,lon1,lat2,lon2)
%
% s = distance in meters (inputs may be scalars, vectors, or matrices)
% a12 = azimuth in degrees from first point to second point (forward)
% a21 = azimuth in degrees from second point to first point (backward)
%       (Azimuths are in degrees clockwise from north.)
% lat1 = GEODETIC latitude of first point (degrees)
% lon1 = longitude of first point (degrees)
% lat2, lon2 = second point (degrees)

% Haversine:
% a = sin2(dlat/2) + cos(lat1).cos(lat2).sin2(dlong/2)
% c = 2.atan2(sqrt(a), sqrt(1-a))
% d = R.c

R = 6371000;

% Convert fom degrees to radians
% lon1=lon1* (pi/180);
% lon2=lon2* (pi/180);
% lat1=lat1* (pi/180);
% lat2=lat2* (pi/180);

dlat = (lat2-lat1);
dlon = (lon2-lon1);

a = sind(dlat/2) * sind(dlat/2) + ...
    sind(dlon/2) * sind(dlon/2) * cosd(lat1) * cosd(lat2);
c = 2 * atan2(sqrt(a),sqrt(1-a));
s = R * c;

if nargin > 1
    dlon = lon2 - lon1
    y = sind(dlon) * cosd(lat2)
    x = cosd(lat1) * sind(lat2) - sind(lat1) * cosd(lat2) * cosd(dlon)
    az=atan2(y, x)*180/pi
    a12 = mod(az,360)
end

if nargin > 2
    dlon = lon1 - lon2;
    y = sind(dlon) * cosd(lat1);
    x = cosd(lat2) * sind(lat1) - sind(lat2) * cosd(lat1) * cosd(dlon);
    az=atan2(y, x)*180/pi;
    a21 = mod(az,360);
end

end
```

dlat	dlon	a	c	Distancia	y	x	az	a12
0.00478981	0.03296208	5.27239E-08	0.00045923	2925.77926	0.00045155	8.36784E-05	79.5013161	280.498684

Con esto más las direcciones de los ángulos de pista se pueden obtener las coordenadas X e Y de cada obstáculo. Los ángulos de la pista se basan en utilizar 100.4° (ángulo geográfico de la pista), como X-, pudiéndose deducir fácilmente el resto.

Una vez se tienen las coordenadas de cada obstáculo, se utiliza la ecuación de cada una de las superficies OAS para obtener su altura en ese punto, y se toma la altura de la superficie OAS más alta. Se utilizan las constantes de la primera de las Tablas 9, y se insertan en la ecuación mencionada al principio de la sección.

Problema encontrado. Durante esta parte del procedimiento se calcularon las alturas de los planos sin tener en cuenta que hay dos planos X e Y simétricos. Añadiendo un valor absoluto a la fórmula en Excel se soluciona el problema.

Una vez se tiene la altura del plano más elevado en cada punto se obtiene la altura respecto del umbral de los obstáculos, restando la altura del umbral a la de los obstáculos. Para los obstáculos de frustrada, localizados a X menores de -900 m, se emplea además la fórmula del apartado 1.4.8.8.2.1, que utiliza la altura, la distancia y los ángulos de planeo y de frustrada para obtener la altura equivalente. Si el valor de la resta de la altura del plano y la del obstáculo respecto del umbral es negativo, los obstáculos están perforando. Se toma la altura más alta de entre los obstáculos que perforan y se le suman el MOC de la tabla II-1-1-2 de documento 8168 [19] y se obtiene la OCA/H. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

	A	B	C	D
m	103.651	108.651	112.651	116.651
ft	340.062347	356.466547	369.589907	382.713267

Tabla 21. OCA/H

Comparando estos resultados con los presentes en la carta ILS Z LEAL se comprueba que la diferencia entre ambos no es demasiado grande, lo que valida la metodología seguida.

8.4. Aproximación inicial

Las instrucciones sobre cómo calcular el franqueamiento de obstáculos de las diferentes fases de la aproximación se encuentran repartidas por diferentes capítulos y secciones del 2 de Doc. 8168. La información principal se encuentra en la Parte III, en el Capítulo 2 de la Sección 1 y en el Capítulo 6 de la Sección 3. La tabla III-1-2-9, que se proporciona en la Tabla 22, que se encuentra en el Capítulo 2, proporciona los datos de las semianchuras, que son los que proporcionan las medidas de área primaria y la secundaria de las superficies del MOC.

RNP	En ruta (Continental y remota)			STAR/SID (>56 km del ARP)			STAR/SID/IF/ IAF/ aproximación frustrada (<56 km del ARP)			FAF			MAPt			Aproximación frustrada/SID (<28 km del ARP)		
	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W
2	3 704	2 964	9 260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1 852	1 482	6 482	1 852	1 482	6 482	1 852	1 482	4 630	-	-	-	-	-	-	1 852	1 482	3 704
0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	556	444	2 685	556	444	1 759	-	-	-

Tabla 22. Semianchura del área en metros

Problema encontrado. Un fallo muy parecido al anterior fue que no se aplicó las semianchuras se aplican a cada lado del tramo entre los waypoints. Lo que se hizo para solucionarlo fue aplicar la mitad de la semianchura a cada lado, lo que causó que el resultado fuera incorrecto. Esto provocó que haya que repetir el proceso de nuevo.

El procedimiento básico para dibujar la superficie en Civil 3d es aplicar la semianchura una vez a cada lado del segmento que une los puntos de referencia en la zona comprendida entre las perpendiculares a estos segmentos en cada waypoint. Cuando se realice este proceso en todos los segmentos, se notará que en un lado las áreas se cruzan y en el otro están separadas. Lo que hay que hacer es unir con arcos tangentes las áreas, borrando las perpendiculares y obteniendo un área continua. En la Figura 30 se muestra el dibujo a falta de eliminar las perpendiculares.

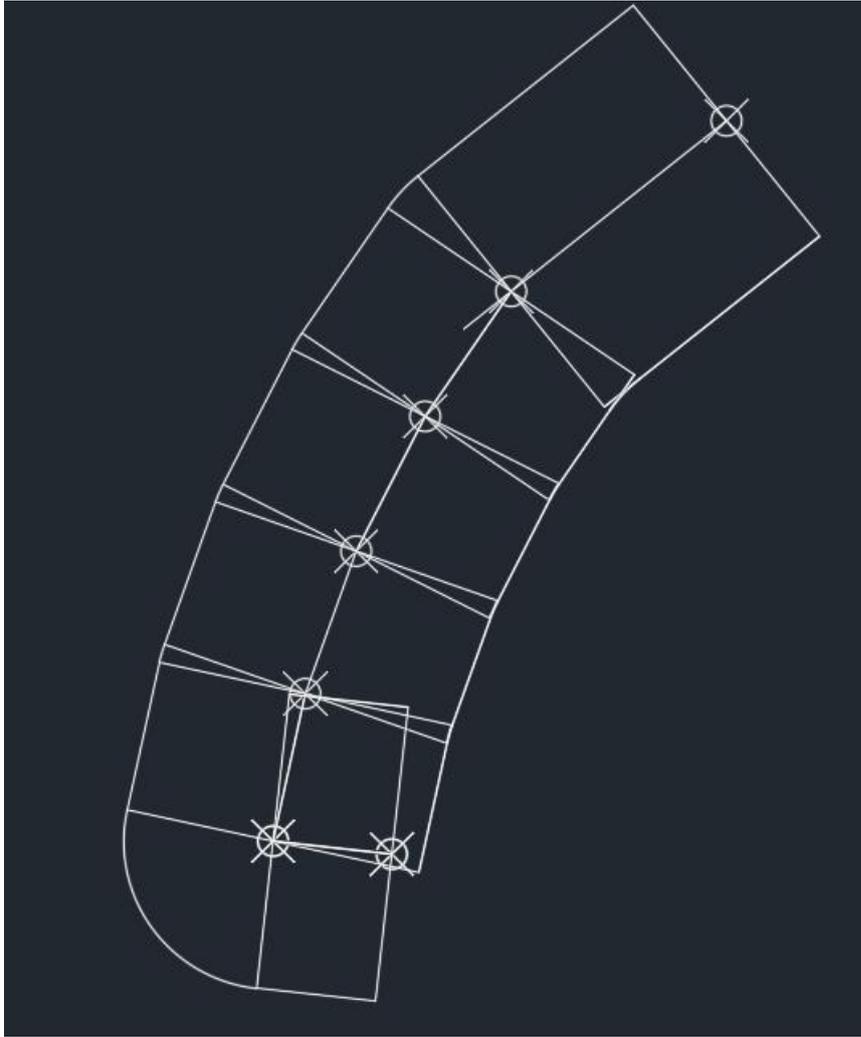


Figura 30. Área primaria de la aproximación inicial

Una vez se eliminan las rectas interiores, se hace un desfase para crear el área secundaria y se unen en los extremos. Esta área, como se explicó anteriormente, tiene una pendiente, ya que el MOC va desde el valor del área primaria hasta 0 en los extremos. Para simular esto, se divide el área secundaria en 10 áreas iguales. Con esto, se puede saber aproximadamente cuánto hay que sumar a cada obstáculo según en qué área caiga. Este proceso es más complicado de lo que parece, pues hay que unir manualmente cada uno de los segmentos que se crean para dividir el área en 10 con un arco de diferente radio, como se hizo con el área primaria. No resulta complicado, pero sí extremadamente largo para la simplicidad conceptual que tiene. El resultado se puede observar en la Figura 31.

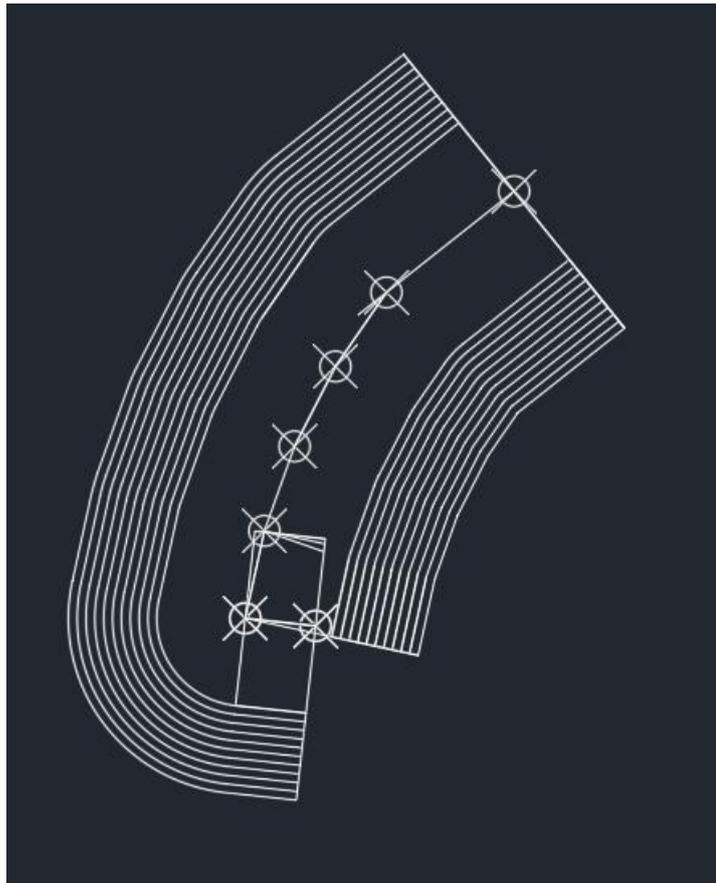


Figura 31. Áreas primaria y secundaria de la aproximación inicial

Antes de insertarlo en Google Earth, es conveniente obtener las plantillas de la aproximación intermedia y la protección de virajes, por lo que se explicarán ambos primero.

8.5. Aproximación intermedia

Las instrucciones sobre este procedimiento se pueden encontrar en el apartado 6.3.4 del III-3-6 (Parte-Sección-Capítulo). Básicamente expresa que el área primaria es la unión de la de la aproximación inicial y las superficies OAS. Y que el área secundaria llega a cero en su unión con las OAS. En la Figura III-3-6-2 se puede observar una representación gráfica del procedimiento (mostrado aquí en la Figura 32), que resulta algo difícil de interpretar a primera vista por las diferencias en las superficies OAS con respecto a las obtenidas en el proyecto, pero con un corto análisis se puede entender con claridad.

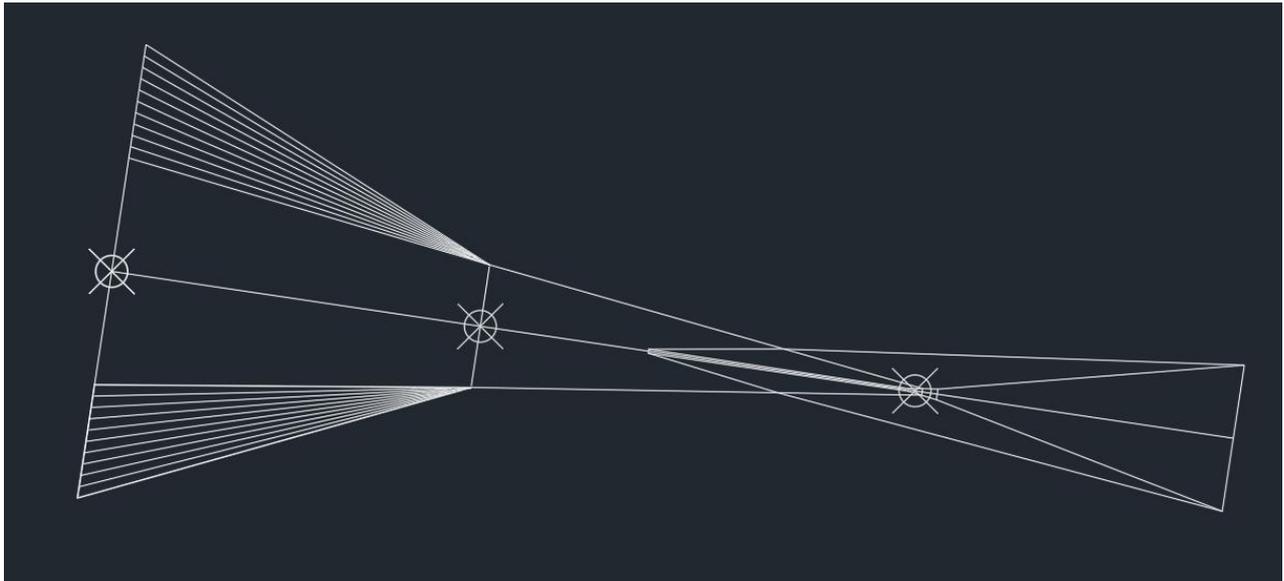


Figura 33. Áreas primaria y secundaria de la aproximación intermedia

8.6. Protección de viraje

Esta sección es complicada de todas en cuanto a recopilar la información se refiere, teniendo referencias a varios capítulos en varios de los apartados del Doc. 8168 que tratan sobre ello. Los criterios para seleccionar los virajes que se deben proteger están descritos en el apartado 2.1.3 del III-2-2 [19]. El IAF del procedimiento del proyecto está protegido por el circuito de espera, y no hay giro en el FAP, por lo que el único giro que hay que considerar es el viraje que hay justo antes de llegar al IF. Los virajes que hay que dar en los waypoints que imitan el arco DME son demasiado pequeños, por lo que tampoco se tienen que proteger.

La protección de virajes se puede realizar tanto por espiral de vientos como por círculos limitadores, pero como el primero es extremadamente complicado de realizar a mano se utilizará el segundo método. Se necesitan las siguientes fórmulas para hacer los cálculos:

- $E_{\theta} = (\theta/R) * (w/3600)$ km (NM). E_{θ} efecto del viento, θ ángulo de viraje, w velocidad del viento. Se encuentra en el apartado 3.3.2 del I-2-3.
- $r = V/(20 \pi R)$. r radio de viraje, V TAS, R régimen de viraje. Se encuentra en el apartado 3.1.2.2 c del I-2-3.
- $w = (12h + 87)$ km/h. h altura en miles de metros. Se encuentra en el apartado 3.3.3.3 del I-4-3.

Con estas fórmulas se consiguen los datos necesarios para seguir el procedimiento explicado en el 3.3.3 del I-2-3. En la tabla 23 se muestran los resultados de los cálculos y en la Figura 34 el dibujo.

	Rafo (r)	Regimen viraje (R)	TAS	Velocidad del viento (w)	Efecto del viento (km)	E (m)
km	3.349625	1.5	315.694719	105	1.75	1750

RAIZ(r ² +E ²)	3779.21786
r+E	5099.625
r+2E	6849.625

Tabla 23. Resultados de las operaciones para la protección de viraje

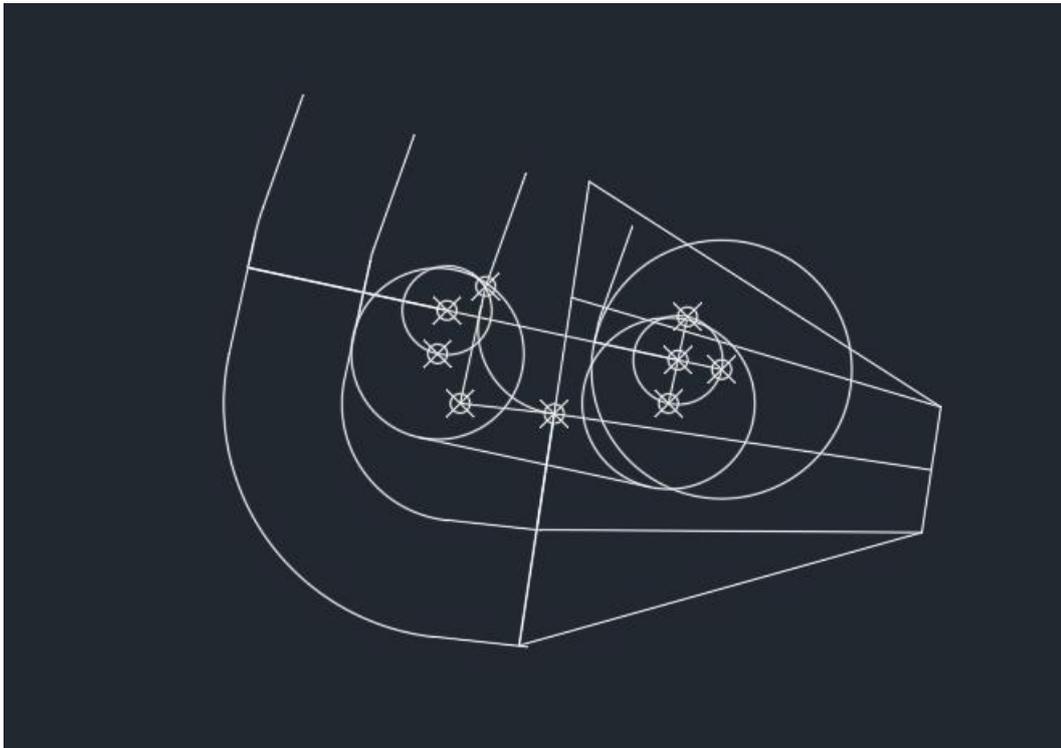


Figura 34. Protección de viraje

En la Figura 34 se muestra cómo la protección de virajes por círculos limitadores protege menos en este caso que el arco tangente a los segmentos de giro, por lo que no es necesario añadir nada a la plantilla de la aproximación.

8.7. Resultados del franqueamiento de obstáculos de la aproximación

Se procede a insertar las plantillas de las aproximaciones inicial e intermedia a Google Earth, y se sigue el mismo procedimiento que se ha usado en las secciones anteriores, que no aportaría al trabajo repetir entero. En resumen, se construyen polígonos

de altura variable en Google Earth y se comprueba el obstáculo más elevado de cada sección. El obstáculo cuya altura más el MOC sume más es el que define el franqueamiento de obstáculos. El MOC para la aproximación inicial es de 300 m y el de la intermedia de 150 m en el área primaria, en la secundaria al alejarse se reduce a 0. Los obstáculos obtenidos se pueden ver en la Figura 35 y las alturas en la Tabla 24.

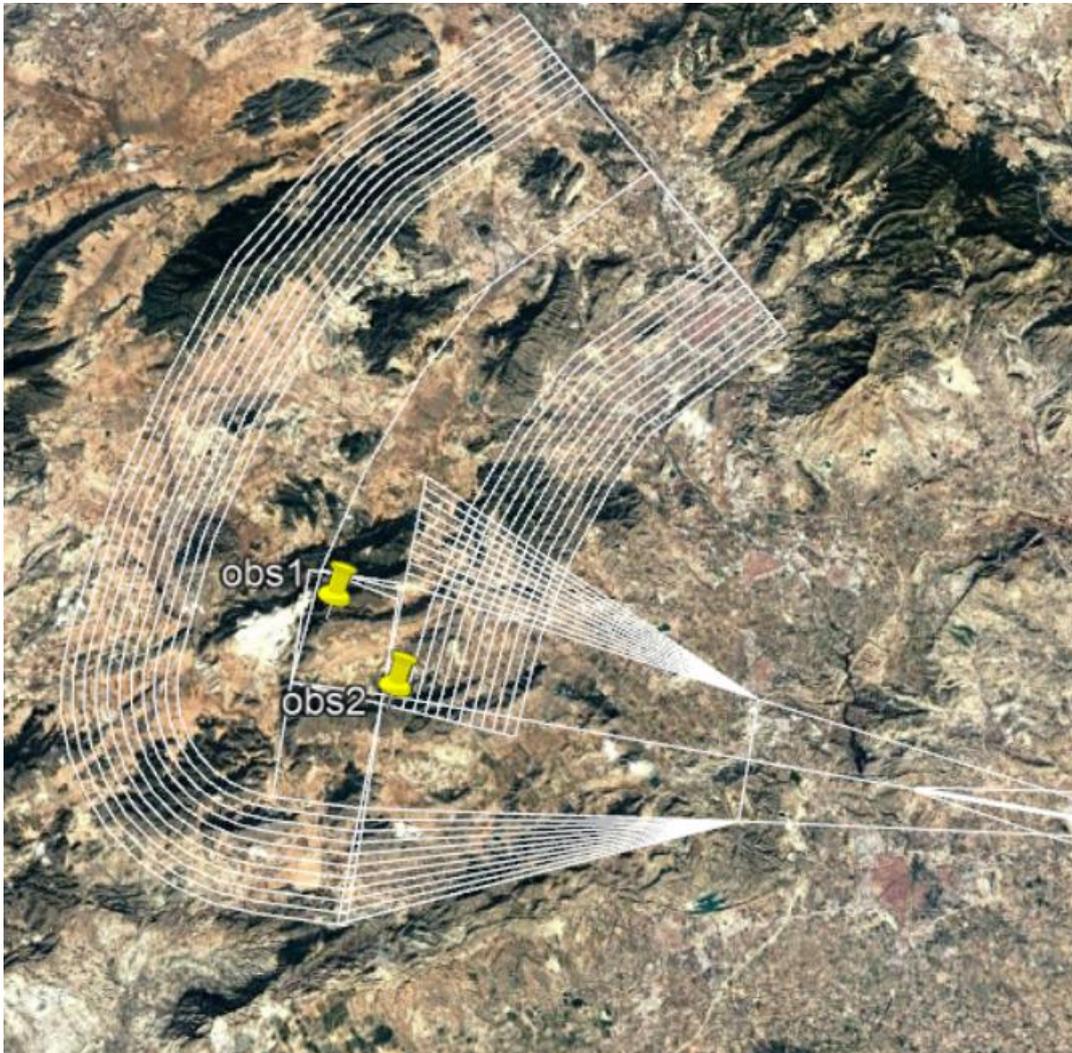


Figura 35. Obstáculos relevantes en la aproximación

	Aproximación inicial	Aproximación intermedia
altura del obstáculo (m)	1055	1050
MOC (m)	300	150
altura + MOC (m)	1355	1200
altura + MOC (ft)	4445.5382	3937.008

Tabla 24. Franqueamiento de obstáculos en aproximaciones inicial e intermedia

En el caso de la aproximación intermedia, el obstáculo vulnera la superficie se coloca a la altura que demarca la distancia con la subida de 3°, como se aprecia en la Figura 32. Por esto, la altura en el IF y en el FAP serán diferentes, habiendo que realizar un descenso a medias de los dos, en la zona en la que se acaban las montañas. La altura del IF, al pertenecer a la vez a la inicial y la intermedia, la marca la más alta, que es la inicial.

8.8. Superficies VSS

En el apartado 5.4.6 del I-4-5 [19] se establece que:

“Todos los nuevos procedimientos de aproximación directa por instrumentos publicados el 15 de marzo de 2007 o después de esa fecha deberán estar protegidos respecto a obstáculos en el tramo visual”

El plano VSS tiene una pendiente 1.2° menor que el GP, es decir una pendiente de 1.8° en este caso. Además, comienza 60 m antes del umbral, diverge un 15% hacia los lados y se acaba cuando llega a la OCA/H. Se utilizará la OCA/H de clase D para asegurar, ya que es la más alta. EN todo caso es poco probable que penetren la VSS obstáculos muy alejados, ya que la VSS será más alta en esa zona. EL dibujo de la VSS en Civil 3d está expuesto en la Figura 36.

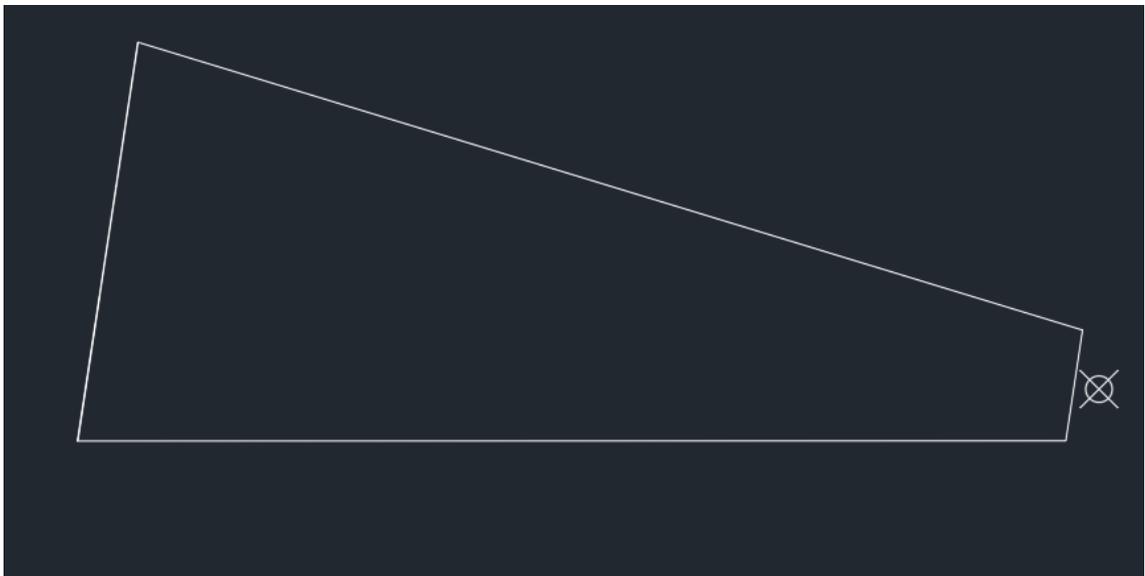


Figura 36. VSS

Para obtener los obstáculos que la penetran, se utiliza la hoja de cálculo del apartado de la OCA/H y se cambian los planos de las OAS por el de la VSS. La ecuación de la altura es muy sencilla de obtener, siendo $z = (X-60) * 0.031426266$, obteniendo esta pendiente fácilmente con la altura final y la pendiente en grados. Los obstáculos que entran se deben identificar a mano, ya que introducir matemáticamente los límites sería

costoso. Para facilitar el proceso, solo se muestran los resultados de los obstáculos que están dentro del rectángulo con la altura del trapecio y la base mayor como lados. Esto hace que el número se reduzca mucho, y que comprobar en Google Earth a mano los que diga Excel que penetran sea mucho más sencillo. Los obstáculos que penetran las VSS se muestran en la Tabla 25.

OBSTÁCULOS	LATITUD	LONGITUD	HGT (FT)	ALT (FT)
Luces de aproximación	38°17'04.6" N	000°34'32.4" W	2.1	144.4
Sistema eléctrico	38°17'05.1" N	000°34'32.4" W	2.9	144.8
Luces de aproximación	38°17'04.8" N	000°34'33.6" W	3.7	145.1
Poste-Mástil	38°17'00.7" N	000°34'50.2" W	26.81	191.4
Sistema Iluminación	38°17'12.2" N	000°34'48.4" W	18.7	188.4
Sistema Iluminación	38°17'21.1" N	000°35'18.5" W	61.4	270.6
Árbol	38°17'17.7" N	000°35'27.3" W	87.4	299.1
Sistema Iluminación	38°17'00.6" N	000°34'42.0" W	11.0	165.4

Tabla 25. Obstáculos que penetran las VSS

Debería haber un estudio aeronáutico antes de publicarse el procedimiento debido a los obstáculos que penetran las VSS, pero se asumirá que ya ha ocurrido. Se podría haber quitado los obstáculos que no estén 15 m por encima del umbral (43.2 m), con lo que solo quedarían 2 que penetren, pero se ha preferido indicarlos todos, ya que en la carta GBAS Z de Málaga [22] están indicados aún midiendo menos de 15 m más que el umbral.

9. Dibujo de la carta en Civil 3d

9.1. Elementos restantes

Antes de comenzar a dibujar la carta es necesario obtener el resto de información. En cuanto a las tablas restantes, no varían de ILS a GBAS. Ni la de las velocidades ni la de la altura a una distancia del DME cambian, ya que no se ha variado ningún parámetro que las afecte.

La caja que contiene el MSA es diferente en la carta de GBAS Z [22] que en la de ILS Z [23] en el caso del aeropuerto de Málaga, por lo que hay que adaptarla.

Las coordenadas de la zona restringida se pueden obtener del AIP España en la referencia [24]:

“LED66 AGOST (Alicante)

383000N 0004400W; 383000N 0003800W; 382500N 0003800W; 382500N 0004400W; 383000N 0004400W”

9.2. Simbología

En la referencia [25] se define la simbología para cada tipo de carta aeronáutica de OACI. Junto con las cartas de [21], [22] y [23], se puede comprobar la simbología de cada elemento. Se enseñará el resultado y se comentarán solo las decisiones de diseño.

9.3. Dibujo en Civil 3d

En Civil 3d se han dibujado todos los elementos de dentro del mapa de la carta que no se descargan directamente del CNIG, esto es, todo menos relieves, ríos, líneas de costa...

El procedimiento es sencillo conceptualmente pero muy largo en la práctica. Como se tienen las coordenadas de todos los puntos relevantes, solo es necesario dibujar la simbología adecuada.

Se dibujan primero los tramos entre los waypoints, los circuitos de espera, el arco y las marcas del DME, la pista, flechas, los recuadros con la información de los waypoints definidos por DME y VOR, el VOR en sí, las zonas restringidas... Es decir, los elementos que son iguales que en la carta ILS Z LEAL, con el grosor y el color adecuado para que se parezca lo máximo posible.

La primera diferencia notoria antes de entrar en los obstáculos son los waypoints definidos por coordenadas GNSS. Como se puede observar en la Figura 37, en la carta GBAS el símbolo de los waypoints no es lo único que cambia.

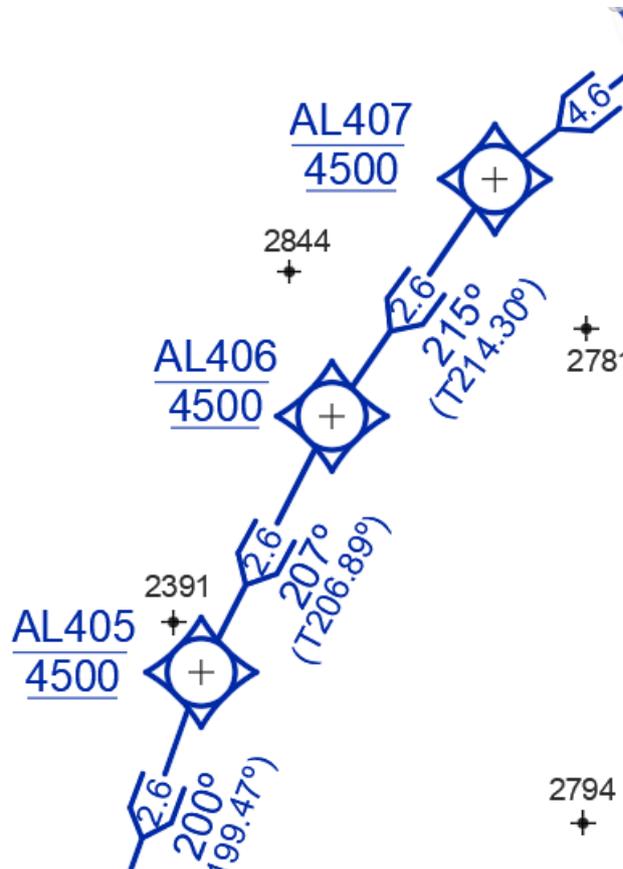


Figura 37. Waypoints y tramos

Los segmentos que unen los waypoints deben contener la distancia que los separa en millas náuticas, junto con el ángulo que se sigue, indicando el verdadero con una T seguida del número. El ángulo se coloca en el tramo o fuera según criterios de espacio y estética. La distancia que separa dos waypoints y el ángulo se obtiene directamente de Civil 3d, ya que te los proporciona en propiedades. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el ángulo que muestra Civil 3d hay que convertirlo para que sea desde el punto de referencia del waypoint anterior. Se coloca la altura obtenida en el franqueamiento de obstáculos redondeada a las centenas hacia arriba.

El siguiente elemento que difiere de la carta son los obstáculos que se muestran. Las cotas de nivel que se han incluido coinciden en su mayoría con las de la carta ILS Z, salvo algunas que al buscar las cotas de altura en el modelo del terreno de ArcGIS (se explicará más adelante) en el lugar que corresponde no se han encontrado. Como la carta se hace solo con información verificable, se ha decidido no colocar estas cotas de altitud de la carta ILS Z. En todo caso esto es respecto a cotas del terreno que no definan las alturas de los procedimientos.

Los obstáculos que definen la altura de las aproximaciones inicial e intermedia, que se podía observar en la Figura 35, se añaden también a los ya presentes. Sin embargo, solo se le asigna el símbolo del triángulo abierto a uno de ellos, pues el otro interferiría con el símbolo del waypoint y perjudicaría a la comprensión de la carta en vez de ayudar. Por esto se ha decidido representarlo como una cota de altura normal. La cota de altura de la ciudad de Alicante se debe a un obstáculo de la ciudad, no a una cota del terreno. Como no es relevante para el procedimiento se ha decidido no incluirlo.

Se incluyen los nombres de ríos, lagos y ciudades junto a todas las indicaciones de texto que necesite la carta en la posición adecuada.

Problema encontrado. Los símbolos que aparecen con color sólido en el dibujo no se pueden realizar con la herramienta sombreado, debido a que no se visualizan en ArcGIS al importar. La solución es realizar los sombreados con líneas. El sombreado que muestra líneas oblicuas se puede descomponer en líneas con la herramienta SEPARAR (caso a). Los sombreados que requieren que parezcan sólidos se simulan creando líneas muy juntas mediante la herramienta DESFASE, limpiando con la herramienta RECORTE las que se salgan del símbolo a rellenar (caso b). Cuando se ve en ArcGIS parece que es un sombreado sólido. Ambos casos se pueden observar en la Figura 38.

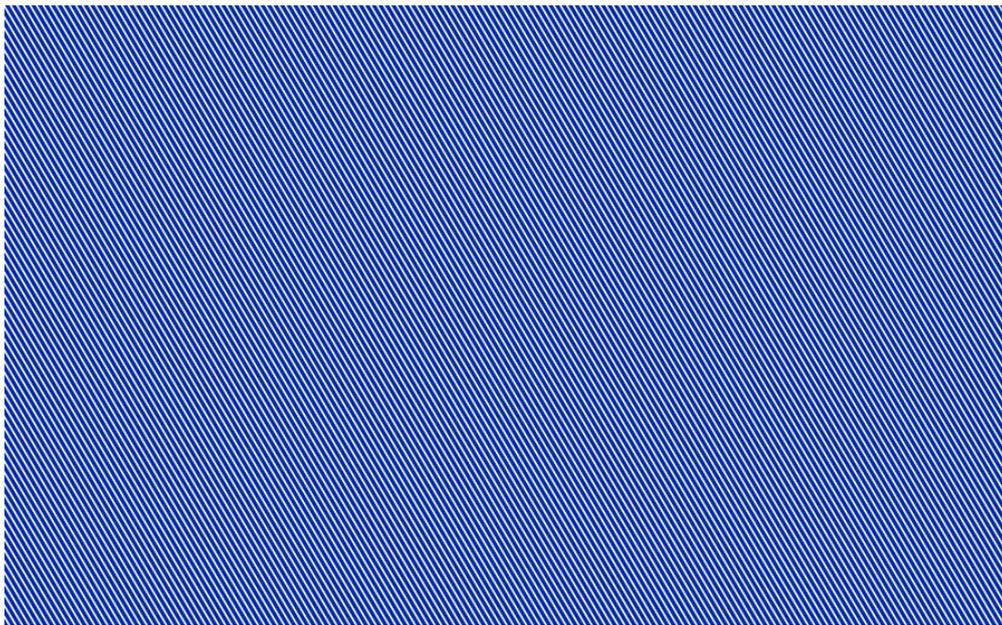
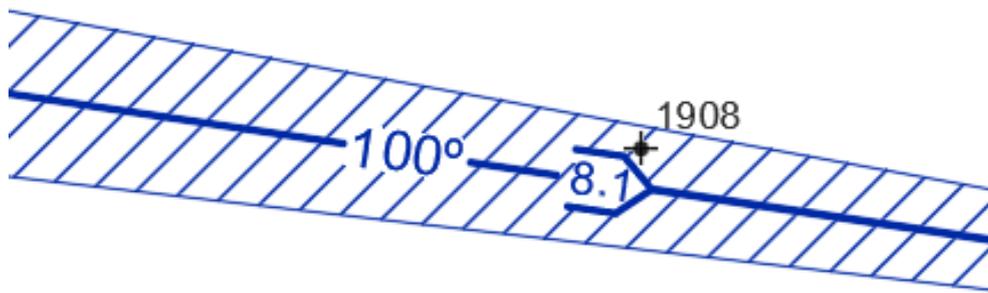


Figura 38. Sombreados. Casos a y b

Este proceso tiene una duración larga, aunque en cuanto a espacio dedicado en la memoria sea relativamente poco. Esto se debe a que la mayoría del trabajo consiste en dibujar todos los símbolos con las diferentes herramientas de Civil 3d, que es fácil de replicar con un conocimiento básico del programa.

10. Diseño de la carta en ArcGIS

10.1. Modelos del terreno

Para poder realizar la parte de ArcGIS del proyecto, lo primero que se necesita es importar al programa el modelo vectorial del terreno. Este se puede obtener o bien del centro de descargas de CNIG o bien del ICN. En el caso de este proyecto, hay una mezcla de modelos de ambas fuentes. La base es un archivo de la serie cv05 del ICN que proporcionó el profesorado de la UPV. Sin embargo, las polilíneas deñ archivo tenían secciones discontinuas, lo que causó que lo fuera necesario completarlo mediante un Merge con varias capas de la serie BCN.

Los ríos y lagos fueron proporcionados también por el profesorado de la UPV, combinados con archivos del CNIG según conviene. El archivo en concreto que se utilice no es importante, se emplea el que sea más fácil de utilizar, bien porque contenga menos elementos innecesarios o porque tenga mejor elaborados los atributos.

10.2. Funcionamiento de ArcMap

ArcMap (programa principal de ArcGis) es un programa para diseño de cartografía, en el que se insertan diferentes capas georreferenciadas y con una serie de atributos. En el programa se pueden editar las capas que se incorporan mediante la barra del modo editor, se puede añadir o quitar atributos a las capas, se pueden crear capas de cero... Las capas pueden ser de diferentes tipos según como estén construidas. Los tipos más básicos son el punto, polilínea y polígono. Estos tipos están formados por los elementos que les dan nombre. Una capa de tipo punto es un conjunto de puntos georreferenciados, por ejemplo. De un dibujo importado de cad se eligen los elementos que quieren incorporarse descompuestos en tipos de capas. El modo edición es el mecanismo por el que se cambia la estructura de una capa. Funciona como mecanismo de seguridad, si una capa no está en modo edición, no se puede modificar. Al salir del modo edición se guardan los cambios. En la tabla de atributos se muestran las características de las capas. Se pueden añadir más atributos a una capa mediante esta tabla, por ejemplo, para tener un campo que muestre la altura. Para los propósitos de este proyecto, se utilizarán los elementos básicos de ArcMap, es decir, añadir capas, crear capas, modo edición, la tabla de atributos y las propiedades de las capas. Estos elementos son básicos y se activan pulsando en símbolos del menú o con el clic derecho, sin tener mucha complicación. Las únicas herramientas que se utilizarán son las siguientes:

- Merge. Figura 40. Crea una capa nueva que es la mezcla de varias capas. Se seleccionan las capas que se quieren juntar en Input Datasets y se especifica la capa de salida en Output Dataset. La capa creada contiene los elementos y atributos de las capas que se mezclan.

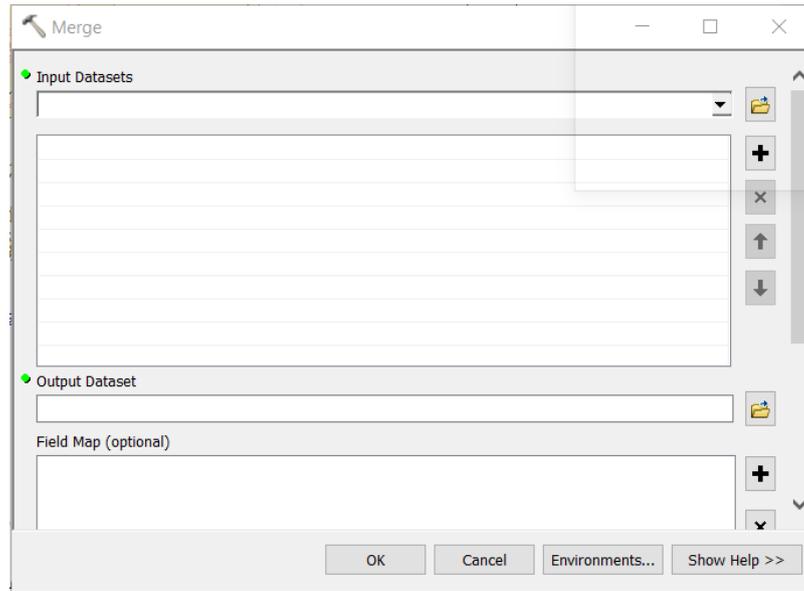


Figura 40. Merge

- Clip. Figura 41. Recorta una capa alrededor del borde de otra de tipo polígono. Se selecciona la capa que se quiere recortar en Input Features, la que marca el borde del recorte en Clip Features y la capa que se obtendrá en Output Feature Class. Esto permite trabajar solo con la sección del mapa que interese.

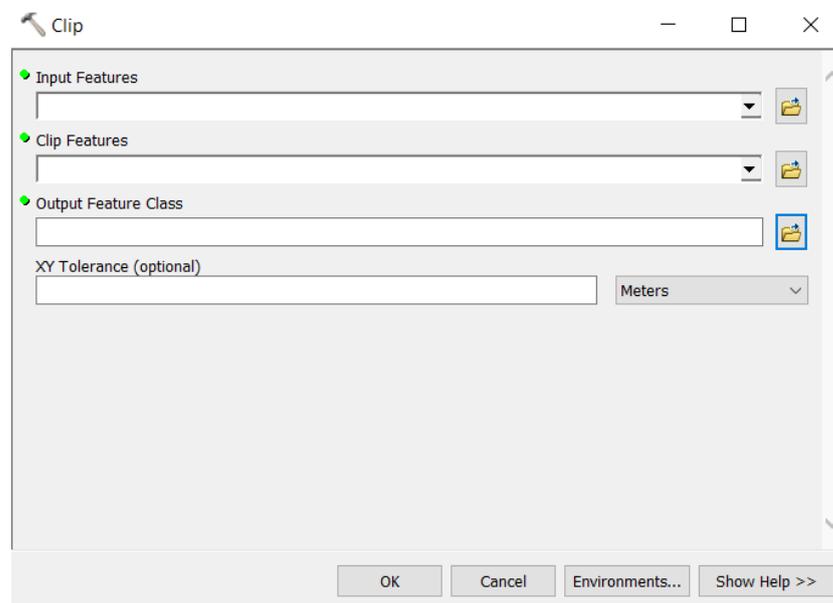


Figura 41. Clip

- Feature to Polygon. Figura 42. Transforma una capa de tipo polilínea a tipo polígono. Esto es, se crea un polígono a partir de polilíneas que definen espacios cerrados. Se selecciona la capa que se quiere transformar en polígono en Input Features y la capa resultante en Output Features

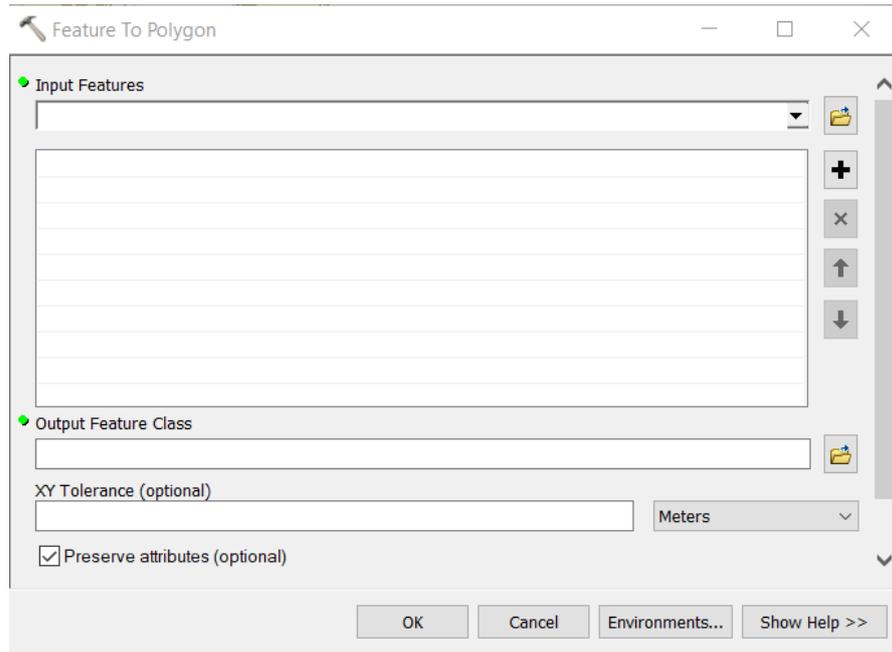


Figura 42. Feature to Polygon

- Select Layer by Attribute. Figura 43. Selecciona los elementos de una capa que cumplan con la expresión que se asigne. Se escoge la capa de la que se quieren seleccionar los elementos en Layer Name y se introduce la expresión mediante el símbolo azul que hay a la derecha de la expresión.

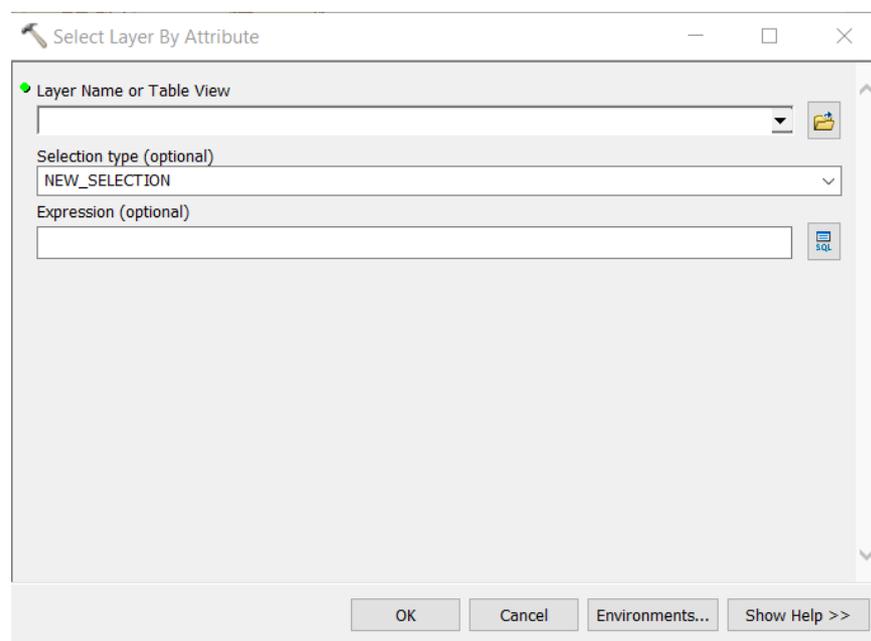


Figura 43. Select Layer by Attribute

Una vez se pulsa el símbolo, se ve lo que se muestra en la Figura 44. Se selecciona el atributo del cual se quieren elegir valores y con Get Unique Values se muestran todos los de ese atributo. Con las opciones lógicas y

matemáticas se elabora la expresión para seleccionar los elementos. Por ejemplo, se pueden seleccionar elementos de una altura deseada.

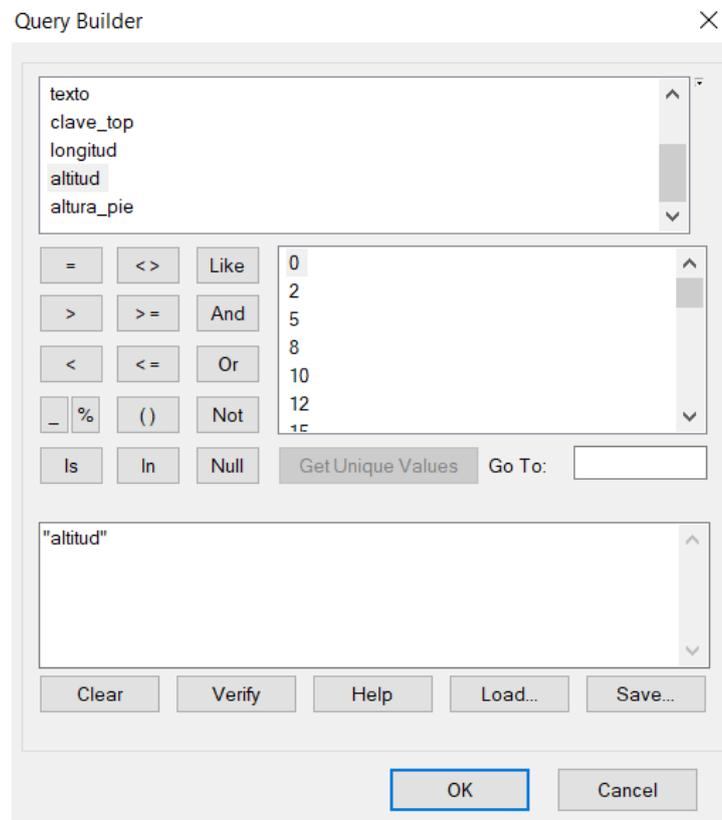


Figura 44. Query Builder

10.3. Importar el dibujo de Civil 3d

Con la opción de añadir capa debería ser posible añadir un archivo cad. Sin embargo, este proceso resultó necesitar más tiempo del planteado.

Problema encontrado. ArcMap no muestra los elementos cad que importa con la versión 2018 de Civil 3d. Que el problema fuera la versión final del programa no era obvio a simple vista. El proceso de búsqueda de información incluyó la búsqueda en páginas de ayuda de ArcMap de información relativa al tema, pero no se encontró la información esperada. Es en un tutorial en vídeo sobre importación de civil 3d a ArcMap, en el que se menciona que se debe exportar en versión 2010 o anterior. Gracias a esta información, simplemente se guarda el archivo en versión 2010 y se importa.

10.4. Diseño en ArcMap

Esta parte se basa exclusivamente en los conocimientos que se tengan de ArcGIS. El primer paso es crear una capa de tipo polilínea alrededor de la zona que se quiere

mostrar en la carta. Se pone la capa en modo edición, se indican los vértices y se sale del modo edición, guardando los cambios. Después se realiza un Feature To Polygon y se crea una capa de tipo polígono con esa forma. Una vez creado el polígono, se puede utilizar la herramienta Clip para recortar las diferentes capas para que estén dentro de ese polígono.

Se abre entonces la tabla de atributos de la capa que contiene las curvas de nivel y se crea un nuevo campo llamado altura. Sobre la columna vacía se hace clic derecho, se pulsa Calculate Geometry y se selecciona coordenada z. Después se crea otra capa y esta vez se pulsa en Field Calculator, insertándose la fórmula: altura*3.3. Con este proceso se obtienen campos que muestren la altura en metros y en pies de manera numérica. Esto se hará siempre que se necesite en nuevas capas creadas.

Se hace un Select Layer by Attribute, en el que se seleccionan las curvas de nivel que sean múltiplos de 300 y se exportan a una nueva capa. Se hace un Merge de la nueva capa con la capa de tipo polilínea (no la que se creó después de tipo polígono) que bordea la zona y se hace un Feature to Polygon de esta nueva capa.

Problema encontrado. Al pasar a polígono esta capa que mezcla el borde con las curvas de nivel, el programa no detectaba todas las líneas. Esto es porque tenían trozos desunidos, que a simple vista no se veían. Para evitar comprobar todas las secciones de las polilíneas se dividieron las líneas en secciones, que permitían reducir el área de búsqueda, debido a que todas las secciones se convertían correctamente a polígono menos la que contenía la conexión defectuosa. Se une manualmente y se soluciona el problema.

Con la capa tipo polígono creada, se abren sus propiedades y, en la sección simbología, se abren categorías y dentro valores únicos y se añaden todos los valores del atributo altura. Se debe notar que los valores de altura que se han calculado son medias, por lo que hay que cambiarlos a mano en modo edición de la altura de cada elemento. Después de ajustar los colores, poniendo que no haya color en el borde.

Lo siguiente es unir en un solo elemento cada uno de los trozos de las líneas de altura que pertenezca a una misma curva de nivel con la opción Merge del modo edición (no confundir con la herramienta Merge, esta es para unir elementos, no capas). Entonces se añaden etiquetas con la altura en pies a las curvas de nivel, mediante diferentes opciones de las propiedades de la tabla de la pestaña Label, colocando las etiquetas de altura en medio de las líneas y con una máscara del color adecuado.

Para representar la ciudad de Alicante se descarga las ortofotos necesarias del CNIG y se dibuja un polígono en sus bordes.

Durante cualquier momento de este proceso se hace la comprobación de las cotas de altura que se mencionó en la parte de Civil 3d, activando la capa en cuestión y comprobando las cotas de nivel de la zona que se busca.

El resultado de esta parte se puede observar en la Figura 45.

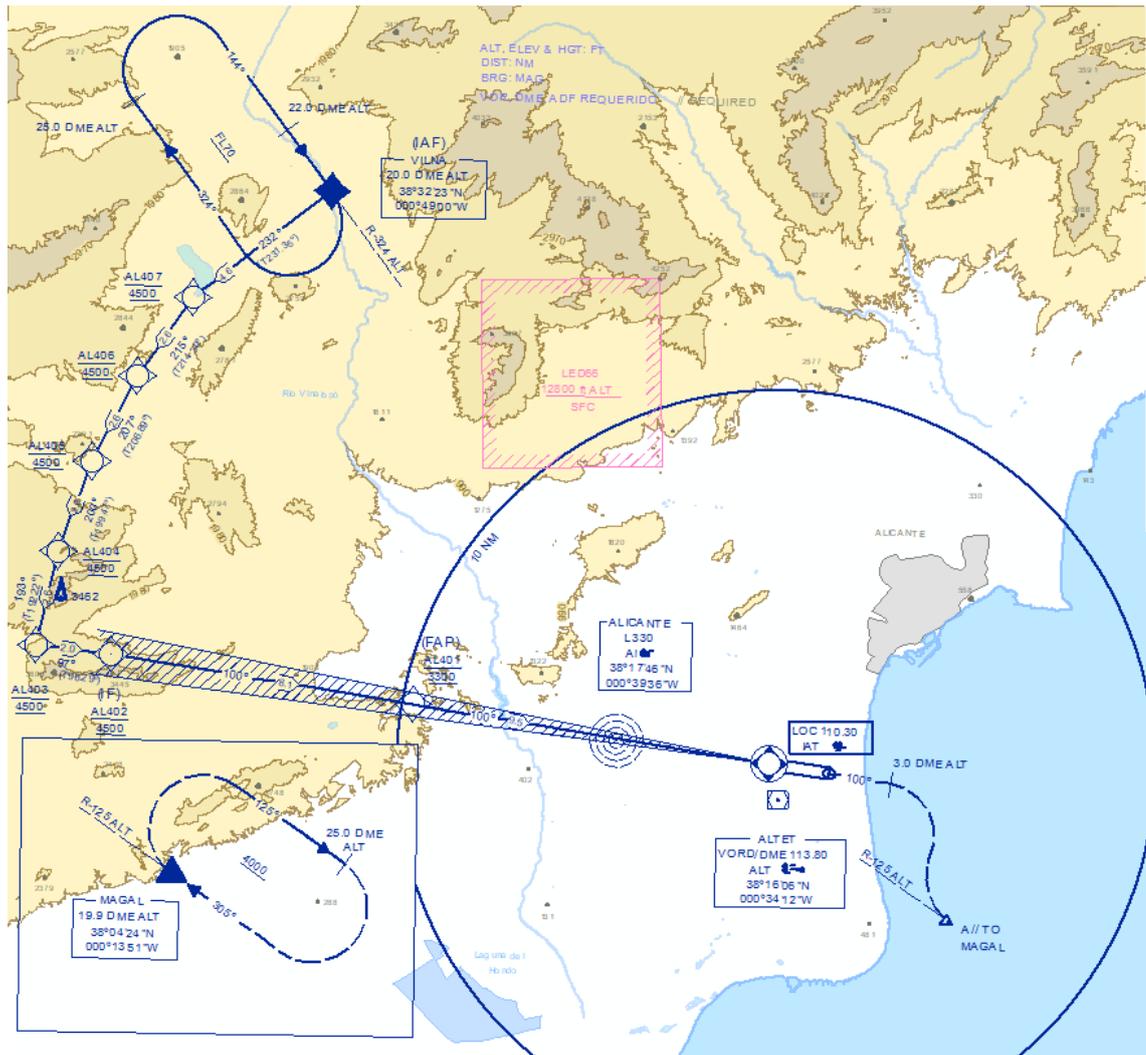


Figura 45. Diseño de la carta en ArcMap

10.5. Modo Layout

Una vez se tiene la Figura 45, se pasa al modo Layout de ArcMap. En este modo, se ve el mapa creado ocupando un espacio variable de una hoja de tamaño a elegir. En el caso del proyecto se elige tamaño A4, con el mapa ocupando una parte importante de la hoja. En este modo se puede añadir textos y cuadros, lo cual es útil para añadir los elementos de la carta que sean necesarios y no necesiten mucha edición, como es el caso de los textos de la parte de arriba de la carta aeronáutica. Se escoge una escala que permita que se vea bien el mapa en el espacio que se tiene.

Las marcas graduadas que indican latitud y longitud se añaden mediante Data Frame Properties, que se encuentra en la pestaña View. Dentro de Data Frame Properties hay una pestaña llamada Grids, se hace clic y se pulsa en New Grid. El Grid se configura para que tenga etiquetas solo, sin cuadrícula, que las marcas sean cada 10 minutos y con

10 subdivisiones, como dice la norma [25]. Se ajusta el grosor de las líneas y el formato de los números y se selecciona que las líneas apunten hacia el interior del mapa.

10.5.1 Perfil de la aproximación

El perfil de aproximación se realiza basándose en el de la carta GBAS Z de LEMG [22] y en el de la carta ILS Z de LEAL [21]. La estructura general es como la de Málaga, pero toma algunos elementos de la de Alicante/Elche. El perfil es bastante sencillo de realizar comparado con el dibujo del procedimiento y se pueden reutilizar varios de los símbolos. En la Figura 46 se muestran los perfiles de las cartas de LEAL y LEMG junto a la producida en el proyecto.

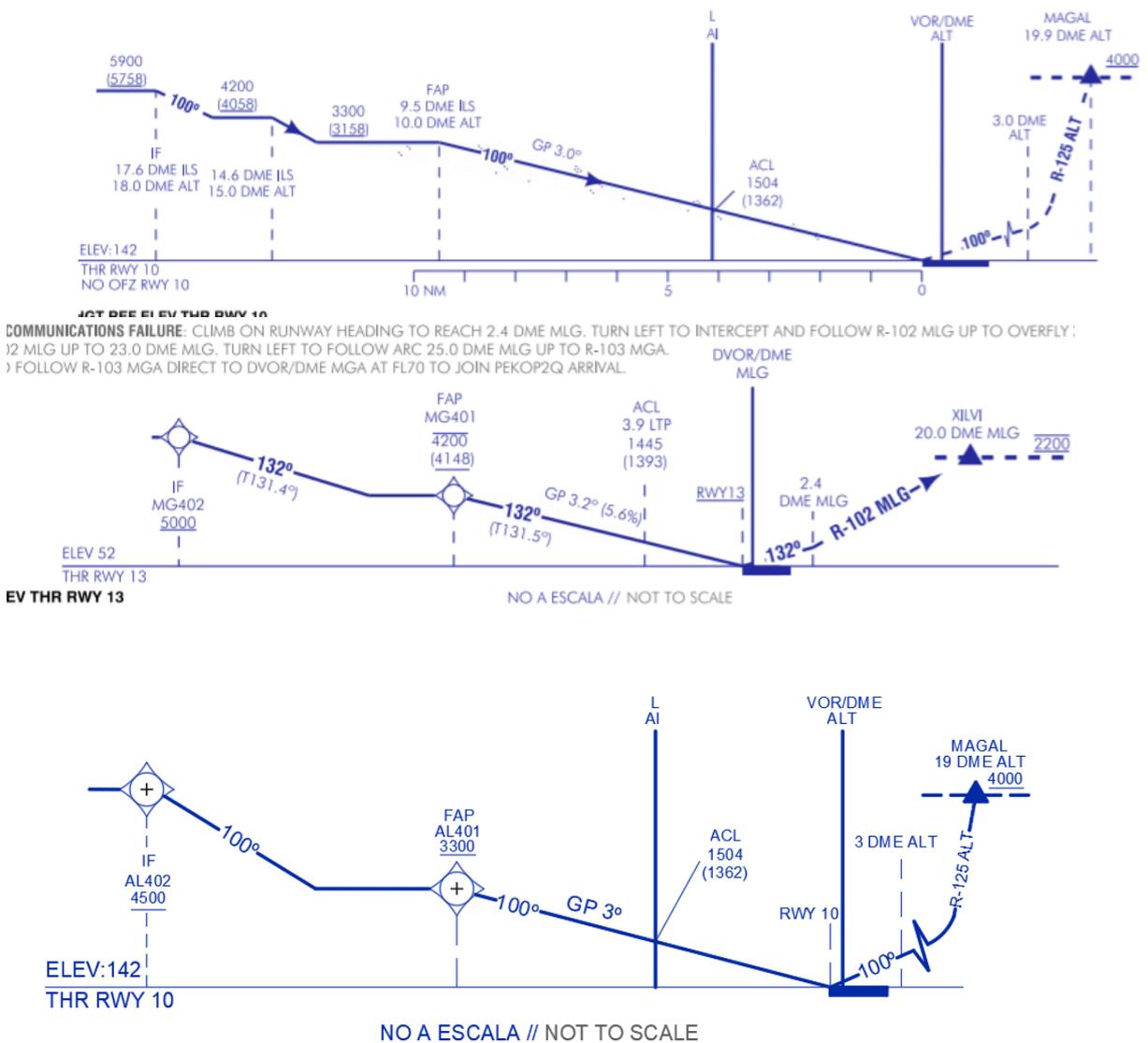


Figura 46. a) Perfil ILS Z LEAL [21] b) Perfil GBAS Z LEMG [22] c) Perfil diseñado

Una vez dibujado el perfil se importa al Layout y se ajusta el tamaño.

10.5.2. Resto de elementos y páginas 2 y 3

Se realizan los dibujos en Civil 3d de las zonas en circuito y la MSA, con los cambios que se mencionaron previamente. Las tablas se diseñan mediante Microsoft Word y se hacen recortes para poder insertarlas como imágenes

La página 2 de la carta GBAS Z de Málaga contiene 2 tablas. La primera contiene los waypoints que están definidos por VOR y DME y la segunda las coordenadas de todos los waypoints del procedimiento. Se realizan versiones de estas dos tablas con los datos del proyecto y se diseña y añade la tabla de obstáculos que penetran las VSS con los datos del apartado correspondiente.

La página 3 contiene una descripción de los dos procedimientos GBAS Z. Como en el caso de este proyecto solo hay un IAF, se realiza la descripción del procedimiento en el formato de las tablas y se añade.

11. Resultado final

En las siguientes páginas se adjunta la carta aeronáutica resultante. En términos generales es bastante similar a las producidas por el AIP España. El elemento que peor se integra son las marcas de latitud y longitud, puesto que la numeración no es exactamente igual. También la fuente y el tamaño de la letra varían un poco, pero estos elementos no deben coincidir necesariamente. Pero en términos generales el resultado es lo suficientemente parecido y satisfactorio.

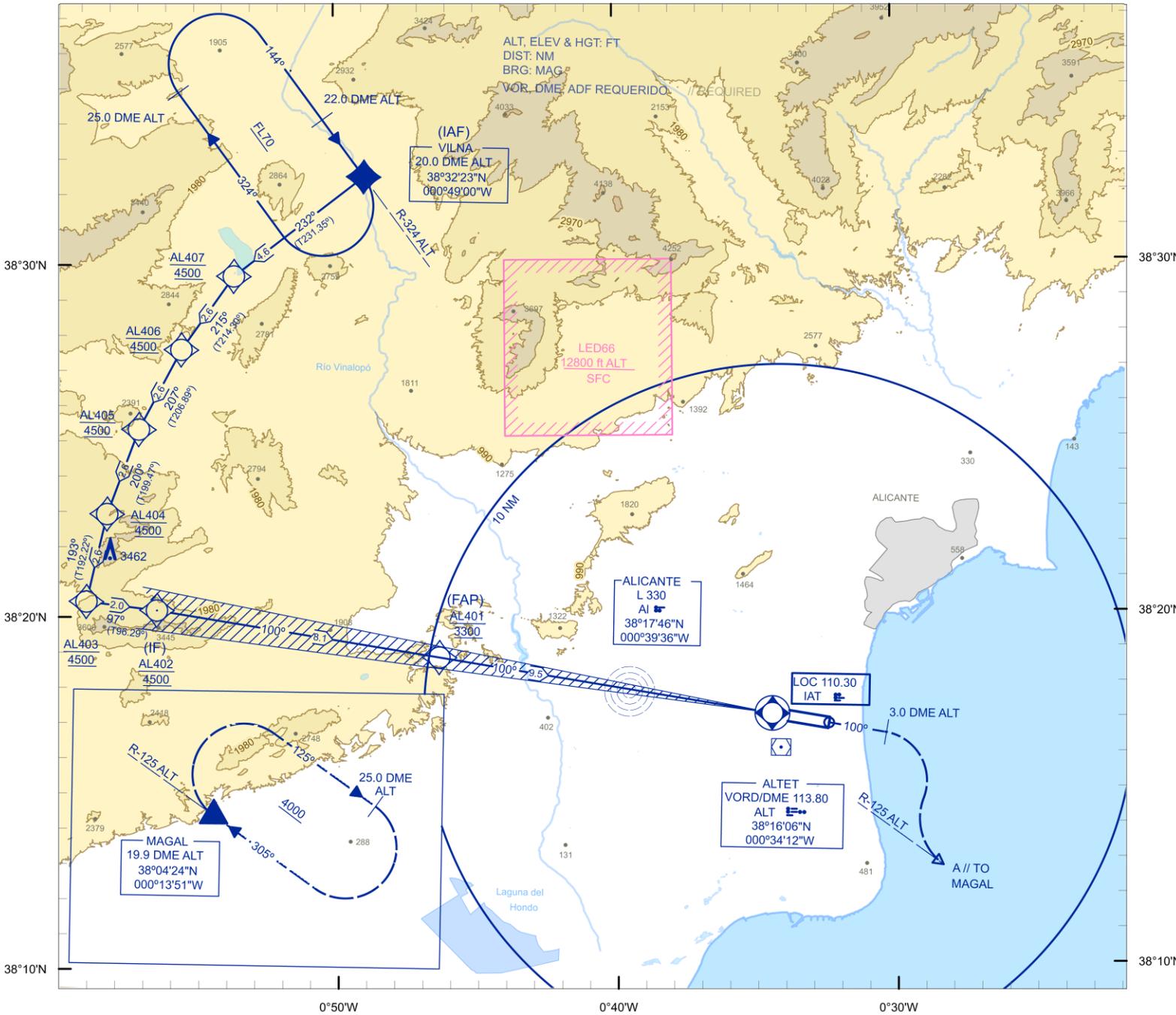
CARTA DE APROXIMACIÓN POR INSTRUMENTOS-OACI

ELEV AD
142
VAR 1° E (2021)

APP 120.400
TW R118.155
GMC 130.655
ATIS 120.080

ALICANTE-ELCHE
GBAS Z
RWY 10

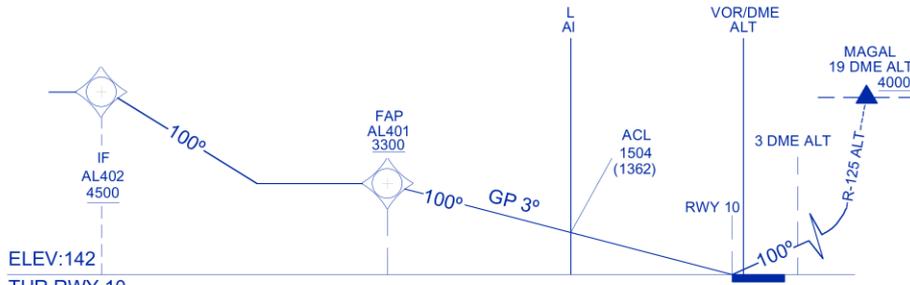
0°50'W 0°40'W 0°30'W



FRUSTRADA: SUBIR EN RUMBO MAGNÉTICO 100° HASTA 3.0 DME ALT, VIRAR A LA DERECHA PARA INTERCEPTAR Y SEGUIR R-125 ALT DIRECTO AMAGAL SUBIENDO A 4000 PARA INTEGRARSE A LA ESPERA.

MISSED APCH: CLIMB ON MAGNETIC HEADING 100° UP TO 3.0 DME ALT, TURN RIGHT TO INTERCEPT AND FOLLOW R-125 ALT DIRECT TO MAGAL CLIMBING TO 4000 TO JOIN THE HOLDING

CAMBIOS: DECLINACIÓN MAGNÉTICA, ACTUALIZACIÓN DE RUMBOS Y RADIALES
CHANGES: MAGNETIC VARIATION, UPDATE OF HEADINGS AND RADIALS



GBAS RDH 49 TA 6000



HGT REF ELEV THR RWY 10

NO A ESCALA // NOT TO SCALE

OCA/H	A	B	C	D	STA
	340 (198)	357 (215)	370 (228)	383 (241)	
En circuito (H) sobre Circling (H) over	142	727 (585)	1007 (865)	1152 (1010)	1152 (1010)

GS	kt	80	100	120	140	160	180
FAF-THR: 9.5 NM	min:s	7:08	5:42	4:45	4:05	3:34	3:10
FAF-MAPT:	min:s						
ROD: 5.2%	ft/min	425	531	637	743	849	955

ALT/HGT DME THR10												
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
				3130	2800	2470	2140	1810	1480	1160	840	520
				(2990)	(2660)	(2330)	(2000)	(1670)	(1340)	(1020)	(690)	(370)

ALICANTE/ELCHE AD

REQUISITOS DE LA BASE DE DATOS AERONÁUTICA

AERONAUTICAL DATABASE REQUIREMENTS

PROCEDIMIENTOS DE APROXIMACIÓN POR INSTRUMENTOS // INSTRUMENT APPROACH PROCEDURES

→ GBAS Z RWY 10

PUNTO POINT	LATITUD LATITUDE	LONGITUD LONGITUDE	AZIMUT VERDADERO TRUE BEARING	DISTANCIA DME DME DISTANCE (NM)
VILNA (IAF)	38°32'23" N	000°49'00" W	324.00° (VOR ALT)	20.00 DME ALT
MAGAL	38°04'24" N	000°13'51" W	125.00° (VOR AT)	19.90 DME ALT
Aproximación final de precisión – Pendiente (Ángulo de descenso) // Precision final approach - Slope (Descent angle)				5.24% (3.20°)

COORDENADAS WAYPOINTS // WAYPOINTS COORDINATES	
WPT	COORD
VILNA (IAF)	38°32'23.0"N 000°49'00.0"W
AL407	38°29'41.6"N 000°53'36.1"W
AL406	38°27'36.6"N 000°55'29.9"W
AL405	38°25'21.3"N 000°57'02.0"W
AL404	38°22'57.8"N 000°58'11.3"W
AL403	38°20'28.6"N 000°58'56.6"W
AL402 (IF)	38°20'06.0"N 000°56'30.0"W
AL401 (FAP)	38°18'43.0"N 000°46'24.0"W
RWY10 (LTP)	38°17'04.3"N 000°34'30.0"W

OBSTÁCULOS QUE VULNERAN LA VSS // OBSTACLES WHICH PENETRATE THE VSS

OBSTÁCULOS OBSTACLES	LATITUD LATITUDE	LONGITUD LONGITUDE	HGT (FT)	ALT (FT)
Luces de aproximación // Approach lights	38°17'04.6" N	000°34'32.4" W	2.1	144.4
Sistema eléctrico // Electrical system	38°17'05.1" N	000°34'32.4" W	2.9	144.8
Luces de aproximación // Approach lights	38°17'04.8" N	000°34'33.6" W	3.7	145.1
Poste-Mástil // Pole	38°17'00.7" N	000°34'50.2" W	26.81	191.4
Sistema Iluminación // Electrical Exit Light	38°17'12.2" N	000°34'48.4" W	18.7	188.4
Sistema Iluminación // Electrical Exit Light	38°17'21.1" N	000°35'18.5" W	61.4	270.6
Árbol // Tree	38°17'17.7" N	000°35'27.3" W	87.4	299.1
Sistema Iluminación // Electrical Exit Light	38°17'00.6" N	000°34'42.0" W	11.0	165.4

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROCEDURE DESCRIPTION			
DESCRIPCIÓN FORMAL FORMAL DESCRIPTION	DESCRIPCIÓN ABREVIADA ABBREVIATED DESCRIPTION	Código Path Terminator Previsto Expected Path Terminator Coding	Fly-Over Requerido Fly-Over Required
→ VILNA (IAF) GBAS Z			
VILNA a o por encima de FL70, virar a la derecha. VILNA at or above FL70, turn right.	VILNA[F070+;R]	IF	-
A AL407 a o por encima de 4500 ft, girar a la izquierda To AL407 at or above 4500 ft, turn left.	AL407[A4500;L]	TF	-
A AL406 a o por encima de 4500 ft, girar a la izquierda To AL406 at or above 4500 ft, turn left.	AL406[A4500;L]	TF	-
A AL405 a o por encima de 4500 ft, girar a la izquierda To AL405 at or above 4500 ft, turn left.	AL405[A4500;L]	TF	-
A AL404 a o por encima de 4500 ft, girar a la izquierda To AL404 at or above 4500 ft, turn left.	AL404[A4500;L]	TF	-
A AL403 a o por encima de 4500 ft, girar a la izquierda To AL403 at or above 4500 ft, turn left.	AL403[A4500;L]	TF	-
A AL402 a o por encima de 4500 ft. To AL402 at or above 4500 ft.	AL402[A4500]	TF	-
A AL401 a o por encima de 3300 ft. To AL401 at or above 3300 ft.	AL401[A3300]	TF	-
A RWY10. To RWY10.	RWY10	TF	Y
APROXIMACIÓN FRUSTRADA CONVENCIONAL // CONVENTIONAL MISSED APPROACH PROCEDURE			
Subir en rumbo magnético 100° hasta 3.0 DME ALT, virar a la derecha para interceptar y seguir r-125 ALT directo a MAGAL subiendo a 4000 para integrarse a la espera. Climb on magnetic heading 100° up to 3.0 DME ALT, turn right to intercept and follow r-125 ALT direct to MAGAL climbing to 4000 to join the holding.			

12. Conclusiones y valoración

En esta sección del proyecto se enfoca desde un punto de vista personal, ya que trata de las conclusiones y valoraciones que hago yo como autor de este Trabajo Fin de Grado. Esta valoración se basa en las dificultades y experiencias que he tenido durante el desarrollo del proyecto, que seguro diferirán de las que tenga un posible lector que intente imitar el mismo proyecto.

En primer lugar, la parte teórica del proyecto es la que más clara tuve desde el principio. La teoría expuesta debía no solo tratar de la tecnología GBAS, sino de su implantación en un aeropuerto. Esta última parte la quise añadir desde que leí el mencionado varias veces Trabajo Fin de Máster de Álvaro Jiménez González, ya que era un área sobre la que había estado interesado desde finales de 3º de carrera. Si debo destacar algo de esta parte teórica, es la dificultad de encontrar información de calidad detallada sobre el tema. Para empezar, la novedad de la tecnología limita el número de proyectos académicos realizados sobre el tema. Y además muchos de los proyectos que hay tienen el acceso limitado tras el registro en determinadas páginas. Este es uno de los motivos por los que mucha de la información de este trabajo está directamente sacada de documentos producidos por organizaciones como la OACI, ya que tienen el acceso mucho más fácil y contienen información fiable. Más allá de eso, siempre es complicado decidir cuánta información poner de cada tema y qué temas precisos exponer. Creo que he conseguido transmitir una buena cantidad de información sin alargar demasiado la duración de la memoria ni quitarle espacio al apartado práctico del trabajo, aunque quizás el lector no concuerde en esto conmigo.

Sobre la parte de diseño de procedimientos, esta es sin duda la parte más complicada conceptualmente y seguramente en general. De hecho, a esta parte se deben reuniones constantes con el cotutor del proyecto. Una de las conclusiones más evidentes que se extraen al realizar esta sección es la dificultad de seguir todas las indicaciones sobre un tema que marcan los documentos de la OACI. La información está repartida en diferentes apartados de diversos capítulos, sobre todo en el caso del Documento 8168, y es complicado tener todo en cuenta a la vez. Para la búsqueda de información necesité llenar el navegador de pestañas con el documento abierto en diferentes páginas. También es notoria la facilidad con que se puede cometer un error en esta sección, y cómo cualquier error pequeño te fuerza a repetir gran parte del procedimiento. También es necesario adaptar las indicaciones a los programas a utilizar, como la división del área secundaria en secciones ante la complejidad de diseñar la superficie en 3 dimensiones. Este tipo de aproximaciones se deben realizar con una precisión que permita no alterar demasiado el resultado y siempre cometiendo errores en el sentido de proteger más de lo necesario en lugar de menos. Este último elemento es clave para la filosofía del trabajo. Si hay alguna duda en un procedimiento, se debe procurar que esté protegido de más y no de menos.

La parte de diseño en Civil 3d es extensa, y ante mi limitado conocimiento sobre el programa, tuve que improvisar en varias ocasiones una solución a ciertos problemas como

el del sombreado que se mencionó en el proyecto. Para la realización de esta parte, como para la de cualquier dibujo no matemáticamente exacto, se requiere un grado de creatividad. La adaptación de los símbolos con los elementos que permite el programa es la mayor muestra de ello.

Parte importante de la filosofía del proyecto es no añadir elementos en el mapa de la carta que no pudiese comprobar. Por esto se da la falta de alguna de las cotas anotadas en la carta original y que no aparecían en mi modelo vectorial de elevación del terreno.

Por último, la sección de ArcGIS supuso un desafío exclusivamente por el uso del programa y por defectos en las capas importadas, como se explica en su sección correspondiente. Para empezar, tuve que pedir a la profesora Áurea Cecilia Gallego Salguero ayuda para que me recordase el funcionamiento básico del programa que enseñaba en sus asignaturas de cartografía. Sin embargo, durante el mes de agosto surgieron problemas inesperados con la importación del archivo de Civil 3d y con las capas, que tardé en resolver bastante tiempo más del que tenía previsto para esa parte, ya que al ser agosto no podía consultar a los profesores cómo solucionar las cosas.

En cuanto al aspecto final de la carta, estoy bastante satisfecho con el resultado. La elección de colores fue complicada, pero el resultado es bastante bueno. Como opinión personal los colores que he usado me parecen más estéticos que los usados por el AIP España. La adaptación de los diferentes elementos fue más o menos sencilla, aunque el perfil tuve que repetirlo varias veces.

Haciendo en referencia al proyecto de manera global, me ha servido para aprender muchas cosas, entre ellas a manejar mejor y solucionar los problemas que me vaya encontrando. Además, comprendo mejor el proceso de general cartas aeronáuticas, y mi interés sobre el tema ha crecido bastante. Conforme avanzaba el proyecto, me notaba más interesado en la materia y más avisado a la hora de tomar decisiones sobre el proyecto. La experiencia en general ha sido agradable y didáctica, y estoy satisfecho con los resultados.

II PLIEGO DE CONDICIONES

13. Pliego de condiciones

13.1. Objeto

El pliego de condiciones acapara todos los aspectos a considerar para que el desarrollo del proyecto y la memoria se realice de manera segura, en términos de diseño, entorno de trabajo... En esta sección se detallan los factores de trabajo a tener en cuenta en el desarrollo del proyecto.

13.2. Condiciones de ejecución

Son las referidas a los diferentes aspectos que hacen referencia al entorno y estructura en que se realiza el proyecto. El Real Decreto 488/1997 establece las disposiciones mínimas de salud y seguridad para evitar situaciones de riesgo en el trabajo, y el ingeniero que tome parte en el desarrollo del mismo debe atenerse a sus artículos. El conocimiento del Decreto permite evitar posibles riesgos de salud relacionados con el hecho de trabajar con pantallas de visualización de manera continuada.

13.2.1. Supervisión

La realización del proyecto está supeditada a la supervisión de los profesores tutores responsables del mismo. Al menos uno de los responsables debe poseer amplios conocimientos sobre la tecnología GNSS, GBAS, PBN y su implementación. Mientras que al menos otro de los tutores debe poseer amplios conocimientos de diseño de procedimientos y cartas aeronáuticas, así como conocimientos de normas PBN y otras consideraciones similares.

13.2.2. Conocimientos del ingeniero

El ingeniero a su vez debe conocer los mismos temas que los tutores, aunque a un nivel inferior. Además, debe ser capaz de interpretar los datos que obtenga y de tomar decisiones ante los diferentes obstáculos que se encuentre.

13.3. Condiciones de los materiales

13.3.1. Software

Los siguientes programas son necesarios para el desarrollo del proyecto:

- Microsoft Office. Programa de ofimática utilizado para la redacción de la memoria, para la creación de tablas para la carta aeronáutica y para manejar operaciones y datos con las hojas de cálculo.
- Google Chrome. Navegador online utilizado para la lectura de archivos PDF y la búsqueda de información.
- Autodesk Civil 3d 2021. Programa de diseño en 3d utilizado para la creación de los dibujos a insertar en Google Earth y ArcGIS.
- Google Earth. Sistema de información geográfica utilizado para comprobar alturas y visualizar obstáculos y procedimientos.
- ArcGIS. Programa de cartografía utilizado para la creación de la carta aeronáutica.
- MATLAB. Software de programación empleado para ejecutar código de obtención de coordenadas y distancias.

13.3.2. Hardware

El único hardware necesario para la realización del proyecto es un ordenador que cumpla con los requisitos mínimos de los programas. El programa más exigente es Autodesk Civil 3d 2021, que requiere lo siguiente:

- Versión de 64 bits de Microsoft Windows 8.1 o superior
- Procesador de 2.5 GHz
- 16 GB de memoria
- Pantalla de 1920 x 1080 con color verdadero
- Tarjeta gráfica de 1 GB de GPU con 29 GB/s de ancho de banda y compatibilidad con DirectX 11
- NET Framework, versión 4.8

El ordenador empleado en el proyecto es un HP OMEN 15-CE016NS que cumple todos los requisitos.

13.3.3. Material adicional

En desarrollo del proyecto se utilizará material adicional, que son los diferentes documentos oficiales y trabajos académicos de los que se extrae la información. Estos documentos deberán referenciarse correctamente.

III PRESUPUESTO

14. Presupuesto

El siguiente desglose de presupuesto refleja el valor económico que supondría la realización del proyecto para un ingeniero recién titulado. Se consideran gastos de personal contratado, emplazamiento y equipo.

La duración del proyecto estimada es de 3 meses, considerando incluyendo los períodos de planteamiento y realización del proyecto.

14.1. Coste del material

En este apartado se calculan de manera aproximada los costes de hardware y software utilizados para el desarrollo del proyecto. Se asume que se han comprado las licencias de todos los programas y que ninguno ha sido proporcionado gratuitamente por la UPV ni por la condición de estudiante. Se consideran el coste únicamente en los períodos amortizados durante el proyecto. Se muestran en la Tabla 26.

Costes de material				
Material	Coste total (€)	Período total de Amortización (meses)	Período amortizado en el proyecto (meses)	Importe total (€)
Portátil HP OMEN 15-CE016NS	1000.00	72	3	41.67
Licencia Microsoft Office 365	69.00	12	3	17.25
Licencia MATLAB	800.00	12	3	200.00
Licencia ArcGIS Desktop Standard para negocios	5391.00	12	3	1347.75
Licencia Autodesk Civil 3d 2021	3207.00	12	3	801.75
Google Earth	0.00	12	3	0
Google Chrome	0.00	12	3	0
Subtotal				2408.42

Tabla 26. Coste de material

14.2. Costes de oficina

Son los costes relacionados con el espacio físico en que se desarrolla el proyecto. Este proyecto se ha realizado principalmente desde casa, pero se supondrá que se ha

alquilado una oficina. Los precios están basados en una media de oficinas buscadas en Internet. Se muestran en la Tabla 27.

Costes de oficina			
Recurso	Coste mensual (€)	Período amortizado en el proyecto (meses)	Importe total (€)
Alquiler Oficina	200.00	3	600.00
Gastos mensuales (luz, Internet)	55.00	3	165.00
Subtotal			765.00

Tabla 27. Costes de oficina

14.3. Costes de personal

Se estima un trabajo de 28 horas semanales por parte del ingeniero titulado y un trabajo de 20 horas totales por parte de cada uno de los tutores. Con estas estimaciones se calcula el sueldo de cada uno de los integrantes del proyecto. Se muestra en la Tabla 28.

Costes de personal			
Recurso	Coste por hora (€/h)	Horas empleadas	Importe total (€)
Ingeniero titulado	10.00	336	3360.00
Prof. Ingeniero Doctor	25.00	20	500.00
Prof. Ingeniero Doctor	25.00	20	500.00
Subtotal			4360.00

Tabla 28. Costes de personal

14.4. Presupuesto total

Se suman los resultados de los 3 apartados anteriores y se les aplica un 21% de IVA como establece la ley en España. Se muestra en la Tabla 29.

Presupuesto del proyecto	
Concepto	Subtotal (€)
Material	2408.42
Oficina	765.00
Personal	4360.00
Total sin IVA	7533.42
IVA (21%)	1582.02
Total proyecto	9115.44

Tabla 29. Coste total del proyecto

Referencias bibliográficas

- [1] DR. MARTÍN BINTANED ARA, *Historia de la aviación comercial desde 1909 hasta nuestros días*, Universitat de les Illes Balears, Curso académico 2013-2014.
- [2] *Guía para la implementación de sistemas de aumentación basados en tierra*, OACI, mayo 2013.
- [3] *Manual de autoridades aeronáuticas, Capítulo 9: Servicios de información aeronáutica y diseño de procedimientos terminales y en ruta*, Dirección general de aeronáutica civil, 11 de mayo de 2012.
- [4] *Orden FOM/1316/2013 de 19 de junio*, Ministerio de Fomento, Publicado en el BOE núm.166 de 12 de julio de 2013.
- [5] *Datos del aeródromo - AD2 LEAL I*, AIP España, Julio 2021.
- [6] PH.D. ISRAEL QUINTANILLA, *BLOQUE III. Navegación aérea, cartografía y cosmografía*, Apuntes. Departamento de Ingeniería Cartográfica. Universitat Politècnica de València.
- [7] JOSÉ RIZO Cerdán, *Diseño y validación de procedimientos SBAS en el Aeropuerto de Alicante según requerimientos ESSP año 2020*, Universitat Politècnica de València, 2020.
- [8] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *GPS General Introduction*. Recuperado el 25/08/2021 de: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_General_Introduction#GPS%20Architecture
- [9] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *GLONASS General Introduction*. Recuperado el 25/08/2021 de: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_General_Introduction
- [10] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *BeiDou General Introduction*. Recuperado el 25/08/2021 de: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction
- [11] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *BeiDou Services*. Recuperado el 25/08/2021 de: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Services
- [12] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *Galileo General Introduction*. Recuperado el 25/08/2021 de: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction
- [13] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *Galileo Services*. Recuperado el 25/08/2021 de: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Services

- [14] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *NAVIC*. Recuperado el 25/08/2021 de: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NAVIC>
- [15] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *QZSS*. Recuperado el 25/08/2021 de: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/QZSS>
- [16] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, Título: *GNSS Performances*. Recuperado el 26/08/2021 de: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Performances
- [17] PH.D. ISRAEL QUINTANILLA, *GPS: MODELOS MATEMATICOS*, Apuntes. Departamento de Ingeniería Cartográfica. Universitat Politècnica de València.
- [18] ÁLVARO JIMÉNEZ GONZÁLEZ, *Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria*, Universidad de Sevilla, 2019.
- [19] *Documento 8168. Operación de aeronaves, Volumen II: Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos: Sexta Edición*, OACI, 2014.
- [20] *Documento 8168. Operación de aeronaves, Volumen II: Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos: Cuarta Edición*, OACI, 1993.
- [21] *Carta de aproximación por instrumentos Alicante-Elche-OACI ILS Z. AD 2 LEAL IAC 2*, AIP España, 22 de abril de 2021.
- [22] *Carta de aproximación por instrumentos MÁLAGA/ Costa del Sol-OACI GBAS Z. AD 2 LEMG IAC 11*, AIP España, 8 de octubre de 2020.
- [23] *Carta de aproximación por instrumentos MÁLAGA/ Costa del Sol -OACI ILS Z. AD 2 LEMG IAC 6*, AIP España, 18 de junio de 2020.
- [24] *ZONAS PROHIBIDAS, RESTRINGIDAS Y PELIGROSAS; ESPACIOS AÉREOS TEMPORALMENTE RESERVADOS Y SEGREGADOS- ENR 5.1*, AIP España, 25 de marzo de 2021.
- [25] *Documento 8697. Aeronautical Chart Manual: Third Edition*, OACI, 2016.