

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Estudio de la viabilidad de utilización de
tecnología GNSS/SBAS para la reducción
de mínimos en aproximación
instrumental a la cabecera 33 del
Aeropuerto de Pamplona.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE DISEÑO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

CURSO 2019/2020

Autor: Javier García Conesa

Tutor: Pedro Yuste Pérez

Cotutor: Juan Antonio Vila Carbó

Índice General

LISTA DE ILUSTRACIONES.....	3
LISTA DE TABLAS.....	6
PARTE I. MEMORIA DEL PROYECTO. DISEÑO DE UNA APROXIMACIÓN PBN BASADA EN GNSS.....	9
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	10
1.2. AEROPUERTO DE PAMPLONA.....	11
1.2.1. <i>Introducción</i>	11
1.2.2. <i>Infraestructura</i>	12
1.2.3. <i>Espacios aeronáuticos</i>	14
1.2.4. <i>Procedimientos existentes</i>	14
1.3. SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS).....	15
1.3.1. <i>Introducción</i>	15
1.3.2. <i>Galileo</i>	16
1.3.3. <i>Sistemas de Aumentación</i>	17
1.3.4. <i>SBAS</i>	17
1.3.5. <i>EGNOS</i>	19
1.4. NAVEGACIÓN BASADA EN PRESTACIONES (PBN).....	22
1.4.1. <i>Concepto PBN</i>	22
1.4.2. <i>Procedimientos LPV y LNAV/VNAV</i>	24
1.5. FASES DE UNA APROXIMACIÓN.....	26
1.5.1. <i>Aproximación inicial</i>	26
1.5.2. <i>Aproximación intermedia</i>	26
1.5.3. <i>Aproximación final</i>	27
1.5.4. <i>Descripción de las OAS</i>	27
1.5.5. <i>Aproximación frustrada</i>	29
1.6. REQUERIMIENTOS DE LA OPERACIÓN.....	30
1.6.1. <i>Descripción de la OCA/H y el MOC</i>	30
1.6.2. <i>Niveles de protección lateral</i>	31
1.6.3. <i>Niveles de protección vertical</i>	31
1.7. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE LAS APROXIMACIONES.....	33
1.7.1. <i>Modelo de Elevación del Terreno (MET)</i>	33
1.7.2. <i>Circuito de aproximación visual</i>	34
1.7.3. <i>Pista ficticia con aproximación directa</i>	46
1.8. APROXIMACIÓN LPV.....	48
1.8.1. <i>Análisis inicial de la fase intermedia</i>	48
1.8.2. <i>OAS sobre el umbral ficticio</i>	51
1.8.3. <i>Análisis del viraje</i>	56
1.8.4. <i>OAS sobre el punto M</i>	57
1.8.5. <i>OAS sobre el punto M2</i>	61
1.8.6. <i>Tramo visual con derrota prescrita</i>	66
1.8.7. <i>Tramo de aproximación intermedia</i>	71
1.8.8. <i>Resumen del procedimiento y mínimos operacionales</i>	73
1.9. APROXIMACIÓN LNAV.....	75
1.9.1. <i>Análisis inicial de las fases de aproximación final e intermedia</i>	75
1.9.2. <i>Aproximación intermedia</i>	77
1.9.3. <i>Aproximación final</i>	78
1.9.4. <i>Transición entre la fase final y la frustrada inicial</i>	79
1.10. CONCLUSIONES.....	82
PARTE II. PLANOS.....	83
PARTE III. CÓDIGO DESARROLLADO EN MATLAB.....	88
3.1. SCRIPTS	89

3.1.1. <i>Area_Visual</i>	89
3.1.2. <i>LPV_OAS</i>	89
3.1.3. <i>Aprox_tramos</i>	89
3.1.4. <i>Viraje_Visual</i>	89
3.2. FUNCIONES	90
PARTE IV. PLIEGO DE CONDICIONES.....	96
4.1. CLAVE DE REFERENCIA DEL AERÓDROMO.....	97
4.2. FLOTA USUARIA.	100
4.3. CLIMATOLOGÍA.	101
4.4. COMPATIBILIDAD CON PROCEDIMIENTOS EXISTENTES.	102
PARTE V. PRESUPUESTO.....	104
5.1. INTRODUCCIÓN	105
5.2. COSTE DE PERSONAL	105
5.3. COSTE INFORMÁTICO	106
5.4. COSTE INDIRECTO.....	107
5.5. PRESUPUESTO TOTAL.....	107
PARTE VI. BIBLIOGRAFÍA.....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	108

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Ubicación del Aeropuerto de Pamplona. AENA.	11
Ilustración 2. Ubicación en detalle del Aeropuerto de Pamplona. AENA.	12
Ilustración 3. Aeropuerto de Pamplona. Google Earth.....	13
Ilustración 4. Estructura de los sistemas GNSS. [4].....	16
Ilustración 5. Estructura SBAS. [4]	18
Ilustración 6. Sistemas SBAS implementados en la actualidad. [4]	18
Ilustración 7. Estructura de EGNOS. [6].....	19
Ilustración 8. Infraestructura terrestre de EGNOS. [6].....	20
Ilustración 9. Estructura de EDAS. [6]	21
Ilustración 10. Concepto PBN. [8]	22
Ilustración 11. Comparación entre navegación tradicional y RNAV. [8]	22
Ilustración 12. Tipos de especificaciones para la navegación. [8]	23
Ilustración 13. Especificaciones asociadas a cada fase de vuelo. [8]	24
Ilustración 14. Tipos de aproximaciones RNP. [9].....	24
Ilustración 15. Mapa LPV en Europa. [10].....	25
Ilustración 16. Fases de una aproximación. [4].....	26
Ilustración 17. Sistema de coordenadas OAS. [6]	28
Ilustración 18. Vista en planta y perfil de las superficies OAS. [6].....	28
Ilustración 19. Actuales mínimos de operación.....	30
Ilustración 20. Áreas primaria y secundaria en las fases de aproximación. [6]	31
Ilustración 21. División del terreno nacional en celdas MTN50. [8]	33
Ilustración 22. Zonas de interés a representar. [8].....	34
Ilustración 23. Circuito Visual para varias pistas operativas. [4]	36
Ilustración 24. Circuito Visual para categoría A con elevación de 557 metros y obstáculo determinante en Google Earth.	37
Ilustración 25. Circuito Visual a una elevación de 557 metros para categoría B y obstáculo determinante en Google Earth.	38
Ilustración 26. Circuito Visual a una elevación de 557 metros para categoría C y obstáculo determinante en Google Earth.	39
Ilustración 27. Restricción de rumbos en el área del circuito visual.	40
Ilustración 28. Circuito visual completo para categoría A con una elevación de 557 metros.	41
Ilustración 29. Circuito visual recortado para categoría A con una elevación de 557 metros.	41
Ilustración 30. Circuito visual recortado para categoría B con una elevación de 557 metros.	43
Ilustración 31. Circuito visual recortado para categoría C con una elevación de 557 metros.	44
Ilustración 32. Restricción en el radio del circuito visual para categoría C. 44	
Ilustración 33. Circuito visual para categoría C con radio de 5.36 km a una elevación de 557 metros.	45
Ilustración 34. Actual carta de aproximación por instrumentos para la cabecera 33.....	46

Ilustración 35. Representación de las coordenadas de los umbrales ficticios B33 y B15 y el punto de rotación A en Google Earth.....	47
Ilustración 36. Terreno que precede al umbral ficticio en la aproximación directa con rumbo 33° en el sistema de coordenadas OAS.....	49
Ilustración 37. Área de la fase intermedia a 10 km el umbral ficticio con una elevación de 700 metros para rumbo de aproximación 33°.....	50
Ilustración 38. PANS OPS categorías A y B.	51
Ilustración 39. PANS-OPS categoría C.	52
Ilustración 40. Puntos que definen las superficies OAS.	52
Ilustración 41. Intersección entre el MET y las OAS para un GP de 3° y categoría A en la aproximación a B33.	53
Ilustración 42. OAS para un GP de 3° y categoría A en la aproximación a B33 en Google Earth.....	54
Ilustración 43. Puntos de inicio de viraje y punto M en Google Earth.	57
Ilustración 44. Intersección entre el MET y las OAS para un GP de 3° y categoría A en la aproximación a M.....	58
Ilustración 45. Intersección entre el MET y las OAS para un GP de 3.5° y categoría A en la aproximación a M.....	60
Ilustración 46. Puntos de inicio y fin de viraje para categoría C.	62
Ilustración 47. Definición de punto de recorrido de paso y punto de recorrido de sobrevuelo.	63
Ilustración 48. OAS sobre el punto M2 con GP de 3° para categoría C	65
Ilustración 49. OAS sobre el punto M2 con GP de 3.5° para categoría C.....	66
Ilustración 50. Área de la derrota prescrita para categoría C.....	67
Ilustración 51. Área de la derrota prescrita a una elevación de 662 metros.68	
Ilustración 52. Referencia visual para el inicio del viraje.....	69
Ilustración 53. Referencia visual en detalle para el inicio del viraje.	69
Ilustración 54. Referencia visual para el fin del viraje.....	70
Ilustración 55. Referencia visual en detalle para el fin del viraje.	70
Ilustración 56. Fase intermedia a 16373 metros de B33 a una elevación de 650 metros.....	72
Ilustración 57. Actuales mínimos operacionales.....	74
Ilustración 58. Áreas de aproximación intermedia y final a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 33°.....	76
Ilustración 59. Áreas de aproximación intermedia y final a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 35°.....	76
Ilustración 60. Área de aproximación intermedia a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 35°.	77
Ilustración 61. Área de aproximación final a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 35°.....	78
Ilustración 62. Criterio de estrechamiento de la fase de aproximación final.	80
Ilustración 63. Fase de aproximación final con rumbo de aproximación 35° y estrechamiento.....	81
Ilustración 64. Situación actual del Aeropuerto de Pamplona. AENA.	84
Ilustración 65. Infraestructuras del Aeropuerto de Pamplona. AENA.....	85

Ilustración 66. Plano del Aeródromo. OACI.....	86
Ilustración 67. Actual procedimiento de aproximación por instrumentos a la cabecera 33 del Aeropuerto de Pamplona.....	87
Ilustración 68. Perfil de la pista. [9]	97
Ilustración 69. Criterios para deducir la clave de referencia del aeródromo. [8]	98
Ilustración 70. Rosa de los vientos totales en el aeropuerto de pamplona entre 1993 y 2006. [11].....	102
Ilustración 71. Zonas restringidas y peligrosas en las cercanías del aeropuerto. [12].....	103

Lista de Tablas.

Tabla 1. Características de la pista. AENA.	12
Tabla 2. Procedimientos RNP APCH (Cat A – E). [6].....	31
Tabla 3. Valores del MOC en el área primaria para cada una de las fases de aproximación. [6]	32
Tabla 4. Cálculo de TAS.	34
Tabla 5. Radios desde el umbral de pista.	35
Tabla 6. Valores del MOC para el circuito visual. [6]	35
Tabla 7. Coordenadas del obstáculo determinante AIP en circuito visual para categoría A.	37
Tabla 8. OCA/H en circuito visual AIP para categoría A.....	37
Tabla 9. Coordenadas del obstáculo determinante AIP en circuito visual para categoría B.....	38
Tabla 10. OCA/H en circuito visual AIP para categoría B.....	38
Tabla 11. Coordenadas del obstáculo determinante AIP en circuito visual para categoría C.	39
Tabla 12. OCA/H en circuito visual AIP para categoría C.....	39
Tabla 13. Obstáculo determinante utilizando el MET en el circuito visual recortado para categoría A.	42
Tabla 14. OCA/H para el circuito visual de categoría A recortado utilizando el MET.	42
Tabla 15. Obstáculo determinante utilizando el MET en el circuito visual recortado para categoría B.	43
Tabla 16. OCA/H para el circuito visual de categoría B recortado utilizando el MET.	43
Tabla 17. Obstáculo determinante utilizando el MET en el circuito visual recortado para categoría C.	44
Tabla 18. Obstáculo determinante para el circuito visual de categoría C con MET y reducción de radio a 5.36 km.	45
Tabla 19. OCA/H para categoría C con radio 5.36 km y MET.....	45
Tabla 20. Coordenadas del obstáculo determinante en la fase de aproximación intermedia a 10 kilómetros del umbral.....	50
Tabla 21. OCA/H para la fase de aproximación intermedia a 10 km del umbral ficticio.	50
Tabla 22. Obstáculo determinante en las OAS sobre B33 para categorías A, B y C.....	54
Tabla 23. OCA/H de las OAS sobre B33 para categoría A.....	55
Tabla 24. Tabla 16. OCA/H de las OAS sobre B33 para categoría B.	55
Tabla 25. Tabla 16. OCA/H de las OAS sobre B33 para categoría C.	55
Tabla 26. Velocidades de aproximación para cada categoría en km/s.	56
Tabla 27. Velocidad angular y radio de giro para cada categoría.	56
Tabla 28. Obstáculo determinante en las OAS sobre M a 3° para categorías A, B y C.....	58
Tabla 29. OCA/H de las OAS sobre M para categoría A y GP de 3°.	59
Tabla 30. OCA/H de las OAS sobre M para categoría B y GP de 3°.	59

Tabla 31. OCA/H de las OAS sobre M para categoría C y GP de 3°.	59
Tabla 32. Obstáculo determinante en las OAS sobre M con GP de 3.5° para categorías A, B y C.	60
Tabla 33. OCA/H de las OAS sobre M para categoría A y GP de 3.5°.	60
Tabla 34. OCA/H de las OAS sobre M para categoría B y GP de 3.5°.	60
Tabla 35. OCA/H de las OAS sobre M para categoría C y GP de 3.5°.	61
Tabla 36. Distancias de estabilización para puntos de recorrido de paso.	63
Tabla 37. Longitud de los tramos de la aproximación visual para categoría C.	64
Tabla 38. Altitud y elevación del punto M2.	64
Tabla 39. Longitud de los tramos de aproximación visual para categoría A.	64
Tabla 40. Longitud de los tramos de aproximación visual para categoría B.	65
Tabla 41. Valores de la semianchura del corredor de la derrota prescrita. [11]	66
Tabla 42. MOC de aproximaciones visuales utilizando derrotas prescritas. [11]	68
Tabla 43. Obstáculo determinante de la fase intermedia a 16.373 km de B33.	72
Tabla 44. OCA/H de la fase intermedia a 16.373 km de B33.	72
Tabla 45. Mínimos operacionales para categorías A, B y C sin redondeo.	74
Tabla 46. Mínimos operacionales para categorías A, B y C con redondeo.	74
Tabla 47. Obstáculo determinante de la fase intermedia a 15 km del umbral ficticio.	77
Tabla 48. OCA/H de la fase intermedia a 15 km del umbral ficticio.	78
Tabla 49. Obstáculo determinante en la fase de aproximación final de longitud 15 km.	78
Tabla 50. OCA/H de la fase de aproximación final de longitud 15km.	79
Tabla 51. Función "Umbral_rot".	90
Tabla 52. Función "matrices".	90
Tabla 53. Función "MET_rot".	90
Tabla 54. Función "read_OBS".	91
Tabla 55. Función "RT".	91
Tabla 56. Función "Tramos_Visual".	92
Tabla 57. Función "pol_aprox".	92
Tabla 58. Función "plotSurfint2". [8]	92
Tabla 59. Función "PANS_OPS".	93
Tabla 60. Función "Obst_Visual_MDT".	93
Tabla 61. Función "Obst_Visual".	93
Tabla 62. Función "Obst_OAS". [8]	94
Tabla 63. Función "Obst_NPA".	94
Tabla 64. Función "generateOAS_SBAS". [8]	94
Tabla 65. Función "Circuito_Visual".	95
Tabla 66. Función "Plot_OAS_MET". [8]	95
Tabla 67. Valores de referencia asociados a las aeronaves. [10]	99
Tabla 68. Flota usuaria del aeropuerto de pamplona en 2006. [11]	100
Tabla 69. Cálculo de horas de trabajo.	105

Tabla 70. Costes asociados al personal.	106
Tabla 71. Costes asociados al Equipo y el software utilizados.	106
Tabla 72. Costes indirectos.	107
Tabla 73. Presupuesto total.	107

Parte I. Memoria del proyecto. Diseño de una aproximación PBN basada en GNSS.

1.1. Introducción General.

En este proyecto se pretende realizar el diseño de una aproximación final basada en prestaciones o PBN para el Aeropuerto de Pamplona. Concretamente, serán diseñados para la cabecera 33 dos procedimientos de aproximación final de manera independiente. Cabe destacar que en ambos diseños será necesaria la incorporación de una derrota prescrita para el tramo visual de la aproximación debido a la geografía que rodea al aeropuerto. De forma posterior al diseño, se procederá a la comparación entre ambos con el fin de estudiar si alguno mejora los mínimos de operación implantados actualmente.

- En primer lugar, se diseñará una aproximación final **APV SBAS o LPV**. En ellas, la aeronave es proporcionada de guiado vertical mediante SBAS.
- En segundo lugar, el diseño será llevado a cabo atendiendo al procedimiento de aproximación final **LNAV**, en el cual se proporciona guiado lateral mediante GNSS básico.

Las aproximaciones mediante el uso del sistema de aumentación SBAS se consideran una tendencia creciente en los últimos años, ya que supone una alternativa más económica a los sistemas de aproximación por instrumentos ILS.

En primer lugar, se presenta esta memoria del proyecto. En ella, se realiza una introducción teórica a los sistemas GNSS, cuyas transmisiones constituyen la base de este trabajo de fin de grado. De forma posterior, se desarrollan los sistemas de aumentación y se concreta en el proveedor SBAS europeo, EGNOS, el cual consta de tres satélites geostacionarios que complementan a las constelaciones de satélites GNSS y permiten mejorar sus prestaciones para campos como el de la navegación aérea. Como proveedor de señal GNSS actualmente se utiliza la constelación americana GPS, pero se espera contar con Galileo en un futuro cercano.

De forma anterior al desarrollo del diseño, también se realizará una explicación teórica en la que se exponen los principales conceptos relacionados con cada una de las aproximaciones. Como base bibliográfica para el diseño cabe destacar las pautas establecidas por la OACI para este tipo de aproximaciones, donde distinguimos el Documento 8168: “Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos” y el Documento 9163 “Performance-Based Navigation Manual (PBN)”. También ha servido de gran ayuda el Anexo 14 de la OACI, en el que se hace referencia a los Aeródromos.

1.2. Aeropuerto de Pamplona.

1.2.1. Introducción.

El Aeropuerto de Pamplona se encuentra situado a 6 km. al sur de la capital de Navarra, Pamplona. Concretamente, su superficie se encuentra repartida entre los municipios de Noain y Galar.

La Comunidad Autónoma cuenta con una población total de unos 600.000 habitantes, de los cuales en torno a un 35% reside en Pamplona. El acceso al aeropuerto se realiza a través de la Nacional NA-6026, que parte de la Autovía de acceso sur a Pamplona PA-31.



Ilustración 1. Ubicación del Aeropuerto de Pamplona. AENA.

Se trata de un Aeropuerto Civil Internacional de tercera categoría. Presenta enlaces continuos con dos destinos principales: Madrid-Barajas y Frankfurt. Así, el desglose del tráfico doméstico e internacional representan un 78% y 22%, respectivamente. [1]

El aeropuerto registró en 2018 un total 6.100 operaciones y 242.500 pasajeros, lo que representa un incremento del 24,1% respecto al año anterior. Por otro lado, el aeropuerto manejó un total de 22,2 toneladas de carga, lo que supone un descenso de este campo en un 24,3% respecto a 2018. [2]



Ilustración 2. Ubicación en detalle del Aeropuerto de Pamplona. AENA.

Su referencia OACI es LEPP, la “L” es común en los aeropuertos del sur de Europa, Israel y Turquía, la “E” es común para los aeropuertos españoles y las dos últimas letras hacen referencia al aeropuerto en cuestión. Su código IATA es PNA.

El aeropuerto pertenece a la red de aeropuertos de AENA, el principal gestor aeroportuario de nuestro país, y cuenta con una clave de referencia OACI 4C. El número tiene que ver con la longitud de su campo de referencia y la letra se refiere al intervalo de envergadura de las aeronaves que operan en él.

1.2.2. Infraestructura.

- Pista

El aeropuerto de Pamplona dispone de una única pista de orientación 15-33 con unas dimensiones de 2405 x 45 m. La pista contiene raquetas en ambas cabeceras que permiten el cambio de sentido de las aeronaves. La cabecera 15 dispone de un ILS de categoría I y el umbral 33 se encuentra desplazado 500 m. Las principales características de la pista pueden apreciarse en la siguiente tabla:

RWY	TORA (m)	TODA (m)	ASDA (m)	LDA (m)
15	2205	2285	2205	2205
33	2405	2505	2405	1905

Tabla 1. Características de la pista. AENA.



Ilustración 3. Aeropuerto de Pamplona. Google Earth.

- Calles de salida y rodaje

La pista cuenta con una calle de rodaje única a 90° situada en el umbral desplazado.

- Plataforma de estacionamiento de aeronaves

Dividida en una plataforma de aviación comercial con una superficie de 28.000 m², una plataforma de aviación general con una superficie de 6.288 y un hangar de 514 m².

- Terminal de pasajeros
- Terminal de carga
- Zona de Aparcamiento
- Edificio Contraincendios
- Torre de Control (TWR)
- Centro de Emisores, Receptores y Comunicación
- Centro Informático y de Meteorología
- Central Eléctrica
- Central Térmica
- Taller de Mantenimiento Iberia

- Hangar Real Aeroclub de Navarra
- Depósitos de Combustible

1.2.3. Espacios aeronáuticos.

En primer lugar, de acuerdo con lo establecido con el Anexo 11 de la OACI “Servicios de tránsito Aéreo”, el espacio aéreo ATS se encuentra clasificado en niveles, designados por letras de la “A” a la “G”. Bajo una primera clasificación, el espacio aéreo se clasifica en espacio aéreo controlado, con designación A, B, C, D o E y en espacio aéreo no controlado, designados por las letras F y G.

Dentro de este espacio aéreo pueden tener lugar vuelos en régimen instrumental (IFR) y vuelos en régimen visual (VFR). Volviendo a la designación de los distintos niveles por letras, el nivel de vuelo “A” será el más restrictivo ya que, por ejemplo, solo permite vuelos IFR. A este le seguirá el nivel de vuelo “B” y así sucesivamente hasta llegar al nivel “G”, en el que solo se permiten vuelos en régimen visual.

Además, en función del nivel de vuelo en el que nos encontremos, las aeronaves serán provistas de distintos servicios por parte del Sistema de Tránsito Aéreo o Air Traffic Service (ATS), tales como Air Traffic Control Service (ATCS), Flight Information Service (FIS) y Alert Service (AS) y de restricciones de velocidad, Indicated Air Speed (IAS), y altitud.

Pamplona se encuentra dentro del FIR/UIR de Madrid. Su Zona de Tránsito de Aeródromo (ATZ), Zona de Control (CTR), y su Área de Control (CTA) se tratan de espacios aéreos de categoría D cuyo servicio ATS es proporcionado por la Torre de Control (TWR).

1.2.4. Procedimientos existentes.

El Aeropuerto de Pamplona no posee rutas ni procedimientos de llegadas publicados (STAR). Por otro lado, si que presenta rutas de aproximación por instrumentos entre las que destaca la aproximación de precisión basada en un ILS de categoría I para la pista 15, así como distintos procedimientos de aproximación por instrumentos de no precisión basados en un VOR/DME para la pista 33, sobre la que se pretenden implantar los procedimientos diseñados a continuación.

En el AIP también se encuentran disponibles los distintos procedimientos de aproximación en régimen de vuelo visual, así como las cartas de salida normalizada de vuelo por instrumentos (SID).

1.3. Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS).

1.3.1. Introducción.

Hoy en día, la forma de navegación más innovadora y precisa es la basada en el uso de satélites. El término GNSS hace referencia a una constelación de satélites que transmiten información de tiempo y posicionamiento a receptores GNSS que usan esta información para determinar su localización. [4]

Entre las constelaciones más importantes de satélites GNSS destacamos las impulsadas por los gobiernos de EE. UU. y Rusia, GPS (Global Positioning System) y GLONASS respectivamente, la europea Galileo, y la china BeiDou. La actuación de estos satélites irá en función de cuatro criterios principales:

- Precisión: diferencia entre la posición, velocidad o tiempo medida por el receptor y el valor real.
- Integridad: capacidad de un sistema para proporcionar mediciones dentro de un intervalo de confianza y, en el caso de una medición anómala, dar una señal de alarma.
- Continuidad: permite al sistema operar sin interrupciones.
- Disponibilidad: porcentaje del tiempo que el sistema cumple con los requisitos de precisión, integridad y continuidad.

Es importante destacar que los sistemas GNSS no pueden usarse como único método para esta determinación por dos motivos principales:

- La naturaleza militar de estas constelaciones, principalmente de las pioneras GPS y GLONASS, no garantiza su continua operación en usuarios civiles.
- La calidad de las mediciones irá en función de su precisión, disponibilidad, continuidad e integridad. Estos parámetros constituyen requisitos para el régimen de vuelo por instrumentos o IFR y no pueden ser garantizados únicamente por los sistemas GNSS debido a que no fueron diseñados para ello.

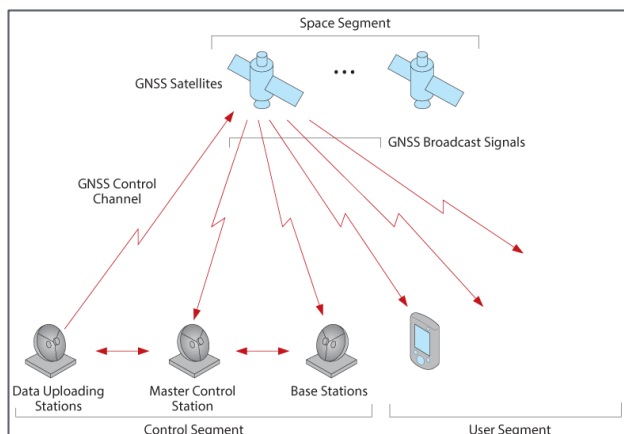


Ilustración 4. Estructura de los sistemas GNSS. [4]

Como puede apreciarse en la *Ilustración 4*, la estructura de los sistemas GNSS se encuentra dividida en tres segmentos. El segmento espacial (SS), el segmento de control (CS) y el segmento usuario (US).

1.3.2. Galileo.

Las constelaciones GPS y, posteriormente, GLONASS, fueron las precursoras en cuanto a constelaciones y sistemas GNSS. No obstante, estas constelaciones se encuentran bajo control militar ya que surgieron con dichas finalidades. Por otro lado, la constelación impulsada por la Unión Europea y desarrollada en conjunto con la Agencia Espacial Europea (ESA), Galileo, se encuentra bajo el control civil. Fue creada con la finalidad de no tener que depender de los sistemas ruso y americano.

Galileo empezó a ofrecer sus primeros servicios a finales del año 2016 y se encuentra aún en desarrollo con la esperanza de que se complete en el año 2020. Se espera que cuente con un total de 30 satélites operando en 6 planos orbitales a unos 23.000 km de la superficie terrestre. Actualmente hay 26 satélites en órbita.

Galileo ofrece los siguientes servicios:

- Open Service (OS): Servicio público de tiempo y posicionamiento.
- High Accuracy Service (HAS): Servicio de pago complementario del OS para obtener una mayor precisión en las mediciones.
- Public Regulated Service (PRS): Este servicio se encuentra restringido para usuarios gubernamentales para aplicaciones que requieran un mayor nivel de continuidad.

- Search and Rescue Service (SAR): Dedicado a la ayuda de personas en situaciones de peligro.

1.3.3. Sistemas de Aumentación.

Si nos centramos en el campo de la navegación aérea, se requiere de sistemas con bastante precisión con el fin que las aeronaves cumplan con su cometido de la manera más eficiente posible pero siempre garantizando su seguridad. Ya se ha comentado anteriormente que los sistemas GNSS no se diseñaron con la finalidad principal de dar servicio a este sector.

De esta forma, surgen los sistemas de aumentación, cuyo objetivo principal es el de obtener una mayor calidad en las mediciones en base a precisión, disponibilidad, integridad y continuidad. Su funcionamiento se centra en la aplicación de correcciones diferenciales con el fin de disminuir errores y proporcionar a los receptores de las aeronaves de información más precisa.

Actualmente distinguimos tres sistemas de aumentación:

- GBAS (Ground-Based Augmentation System): Sistema basado en instalaciones terrestres.
- SBAS (Satellite-Based Augmentation System): Sistema basado en satélites que complementan a los GNSS.
- ABAS (Aircraft-Based Augmentation System): Sistema caracterizado por el hecho de que todo el equipo necesario para la aumentación se encuentra embarcado en la aeronave. Se trata de un sistema muy utilizado en las fases de ruta, salidas y llegadas.

El sistema SBAS presenta la ventaja de que puede dar cobertura a un área extensa, mientras que GBAS y ABAS presentan una mayor limitación en su rango de operación y son considerados como sistemas locales. Por consiguiente, el sistema SBAS será explicado en mayor detalle a continuación.

1.3.4. SBAS.

En base a lo comentado anteriormente, el sistema SBAS se presenta como la mejor alternativa en cuanto a sistemas diferenciales de aumentación para el campo de la navegación aérea y sus distintas fases de vuelo. Su estructura se encuentra organizada de la siguiente forma:

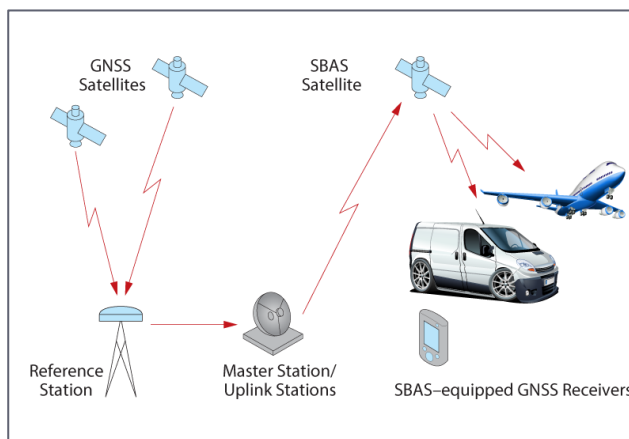


Ilustración 5. Estructura SBAS. [4]

- Segmento Espacial: Formado por constelaciones de satélites geostacionarios (GEO) que reciben la señal aumentada de los satélites GNSS y la envían a sus receptores.
- Segmento Tierra: Lo componen diversas estaciones de referencia en tierra. Estas estaciones reciben las mediciones de los satélites GNSS. Dicha información es enviada a centros de control y procesamiento. En ellos, son aplicadas correcciones diferenciales y las mediciones son recalculadas. Esta información es enviada a las “Uplink Stations”, encargadas de la comunicación con los satélites SBAS.
- Segmento Usuario: Compuesto por los receptores de la señal GNSS que disfrutan de los servicios proporcionados por el sistema SBAS.

Los sistemas de aumentación SBAS se encuentran distribuidos en constelaciones con el fin de dar cobertura a una determinada zona o territorio. Así, en la actualidad distinguimos: WAAS, EGNOS, SDCM, GAGAN y MSAS, cuyas zonas de operación pueden apreciarse en la *Ilustración 6*.

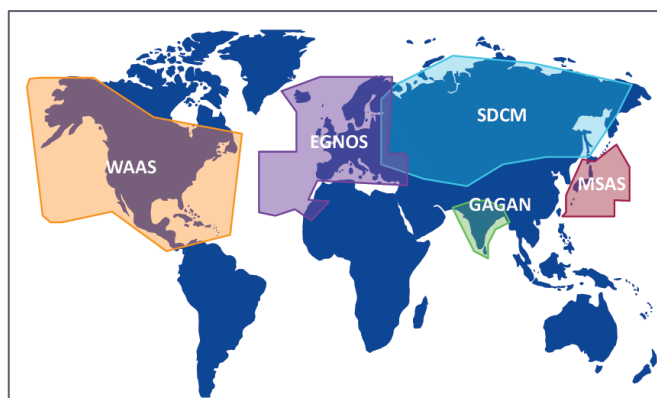


Ilustración 6. Sistemas SBAS implementados en la actualidad. [4]

Una vez expuestos los sistemas SBAS actuales a nivel global, se dispone a profundizar en el sistema europeo EGNOS en el siguiente apartado.

1.3.5. EGNOS.

El European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), fue creado para mejorar las prestaciones del sistema GPS y del sistema Galileo en un futuro próximo. Inició sus operaciones en 2005 y fue certificado para la navegación aérea en 2009.

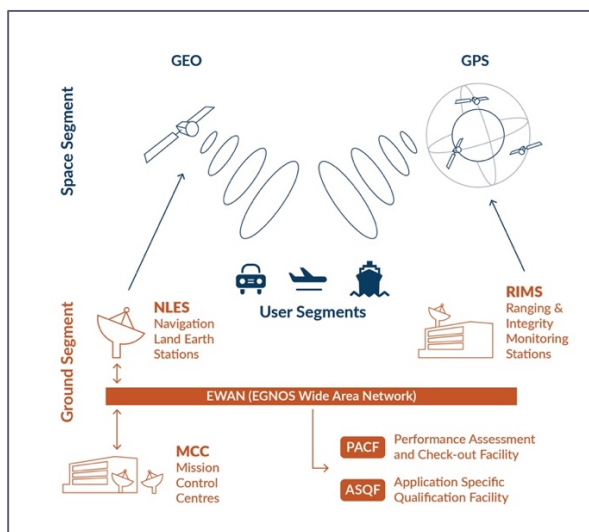


Ilustración 7. Estructura de EGNOS. [6]

La estructura de EGNOS se encuentra dividida en cuatro segmentos:

- Segmento de tierra: Formado por 40 “Ranging Integrity Monitoring Stations” (RIMS), 2 “Mission Control Centres” (MCC), 2 “Navigation Land Earth Stations” (NLES) por satélite GEO, y el “EGNOS Wide Area Network” (EWAN), que hace de nexo de Comunicaciones para todas las infraestructuras en tierra. [6]
 - La función de las RIMS es la de recibir la información de los satélites GNSS y transmitirla a los centros de procesamiento o “Central Processing Facilities” (CPF) de cada MCC.
 - Los MCC reciben los datos de las RIMS y generan las correcciones diferenciales con el fin de mejorar la integridad del sistema.
 - Las NLES transmiten los mensajes de las MCC a los GEO.



Ilustración 8. Infraestructura terrestre de EGNOS. [6]

- Segmento de support: A parte de la infraestructura terrestre ya mencionada, EGNOS también tiene otras instalaciones dedicadas a mantenimiento y verificación conocidas como Performance Assessment and Check-out facility (PACF) y Application Specific Qualification Facility (ASQF), ambas reguladas por el EGNOS Service Provider (ESSP).
- Segmento espacial: Compuesto por tres satélites GEO.
- Segmento usuario: Lo forman los receptores de la señal de EGNOS, obteniendo su localización con integridad. Actualmente EGNOS es compatible con sistemas de transporte por carretera, aéreo, marítimo y por raíl, sector agrícola, etc.

EGNOS ofrece tres servicios principales:

- Open Service: Este servicio se encuentra disponible desde 2009 y es accesible desde cualquier receptor compatible con GPS/SBAS sin necesidad de autorización. Sus precisiones mínimas de localización se encuentran disponibles:
 - Horizontal: error bidimensional máximo de 3 metros al 95%.
 - Vertical: error unidimensional máximo de 4 metros al 95%.
- Safety of Life (SoL) Service: Servicio proveedor de la navegación aérea. Mantiene los requisitos de integridad, disponibilidad y continuidad y es capaz de dar cabida hasta aproximaciones LPV (Localiser Performance with Vertical Guidance), que serán explicadas más adelante.

- EGNOS Data Access Service (EDAS): permite acceder a los datos almacenados, generados y transmitidos por los satélites EGNOS a tiempo real.

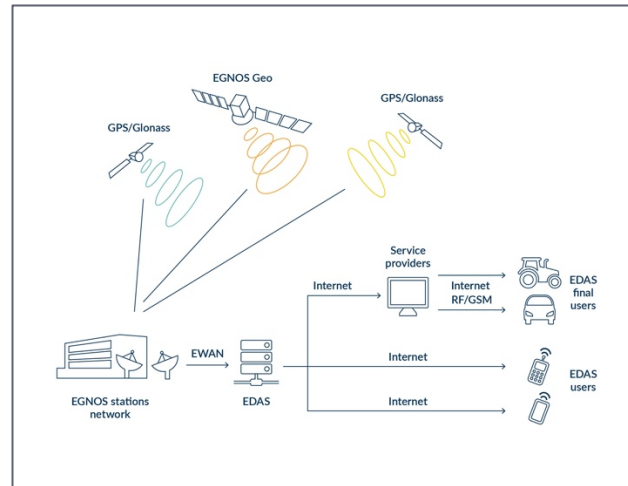


Ilustración 9. Estructura de EDAS. [6]

1.4. Navegación Basada en Prestaciones (PBN).

1.4.1. Concepto PBN.

La navegación basada en la performance (PBN) se define como un tipo de navegación de área (RNAV) para el que los requisitos de navegación se estipulan en las especificaciones de navegación. Siendo una especificación de navegación un conjunto de requisitos de aeronave y tripulación de vuelo necesario para llevar a cabo operaciones PBN dentro de un espacio aéreo definido. [5]

La navegación (NAV) PBN es uno de los elementos esenciales del espacio aéreo, como son las comunicaciones (COM), la vigilancia (SUR) del ATS y la gestión del tráfico aéreo (ATM). La aplicación de la navegación PBN esta basada en tres pilares básicos.

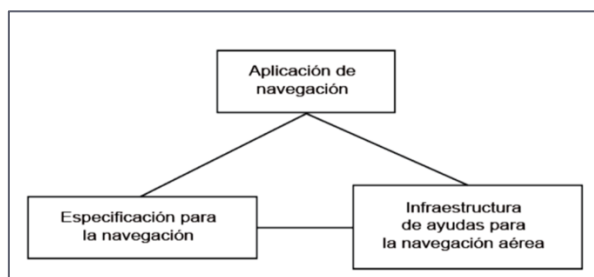


Ilustración 10. Concepto PBN. [8]

La navegación de área supone una evolución de la navegación tradicional (“navegación de punto a punto”), en la que se depende en gran medida de las radioayudas en tierra (NAVAIDs). Este tipo de navegación permite a las aeronaves operar en cualquier ruta ATS deseada, siempre dentro de los márgenes establecidos por el equipo a bordo de la aeronave. Dichos equipos se definen en función de su precisión, disponibilidad, continuidad e integridad.

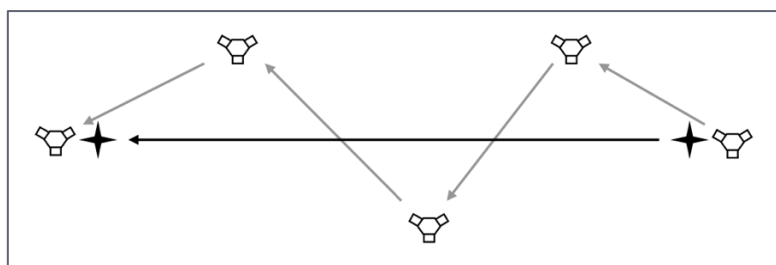


Ilustración 11. Comparación entre navegación tradicional y RNAV. [8]

En cuanto a los principales beneficios que aporta este método de navegación, podemos destacar:

- Reduce la necesidad de mantener rutas y procedimientos específicos.
- Evita tener que desarrollar procedimientos y operaciones cada vez que evoluciona la tecnología de los sistemas de navegación, lo que supondría un coste demasiado elevado.
- Permite un uso más eficiente del espacio aéreo.
- Clarifica la forma de utilizar los sistemas PBN (RNAV y RNP), que serán explicado a continuación.

La navegación basada en prestaciones se divide en dos especificaciones:

- RNAV (aRea NAVigation): no incluye el requisito de vigilancia y alerta del rendimiento a bordo.
- RNP (Required Navigation Performance): incluye el requisito de vigilancia y alerta del rendimiento a bordo.

Estas designaciones RNAV o RNP van acompañadas de un número que representa la precisión lateral en millas náuticas (NM) que se espera que tenga el sistema al menos un 95% del tiempo. De esta forma distinguimos los siguientes tipos de especificaciones según la aplicación de la navegación:

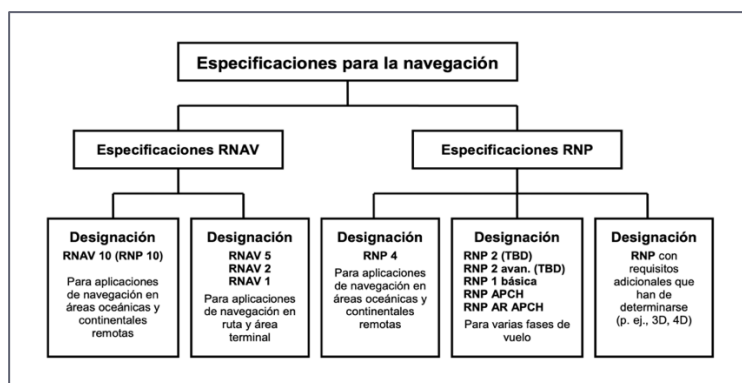


Ilustración 12. Tipos de especificaciones para la navegación. [8]

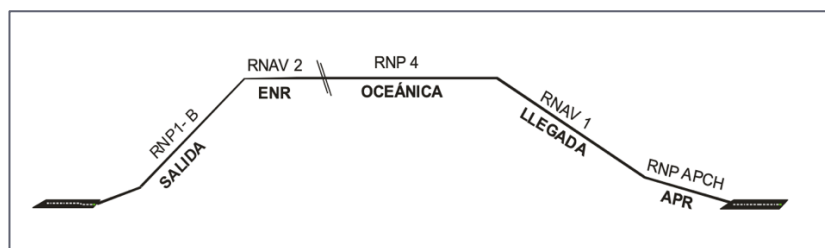


Ilustración 13. Especificaciones asociadas a cada fase de vuelo. [8]

Dentro del apartado de aproximaciones por instrumentos PBN o RNP APCH, es importante distinguir entre aproximaciones de no precisión (NPA), en las cuales no se dispone de guiado vertical, y aproximaciones de precisión (APV), donde distinguimos las aproximaciones que utilizan un altímetro barométrico (LNAV/VNAV) y las que utilizan SBAS (LPV) para su guiado vertical.

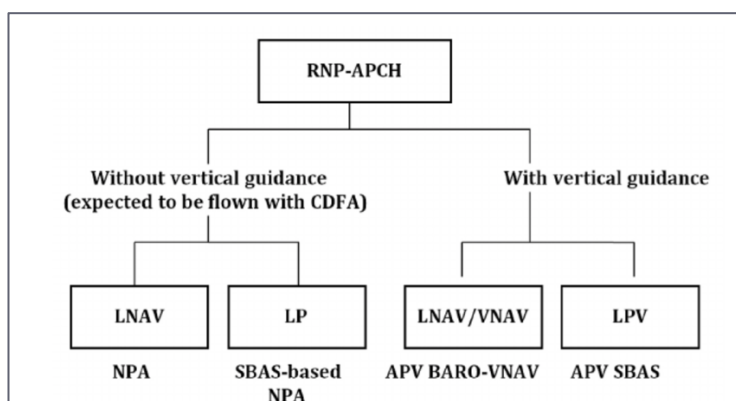


Ilustración 14. Tipos de aproximaciones RNP. [9]

1.4.2. Procedimientos LPV y LNAV/VNAV.

Como se ha comentado anteriormente, el concepto **LPV** hace referencia a aproximaciones de precisión en las que se requiere del sistema de aumentación SBAS. Concretamente, el servicio Safety of Life (SoL) de EGNOS es el que se encarga de dar servicio a estas operaciones en Europa.

Estas operaciones presentan, los siguientes beneficios:

- En primer lugar, estas operaciones presentan un gran parentesco con aproximaciones de precisión basadas en un ILS de categoría I. No obstante, se presentan como una alternativa mucho más económica

- Gracias a las aproximaciones LPV se consigue un aumento en la seguridad de las aproximaciones frente a condiciones climatológicas adversas.
- Se reducen las dispersiones en la trayectoria de las aeronaves, permitiendo así un uso más eficiente y flexible del espacio aéreo, lo que conlleva una disminución en el consumo de combustible de las aeronaves y en su impacto medioambiental.
- Dan lugar a aproximaciones que no podrían realizarse únicamente con procedimientos NPAs.

En base a todos estos beneficios, son muchos los países europeos que ya cuentan o han planteado la implantación de este tipo aproximaciones en sus aeródromos. En la *Ilustración 15* podemos apreciar los aeródromos con LPV operativo en verde y los que tienen planteada su implementación en amarillo, entre los que podemos identificar el Aeropuerto de Pamplona.

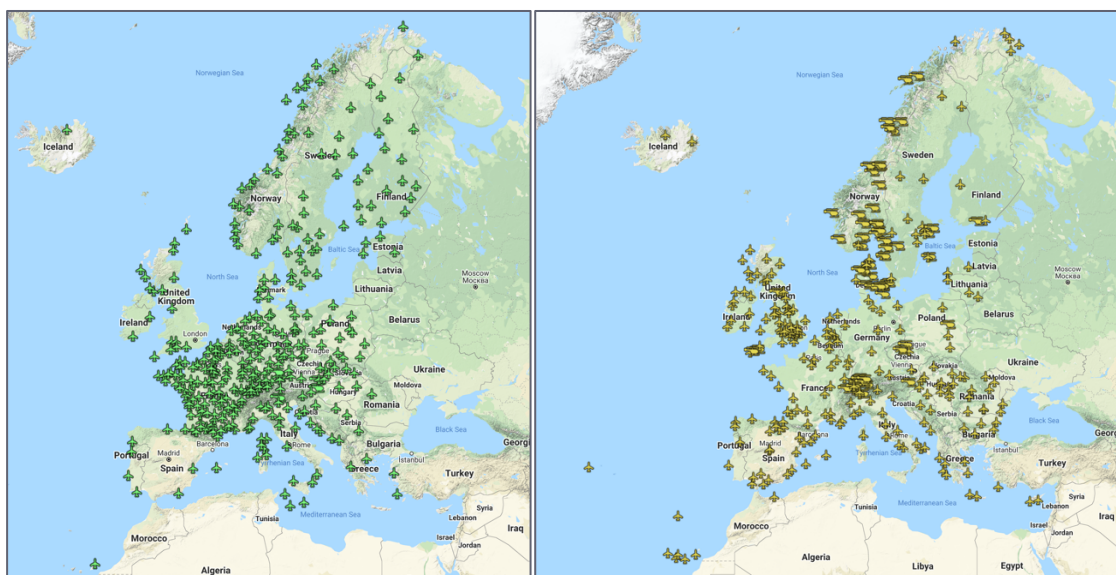


Ilustración 15. Mapa LPV en Europa. [10]

En los procedimientos **LNAV** se dispone de guiado vertical basado en recepciones del sistema GNSS básico. En este tipo de aproximaciones se aconseja un descenso continuo en aproximaciones directas.

1.5. Fases de una aproximación.

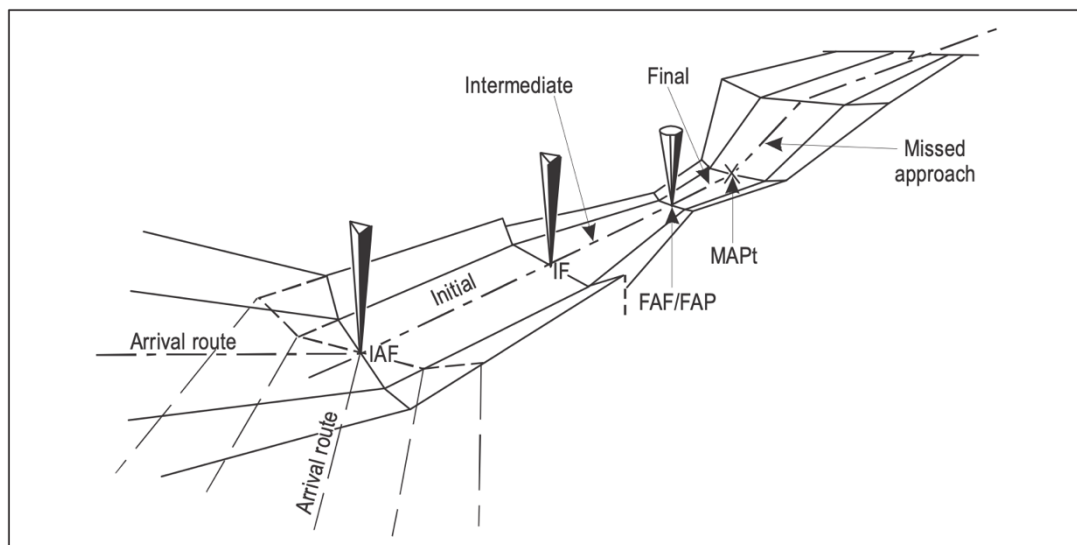


Ilustración 16. Fases de una aproximación. [4]

1.5.1. Aproximación inicial.

El tramo de aproximación inicial comienza en el punto de referencia de aproximación inicial o IAF. El objetivo principal de esta fase de la aproximación es el de ir disminuyendo la altitud y alinearse con la pista. Sin embargo, en nuestro caso, la aeronave no podrá alinearse con la pista hasta la aproximación final.

Las altitudes mínimas de este procedimiento no deben ser inferiores a la OCA/H y, además, deben expresarse en incrementos de 50 metros o 100ft. El MOC presenta un valor de 300 metros en el área primaria de esta fase.

La longitud óptima de este tramo es de 9 km y su pendiente óptima es del 4%. La pendiente puede alcanzar valores de hasta el 8% o incluso del 13.2% si se produce una restricción de la IAS máxima de 165 km/h.

1.5.2. Aproximación intermedia.

El tramo de aproximación intermedia tiene lugar entre el IF y el FAF. Al igual que en la aproximación inicial las altitudes deben expresarse en intervalos de 50 metros o 100 ft.

La longitud de este tramo no deberá ser mayor que 28 kilómetros (15NM) ni menor que 9.3 km (5NM). Estableciéndose una longitud óptima de 19 km. (10 NM). En el área primaria de esta fase de la aproximación se debe tener un margen mínimo de franqueamiento de obstáculos de 150 metros.

Esta fase es preferiblemente horizontal. En el caso de que se requiera de un descenso, la pendiente máxima autorizada es del 5.2%. Son posibles pendientes de descenso máximas de 13.2% si la IAS es restringida a 165 km/h y se presenta un tramo horizontal de al menos 2.8 km antes de la aproximación final para categorías C y D y de 1.9 km. para A y B.

1.5.3. Aproximación final.

La aproximación final con FAF tiene una longitud óptima de 9.3 km (5 NM), una longitud mínima de 5.6 km (3 NM) y una longitud máxima de 18.4 km. LA aproximación final termina en el punto de transición a VFR o inicio de la frustrada (MAPT).

Además, para aproximaciones finales en los que la derrota corta a la prolongación del eje de la pista, se establece una distancia mínima de 1400 metros entre el punto de corte y el umbral de pista. Se establece una pendiente óptima de 3°, estableciendo su valor máximo en 3.5°.

La aproximación final estaría comprendida entre el FAF y el punto de decisión o MAPt.

1.5.4. Descripción de las OAS.

La fase de aproximación final en el apartado del diseño de la aproximación LPV estará compuesta por las superficies OAS (Obstacle Assessment Surface) APV SBAS. Las cuales están formadas por siete superficies planas en pendiente, denominadas por las letras W, W', X, Y, Z. Estas superficies se distribuyen de manera simétrica alrededor de la derrota del tramo APV y el plano horizontal que contiene al umbral.

Su geometría está definida por cuatro ecuaciones lineales simples de la forma $z = Ax + By + C$. Estas dependen de la pendiente de aproximación frustrada y de la categoría de las aeronaves. Presentan el siguiente sistema de coordenadas:

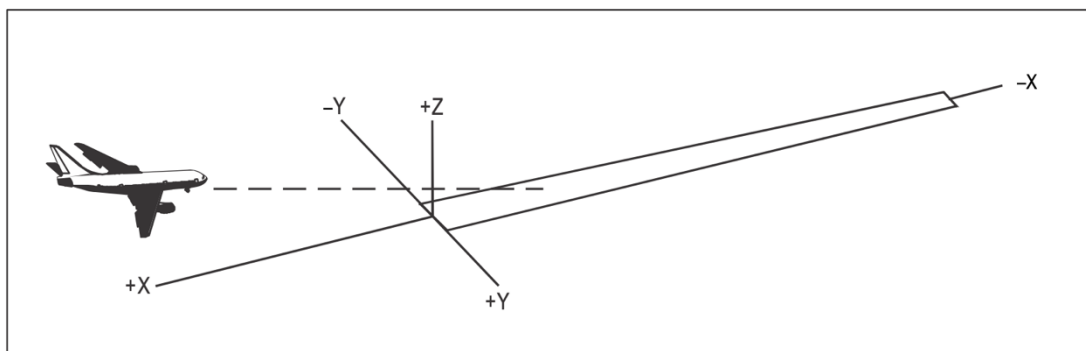


Ilustración 17. Sistema de coordenadas OAS. [6]

La coordenada “X” se considera positiva antes de la pista, la coordenada “Z” será la altitud respecto al umbral y la coordenada “Y” completa el triedro, siendo positiva hacia la derecha.

En la mayor parte de este proyecto este será el sistema de coordenadas empleado, ver *Ilustración 17*.

Para el cálculo de las constantes que nos permiten definir los planos que forman las superficies, será necesario el software PANS-OPS de EUROCONTROL. Este programa presenta los coeficientes para pendientes de descenso entre 2.5 y 3.5°, permitiendo variaciones de 0.1°. En la siguiente imagen pueden apreciarse estas superficies en planta y perfil.

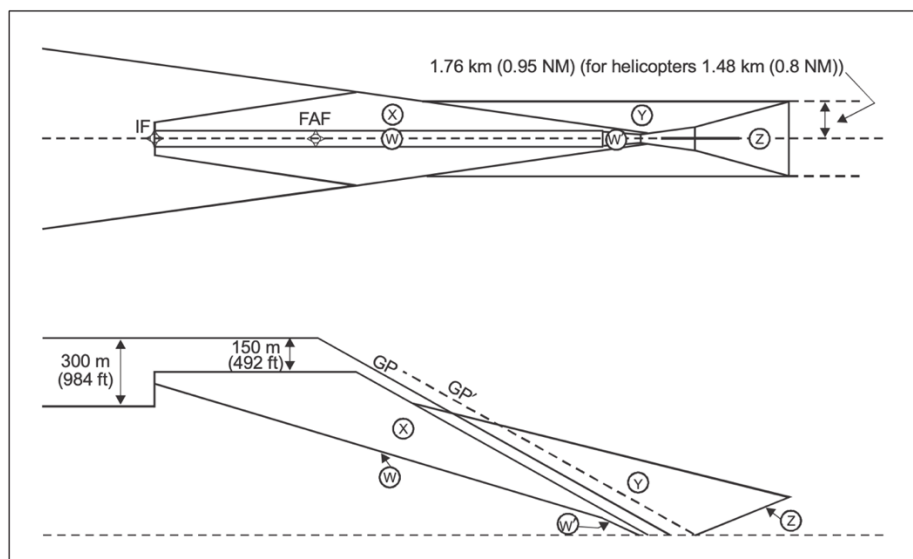


Ilustración 18. Vista en planta y perfil de las superficies OAS. [6]

1.5.5. Aproximación frustrada.

La aproximación frustrada tiene el objetivo principal de volver a remontar el vuelo para proceder a reiniciar la fase de aproximación y el aterrizaje. Esta tiene lugar cuando no se cumplen las condiciones óptimas para que se pueda aterrizar de manera segura.

Es importante comentar que, si tratamos con un procedimiento de no precisión, esta tendrá su comienzo en el punto de decisión o MAPT. A partir del cual la aeronave comienza un tramo recto hasta el punto SOC (Start of Climbing), donde empieza su ascenso. Por el otro lado, si no encontramos en un procedimiento APV, la aproximación frustrada tiene su comienzo en el SOC.

1.6. Requerimientos de la operación.

1.6.1. Descripción de la OCA/H y el MOC.

La OCA/H (Obstacle Clearance Altitude/Height) representa la menor altitud sobre el umbral/altura a la que se garantiza el correcto franqueamiento de obstáculos. La OCA/H es el resultado de añadir el MOC (Margen de franqueamiento de Obstáculos) conveniente al obstáculo de mayor cota que penetre nuestras correspondientes superficies en función de la fase de aproximación en la que nos encontremos.

Como guía para el establecimiento de la OCA/H, en el AIP podemos encontrar una lista de obstáculos para cada aeropuerto. En el caso del aeropuerto de Pamplona, ENAIRE considera como relevantes un total de 278 obstáculos.

Por otro lado, en la mayor parte de este proyecto, la OCA/H será calculada atendiendo al Modelo de Elevación del Terreno en las zonas de interés de nuestra aproximación. Este Modelo se encuentra explicado en mejor detalle en el apartado 1.7.1.

Nuestro objetivo principal será el de mejorar los mínimos actuales, que pueden apreciarse en la *Ilustración 19*.

- En el caso de la aproximación directa o STA (Straight Approach), la OCA/H se limita a los límites del circuito visual debido a la necesidad comentada anteriormente de un viraje en la aproximación final.
- Por otro lado, la OCA/H de circuito se encuentra diferenciada en función de su pendiente de frustrada. Sin embargo, para los cálculos de la OCA/H de circuito no interviene este parámetro como se verá en el apartado 1.7.2.

OCA/H		A	B	C	D
STA	2.5%	RESTRINGIDA A OCA/H DE CIRCUITO POR ÁNGULO DE LA DERROTA ENTRE FNA Y RCL EXCESIVO			
	4.5%	RESTRINGIDA A OCA/H DE CIRCUITO POR ÁNGULO DE LA DERROTA ENTRE FNA Y RCL EXCESIVO			
En circuito (H) sobre	2.5%	3300 (1800)			
	4.5%	2500 (1000)	2600 (1100)	3100 (1600)	

Ilustración 19. Actuales mínimos de operación.

1.6.2. Niveles de protección lateral.

En cuanto a las protecciones laterales, se dispone del valor de la semianchura ($1/2 A/W$) del área, igualmente en función de la fase de aproximación. Este semianchura corresponde al área total, es decir al conjunto del área primaria y el área secundaria.

Las definiciones de las áreas primaria y secundaria quedan reflejadas en la *Ilustración 20*.

El área tendrá la misma anchura en el tramo inicial e intermedio de la aproximación, reduciéndose en el tramo final para, posteriormente, volver a ensancharse a partir del MAPt.

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

Tabla 2. Procedimientos RNP APCH (Cat A – E). [6]

1.6.3. Niveles de protección vertical.

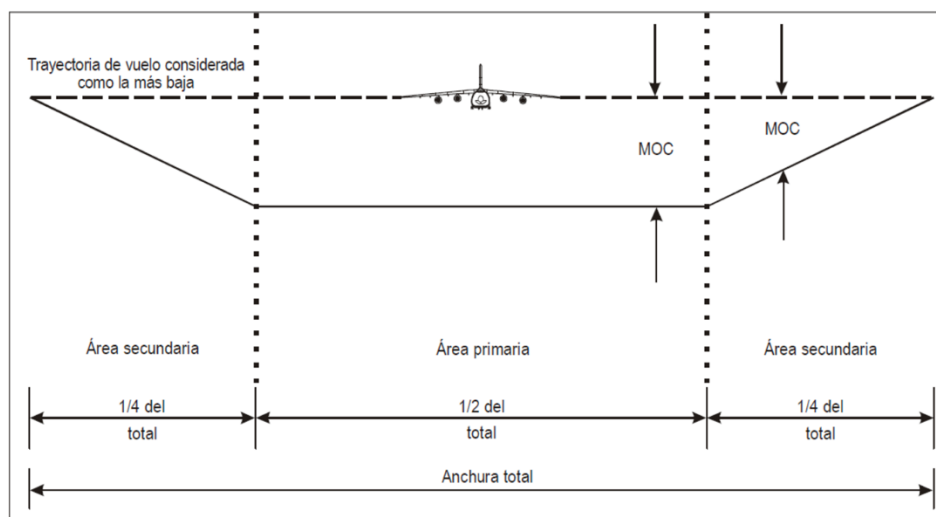


Ilustración 20. Áreas primaria y secundaria en las fases de aproximación. [6]

El MOC presenta un valor fijo para cada fase de la aproximación en el área primaria. Por otro lado, como puede apreciarse en la *Ilustración 20*, su valor varía en el área secundaria. Así, el MOC pasa de tener el mismo valor

que en el área primaria hasta reducirse a cero según vamos avanzando lateralmente en la secundaria.

El MOC del área primaria varía en función de la fase de aproximación en la que nos encontramos, tomando los siguientes valores:

Fase de la aproximación	MOC en el área primaria (m)
Inicial	300
Intermedia	150
Final / Frustrada inicial	75
Frustrada Intermedia	30
Frustrada final	50

Tabla 3. Valores del MOC en el área primaria para cada una de las fases de aproximación. [6]

1.7. Introducción al diseño de las aproximaciones.

El objetivo principal de este proyecto es el de reducir los mínimos de cada una de las distintas fases del proceso de aproximación, aunque nos centraremos, principalmente, en la que establece los mínimos de la operación, la aproximación final.

De esta forma, se pretenden disminuir los mínimos implantados actualmente, pero con la necesidad de realizar la última parte de la aproximación en régimen de vuelo visual o VFR, por lo que debemos tener en cuenta los mínimos establecidos para este tipo de aproximaciones.

Por ello, en la primera parte de este apartado se va a proceder al diseño del área de maniobra visual en circuito con el fin de establecer la OCA/H para las diferentes categorías de aeronaves. Ya que, los mínimos establecidos para este circuito probablemente sean los más restrictivos de la aproximación.

Como apartado inicial se introduce el Modelo de Elevación del Terreno utilizado para la obtención del obstáculo determinante en cada caso.

1.7.1. Modelo de Elevación del Terreno (MET).

El primer objetivo en el diseño de las aproximaciones es el de tratar con la matriz de cotas descargada desde el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Una matriz que, tras fusionar las zonas de interés, presenta unas enormes dimensiones.

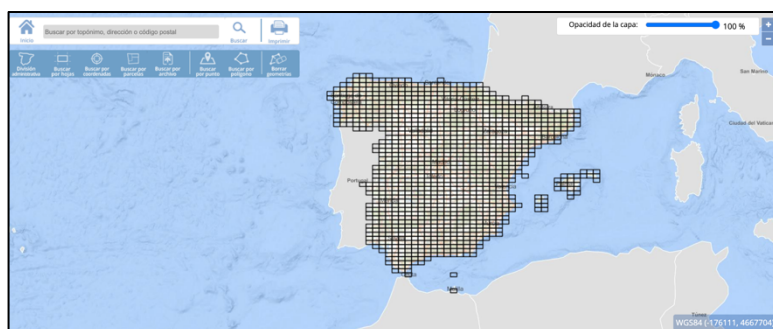


Ilustración 21. División del terreno nacional en celdas MTN50. [8]

Para simplificar el proceso, nos interesa la representación parcial de la matriz de la Elevación del terreno (MET) en un área que se ajuste a nuestro aeropuerto y zonas de aproximación. Se han considerado zonas de interés las correspondientes a las zonas 0141, 0142 y 0173, ver *Ilustración 22*. En rojo se encuentra marcado el aeropuerto.

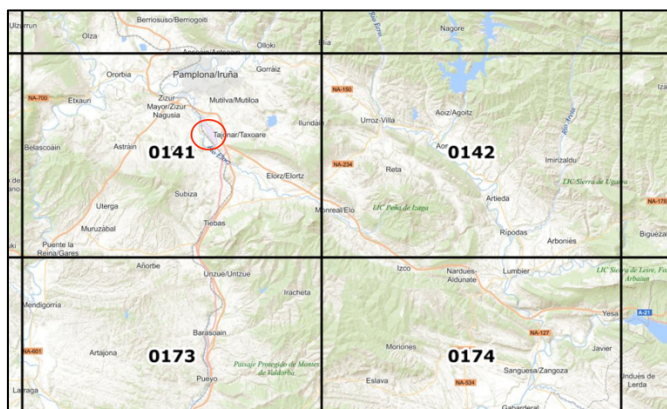


Ilustración 22. Zonas de interés a representar. [8]

1.7.2. Circuito de aproximación visual.

En primer lugar, es conveniente señalar que todo lo relacionado con el diseño de dicha área de maniobra se encuentra disponible en el Documento 8168, parte I, sección 4, capítulo 7.

El Aeropuerto de Pamplona presenta una elevación de 458,43 m. a lo que debemos sumarle 1000 pies o 300 m. para realizar los cálculos del circuito. Obtenemos un total de 758.43 m., altitud para la cual debemos calcular la temperatura ISA y sumarle 15°C. Obteniendo un total de 25°C.

La OACI establece como regla para los cálculos una velocidad del viento de 46 km/h. De esta forma, calculamos la “True Air Speed” partiendo de la “Indicated Air Speed” para cada categoría de aeronave y le sumamos el factor viento.

Categoría	A	B	C
IAS (Km/h)	185	250	335
TAS (km/h)	196.94	266.13	356.62
TAS + viento (km/h)	242.94	312.13	402.62

Tabla 4. Cálculo de TAS.

El área de maniobra consiste en la superficie externa que resulta del trazado de una circunferencia desde los umbrales de cada pista de aterrizaje útil con un radio que depende de la categoría de la aeronave. De esta forma, obtendremos 3 diferentes áreas de maniobra.

Por otro lado, la OACI establece un ángulo de inclinación lateral promedio (α) de 20° con el que se consigue una velocidad de viraje de 3° por segundo. Así, calculamos las velocidades angulares (W) y el radio de giro o viraje (r) mediante las siguientes expresiones:

$$W = 6355 * \frac{\tan \alpha}{\pi * TAS}$$

Obtenemos la velocidad angular en °/s. Con el ángulo de inclinación en grados y las TAS en km/h.

$$r = \frac{TAS}{20 * \pi * W}$$

Obtenemos el radio de giro en km.

Para obtener el radio de los arcos desde el umbral (R) tenemos en cuenta la siguiente expresión:

$$R = 2 * r + \text{tramo recto}$$

Donde el tramo recto es un valor constante independiente de la altitud establecido por la OACI para cada categoría de aeronave.

Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 5*:

Categoría	A	B	C
W para 20° de inclinación lateral (°/s)	3.03	2.36	1.83
Radio de giro (km)	1.28	2.11	3.50
Tramo recto (km)	0.56	0.74	0.93
Radio desde el Umbral (km)	3.11	4.95	7.94

Tabla 5. Radios desde el umbral de pista.

De forma posterior a la representación de las áreas, se analizará cual es el objeto más alto que penetra las superficies para sumarle el MOC correspondiente a cada categoría de aeronaves. Los valores del MOC pueden apreciarse en la *Tabla 6*:

Aircraft category	Minimum obstacle clearance m (ft)	Lower limit for OCH above aerodrome elevation m (ft)	Minimum visibility km (NM)
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 6. Valores del MOC para el circuito visual. [6]

Para realizar el estudio de obstáculos del circuito, se realizarán dos alternativas.

- Primero, será realizado un análisis de obstáculos basado en el listado de obstáculos disponibles para el Aeropuerto de Pamplona en el AIP. La representación gráfica de este primer método será Google Earth.
- Después, será realizada un análisis del circuito visual con el Modelo de Elevación del Terreno.

En ambos casos, el circuito visual ha sido posicionado inicialmente a una elevación de 557 metros o 100 metros por encima del umbral. Todos los obstáculos han sido ubicados siguiendo el sistema de referencia de las OAS, de manera que se expresarán sus coordenadas en metros respecto al umbral.

En el supuesto de que el aeropuerto tuviera varias pistas, deberían trazarse los arcos desde cada uno de los umbrales y quedarnos con la superficie externa en caso de intersección entre ellos como puede apreciarse en la siguiente figura. En nuestro caso, al tener solo una pista, nuestro circuito visual tiene una forma más simplificada como podrá apreciarse en los apartados a continuación.

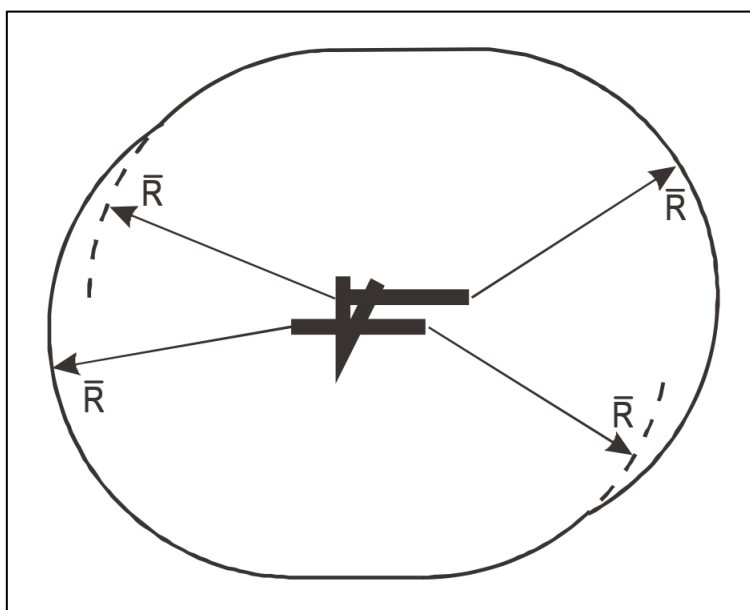


Ilustración 23. Circuito Visual para varias pistas operativas. [4]

1.7.2.1. Análisis de obstáculos del circuito visual en base a los obstáculos disponibles en el AIP.

La coordenada “Z” representa su elevación respecto al geode.

Categoría A

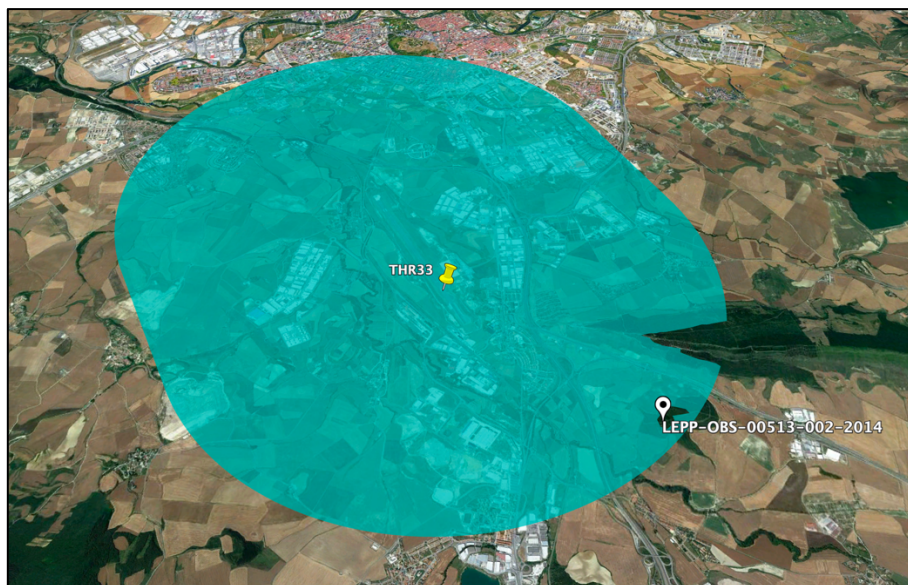


Ilustración 24. Circuito Visual para categoría A con elevación de 557 metros y obstáculo determinante en Google Earth.

Tras su análisis de obstáculos obtenemos:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
2701	1033	594

Tabla 7. Coordenadas del obstáculo determinante AIP en circuito visual para categoría A.

Fase de la aproximación	Circuito Visual
Categoría de Aeronave	A
MOC (metros)	90
OCA (metros)	684
OCH (metros)	227

Tabla 8. OCA/H en circuito visual AIP para categoría A.

Categoría B

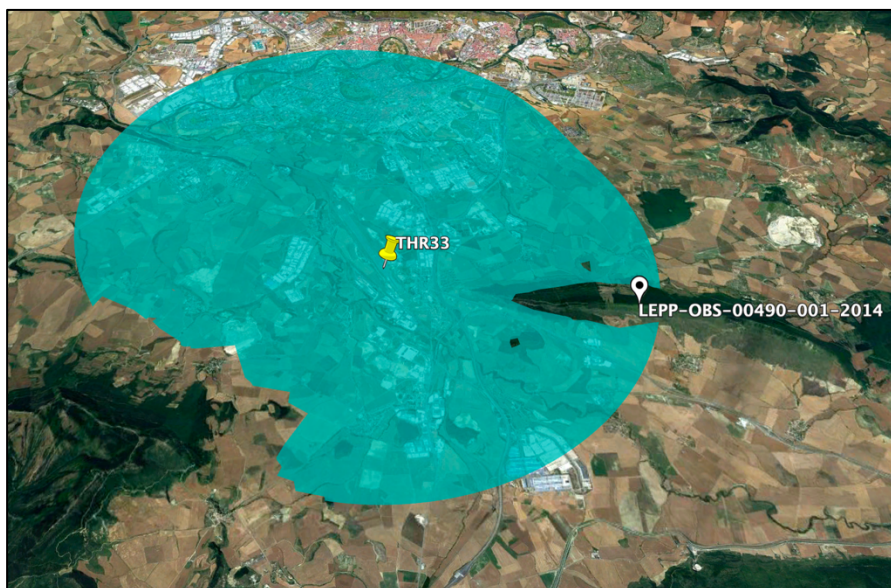


Ilustración 25. Circuito Visual a una elevación de 557 metros para categoría B y obstáculo determinante en Google Earth.

Tras su análisis de obstáculos obtenemos:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
3028	3442	682

Tabla 9. Coordenadas del obstáculo determinante AIP en circuito visual para categoría B.

Fase de la aproximación	Circuito Visual
Categoría de Aeronave	B
MOC (metros)	90
OCA (metros)	772
OCH (metros)	315

Tabla 10. OCA/H en circuito visual AIP para categoría B.

Categoría C

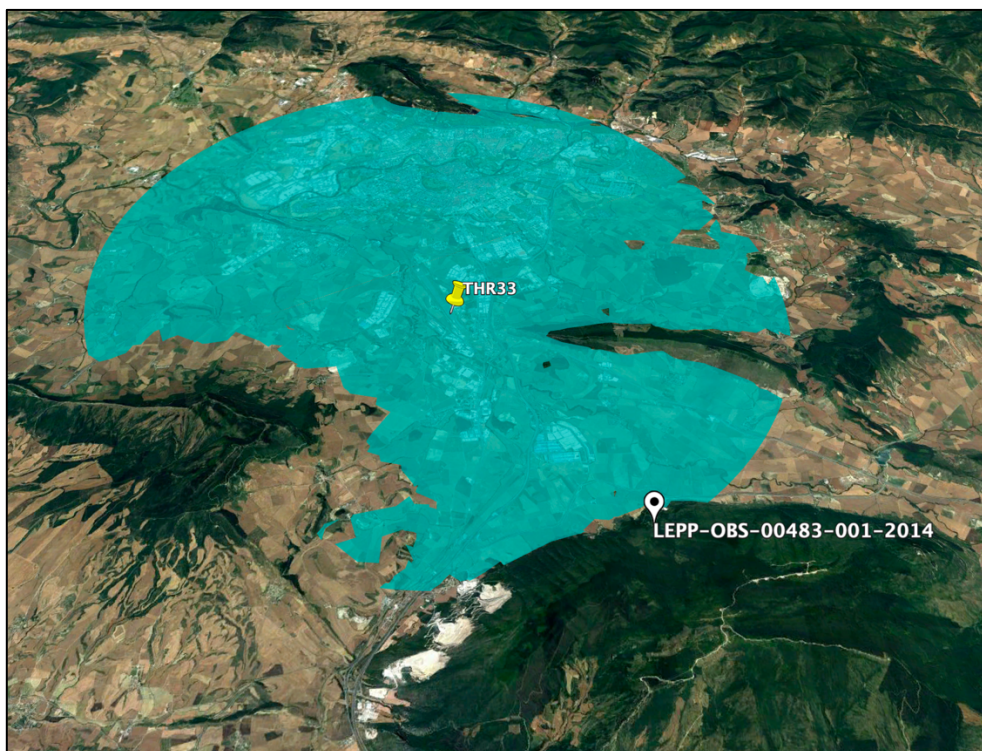


Ilustración 26. Circuito Visual a una elevación de 557 metros para categoría C y obstáculo determinante en Google Earth.

Tras su análisis de obstáculos obtenemos:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
7724	707	769

Tabla 11. Coordenadas del obstáculo determinante AIP en circuito visual para categoría C.

Fase de la aproximación	Circuito Visual
Categoría de Aeronave	C
MOC (metros)	120
OCA (metros)	889
OCH (metros)	432

Tabla 12. OCA/H en circuito visual AIP para categoría C.

1.7.2.2. Análisis de obstáculos del circuito visual mediante el MET.

La idea de realizar un nuevo análisis de obstáculos utilizando el Modelo de Elevación del Terreno surge como consecuencia de la falta de precisión de los obstáculos disponibles en el AIP. Ya que los mínimos establecidos por el circuito visual desempeñan un papel importante en este proyecto.

Para que este análisis se ajuste a lo estipulado actualmente, se decide utilizar las mismas restricciones que las presentes en la actual carta de aproximación por instrumentos, como podemos ver en la *Ilustración 27*. Así, se procede al diseño de circuito visual que solo tenga en cuenta el área comprendida entre los rumbos 160° y 324° .

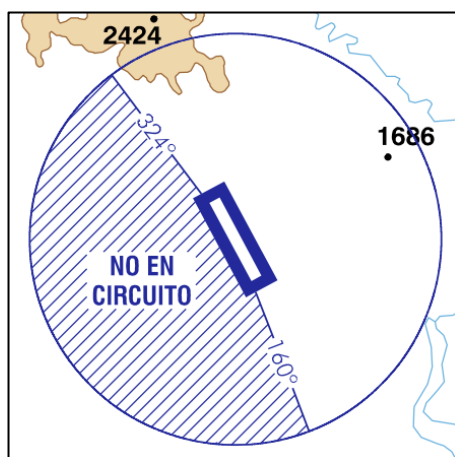


Ilustración 27. Restricción de rumbos en el área del circuito visual.

Si representáramos el circuito visual completo, el área sería la equivalente a la *Ilustración 28*. Por otro lado, al aplicar la restricción comentada anteriormente, el resultado sería el de la *Ilustración 29*.

Categoría A

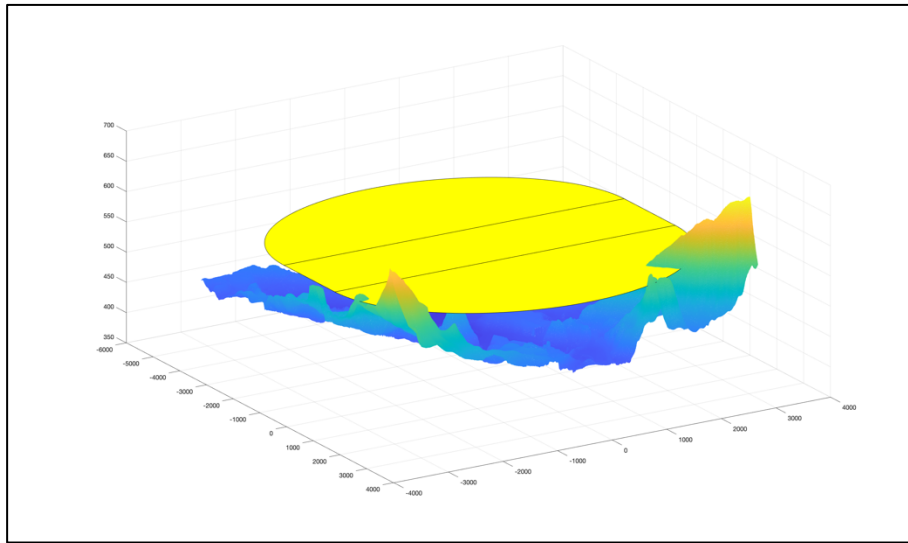


Ilustración 28. Circuito visual completo para categoría A con una elevación de 557 metros.

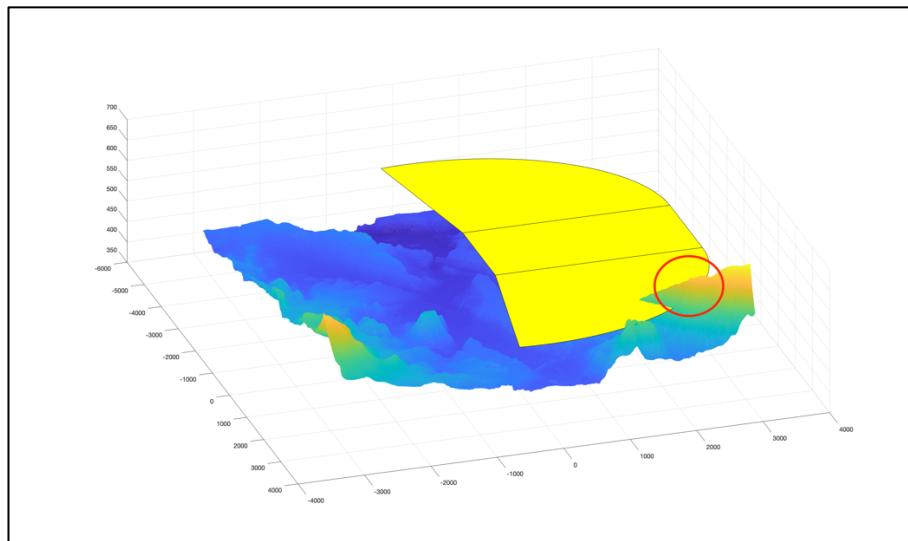


Ilustración 29. Circuito visual recortado para categoría A con una elevación de 557 metros.

Tras el análisis de obstáculos, obtenemos:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
2215	2160	609

Tabla 13. Obstáculo determinante utilizando el MET en el circuito visual recortado para categoría A.

Fase de la aproximación	Circuito Visual / MET
Categoría de Aeronave	A
MOC (metros)	90
OCA (metros)	699
OCH (metros)	242

Tabla 14. OCA/H para el circuito visual de categoría A recortado utilizando el MET.

Categoría B

Para las representaciones del circuito visual en categorías B y C, se ha representado el circuito visual recortado junto con el modelo de elevación del terreno para x positiva.

Esto es debido a que, como ya se ha podido ver anteriormente en el estudio de los objetos AIP, los obstáculos determinantes se encuentran en esta zona. Además, el objetivo principal de esta representación parcial del terreno es la de conseguir disminuir el tiempo de compilación del script en cuestión, al estar representando un área del terreno muy extensa. De igual forma obtenemos:

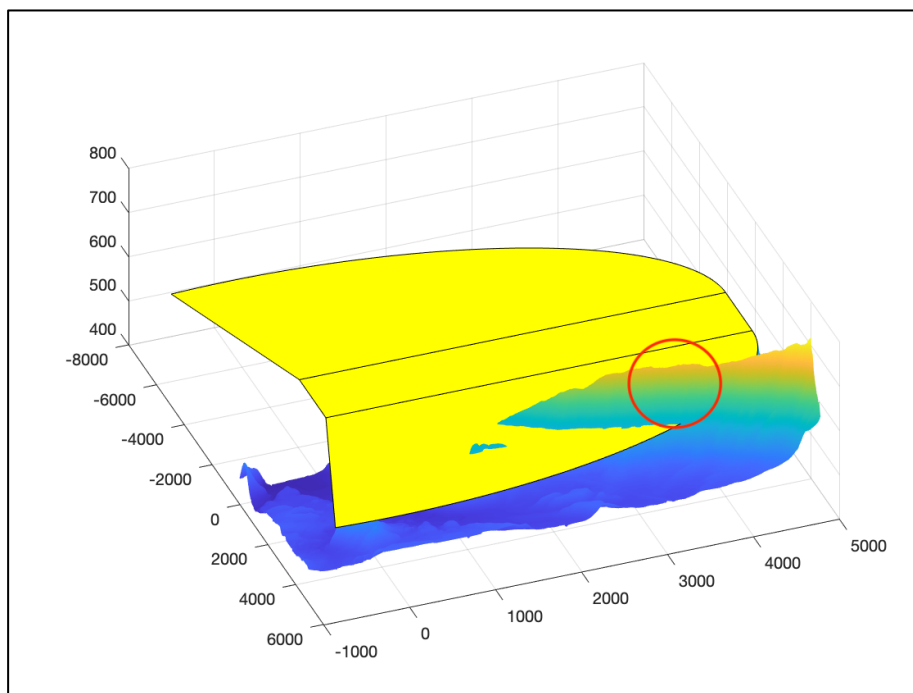


Ilustración 30. Circuito visual recortado para categoría B con una elevación de 557 metros.

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
3140	3655	675

Tabla 15. Obstáculo determinante utilizando el MET en el circuito visual recortado para categoría B.

Fase de la aproximación	Circuito Visual / MET
Categoría de Aeronave	B
MOC (metros)	90
OCA (metros)	765
OCH (metros)	308

Tabla 16. OCA/H para el circuito visual de categoría B recortado utilizando el MET.

Categoría C

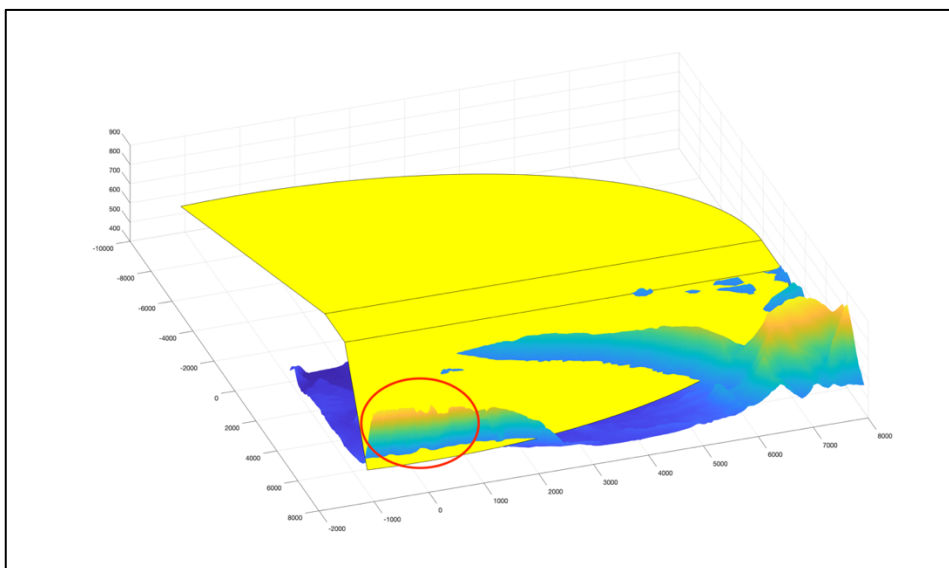


Ilustración 31. Circuito visual recortado para categoría C con una elevación de 557 metros.

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
7915	-525	851

Tabla 17. Obstáculo determinante utilizando el MET en el circuito visual recortado para categoría C.

Este sería el circuito de aproximación visual y su obstáculo determinante utilizando el radio calculado correspondiente a categoría C. No obstante, la OACI establece otra restricción comentada en la actual carta de aproximación por instrumentos.

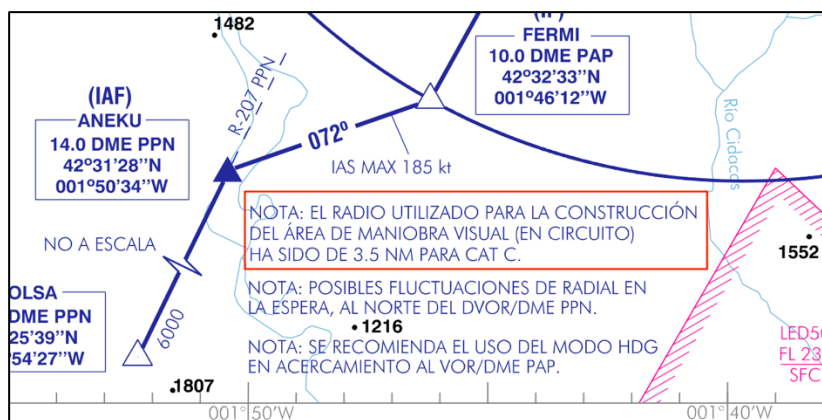


Ilustración 32. Restricción en el radio del circuito visual para categoría C.

Para comprobar que es lo conseguido con esta disminución específica para categoría C de 3.5 Millas Náuticas (5.6 km), volvemos a graficar y obtener el obstáculo determinante. Recordamos que el anterior radio, ver *Tabla 5*, era de 7.95 km.

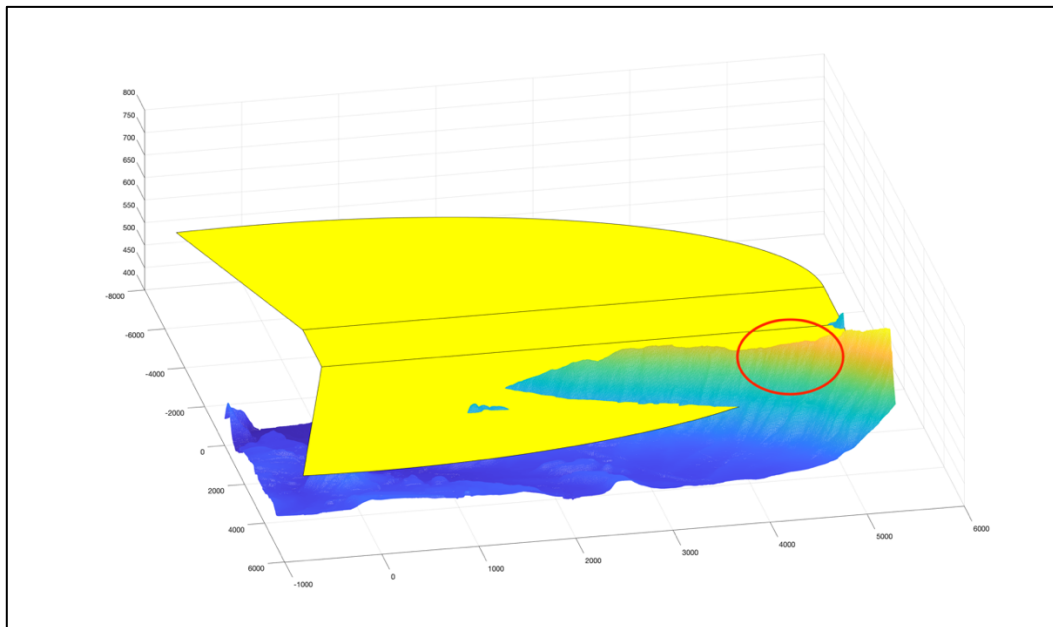


Ilustración 33. Circuito visual para categoría C con radio de 5.36 km a una elevación de 557 metros.

Tras analizar la figura anterior nos damos cuenta de que con esta reducción del radio se consigue extraer del circuito la montaña que contenía al obstáculo determinante del caso anterior. Utilizamos esta simplificación como resultado final para la categoría C, obteniendo:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
3465	4095	675

Tabla 18. Obstáculo determinante para el circuito visual de categoría C con MET y reducción de radio a 5.36 km.

Fase de la aproximación	Circuito Visual / MET
Categoría de Aeronave	C
MOC (metros)	120
OCA (metros)	795
OCH (metros)	338

Tabla 19. OCA/H para categoría C con radio 5.36 km y MET.



Ilustración 35. Representación de las coordenadas de los umbrales ficticios B33 y B15 y el punto de rotación A en Google Earth.

1.8. Aproximación LPV

En este apartado se procede al diseño de la aproximación RNP APCH en base a lo establecido para los procedimientos SBAS APV-I o LPV. Para ello, se realizará un análisis gráfico y numérico de obstáculos con el fin de establecer el procedimiento a la mínima altitud posible respecto al umbral de la cabecera 33 del aeropuerto de Pamplona.

Las distancias de los tramos de aproximación serán consideradas desde el umbral ficticio calculado anteriormente. Esto es debido a que podemos referenciar las superficies representadas respecto a este punto. El sistema de coordenadas utilizado para ubicar los obstáculos será el mismo que el de las OAS. El rumbo de aproximación se establece en 33° , el cual coincidirá con el eje de coordenadas X.

De cara a este capítulo nos disponemos a analizar varios escenarios, que serán explicados en detalle en sus correspondientes apartados a continuación, con el fin de su comparación y análisis.

1.8.1. Análisis inicial de la fase intermedia.

Como primer punto en este diseño de la aproximación LPV, se procede a graficar y realizar el análisis de obstáculos sobre la fase intermedia de la aproximación. Como ya se ha comentado anteriormente, las distancias de las fases de aproximación se expresarán con respecto a la aproximación directa al umbral ficticio B33.

Se realiza primero el análisis de obstáculos relacionado con la fase intermedia con el fin de establecer la pendiente de descenso óptima para flanquear los obstáculos que supongan un problema en esta fase. Ya que, para el diseño de la aproximación final, donde entran en juego las constantes necesarias para el diseño de las superficies limitadoras de obstáculos OAS, necesitamos saber esta pendiente de descenso.

Con el fin de establecer de manera inicial y orientativa las distancias de las fases de aproximación final e intermedia, realizamos un estudio del terreno de manera visual en la siguiente figura.

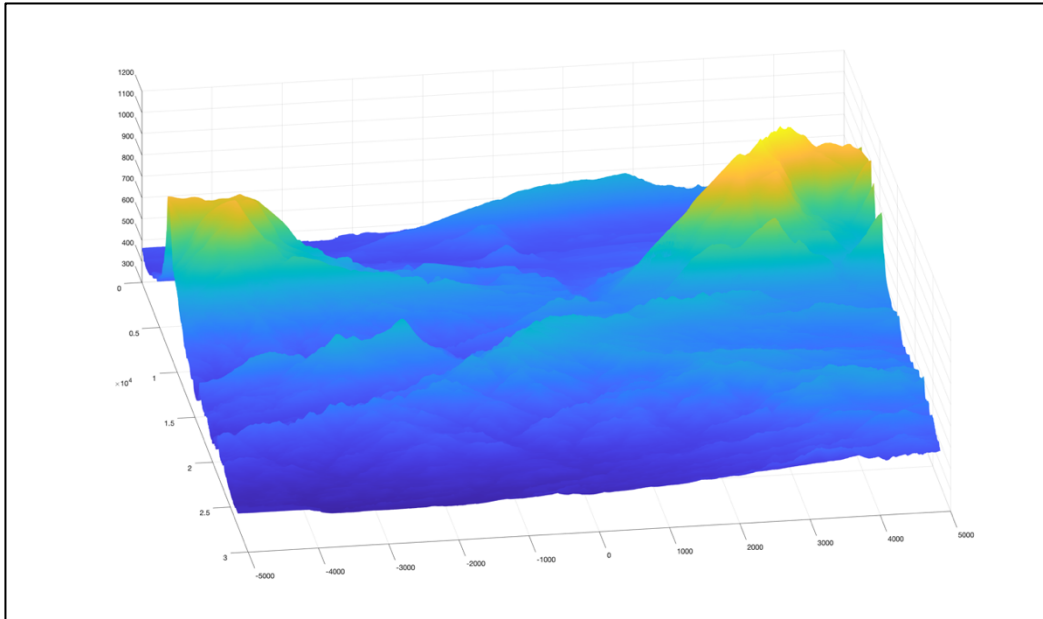


Ilustración 36. Terreno que precede al umbral ficticio en la aproximación directa con rumbo 33° en el sistema de coordenadas OAS.

En esta figura apreciamos los 30 kilómetros de terreno que preceden al umbral ficticio en la aproximación directa con rumbo 33° . El origen del gráfico corresponde a dicho umbral. El principal problema que debemos analizar es atravesar el valle que puede apreciarse sin que las áreas laterales del área de nuestra aproximación sean invadidas por algún obstáculo.

Centrándonos en la aproximación final LPV, somos conscientes de que las OAS presentan unas tolerancias laterales mucho menores a las de la fase intermedia, por lo que se pretende atravesar el valle en la fase de aproximación final. De esta manera establecemos una longitud de 10 kilómetros para el tramo final y de 9.3 kilómetros (el mínimo recomendado) para el tramo intermedio. Por lo tanto, la fase intermedia se sitúa entre los 10 y los 19.3 kilómetros desde el umbral.

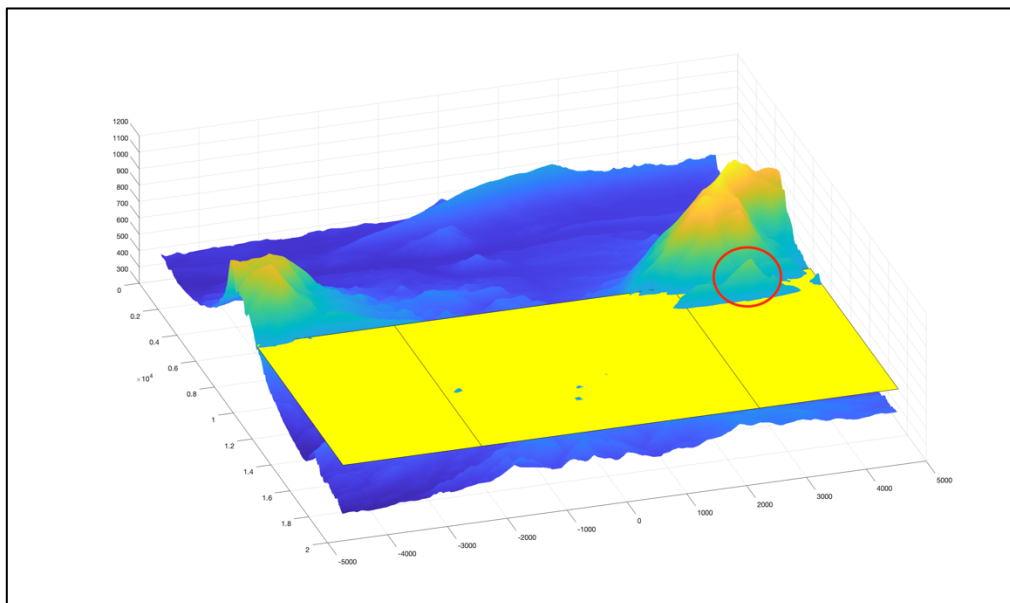


Ilustración 37. Área de la fase intermedia a 10 km el umbral ficticio con una elevación de 700 metros para rumbo de aproximación 33°.

Tras su análisis de obstáculos obtenemos:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
11180	3455	914

Tabla 20. Coordenadas del obstáculo determinante en la fase de aproximación intermedia a 10 kilómetros del umbral.

Además, la pendiente de descenso, medida desde el umbral correspondiente a la pista ficticia, necesaria para su franqueamiento es de 2.73°. Sin embargo, para el cálculo de las constantes OAS se ha supuesto una pendiente de 3° por ser la óptima en aproximación final.

Fase de la aproximación	Intermedia a 10 km del umbral ficticio
MOC en el área primaria (metros)	150
MOC a aplicar (metros)	76
OCA (metros)	990
OCH (metros)	533
Pendiente de franqueamiento (grados)	2.73

Tabla 21. OCA/H para la fase de aproximación intermedia a 10 km del umbral ficticio.

1.8.2. OAS sobre el umbral ficticio.

El objetivo de este apartado es la representación conjunta de la matriz de elevación del terreno y las OAS, así como el análisis de obstáculos con el fin de establecer la OCA/H para la aproximación final al umbral B33.

Para ello, es necesario el software PANS_OPS de EUROCONTROL, donde obtendremos los parámetros necesarios para establecer las ecuaciones de los planos que componen las superficies. Las constantes son equivalentes para las categorías “A” y “B”, y diferentes para la categoría “C”.

Se ha elegido una Pendiente de Aproximación (GP) de 3° debido a que este se trata del valor óptimo y, al fin y al cabo, estamos tratando con un procedimiento ficticio sobre un umbral situado bajo una montaña con cotas situadas a más de 100 metros por encima de él. La pendiente de frustrada se ha supuesto de 2.5°.

The screenshot shows the PANS OPS software interface with the following data:

NAVIGATION AID DATA

- Approach Category: APV 1
- GP/WPA (°): 3
- RDH: 15 m
- LOC THR Dist⁽¹⁾: 2000 m
- Course width at THR: 210 m

AIRCRAFT DATA

- M/App CG (%): 2.5
- CAT: A
- STD:
- Wing Semi Span: 30 m
- GP Wheel / Antenna height: 6 m

OAS constants

	A	B	C		A	B	C
W	0.028500	0.000000	-8.01	Y	0.021902	0.192108	-57.67
W	0.039290	0.000000	-38.75	Z	-0.025000	0.000000	-40.63
X	0.025603	0.168800	-53.47				

OAS Template coordinates -m (metres)

	THR Elevation		Upper coordinates			
	X	Y	X	Y	Z	
C	986	167	10807	454	300	
D	439	250	2849	318	73	
E	-1625	485	6163	1159	300	
			E*	-7222	1852	139

OAS height calculator

X: m Y: m Z: 0 m

(1) For MLS read: "Azimuth antenna to THR distance"; for GBAS/APV read: "GARP-LTP distance".

Ilustración 38. PANS OPS categorías A y B.

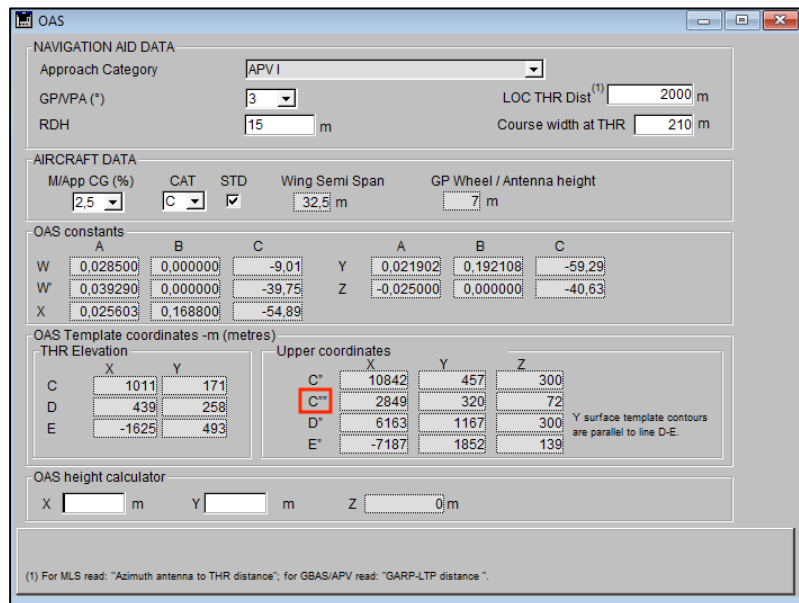


Ilustración 39. PANS-OPS categoría C.

En la *Figura 40* siguiente vemos representadas las OAS. Faltan los puntos que la delimitarían por la izquierda que corresponden a C'' y su opuesto. El punto del programa denominado C'' '' corresponde al C' de la imagen inferior de las OAS. Para su desarrollo gráfico este punto ha sido denominado C2 con el fin de evitar confusiones.

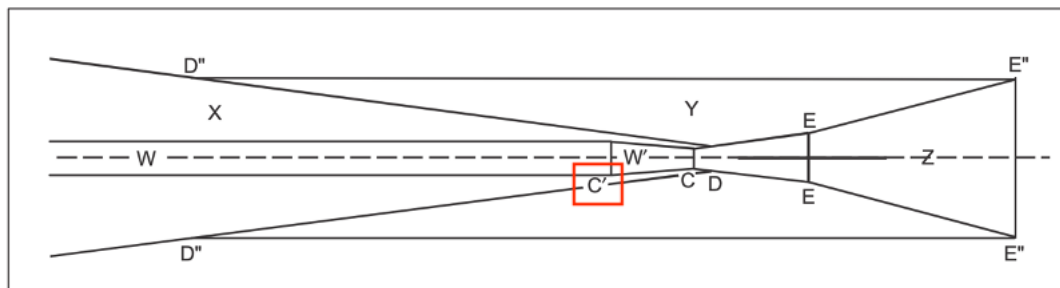


Ilustración 40. Puntos que definen las superficies OAS.

Obtenemos los siguientes polígonos:

- Polígono exterior: utilizado para representar el rectángulo que contiene todas las OAS. Definido por los puntos: C'' - D'' - E''.
- Polígono G: C - D - E
- Polígono W: C'' - C2

- Polígono W: C2 – C
- Polígonos X-X': C'' – D'' – D – C – C2
- Polígonos Y-Y': D'' – E'' – E – D
- Polígono Z: E – E''

Una vez graficadas las OAS sobre el modelo de elevación del terreno recortado, se aprecia, como era de esperar, que gran parte del terreno perfora las superficies como se muestra en la siguiente figura.

Por consiguiente, se procede al estudio de obstáculos. Dicha representación se ha realizado también en Google Earth con el fin de comprobar nuestro resultado visualmente.

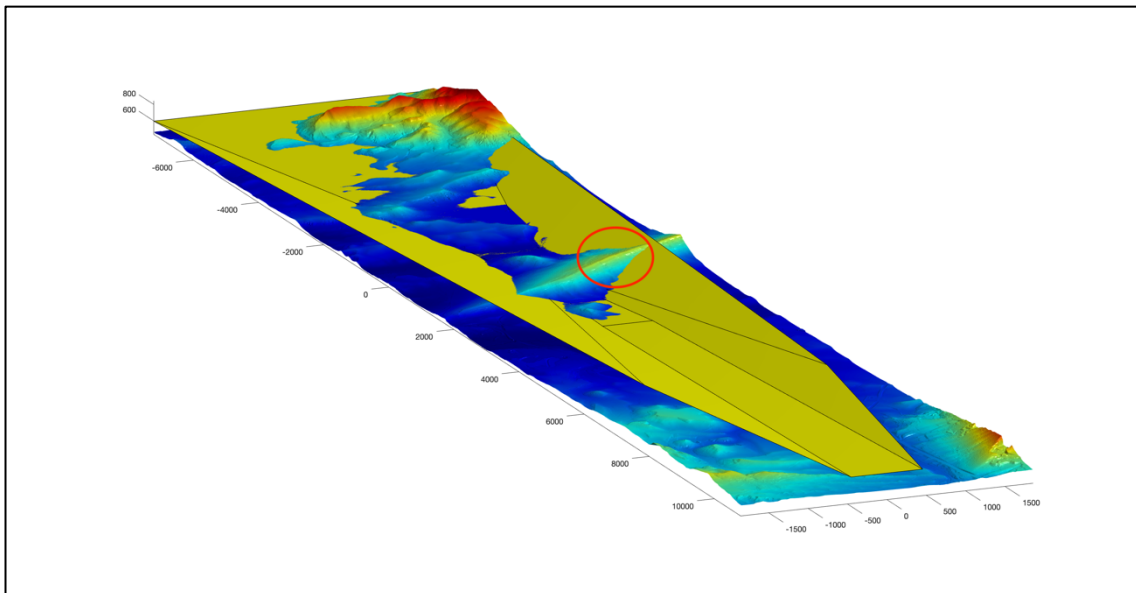


Ilustración 41. Intersección entre el MET y las OAS para un GP de 3° y categoría A en la aproximación a B33.



Ilustración 42. OAS para un GP de 3° y categoría A en la aproximación a B33 en Google Earth.

Tras su análisis de obstáculos obtenemos el mismo obstáculo determinante para categorías A, B y C:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
432	952	675

Tabla 22. Obstáculo determinante en las OAS sobre B33 para categorías A, B y C.

Cabe destacar que, para el análisis de obstáculos, si este se encuentra en el plano Z o de aproximación frustrada, deberá calcularse su altura equivalente en la aproximación final en base a la siguiente expresión:

$$h_a = \frac{[h_{ma} \cot Z + (x - X_E)]}{\cot Z + \cot \theta}$$

- h_a : altura del obstáculo de aproximación equivalente;
- h_{ma} : altura del obstáculo de aproximación frustrada;
- θ : ángulo de la trayectoria de planeo;
- Z : ángulo de la superficie de aproximación frustrada;
- X_E : nueva coordenada del origen de la superficie Z ;
- x : distancia del obstáculo relativa al umbral (negativa después del umbral).

Sin embargo, en nuestro caso, el obstáculo determinante no se encuentra en la aproximación frustrada por lo que no es necesario el cálculo de su altura equivalente.

Los márgenes de franqueamiento de obstáculos dependen de la categoría, en el primer caso, se ha supuesto categoría “A” con un margen de 40 metros. Los márgenes para categorías “B” y “C” son 43 y 46 metros respectivamente.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre B33
Categoría de Aeronave	A
MOC (metros)	40
OCA (metros)	715
OCH (metros)	258

Tabla 23. OCA/H de las OAS sobre B33 para categoría A.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre B33
Categoría de Aeronave	B
MOC (metros)	43
OCA (metros)	718
OCH (metros)	261

Tabla 24. Tabla 16. OCA/H de las OAS sobre B33 para categoría B.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre B33
Categoría de Aeronave	C
MOC (metros)	46
OCA (metros)	721
OCH (metros)	264

Tabla 25. Tabla 16. OCA/H de las OAS sobre B33 para categoría C.

1.8.3. Análisis del viraje.

Debemos tener en cuenta que no tendría sentido que el obstáculo determinante en el apartado anterior fuera el más significativo de nuestra aproximación. Pues el obstáculo se encontraría realmente en la aproximación frustrada y debería calcularse su altura equivalente. Es decir, tenemos que ser conscientes de que, con este diseño de la aproximación ficticia, nuestro objetivo principal es el de conseguir disminuir la OCA/H en el punto de transición a VFR.

Dicho esto, se procede a analizar el punto en el que debería iniciarse dicho viraje para el alineamiento con el RCL y el aterrizaje. De forma que podamos establecer la aproximación final LPV sobre ese punto.

En primer lugar, es importante comentar que este punto de inicio de viraje varía en función de la categoría de la aeronave, ya que este depende de su IAS. Para el cálculo de los radios de viraje podemos basarnos en los cálculos realizados para el área del circuito visual.

No obstante, la aproximación visual con derrota prescrita presenta la peculiaridad de que la OACI permite inclinaciones laterales de hasta 25°, superando la velocidad angular de giro de 3°/s. Así, obtenemos, teniendo en cuenta un factor viento de 46 km/h (25 knots):

Categoría	A	B	C
IAS (Km/h)	185	250	335
TAS (km/h)	196.94	266.13	356.62
TAS + wind (km/h)	242.94	312.13	402.62

Tabla 26. Velocidades de aproximación para cada categoría en km/s.

Categoría	A	B	C
W for 20° lateral inclination (°/s)	3.88	3.02	2.34
Turn radius (km)	1.00	1.64	2.74

Tabla 27. Velocidad angular y radio de giro para cada categoría.

Si trasladamos estos radios de viraje como distancias ortodrómicas desde el punto A con rumbo (33° + 180°), obtenemos los puntos donde debería iniciarse el viraje de la aproximación para cada una de las categorías, “VA”, “VB” y “VC”, respectivamente, como puede apreciarse en la *Ilustración 43*.



Ilustración 43. Puntos de inicio de viraje y punto M en Google Earth.

En los casos de viraje en régimen visual, la OACI también contempla un tiempo de reacción del piloto de 6 segundos. Por ello, estableciendo la velocidad más restrictiva, la de categoría C, sin tener en cuenta el viento, deberíamos añadir a los radios un total de 594 metros.

El radio de Categoría C, por ser el más restrictivo, junto con la distancia del margen de reacción del piloto nos daría lugar a las coordenadas del punto sobre el que se pretende disminuir la OCA/H con el apoyo de la tecnología SBAS “M”. A partir de este punto, en caso de una correcta visualización de la pista, tendría lugar la transición a VFR y el aterrizaje.

1.8.4. OAS sobre el punto M.

Por consiguiente, se procede al diseño de las superficies OAS para el punto M y su análisis de obstáculos. Se ha considerado la elevación del punto M igual a la del umbral U33 con el fin de obtener la OCH en ese punto referenciada respecto al umbral.

Es cierto el hecho de que para mantener una pendiente de 3° en la llegada a M debería ampliarse la longitud del tramo final y, consecuentemente, el tramo intermedio quedaría más alejado del umbral ficticio, dando lugar a esta pendiente de descenso. No obstante, se procede primero a estudiar las OAS y evaluar los resultados para pendientes de

descenso de 3° y 3.5°, siendo esta última la máxima permitida por la OACI en el software de las PANS-OPS.

1.8.4.1. OAS con pendiente de descenso de 3°.

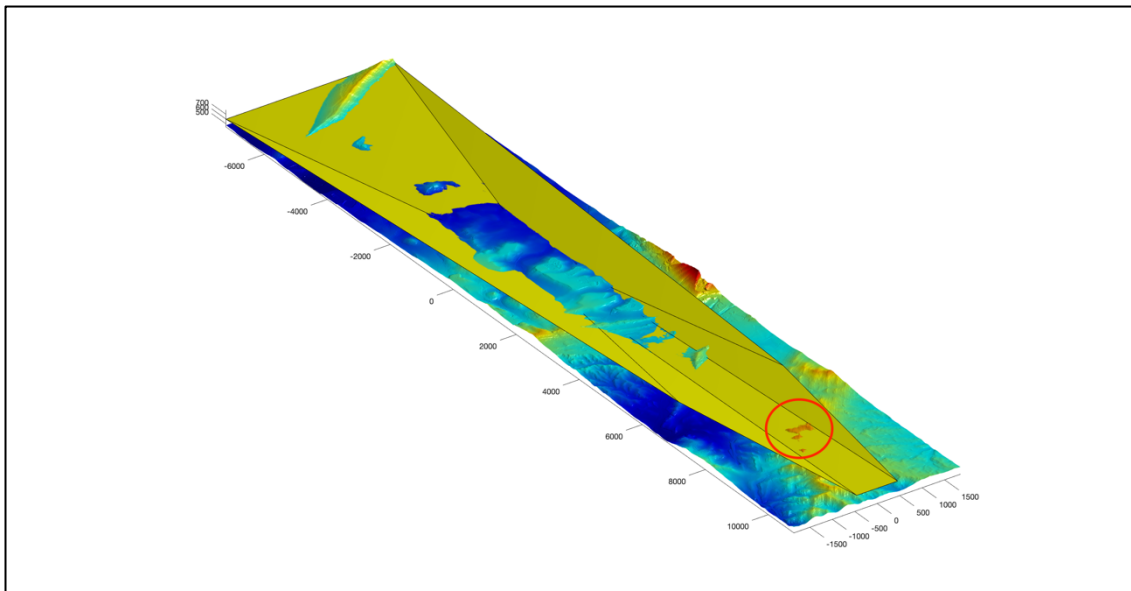


Ilustración 44. Intersección entre el MET y las OAS para un GP de 3° y categoría A en la aproximación a M.

Tras su análisis de obstáculos, obtenemos el mismo obstáculo determinante para categorías A, B y C:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
8797	-268	708

Tabla 28. Obstáculo determinante en las OAS sobre M a 3° para categorías A, B y C.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre M a 3º
Categoría de Aeronave	A
MOC (metros)	40
OCA (metros)	748
OCH (metros)	291

Tabla 29. OCA/H de las OAS sobre M para categoría A y GP de 3º.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre M a 3º
Categoría de Aeronave	B
MOC (metros)	43
OCA (metros)	751
OCH (metros)	294

Tabla 30. OCA/H de las OAS sobre M para categoría B y GP de 3º.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre M a 3º
Categoría de Aeronave	C
MOC (metros)	46
OCA (metros)	754
OCH (metros)	297

Tabla 31. OCA/H de las OAS sobre M para categoría C y GP de 3º.

1.8.4.2. OAS con pendiente de descenso de 3.5º.

En base a los resultados de la aproximación a M con un ángulo de descenso de 3º, los cuales consiguen mejorar de manera mínima las condiciones actuales, procedemos al estudio con un ángulo de 3.5º.

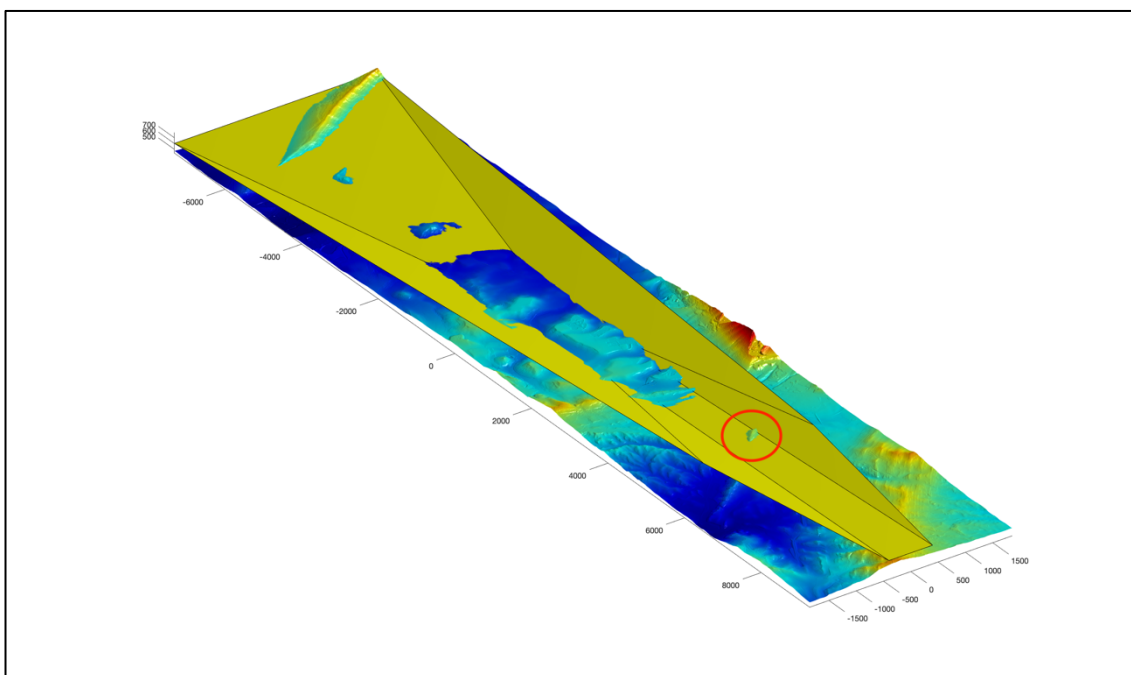


Ilustración 45. Intersección entre el MET y las OAS para un GP de 3.5° y categoría A en la aproximación a M.

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
4763	252	635

Tabla 32. Obstáculo determinante en las OAS sobre M con GP de 3.5° para categorías A, B y C.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre M a 3.5°
Categoría de Aeronave	A
MOC (metros)	40
OCA (metros)	675
OCH (metros)	218

Tabla 33. OCA/H de las OAS sobre M para categoría A y GP de 3.5°.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre M a 3.5°
Categoría de Aeronave	B
MOC (metros)	43
OCA (metros)	751
OCH (metros)	221

Tabla 34. OCA/H de las OAS sobre M para categoría B y GP de 3.5°.

Fase de la aproximación	Aproximación final / OAS sobre M a 3.5°
Categoría de Aeronave	C
MOC (metros)	46
OCA (metros)	681
OCH (metros)	224

Tabla 35. OCA/H de las OAS sobre M para categoría C y GP de 3.5°.

Tras analizar estos resultados se llega a la conclusión de que estamos sobreprotegiendo la aproximación. Es decir, estamos intentando minimizar la OCA/H en el punto M como si este fuera el umbral objetivo de la aproximación.

Hay que tener en cuenta que en el caso de que las condiciones sean favorables para el aterrizaje, desde ese punto la aeronave entra en un procedimiento de aproximación visual en el que también se produce un descenso de altitud de la aeronave.

Como base para este estudio posterior, se procede al cálculo real de la distancia que la aeronave tendría que recorrer para aterrizar. Nos disponemos a calcular el perímetro del arco del viraje junto con los tramos rectos asociados a la aeronave de categoría C, por ser la más restrictiva, y aplicarle una pendiente de 3°, por tratarse de la ideal. Con ello conseguimos averiguar la altitud a la que se encontraría nuestro punto M.

En el siguiente apartado se desarrolla el diseño de las OAS y el análisis de obstáculos para el punto M a esa determinada altitud, el cual se denominará punto “M2”. En el caso de obtener resultados favorables, se procederá al diseño del corredor de la derrota prescrita, con el que se valida la seguridad del descenso de la aeronave desde ese punto en régimen visual, y las fases intermedia y final, que completarían el diseño total de la aproximación.

1.8.5. OAS sobre el punto M2.

Siguiendo lo comentado anteriormente, y centrándonos en categoría C, a partir del punto M el camino a seguir por la aeronave quedaría dividido en tres tramos, como puede apreciarse en la siguiente imagen.

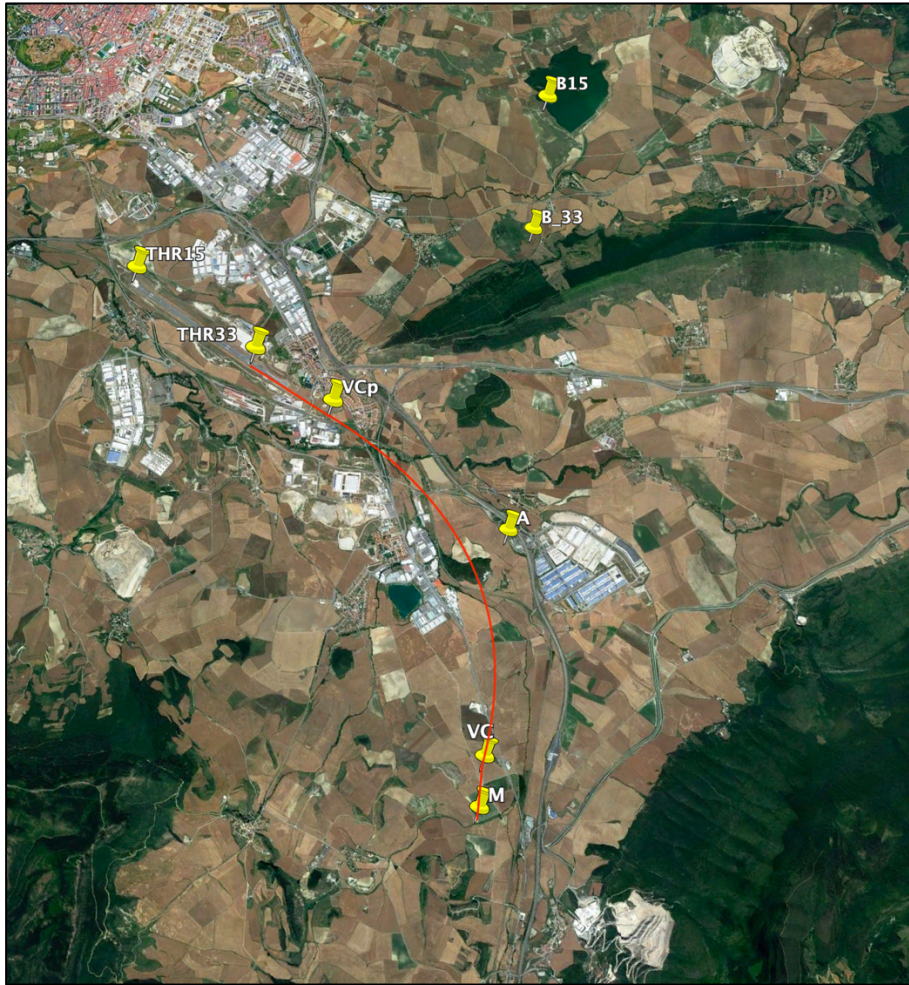


Ilustración 46. Puntos de inicio y fin de viraje para categoría C.

En primer lugar, tenemos un tramo recto entre el punto de decisión “M” y el punto de inicio de viraje para categoría C, “VC”. A partir de ese punto, entramos en un viraje con una velocidad de giro de $2.34^{\circ}/s$, ver apartado 1.8.3, que termina en el punto “VCp”. En este punto la aeronave ya se encontraría alineada con la pista y sólo nos quedaría el último tramo recto hasta llegar al THR33. En rojo se aprecia la trayectoria que describiría la aeronave, ver Ilustración 46.

Por lo tanto, nuestro viraje presenta una variación total entre los rumbos inicial y final total de 61° . Además, el punto “A” es tomando como punto de recorrido de paso.

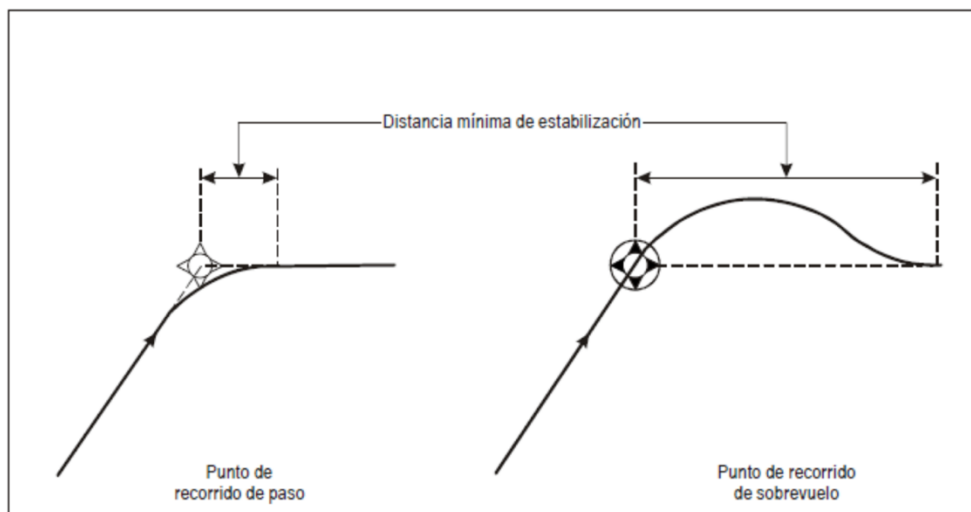


Ilustración 47. Definición de punto de recorrido de paso y punto de recorrido de sobrevuelo.

Cuando tratamos con un viraje, la OACI también contempla una distancia mínima de estabilización necesaria, con la que se consigue que la aeronave se encuentre totalmente alineada con el nuevo rumbo. Esta distancia depende de la TAS, del cambio de rumbo total del viraje y de la inclinación lateral.

La siguiente tabla se centra en inclinaciones laterales de 25°, como sucede en nuestro caso. Considerando que nuestra velocidad verdadera, junto con el factor viento, es de 403 km/h, ver tabla 19, obtenemos:

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

* 25° o 3°/s

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

Tabla 36. Distancias de estabilización para puntos de recorrido de paso.

Tendríamos que nuestra distancia de estabilización se sitúa sobre los 2.1 km. La distancia a la que se encuentra el punto “VCp2 de “A” es igual al radio de giro para categoría C, 2.74 km. Entonces, podemos afirmar que tenemos suficiente margen para el correcto alineamiento de la aeronave con la pista.

Tramo	Longitud (metros)
Tramo recto inicial (M-VC)	627
Viraje (VC-VCp)	2917
Tramo recto final (VCp-THR33)	1199
TOTAL	4743

Tabla 37. Longitud de los tramos de la aproximación visual para categoría C.

Una vez calculadas las longitudes de los tramos que realizaría la aeronave en la aproximación visual y, sabiendo que tendría una pendiente de descenso con un ángulo de 3°, podemos calcular la altitud del punto “M2”, equivalente a 249 metros para Categoría C.

Altitud de M2 (metros)	Elevación de M2 (metros)
249	706

Tabla 38. Altitud y elevación del punto M2.

Además, asumimos que todas las categorías tendrán la misma razón de giro que la categoría C, al ser el parámetro que minimiza la altitud de M2. El hecho que las categorías A y B puedan tener una razón de giro mayor hace que la longitud del tramo de viraje disminuya y, en consecuencia, aumenten las de ambos tramos rectos, aumentando la distancia total del tramo de aproximación visual. Si la distancia de este tramo aumenta, también lo hará la altitud de M2.

Tramo	Longitud (metros)
Tramo recto inicial (M-VA)	2368
Viraje (VA-VAp)	1065
Tramo recto final (VAp-THR33)	2938
TOTAL	6371

Tabla 39. Longitud de los tramos de aproximación visual para categoría A.

Tramo	Longitud (metros)
Tramo recto inicial (M-VB)	1728
Viraje (VB-VBp)	1746
Tramo recto final (VBp-THR33)	2298
TOTAL	5772

Tabla 40. Longitud de los tramos de aproximación visual para categoría B.

Ahora que ya sabemos donde posicionar el punto “M2”, procedemos al diseño de las OAS para ese punto. Serán comparados los resultados con pendiente de descenso de 3 y 3.5°.

1.8.5.1. OAS con pendiente de descenso de 3°.

Se ha realizado el análisis de obstáculos directamente sobre las OAS en Categoría C por ser las más restrictivas. El resultado es que ningún obstáculo perfora las superficies.

En cualquier aproximación directa SBAS, mediante las superficies OAS conseguimos minimizar el punto de decisión o D/H, cuyos mínimos son 200 ft. para APV II y 250 ft. para APV I, el cual representa nuestro diseño.

Así, el **punto de decisión** se encontraría 250 ft (76 m.) por encima del punto M2, o lo que es lo mismo, a una **altitud total sobre el umbral de 325 metros**.

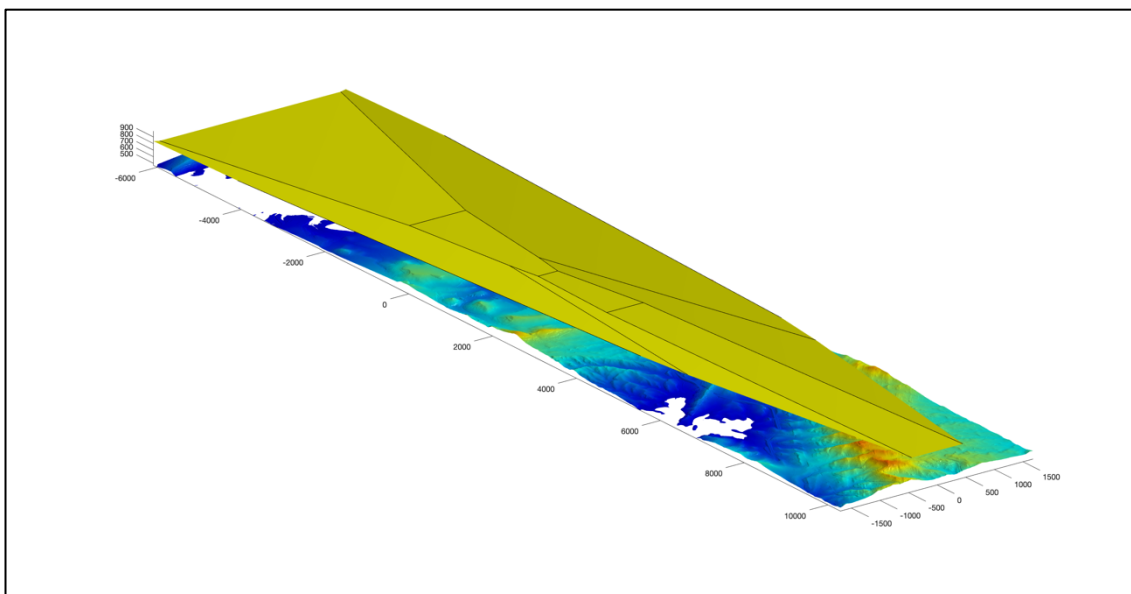


Ilustración 48. OAS sobre el punto M2 con GP de 3° para categoría C

1.8.5.2. OAS con pendiente de descenso de 3.5°.

De igual manera se aprecia que con un ángulo de descenso más llamativo tampoco se aprecia ningún obstáculo que perfora las superficies.

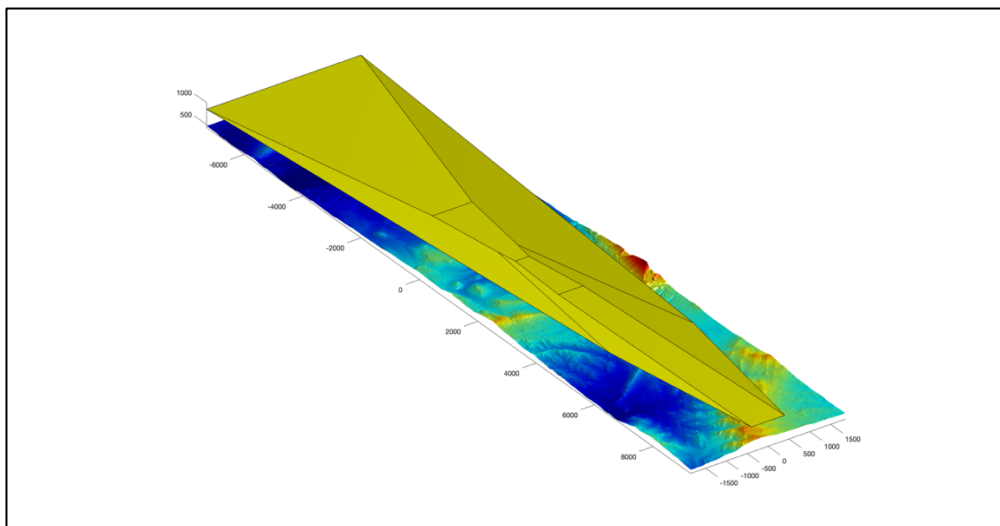


Ilustración 49. OAS sobre el punto M2 con GP de 3.5° para categoría C.

1.8.6. Tramo visual con derrota prescrita.

La OCA/H para maniobras visuales en derrotas prescritas deberá prever el margen mínimo para el franqueamiento de obstáculos por encima del obstáculo de mayor altura existente en el área de la derrota prescrita. Deberá ser conforme a los límites en circuito visual y no ser inferior a la OCA/H calculada para el procedimiento de aproximación por instrumentos que precede a la maniobra de aproximación visual. [6]

De esta forma se procede al diseño del área para el viraje a realizar, el cual representa un cambio de rumbo total de 61°. Su área está limitada por la semianchura del corredor a ambos lados de la derrota nominal. Este parámetro varía en función de la categoría como puede apreciarse en la siguiente tabla.

<i>Aircraft category</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
semi-width of the corridor (w)					
metres	1 400	1 500	1 800	2 100	2 600
(feet)	4 593	4 921	5 905	6 890	8 530

Tabla 41. Valores de la semianchura del corredor de la derrota prescrita. [11]

El área de la derrota prescrita se ha posicionado a la altitud anteriormente calculada para el punto M2 con el margen APV I, 325 metros. La semianchura para nuestros cálculos será la equivalente a categoría C por suponer la aproximación visual más restrictiva.

En la Figura 50, se encuentran diferenciados los tramos rectos inicial y final, así como el tramo del viraje. De manera que todo el conjunto del área tiene comienzo en el punto de decisión “M2” o “MAPt” y termina en el umbral THR33. Las coordenadas del punto de decisión se adjuntan a continuación.

$$MAPt = 42^{\circ}42'27.10"N \quad 1^{\circ}38'33.50"W$$

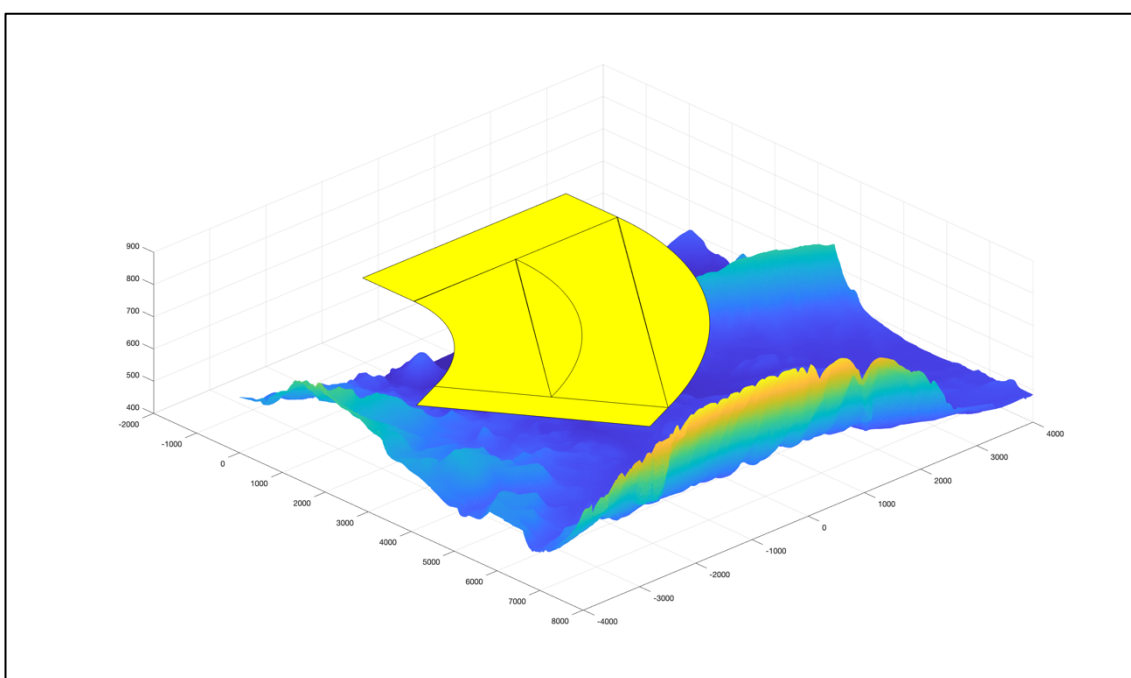


Ilustración 50. Área de la derrota prescrita para categoría C.

Para garantizar el correcto franqueamiento de obstáculos acorde a los mínimos de la derrota prescrita, los cuales coinciden con los del circuito visual, ver Tabla 42, se ha posicionado el área de la derrota prescrita a 120 metros de altura/altitud menos que en el caso anterior, es decir, 205 metros de altitud o una elevación de 662 metros. El resultado puede apreciarse en la Figura 51, donde se aprecia que ningún obstáculo intercede.

<i>Aircraft category</i>	<i>Obstacle clearance m (ft)</i>	<i>Lower limit for OCH above aerodrome elevation m (ft)</i>	<i>Minimum visibility 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 42. MOC de aproximaciones visuales utilizando derrotas prescritas. [11]

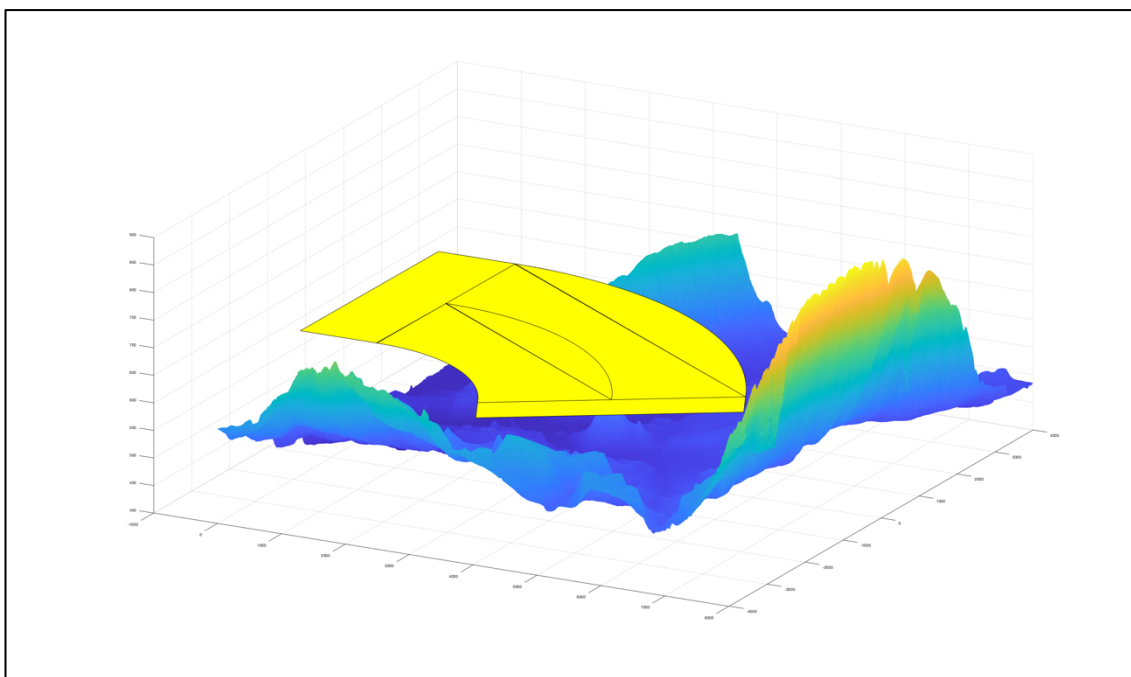


Ilustración 51. Área de la derrota prescrita a una elevación de 662 metros.

Por otro lado, basándonos en el único procedimiento de aproximación visual con derrota prescrita implantado a nivel nacional, el del Aeropuerto de La Coruña, somos conscientes de la necesidad de referencias visuales que nos indiquen el inicio y el fin del consecuente viraje, así como las coordenadas de esos puntos como título informativo.

1.8.6.1. Punto de inicio del viraje.

El viraje, como ya se ha comentado anteriormente, tiene comienzo en el punto “VC”, cuyas coordenadas se muestran a continuación.

$$VC = 42^{\circ}42'43.20"N \quad 1^{\circ}38'19.30"W$$

Como referencia visual puede utilizarse un peaje situado a la derecha de la derrota nominal:



Ilustración 52. Referencia visual para el inicio del viraje.



Ilustración 53. Referencia visual en detalle para el inicio del viraje.

1.8.6.2. *Punto de inicio del viraje.*

A la altura del punto “VCp” el piloto ya debería encontrarse prácticamente alineado con la pista.

$$VCp = 42^{\circ}45'17.30"N \ 1^{\circ}38'6.70"W$$

Como referencia visual para el punto final del viraje se ha escogido un polígono industrial situado a la izquierda de la derrota, favoreciendo así su correcta visibilidad ya que el viraje es realizado para este lado.

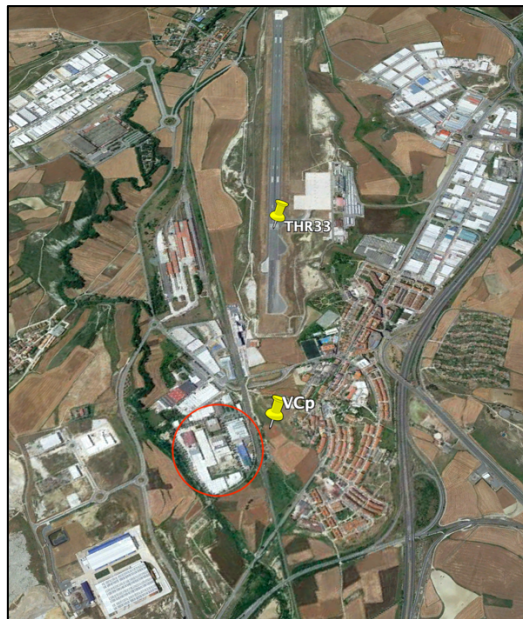


Ilustración 54. Referencia visual para el fin del viraje.



Ilustración 55. Referencia visual en detalle para el fin del viraje.

1.8.7. Tramo de aproximación intermedia

En este apartado se procede a, una vez concluida la aproximación final, diseñar la fase de aproximación intermedia definitiva, lo que nos daría las coordenadas el FAF de nuestra operación.

En base a lo establecido anteriormente, se realizó la aproximación APV con pendiente de descenso 3° sobre el punto M2, por lo que la aproximación intermedia deberá situarse a una distancia y altitud que permitan la senda de descenso ya comentada hasta dicho punto, siempre que los obstáculos lo permitan.

El punto M2 se encontraba situado a una altitud de, ver Tabla 38, 249 metros. Además, este punto, en la aproximación directa al umbral ficticio inicialmente desarrollada, se encuentra a una distancia de 7373 metros de dicho umbral (B33). Por lo que la distancia de la aproximación intermedia, ya que nos estamos aproximando a M2, se expresará tanto desde M2 como desde B33.

Si consideramos una longitud del tramo final desde M2 de 9 km., la fase de aproximación final tendría una longitud total de 16373 metros desde B33. De forma que, en los 9000 metros desde M2, para descender hasta M2 a razón de 3° , recorreríamos una distancia vertical de 471.67 metros.

Así, se requiere una altitud mínima de la fase intermedia de 680.67 metros. De esta forma, procedemos a estudiar su viabilidad. Consideramos, además, una longitud de la fase intermedia de 9.3 km y que el FAF representa el final de la fase intermedia y, consecuentemente, el inicio de la final.

$$\begin{aligned} \text{Longitud tramo final desde B33} &= \overline{B33 M2} + \overline{M2 FAF} = 7373 + 9000 = \\ &= 16373 \text{ metros.} \end{aligned}$$

$$\text{Longitud vertical tramo final desde M2} = \tan(3^\circ) * 9000 = 471.67 \text{ metros.}$$

$$\begin{aligned} \text{Altitud necesaria fase intermedia} &= \text{Altitud M2} + 471.67 = 209 + 471.67 = \\ &= 680.67 \text{ metros.} \end{aligned}$$

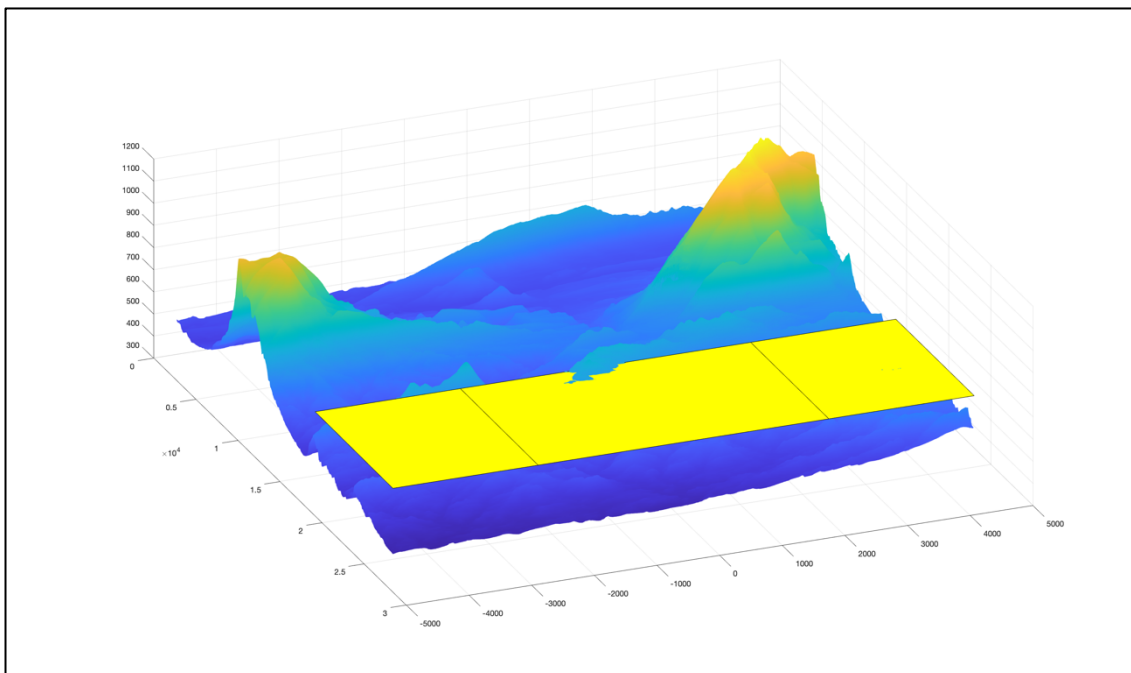


Ilustración 56. Fase intermedia a 16373 metros de B33 a una elevación de 650 metros.

El área de aproximación intermedia se ha posicionado inicialmente a una elevación de 650 metros con el fin de analizar su obstáculo determinante, obtenemos:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
16920	-325	712

Tabla 43. Obstáculo determinante de la fase intermedia a 16.373 km de B33.

Fase de la aproximación	Intermedia a 16.737 km del umbral ficticio
MOC en el área primaria (metros)	150
MOC a aplicar (metros)	150
OCA (metros)	862
OCH (metros)	405

Tabla 44. OCA/H de la fase intermedia a 16.373 km de B33.

En la Tabla 44, podemos apreciar que la OCH de esta fase intermedia sería de 405 metros, por lo que perfectamente podríamos situar la fase intermedia a la altitud requerida de 681 metros calculada anteriormente.

La OACI establece que las altitudes deben expresarse en intervalos de 50 metros o 100ft. Así, establecemos nuestra fase intermedia a una altitud de 700 metros.

Para calcular el FAF, establecemos la distancia total de la fase de aproximación final desde el umbral B33 con el rumbo opuesto a la aproximación, obteniendo las siguientes coordenadas:

$$\mathbf{FAF = 42^{\circ}34'9.50" N \ 1^{\circ}45'55.80" W}$$

1.8.8. Resumen del procedimiento y mínimos operacionales.

El procedimiento se basaría entonces en una aproximación intermedia de longitud 9.3 km. que termina en el FAF. Lo preferible en las fases de aproximación intermedia es realizar un recorrido horizontal y así se ha supuesto. Quedando pendientes el diseño de las fases de aproximación inicial y llegada, cuyo desarrollo es ajeno a este proyecto, para completar el diseño total de las fases de aproximación y comprobar la viabilidad de la aproximación intermedia diseñada finalmente.

$$\mathbf{FAF = 42^{\circ}34'9.50" N \ 1^{\circ}45'55.80" W}$$

A partir del FAF, la aeronave empieza un descenso a razón de 3° hasta llegar a una altitud de 325 metros. Al llegar a esta altitud la aeronave seguiría avanzando hasta llegar al punto de decisión o MAPt, a partir del cual, si las condiciones climatológicas lo permiten y hay una correcta visualización de la pista, se iniciaría la fase de aproximación visual donde la aeronave describiría un viraje de 61° para su alineamiento con la pista 33 del Aeropuerto de Pamplona.

$$\mathbf{MAPt = 42^{\circ}42'27.10"N \ 1^{\circ}38'33.50"W}$$

En el supuesto de no poder realizar el aterrizaje, a partir del MAPt la aeronave entra en la fase de aproximación frustrada con el mismo rumbo de la aproximación final basada en una pendiente de ascenso del 2.5 %.

Al tratarse de una mejora del procedimiento actual, se suponen compatibles las fases de aproximación frustrada implantadas actualmente y las que se realizarían en nuestra aproximación, a la espera del estudio de su viabilidad. Por tanto, la aeronave describiría una pendiente de ascenso del 2.5 % hasta 8.0 DME PAP o 4300 ft., lo que se alcance primero. Para posteriormente virar a la izquierda y entrar en el circuito de espera situado a 6000 ft., igual que en actual procedimiento.

De esta forma se establecen los siguientes mínimos para la operación, comunes para categorías A, B y C.

Categorías A, B y C	metros	pies
OCA	782	2565
OCH	325	1066

Tabla 45. Mínimos operacionales para categorías A, B y C sin redondeo.

Los cuales, expresados correctamente en intervalos de 50 metros o 100 pies, resultarían:

Categorías A, B y C	metros	pies
OCA	800	2600
OCH	350	1100

Tabla 46. Mínimos operacionales para categorías A, B y C con redondeo.

En base a todo lo comentado en este capítulo y gracias al desarrollo paso a paso del diseño de nuestro procedimiento, conseguimos reducir los mínimos implantados actualmente excepto los relacionados con categoría A. Por contraste, ya no sería necesaria realizar la fase de aproximación frustrada con pendiente de ascenso de 4.5%.

Además, como ya se ha comentado en los capítulos iniciales, el procedimiento establecido incorpora un desarrollo tecnológico muy a tener en cuenta frente al procedimiento instrumental de no precisión implantado en la actualidad.

OCA/H		A	B	C	D
STA	2.5%	RESTRINGIDA A OCA/H DE CIRCUITO POR ÁNGULO DE LA DERROTA ENTRE FNA Y RCL EXCESIVO			
	4.5%	RESTRINGIDA A OCA/H DE CIRCUITO POR ÁNGULO DE LA DERROTA ENTRE FNA Y RCL EXCESIVO			
En circuito (H) sobre	2.5%	3300 (1800)			
	4.5%	2500 (1000)	2600 (1100)	3100 (1600)	

Ilustración 57. Actuales mínimos operacionales.

1.9. Aproximación LNAV.

El procedimiento LNAV se plantea como solución alternativa a la aproximación LPV. En este caso, tratamos con una aproximación en la que solo se presenta guiado lateral GNSS, pero seguimos en condiciones de RNP APCH, por lo que las tolerancias laterales y verticales son las mismas que en el anterior diseño.

Para esta aproximación se van a suponer unas longitudes iniciales de los tramos de aproximación intermedia y final diferentes a los del apartado anterior, ya que esta aproximación no dispone de OAS. Las distancias de las fases de aproximación se seguirán expresando desde el punto B33.

La aproximación final sólo será graficada y analizada desde el punto de rotación A con el fin de que los obstáculos situados sobre el umbral ficticio no afecten a la OCA/H de aproximación final. Por otro lado, estos obstáculos si que serán analizados para el diseño de la aproximación frustrada, en caso de que los mínimos en las aproximaciones intermedia y final sean viables.

1.9.1. Análisis inicial de las fases de aproximación final e intermedia.

Como primer punto en el diseño de esta aproximación se procede a estudiar las fases intermedia y final con el fin de determinar las respectivas coordenadas de sus obstáculos determinantes. Se ha procedido a considerar, de manera inicial y orientativa, que la fase final presente una longitud de 15 kilómetros.

Una vez establecida la longitud del tramo de aproximación inicial, establecemos una longitud de 9.3 kilómetros para el tramo de aproximación intermedia. De manera que esta se encontrará situada entre 15 y 24.3 kilómetros desde el umbral ficticio.

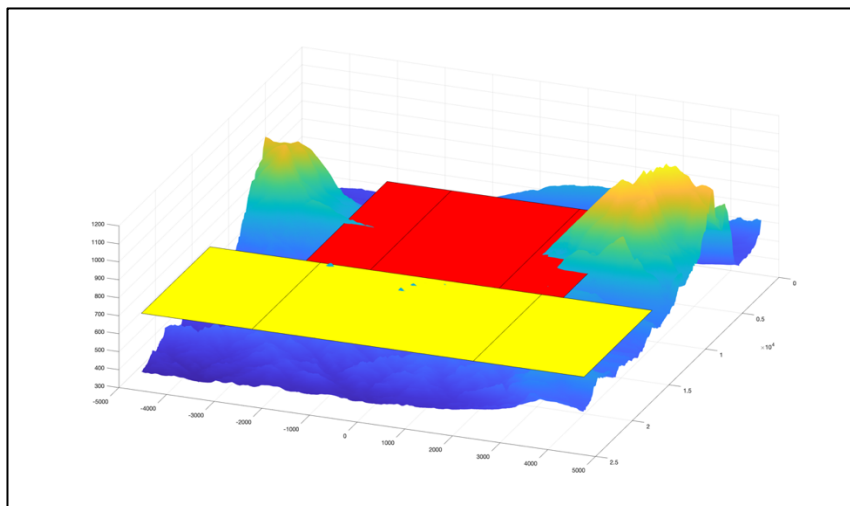


Ilustración 58. Áreas de aproximación intermedia y final a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 33°.

En esta imagen se aprecian las áreas de aproximación final e intermedia a una altura de 700 metros. El área de aproximación final esta claramente invadida por el terreno.

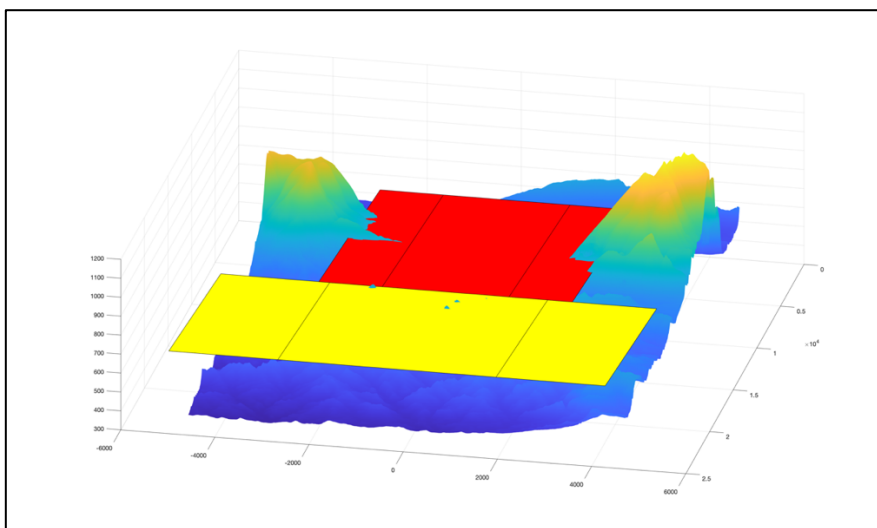


Ilustración 59. Áreas de aproximación intermedia y final a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 35°.

En esta imagen se ha procedido a realizar un cambio de rumbo de aproximación de 2°. De esta forma nos aproximamos con rumbo 35° al punto M. En la imagen se aprecia de manera muy ligera, pero se ha conseguido penetrar menos en la montaña de la derecha para hacerlo un poco más en la de la izquierda, que presenta menores cotas, lo que se traduce en una mejora en los mínimos del procedimiento. De esta manera establecemos un rumbo de la aproximación de 35°.

1.9.2. Aproximación intermedia.

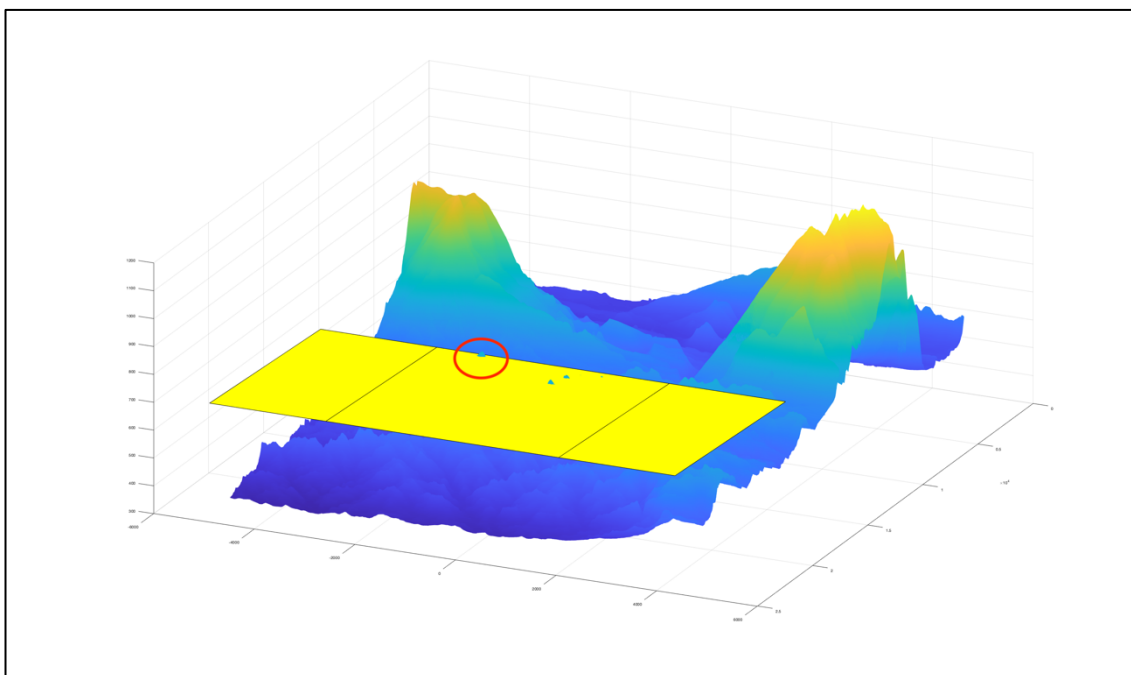


Ilustración 60. Área de aproximación intermedia a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 35°.

Tras el análisis de obstáculos de la fase intermedia se obtienen las siguientes coordenadas de su obstáculo determinante:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
15040	-1225	714

Tabla 47. Obstáculo determinante de la fase intermedia a 15 km del umbral ficticio.

Este obstáculo se encuentra en su área primaria, por lo tanto, el margen de franqueamiento de obstáculos que debe aplicarse es íntegramente el asociado a esta fase de la aproximación, 150 metros. Y la pendiente de descenso para franquear este obstáculo sería de 1.55°.

Fase de la aproximación	Intermedia a 15 km del umbral ficticio
MOC en el área primaria (metros)	150
MOC a aplicar (metros)	150
OCA (metros)	864
OCH (metros)	407
Pendiente de franqueamiento (grados)	1.55

Tabla 48. OCA/H de la fase intermedia a 15 km del umbral ficticio.

1.9.3. Aproximación final.

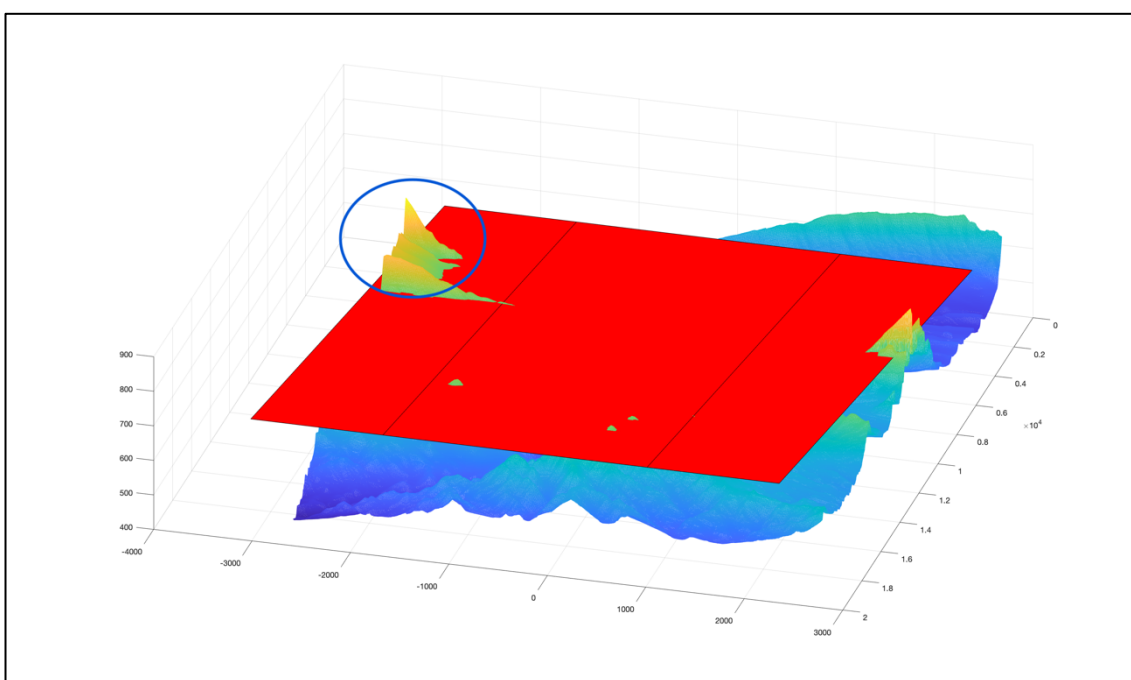


Ilustración 61. Área de aproximación final a una altura de 700 metros con rumbo de aproximación 35°.

Tras el análisis de obstáculos de la fase intermedia, se obtiene:

Coordenadas del obstáculo determinante		
X	Y	Z
7070	-2685	857

Tabla 49. Obstáculo determinante en la fase de aproximación final de longitud 15 km.

En este caso, el obstáculo se encuentra justo en el borde del área secundaria por lo que el MOC correspondiente es igual a cero. La pendiente para franquearlo es de 3.24°.

Fase de la aproximación	Aproximación final de longitud 15 km
MOC en el área primaria (metros)	75
MOC a aplicar (metros)	0
OCA (metros)	857
OCH (metros)	400
Pendiente de franqueamiento (grados)	3.24

Tabla 50. OCA/H de la fase de aproximación final de longitud 15km.

El análisis de obstáculos de la fase final nos da como resultados unos mínimos demasiados elevados.

1.9.4. Transición entre la fase final y la frustrada inicial.

Como solución a este problema de la aproximación final, se ha propuesto realizar el conveniente estrechamiento entre la aproximación final y la frustrada inicial.

Al tratarse de un valle, las montañas que lo rodean tienen cotas muy elevadas por lo que si una de estas cotas penetra las áreas primaria o secundaria elevaría demasiado los mínimos de la operación. El objetivo es que con este estrechamiento se consiga que ningún obstáculo interfiera.

Dicho esto, el estrechamiento será llevado a cabo en base a lo expuesto por el documento 8168 para estos casos. En la Ilustración 62, el punto rojo representaría el MAPT mientras que el punto amarillo corresponde al FAF.

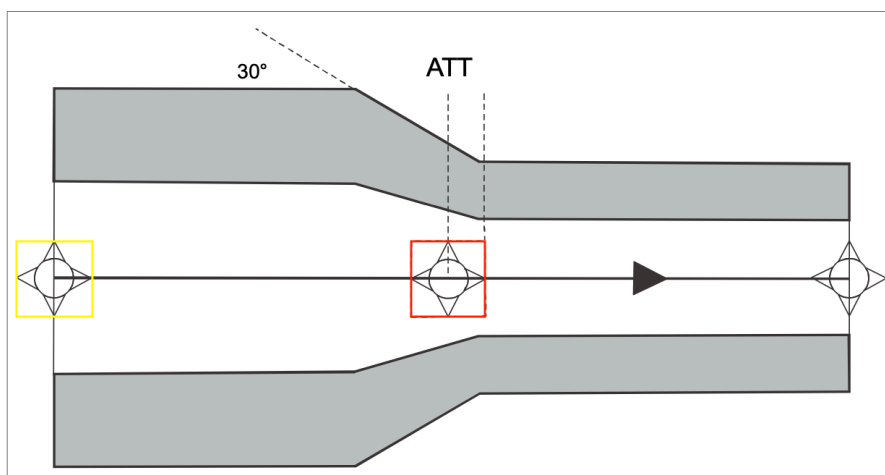


Ilustración 62. Criterio de estrechamiento de la fase de aproximación final.

El estrechamiento termina en el MAPt nominal, el cual se sitúa a 444 metros en el sentido de la aproximación. Ahora calculamos la distancia total de la aproximación final en la que se produce variación en la longitud lateral del área secundaria:

$$\tan 30^\circ = \frac{2685 - 1759}{\text{longitud de progresión}} ; \text{longitud} = 1603.879 \text{ metros}$$

De manera que desde el MAPt nominal y, en sentido contrario a la aproximación, el área final se ensancha a razón de 30°. Si representamos esta área de aproximación final junto con el Modelo de elevación del Terreno y siguiendo un rumbo de aproximación de 35 grados:

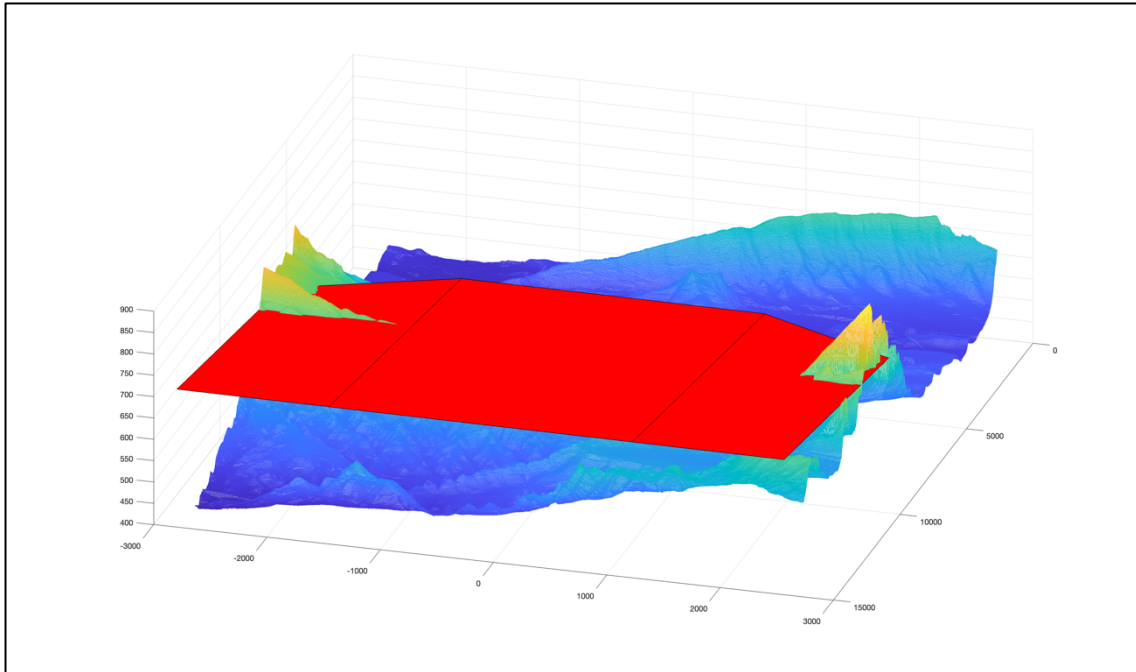


Ilustración 63. Fase de aproximación final con rumbo de aproximación 35° y estrechamiento.

Tras analizar la figura anterior vemos que no se ha conseguido evitar que los obstáculos penetren el área secundaria. Situando los mínimos de la aproximación final por encima de los 400 metros de altitud.

Después de este análisis damos por finalizada la reducción de mínimos mediante el diseño de la aproximación LNAV ya que esta no mejora las prestaciones de la aproximación LPV.

1.10. Conclusiones.

El procedimiento de aproximación a la cabecera 33 del Aeropuerto de Pamplona se presenta como una de las aproximaciones más peculiares a nivel nacional. La común búsqueda de realizar las fases de aproximación de manera directa lleva a evitar este tipo de procedimientos, en los que se ponen a prueba las capacidades del piloto.

Mediante el diseño de la aproximación SBAS APV I o LPV conseguimos, finalmente la reducción de los mínimos operacionales. Se estableció en todo caso la prioridad de realizar la senda de descenso con un ángulo de 3° ya que pendientes menos pronunciadas o, lo que es lo mismo, menores ángulos de descenso, nos llevarían a una peor visualización de la pista por parte del piloto.

Es importante comentar que nuestra aproximación LPV se aleja mucho de un procedimiento estándar de este tipo. Nos basamos en el hecho de el software PANS-OPS utilizado para el diseño de las OAS solo permite una pendiente de descenso máxima de 3.5° . El desarrollo particular de las OAS para ángulos mayores a este, unido a la ya peculiaridad de nuestra aproximación, podría invalidar nuestros resultados finales.

Destacamos que el procedimiento LPV puede, finalmente, llevarse a cabo por la peculiaridad de su aproximación final, basada en las OAS. Las que nos permite atravesar el valle comentado anteriormente con seguridad. Todo lo contrario a lo que sucede en la aproximación LNAV, cuyo proceso de diseño fue interrumpido ante las dificultades presentadas y sus altos mínimos de operación en la fase de aproximación final.

Por otro lado, a pesar de la peculiaridad de nuestra aproximación, podemos enfatizar la firmeza de nuestros resultados. Basados en el Modelo de Elevación del Terreno proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional. Dicho modelo de Elevación del Terreno ha sido de vital importancia para el estudio de obstáculos en una zona con geografía tan peculiar como la que rodea al aeropuerto objeto de nuestro estudio. Este método puede considerarse mucho más preciso que la alternativa planteada en el análisis gráfico del terreno mediante Google Earth o el estudio de obstáculos mediante el listado proporcionado en el AIP.

Finalmente, también debe comentarse que el objetivo de este proyecto fue finalmente cumplido. Comparando el proceso implantado actualmente con el parcialmente diseñado en este proyecto, para casos de pendiente de frustrada de 2.5%, asumimos una mejora en la OCA de 700 pies. Queda pendiente así, como ya fue comentado anteriormente, el desarrollo de las fases de llegada y aproximación inicial, cuyo objetivo es ajeno a este proyecto.

Parte II. Planos.

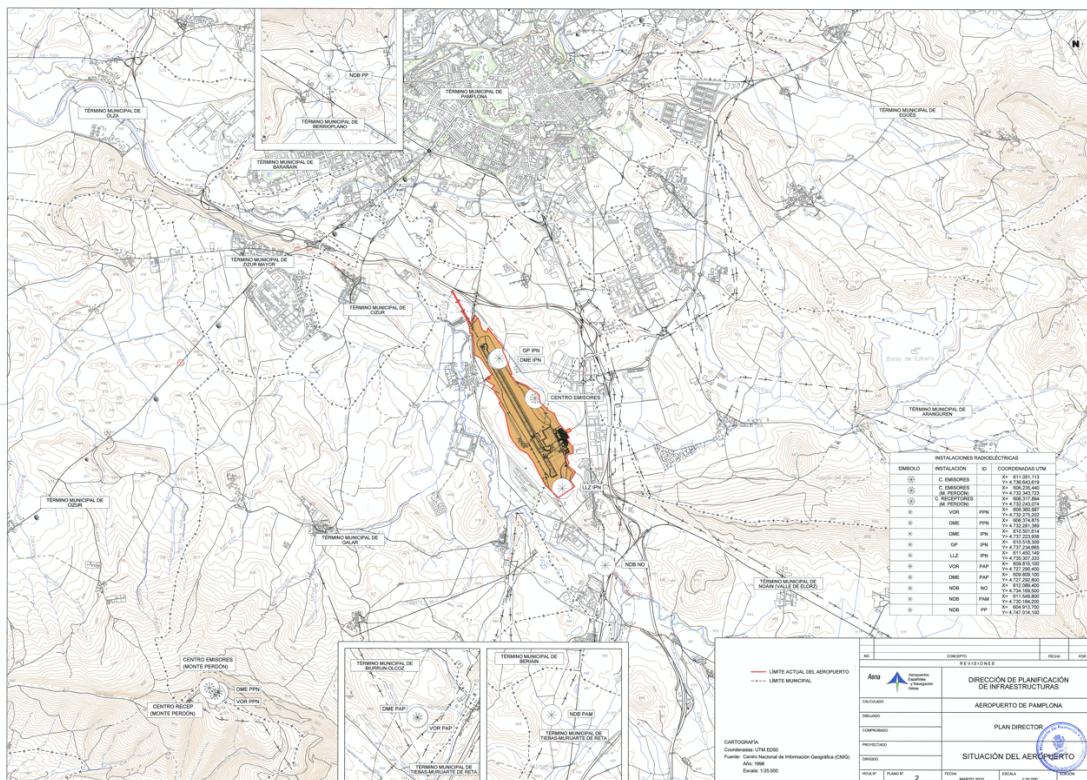


Ilustración 64. Situación actual del Aeropuerto de Pamplona. AENA.

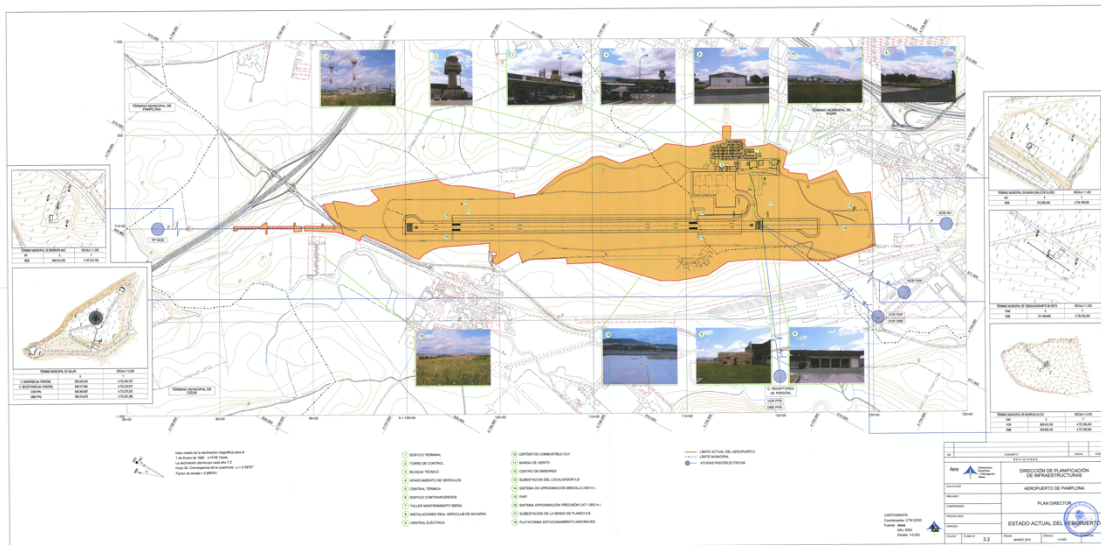


Ilustración 65. Infraestructuras del Aeropuerto de Pamplona. AENA.

TRABAJO DE FIN DE GRADO

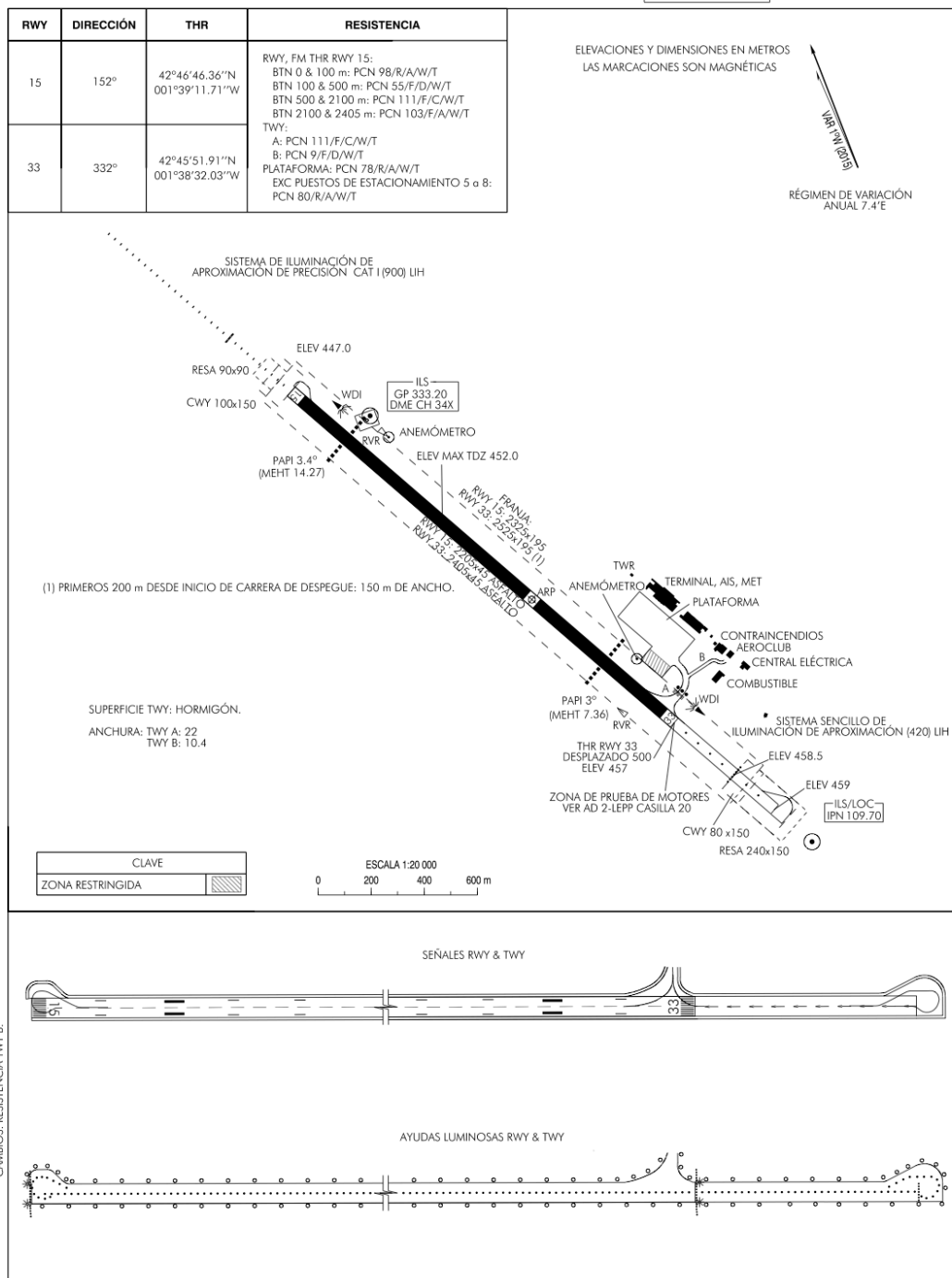
AIP
ESPAÑA

AD 2-LEPP ADC
WEF 15-SEP-16

PLANO DE AERÓDROMO-OACI 42°46'12"N
001°38'47"W ELEV 459

TWR 118.200
GMC 121.700

PAMPLONA



SEÑALES RWY & TWY

AYUDAS LUMINOSAS RWY & TWY

CAMBIOS: RESISTENCIA TWY B.

AIS-ESPAÑA

AIRAC AMDT 10/16

Ilustración 66. Plano del Aeródromo. OACI.

TRABAJO DE FIN DE GRADO

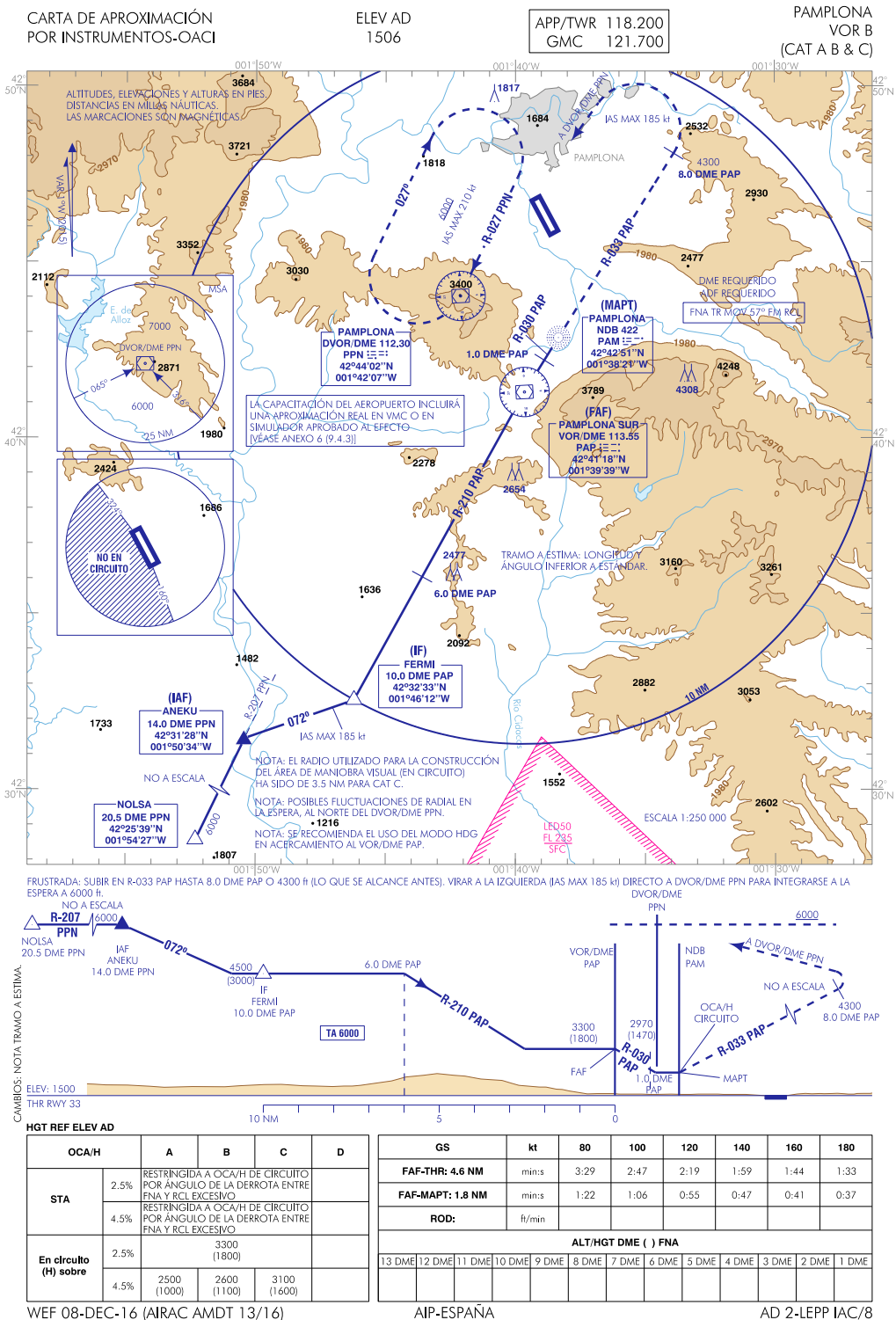


Ilustración 67. Actual procedimiento de aproximación por instrumentos a la cabecera 33 del Aeropuerto de Pamplona.

Parte III. Código desarrollado en MATLAB.

3.1. Scripts.

Cabe destacar que en todos los scripts comentados a continuación se definen inicialmente las coordenadas de los umbrales reales y ficticios. En el desarrollo del código se ha trabajado con coordenadas LLA, coordenadas UTM y coordenadas OAS. En los scripts se hace referencia a las funciones que serán comentadas en el siguiente apartado dependiendo de la finalidad de este.

Para la representación en Google Earth se precisa de las coordenadas en LLA mientras que para la representación junto con el Modelo de Elevación del terreno entran en juego las coordenadas OAS, obtenidas a partir de una rotación y traslación respecto del umbral, en torno al cual se quiere representar, a partir de las coordenadas UTM.

3.1.1. Area_Visual

En este script se crea el área de maniobra visual en circuito y se realiza su representación tanto en Google Earth como junto al MET. También se realiza el análisis de obstáculos para ambos casos. Todo en función de la categoría de aeronave analizada.

3.1.2. LPV_OAS

En este script tiene lugar el desarrollo de las OAS, su análisis de obstáculos y su representación, tanto en Google Earth como junto al MET. Todo en función de la categoría de aeronave analizada.

3.1.3. Aprox_tramos

En el que se realiza el diseño de las fases de aproximación. En función de la fase deseada esta se grafica junto al MET y se realiza su análisis de obstáculos, el cual nos da como resultado el obstáculo determinante, el correspondiente MOC a añadir en función de la posición lateral del objeto, la OCA/H y la pendiente necesaria para su franqueamiento.

3.1.4. Viraje_Visual

En este script tienen lugar los cálculos relacionados con el viraje y la obtención de los puntos de inicio y fin de este. De la misma forma, se diseña el área de la derrota prescrita y se grafica junto con el MET. Todo en función de la categoría de aeronave analizada.

3.2. Funciones

En este apartado se procede a explicar cada función desarrollada en base a sus inputs y outputs, así como una breve explicación de su funcionamiento. Además, es importante comentar que la gran mayoría de las variables presentan formato *struct*.

FUNCIÓN	[B,A]= Umbral_rot(THR,FAF)
INPUT	
THR	Umbral que se quiere rotar
FAF	Actual FAF
OUTPUT	
B	Umbral rotado
A	Punto de rotación

Tabla 51. Función "Umbral_rot".

Esta función calcula el punto A como la intersección entre dos rectas en base a lo comentado en el apartado 1.7.3. Obtiene el nuevo punto rotado mediante la traslación de distancias ortodrómicas.

FUNCIÓN	[M2] = matrices(M_0141,M_0142,M_0173)
INPUT	
M_0141	Matriz de cotas correspondiente al área 0141
M_0142	Matriz de cotas correspondiente al área 0142
M_0173	Matriz de cotas correspondiente al área 0173
OUTPUT	
M2	Unión de las tres matrices anteriores

Tabla 52. Función "matrices".

Esta función realiza la unión de las matrices de cotas descargadas desde el IGN.

FUNCIÓN	[M] = MET_rot(M2,d,R,OO,alpha)
INPUT	
M2	Matriz de cotas
d	Distancias que establecen el rectángulo del MET a representar
R	Punto de rotación
O	Coordenadas UTM de la esquina inferior izquierda de M2
alpha	Ángulo positivo de la orientación de la pista
OUTPUT	
M	Matriz del terreno recortada y orientada

Tabla 53. Función "MET_rot".

Mediante esta función obtenemos la matriz de elevación del terreno recortada y orientada respecto al umbral en torno al cual se quiera representar.

FUNCIÓN	[OBS] = read_OBS(U15,U33)
INPUT	
U15	Umbral 33 real
U33	Umbral 15 real
OUTPUT	
OBS	Obstáculos del AIP con coordenadas OAS

Tabla 54. Función "read_OBS"

Función que lee el archivo OBS.txt, en el que se encuentran los obstáculos del AIP, y obtiene sus coordenadas OAS respecto al umbral real, ya que estos obstáculos AIP solo son utilizados para el análisis del obstáculo determinante del circuito visual sobre ese umbral.

FUNCIÓN	[x, y] = RT(px,py,THR33,THR15)
INPUT	
px	Coordenada UTM x
py	Coordenada UTM y
THR33	Umbral 33 real o ficticio
THR15	Umbral 15 real o ficticio
OUTPUT	
x	Coordenada OAS x
y	Coordenada OAS y

Tabla 55. Función "RT".

Función que realiza una rotación y traslación para el cambio de coordenadas UTM a OAS en función del umbral requerido como origen (real o ficticio). Por ejemplo, para la obtención de los tramos de aproximación se utiliza como origen el umbral ficticio mientras que para los circuitos visuales se utiliza el real.

FUNCIÓN	[pol,d,R] = Tramos_Visual(U33,U15,B33,V,Vp,h,l,MAPT)
INPUT	
U33	Umbral 33 real
U15	Umbral 15 real
B33	Umbral 33 ficticio
V	Punto de inicio del viraje
Vp	Punto de fin del viraje
h	Elevación del área de la derrota prescrita
l	Anchura del corredor
MAPT	Punto de decision
OUTPUT	
pol	Conjunto de polígonos que forman el área
d	Distancias que establecen el rectángulo del MET a representar
R	Punto de rotación

Tabla 56. Función "Tramos_Visual".

Mediante esta función se crean los polígonos que forman el área de la derrota prescrita y se establecen las distancias necesarias para que el MET a representar coincida con dicha área. A partir de las distancias obtenemos el punto de rotación.

FUNCIÓN	[pol,d] = pol_aprox(AUX,B33,B15,data,h)
INPUT	
AUX	Punto auxiliar utilizado para la representación del área
B33	Umbral 33 ficticio
B15	Umbral 15 ficticio
data	Longitud y anchura de cada uno de los tramos
OUTPUT	
pol	Conjunto de polígonos que forman el área
d	Distancias que establecen el rectángulo del MET a representar

Tabla 57. Función "pol_aprox".

Mediante esta función se crean los polígonos que forman el área de la fase de aproximación requerida, así como las distancias necesarias para que el MET a representar coincida con dicha área.

FUNCIÓN	[zdiff] = plotSurfInt2(surfA,surfB)
INPUT	
SurfA	Superficie objeto del análisis de obstáculos
SurfB	MET
OUTPUT	
zdiff	Obstáculos del AIP con coordenadas OAS

Tabla 58. Función "plotSurfInt2". [8]

Función que calcula la diferencia entre las cotas entre dos superficies.

FUNCIÓN	[OAS, pol] = PANS OPS (Cat, THR)
INPUT	
Cat	Categoría de aeronave
THR	Umbral objeto de las OAS. Utilizado para cargar su elevación.
OUTPUT	
OAS	Conjunto de parámetros que definen las OAS
pol	Conjunto de polígonos que forman las OAS

Tabla 59. Función "PANS OPS".

En esta función se establecen los parámetros obtenidos del software PANS-OPS y se crean los polígonos que definen las superficies OAS.

FUNCIÓN	[OBSdet] = Obst_Visual_MDT(grid, pol, M, surf, h)
INPUT	
grid	Cuadrícula acorde al MET a representar
pol	Conjunto de polígonos que forman el circuito visual
M	Matriz del terreno recortada y orientada
surf	Cota del circuito visual, definida por h al ser horizontal.
h	Elevación del circuito visual
OUTPUT	
OBSdet	Características del obstáculo determinante

Tabla 60. Función "Obst_Visual_MDT".

Función que calcula el obstáculo determinante en el circuito visual acorde al MET.

FUNCIÓN	[OBSdet, k] = Obst_Visual(OBS, h, r, d)
INPUT	
OBS	Obstáculos AIP en coordenadas OAS
h	Elevación del circuito visual
r	Radio desde el umbral acorde a cada categoría
d	Distancia entre U33 y U15
OUTPUT	
OBSdet	Características del obstáculo determinante
k	Número identificativo del obstáculo determinante (1-278)

Tabla 61. Función "Obst_Visual".

Función que calcula el obstáculo determinante AIP para el circuito visual.

FUNCIÓN	[OBS_DET] = Obst_OAS(grid,M,surf,OAS,Cat,GP,Frustrada,pol,THR)
INPUT	
grid	Cuadrícula acorde al MET a representar
M	Matriz del terreno recortada y orientada
surf	Cota de las OAS en cada punto, definida por las ecuaciones de sus planos
OAS	Conjunto de parámetros que definen las OAS
Cat	Categoría de aeronave
GP	Ángulo de descenso
Frustrada	Pendiente de frustrada
pol	Conjunto de polígonos que forman el área
THR	Umbral objeto de las OAS.
OUTPUT	
OBSdet	Características del obstáculo determinante

Tabla 62. Función "Obst_OAS". [8]

Función que calcula el obstáculo determinante en las superficies OAS.

FUNCIÓN	[OBSdet] = Obst_NPA(grid,pol,M,surf,h)
INPUT	
grid	Cuadrícula acorde al MET a representar
pol	Conjunto de polígonos que forman el área de la fase de aproximación
M	Matriz del terreno recortada y orientada
surf	Cota del área de aproximación definida por h al ser horizontal.
h	Elevación del área de aproximación
OUTPUT	
OBSdet	Características del obstáculo determinante

Tabla 63. Función "Obst_NPA".

Función que calcula el obstáculo determinante en la fase de aproximación requerida.

FUNCIÓN	[surf] = generateOAS_SBAS(grid,OAS,THR)
INPUT	
grid	Cuadrícula acorde al MET a representar
OAS	Conjunto de parámetros que definen las OAS
THR	Umbral objeto de las OAS.
OUTPUT	
surf	Cota de las OAS en cada punto, definida por las ecuaciones de sus planos

Tabla 64. Función "generateOAS_SBAS". [8]

En esta función, a través de las ecuaciones de los planos OAS, se establecen las cotas z de las superficies en cada punto.

FUNCIÓN	[pol,d,R,r] = Circuito_Visual(Cat,U33,U15,h)
INPUT	
Cat	Categoría de aeronave
U33	Umbral 33 real
U15	Umbral 15 real
h	Elevación del circuito visual
OUTPUT	
pol	Conjunto de polígonos que forman el circuito visual
d	Distancias que establecen el rectángulo del MET a representar
R	Punto de rotación
r	Radio desde el umbral acorde a cada categoría

Tabla 65. Función "Circuito_Visual"

Esta función crea los polígonos que forman el área visual.

FUNCIÓN	Plot_OAS_MET(grid,M,pol)
INPUT	
grid	Cuadrícula acorde al MET a representar
M	Matriz del terreno recortada y orientada
pol	Conjunto de polígonos que forman las OAS
OUTPUT	
	Representación gráfica

Tabla 66. Función "Plot_OAS_MET". [8]

Función que grafica las OAS junto con el MET.

Finalmente, las funciones "*rec_GE*", "*sc1_GE*", "*sc2_GE*", "*OAS_GE*" y "*dibujar_superficie*" son utilizadas para la representación del circuito visual y las superficies OAS en Google Earth.

Parte IV. Pliego de condiciones.

4.1. Clave de referencia del Aeródromo.

El propósito de la clave de referencia es proporcionar un método simple para relacionar entre sí las numerosas especificaciones concernientes a las características de los aeródromos, a fin de suministrar una serie de instalaciones aeroportuarias que convengan a los aviones destinados a operar en el aeródromo. [9]

La clave está compuesta de dos elementos que se relacionan con las características y dimensiones del avión. El elemento 1 es un número basado en la longitud de campo de referencia del avión y el elemento 2 es una letra basada en la envergadura del avión y en la anchura entre las ruedas del tren de aterrizaje principal. [9]

En primer lugar, nos disponemos a calcular la longitud de campo de referencia del aeródromo, cuyo perfil de pista se muestra a continuación. Tomamos como altitud la del punto de referencia del aeródromo: 459 metros. Además, la pista tiene una longitud de 2405 metros.

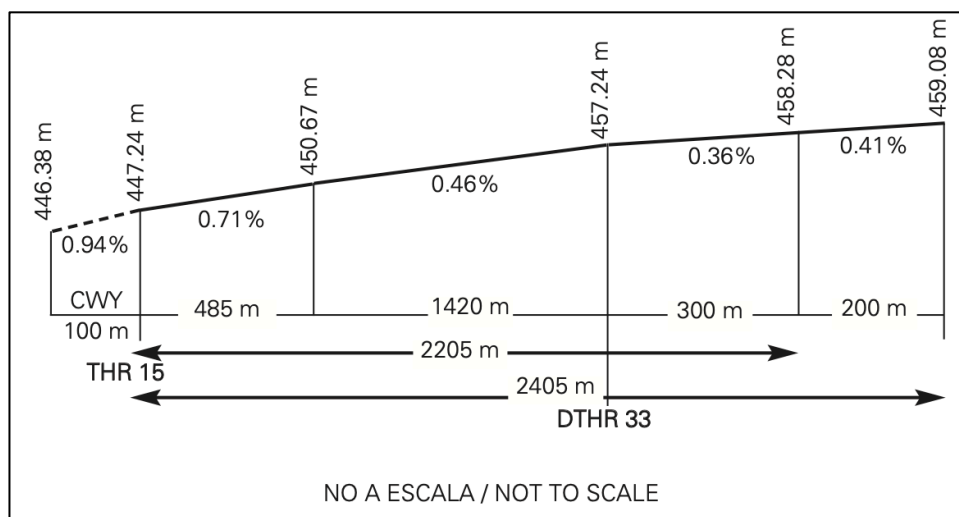


Ilustración 68. Perfil de la pista. [9]

Calculamos las correcciones asociadas a la pista:

- Corrección por temperatura: 1% por cada 1°C sobre la temperatura ISA a esa altitud. La temperatura ISA se establece como 15°C a nivel del mar y disminuye a razón de 6.5°C por cada 1000 metros de elevación. La temperatura de referencia es 28°C:

$$C.T. = 1 + 0.01 \left(T_{ref} - \left(15 - \frac{6.5 \cdot 459}{1000} \right) \right) = 1.1598$$

- Corrección por altitud: 7% por cada 300 metros de elevación:

$$C.A. = 1 + 0.07 * \frac{459}{300} = 1.1071$$

- Corrección por pendiente: solo aplicable en pistas de longitud mayor de 900 metros, como es nuestro caso. 10% por cada 1% de pendiente:

$$C.P. = 1 + 0.1 * \frac{459.08 - 447.24}{2405} * 100 = 1.0492$$

Si dividimos la actual longitud de pista entre estas correcciones, obtendremos la longitud del campo de referencia:

$$L.C.R. = \frac{2405}{C.T.* C.P.* C.A.} = 1786 \text{ metros}$$

Por lo que, atendiendo a la longitud de su campo de referencia y al ancho de pista, el aeropuerto tendría una clave de referencia con número de clave 3, ver Ilustración 69. No obstante, en el documento en el AIP sobre el aeropuerto de Pamplona (LEEP), se establece una clave de aeródromo 4C.

En base a la pequeña diferencia restante para alcanzar una longitud de campo de referencia correspondiente a número de clave 4, se asume esta como la clave definitiva.

Núm. de clave (1)	Elementos 1 de la clave		Elementos 2 de la clave	
	Longitud de campo de referencia del avión (2)	Letra de clave (3)	Envergadura (4)	Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal ^a (5)
1	Menos de 800 m	A	Hasta 15 m (exclusive)	Hasta 4,5 m (exclusive)
2	Desde 800 m hasta 1 200 m (exclusive)	B	Desde 15 m hasta 24 m (exclusive)	Desde 4,5 m hasta 6 m (exclusive)
3	Desde 1 200 m hasta 1 800 m (exclusive)	C	Desde 24 m hasta 36 m (exclusive)	Desde 6 m hasta 9 m (exclusive)
4	Desde 1 800 m en adelante	D	Desde 36 m hasta 52 m (exclusive)	Desde 9 m hasta 14 m (exclusive)
		E	Desde 52 m hasta 65 m (exclusive)	Desde 9 m hasta 14 m (exclusive)
		F	Desde 65 m hasta 80 m (exclusive)	Desde 14 m hasta 16 m (exclusive)

a. Distancia entre los bordes exteriores de las ruedas del tren de aterrizaje principal.

Ilustración 69. Criterios para deducir la clave de referencia del aeródromo. [8]

En el Manual de Diseño de Aeródromos, Pistas, podemos encontrar valores de longitud de campo de referencia, envergadura y ancho exterior entre las ruedas del tren de aterrizaje para diferentes categorías de aeronaves como se puede apreciar en la Tabla 67.

<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Clave</i>	<i>Longitud de campo de referencia del avión (m)</i>	<i>Envergadura (m)</i>	<i>Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal (m)</i>
	F28-3000	3C	1 640	25,1	5,8
	F28-4000	3C	1 640	25,1	5,8
	F28-6000	3C	1 400	25,1	5,8
	F50	3C	1 355	29,0	8,0
McDonnell Douglas	MD90	3C	1 798	32,9	6,2
SAAB	340A	3C	1 220	21,4	7,3
	340B	3C	1 220	22,8 ³	7,3
	SAAB 2000	3C	1 340	24,8	8,9
BAe	ATP	3D	1 540	30,6	9,3
DeHavilland Canada	DHC5D	3D	1 471	29,3	10,2
Airbus	A300 B2	3D	1 676	44,8	10,9
Bombardier Aero.	CRJ 100LR	4B	1 880	21,2	4,0
	CRJ 200LR	4B	1 850	21,2	4,0
Dassault Aviation	Falcon 20-5 (Retrofit)	4B	1 859	16,3	3,7
Embraer	EMB-145 LR	4B	2 269	20,0	4,1
Airbus	A320-200	4C	2 480	33,9	8,7
BAC	1-11-200	4C	1 884	27,0	5,2
	1-11-300	4C	2 484	27,0	5,2
	1-11-400	4C	2 420	27,0	5,2
	1-11-475	4C	2 286	28,5	5,4
	1-11-500	4C	2 408	28,5	5,2
Boeing	B727-100	4C	2 502	32,9	6,9
	B727-200	4C	3 176	32,9	6,9
	B737-100	4C	2 499	28,4	6,4
	B737-200	4C	2 295	28,4	6,4
	B737-300	4C	2 160	28,9	6,4
	B737-400	4C	2 550	28,9	6,4
	B737-500	4C	2 470	28,9	6,4
	B737-800	4C	2 090	34,3	7,0

Tabla 67. Valores de referencia asociados a las aeronaves. [10]

4.2. Flota Usuaria.

Para establecer la flota usuaria, se ha recurrido a los datos establecidos en el Plan Director del Aeropuerto. Sin embargo, estos datos no se encuentran actualizados, considerando las estadísticas hasta el año 2006.

Las principales aeronaves que operaban en el aeropuerto ese año, así como su número de operaciones y su representación en el porcentaje total de operaciones puede apreciarse en la Tabla 68.

Por otro lado, es importante comentar que cualquier aeronave que pretenda realizar esta aproximación, así como su tripulación, deben estar validadas para aproximaciones PBN.

Tipo de Avión	Operaciones	%
De Havilland Dhc-8 Dash 8-300	3.252	38,2%
Aerospatiale ATR-72	1.677	19,7%
Mcdonnell Douglas MD88	1.173	13,8%
Canadair Regional Jet 200	905	10,6%
Beechcraft 1900D Airliner	508	6,0%
Mcdonnell Douglas MD87	238	2,8%
Cessna Citation	176	2,1%
Fairchild Metro/Merlin/Expediter	42	0,5%
Saab 2000	41	0,5%
Boeing B757/200 Passengers	36	0,4%
Fokker 100	34	0,4%
Fokker F50	32	0,4%
Beechcraft Twin Turboprop	26	0,3%
Learjet	25	0,3%
Dassault (B.M) Falcon 50/900	24	0,3%
Boeing B737/400 Passengers	22	0,3%
Airbus A320	20	0,2%
Boeing 737/800 Passengers	20	0,2%
Airbus A319	18	0,2%
Otros	233	2,7%
TOTAL	8.502	100%

Tabla 68. Flota usuaria del aeropuerto de pamplona en 2006. [11]

4.3. Climatología.

Si nos remontamos a la introducción teórica de este proyecto, somos conscientes de que los procedimientos basados en GNSS suponen una alternativa más económica y eficiente a los sistemas instrumentales como el ILS que permiten aproximaciones instrumentales de precisión.

No obstante, debemos ser conscientes de que este aeropuerto ya dispone de un ILS para la cabecera contraria, la correspondiente a la cabecera 15. De forma que el procedimiento objeto del estudio de este proyecto tiene el fin de dar cabida a la aproximación de las aeronaves cuando la pista 15 no pueda utilizarse.

Si analizamos los datos eólicos presentes en el plan director, identificamos un **14.48%** de tiempo con **viento en calma**, en el que sería equiparable la aproximación a cualquiera de las cabeceras. Por otro lado, como puede apreciarse en la Ilustración 70, los vientos predominantes son los que favorecen la aproximación a la cabecera 15.

Con el fin de establecer el porcentaje del tiempo que nuestra aproximación a la cabecera 33 será llevada a cabo, hacemos el sumatorio de los vientos que se presentan favorables para dicho fin. Se han considerado como favorables los vientos de frente a la cabecera 33, así como los que se sitúan en un intervalo de lateral de 30° , es decir, aquellos con rumbo entre 120° y 180° . Su porcentaje total de tiempo representa el **14.38 %**.

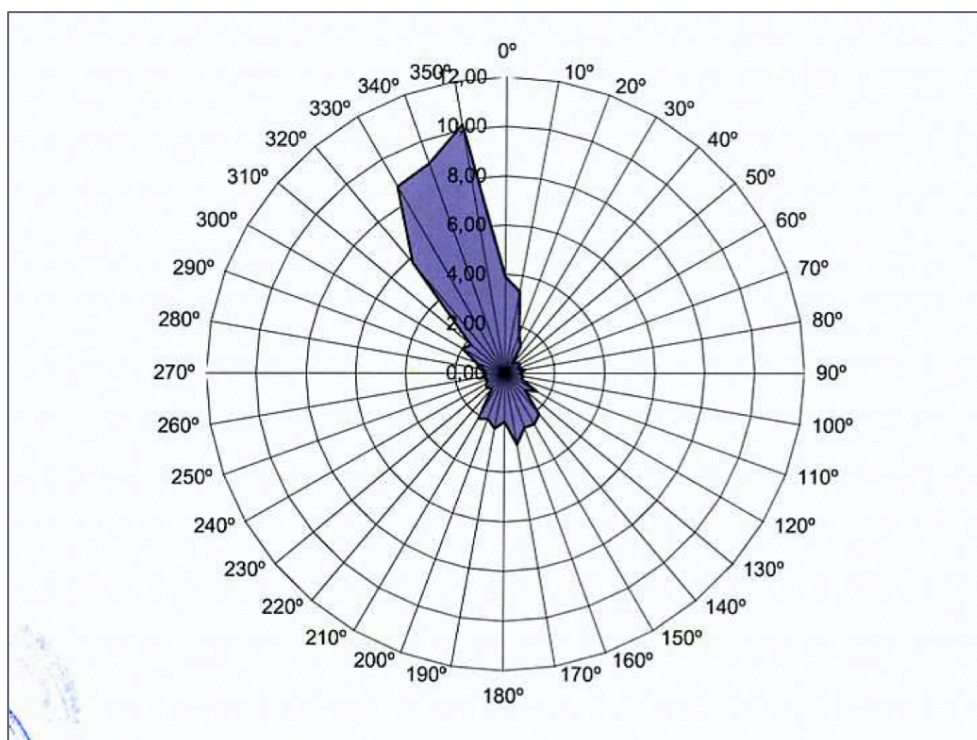


Ilustración 70. Rosa de los vientos totales en el aeropuerto de pamplona entre 1993 y 2006. [11]

4.4. Compatibilidad con procedimientos existentes.

Al tratarse de una mejora del procedimiento implantado actualmente, no se ha encontrado ningún procedimiento que interceda en la aproximación diseñada.

Por otro lado, se comentan a continuación los aeródromos más cercanos al Aeropuerto de Pamplona:

- Aeródromo Pyreneum – Centro Internacional de Vuelo: Caracterizado principalmente por ser una escuela de pilotos privados de ultraligeros.
- Aeródromo Militar de Ablitas: perteneciente al Ejército del Aire
- Aeródromo Santa Cilia: caracterizado por sus vuelos en planeador y sus actividades de salto en paracaídas.

Además, se procede al estudio de las zonas prohibidas (P), restringidas (R) o peligrosas (D) en el entorno del Aeropuerto.

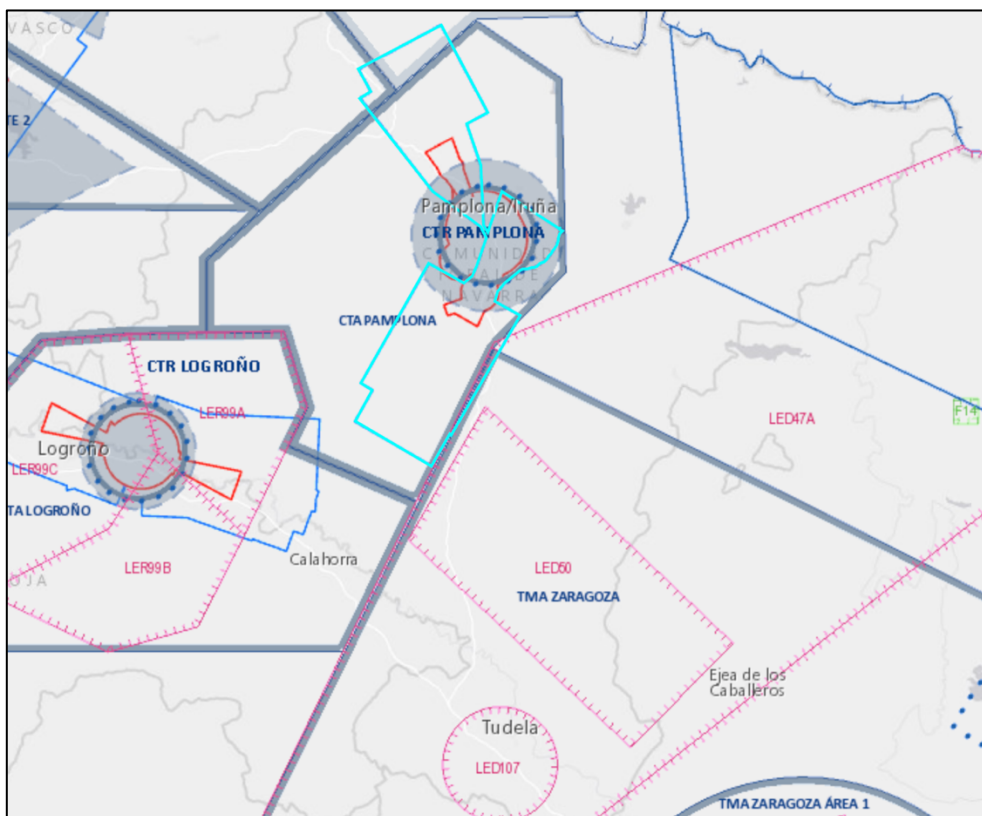


Ilustración 71. Zonas restringidas y peligrosas en las cercanías del aeropuerto. [12]

- En las cercanías del Aeropuerto no hay ninguna zona prohibida.
- Se identifica una zona peligrosa denominada LED50 al sur del aeropuerto, con límites verticales entre tierra y FL235.
- Otra zona peligrosa denominada LED47A localizada al este, con límites verticales entre FL370 y FL460.
- Por último, existe una zona restringida compuesta por tres sectores: LER99A, LER99B y LER99C, localizada al suroeste de nuestro aeropuerto, con límites verticales desde tierra hasta 5000ft., FL70 y 6000ft. respectivamente.

De esta forma, el diseño de las fases de aproximación final y de llegada deberían ser conformes con las zonas anteriormente comentadas. Sin embargo, no se aprecia un posible riesgo de incompatibilidad con nuestro procedimiento aproximación.

Parte V. Presupuesto.

5.1. Introducción

Este trabajo de fin de grado presenta una serie de costes asociados a su desarrollo entre los que diferenciamos los costes del personal, los costes informáticos, entre los que se incluyen el coste de los equipos y el coste del software empleado, así como los costes indirectos. Es importante comentar que el hecho de considerar este proyecto como un proyecto de investigación nos lleva a obviar en los cálculos de presupuestos el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA).

Centrándonos en los costes de personal, se establece un salario bruto anual tanto de los tutores como del ingeniero alumno. Para deducir el coste horario de cada uno de ellos nos basamos en una jornada laboral de 40 horas semanales. Además, debemos tener en cuenta las 4 semanas de vacaciones y las 2 semanas extra de festivos, que incluyen 12 días de festivos nacionales y 2 días de festivos locales. Considerando que un año tiene 52 semanas, el número de horas anuales trabajadas se calcula en base a la siguiente expresión:

$$\text{Horas anuales trabajadas} = (52 - (4 + 2)) * 40 = 1840 \text{ horas}$$

En cada uno de los apartados a continuación se expondrán los costes unitarios y los costes totales asociados a cada uno de ellos.

5.2. Coste de personal

Para el cálculo del coste del personal, primero debe calcularse el número de horas de trabajo que ha supuesto la realización de este proyecto.

Se establece, por parte del alumno, una media de 12 horas de trabajo semanales en los meses de Mayo y Junio y una media de 35 horas semanales entre Julio y Agosto. Suponiendo que un mes está compuesto de 4 semanas, obtenemos un total de 376 horas.

Cálculo de horas de trabajo	Horas Semanales	Meses	Horas Mensuales
Mayo - Junio	12	2	96
Julio - Agosto	35	2	280
		TOTAL	376

Tabla 69. Cálculo de horas de trabajo.

Por parte de los tutores de este proyecto, se les asocia una carga de trabajo total de 20 horas a cada uno.

Coste de personal	Salario bruto anual (€)	Coste horario (€/h)	Horas trabajadas	Coste (€)
Tutor	75000	40.76	20	815.22
Coutor	75000	40.76	20	815.22
Ingeniero Alumno	50000	27.17	376	10217.39
			TOTAL	11847.83

Tabla 70. Costes asociados al personal.

5.3. Coste informático

El coste informático es el que hace referencia a los equipos y el software necesario para el desarrollo del proyecto.

Su coste horario del software se establece en base a la relación entre el número de horas de trabajo anuales y su precio en este mismo periodo de tiempo.

Esto es debido a que la mayoría de programas, entre los que incluimos los utilizados en este proyecto, establecen precios para licencias anuales.

- El coste de la licencia de MATLAB para asciende hasta 800 € anuales.
- El paquete completo de Microsoft Office 365 entre los que se encuentras los programas Word, PowerPoint y Excel, empleados tiene un coste de 60 € anuales.

Una vez calculado su coste unitario podemos calcular el coste total del proyecto sabiendo las horas necesarias para que este fuera llevado a cabo, 376.

Coste informático					
Equipos	Coste (€)	Años de uso	Amortización (€ anuales)	Coste horario (€)	Coste proyecto (€)
Portátil MacBook Pro	1250	3	416.67	0.23	85.14
Software					
MATLAB R2020a	800	1	800	0.43	163.48
Google Earth Pro	0	1	0	0.00	0.00
Microsoft Office 365	60	1	60	0.03	12.26
				TOTAL	260.88

Tabla 71. Costes asociados al Equipo y el software utilizados.

5.4. Coste indirecto

Dentro de los costes indirectos se asocian parámetros externos a los comentados anteriormente. En este grupo se incluyen electricidad, conexión a internet estable, etc. Estos costes se han supuesto iguales al 5% de la suma del coste de personal y el coste informático, resultando:

Costes indirectos		
Coste personal + informático	Procentaje	Coste (€)
11959.33	0.05	597.97

Tabla 72. Costes indirectos.

5.5. Presupuesto total

El coste total se establece como la suma de todos los costes anteriores, alcanzando un valor de 12714.15 € (DOCE MIL SETECIENTOS CATORCE EUROS CON QUINCE CÉNTIMOS)

Descripción	Coste (€)
Personal Cualificado	11847.83
Coste informático	260.88
Coste indirecto	605.44
TOTAL	12714.15

Tabla 73. Presupuesto total.

Parte VI. Bibliografía.

Bibliografía

- [1] AENA, «Pamplona Airport,» 2019. [En línea]. Available: <https://wwwssl.aena.es/csee/ccurl/606/534/Pamplona-Airport-2019-web.pdf>.
- [2] AENA, «Aeropuerto de Pamplona,» 2018. [En línea]. Available: <http://aena.mobi/m/es/aeropuerto-pamplona/pamplona.html>.
- [3] GSA, «EUROPEAN GNSS,» 24 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas>.
- [4] GSA, «LPV PROCEDURES,» [En línea]. Available: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/lpv-procedures-map.
- [5] GSA, «EGNOS SYSTEM,» [En línea]. Available: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/egnos-system/about-egnos.
- [6] OACI, «Doc. 8168: Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos,» Sexta edición (2014).
- [7] L. Peña Pascual, TFG: Diseño de un procedimiento de aproximación GNSS SBAS para el aeropuerto de La Seu d'Urgell., 2019.
- [8] OACI, «Anexo 14: Aeródromos,» Quinta edición (2009).
- [9] AIP, «LEPP,» [En línea]. Available: https://ais.enaire.es/AIP/AIPS/AMDT_326_2020_AIRAC_03_2020/AIP/aip/ad/ad2/LEPP_PAMPLONA/LE_AD_2_LEPP_en.pdf.
- [10] OACI, Doc. 9157: Manual de diseño de Aeródromos - Pistas, parte 1, Tercera edición, 2006.
- [11] A. España, «Plan Director del Aeropuerto de Pamplona,» [En línea]. Available: <https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/politicas-aeroportuarias/integracion-territorial-aeroportuaria/planes-directores/plan-director-del-aeropuerto-de-pamplona?lang=es>.
- [12] ENAIRE, «Insignia,» [En línea]. Available: <https://insignia.enaire.es/>.
- [13] NovAtel, «Introduction to GNSS,» [En línea]. Available: <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/section-1/>.
- [14] «Navegación basada en la performance,» Manual del Inspector de Operaciones, 2018. [En línea]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/421033/CAP_17.pdf.
- [15] OACI, «Doc. 9163: Performance based-NAvigation Manual,» Tercera edición (2008).
- [16] GSA, «EGNOS HOW TO: Become compliant with European requirements for RNP APCH operations to LPV minima,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/EGNOS%20How%20to%20become%20compliant%20with%20EU%20requiriements%20for%20LPV.pdf.

- [17] I. G. Nacional, «Centro Nacional de Información Geográfica,» Ministerior de Transportes, Movilidas y Agenda Urbana, [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>.
- [18] AIP, «LECO,» [En línea]. Available: https://ais.enaire.es/AIP/AIPS/AMDT_331_2020_AIRAC_08_2020/AIP.html.
- [19] M. d. C. F. Gascón, TFM: Diseño y Validación de un Procedimiento de Aproximación empleando GNSS/SBAS para el Aeropuerto de Teruel, 2018.
- [20] EUROCONTROL, «Performance-Based Navigation,» [En línea]. Available: <https://www.eurocontrol.int/concept/performance-based-navigation>.
- [21] ENAV, «SBAS NPA, APV and Precision Approach CAT I,» [En línea]. Available: http://galileo.cs.telespazio.it/medusa/PANS%20OPS%208168%20Advanced%20Class%20Rabat%2016-27%20March%202015/Training%20material%20&%20exam/SBAS%20NPA,%20APV%20AND%20PA%20CAT%20I_1.1.pdf.
- [22] M. d. I. d. Operaciones, «VIGILANCIA DE OPERACIONES: RVSM, NAT/MNPS, RNAV/RNP, EDTO,» 2018. [En línea]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/421033/CAP_17.pdf.
- [23] EGNOS, «How to become compliant with European requirements for RNP APCH operations to LPV minima,» 2020. [En línea]. Available: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/EGNOS%20How%20to%20become%20compliant%20with%20EU%20requiriements%20for%20LPV.pdf.