

# Trabajo Fin de Máster Ingeniería Aeronáutica

## Diseño de procedimientos por instrumentos para el aeropuerto de Ciudad Real (LERL)

Autor: Gwendolyne Espínola Guzmán

Tutor: Alfonso Valenzuela Romero

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería Aeronáutica

# **Diseño de procedimientos por instrumentos para el aeropuerto de Ciudad Real (LERL)**

Autor:

Gwendolyne Espínola Guzmán

Tutor:

Alfonso Valenzuela Romero

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster: Diseño de procedimientos por instrumentos para el aeropuerto de Ciudad Real (LERL)

Autor: Gwendolyne Espínola Guzmán

Tutor: Alfonso Valenzuela Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis amigos*



# Agradecimientos

---

En esta sección, me gustaría hacer mención de aquellas personas que de una u otra forma han hecho posible la realización de este trabajo. Cabe destacar que este documento es el resultado final de una etapa marcada por el apoyo de todos aquellos que estuvieron presentes.

Por ello, en primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Alfonso Valenzuela, por la oportunidad y la confianza depositadas en mí. Su paciencia y dedicación han sido claves para la consecución de los objetivos marcados.

Además, me gustaría agradecer a Alberto Ortas por sus aportaciones y por la predisposición que siempre ha mostrado a la hora de resolver las dudas que se le planteaban.

Dentro del ámbito académico, también merecen una mención todos aquellos profesores que desde la primaria hasta hoy me han formado y me han dado las herramientas necesarias para la realización de este trabajo.

Por otra parte, me gustaría agradecer a mi familia, destacando a mi madre y a mi hermana, apoyos incondicionales durante toda mi trayectoria. Por celebrar mis triunfos y arroparme en los fracasos. Gracias.

Agradecimientos especiales a mis abuelos, Manuela y Antonio, por enseñarme que con esfuerzo y constancia todo es posible. Hoy y siempre seréis mis grandes ejemplos.

También, quería agradecerme a ti, José, por ser el espejo donde tantas veces intenté mirarme. Ejemplo de humanidad, lucha y coraje. Gracias.

Gracias a ti, Cristina, por ser el mejor modelo a seguir y por creer en mí. Sin saberlo, eres una de las grandes culpables de cada uno de mis logros.

Por último, agradecer a mis amigos, a los que estuvieron y a los que están. A mis compañeros de batalla, Sara y Juan Antonio, que han recorrido conmigo este camino de principio a fin. A Juan, Elena, Mari y Estrella, que me levantaron en los peores momentos y que ya son parte de mi familia. A Sara y a Mónica que tantos buenos momentos me han dado y que aportan el punto justo de locura en cada instante. Gracias a cada uno de vosotros por formar parte de esta aventura.

*Gwendolyne Espínola Guzmán*

*Sevilla, 2020*



# Resumen

---

En este trabajo fin de máster se pretende realizar el diseño de los procedimientos de llegada y salida por instrumentos al aeropuerto de Ciudad Real. En particular, se diseñan:

- un procedimiento de aproximación convencional de precisión con ILS para la pista 10,
- un procedimiento de aproximación RNP de no precisión para la pista 28, y
- dos salidas convencionales, una para la pista 10 y otra para la 28.

Para el diseño de estos procedimientos se sigue la normativa recogida en el documento técnico 8168 de OACI. El trazado de la trayectoria desde el comienzo del tramo de llegada hasta la aproximación intermedia se optimiza mediante la formulación de un problema de optimización mixta entera-lineal. Esto último se hace para conseguir la ruta más eficiente que sea compatible con la actividad aérea de los aeropuertos circundantes.

Por último, cabe destacar que, al margen de la compatibilidad de las operaciones aéreas, los procedimientos deben garantizar la seguridad de las operaciones. En ese sentido, las restricciones más relevantes que afectarán sobre todo a los tramos más cercanos a tierra en cada uno de los procedimientos diseñados vendrán asociadas al franqueamiento de obstáculos.



# Abstract

---

The objective of this Master Thesis is to design instrumental departure and arrival procedures at the Ciudad Real airport. In particular:

- a conventional precision approach procedure with ILS for runway 10,
- a non-precision RNP approach procedure for runway 28, and
- two conventional departures, one on runway 10 and another one for runway 28.

The design of these procedures follows the standards set out in ICAO Technical Document 8168. The path tracing from the start of the arrival section to the intermediate approach is optimized through the formulation of a mixed integer-linear optimization problem. This optimization seeks the most efficient route that is compatible with the air activity of surrounding airports.

Finally, it should be noted that, in addition to compatibility of air operations, the procedures must ensure the security of the operations. Therefore, the most relevant restrictions that primarily affect the closest sections to the ground in each of the designed procedures, will be associated with obstacle clearance.



# Índice

Agradecimientos .....	ix
Resumen .....	xi
Abstract .....	xiii
Índice .....	xv
Índice de Tablas .....	xix
Índice de Figuras .....	xxi
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivo .....	1
1.3. Metodología.....	2
1.4. Estructura.....	3
<b>2 Información relevante del aeropuerto de Ciudad Real .....</b>	<b>5</b>
2.1 Terreno circundante .....	5
2.1.1 Orografía .....	5
2.1.2 Poblaciones .....	8
2.2 Características del aeropuerto.....	10
2.3 Radioayudas.....	12
2.4 Espacio aéreo.....	15
2.4.1. Designaciones y clasificaciones del espacio aéreo .....	15
2.4.2. Restricciones del espacio aéreo.....	18
2.4.3. Aerovías.....	20
2.4.4. Sectorización .....	23
<b>3 Diseño de procedimientos de llegada .....</b>	<b>25</b>
3.1 Llegada RNP de no precisión por la pista 28.....	26
3.1.1 Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada.....	26
3.1.1.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	29
3.1.1.2 Proceso de diseño.....	30
3.1.2 Aproximación inicial y llegada.....	36
3.1.2.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	38
3.1.2.2 Construcción del área de protección de virajes .....	38
3.1.2.3 Procedimiento de comprobación del MOC.....	40
3.1.3 Fase final de la aproximación frustrada .....	42
3.1.3.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	45
3.1.3.2 Construcción del área de protección de virajes .....	45
3.1.3.3 Procedimiento de comprobación del MOC.....	47
3.1.4 Resumen del procedimiento .....	49
3.2 Llegada convencional de precisión por la pista 10.....	51
3.2.1 Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada.....	52
3.2.1.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	56
3.2.1.2 Proceso de diseño.....	56
3.2.2 Aproximación inicial y llegada.....	64
3.2.2.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	66
3.2.2.2 Construcción del área de protección de virajes: Tramo TLD - VTB.....	66
3.2.2.3 Construcción del área de protección de virajes: Tramo SP1 - TLD.....	67
3.2.2.4 Procedimiento de comprobación del MOC.....	68
3.2.3 Fase final de la aproximación frustrada .....	71

3.2.3.1	Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	72
3.2.3.2	Construcción del área de protección de virajes .....	72
3.2.3.3	Procedimiento de comprobación del MOC .....	74
3.2.4	Resumen del procedimiento .....	76
<b>4</b>	<b>Diseño de procedimientos de salida .....</b>	<b>79</b>
4.1	<i>Salida convencional por la pista 10</i> .....	80
4.1.1	Tramo sin viraje.....	80
4.1.1.1	Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	82
4.1.1.2	Definición de la pendiente de diseño de procedimientos.....	83
4.1.1.3	Determinación del punto de viraje.....	87
4.1.2	Tramo con viraje .....	88
4.1.2.1	Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	90
4.1.2.2	Construcción del área de protección de virajes .....	90
4.1.2.3	Procedimiento de comprobación del MOC .....	92
4.1.3	Resumen del procedimiento .....	94
4.2	<i>Salida convencional por la pista 28</i> .....	96
4.2.1	Tramo sin viraje.....	96
4.2.1.1	Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	98
4.2.1.2	Definición de la pendiente de diseño de procedimientos.....	98
4.2.1.3	Determinación del punto de viraje.....	102
4.2.2	Tramo con viraje .....	103
4.2.2.1	Hipótesis realizadas y decisiones de diseño .....	106
4.2.2.2	Determinación de la primera área de viraje .....	106
4.2.2.3	Determinación de la segunda área de viraje .....	108
4.2.2.4	Determinación de la tercera área de viraje .....	109
4.2.2.5	Procedimiento de comprobación del MOC .....	111
4.2.3	Resumen del procedimiento .....	113
<b>5</b>	<b>Optimización.....</b>	<b>115</b>
5.1	<i>Desarrollo teórico</i> .....	115
5.1.1	Generación de la malla.....	116
5.1.2	Variables de decisión .....	117
5.1.3	Restricciones .....	117
5.1.3.1	Grado en los nodos.....	118
5.1.3.2	Ángulo de viraje .....	119
5.1.3.3	Interacción con la SID .....	120
5.1.3.4	Flujos.....	120
5.1.3.5	Alineación con la pista.....	121
5.1.3.6	Espacio aéreo .....	121
5.1.3.7	Tree weight .....	121
5.1.4	Función objetivo .....	121
5.2	<i>Resultados y análisis</i> .....	122
<b>6</b>	<b>Conclusiones y estudios futuros.....</b>	<b>129</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>131</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>133</b>
ANEXO I:	<i>SID y STAR de aeropuertos circundantes</i> .....	133
7.1.1	Madrid .....	133
7.1.2	Sevilla.....	134
7.1.3	Albacete.....	136
ANEXO II:	<i>Comprobación del franqueamiento de obstáculos</i> .....	137
7.2.1	Llegada RNP de no precisión por la pista 28.....	137
7.2.1.1	Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada.....	137

7.2.1.2	Aproximación inicial y llegada.....	138
7.2.1.3	Fase final de la aproximación frustrada .....	141
7.2.2	Llegada convencional de precisión por la pista 10.....	144
7.2.2.1	Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada.....	144
7.2.2.2	Aproximación inicial y llegada.....	146
7.2.2.3	Fase final de aproximación frustrada.....	150
7.2.3	Salida convencional por la pista 10 .....	153
7.2.3.1	Definición de la PDG .....	153
7.2.3.2	Determinación del punto de viraje.....	155
7.2.3.3	Tramo con viraje .....	157
7.2.4	Salida convencional por la pista 28 .....	160
7.2.4.1	Definición de la PDG .....	160
7.2.4.2	Determinación del punto de viraje.....	161
7.2.4.3	Tramo con viraje .....	163
<i>ANEXO III: Construcción de las áreas de viraje .....</i>		<i>166</i>
7.3.1	Llegada RNP de no precisión por la pista 28.....	166
7.3.1.1	Aproximación inicial y llegada.....	166
7.3.1.2	Fase final de la aproximación frustrada .....	170
7.3.2	Llegada convencional de precisión por la pista 10.....	173
7.3.2.1	Aproximación inicial y llegada.....	173
7.3.2.2	Fase final de aproximación frustrada .....	178
7.3.3	Salida convencional por la pista 10 .....	182
7.3.4	Salida convencional por la pista 28 .....	186
7.3.4.1	Construcción de la primera área de viraje .....	186
7.3.4.2	Construcción de la segunda área de viraje .....	189
7.3.4.3	Construcción de la tercera área de viraje .....	192
<i>ANEXO IV: Perfiles de elevación del terreno .....</i>		<i>195</i>
7.4.1	Salida por la pista 10.....	195
7.4.2	Salida por la pista 28.....	197



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Núcleos urbanos más cercanos al aeropuerto de Ciudad Real	8
Tabla 2. Municipios más poblados de Ciudad Real	9
Tabla 3. Distancias declaradas	10
Tabla 4. Ubicación de los umbrales	11
Tabla 5. Ubicación del ARP	11
Tabla 6. Radioayudas. AIP	12
Tabla 7. Radioayudas que sirven de apoyo a las aerovías de la Tabla 11	15
Tabla 8. Espacio aéreo ATS. AIP	16
Tabla 9. UIR Madrid. AIP	18
Tabla 10. FIR Madrid. AIP	18
Tabla 11. Aerovías próximas al aeropuerto de Ciudad Real	20
Tabla 12. Aeropuertos españoles más activos. Aena	22
Tabla 13. Anchuras de las áreas de franqueamiento de obstáculos para RNP APCH [13]	27
Tabla 14. Ubicación de los puntos de referencia de la pista 28 (I)	34
Tabla 15. Anchuras de las áreas de franqueamiento de obstáculos para RNAV 1 [13]	37
Tabla 16. Puntos relevantes para la llegada por la pista 28	42
Tabla 17. Distancias mínimas de estabilización según el documento 8168 de OACI	43
Tabla 18. Comprobación de las distancias mínimas entre puntos de recorrido consecutivos	45
Tabla 19. Puntos relevantes para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 28	49
Tabla 20. Altitudes de los puntos más relevantes. Llegada por la pista 28	51
Tabla 21. Ubicación ILS	52
Tabla 22. Localización de los puntos característicos de las OAS	54
Tabla 23. Definición de las OAS	55
Tabla 24. Ubicación de los puntos de referencia para la llegada a la pista 10	62
Tabla 25. Puntos relevantes para la llegada por la pista 10	70
Tabla 26. Puntos relevantes para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 10	76
Tabla 27. Altitudes de los puntos más relevantes. Llegada por la pista 10	78
Tabla 28. PDG para la salida por la pista 10	87
Tabla 29. Punto a partir del que se permite virar. Pista 10	88
Tabla 30. Modificación de la PDG para la salida por la pista 10	89
Tabla 31. Puntos relevantes para la salida por la pista 10	94
Tabla 32. Altitudes de los puntos más relevantes. Salida por la pista 10	95
Tabla 33. PDG para la salida por la pista 28	101
Tabla 34. Punto a partir del que se permite virar. Pista 28	102

Tabla 35. Modificación de la PDG. Salida por la pista 28	104
Tabla 36. Puntos relevantes para la salida por la pista 28	113
Tabla 37. Altitudes de los puntos más relevantes. Salida por la pista 28	114

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Garantía de calidad	3
Figura 2. Límites del estudio orográfico. GoogleMaps	5
Figura 3. Fragmento del mapa orográfico. Tratamiento en MATLAB	6
Figura 4. Fragmento del mapa orográfico. Vista en planta	7
Figura 5. Solape entre fragmentos	7
Figura 6. Situación de los núcleos urbanos más cercanos al aeropuerto. GoogleMaps	8
Figura 7. Situación de los municipios más poblados. GoogleMaps	9
Figura 8. Características de las pistas. AIP	10
Figura 9. Zona de especial protección para aves. AIP	12
Figura 10. Antena de la senda de planeo en la pista 10. Google Earth	13
Figura 11. Localizador ILS en la pista 28. Google Earth	13
Figura 12. Instalación VOR/DME. Google Earth	14
Figura 13. Sistema de iluminación para la obtención de CAT I. Anexo 14	14
Figura 14. Espacio aéreo próximo al aeropuerto de Ciudad Real (I). Insignia	16
Figura 15. Espacio aéreo próximo al aeropuerto de Ciudad Real (II). Insignia	17
Figura 16. FIR/UIR de Madrid. Insignia	17
Figura 17. Restricciones del espacio aéreo próximo al aeropuerto de Ciudad Real	19
Figura 18. Espacio aéreo relativamente cercano al aeropuerto de Ciudad Real. Insignia	19
Figura 19. Localización de las aerovías próximas al aeropuerto de Ciudad Real	20
Figura 20. Límites de estudio para las SID/STAR. GoogleMaps	21
Figura 21. SID/STAR próximas al aeropuerto de Ciudad Real. Insignia	22
Figura 22. Sectorización. Insignia	23
Figura 23. Áreas de franqueamiento de obstáculos RNP APCH (I)	27
Figura 24. Área de franqueamiento de obstáculos RNP APCH (II)	27
Figura 25. Determinación del SOC con un MAPt definido por una distancia desde el FAF	29
Figura 26. Puntos de las áreas de franqueamiento de obstáculos (I)	32
Figura 27. Puntos de las áreas de franqueamiento de obstáculos (II)	32
Figura 28. Llegada RNP de no precisión por la pista 28	35
Figura 29. Vista cenital de la llegada por la pista 28	35
Figura 30. Perfil vertical de la llegada por la pista 28	36
Figura 31. Llegada por la pista 28. Trayectoria	37
Figura 32. Área de viraje para la llegada por la pista 28	40
Figura 33. Terreno analizado (I). Llegada por la pista 28	41
Figura 34. Terreno analizado (II). Llegada por la pista 28	41

Figura 35. Fase final de aproximación frustrada para la salida por la pista 28. Trayectoria	44
Figura 36. Distancia mínima entre dos puntos de recorrido de paso	44
Figura 37. Área de viraje para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 28	46
Figura 38. Terreno analizado (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28	47
Figura 39. Terreno analizado (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28	48
Figura 40. Tramos de aproximación inicial, intermedia, final y frustrada. Llegada por la pista 28	50
Figura 41. Tramo de llegada. Llegada por la pista 28	50
Figura 42. Superficies de evaluación de obstáculos (OAS)	53
Figura 43. Definición de los puntos clave en las OAS	53
Figura 44. Configuración del soporte PANS-OPS	54
Figura 45. Formulación de puntos característicos de las OAS	57
Figura 46. Coordenadas de un punto en metros	58
Figura 47. Cálculo del SOC	60
Figura 48. Llegada convencional de precisión por la pista 10	62
Figura 49. Vista cenital de la llegada por la pista 10	63
Figura 50. Perfil vertical de la llegada por la pista 10	63
Figura 51. Llegada por la pista 10. Trayectoria	65
Figura 52. Anchura del área de protección en llegadas convencionales	65
Figura 53. Áreas de viraje para la llegada por la pista 10	68
Figura 54. Terreno analizado (I). Llegada por la pista 10	69
Figura 55. Terreno analizado (II). Llegada por la pista 10	69
Figura 56. Fase final de aproximación frustrada para la salida por la pista 10. Trayectoria	72
Figura 57. Área de viraje para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 10	73
Figura 58. Terreno analizado (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10	74
Figura 59. Terreno analizado (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10	75
Figura 60. Tramos de aproximación inicial, intermedia, final y frustrada. Llegada por la pista 10	77
Figura 61. Tramo de llegada. Llegada por la pista 10	77
Figura 62. Definición de la PDG	79
Figura 63. Definición de la OIS. Pista 10	80
Figura 64. Perfil de elevación del terreno. Salida por la pista 10	81
Figura 65. Zona libre de obstáculos en el umbral 28	82
Figura 66. Definición de la OIS (I). Pista 10	84
Figura 67. Definición de la OIS (II). Pista 10	85
Figura 68. Cálculo de la elevación (II). Pista 10	86
Figura 69. Salida por la pista 10. Tramo sin viraje	88
Figura 70. Salida por la pista 10. Trayectoria	90
Figura 71. Área de viraje para la salida por la pista 10	91
Figura 72. Terreno analizado (I). Pista 10	92
Figura 73. Terreno analizado (II). Pista 10	93

Figura 74. Llegada por la pista 10. Global	95
Figura 75. Definición de la OIS. Pista 28	96
Figura 76. Perfil de elevación del terreno. Pista 28	97
Figura 77. Zona libre de obstáculos en el umbral 10	98
Figura 78. Definición de la OIS (I). Pista 28	100
Figura 79. Definición de la OIS (II). Pista 28	101
Figura 80. Salida por la pista 28. Tramo sin viraje	103
Figura 81. Primer diseño de la salida por la pista 28	105
Figura 82. Salida por la pista 28. Segundo diseño	105
Figura 83. Salida por la pista 28. Tercer diseño	106
Figura 84. Área de viraje para la salida por la pista 28	107
Figura 85. Área de viraje para la salida por la pista 28	109
Figura 86. Tolerancia del punto de referencia sobre un VOR	110
Figura 87. Área del tercer viraje para la salida por la pista 28	110
Figura 88. Terreno analizado. Salida por la pista 28	111
Figura 89. Llegada por la pista 28. Global	113
Figura 90. Ubicación de los puntos de entrada. Insignia	116
Figura 91. Restricción del ángulo de viraje [2]	119
Figura 92. Soluciones de la optimización de la llegada para la pista 28 para $L = 25$ Km y Gurobi	124
Figura 93. Soluciones óptimas de Pareto de la llegada para la pista 28 para $L = 25$ Km y Gurobi	125
Figura 94. Soluciones de la optimización de la llegada para la pista 10 para $L = 25$ Km y Gurobi	125
Figura 95. Soluciones óptimas de Pareto de la llegada para la pista 10 para $L = 25$ Km y Gurobi	126
Figura 96. Tercera solución de la llegada para la pista 28	127
Figura 97. Tercera solución de la llegada para la pista 10	128
Figura 98. STAR 4 RWY 32R/32L. Madrid-Barajas	133
Figura 99. STAR 3 RWY 32R/32L. Madrid-Barajas	134
Figura 100. STAR 1 RWY 09. Sevilla	135
Figura 101. STAR 3 RWY 27. Sevilla	135
Figura 102. Rutas de llegada/salida a LEAB	136
Figura 103. Ejemplo de comprobación del MOC	137
Figura 104. Comprobación del MOC (I). Llegada RNP por la pista 28	140
Figura 105. Comprobación del MOC (II). Llegada RNP por la pista 28	140
Figura 106. Comprobación del MOC (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28	143
Figura 107. Comprobación del MOC (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28	143
Figura 108. Área de franqueamiento de obstáculos en el tramo de aproximación intermedia	145
Figura 109. Comprobación del MOC (I). Llegada convencional por la pista 10	148
Figura 110. Comprobación del MOC (II). Llegada convencional por la pista 10	149
Figura 111. Comprobación del MOC (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10	151
Figura 112. Comprobación del MOC (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10	152

Figura 113. Comprobación de obstáculos en la OIS. Pista 10	154
Figura 114. Cálculo de la elevación (I). Pista 10	155
Figura 115. Determinación del punto a partir del cual se pueden realizar virajes. Pista 10	157
Figura 116. Comprobación del MOC (I). Salida por la pista 10	158
Figura 117. Comprobación del MOC (II). Salida por la pista 10	159
Figura 118. Comprobación de obstáculos en la OIS. Pista 28	161
Figura 119. Determinación del punto a partir del cual se pueden realizar virajes. Pista 28	163
Figura 120. Comprobación del MOC (I). Salida por la pista 28	164
Figura 121. Comprobación del MOC (II). Salida por la pista 28	165
Figura 122. Espiral de viento	168
Figura 123. Área de protección de virajes RNAV y RNP	169
Figura 124. Área de protección de virajes RNAV y RNP (II)	172
Figura 125. Área de protección de virajes para llegadas convencionales	173
Figura 126. Área de protección de virajes en aproximación frustrada	179
Figura 127. Borde exterior para virajes en aproximación frustrada. Pista 10	182
Figura 128. Área de protección de virajes	183
Figura 129. Construcción del borde interior. Primera área de viraje. Pista 28	187
Figura 130. Construcción del borde interior. Segunda área de viraje. Pista 28	190
Figura 131. Perfil de elevación del terreno (II). Salida por la pista 10	195
Figura 132. Perfil de elevación del terreno (III). Salida por la pista 10	195
Figura 133. Perfil de elevación del terreno (IV). Salida por la pista 10	196
Figura 134. Perfil de elevación del terreno (V). Salida por la pista 10	196
Figura 135. Perfil de elevación del terreno (II). Salida por la pista 28	197
Figura 136. Perfil de elevación del terreno (III). Salida por la pista 28	197
Figura 137. Perfil de elevación del terreno (IV). Salida por la pista 28	198



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Motivación

En la actualidad, el diseño de procedimientos de vuelo es una de las actividades más críticas en el ámbito de la aviación. Junto con el establecimiento de las servidumbres aeronáuticas, el diseño de procedimientos pretende alcanzar un nivel adecuado de seguridad en las operaciones aéreas. Bien es cierto que, mientras que las servidumbres se centran en limitar la aparición de obstáculos o señales radioeléctricas que pongan en peligro las operaciones, los procedimientos centran el enfoque del problema en las propias aeronaves, estableciendo el lugar y la altitud por los que pueden transitar manteniendo una separación adecuada con el terreno y los obstáculos.

Por otra parte, cabe destacar que el vuelo instrumental nace de la necesidad de realizar vuelos en condiciones de visibilidad reducida o nula, sin que eso suponga una reducción en los niveles de seguridad de la operación. Hoy día, la mayoría de los aeropuertos cuya densidad de tráfico es considerable poseen procedimientos normalizados por instrumentos. Gracias a estas rutas predefinidas se consigue una reducción en el número de comunicaciones existentes entre el controlador y la aeronave, optimizando los recursos de control del tráfico aéreo y espacio aéreo que son escasos.

Por tanto, el trabajo que se desarrolla en este documento se establece como una primera experiencia en el ámbito de diseño de procedimientos instrumentales, para la consecución de las ventajas mencionadas en el aeropuerto de Ciudad Real. En esta experiencia, se pretende adquirir un cierto nivel de comprensión de la normativa aeronáutica y los conceptos que en ella se especifican. Además, se obtendrán conocimientos relacionados con la optimización de rutas y capacidades para enfrentar las dificultades asociadas al terreno o la compatibilidad de las operaciones aéreas, entre otros, que sin duda son necesarios en la formación de un ingeniero aeronáutico. Estos conocimientos se imparten, de manera básica, en la asignatura de Tráfico Aéreo Avanzado. Sin embargo, este TFM va más allá de lo explicado en clase y es el primero que aborda un diseño en detalle.

Por último, merece la pena destacar que la selección del aeropuerto de Ciudad Real no se ha realizado de forma aleatoria. Al tratarse de un aeropuerto sin procedimientos aún publicados y con potencial como aeropuerto de servicios (por ejemplo, aparcamiento) se convierte en un candidato perfecto para la realización de este trabajo.

## 1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo fin de máster es diseñar procedimientos de llegada y salida por instrumentos en el aeropuerto de Ciudad Real. En concreto, se diseñan dos procedimientos de llegada y dos de salida. Estos procedimientos están asociados a las pistas 10 y 28 respectivamente.

El procedimiento de llegada asociado a la pista 10 será de precisión y queda enmarcado en el ámbito de la navegación convencional definida por la OACI. Sin embargo, a fin de tener un diseño más variado, para la pista 28 se considera un procedimiento de llegada asociado a la navegación de área y, más concretamente, a especificaciones RNP (Required Navigation Performance). Por su parte, las salidas serán convencionales en todos los casos.

En relación con los conceptos que se van a manejar, hay que tener en cuenta que la navegación de área es un método de navegación que permite la operación de aeronaves en cualquier trayectoria de vuelo, dentro de la cobertura de las ayudas para la navegación, o dentro de los límites de las posibilidades de las ayudas autónomas, o una combinación de ambas. De esa manera, este tipo de navegación otorga una mayor flexibilidad y eficiencia operacional a las aeronaves.

En este trabajo se pretende diseñar procedimientos en base a especificaciones RNP. Estas especificaciones son de la misma naturaleza que las especificaciones RNAV (navegación de área) pero, además, incluyen un requisito de vigilancia y alerta de las prestaciones a bordo. Por tanto, la tripulación puede detectar si el sistema no logra o garantiza las prestaciones requeridas con un nivel de integridad del  $10^{-5}$  por hora. De hecho, en vista de los beneficios que ofrecen los sistemas RNP, los cuales se relacionan con la integridad, la eficiencia y la seguridad de las operaciones, está previsto que se desarrolle una transición gradual hacia RNP de cara al futuro.

El documento 8168 de la OACI recoge los criterios que se emplean en el diseño de procedimientos para navegación convencional y para navegación de área. Por ello, este documento será la base fundamental para el desarrollo del trabajo fin de máster.

### 1.3. Metodología

A la hora de establecer los criterios para el diseño de procedimientos, es necesario prestar una especial atención al documento 8168 de OACI, tal y como se ha comentado anteriormente. Este documento se divide en dos volúmenes claramente diferenciados: Procedimientos de Vuelo [12] y Construcción de Procedimientos de Vuelo Visual y por Instrumentos [13]. El primero de ellos, pretende servir como guía para el personal de operaciones y las tripulaciones de vuelo, describiendo los procedimientos operacionales que deben seguir los mismos. Por su parte, el segundo volumen ofrece diferentes opciones de diseño y persigue el objetivo de ser la guía fundamental para los especialistas en diseño de procedimientos.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el responsable de asegurar que las aeronaves puedan realizar en su espacio aéreo, en condiciones seguras, los procedimientos publicados, es el Estado. Además, la seguridad operacional se logra por medio de la aplicación de los criterios recogidos en el documento mencionado y a través de medidas que controlan la calidad del proceso empleado para aplicar esos criterios.

En ese sentido, el documento 8168 establece que el desarrollo de los procedimientos de vuelo por instrumentos consta de tres fases fundamentales: la adquisición de datos, el diseño y la promulgación, véase la Figura 1.

La primera fase consiste en recoger información sobre una gran variedad de aspectos que se asocian al aeropuerto y a las operaciones en el mismo. Entre esos aspectos están la orografía, poblaciones circundantes, restricciones del espacio aéreo, características del aeropuerto, etc. Es decir, se trata de definir todos aquellos aspectos que de una forma u otra influyen en el diseño de los procedimientos que se están planteando.

La segunda fase recoge el proceso de diseño propiamente dicho. Los procedimientos se diseñan en base a los criterios aprobados por el Estado pertinente. En esta fase, también se genera la documentación necesaria para la publicación del procedimiento en la AIP (Publicación de información aeronáutica) y para la validación del mismo. Además, se incluye la propia validación del procedimiento. Con esta validación se pretende verificar los datos sobre obstáculos y navegación que se recogieron en la primera fase, y se evalúa la posibilidad de aplicar el procedimiento en la práctica.

Por último, la tercera fase consiste en promulgar el procedimiento. Es decir, se trata de publicarlo en la AIP y hacerlo llegar a los proveedores de bases de datos, para que de esa forma puedan ser empleado por los usuarios pertinentes.

La metodología de garantía de calidad descrita define la metodología que se va a emplear en este trabajo y tiene como consecuencia directa el empleo de la estructura que se describe en el apartado siguiente.

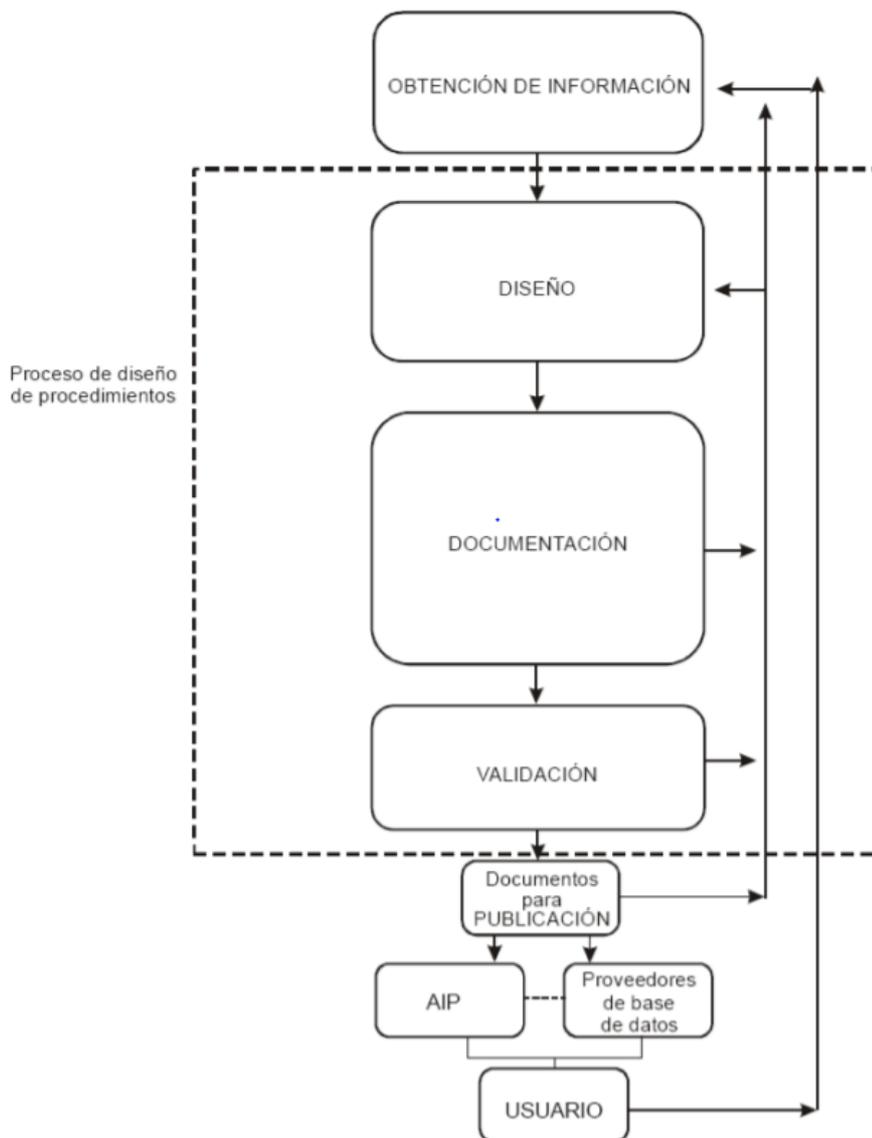


Figura 1. Garantía de calidad

## 1.4. Estructura

La estructura del documento sigue la metodología especificada de garantía de calidad. De esa manera, el trabajo partirá de una introducción, que como se ha visto se ha presentado en este primer apartado. A continuación, se necesitará desarrollar un estudio en profundidad del aeropuerto y de las operaciones que tienen lugar en él, en el cual se recopilarán todos los datos necesarios para el diseño (Apartado 2). En ese sentido, se recogerán datos sobre el terreno (Apartado 2.1), las características generales del aeropuerto (Apartado 2.2), las radioayudas existentes (Apartado 2.3) y el espacio aéreo (Apartado 2.4).

Posteriormente, se procederá al diseño de los procedimientos mencionados, en base a los criterios que se establecen en el documento 8168 de la OACI. Los procedimientos se dividen en llegadas (Apartado 3) y salidas (Apartado 4). Estos apartados serán el núcleo fundamental del trabajo.

El apartado de las llegadas estará compuesto de una llegada RNP de no precisión por la pista 28 (3.1) y una llegada convencional de precisión con ILS por la pista 10 (3.2). En cada uno de estos casos, la estructura será idéntica. De esa manera, se establecerá un subapartado que recoja los tramos de aproximación final, intermedia y las fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada (3.1.1 y 3.2.1). En el siguiente subapartado, se describirán los tramos restantes de aproximación, es decir, inicial y llegada (3.1.2 y 3.2.2). Por otro lado, se incluirá un subapartado más donde se recogerá la fase final de aproximación frustrada (3.1.3 y 3.2.3). Finalmente, se desarrolla un subapartado en el que se resume de manera global el procedimiento diseñado (3.1.4 y 3.2.4).

En cuanto a las salidas, también existirán dos apartados principales que vendrán asociados a salidas convencionales por las pistas 10 (4.1) y 28 (4.2). En ambos casos, la estructura es similar. Es decir, se tendrán dos subapartados: uno tratará la parte baja de la salida en la que no están permitidos los virajes (4.1.1 y 4.2.1) y el otro irá asociado al tramo en el que los virajes están permitidos (4.1.2 y 4.2.2).

Además, se realizará un proceso de optimización para las llegadas (Apartado 5), en el que se utilizará un método numérico para encontrar las trayectorias que presenten una menor distancia recorrida. Este apartado estará dividido en dos partes claramente diferenciadas: el desarrollo teórico del método de optimización (5.1) y el análisis de los resultados (5.2). La primera parte tratará aspectos tales como la generación de la malla (5.1.1), las variables de decisión (5.1.2), las restricciones (5.1.3) y la función objetivo (5.1.4), mientras que la segunda estará centrada en la implementación del método, los resultados obtenidos y los problemas enfrentados en el proceso.

Por último, el apartado 6 recoge aquellas conclusiones más relevantes obtenidas a lo largo del trabajo y muestra posibles estudios futuros.

## 2 INFORMACIÓN RELEVANTE DEL AEROPUERTO DE CIUDAD REAL

En este apartado, se presente recoger toda la información relevante para el diseño de procedimientos por instrumentos en el aeropuerto de Ciudad Real. Dicha información, que es de carácter diverso, comprende aspectos tales como los datos del aeropuerto, las ayudas para la navegación existentes en el mismo, los obstáculos que puedan suponer un peligro para las operaciones, los requisitos del espacio aéreo o las consideraciones ambientales entre otros.

### 2.1 Terreno circundante

#### 2.1.1 Orografía

A continuación, se analiza la orografía. Para ello, se limita el territorio de análisis a 50 NM desde el aeropuerto. Es decir, se establece una circunferencia de 50 NM de radio alrededor del aeropuerto y se analiza el terreno que quede dentro de esta, ver Figura 2. Este valor de 50 NM se ha establecido en base a las pendientes de ascenso y descenso que se manejan. Con una pendiente del 2,5% y a una distancia de 50 NM desde el aeropuerto, se tendría una altura de 2300 m sobre el propio aeropuerto. Esto es suficiente para que los posibles obstáculos del terreno no supongan un problema.

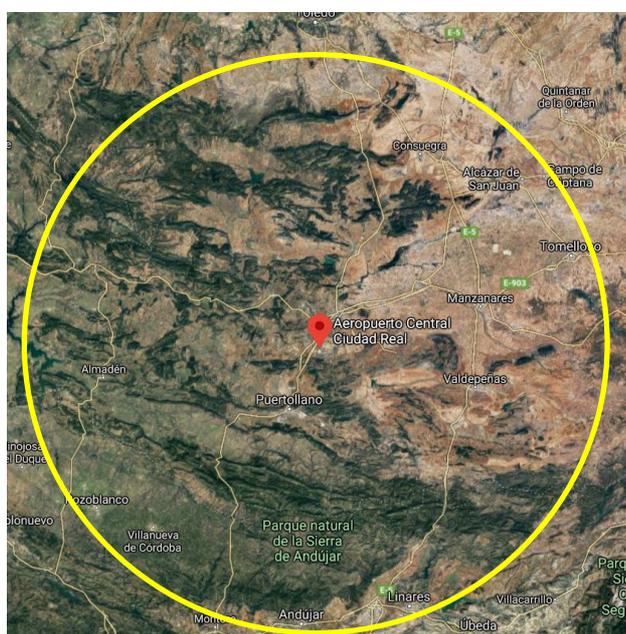


Figura 2. Límites del estudio orográfico. GoogleMaps

Para el análisis descrito, se utilizan los mapas de elevaciones que se pueden encontrar en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica [3]. Cabe destacar que se han utilizado los mapas MDT05, es decir, el paso que se utiliza para mallar cada fragmento del mapa es de 5 m. Existen, por tanto, una serie de nodos separados a 5 m entre sí y se conocen las altitudes asociadas a dichos nodos.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que cada fragmento de mapa, que se recoge en archivos del tipo *.asc*, detallan la superficie contenida en un rectángulo que viene determinado por cuatro vértices. Estos vértices están definidos en el sistema de referencia ETRS89, que es equivalente (por milímetros) al WGS84, y en formato UTM. De esa manera, ha sido necesario transformar las coordenadas de los cuatro vértices al formato de longitud y latitud típicamente utilizado. Para esta tarea, se ha empleado una aplicación online del Instituto Nacional Geográfico [9] que permite la transformación directa de puntos de un formato a otro.

En cuanto al resto de puntos del fragmento, se ha modificado su formato a partir de las relaciones de proporcionalidad que se establecen entre los puntos y que vienen recogidas en el documento *cartografia-geograficas-utm-datum* [6] de la Universidad de Valladolid.

En este punto del proceso de descripción de la orografía, se ha de tener en cuenta que, para cubrir el rango de 50 NM descrito anteriormente, ha sido necesario manejar un conjunto de 70 archivos, es decir, 70 fragmentos de mapas. De esa forma y a modo de ejemplo, en la Figura 3 y en la Figura 4 se puede observar el resultado del tratamiento en MATLAB de uno de esos fragmentos.

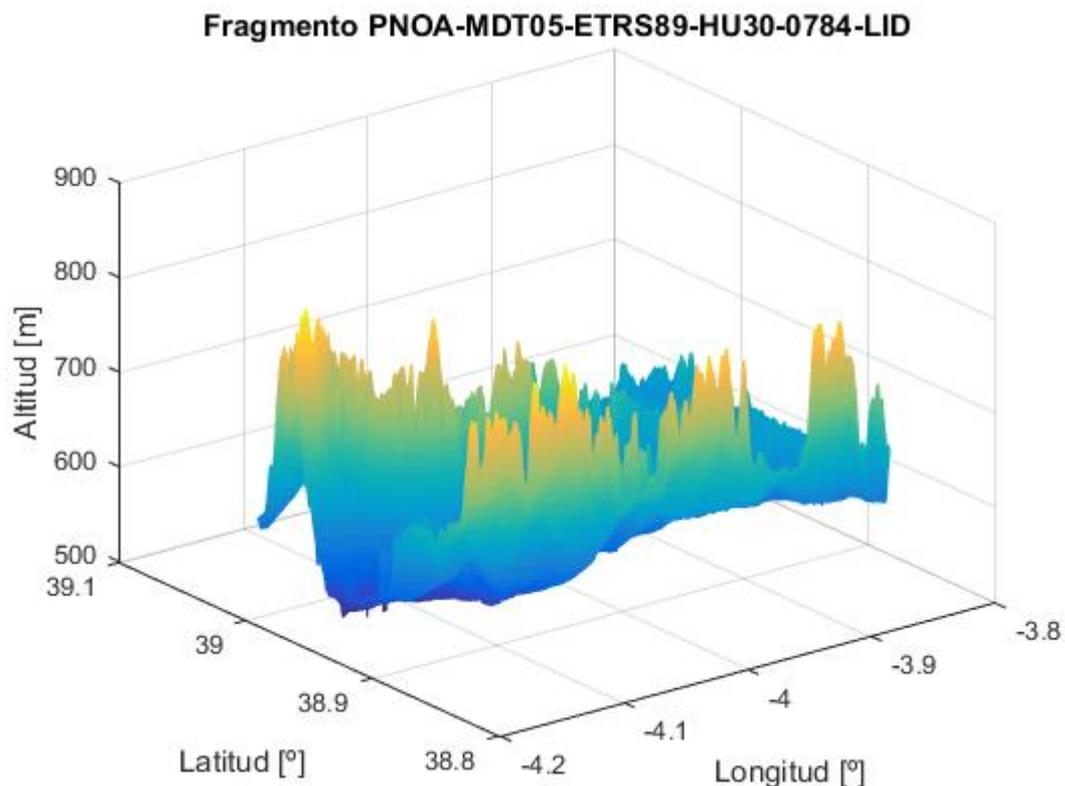


Figura 3. Fragmento del mapa orográfico. Tratamiento en MATLAB

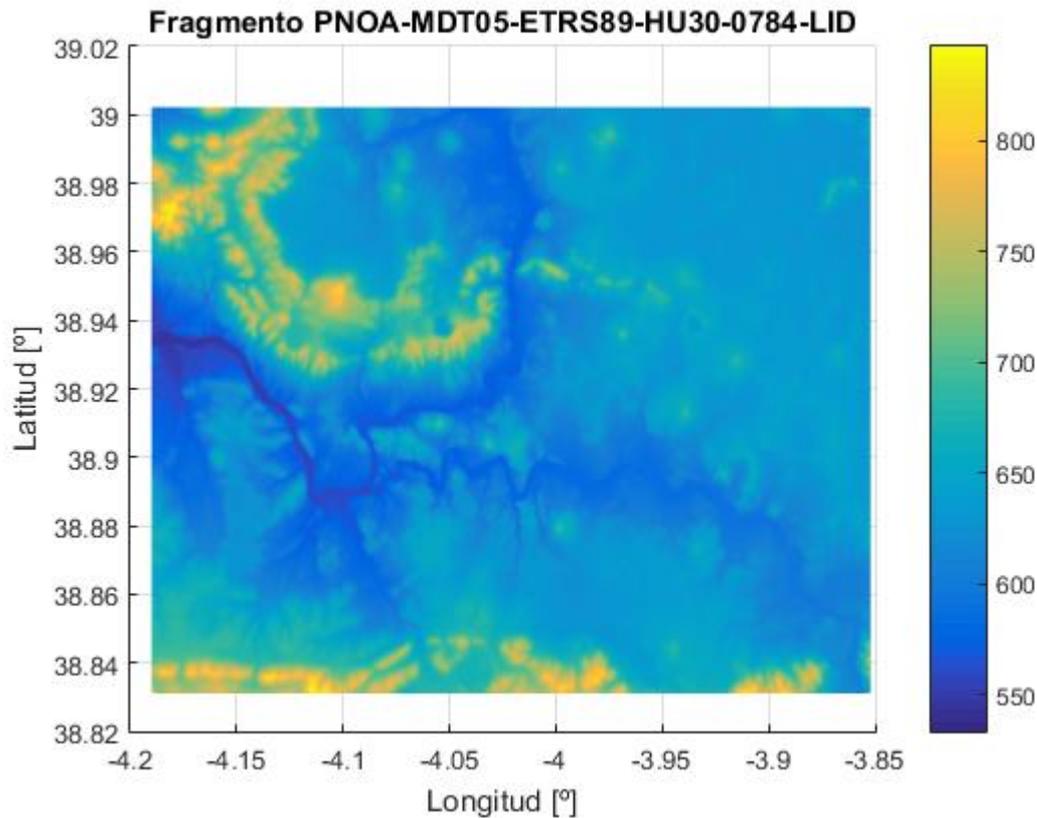


Figura 4. Fragmento del mapa orográfico. Vista en planta

Por último, fue necesario tratar los solapes entre fragmentos. Es decir, en los diferentes fragmentos del mapa existían ciertas regiones que aparecían definidas en dos fragmentos contiguos. Por ello, fue necesario eliminar estas regiones de uno de los dos fragmentos en los que estaban definidas. De esa forma, se optó por eliminar las regiones comunes en los fragmentos de la derecha y de abajo. En la Figura 5, se detalla el proceso comentado. Los fragmentos 1 y 2 tienen una región común. Este solape se soluciona eliminando, dicha región del fragmento 2. De la misma manera, los fragmentos 1 y 3, también poseen una región común. En este caso, se elimina la región del fragmento 3. El resultado se muestra a la derecha de la figura.

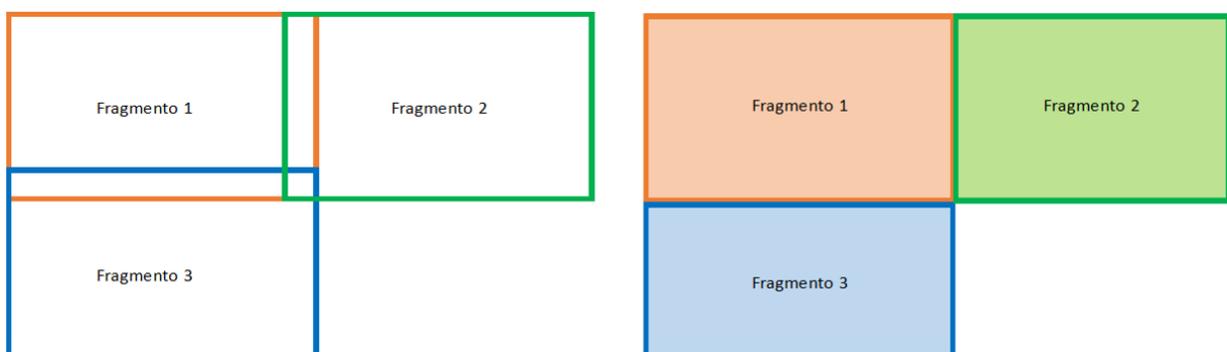


Figura 5. Solape entre fragmentos

### 2.1.2 Poblaciones

Según el Plan Director [11], el aeropuerto de Ciudad Real está situado en el centro de la provincia de Ciudad Real, en terrenos que pertenecen a los municipios de Ciudad Real, Villar del Pozo y Ballesteros de Calatrava.

A la hora de elegir un emplazamiento para el aeropuerto se seleccionó una zona que no contaba con una concentración de industrias en su entorno, ni tampoco de grandes núcleos urbanos. De hecho, los núcleos urbanos más cercanos son los de Villar del Pozo, Ballesteros de Calatrava y Cañada de Calatrava, cuya situación geográfica se muestra en la Figura 6. En la Tabla 1, se recogen los datos de población de los municipios anteriores. Como se puede observar, el número de habitantes es escaso en todos los municipios. Esto resulta lógico si se atiende a los datos demográficos de la propia provincia de Ciudad Real.

Municipio	Número de habitantes	Año del que data el dato	Fuente
Villar del Pozo	75	2019	INE
Ballesteros de Calatrava	373		
Cañada de Calatrava	102		

Tabla 1. Núcleos urbanos más cercanos al aeropuerto de Ciudad Real

A pesar de ser la tercera provincia española en cuanto a superficie, sus 19,813 km<sup>2</sup> están ocupados por una población de 495761 habitantes (dato que se obtiene de INE [10]). Además, dentro de la provincia, solo existen cinco municipios que superan los 25000 habitantes. Esos municipios son: Ciudad Real, Puertollano, Tomelloso, Alcázar de San Juan y Valdepeñas. En la Tabla 2, se recogen los datos de población de estos municipios y en la Figura 7, se muestra su situación geográfica respecto al aeropuerto.

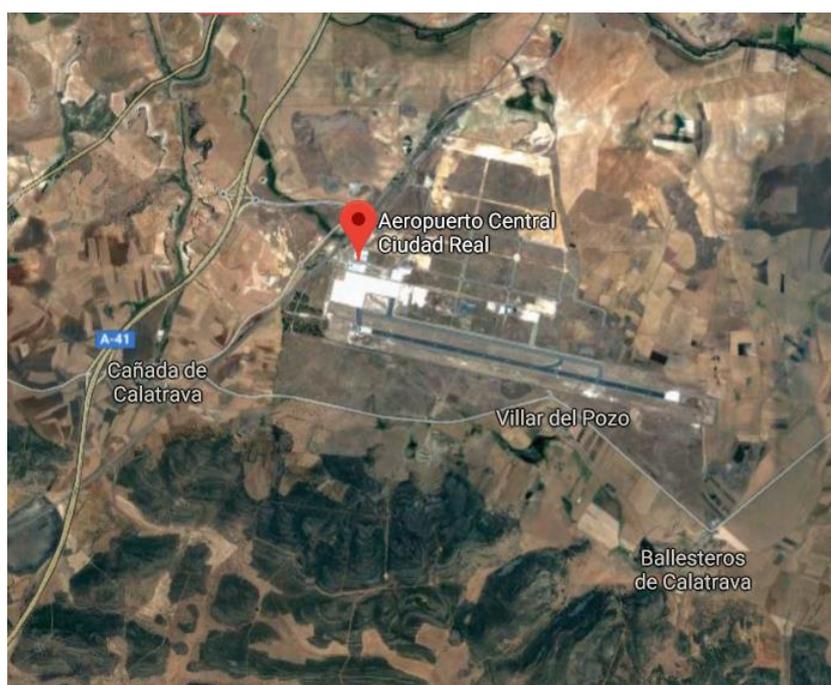


Figura 6. Situación de los núcleos urbanos más cercanos al aeropuerto. GoogleMaps

Municipio	Número de habitantes	Año del que data el dato	Fuente
Ciudad Real	75023	2019	Ayuntamiento de Ciudad Real
Puertollano	47035		INE
Tomelloso	35873		
Alcázar de San Juan	30576		
Valdepeñas	30077		

Tabla 2. Municipios más poblados de Ciudad Real

Para compatibilizar las operaciones del aeropuerto con el entorno del mismo y sus poblaciones, en la AIP (Publicación de Información Aeronáutica) se describen procedimientos de atenuación de ruido. En ellos, se establece que las pruebas de motores deben realizarse con la autorización del CEOPS (Centro de Operaciones del aeropuerto).

Sin embargo, al no existir otras restricciones asociadas diferentes a las de las pruebas de motores, no es necesario establecer un mayor nivel de detalle en la descripción de las poblaciones. Por ello, con los datos que se han especificado en este apartado es suficiente.

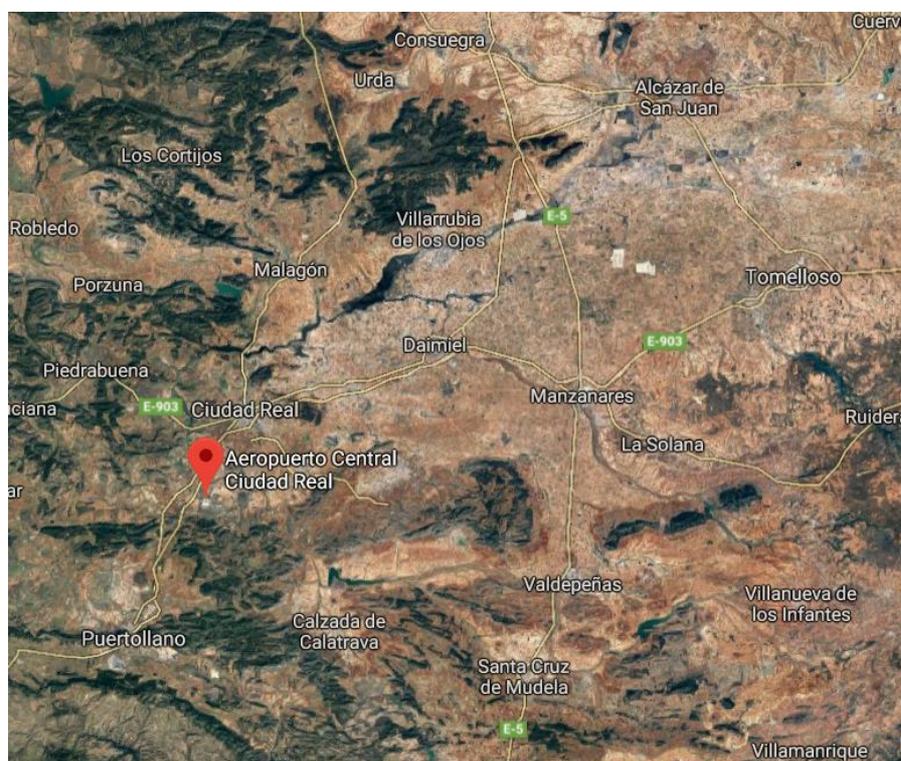


Figura 7. Situación de los municipios más poblados. GoogleMaps

## 2.2 Características del aeropuerto

El aeropuerto de Ciudad Real (LERL), en su día bautizado como ‘Don Quijote’, comenzó a operar el 12 de septiembre de 2019 después de un largo periodo de inactividad al que se llegó a causa de una mala gestión en el mismo. Este aeropuerto consta de dos pistas (10 y 28), cuyas características más relevantes se resumen en la Figura 8. Además, presenta una temperatura de referencia de 34 °C y una elevación de 646 m.

El aeropuerto está situado a 15 km de la ciudad en dirección Sur, de forma que el punto de referencia del aeródromo está en (385123N, 0035812W), y consta únicamente de tránsito VFR (Reglas de vuelo visual). El horario de operación se ve modificado entre las temporadas de verano e invierno. En verano, el horario es de 8:00 a 16:00 de lunes a viernes y los sábados y domingos se opera a demanda. Por su parte, en invierno, se opera de 9:00 a 17:00 de lunes a viernes y a demanda, igualmente, los sábados y domingos. Estos horarios se pueden ampliar en una cantidad de 1,5 horas bajo petición.

RWY	Orientación Direction	DIM (m)	THR PSN	THR ELEV TDZ ELEV	SWY (m)	CWY (m)	Franja (m) Strip (m)	OFZ	RESA (m)	RWY/SWY SFC PCN
10 (1)	102.58°GEO 104°MAG	4000 x 60	385137.56N 0035933.18W	THR: 626.1 m/2054 ft TDZ: 627.1 m/2057 ft	60 x 60	60 x 150	4240 x 150	No	240 x 150	RWY: ASPH PCN 123/F/AW/T SWY: No
28 (2)	282.60°GEO 284°MAG	4000 x 60	385116.36N 0035731.76W	THR: 639 m/2095 ft TDZ: 634.8 m/2083 ft	60 x 60	60 x 150	4240 x 150	No	240 x 150	RWY: ASPH PCN 123/F/AW/T SWY: No

#### Observaciones:

- (1) Coordenadas extremo RWY 10: 385109.29N 0035651.29W.  
(2) THR RWY 28 desplazado 1000 m.

#### Remarks:

- (1) End RWY 10 coordinates: 385109.29N 0035651.29W.  
(2) THR RWY 28 displaced 1000 m.

#### Perfil:

#### Profile:

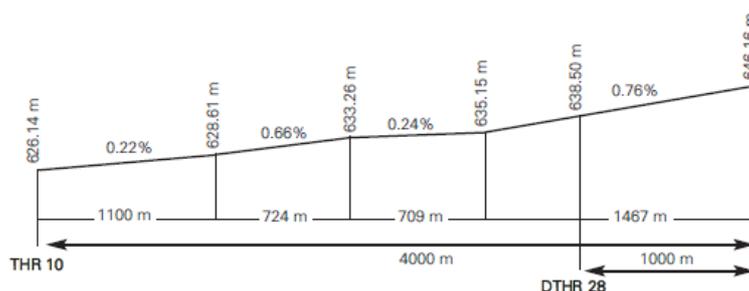


Figura 8. Características de las pistas. AIP

Las calles de rodaje que se observan en el aeropuerto de Ciudad Real tienen una anchura de 25 m. Se trata de calles hechas de asfalto (en su mayoría) y hormigón. Las distancias declaradas de estas pistas se encuentran recogidas en la Tabla 3. La RWY 28 INT E-3 hace referencia a la intersección de la pista 28 con la calle E3.

RWY	TORA (m)	TODA (m)	ASDA (m)	LDA (m)
<b>10</b>	4000	4060	4060	4000
<b>28</b>	4000	4060	4060	3000
<b>28 INT E-3</b>	3000	3060	3060	NU

Tabla 3. Distancias declaradas

Por otra parte, la Tabla 4 y la Tabla 5 recogen las ubicaciones de los umbrales y del ARP (punto de referencia del aeródromo), que serán esenciales para el desarrollo de los procedimientos.

<b>Umbral</b>	<b>Localización</b>	
<b>Pista 10</b>	Latitud	38° 51' 37,56" N
	Longitud	3° 59' 33,18" W
	Elevación	626,0 m
<b>Pista 28</b>	Latitud	38° 51' 16,36" N
	Longitud	3° 57' 31,76" W
	Elevación	638,5 m

Tabla 4. Ubicación de los umbrales

<b>Localización del ARP</b>	
<b>Latitud</b>	38° 51' 23" N
<b>Longitud</b>	3° 58' 12" W
<b>Elevación</b>	646 m

Tabla 5. Ubicación del ARP

En cuanto a la iluminación asociada de aproximación cabe destacar, que el aeropuerto presenta sistemas de iluminación PAPI (Indicador de trayectoria de aproximación de precisión) para ambas pistas. También se pueden encontrar luces de umbral, de eje de pista, de borde de pista y de extremo de pista. Sin embargo, lo más llamativo es que posee para las dos pistas un sistema de aproximación de precisión CAT I.

En relación con los aspectos operacionales más relevantes, se destacan que no está permitida la operación de aeronaves de características superiores a letra de clave E, la calle de salida rápida es apta para aeronaves de letra de clave D máximo y la RWY 10 será la preferente siempre que la componente de viento en cola no exceda de 10 kt en pista seca, o pista mojada con acción de frenado buena.

Por último, a la hora de diseñar los procedimientos se ha de tener presente que existe una zona de especial protección para aves en las proximidades del aeropuerto, tal y como se muestra en la Figura 9, aunque ésta no cruza la prolongación del eje de pista.

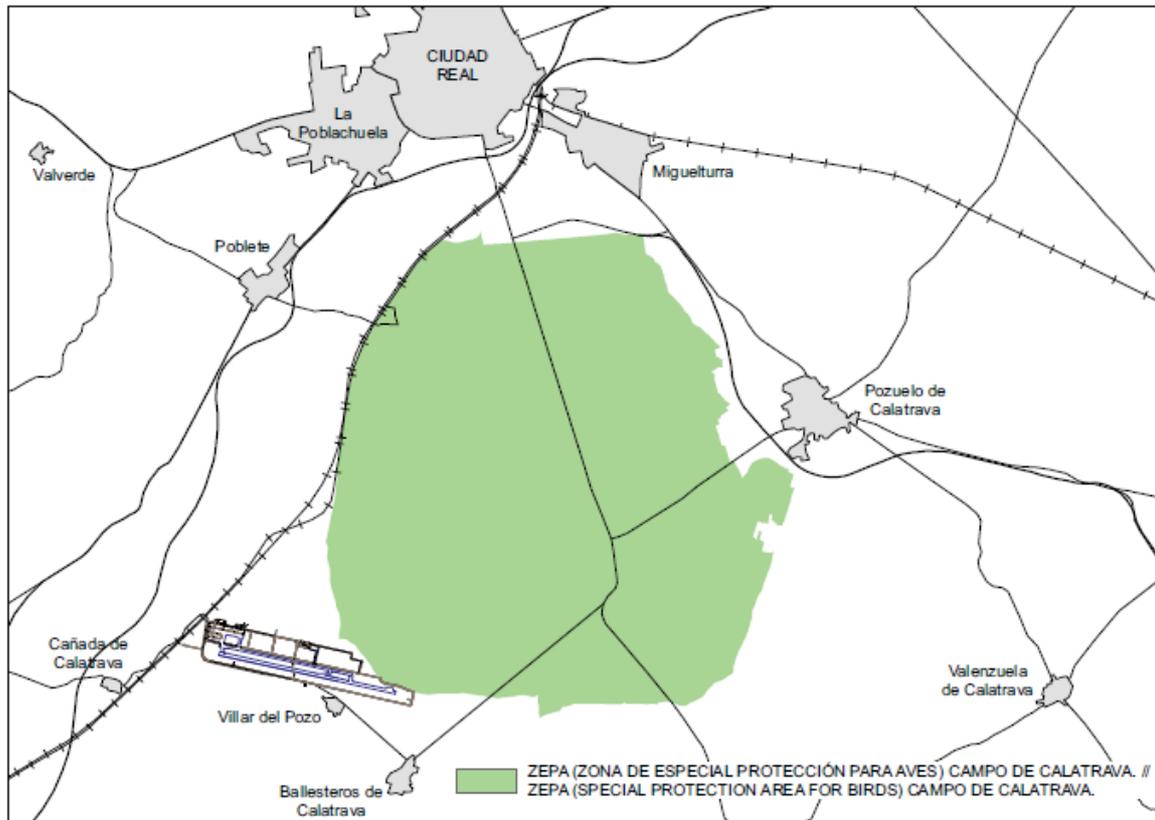


Figura 9. Zona de especial protección para aves. AIP

### 2.3 Radioayudas

Actualmente, el aeropuerto de Ciudad Real no consta de ningún tipo de radioayuda para la navegación o el aterrizaje. Sin embargo, esto no ha sido siempre así. En la primera apertura del aeropuerto, este constaba de radioayudas para la navegación. En julio de 2012 se deshabilitan las radioayudas. Tras la reapertura, y al no existir en el aeropuerto procedimientos instrumentales, no es necesario que las radioayudas existentes en el origen sigan en servicio, tal y como se indica en la AIP, ver Tabla 6.

19. RADIOAYUDAS PARA LA NAVEGACIÓN Y EL ATERRIZAJE				RADIO NAVIGATION & LANDING FACILITIES		
Instalación (VAR) Facility (VAR)	ID	FREQ	HR	Coordenadas Coordinates	ELEV DME	Observaciones Remarks
No.						

Tabla 6. Radioayudas. AIP

Sin embargo, las instalaciones de las radioayudas originales siguen presentes en el aeropuerto. Esto puede contrastarse con las imágenes satelitales de Google Earth y la plataforma de Insignia, ver Figura 10, Figura 11 y Figura 12. Como puede verse en las figuras siguientes, para la pista 10 se dispone de luces PAPI (ubicadas en las proximidades de la zona de toma de contacto), una antena de senda de planeo (en estas mismas proximidades), y un localizador (situado después del umbral de la pista 28). Además, existe una instalación que bien podría ser un VOR-DME cerca del centro de la pista.

En Insignia, todas estas instalaciones aparecen clasificadas como obstáculos del tipo ‘Navaid’, lo que confirma que las visuales de Google Earth y las suposiciones hechas a partir de las mismas son realistas.

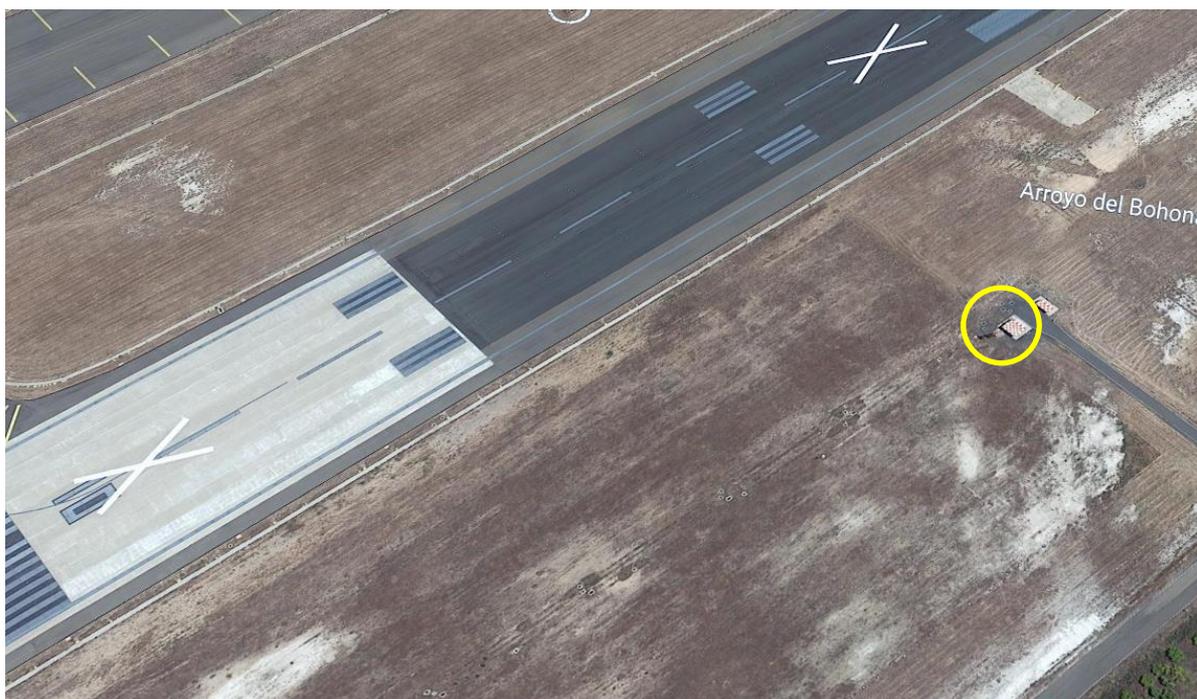


Figura 10. Antena de la senda de planeo en la pista 10. Google Earth



Figura 11. Localizador ILS en la pista 28. Google Earth



Figura 12. Instalación VOR/DME. Google Earth

Por otra parte, y al margen de la no disponibilidad de radioayudas en el aeropuerto, en la AIP se detalla que las pistas poseen procedimientos de aproximación de precisión de CAT I (900 m). Esto se consigue por medio de un sistema de iluminación para la aproximación de precisión (PALS), lo que puede corroborarse con la vista satelital de Google Earth. Según el Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional [14], este sistema debe consistir en una fila de luces situadas en la prolongación del eje de la pista, extendiéndose hasta 900 m a partir del umbral y una fila de luces que formen una barra transversal de 30 m de longitud, a una distancia de 300 m del umbral de la pista. La Figura 13 muestra la colocación de las luces descritas de manera detallada.

Las luces que forman la barra transversal siguen una línea recta horizontal, perpendicular a la fila de luces de la línea central. Por su parte, las luces que forman la línea central se situarán a intervalos longitudinales de 30 m, tal y como se muestra en la Figura 13. El resto de los detalles se especifican en el Anexo 14 anteriormente mencionado.

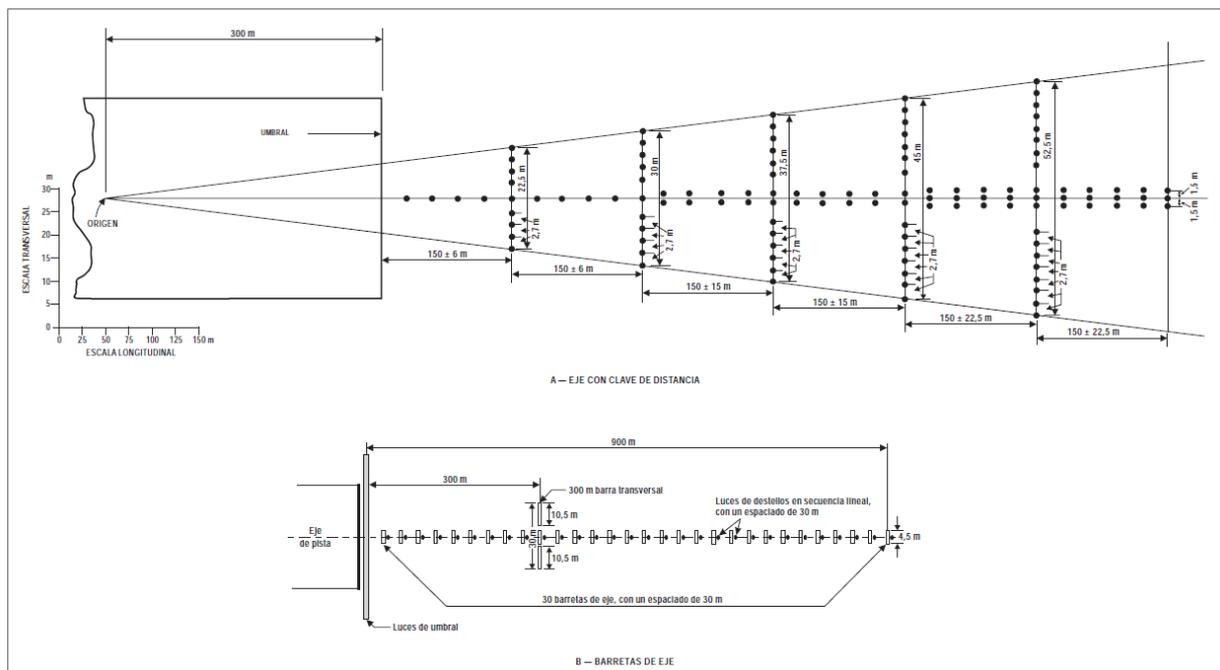


Figura 13. Sistema de iluminación para la obtención de CAT I. Anexo 14

Además, cabe destacar que, a la hora de diseñar un procedimiento de llegada o salida, no sólo se tienen en cuenta las radioayudas del aeropuerto. También, hay que analizar las radioayudas circundantes que puedan apoyar a los procedimientos que se están diseñando. De esa forma, las principales radioayudas que sirven como apoyo a las aerovías circundantes y que podrían guiar de alguna manera a los procedimientos que se pretenden diseñar en el presente documento, se encuentran recogidas en la Tabla 7.

Radioayuda	Denominación	Coordenadas	
		Longitud	Latitud
VOR/DME-NDB	Toledo	4°20' 14" W	39° 58' 10" N
VOR/DME-NDB	Villatobas	3° 27' 51" W	39° 46' 51" N
VOR/DME-NDB	Bailén	3° 37' 30" W	38° 09' 09" N
VOR/DME-NDB	Hinojosa	5° 05' 59" W	38° 30' 29" N
VOR/DME	Martín	4° 56' 23" W	37° 03' 19" N
VOR/DME	Yeste	2° 21' 09" W	38° 21' 39" N
NDB	Almagro	3° 45' 17" W	38° 57' 10" N
VOR/DME	Castejón	2° 32' 41" W	40° 22' 19" N

Tabla 7. Radioayudas que sirven de apoyo a las aerovías de la Tabla 11

## 2.4 Espacio aéreo

### 2.4.1. Designaciones y clasificaciones del espacio aéreo

Alrededor del aeropuerto se tiene una FIZ (zona de información de vuelo) en la que se provee el servicio de información de vuelo. Este servicio da información sobre cambios en la capacidad de servicio de las ayudas a la navegación o sobre cambios en el estado del aeródromo y sus instalaciones asociadas, incluyendo información sobre el estado de las áreas de movimiento del aeródromo si están afectadas por nieve, hielo o existe una profundidad significativa de agua. También, otorga información relacionada con la emisión a la atmósfera de materiales radioactivos o sustancias químicas tóxicas, e información SIGMET y AIRMET. La geometría de la FIZ se describe en la Tabla 8; esta presenta un límite vertical superior de 4000 ft AMSL y se extiende alrededor del aeródromo según se muestra en la Figura 14. Sin embargo, esta zona sólo está activada en horario ATS (Servicio de tránsito aéreo), que por lo indicado en la AIP [4] del aeródromo se corresponde con los horarios de utilización del mismo, descritos en el apartado 2.2.

Como se observa en la Tabla 8, el espacio aéreo en el que se sitúa el aeropuerto de Ciudad Real es de clase G. Esta clase es la menos restrictiva, y en ella se permiten vuelos IFR (Reglas de vuelo instrumental) y VFR (Reglas de vuelo visual). Los servicios que se proporcionan en ella son servicios de información de vuelo, tal y como está dispuesto en el aeropuerto en estudio. Las limitaciones de velocidad son de 250 kt por debajo de 10000 ft AMSL (sobre el nivel medio del mar), excepto en los casos de vuelos militares en misiones operativas o de defensa aérea, o cuando sus características de actuación no lo permitan.

Denominación y límites laterales Designation and lateral limits	Límites verticales Vertical limits	Clase de espacio aéreo Airspace class	Unidad responsable Idioma Unit Language	Altitud de transición Transition altitude
FIZ CIUDAD REAL (RMZ) (1) 385431N 0040320W, desde este punto siguiendo arco de 5 NM centrado en el ARP hasta // from this point following arc of 5 NM centre on ARP, up to 385201N 0035149W, 385431N 0040320W.	<u>4000 ft AMSL</u> SFC	G	Ciudad Real AFIS ES/EN	1850 m/6000 ft
<b>Observaciones:</b> (1) Solo activada en horario ATS.				
			<b>Remarks:</b> (1) Activated only ATS hours.	

Tabla 8. Espacio aéreo ATS. AIP

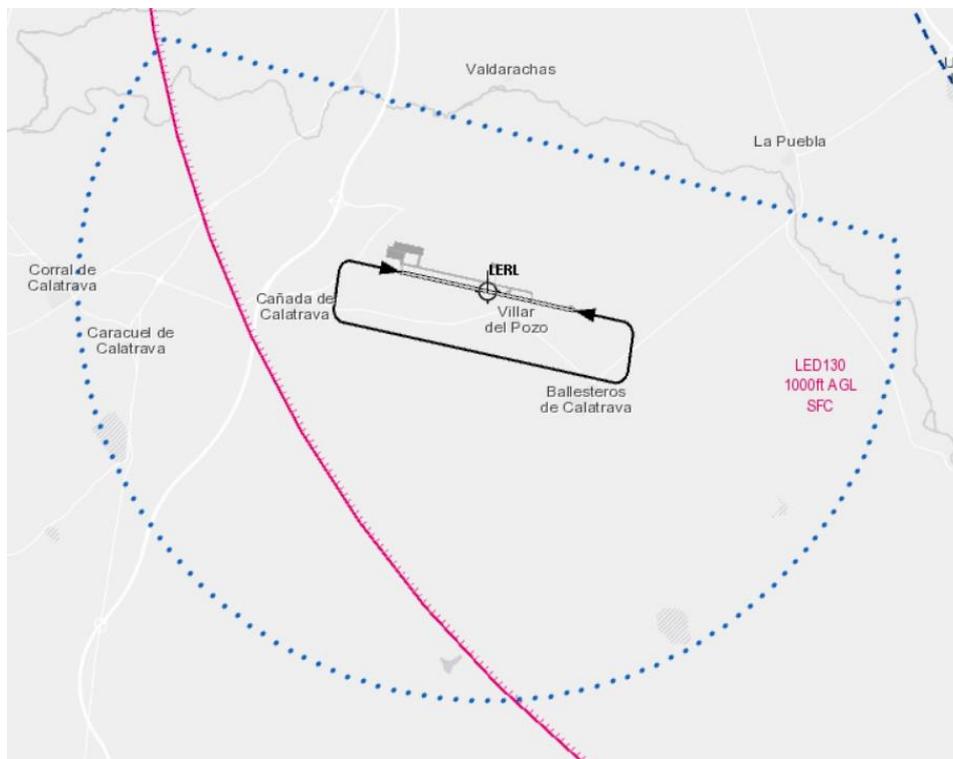


Figura 14. Espacio aéreo próximo al aeropuerto de Ciudad Real (I). Insignia

Respecto a las inmediaciones, hay que tener en cuenta la CTR (Zona de control) y la ATZ (Zona de tránsito de aeródromo) de la base de Almagro, cuya disposición se encuentra recogida en la Figura 15. La CTR cuenta con un límite superior a 3300 ft. El espacio aéreo en esta zona es de clase B, es decir, se permiten vuelos IFR y VFR, pero todos los vuelos están sujetos al servicio de control de tránsito aéreo y están separados unos de otros. La ATZ, por su parte, tiene su límite superior en 3000 ft o en el techo de nubes (lo que resulte más bajo). Se trata de un círculo de radio 8 km centrado en el ARP o la visibilidad horizontal (lo que resulte inferior).

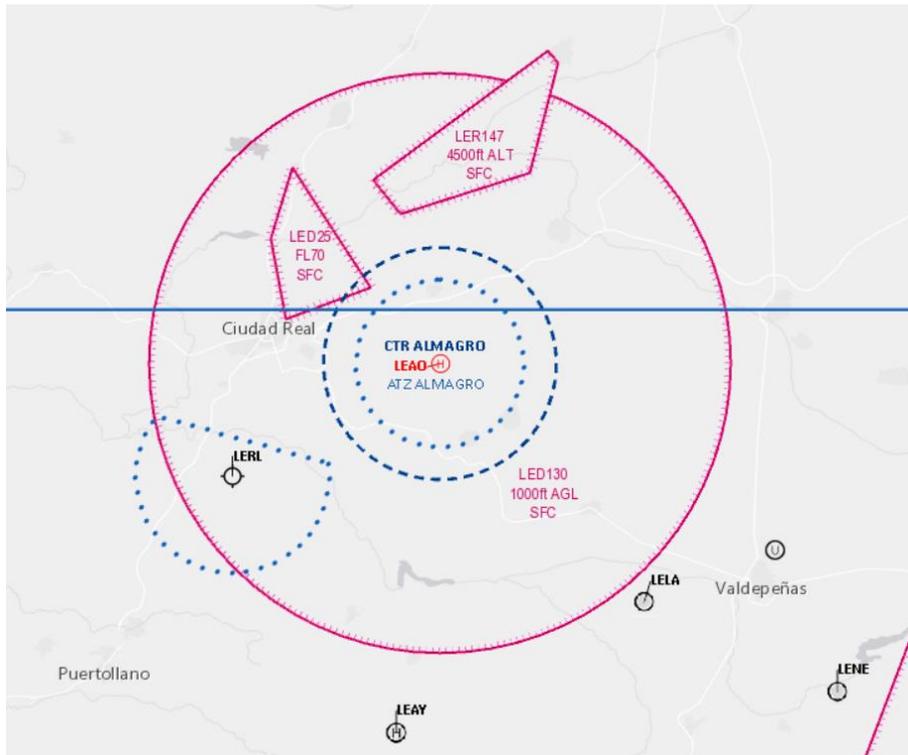


Figura 15. Espacio aéreo próximo al aeropuerto de Ciudad Real (II). Insignia

Por último, cabe destacar que el aeropuerto de Ciudad Real se encuentra situado en el FIR/UIR (Región de información de vuelo/ Región superior de información de vuelo) de Madrid, tal y como se muestra en la Figura 16. Las características de estas zonas se recogen en la Tabla 9 y en la Tabla 10.



Figura 16. FIR/UIR de Madrid. Insignia

UIR MADRID	
<b>LÍMITES LATERALES // LATERAL LIMITS</b>	4500N 01300W, 4500N 00800W, 4420N 00400W, 4335N 00147W, 4323N 00147W, frontera franco-española hasta 4242N 00004W, 3944N 00106W, 3550N 00206W, 3550N 00723W, 3558N 00723W, por el meridiano 00723W siguiendo la frontera hispano-portuguesa hasta su extremo NW en la costa del Atlántico hasta 4200N 01000W, 4300N 01300W, 4500N 01300W. // 4500N 01300W, 4500N 00800W, 4420N 00400W, 4335N 00147W, 4323N 00147W, Spanish-French border up to 4242N 00004W, 3944N 00106W, 3550N 00206W, 3550N 00723W, 3558N 00723W, by the meridian 00723W following the Portuguese-Spanish border up to the NW edge on the Atlantic coast up to 4200N 01000W, 4300N 01300W, 4500N 01300W.
<b>LÍMITES VERTICALES // VERTICAL LIMITS, CLASIFICACIÓN // CLASSIFICATION</b>	FL195-UNL Fuera de otros espacios clasificados // Outside other classified airspace: FL660-UNL ..... G FL195-FL660 ..... C
<b>DEPENDENCIA ATS // ATS UNIT</b>	MADRID ACC
<b>DISTINTIVO DE LLAMADA // CALL SIGN</b>	Madrid Control
<b>FREQ</b>	Ver apartado 2.2 // See item 2.2
<b>OBSERVACIONES // REMARKS</b>	

Tabla 9. UIR Madrid. AIP

FIR MADRID	
<b>LÍMITES LATERALES // LATERAL LIMITS</b>	4500N 01300W, 4500N 00800W, 4420N 00400W, 4335N 00147W, 4323N 00147W frontera franco-española hasta 4242N 00004W, 3944N 00106W, 3550N 00206W, 3550N 00723W, 3558N 00723W, por el meridiano 00723W siguiendo la frontera hispano-portuguesa hasta su extremo NW en la costa del Atlántico hasta 4200N 01000W, 4300N 01300W, 4500N 01300W. // 4500N 01300W, 4500N 00800W, 4420N 00400W, 4335N 00147W, 4323N 00147W Spanish-French border up to 4242N 00004W, 3944N 00106W, 3550N 00206W, 3550N 00723W, 3558N 00723W, por el meridiano 00723W by the eridian 00723W following the Portuguese-Spanish border up to the NW edge on the Atlantic coast up to 4200N 01000W, 4300N 01300W, 4500N 01300W.
<b>LÍMITES VERTICALES // VERTICAL LIMITS, CLASIFICACIÓN // CLASSIFICATION</b>	SFC-FL195 Fuera de otros espacios clasificados // Outside other classified airspace: FL145-FL195 ..... C SFC-FL145 ..... G
<b>DEPENDENCIA ATS // ATS UNIT</b>	MADRID ACC
<b>DISTINTIVO DE LLAMADA // CALL SIGN</b>	Madrid Control
<b>FREQ</b>	Ver apartado 2.2 // See item 2.2
<b>OBSERVACIONES // REMARKS</b>	

Tabla 10. FIR Madrid. AIP

## 2.4.2. Restricciones del espacio aéreo

Además, al margen de las clasificaciones y las designaciones establecidas en el apartado anterior, la zona de información de vuelo se encuentra solapada con la LED 130. Se trata de una zona peligrosa, que está catalogada en el AIP como zona de tránsito de helicópteros en contacto con la torre de control de la base de helicópteros militares de Almagro.

Por otra parte, al norte del aeropuerto se encuentran las zonas LED 25 y LER 147. La primera de estas zonas está definida como zona peligrosa por ser una zona en la que se realizan vuelos de instrucción de helicópteros militares. La LER 147 es una zona restringida porque se sitúa en ella un parque nacional. Por esta razón, queda prohibido el sobrevuelo, excepto para aeronaves de estado y vuelos que pretendan la conservación del propio parque y que estén autorizados por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

En las proximidades del aeropuerto, se pueden encontrar las regiones LER 146 y F21 B, ver Figura 17. La región LER 146 delimita una zona en la que está prohibido el sobrevuelo en las mismas condiciones que para LER 147. En este caso, también se trata de un parque nacional. En cuanto a F21 B, se trata de una zona que abarca desde la superficie hasta los 1000 ft AGL y en la que se establece la advertencia de ser una zona de fauna sensible.

En la Figura 18, se recogen las restricciones del espacio aéreo que aparecen en zonas más alejadas del aeropuerto. Como se puede observar, Madrid y Sevilla son regiones especialmente problemáticas, ya que aparecen en ellas grandes concentraciones de zonas peligrosas. En la mayoría de los casos, estas zonas están designadas de esa manera por ser zonas en las que se realizan entrenamientos militares o ejercicios acrobáticos.

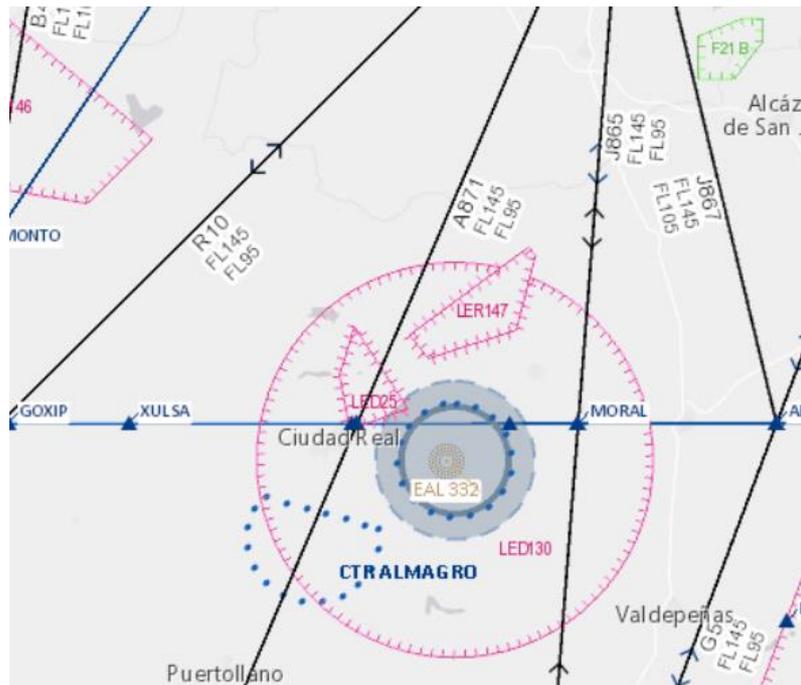


Figura 17. Restricciones del espacio aéreo próximo al aeropuerto de Ciudad Real

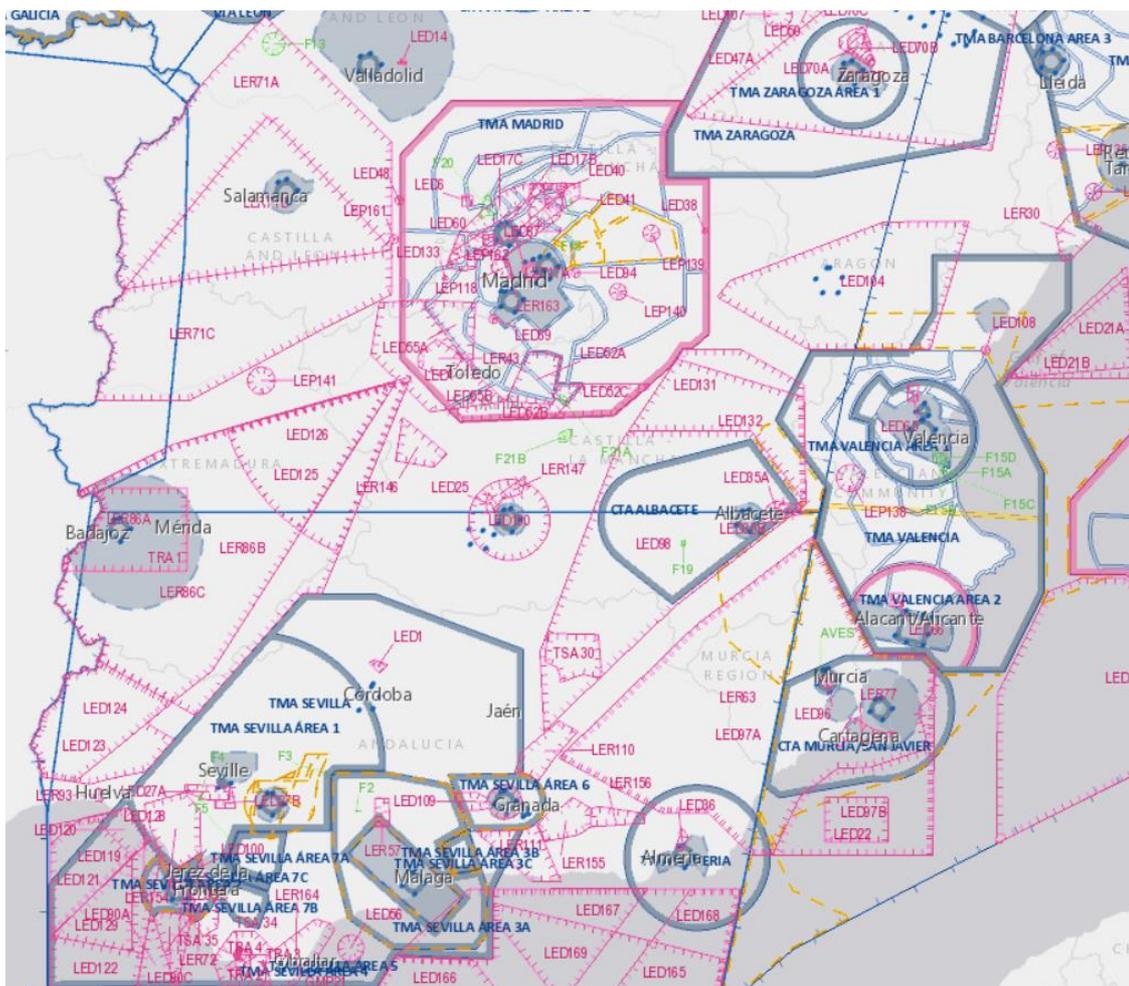


Figura 18. Espacio aéreo relativamente cercano al aeropuerto de Ciudad Real. Insignia

### 2.4.3. Aerovías

Además, es importante conocer cuáles son las aerovías más cercanas al aeropuerto (Tabla 11 y Figura 19), ya que estas aerovías son las que pueden interferir en las operaciones de este. Es decir, hay que tenerlas en cuenta a la hora de establecer el procedimiento para garantizar la compatibilidad de este con las mismas.

Espacio aéreo superior	Espacio aéreo inferior
UA/UN-857	A-857
UR-10	B-42
UB-42/UN-864	R-10
UA/UN-871	A-871
UN-865/UB-11	B-11
UG-5/UN-869	G-5

Tabla 11. Aerovías próximas al aeropuerto de Ciudad Real

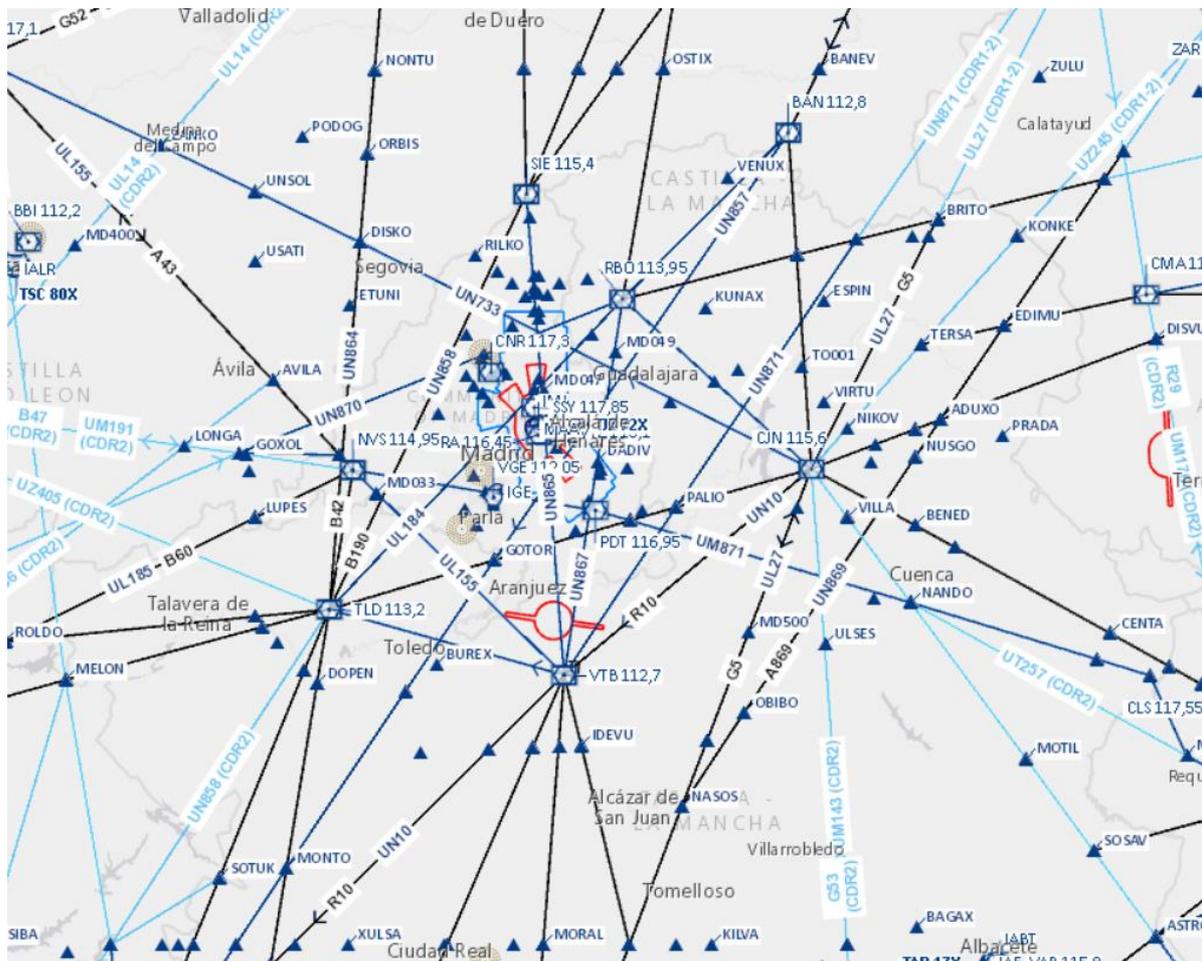


Figura 19. Localización de las aerovías próximas al aeropuerto de Ciudad Real

Por otro lado, merece la pena hacer un estudio de las cartas SID (Salida normalizada por instrumentos) y STAR (Llegada normalizada por instrumentos) de los aeropuertos circundantes. Se analizan las cartas de los aeropuertos situados dentro de una circunferencia de 200 NM alrededor del aeropuerto de Ciudad Real. Esto se debe a la proximidad de los mismos con el aeropuerto en cuestión y a las posibles interferencias entre procedimientos que podrían existir en caso de no considerarse. Teniendo en cuenta que durante las salidas las pendientes de subida suelen ser del 3,3% y durante las llegadas las pendientes del aeropuerto en cuestión serán de 3° (al menos en la fase final, porque es lo que marca el PAPI), a una distancia de 200 NM del aeropuerto se conseguirán alturas de 13000 m como mínimo sobre el terreno. Más allá de esta distancia la aeronave volaría a una altitud que garantizaría que las SID y las STAR no suponen un problema.



Figura 20. Límites de estudio para las SID/STAR. GoogleMaps

Por tanto, en primer lugar, se establece una selección de los aeropuertos que se van a analizar. En la Figura 20, se muestra el territorio objeto de análisis. Como se puede ver, dicho territorio abarca la mayor parte de la península, lo que llevaría a analizar una gran cantidad de aeropuertos. Sin embargo, en base a las estadísticas de Aena (Tabla 12), se concluye que la mayoría de las operaciones se realizan en los aeropuertos de Madrid, Málaga, Alicante, Valencia y Sevilla. Por ese motivo, se tendrán en cuenta las SID y STAR propias de los mismos.

Además, no toda la información de las cartas será útil, ya que se buscan posibles interferencias con los procedimientos que se está diseñando. De esa manera, se centrará la atención en aquellas salidas y llegadas que puedan suponer un problema en la ejecución de los procedimientos.

La Figura 21 recoge una vista general de las SID y STAR más próximas al aeropuerto objeto de análisis, en la que, a priori, se observa que los principales problemas de interferencia vendrán asociados a la STAR de Albacete que pasa por Valdepeñas y Puertollano y a la STAR de Madrid. Sin embargo, con la intención de mostrar un mayor nivel de detalle, se incluyen en el Anexo I de este documento, las cartas más relevantes.

AEROPUERTOS	OPERACIONES	
	Total	% Inc 2019 /s 2018
ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS	426.376	4,0%
BARCELONA-EL PRAT J.T.	344.558	2,7%
PALMA DE MALLORCA	217.218	-1,4%
MALAGA-COSTA DEL SOL	144.920	2,5%
GRAN CANARIA	126.452	-3,5%
ALICANTE-ELCHE	101.408	4,8%
VALENCIA	77.699	2,5%
TENERIFE-NORTE	75.385	2,9%
IBIZA	75.378	-2,1%
TENERIFE-SUR	70.277	0,5%
SEVILLA	64.110	10,7%

Tabla 12. Aeropuertos españoles más activos. Aena

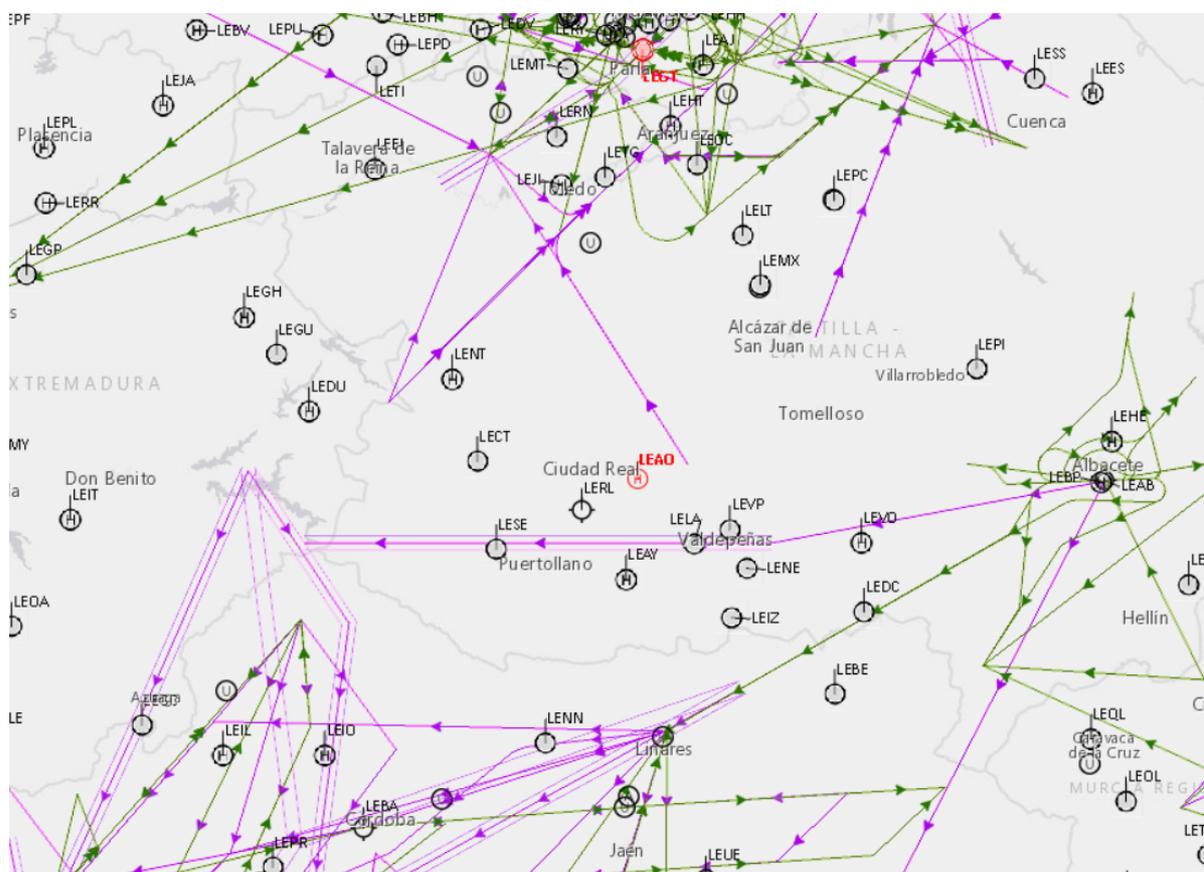


Figura 21. SID/STAR próximas al aeropuerto de Ciudad Real. Insignia

#### 2.4.4. Sectorización

Con el objetivo de llevar a cabo la prestación de servicios de control de tráfico aéreo, el espacio aéreo está dividido en sectores. Estos sectores son volúmenes de espacio aéreo que están a cargo de una dependencia de control y bajo la responsabilidad de uno o varios controladores.

El aeropuerto de Ciudad Real se encuentra dentro de los límites del sector LECSBA1, que se extiende desde la superficie hasta el nivel de vuelo 660 (FL660). Sin embargo, también pertenece al espacio LECS MA4, que presenta unos límites verticales similares. Ambos sectores están a cargo del centro de control de área (ACC) de Sevilla. A cargo del propio ACC de Sevilla, se encuentran también los sectores LECSYES al Este y LECSSEV al Oeste. Ambos extendiéndose desde la superficie hasta FL660.

Por último, cabe destacar que el aeropuerto de Ciudad Real es un aeropuerto situado cerca de la frontera entre sectores. Por ello, al diseñar los procedimientos, habrá que tener en cuenta los sectores circundantes LECMCZI, LECMZTI, LECMTLI, LECMTLU, LECMTLL, LECMCJL, y LECMZML, todos ellos por encima del paralelo 39 y bajo la responsabilidad del ACC de Madrid. Estos sectores cubren desde la superficie hasta FL660.

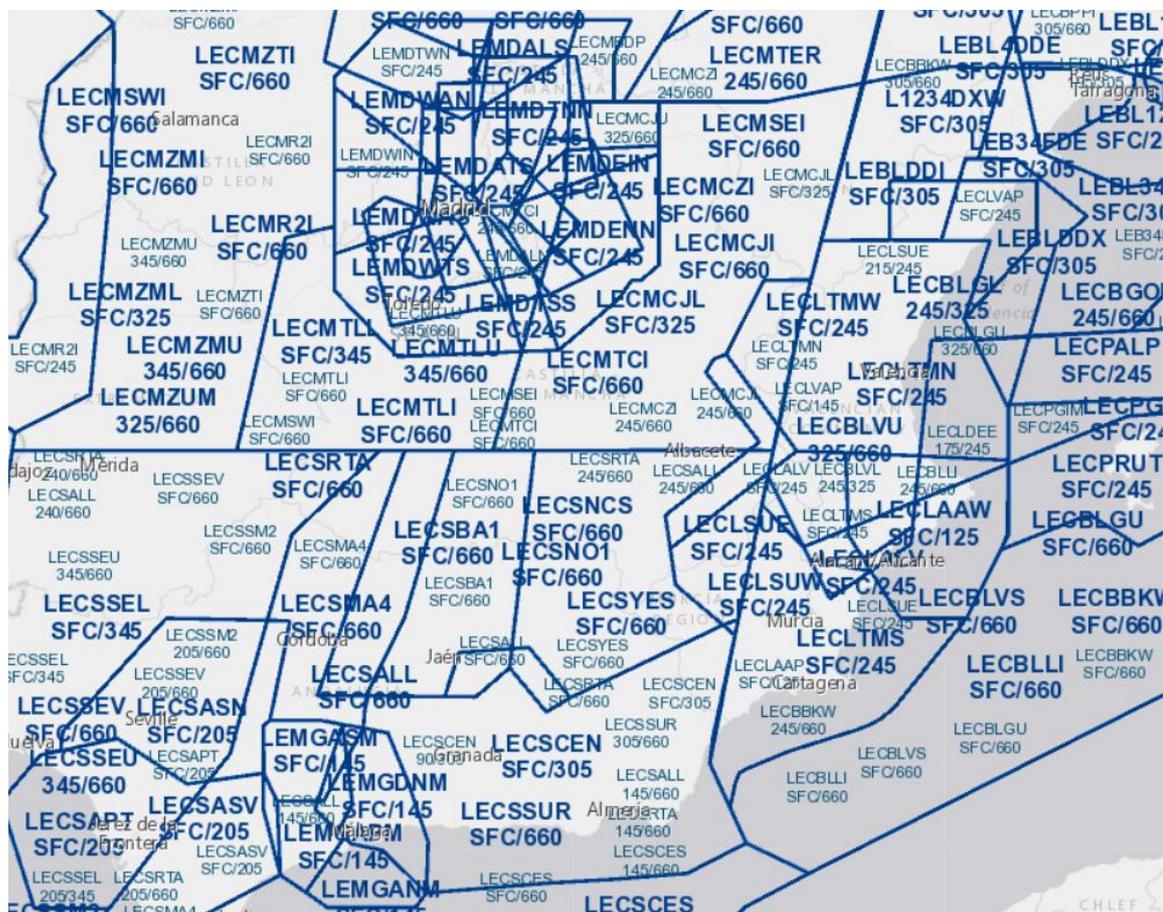


Figura 22. Sectorización. Insignia



# 3 DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS DE LLEGADA

En vista de las radioayudas existentes en el aeropuerto de Ciudad Real, las cuales fueron especificadas en el apartado 2.3 del presente documento, se optó por diseñar dos procedimientos de llegada: una llegada convencional de precisión basada en un sistema ILS por la pista 10 (la pista de uso preferente), y una llegada RNP de no precisión por la pista 28. En los apartados siguientes se desarrollará en detalle el proceso de diseño seguido en cada caso, indicando las suposiciones realizadas y las herramientas empleadas.

Sin embargo, existen aspectos comunes que merece la pena resaltar. Según el Volumen II del documento 8168 de la OACI [13], todo procedimiento de aproximación por instrumentos podrá constar de hasta cinco tramos:

- Tramo de llegada: permite la transición desde la fase en ruta a la fase de aproximación. Termina en el punto de referencia de aproximación inicial (IAF).
- Tramo de aproximación inicial: comienza en el IAF del tramo anterior y finaliza en el punto de referencia intermedio (IF). En este tramo la aeronave abandona la estructura de vuelo en ruta y maniobra para entrar en el tramo de aproximación intermedia.
- Tramo de aproximación intermedia: es aquel en el que se realizan los ajustes de configuración, velocidad y posicionamiento de la aeronave para entrar, más adelante, en el tramo de aproximación final. Este tramo comienza en el punto de referencia de aproximación intermedia (IF) y termina en el punto de aproximación final o en el punto de referencia de aproximación final (FAF/FAP).
- Tramo de aproximación final: en este tramo se realiza la alineación y el descenso para el aterrizaje. El comienzo del tramo se sitúa en el FAF/FAP y su final en el punto de aproximación frustrada o en la altura/altitud de decisión (MAPt o DA/H).
- Tramo de aproximación frustrada: se extiende desde el MAPt o DA/H hasta una altitud o altura suficiente para permitir el inicio de otra aproximación, el retorno a un circuito de espera o la reanudación de un vuelo en ruta.

Cada uno de estos tramos comienzan y terminan en puntos de referencia designados. No obstante, esto no siempre es así, ya que estas transiciones entre los tramos podrían venir dadas por puntos de intersección o por el final de un viraje.

Por otra parte, habrá que tener en cuenta que el aspecto más crítico en el diseño de procedimientos está relacionado con los obstáculos, es decir, los procedimientos tienen que ser diseñados de manera que se garantice el franqueamiento de obstáculos.

Además, se considera que se tiene guía de derrota para todas las fases de vuelo, asumiendo, en consecuencia, que los tramos están comprendidos en la cobertura establecida de la instalación de navegación aérea en la que se base esa guía de derrota.

Por último, y en vista de que las actuaciones de las aeronaves influyen de forma directa en la visibilidad y el espacio aéreo requerido para la realización de ciertas maniobras como el descenso en el tramo de aproximación final, se ha de tener en cuenta que la velocidad constituye un factor muy relevante en el diseño de un procedimiento de aproximación. En ese sentido, existen diferentes categorías de aeronaves (A, B, C, D, E y H) en función de la velocidad indicada en el umbral ( $V_{at}$ ). Teniendo en cuenta que el aeropuerto objeto de estudio es un aeropuerto pequeño y que, según su plan director [11] la aeronave de cálculo es el A380-861, se asume que la categoría a considerar es la categoría D, que engloba a aquellas aeronaves cuya velocidad en el umbral está situada entre 261 km/h y 307 km/h de IAS, entendiéndose esta velocidad como la mayor entre la velocidad de entrada en pérdida  $V_{so}$  multiplicada por 1,3 y la velocidad de pérdida  $V_{s1g}$  multiplicada por 1,23 en la configuración de aterrizaje con la máxima masa certificada.

### 3.1 Llegada RNP de no precisión por la pista 28

En el caso de diseñar un procedimiento de aproximación RNP, es necesario tener en cuenta aquellas consideraciones generales a las que hace referencia el documento 8168, en el volumen II, parte I, sección 4. Sin embargo, esta normativa se complementa con la parte III, sección 2, capítulo 2 de ese mismo documento, que se refiere a los procedimientos de navegación de área y procedimientos RNP. En este caso, se asume que el procedimiento es del tipo RNP APCH en el tramo de aproximación inicial, intermedia y final, y las fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada, y RNAV 1 en el resto de los tramos. Esto último se ha decidido a partir de la comparación con el aeropuerto de Almería. Además, se ha decidido establecer una STAR que comienza en CJN, ya que este punto tiene buena conectividad con el centro de Europa y es cercano al aeropuerto, pero está lo suficientemente alejado como para permitir alcanzar niveles de vuelo de espacio aéreo superior con las pendientes de ascenso y descenso que marca la normativa.

A continuación, se va a dividir el proceso de diseño del procedimiento en dos partes. En la primera parte, se tendrán en cuenta los tramos de aproximación intermedia, final y frustrada (hasta el tramo intermedio inclusive). Esta parte estará caracterizada por la consideración de una trayectoria recta y alineada con el eje de la pista, que no deja lugar para la optimización. En la segunda parte, que se ocupará del resto de tramos, se podrán considerar virajes y, por ello, se establece un primer diseño manual en este apartado y, en el apartado 5, se tendrá un proceso de diseño más automatizado en el que se pasará a optimizar las rutas en base a ciertos criterios que se especificarán más adelante.

#### 3.1.1 Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada

Como se ha especificado anteriormente, en esta primera parte, se presenta el diseño de aquellos tramos que se extienden desde el punto de la aproximación intermedia (IF) hasta el final del tramo intermedio de aproximación frustrada, donde se puede garantizar un margen mínimo de franqueamiento de obstáculos (MOC) de 50 m. Por tanto, el diseño de esta parte consiste en determinar la ubicación de estos dos puntos, junto con la ubicación del FAF, el MAPt y el SOC (nótese que FAF y MAPt son específicos de las aproximaciones de no precisión). Además, hay que determinar las pendientes asociadas a cada tramo que dan lugar al perfil vertical del procedimiento.

Como ya se ha comentado, un aspecto determinante en el diseño que se plantea es el franqueamiento de obstáculos. Por ello, resulta lógico que el primer paso para determinar los puntos mencionados y las pendientes de los tramos correspondientes sea definir las áreas de franqueamiento de obstáculos. Se dispondrá de un área primaria y un área secundaria. La anchura del área secundaria será la mitad de la anchura total (que incluye el área secundaria y el área primaria). Por su parte, se definirá un valor del margen mínimo del franqueamiento de obstáculos (MOC) para cada tramo que tendrá que ser respetado en el área primaria y que evolucionará de forma lineal a lo largo de la anchura del área secundaria, siendo cero en el extremo exterior de la misma.

Las semianchuras de las áreas de protección, designadas como  $\frac{1}{2} A/W$ , se recogen en la Tabla 13. En esa tabla, se muestran también los valores (en kilómetros) de las tolerancias que serán relevantes en la construcción de las áreas. Existen dos tipos de tolerancias: la tolerancia perpendicular a la derrota (XTT) y la tolerancia paralela a la derrota (ATT). De esa manera, las protecciones de los tramos intermedios y final se establecerían tal y como indica la Figura 23. En cuanto a las protecciones de los tramos de la frustrada, vendrían dados según la Figura 24.

Por tanto, el tramo de aproximación final terminaría a una distancia de 0,44 km del MAPt, siendo este valor la tolerancia paralela a la derrota (ATT). Yendo aguas arriba, este tramo tiene una semianchura de 1,76 km que se extiende a partir del eje de la pista. La semianchura varía de forma lineal hasta alcanzar el valor de 2,69 km a una distancia del FAF (en el sentido de aproximación) de 1,48 km que es el valor del ATT. A continuación, el área se ensancha con una divergencia de 30° hasta alcanzar la semianchura de 4,63 km, que se mantiene constante hasta el IF.

Por otra parte, en los tramos asociados a la aproximación frustrada, se comienza con un valor de 1,76 km de semianchura en el punto inicial, cercano al MAPt. A partir de ese punto y en el sentido que sigue la trayectoria de aproximación frustrada, el área se ensancha divergiendo con un ángulo de 15° hasta alcanzar la semianchura de 3,7 km. Esta semianchura se mantiene constante hasta una distancia de 28 km desde el punto de referencia del aeródromo (ARP) menos la ATT correspondiente, que en este caso es de 1,48 km. Una vez se supera esa distancia, el área se ensancha de nuevo con una divergencia de 15° hasta una semianchura de 4,63 km, que se mantiene hasta el final del área que, en principio, se asume que está a 56 km del ARP.

<i>IF/IAF/aproximación frustrada (&lt;56 km del ARP)</i>			<i>FAF</i>			<i>MAPt</i>			<i>Aproximación frustrada (&lt;28 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
1,85	1,48	4,63	0,56	0,44	2,69	0,56	0,44	1,76	1,85	1,48	3,70

Tabla 13. Anchuras de las áreas de franqueamiento de obstáculos para RNP APCH [13]

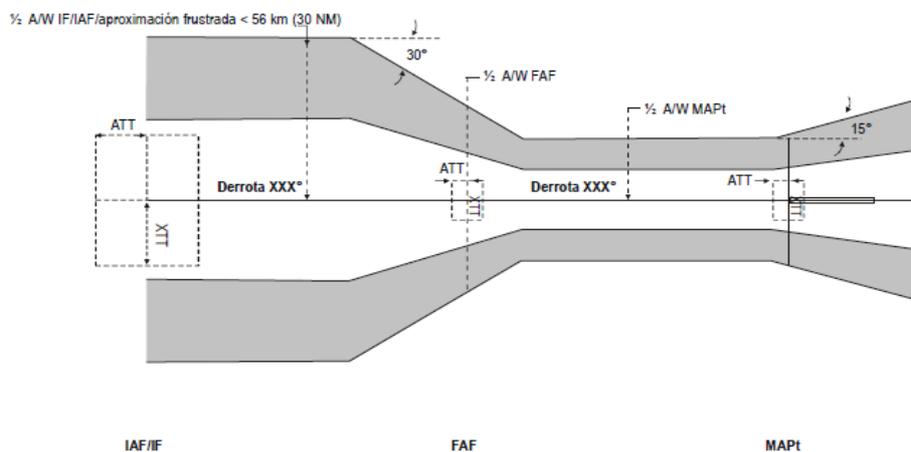


Figura 23. Áreas de franqueamiento de obstáculos RNP APCH (I)

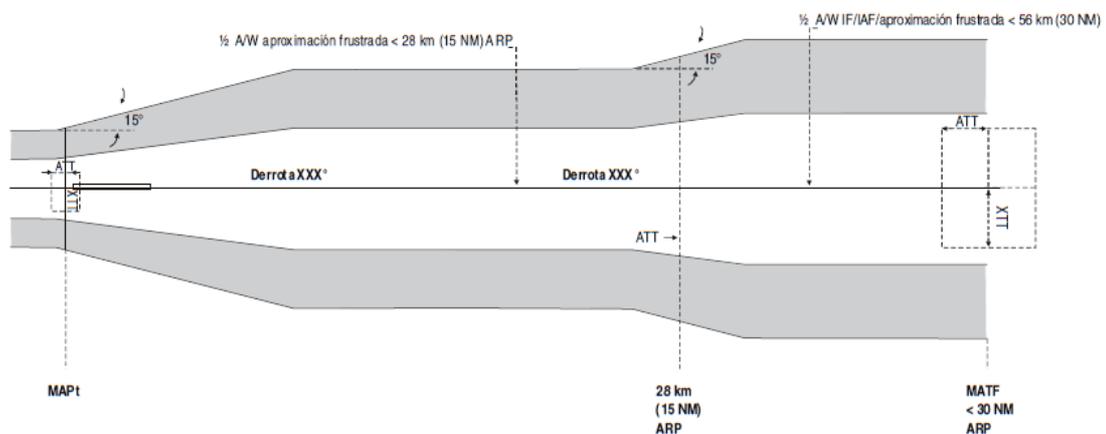


Figura 24. Área de franqueamiento de obstáculos RNP APCH (II)

A continuación, se recogen aquellas características relevantes que menciona el documento 8168 de cada uno de los tramos bajo consideración. Posteriormente, se desarrollará el procedimiento seguido para el cálculo de los puntos mencionados.

- **Tramo de aproximación intermedia.** La derrota en el tramo de aproximación intermedia debería ser la misma que la derrota de aproximación final, es decir, se considera que la derrota está alineada con el eje de la pista. La longitud del tramo no debe ser mayor de 28 km, ni menor de 9,3 km. La longitud óptima es de 19 km.

Por último, el MOC es de 150 m y hay que tener en cuenta que en el tramo anterior es de 300 m. Las altitudes seleccionadas para cumplir con estos márgenes deben ser redondeadas a los 50 m o 100 ft inmediatos.

- **Tramo de aproximación final.** La longitud óptima es de 9,3 km y no debe exceder de 18,5 km. La longitud mínima es de 5,6 km. Además, en este tramo la derrota debe estar alineada con el eje de la pista en la medida de lo posible.

La pendiente de descenso óptima es del 5,2 % para el tramo de aproximación que no es de precisión (con FAF).

Por último, cabe destacar que el margen mínimo de franqueamiento de obstáculos en el área primaria es de 75 m, reduciéndose linealmente hasta tener un valor de 0 m en el límite exterior del área secundaria.

- **Tramo de aproximación frustrada inicial.** El tramo de aproximación frustrada inicial se extiende desde el MAPt hasta el comienzo del ascenso (SOC). La ubicación óptima del MAPt es el umbral de la pista. Sin embargo, cuando sea necesario el MAPt podría situarse más cerca del FAF, siempre que la OCA/H no sea inferior a la altitud/altura del del MAPt. Esta OCA/H haría referencia a la altitud más baja o altura más baja por encima de la elevación del umbral de la pista o del aeródromo utilizada para respetar los criterios de franqueamiento de obstáculos.

Por su parte, el SOC está definido por una distancia desde el FAF hasta el MAPt más la distancia de transición X, tal y como se muestra en la Figura 25. La distancia de transición se basa en 15 segundos de vuelo a la TAS adecuada, a la elevación del aeródromo y con una temperatura ISA+15 °C, y un viento de cola de 10 kt. Esta distancia viene definida por la siguiente expresión, que es específica para categoría D:

$$X = \text{máx}\{0,0495D + 4153; 0,2055D + 2073\}$$

Nótese que la temperatura de referencia del aeródromo es de 34 °C. Sin embargo, el documento 8168 de OACI, no proporciona otra expresión que tenga en cuenta la variación de temperatura respecto a ISA+15°C, forzando a la utilización de la expresión anterior. Más adelante, en la construcción de las áreas de viraje, sí se considerará este aspecto.

Este tramo requiere de una concentración absoluta del piloto, ya que debe modificar la configuración de la aeronave de aterrizaje a despegue. Por ello, en esta fase no se autoriza la realización de virajes.

El margen mínimo de franqueamiento de obstáculos en esta fase debe ser el mismo que en la última parte de la aproximación final.

- **Tramo de aproximación frustrada intermedio.** La fase intermedia de la aproximación frustrada se inicia en el SOC. El ascenso continúa hasta el primer punto donde se alcance y pueda mantener un MOC de 50 m.

La pendiente nominal de ascenso es del 2,5 %. El margen mínimo de franqueamiento de obstáculos en este tramo es de 30 m en el área primaria y en el área secundaria debe reducirse de forma lineal hasta anularse en el borde exterior de la misma.

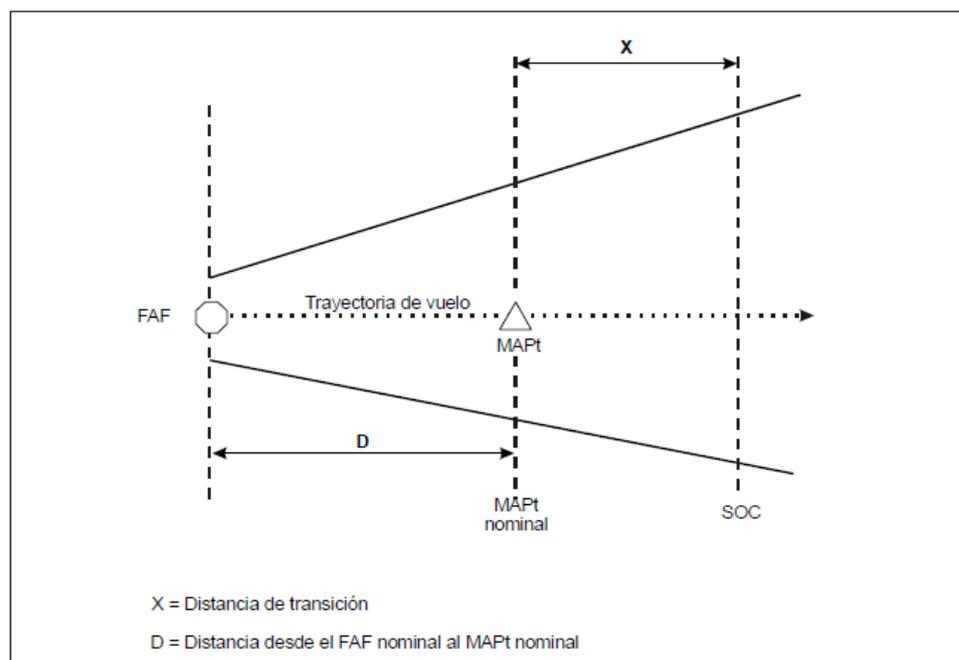


Figura 25. Determinación del SOC con un MAPt definido por una distancia desde el FAF

### 3.1.1.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño que se presentan en este apartado sirven para cerrar el diseño que se está planteando. Dichas hipótesis y decisiones son:

- La pendiente de descenso es de  $3^\circ$  en aproximación final.
- El tramo de aproximación intermedia es horizontal, es decir, tiene pendiente nula.
- La pendiente de ascenso es del 2,5% a partir del SOC en aproximación frustrada. El tramo delimitado por la OCH y el SOC es un tramo horizontal.
- En todos los tramos que se recogen en este apartado la derrota se encuentra alineada con el eje de la pista.
- El MAPt y la OCH se asocian al mismo punto. En realidad, existe un margen entre ambos puntos basado en restricciones del explotador. Sin embargo, para el proceso de diseño se asume que ese margen es nulo.
- Se asumen las longitudes óptimas en aproximación intermedia y final, es decir, 9300 y 19000 m respectivamente.
- El reglaje del altímetro procede del propio aeródromo.
- El procedimiento será RNP APCH con GNSS básico. Por eso, se emplean las dimensiones de la Tabla 13 para las áreas de franqueamiento de obstáculos.
- En el aeropuerto existen sistemas PAPI en ambas pistas. En el caso de la pista 28 el sistema, que está situado a 502 m, define una pendiente de descenso de  $3^\circ$ . Por tanto, se asume que la pendiente de descenso será de  $3^\circ$ .

### 3.1.1.2 Proceso de diseño

A partir de las consideraciones anteriores, se determinan los puntos y las pendientes que definen el procedimiento.

En primer lugar, es necesario determinar la OCA/H o altura/altitud de franqueamiento de obstáculos. En el caso de aproximaciones que no son de precisión y que son directas (alineadas con la pista), la OCA/H debe garantizar el margen mínimo de franqueamiento de obstáculos de 75 m en el área de aproximación final, ya que se trata de una aproximación con FAF. También debe garantizar el MOC de 30 m en el primer tramo de aproximación frustrada.

Para determinar esta OCA/H, se dispone de cuatro fragmentos de los mapas orográficos definidos en el apartado 2.1.1. Estos fragmentos contienen a la pista y sus proximidades. De esa forma, todas las áreas de franqueamiento de obstáculos definidas anteriormente quedan cubiertas por el mapa orográfico.

Por otra parte, se define la pista a partir de la localización de sus umbrales que vienen recogidos en la AIP del aeropuerto y que se muestran en la Tabla 4.

A partir de estos dos puntos, se define la dirección de la pista. Para ello, se emplean las expresiones de la loxodrómica (hacia el umbral 10) y se asume que la referencia (es decir, los 0°) se sitúan en el Norte. También se definen las escalas que permite el paso de las variables latitud y longitud expresadas en grados a coordenadas x e y expresadas en metros. Esto último se hace teniendo en cuenta que la longitud de la pista (considerando que el umbral 28 se encuentra desplazado 1000 m) es de 3000 m. De esa manera, se desarrollan las expresiones siguientes, donde  $\chi_{pista}$  hace referencia a la dirección de la pista,  $\lambda_{10}$  y  $\lambda_{28}$  indican las longitudes de los umbrales 10 y 28 respectivamente,  $\phi_{10}$  y  $\phi_{28}$  se refieren a las latitudes de los mismos,  $\phi_{ARP}$  indica la latitud del punto de referencia del aeródromo (ARP), y  $Esc_{\lambda}$  y  $Esc_{\phi}$  hacen referencia a las escalas anteriormente mencionadas.

$$\chi_{pista} = \text{atan} \left( \cos \phi_{ARP} \frac{\lambda_{10} - \lambda_{28}}{\phi_{10} - \phi_{28}} \right)$$

$$Esc_{\lambda} = \frac{\lambda_{10} - \lambda_{28}}{3000 \sin(\chi_{pista})}$$

$$Esc_{\phi} = \frac{\phi_{10} - \phi_{28}}{3000 \cos(\chi_{pista})}$$

Aplicando las variables definidas en las líneas anteriores y considerando como origen la ubicación del umbral de la pista 28, se define una altura como valor de la OCH. Esta altura debe ser un punto de la recta que tiene como origen el punto de contacto, es decir, la localización del sistema PAPI a 502 m del umbral en el sentido del aterrizaje, y una pendiente de 3°. A 9300 m de esta OCH se sitúa el FAF, que también está contenido en la misma recta. El IF se asume situado a 19000 m del FAF y a la misma elevación que este, ya que el tramo intermedio se asume horizontal. Por último, se define el SOC a partir de las distancias que existen entre el umbral y el FAF y entre el umbral y la OCH, tal y como se comentó anteriormente. Cabe destacar que todos estos puntos están situados en la prolongación del eje de la pista que está definido a partir del umbral y la dirección mencionados. A continuación, se desarrollan las ecuaciones empleadas.

$$elev_{OCH} = s \times \tan\left(\frac{3\pi}{180}\right) + 638,5$$

$$Dist_{OCH-28} = \frac{elev_{OCH} - 638,5}{\tan\left(\frac{3\pi}{180}\right)} - 502$$

$$\phi_{OCH} = \phi_{28} - \cos(\chi_{pista}) \times Dist_{OCH-28} \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{OCH} = \lambda_{28} - \sin(\chi_{pista}) \times Dist_{OCH-28} \times Esc_{\lambda}$$

$$Dist_{FAF} = Dist_{OCH-28} + 9300$$

$$\begin{aligned}\phi_{FAF} &= \phi_{28} - \cos(\chi_{pista}) \times Dist_{FAF} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FAF} &= \lambda_{28} - \sin(\chi_{pista}) \times Dist_{FAF} \times Esc_{\lambda} \\ elev_{FAF} &= 638,5 + \tan(3\pi/180) \times (502 + Dist_{FAF})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Dist_{IF} &= Dist_{FAF} + 19000 \\ \phi_{IF} &= \phi_{28} - \cos(\chi_{pista}) \times Dist_{IF} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{IF} &= \lambda_{28} - \sin(\chi_{pista}) \times Dist_{IF} \times Esc_{\lambda} \\ elev_{IF} &= elev_{FAF}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Dist_{SOC} &= Dist_{OCH-28} - X \\ \phi_{SOC} &= \phi_{28} - \cos(\chi_{pista}) \times Dist_{SOC} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{SOC} &= \lambda_{28} - \sin(\chi_{pista}) \times Dist_{SOC} \times Esc_{\lambda} \\ elev_{IF} &= elev_{OCH}\end{aligned}$$

Obsérvese que, en las expresiones anteriores, existe un parámetro libre denominado  $s$ . Este parámetro hace referencia a la distancia horizontal existente entre el punto de contacto y la OCH y se determina de forma iterativa, como se explicará más adelante.

A continuación, se determinan las áreas definidas al comienzo del apartado. Estas áreas están calculadas a partir de los puntos de paso de un tramo al siguiente. Dichos puntos se recogen en la Figura 26 y en la Figura 27. Estos puntos se calculan a partir de las intersecciones de la prolongación del eje de la pista con la perpendicular al mismo que determina el cambio de anchura, es decir, los puntos FAS, FASp, FASpp y FASppp. A modo de ejemplo, se incluyen en las líneas siguientes las expresiones de los puntos  $FAS_p$ ,  $FAS_3$  y  $FAS_4$ . Obsérvese que para el resto de los puntos el proceso y las expresiones son análogos. Las únicas diferencias existentes serían las distancias que aparecen en las expresiones.

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{\pi}{2} + \chi_{pista} \\ \beta_2 &= -\frac{\pi}{2} + \chi_{pista}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_{FASp} &= \phi_{28} - \cos(\chi_{pista}) \times (Dist_{FAF} - ATT) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FASp} &= \lambda_{28} - \sin(\chi_{pista}) \times (Dist_{FAF} - ATT) \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_{FAS3} &= \phi_{FASp} + \sin \beta \times 2690 \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FAS3} &= \lambda_{FASp} + \cos \beta \times 2690 \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_{FAS4} &= \phi_{FASp} + \sin \beta_2 \times 2690 \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FAS4} &= \lambda_{FASp} + \cos \beta_2 \times 2690 \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

Un aspecto relevante que merece la pena destacar es que, en el caso de las áreas asociadas al procedimiento de aproximación frustrada, los puntos se definen en base al punto de referencia del aeródromo, cuya localización viene definida en la AIP. Es necesario, por tanto, determinar el punto de intersección de la perpendicular al eje de la pista que pasa por el ARP con el propio eje de la pista. Ese punto de intersección hace la función del umbral de la pista 28 en las ecuaciones.

Una vez se tienen definidos todos los puntos, de la forma indicada anteriormente, se generan las rectas que definen los límites de las áreas. Hay que tener en cuenta que en las figuras mencionadas se definen los puntos del área secundaria. La definición de los puntos del área primaria es completamente análoga.

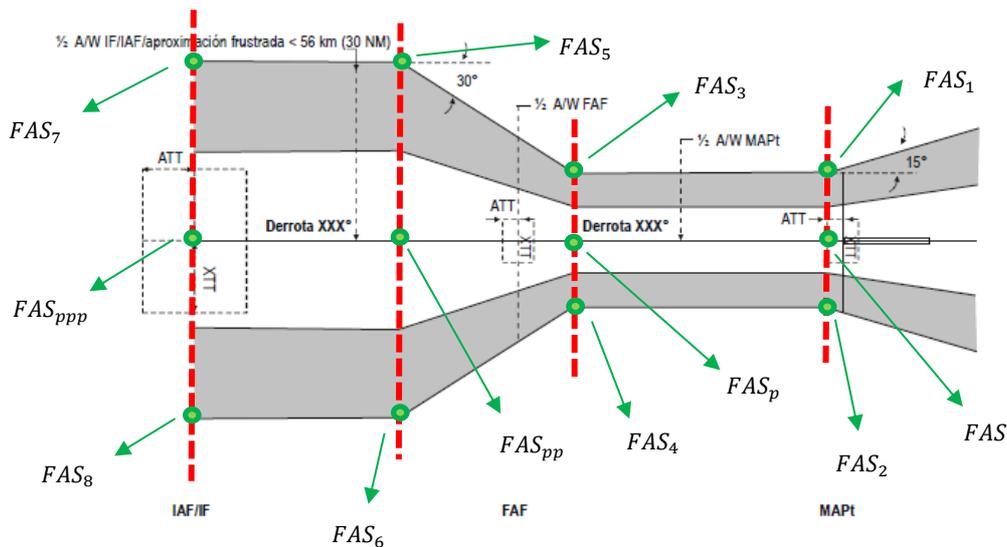


Figura 26. Puntos de las áreas de franqueamiento de obstáculos (I)

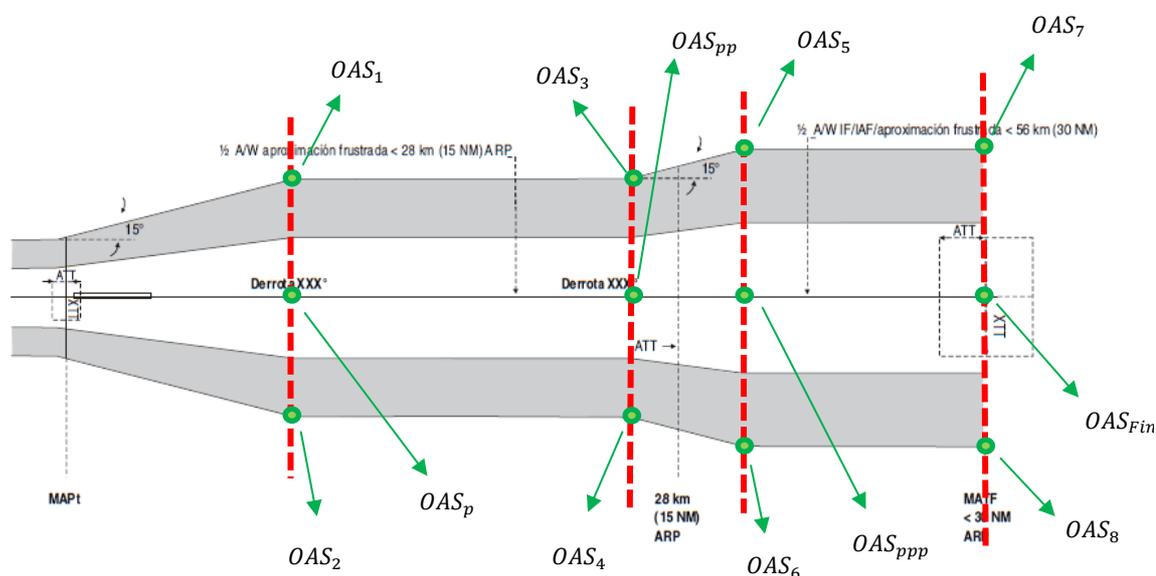


Figura 27. Puntos de las áreas de franqueamiento de obstáculos (II)

Cuando ya se han definido las áreas de protección y los puntos de referencia asociados al procedimiento, el proceso a seguir es iterativo. De esa forma, se asume un valor de la variable  $s$ , ya definida, y se comprobará que se cumplen los márgenes de franqueamiento de obstáculos. Es decir, hay que comprobar el MOC de 75 m en el tramo de aproximación final y el MOC de 30 m en el tramo de aproximación frustrada intermedia. La

comprobación se hace de forma similar en ambos casos. En caso de que la comprobación no asegure los valores del MOC comentados, se modifica el valor de  $s$ , aumentándolo, y se vuelve a comprobar el MOC en cada caso con el nuevo valor de  $s$ . Las variaciones de  $s$  se hacen en dos pasos. Primero, se usa una malla gruesa de 1000 m para encontrar un intervalo en el que uno de los extremos de problemas referentes a obstáculos y el otro no. Posteriormente, en ese intervalo se reduce el paso a 100 m y se determina el valor más pequeño que no presenta problemas.

Para realizar la comprobación del franqueamiento de obstáculos, en ambos casos, se sigue un procedimiento análogo. En ese sentido, se van tomando los puntos del mapa orográfico. Para cada punto, hay que comprobar si está bajo el área primaria o secundaria y, posteriormente, determinar si se cumple el margen de franqueamiento de obstáculos. Los detalles del proceso se recogen en el Anexo II del presente documento (Apartado 7.2.1.1).

En relación con la OCH, existen tres tipos de ajuste que se definen en el documento 8168 de OACI. Estos ajustes están asociados a un margen adicional añadido al MOC, un incremento porcentual en la OCA/H y la aplicación de un límite inferior a la OCA/H. El primero de estos ajustes es aplicable cuando se está volando en áreas montañosas. Sin embargo, en este caso, las altitudes más elevadas no superan los 400 m por encima del umbral. Es decir, no hay que aplicarlo. En cuanto al incremento porcentual de la OCA/H, este ajuste se asocia al reglaje del altímetro a distancia. Si se asume que el reglaje del altímetro procede del propio aeródromo tampoco es aplicable. Por último, el límite inferior se tiene en cuenta cuando el reglaje del altímetro sea un valor pronosticado por la oficina meteorológica competente, cuando la derrota de aproximación final que intersecta la prolongación del eje de la pista forma un ángulo entre  $5^\circ$  y  $30^\circ$  con el mismo, cuando la derrota de aproximación final que intersecta a la prolongación del eje de la pista forma un ángulo de más de  $30^\circ$  con una pendiente de descenso que exceda de 6,5% o cuando se tengan maniobras visuales. Puesto que se asume que no se está en ninguno de los cuatro casos anteriores, la corrección tampoco es aplicable.

En este punto del diseño, se necesita realizar otras comprobaciones. La primera de ellas está asociada al tramo de aproximación intermedia y consiste en garantizar que el MOC es de 150 m en el área primaria, reduciéndose de forma lineal en el área secundaria. El proceso de comprobación es análogo a los anteriores. De nuevo, en el Anexo II (Apartado 7.2.1.1) se recoge el proceso con un mayor nivel de detalle.

Además de la comprobación anterior, en relación con el tramo de aproximación intermedia y con la determinación del IF, es necesario comprobar que para puntos cuya longitud sea inferior a la de  $FAS_8$  dentro del fragmento de mapa considerado, el MOC es de 300 m como mínimo. De esta manera, se facilita que se consiga dicho valor del MOC en el tramo anterior. En este caso, la restricción se cumple.

Por último, se determina el punto que pone fin al tramo de aproximación frustrada intermedia (FI). Para ello, se calcula la localización de este punto a partir de la ubicación del umbral de la pista 28. Esto se hace a partir de las escalas y de la dirección, ya calculadas. Por su parte, la elevación se calcula a partir de la distancia al SOC y asumiendo una pendiente de ascenso a partir del mismo de valor 2,5%.

Cabe destacar, que la distancia respecto del umbral se debe introducir como un valor negativo, puesto que se ha establecido desde el principio un criterio de signos que asume que las distancias positivas se corresponden con puntos que están situados más allá del umbral en el sentido de despegue.

$$Dist_{FI} = t$$

$$\phi_{FI} = \phi_{28} - \cos(\chi_{pista}) \times Dist_{FI} \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{FI} = \lambda_{28} - \sin(\chi_{pista}) \times Dist_{FI} \times Esc_{\lambda}$$

$$elev_{IF} = elev_{OCH} + 0,025 \times (|Dist_{FI}| - |Dist_{SOC}|)$$

Como se puede observar, la localización del punto depende del parámetro  $t$ . Por tanto, habrá que iterar modificando el valor de dicho parámetro (aumentándolo) hasta garantizar que en el punto FI se obtiene y se puede mantener un MOC de 50 m. Para ello, y de forma completamente análoga a los casos anteriores, se comprueba el franqueamiento de obstáculos recorriendo el mapa orográfico. A continuación, se comprobará para cada punto del terreno si está dentro del área de protección existente a partir del punto FI. El resto del proceso es idéntico al de los casos anteriores con la única salvedad de que el MOC en el área primaria es 50 m y que la reducción lineal del área secundaria irá entre los valores 0 y 50.

Con todo lo descrito anteriormente, se obtiene la ubicación de los puntos de referencia de los tramos analizados hasta el momento. Los resultados aparecen recogidos en la Tabla 14 y representados en la Figura 28.

<b>Punto</b>	<b>Localización</b>	
<b>OCH (MAPt)</b>	<b>Latitud</b>	38,8487 °
	<b>Longitud</b>	-3,9251 °
	<b>Altitud</b>	821,93 m
<b>FAF</b>	<b>Latitud</b>	38,8304 °
	<b>Longitud</b>	-3,8206 °
	<b>Altitud</b>	1350 m
<b>IF</b>	<b>Latitud</b>	38,7931 °
	<b>Longitud</b>	-3,6070 °
	<b>Altitud</b>	1350 m
<b>SOC</b>	<b>Latitud</b>	38,8577 °
	<b>Longitud</b>	-3,9770 °
	<b>Altitud</b>	821,93 m
<b>FI</b>	<b>Latitud</b>	38,8581 °
	<b>Longitud</b>	-3,9791 °
	<b>Altitud</b>	826,54 m

Tabla 14. Ubicación de los puntos de referencia de la pista 28 (I)

Obsérvese que se ha diseñado asumiendo que la OCH y la elevación del MAPt coinciden. En realidad, existe un margen entre ambos puntos. Sin embargo, este margen está basado en restricciones del explotador sobre características del equipo terrestre y de a bordo, calificaciones de la tripulación, actuaciones de la aeronave, condiciones meteorológicas o características del aeródromo, entre otros. Estas restricciones que impondrá el explotador tienen valores desconocidos a la hora de diseñar. Por tanto, se asume que el MAPt viene determinado por la elevación de la OCH.

Además, en el caso del FAF ha sido necesario redondear la elevación a los 50 m inmediatos, tal y como se especifica en la normativa.

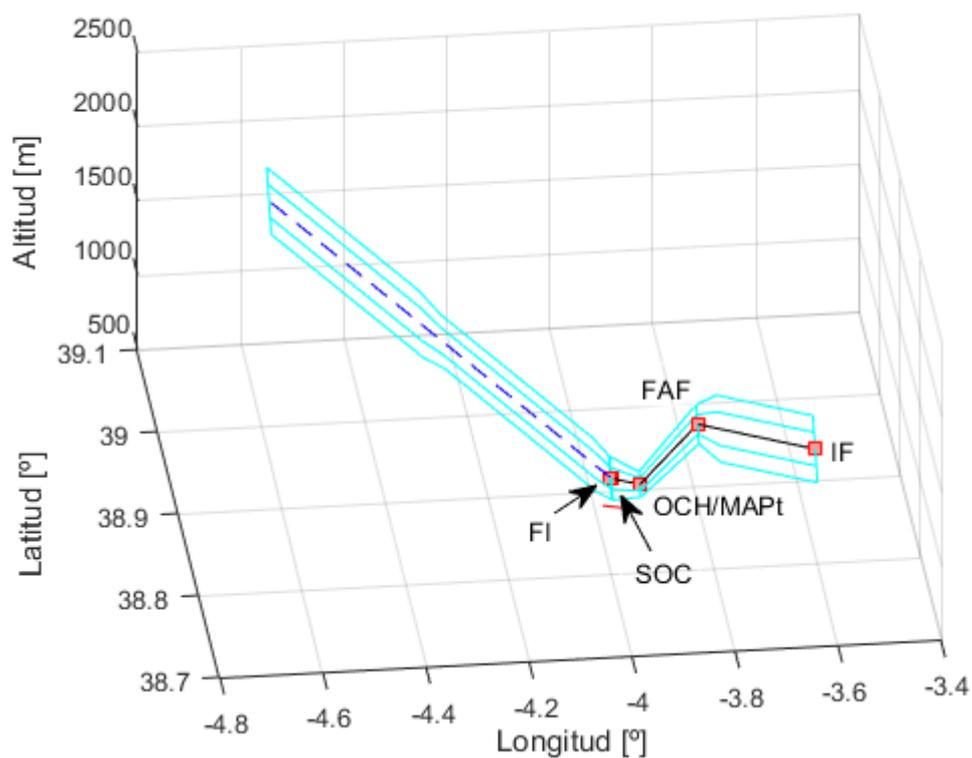


Figura 28. Llegada RNP de no precisión por la pista 28

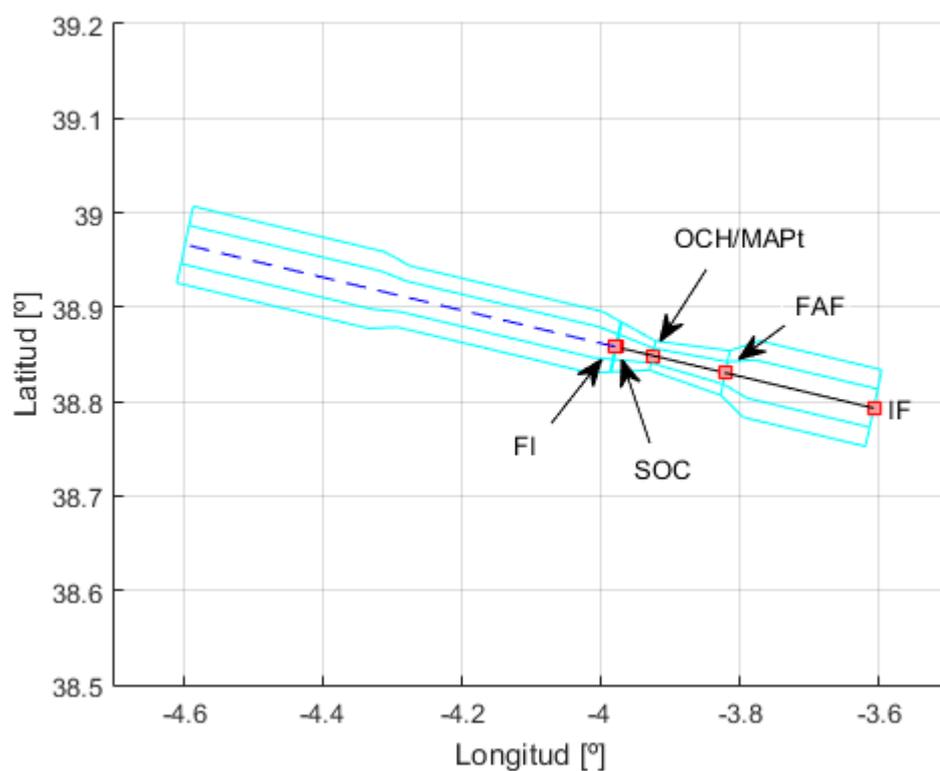


Figura 29. Vista cenital de la llegada por la pista 28

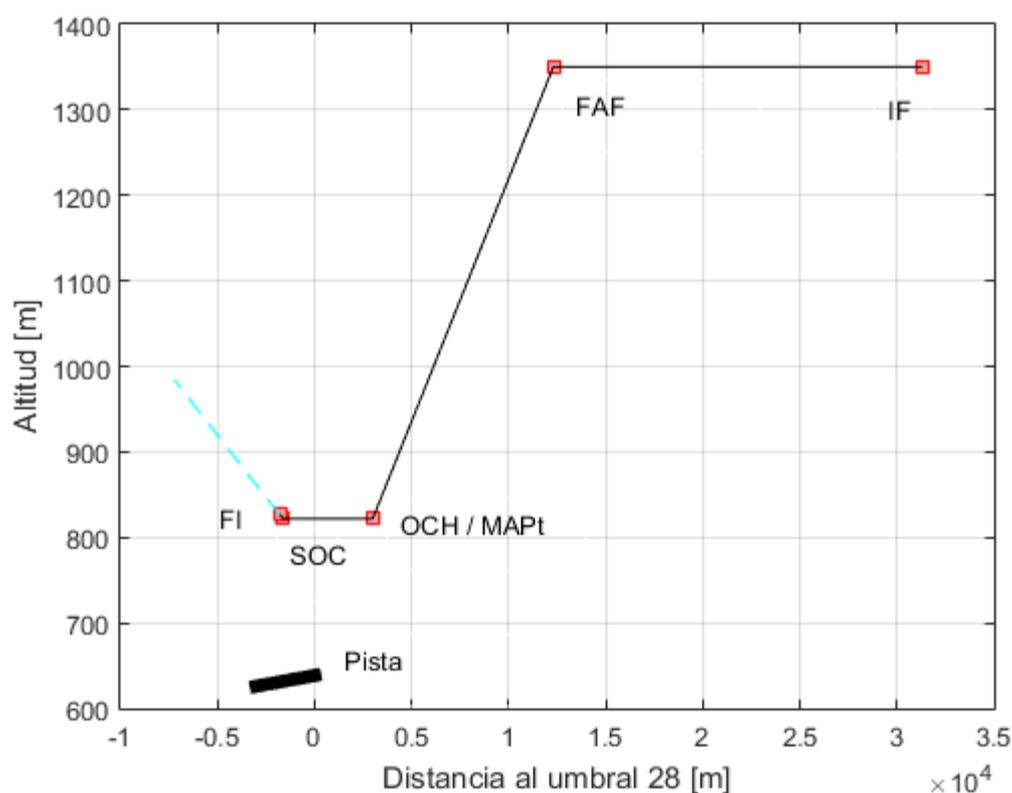


Figura 30. Perfil vertical de la llegada por la pista 28

### 3.1.2 Aproximación inicial y llegada

En este apartado, están contenidos aquellos tramos que se extienden desde el IF hasta aquel punto en el que se conecta con el tramo en ruta, que en este caso es CJN. Por tanto, el diseño de esta parte consiste en determinar la ubicación del IAF y de las pendientes asociadas, de forma que se permita alcanzar niveles de altitud adecuados. Hay que recordar que el procedimiento es RNP APCH en el tramo de aproximación inicial y RNAV 1 en el tramo de llegada.

Llegados a este punto, parece razonable definir la ruta que se sigue en estos tramos y que permite conectar el punto de entrada a la STAR (CJN) con los tramos finales de la llegada. En este caso, se opta por llegar a CJN y continuar por la aerovía G5 hasta la altura de Valdepeñas aproximadamente. En ese punto, el nivel de vuelo asociado será FL 100. Por tanto, será necesario empezar a descender con una pendiente del 6,6 % para alcanzar el IF en condiciones adecuadas. Este descenso se hace con la aeronave alineada con la pista. La Figura 31, recoge el camino descrito. Obsérvese que se ha decidido realizar un único viraje.

Una vez definida la ruta es necesario resaltar que existe un tramo común con la STAR 4 de Madrid que se recoge en el Anexo I de este documento. Este tramo va desde CJN a NASOS. En él, habría que considerar una diferencia entre altitudes. En el caso de la STAR 4 de Madrid la máxima altitud en ese tramo es de FL 210. En la ruta que se está diseñando el nivel de vuelo alcanzado en ese tramo es de FL 100 como mínimo, que es lo que exige G5. Es decir, hay margen suficiente para que no existan problemas.

En cuanto a los sectores de control, cabe destacar que el aeródromo se encuentra dentro del sector LECSBA1. Por tanto, la llegada trazada termina en este sector. Previamente, habrá atravesado los sectores LECMCJI, LEMDALN y LEMDERS. En ningún caso, se exceden los límites que impone la altitud mínima de sector.

Al igual que en los tramos anteriores, un aspecto determinante en el diseño que se plantea es el franqueamiento de obstáculos. Por ello, resulta lógico que el primer paso para determinar los puntos mencionados y las pendientes de los tramos correspondientes sea definir las áreas de franqueamiento de obstáculos. Se dispone de un área primaria y un área secundaria. La anchura del área secundaria es la mitad de la anchura total (que incluye el área secundaria y el área primaria). Por su parte, se define un valor del margen mínimo del franqueamiento de obstáculos (MOC) que tiene que ser respetado en el área primaria y que evoluciona de forma lineal a lo largo de la anchura del área secundaria, siendo cero en el extremo exterior de la misma.

Las semianchuras de las áreas de protección se recogen en la Tabla 13 y en la Tabla 15. En ellas, se muestran también los valores de las tolerancias que serán relevantes en la construcción de las áreas. En ese sentido y como se puede observar, existen dos tramos con diferentes anchuras. El primero de ellos, comienza en el IF y presenta una semianchura de 4630 m. A los 56 km del ARP, esa anchura varía de forma lineal hasta alcanzar el valor de 9260 m. La conexión de un tramo y otro se hace con un ángulo de 30°.

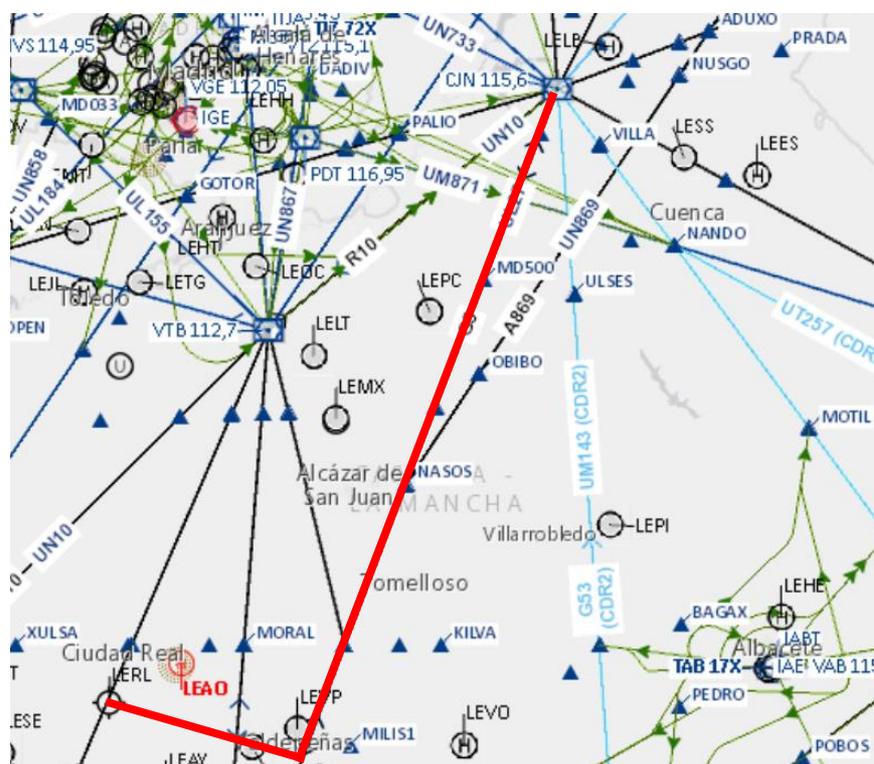


Figura 31. Llegada por la pista 28. Trayectoria

En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)			STAR/IF/LAF/SID (<56 km del ARP)			SID (<28 km del ARP)		
XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W
3,70	2,96	9,26	1,85	1,48	4,63	1,85	1,48	3,70

Tabla 15. Anchuras de las áreas de franqueamiento de obstáculos para RNAV 1 [13]

A continuación, se recogen aquellas características relevantes que menciona el documento 8168 de cada uno de los tramos bajo consideración. Posteriormente, se resumirán las hipótesis empleadas, se desarrollará el área de protección de virajes correspondiente y se describirá el procedimiento de comprobación del MOC.

- **Tramo de aproximación inicial.** El tramo de aproximación inicial es aquel en el que se realizan las maniobras necesarias para entrar en el tramo intermedio. En este caso, este tramo comienza en el punto de referencia de aproximación inicial (IAF) y termina en el punto de referencia de aproximación intermedia (IF). La longitud del tramo no está establecida por normativa, aunque debería ser la suficiente para permitir los cambios de altitud necesarios. Además, la pendiente de descenso óptima de este tramo es del 4%. Sin embargo, esta pendiente puede ser incrementada hasta un valor del 13,2%. Por último, el MOC será de 300 m
- **Tramo de llegada.** El tramo de llegada puede ser de dos tipos: llegadas por instrumentos normalizadas y llegadas omnidireccionales o por un sector. En este caso, se diseña una llegada normalizada por instrumentos (STAR). En caso de diseñar una STAR, esta debe ser sencilla y de fácil comprensión, utilizando los puntos de referencia y de recorrido estrictamente necesarios. Además, este tramo debería estar preparado para el mayor número de categorías de aeronaves posible.

El tramo debe comenzar en un punto de referencia, por ejemplo, una instalación de radioayuda. Además, la llegada debe garantizar la transición desde la fase de ruta hasta la fase de aproximación inicial. En el caso RNAV 1, las áreas de protección se definen tal y como se indicó anteriormente (Tabla 15).

Por su parte, el MOC debe ser de al menos 300 m en el área primaria. En el área secundaria, se debe disponer de un MOC de 300 m en el borde interior, pero este MOC se irá reduciendo de forma lineal hasta cero en el borde exterior.

### 3.1.2.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño que se presentan en este apartado permiten cerrar el diseño que se está planteando. Dichas hipótesis y decisiones son:

- Se diseña una llegada normalizada por instrumentos (STAR) desde CJN.
- La pendiente de descenso es del 6,6% en el tramo de aproximación inicial.
- El tramo de aproximación inicial se diseña en base a criterios RNP APCH y el de llegada se hace en base a criterios RNAV 1.
- Se asume la longitud del tramo de aproximación inicial de 11100 m para que, con la pendiente del 6,6% se alcance una altitud adecuada de salida de G5 (FL100).
- El vuelo es horizontal desde CJN hasta salir de la aerovía G5, donde comenzará el descenso.
- Se utiliza el método perfeccionado para la determinación del área de protección y el método de la espiral de vientos para la construcción del borde exterior del área de viraje.
- El tramo aproximación inicial se considera alineado con la pista.

### 3.1.2.2 Construcción del área de protección de virajes

Para determinar las áreas de viraje se tendrán en cuenta aquellos criterios descritos en el capítulo 2 de la Parte III, Sección 2 del documento 8168 de la OACI [13]. En este caso, se tiene un único viraje. La altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo tienen una influencia considerable en la construcción del mismo. Téngase en cuenta que, en este caso, se diseña el viraje con los criterios de aproximación inicial, ya que, aunque este se sitúa en el tramo de ruta, existe una distancia inferior a los 46 km desde el punto de viraje hasta el IAF, situado a 11100 m del IF siguiendo el eje de la pista en sentido contrario a la aproximación.

La velocidad indicada (IAS) considerada es de 465 km/h, que es la velocidad de aproximación inicial recomendada por el documento anteriormente mencionado. A partir de ella se puede calcular la TAS con la expresión siguiente. En esta expresión se considera una altitud de 2864,6 m, que es la altitud del punto de salida de G5 o punto de viraje. También hay que definir la variable VAR. Esta variable hace referencia a la diferencia de temperatura en relación con las de la ISA en °C. Aunque el documento 8168 de la OACI establece que los virajes se calculen con ISA+15°C, se va a asumir que VAR es de 23,05°C. Esto se hace así porque la temperatura de referencia del aeropuerto según la AIP es de 34°C. Por tanto y en vista de las altas temperaturas que se dan en Ciudad Real, se opta por tomar la opción más restrictiva.  $H$  sería la altitud del punto de viraje en metros.

$$TAS = IAS \times \frac{1000}{3600} \times 171233 \times \frac{((288 + VAR) - 0,006496 \times H)^{0,5}}{(288 - 0,006496H)^{2,628}}$$

$$VAR = T_{ref} - (T_0 - 6,5 \times 10^{-3} \times H_{aeródromo}) = 23,05 \text{ °C}$$

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de 25°, ya que así lo marca la norma para este tramo. El régimen de viraje (R) viene definido por la siguiente expresión, estando su resultado expresado en ‰. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de las direcciones de las rectas que definen la aerovía G5 y la trayectoria seguida por la aeronave desde que sale de ella. Su valor es de  $\alpha = 82,07^\circ$ .

$$R = \frac{6355 \times \tan \mu}{\pi V}$$

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma. La V representa a la TAS y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. El radio de viraje para un valor dado de R se calcula con la siguiente fórmula y su resultado, en este caso, es de 5262,6 m.

$$r = \frac{V}{20\pi R}$$

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral, del tiempo de reacción del piloto, del cronometraje del alejamiento y de la tolerancia de rumbo de la aeronave. En este caso, su valor es de 26 segundos volando a la velocidad (TAS) descrita anteriormente. Por su parte, hay que tener en cuenta la ATT propia del tramo, es decir, un valor de 1480 m, como se deduce de la Tabla 15.

A partir de todos los parámetros anteriores, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. El resultado obtenido se muestra en la Figura 32. En ella, se representa en cian el área definida en el apartado anterior para el resto de los tramos de aproximación, y en rojo el área de protección que se define en este apartado. Además, se presenta en verde la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que será clave para la determinación del MOC. El proceso de construcción en detalle se encuentra recogido en el Anexo III del presente documento (Apartado 7.3.1.1).

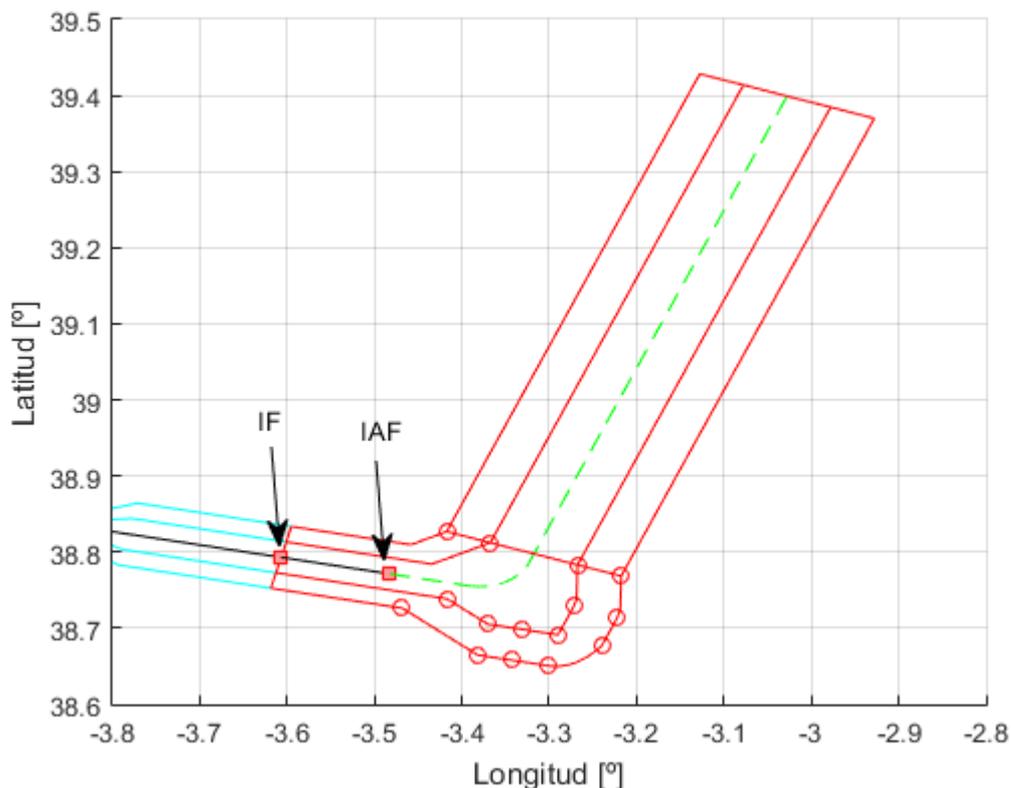


Figura 32. Área de viraje para la llegada por la pista 28

Obsérvese que la trayectoria nominal sigue un arco de círculo en el viraje que estaría deformado debido a las escalas utilizadas. Este arco está delimitado por los puntos  $A_p$  y  $K_p$ , que son los puntos de tangencia del arco en los respectivos radiales que están intersectando. El arco se calcularía a partir de las coordenadas del centro de la elipse que pasa por  $K_p$  o  $A_p$ .

Por su parte, la elevación de los puntos viene determinada a partir de la elevación del punto  $IF$ , asumiendo una pendiente del 6,6% y midiendo la longitud de la curva seguida. Esta pendiente se mantiene desde el punto  $A_p$ . Previamente, se asume que el vuelo es horizontal, aunque realmente no es así. Sin embargo, como la aeronave puede llegar con cualquier pendiente desde  $CJN$  siempre que esté dentro de los límites de la aerovía  $G5$ , se asume vuelo horizontal porque, respecto a obstáculos, es lo más restrictivo.

### 3.1.2.3 Procedimiento de comprobación del MOC

La comprobación del MOC es análoga a las realizadas anteriormente, es decir, hay que recorrer el terreno y para cada punto se comprueba si está dentro de las áreas de protección. En caso afirmativo, se procede a verificar que se cumple con la restricción del MOC. Como en el resto de las comprobaciones, el proceso se encuentra descrito en detalle en el Anexo II (Apartado 7.2.1.2).

Además, hay que resaltar que se ha ido comprobando de forma progresiva. Es decir, se han hecho dos comprobaciones de los fragmentos del terreno que se muestran en la Figura 33 y en la Figura 34. La mínima distancia entre los obstáculos y la trayectoria es de unos 500 m en ambas partes. No es necesario extender la comprobación al resto del área porque ya se tiene una distancia lo suficientemente alta para que no haya problemas y, por inspección visual en los mapas de Google e Insignia, se llega a la conclusión de que no existen zonas que puedan suponer un riesgo. Por tanto, se concluye que el procedimiento diseñado es seguro. La Tabla 16 contiene las elevaciones y las coordenadas de los puntos de referencia del procedimiento.

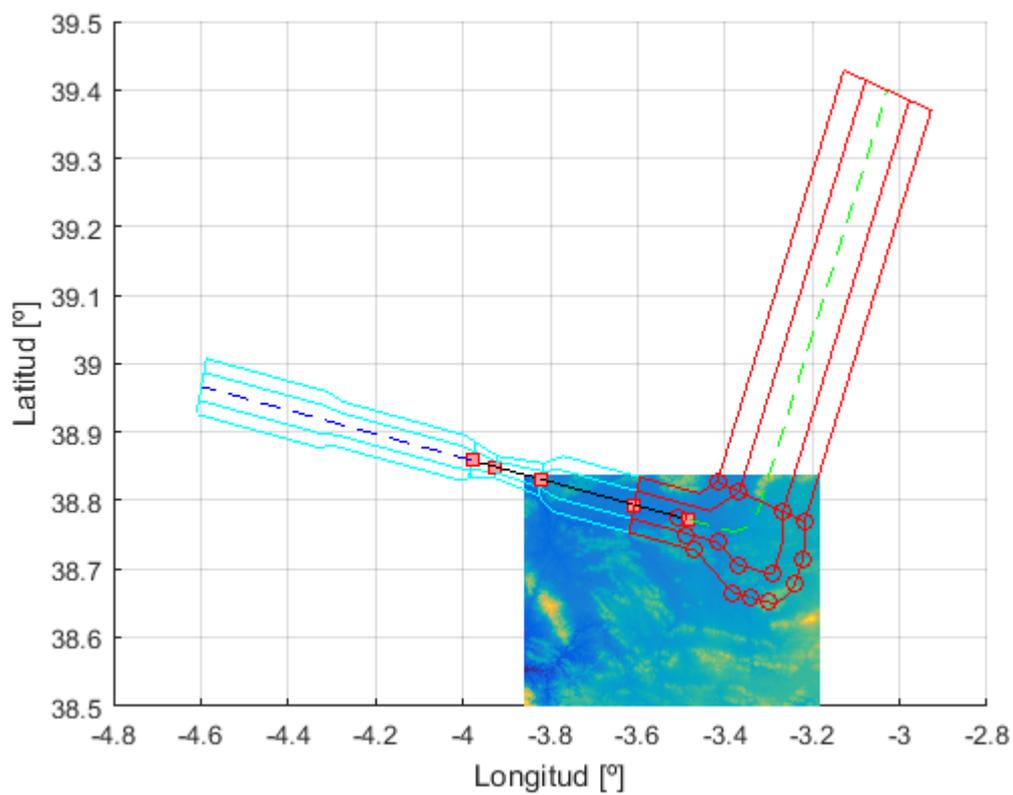


Figura 33. Terreno analizado (I). Llegada por la pista 28

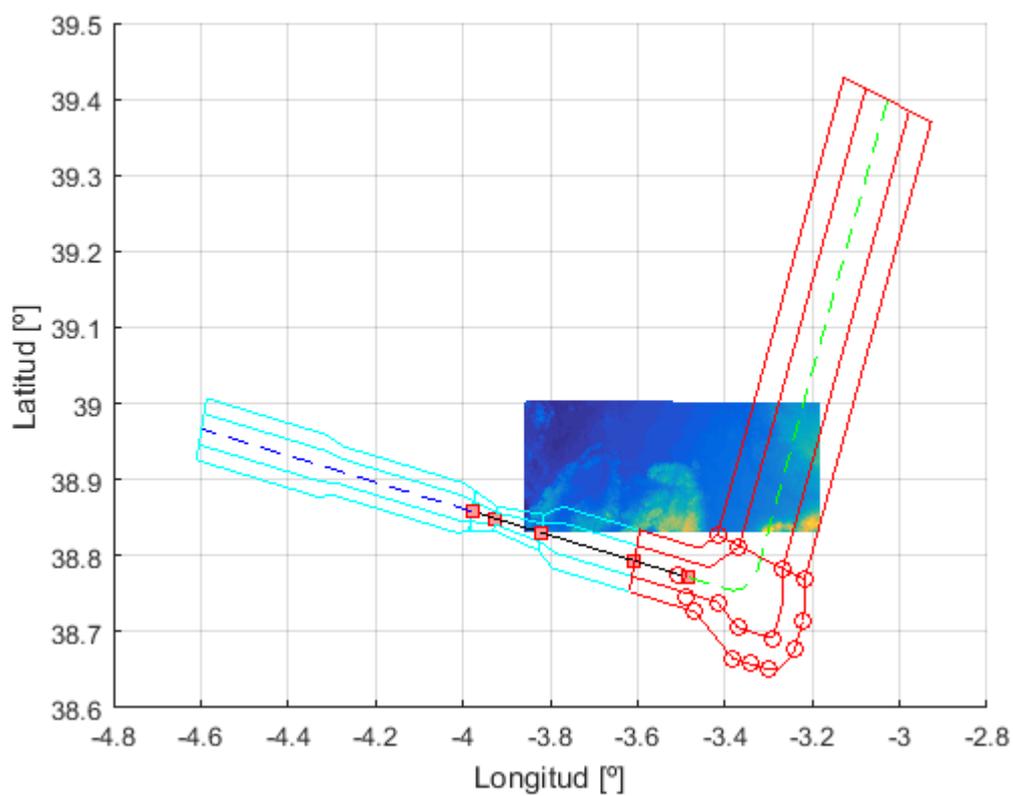


Figura 34. Terreno analizado (II). Llegada por la pista 28

<b>IAF</b>	Longitud	-3,4822 °
	Latitud	38,7713 °
	Altitud	2041,9 m
<b>K<sub>p</sub></b>	Longitud	-3,3935 °
	Latitud	38,7558 °
	Altitud	2562,3 m
<b>A<sub>p</sub></b>	Longitud	-3,3235 °
	Latitud	38,7853 °
	Altitud	3059,9 m
<b>K<sub>cent</sub></b>	Longitud	-3,3175 °
	Latitud	38,7978 °
	Altitud	3059,9 m
<b>NASOS</b>	Longitud	-3,0278 °
	Latitud	39,3991 °
	Altitud	3059,9 m
<b>CJN</b>	Longitud	-2,5447 °
	Latitud	40,3718 °
	Altitud	3059,9 m

Tabla 16. Puntos relevantes para la llegada por la pista 28

### 3.1.3 Fase final de la aproximación frustrada

El tramo de aproximación frustrada final se extiende hasta el punto donde puede comenzar una nueva aproximación, un circuito de espera o un retorno a un vuelo en ruta. Además, en esta fase se pueden realizar virajes. Este tramo final de la aproximación frustrada comienza en el punto donde se alcanza y puede mantenerse un margen mínimo de franqueamiento de obstáculos de 50 m. De esa forma, el MOC en esta fase debe ser de 50 m en el área primaria y contemplar una reducción lineal en el área secundaria hasta cero.

En este caso, se tiene una aproximación frustrada con viraje en la que se pretende llevar a la aeronave hasta el IAF de esta misma llegada. Bien es cierto que, en la práctica, la aproximación frustrada conecta con una STAR diferente, en general, o incluso lleva a la aeronave hasta un punto de referencia donde pueda volver a la fase de ruta. Sin embargo, por simplicidad se decide diseñar la frustrada con conexión a la misma STAR de la que procede.

Por otro lado, en cuanto a pendiente, el documento 8168 especifica que los criterios válidos para este tramo son los establecidos para la fase intermedia. La decisión que se toma al respecto es seguir con la pendiente de subida del 2,5% de la fase intermedia hasta alcanzar la altitud del IAF. A partir de entonces, la pendiente será nula y el vuelo se convertirá en horizontal.

Con las consideraciones anteriores, se procede a diseñar una ruta de aproximación frustrada que parta del punto FI y llegue al punto IAF. Esta trayectoria, que se recoge en la Figura 35, ha tenido que prestar atención a varios aspectos. El primero de ellos, va asociado a los espacios aéreos LER147 y LED25. El espacio LER147 se extiende desde la superficie hasta los 4500ft de altitud, mientras que el LED25 abarca hasta FL70. En vista de que la altitud del IAF de esta salida está alrededor de los 2000 m, parece razonable que exista la necesidad de rodear estos espacios aéreos para no invadirlos.

Por otra parte, hay que tener presente que la frustrada pasa por debajo de varias aerovías. En todos los casos, la aeronave está por debajo del nivel de vuelo mínimo que limita a la aerovía. Por tanto, no existen problemas asociados a este evento. De hecho, esas diferencias en altitudes hacen que tampoco existan interacciones con las SID/ STAR de los aeropuertos circundantes.

Por último, hay que tener en cuenta que, para evitar que los puntos de recorrido estén situados tan cercanos entre sí que los sistemas RNAV los pasen de largo, existen unas distancias mínimas de separación entre puntos de recorrido sucesivos. En este caso, en el que se asume que los puntos de recorrido son de paso, la distancia mínima está compuesta por la suma de las distancias mínimas de estabilización de cada punto, entendiendo esta última como aquella distancia entre el punto de recorrido y el punto en el que la trayectoria se une tangencialmente a la derrota nominal (Figura 36).

Debido a la trayectoria descrita en la Figura 35, se tienen tres segmentos en los que hay que comprobar estas distancias mínimas. Siguiendo el sentido de las agujas del reloj, se tendrán cuatro vértices (1, 2, 3 y 4). La Tabla 17 presenta las distancias de estabilización mínimas para cada uno de estos vértices. Obsérvese que tanto la TAS como el ángulo de inclinación lateral son los mismos para todos los puntos, tal y como se justificará posteriormente. A partir de estas distancias mínimas de estabilización, se obtienen las distancias mínimas entre puntos sucesivos. La Tabla 18 recoge los resultados de las mismas y la distancia real existente en la trayectoria diseñada. Como se puede ver, en todos los casos las distancias reales son muy superiores a las exigidas. Es decir, no existen problemas.

Vértice	Parámetros necesarios			Distancia mínima de estabilización [km]
	Velocidad (TAS) [m/s]	Ángulo de inclinación [°]	Cambio de rumbo [°]	
1	148,21	15	102,78	12,8
2			59,79	6,1
3			86,55	10,0
4			110,89	15,2

Tabla 17. Distancias mínimas de estabilización según el documento 8168 de OACI

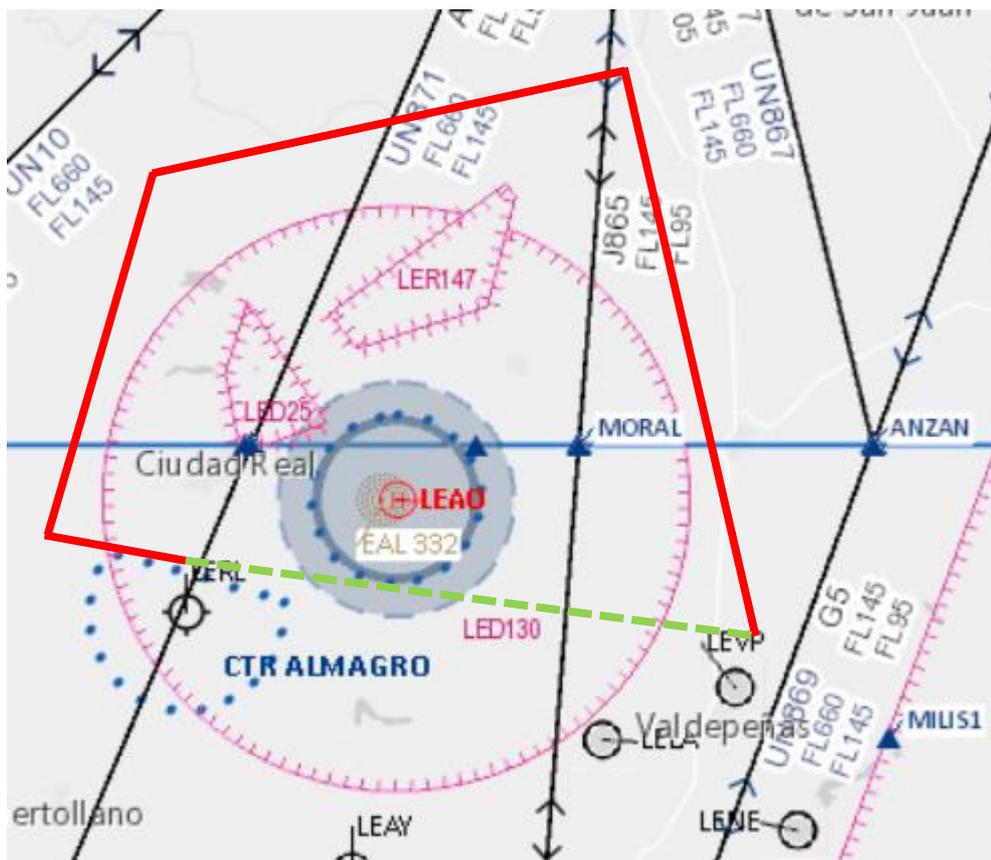


Figura 35. Fase final de aproximación frustrada para la salida por la pista 28. Trayectoria

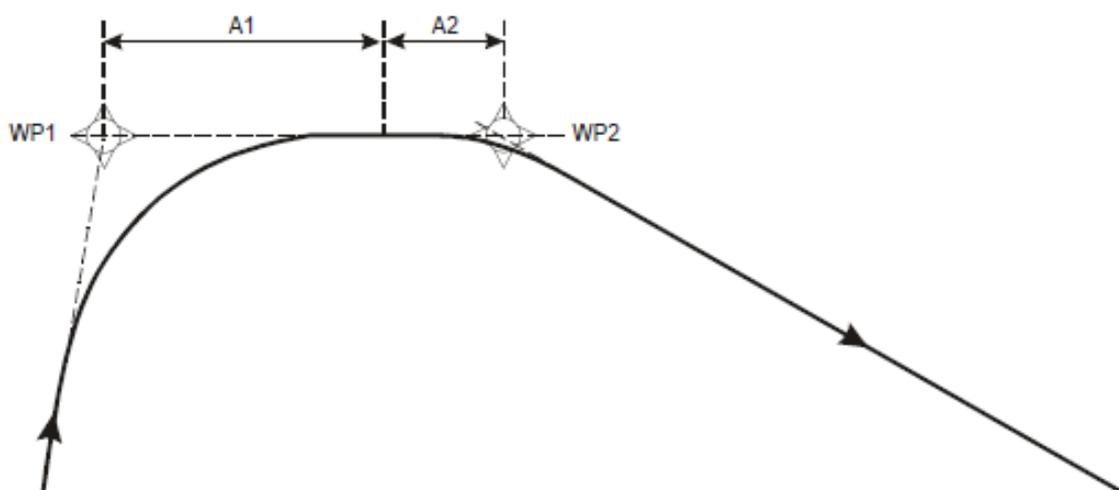


Figura 36. Distancia mínima entre dos puntos de recorrido de paso

Segmento	Distancia mínima [km]	Distancia existente [km]
1 – 2	18,9	48,7
2 – 3	16,1	42,6
3 – 4	25,2	64,5

Tabla 18. Comprobación de las distancias mínimas entre puntos de recorrido consecutivos

A continuación, se procederá a la construcción del área de protección del primer viraje y, posteriormente, se comprobará el MOC en esa zona. Sin embargo, antes de esto, se recogerán las hipótesis que han sido y serán empleadas en el diseño de esta fase del procedimiento.

### 3.1.3.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño que se presentan en este apartado permiten cerrar el diseño que se está planteando. Dichas hipótesis y decisiones son:

- La pendiente de subida es del 2,5% hasta alcanzar la altitud del IAF. A partir de ahí, el vuelo es horizontal.
- Todos los puntos de recorrido son de paso, ninguno de sobrevuelo.
- La conexión se realiza con el IAF de la misma llegada.
- Se utilizan el método perfeccionado para la determinación del área de protección y el método de la espiral de vientos para la construcción del borde exterior del área de viraje.

### 3.1.3.2 Construcción del área de protección de virajes

Para determinar las áreas de viraje se tienen en cuenta aquellos criterios descritos en el capítulo 2 de la Parte I, Sección 4, Capítulo 6.4 del documento 8168 de la OACI [13] que serán complementados con la información de la Parte III del mismo documento, referida a navegación de área. A la hora de construir un área de protección de virajes hay que considerar parámetros tales como, la altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo, que tienen una influencia considerable. En este caso, se va a construir el área asociada al primer viraje realizado.

La velocidad indicada (IAS) considerada es de 490 km/h, que es la velocidad de aproximación frustrada recomendada por el documento anteriormente mencionado. A partir de ella se puede calcular la TAS con la expresión del apartado anterior (3.1.2.2). En esta expresión se considera una altitud de 946 m, que es la altitud establecida por la OACI para el cálculo de las protecciones de viraje en aproximación frustrada. Esta altitud se corresponde con la elevación del aeródromo y 300 m adicionales. Sin embargo, cabe destacar que para la comprobación de obstáculos sí que se considera la altitud real a la que estaría la aeronave, que es superior a la anterior. También hay que definir la variable VAR, que resulta ser de 23,05 °C, debido a las consideraciones tenidas en cuenta en el anterior apartado. Esta variable hace referencia a la diferencia de temperatura en relación con las de la ISA en °C.  $H$  sería la altitud del punto de viraje en metros.

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de  $15^\circ$ , como indica la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la misma expresión del apartado 3.1.2.2, estando su resultado expresado en ‰. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de las direcciones de las rectas que definen la aerovía G5 y la trayectoria seguida por la aeronave hasta interceptarla. Su valor es de  $\alpha = 102,78^\circ$ .

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma. La V representa, de nuevo, a la TAS, y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. El radio de viraje para un valor dado de R se calcula de la misma forma que en el apartado 3.1.2.2, siendo su resultado de 8359,8 m.

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral y del tiempo de reacción del piloto. En este caso, los efectos del cronometraje del alejamiento y de la tolerancia de rumbo de la aeronave no aplican. El valor de FTT es, por tanto, de 6 segundos volando a la velocidad (TAS) descrita anteriormente. Por su parte, hay que tener en cuenta la ATT propia del tramo, es decir, un valor de 1480 m, como se deduce de la Tabla 13.

A partir de todos los parámetros anteriores, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. El proceso de construcción en detalle se encuentra recogido en el Anexo III del presente documento (Apartado 7.3.1.2).

El resultado obtenido se muestra en la Figura 37. En ella, se representa en cian el área definida en el apartado anterior para el resto de los tramos de aproximación, y en rojo el área de protección que se define en este apartado. Además, se presenta en verde la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que será clave para la comprobación del MOC, y en azul los puntos SP1, SP2, SP3 y SP4 que dan lugar a los virajes. Finalmente, se destacan, en magenta, los espacios aéreos comentados anteriormente.

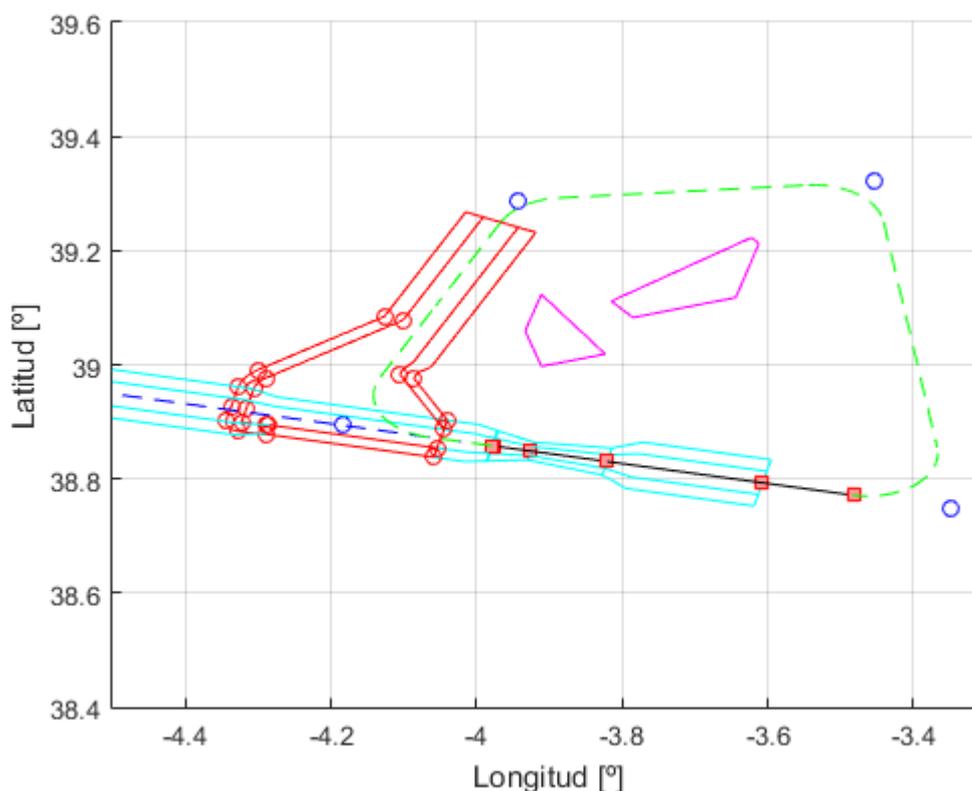


Figura 37. Área de viraje para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 28

De nuevo, la trayectoria nominal estaría delimitada por los puntos  $A_p$  y  $K_p$ , que son los puntos de tangencia del arco en los respectivos radiales que están intersectando. El arco se calcularía a partir de las coordenadas del centro de la elipse que los une. Además, cabe destacar que las diferencias entre los parámetros de viraje asociados a los cuatro virajes existentes están localizadas en el ángulo de viraje y en las distancias desde los puntos A y K exteriores al punto de viraje  $SP_i$ . El resto de los parámetros son idénticos en todos ellos.

Por su parte, la elevación de los puntos viene determinada a partir de la elevación del punto  $FI$ , asumiendo una pendiente del 2,5% y midiendo la longitud de la curva seguida. Esta pendiente se mantiene hasta el punto destacado en negro. Posteriormente, se asume que el vuelo es horizontal a la altitud del IAF.

### 3.1.3.3 Procedimiento de comprobación del MOC

De nuevo, la comprobación del MOC es análoga a la realizada anteriormente, es decir, hay que recorrer el terreno y para cada punto se comprueba si está dentro de las áreas de protección. En caso afirmativo, se procede a verificar que se cumple con la restricción del MOC. Como en el resto de las comprobaciones, el proceso se encuentra descrito en detalle en el Anexo II (Apartado 7.2.1.3).

Además, hay que resaltar que se ha ido comprobando de forma progresiva. Es decir, se han hecho dos comprobaciones de los fragmentos del terreno que se muestran en la Figura 38 y en la Figura 39. La mínima la distancia entre los obstáculos y la trayectoria es de unos 55 m en el primero de esos fragmentos y de 975 m en el segundo. No es necesario extender la comprobación al resto del área porque ya se tiene una distancia lo suficientemente alta para que no haya problemas y, por inspección visual en los mapas de Google e Insignia, se llega a la conclusión de que no existen zonas que puedan suponer un riesgo. Por tanto, se concluye que el procedimiento diseñado es seguro. La Tabla 19 contiene las elevaciones y las coordenadas de los puntos de referencia del procedimiento.

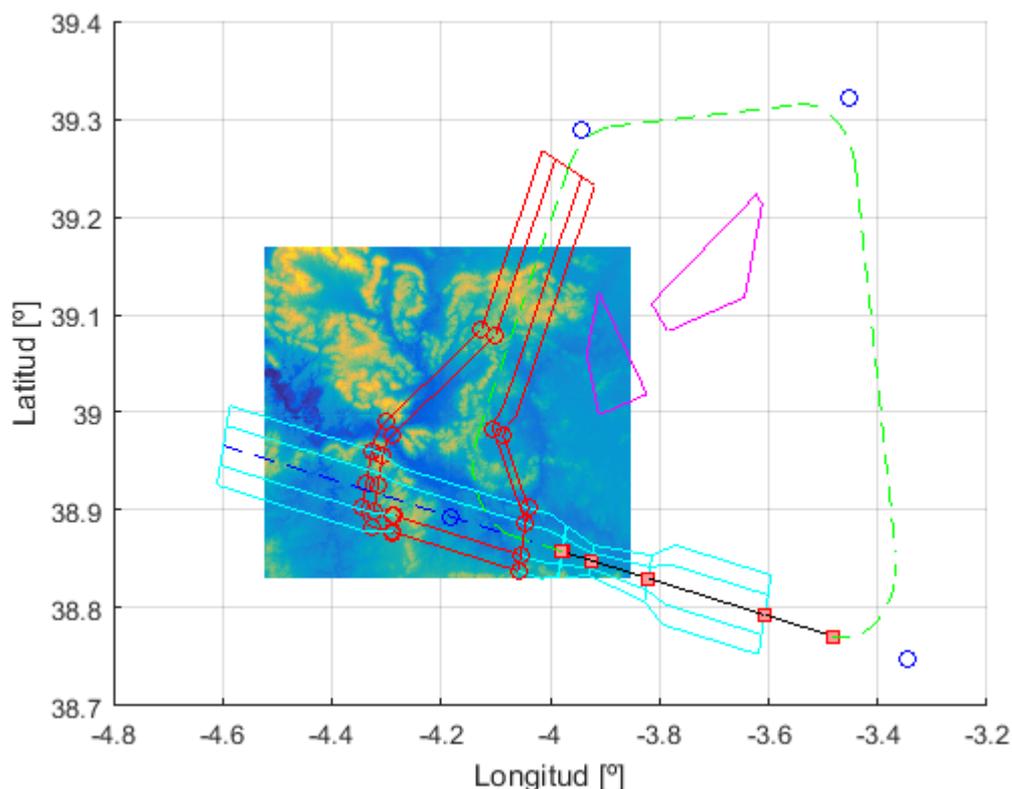


Figura 38. Terreno analizado (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28

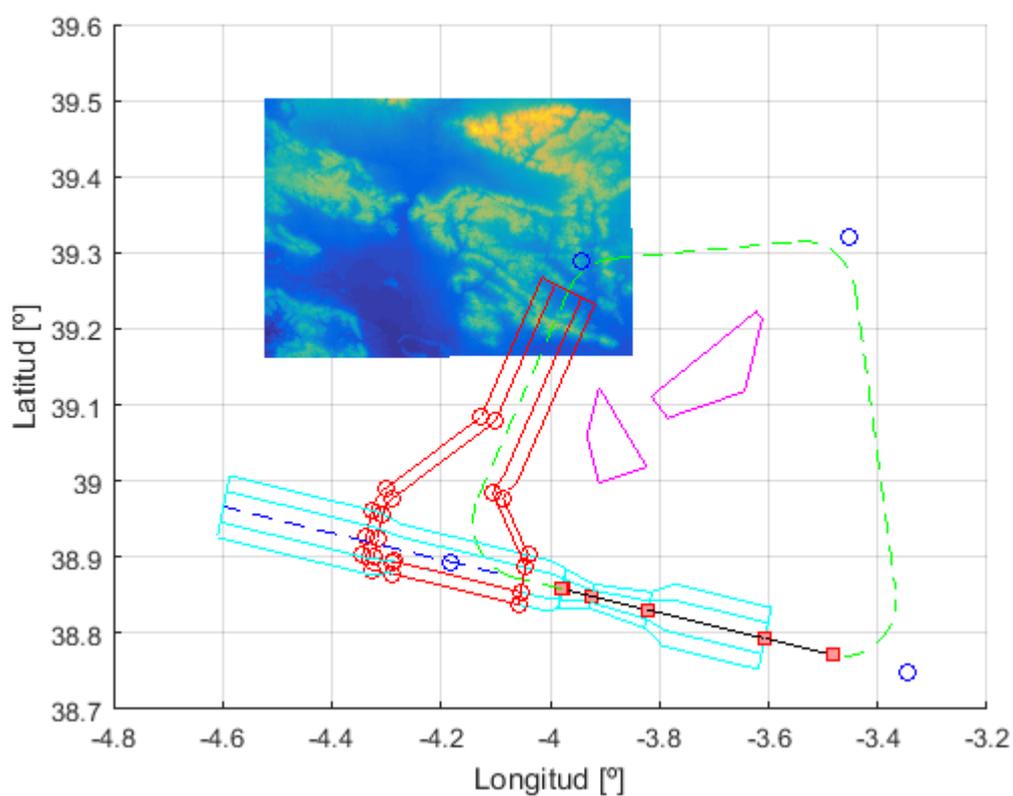


Figura 39. Terreno analizado (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28

<b><i>FI</i></b>	Longitud	-3,9791 °
	Latitud	38,8581 °
	Altitud	826,54 m
<b><i>K<sub>p</sub></i></b>	Longitud	-4,0660 °
	Latitud	38,8733 °
	Altitud	1019,8 m
<b><i>A<sub>p</sub></i></b>	Longitud	-4,1319 °
	Latitud	38,9786 °
	Altitud	1394,7 m
<b><i>K<sub>cent</sub></i></b>	Longitud	-4,0493 °
	Latitud	38,8704 °
	Altitud	982,85 m

$K_{p2}$	Longitud	-3,9665 °
	Latitud	39,2497 °
	Altitud	2041,9 m
$A_{p2}$	Longitud	-3,8876 °
	Latitud	39,2922 °
	Altitud	2041,9 m
$K_{p3}$	Longitud	-3,5443 °
	Latitud	39,3147 °
	Altitud	2041,9 m
$A_{p3}$	Longitud	-3,4409 °
	Latitud	39,2507 °
	Altitud	2041,9 m
$K_{p4}$	Longitud	-3,3673 °
	Latitud	38,8555 °
	Altitud	2041,9 m
$A_{p4}$	Longitud	-3,4837 °
	Latitud	38,7716 °
	Altitud	2041,9 m

Tabla 19. Puntos relevantes para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 28

### 3.1.4 Resumen del procedimiento

En este apartado se incluye un resumen del procedimiento. Dicho resumen está compuesto por dos figuras: una en la que se recogen los tramos de aproximación inicial, intermedia, final y frustrada (Figura 40) y otra que muestra el tramo de llegada (Figura 41). Cabe destacar que tanto las coordenadas como la altitud de los puntos se han ido mostrando a lo largo del apartado. Sin embargo, en la Tabla 20 se recopilan las altitudes de los puntos más relevantes que junto a las figuras anteriormente mencionadas permiten tener una visión general del procedimiento.

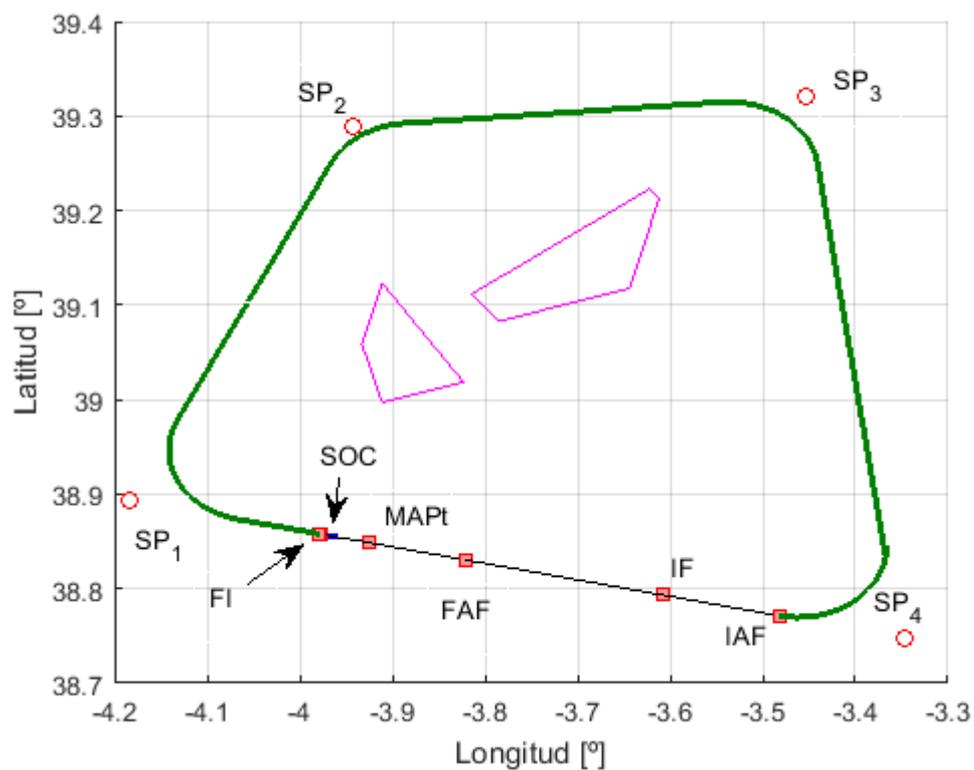


Figura 40. Tramos de aproximación inicial, intermedia, final y frustrada. Llegada por la pista 28

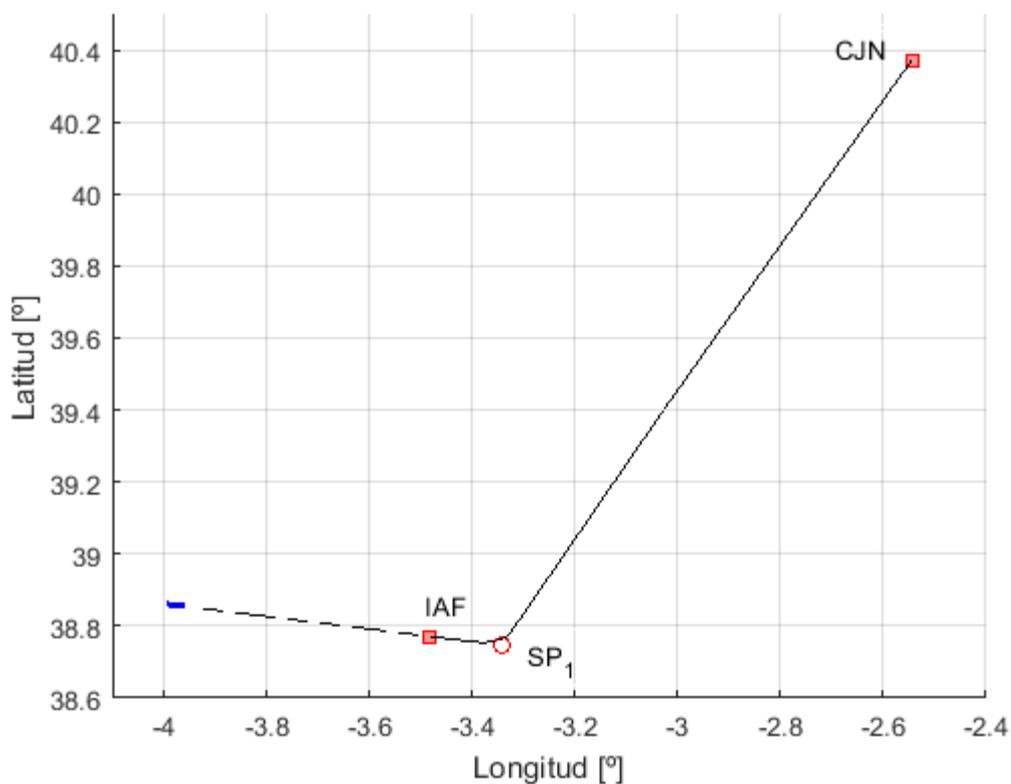


Figura 41. Tramo de llegada. Llegada por la pista 28

<b>Punto</b>	<b>Altitud [m]</b>
<b>SP<sub>1</sub></b> (Frustrada)	1281,5
<b>SP<sub>2</sub></b> (Frustrada)	2041,9
<b>SP<sub>3</sub></b> (Frustrada)	2041,9
<b>SP<sub>4</sub></b> (Frustrada)	2041,9
<b>SP<sub>1</sub></b> (Llegada)	2864,6
<b>SOC</b>	821,9
<b>FI</b>	826,5
<b>MAPt</b>	821,9
<b>FAF</b>	1350
<b>IF</b>	1350
<b>IAF</b>	2041,9
<b>CJN</b>	3059,9

Tabla 20. Altitudes de los puntos más relevantes. Llegada por la pista 28

### 3.2 Llegada convencional de precisión por la pista 10

En el caso de diseñar un procedimiento de aproximación convencional de precisión, es necesario tener en cuenta aquellas consideraciones generales a las que hace referencia el documento 8168, en el volumen II, parte I, sección 4 [13]. En este caso, esta información se complementa con la parte II, sección 1, capítulo 1 de ese mismo documento, que se refiere a los procedimientos de navegación convencional y, en concreto, a las aproximaciones de precisión por instrumentos (ILS). Además, hay que tener en cuenta que el procedimiento que se pretende diseñar en este apartado debe conectar con CJN, al igual que el anterior. Las razones existentes para la selección de este punto son las comentadas en el diseño de la otra llegada.

A continuación, se va a dividir el proceso de diseño del procedimiento en dos partes, al igual que ocurría en el apartado 3.1. En la primera parte, de nuevo, se tendrán en cuenta los tramos de aproximación intermedia, final y frustrada (hasta el tramo intermedio inclusive). En la segunda parte, de la misma manera, se tendrá en cuenta el resto de los tramos en los que se llevará a cabo un primer diseño manual (en el apartado 3.2.2) y, posteriormente, en el apartado 5, se realizará un proceso de diseño más automatizado en el que se pasará a optimizar las rutas en base a ciertos criterios que se especificarán más adelante.

### 3.2.1 Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada

Como se ha especificado anteriormente, en esta primera parte, están contenidos aquellos tramos que se extienden desde el IF hasta el final del tramo intermedio de frustrada, donde se debe garantizar un MOC de 50 m. Por tanto, el diseño de esta parte consiste en determinar la ubicación de estos dos puntos, junto con la ubicación del FAP, el DA/H y el SOC (nótese que FAP y DA/H son específicos de las aproximaciones de precisión). Además, hay que determinar las pendientes asociadas a cada tramo que dan lugar al perfil vertical del procedimiento. En este caso, se asume que el procedimiento es una aproximación convencional de precisión basada en una radioayuda ILS (Sistema de aterrizaje por instrumentos). Por tanto, debido a que el tramo de precisión, que engloba al tramo de aproximación final y las fases inicial e intermedia de aproximación frustrada, presenta unos requisitos específicos que dependen en gran medida de la actuación de los sistemas, es necesario establecer que, en este caso, se asume Categoría I. Esto se justifica porque el aeropuerto de Ciudad Real es un aeropuerto pequeño, que no presenta una gran densidad de tráfico.

Además, la localización de las antenas del ILS, se pueden encontrar en la plataforma de Insignia [5]. En la Tabla 21, se recogen las coordenadas de la antena de la senda de planeo y los extremos de la del localizador.

Punto	Localización	
	GP	Latitud
Longitud		3° 59' 22,1071'' W
Altitud		639,28 m
LOC 1	Latitud	38° 51' 7,0773'' N
	Longitud	3° 56' 36,1761'' W
	Altitud	652,32 m
LOC 2	Latitud	38° 51' 6,2515'' N
	Longitud	3° 56' 36,4123'' W
	Altitud	652,34 m

Tabla 21. Ubicación ILS

Otro aspecto fundamental que influye en el diseño del procedimiento es la categoría de la aeronave, que se asume D en el caso que se está analizando. Esto supone unas dimensiones estándar de 65 m de envergadura. Además, la distancia vertical entre la trayectoria en vuelo de las ruedas y la antena GP es de 7 m.

Como ya se ha comentado en otros apartados, el aspecto más influyente en el diseño es el franqueamiento de obstáculos. Por ello, resulta lógico que el primer paso para determinar los puntos mencionados y las pendientes de los tramos correspondientes sea definir las áreas de franqueamiento de obstáculos.

En este caso, se dispone de las llamadas superficies de evaluación de obstáculos (OAS), que se representan en la Figura 42. Estas superficies contienen el tramo de precisión anteriormente mencionado y permiten llevar a cabo el cálculo de la OCA/H, como se indicará más adelante.

Definir las OAS resulta fundamental para obtener las áreas de franqueamiento de obstáculos, ya que en el tramo de precisión la forma en planta de las OAS y las áreas mencionadas coinciden. En el tramo de aproximación intermedia el área primaria es una prolongación de las OAS, en concreto de la superficie X, mientras que el área secundaria se determina porque su semianchura es igual a la del área primaria y de valor 4,6 km en el IF.

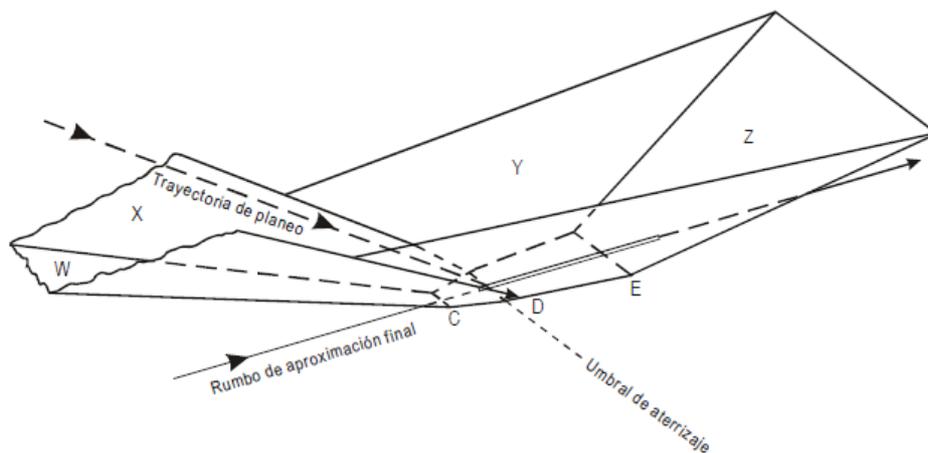


Figura 42. Superficies de evaluación de obstáculos (OAS)

Las OAS están formadas por el plano horizontal que contiene al umbral y seis superficies planas con una cierta pendiente que se disponen simétricamente alrededor de la derrota del tramo de precisión que, en este caso, coincide con la prolongación del eje de la pista. Su geometría se define mediante ecuaciones del tipo  $z = Ax + By + C$ . En estas ecuaciones,  $x$  e  $y$  son coordenadas de posición, y  $z$  es la altura de la superficie en esa posición. Además, hay que tener en cuenta que el origen de coordenadas está en la intersección del umbral con el eje de la pista, siendo la  $x$  la coordenada que contiene al eje de la pista y su signo negativo después del umbral. La  $y$  es siempre positiva y perpendicular a la  $x$ , debido a la simetría que presentan las superficies.

Las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  que definen cada superficie se obtienen del soporte lógico de OAS PANS-OPS. Este programa de la OACI permite obtener, también las coordenadas de los puntos que dan lugar a la representación de las superficies ( $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $E''$ ,  $D''$ ,  $C''$ ), tal y como muestra la Figura 43.

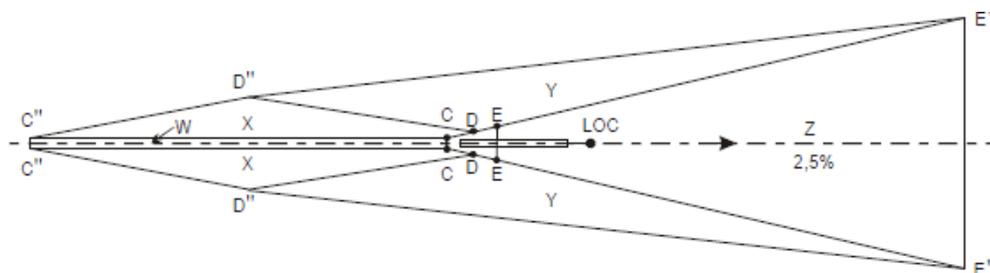


Figura 43. Definición de los puntos clave en las OAS

Sin embargo, el programa requiere de una serie de parámetros de entrada. El primero de ellos es la categoría de la aproximación, que como se ha indicado es CAT I. El ángulo de la senda de planeo es de  $3^\circ$ , que coincide con el óptimo para aproximaciones de precisión y es el marcado por el sistema PAPI de la pista correspondiente. La distancia entre el localizador y el umbral se obtiene a partir de los datos de la Tabla 21 y es de 4313,4 m. La RDH o altura de referencia es la altura a la que estaría la aeronave al volar sobre la intersección del eje de la pista con el umbral siguiendo la senda de planeo. En este caso, esa altura resulta ser de 18 m, debido a la distancia entre ese punto y el punto de contacto. Para CAT I, esta altura debe estar entre 12 y 18 m. En realidad, el programa está basado en una altura de referencia de 15 m. Si la RDH es menor, es necesario establecer un ajuste de los coeficientes de las OAS, pero si es mayor el ajuste es opcional. En el caso analizado, no es necesario llevar a cabo un ajuste. Por su parte, el *course width at THR* hace referencia a la desviación en azimut de la aproximación, es decir, la de la antena ILS. Por defecto, este valor es 210 m. Si fuera mayor, el método recomendado para el cálculo de la OCA/H sería el CRM (collision risk model), que no es el que va a emplearse. Si se introduce un valor menor, el programa lo modifica automáticamente y lo sustituye por 210 m. Por tanto, se toma el valor por defecto.

Por último, es necesario introducir los datos de la aeronave. Teniendo en cuenta que se toma la categoría D y que la pendiente de ascenso en la frustrada es del 2,5%, se selecciona la casilla STD que asume unas características estándar para las aeronaves de esta categoría.

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

Figura 44. Configuración del soporte PANS-OPS

De esa manera, se obtienen las expresiones necesarias para la definición de las OAS y de los puntos C, C'', D, D'', E y E''. Dichas expresiones se recogen en la Tabla 22 y en la Tabla 23.

Como ya se ha comentado, estas determinan en planta las áreas de franqueamiento de obstáculos. Sin embargo, cabe destacar que estas áreas contienen al tramo de precisión y son en su totalidad áreas primarias. Las áreas secundarias aparecen en el tramo de aproximación intermedia, tal y como se ha comentado anteriormente.

Punto	Localización		
	x	y	z
C	210	51	0
C''	10737	33	300
D	-343	135	0
D''	5381	845	299,93
E	-900	199	0
E''	-12900	2929	300

Tabla 22. Localización de los puntos característicos de las OAS

Superficie	Ecuación
X	$z = 0,028836x + 0,190117y - 15,89$
Y	$z = 0,025105x + 0,220209y - 21,26$
W	$z = 0,028500x - 6,01$
Z	$z = -0,025000x - 22,50$

Tabla 23. Definición de las OAS

A continuación, se recogen aquellas características relevantes que menciona el documento 8168 de cada uno de los tramos bajo consideración. Posteriormente, se desarrollará el procedimiento seguido para el cálculo de los puntos mencionados.

- **Tramo de aproximación intermedio.** De forma análoga al procedimiento de la pista 28, este tramo comienza en el punto de referencia de aproximación intermedia (IF) y termina en el punto de referencia de aproximación final (FAP). La derrota debería estar alineada con el eje de pista.

La longitud óptima de este tramo es de 9 km y esto permite la interceptación del rumbo del localizador con la trayectoria de planeo. Por último, el MOC es de 150 m y hay que tener en cuenta que, en el tramo anterior, es de 300 m. Las altitudes seleccionadas para cumplir con estos márgenes deben ser redondeadas a los 50 m o 100 ft inmediatos.

Para el franqueamiento de obstáculos, el tramo de aproximación intermedia se divide en un área primaria limitada a cada lado por un área secundaria. Únicamente cuando se utilice una derrota con navegación a estima en la aproximación inicial, la anchura total del área de franqueamiento de obstáculos es área primaria. Sin embargo, este no es el caso.

- **Tramo de aproximación final.** En este tramo, se realiza la alineación y el descenso para el aterrizaje. El comienzo del tramo se sitúa en el punto de referencia de aproximación final (FAP) y su final en la altura de decisión (DA/H). La longitud mínima es de 5,6 km. Además, en este tramo la derrota debe estar alineada con el eje de la pista en la medida de lo posible. La pendiente de descenso óptima para aproximaciones que son de precisión es de 3°.
- **Tramo de aproximación frustrada inicial.** El tramo de aproximación frustrada inicial se extiende desde la DA/H hasta el comienzo del ascenso (SOC). La DA/H se establece en la OCA/H o por encima de esta. El margen existente entre la DA/H y la OCA/H está basado en consideraciones operacionales como la categoría de la operación, las características de los equipos de tierra y de a bordo, la calificación de las tripulaciones, las actuaciones de las aeronaves, las características del aeródromo o el error de baroaltímetro, entre otros. En este caso, se asume que la DA/H y la OCA/H son iguales.

El SOC se define mediante la altura y la distancia a las que el plano GP', que es un plano paralelo a la trayectoria de planeo y con origen en -900 m al nivel del umbral, alcanza la altitud OCA/H-HL.

- **Tramo de aproximación frustrada intermedio.** La fase intermedia de la aproximación frustrada se inicia en el SOC. El ascenso continúa hasta el primer punto donde se alcance y pueda mantenerse un MOC de 50 m.

La pendiente nominal de ascenso es del 2,5 %. El margen mínimo de franqueamiento de obstáculos en este tramo será de 30 m.

### 3.2.1.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño que se presentan en este apartado permiten cerrar el diseño que se está planteando. Dichas hipótesis y decisiones son:

- La pendiente de descenso es de 3° en aproximación final, debido a las PAPI situadas a 409 m del umbral.
- El tramo de aproximación intermedia es horizontal, es decir, tiene pendiente nula.
- La pendiente de ascenso es del 2,5% a partir del SOC en aproximación frustrada. El tramo delimitado por la OCH y el SOC es un tramo horizontal.
- En todos los tramos que se recogen en este apartado la derrota se encuentra alineada con el eje de la pista.
- La DA/H y la OCH se asocian al mismo punto. En realidad, existe un margen entre ambas basado en consideraciones operacionales. Sin embargo, para el proceso de diseño se asume que ese margen es nulo.
- La longitud del tramo de aproximación intermedia es de 9000 m.
- La categoría de aeronave es D y se asume CAT I de aproximación.
- Se tiene baroaltímetro.

### 3.2.1.2 Proceso de diseño

A partir de las consideraciones anteriores, se determinan los puntos y las pendientes que definen el procedimiento.

En primer lugar, es necesario determinar la OCA/H o altura/altitud de franqueamiento de obstáculos. Para ello, se tienen en cuenta las OAS definidas anteriormente y los obstáculos que penetran en las mismas. De esa forma, los obstáculos se dividen en obstáculos de aproximación y obstáculos de aproximación frustrada. Los obstáculos de aproximación se encuentran entre el FAP y 900 m después del umbral, es decir, el origen de la superficie Z. Los obstáculos de aproximación frustrada se encuentran en el resto de los tramos de precisión.

Para calcular la OCA/H, hay que determinar la altura del obstáculo más elevado en la aproximación que se introduce en las OAS correspondientes. Posteriormente, se determinan los obstáculos que penetran en las OAS en la aproximación frustrada y se corrigen sus alturas para obtener unas alturas equivalentes en la aproximación. Esto se hace empleando la ecuación que se desarrolla a continuación. En ella,  $h_a$  hace referencia a la altura del obstáculo equivalente en la aproximación,  $h_{ma}$  es la altura del obstáculo en la aproximación frustrada,  $\theta$  es el ángulo de la trayectoria de planeo (3°),  $Z$  es el ángulo de la superficie de aproximación frustrada (2,5 %),  $x$  es la distancia del obstáculo relativa al umbral (negativa después del umbral) y  $x_z$  es la distancia desde el umbral hasta el origen de la superficie Z. De estas alturas equivalentes, se determina la más elevada. A continuación, se comparan las dos alturas obtenidas, es decir, la más elevada en aproximación y la más elevada de las equivalentes en frustrada. De esas dos, la más alta define el denominado obstáculo determinante. Por último, se añade un margen relativo a la categoría de la aeronave a la altura del obstáculo determinante y el resultado de esa suma es la OCA/H.

$$h_a = \frac{h_{ma} \cot Z + (x_z + x)}{\cot Z + \cot \theta}$$

De forma análoga al proceso seguido para la pista 28, se determinan los puntos que definen las OAS con la dirección y las escalas definidas en el apartado 3.1. De esa manera, a continuación, se muestran, a modo de ejemplo, las expresiones empleadas para los puntos  $D''_1$  y  $D''_2$  de la Figura 45. Para el resto de los puntos ( $C''_1, C''_2, C_1, C_2, D_1, D_2, E_1, E_2, E''_1$  y  $E''_2$ ) el proceso es análogo.

$$x_{D''} = 5381$$

$$y_{D''} = 845$$

$$z_{D''} = 299,93$$

$$\phi_{D''} = \phi_{10} + \cos(\chi_{Pista}) \times x_{D''} \times Esc\phi$$

$$\lambda_{D''} = \lambda_{10} + \sin(\chi_{Pista}) \times x_{D''} \times Esc\lambda$$

$$elev_{D''} = elev_{10} + z_{D''}$$

$$\phi_{D_1''} = \phi_{D''} + \cos \beta \times y_{D''} \times Esc\phi$$

$$\lambda_{D_1''} = \lambda_{D''} + \sin \beta \times y_{D''} \times Esc\lambda$$

$$elev_{D_1''} = elev_{D''}$$

$$\phi_{D_2''} = \phi_{D''} + \cos \beta_2 \times y_{D''} \times Esc\phi$$

$$\lambda_{D_2''} = \lambda_{D''} + \sin \beta_2 \times y_{D''} \times Esc\lambda$$

$$elev_{D_2''} = elev_{D''}$$

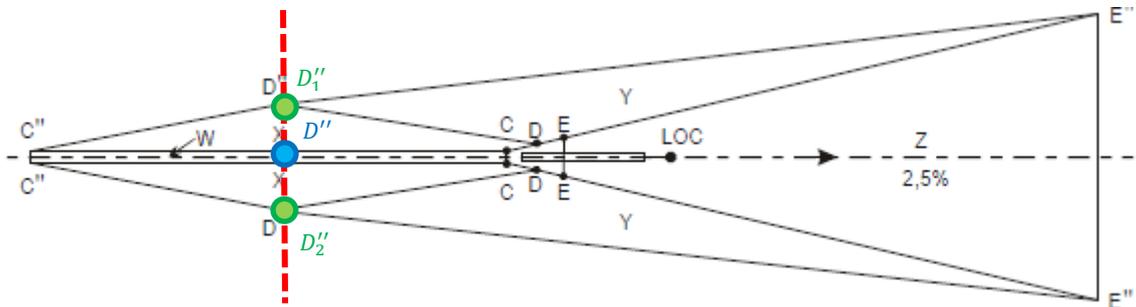


Figura 45. Formulación de puntos característicos de las OAS

Los puntos anteriores permiten establecer las comprobaciones pertinentes. De esa manera, en primer lugar, se busca el obstáculo de mayor elevación que penetra en la superficie de aproximación. Para ello, se exploran todos los puntos de los mapas orográficos. A continuación, se introduce una condición para comprobar si la longitud del punto está entre las de los puntos  $E_1''$  y  $C_2''$ , y su latitud está entre las latitudes de  $D_1''$  y  $E_2''$ . Después de esto, se calcula la distancia desde el umbral hasta el punto analizado en metros. Para ello, se emplean las escalas anteriormente mencionadas. Esa distancia se utiliza para obtener las coordenadas  $x$  e  $y$  del punto seleccionado en el sistema de referencia que tiene su origen en el umbral, cuyo eje  $x$  contiene al eje de la pista y es negativo pasado el umbral en el sentido de aterrizaje, y cuyo eje  $y$  es perpendicular al mismo. Las expresiones empleadas se desarrollan a continuación y la Figura 46 se puede utilizar de apoyo para la comprensión de las mismas. Sin embargo, merece la pena destacar que hay que ser especialmente cuidadosos con los signos, es decir, en función del cuadrante en el que se sitúe el punto, cambiará el signo de  $x$  y, en la ecuación de  $\gamma$ , la dirección de la pista sumará o restará.

$$\chi_{punto} = \text{atan} \left( \frac{\lambda_{10} - \lambda_{punto}}{\phi_{10} - \phi_{punto}} \cos \phi_{ARP} \right)$$

$$Dist_{punto} = \left| \frac{\phi_{punto} - \phi_{10}}{\cos(\chi_{punto}) Esc\phi} \right|$$

$$\gamma = \chi_{punto} - \chi_{Pista}$$

$$x = |Dist_{punto} \times \cos \gamma|$$

$$y = |x \times \tan \gamma|$$

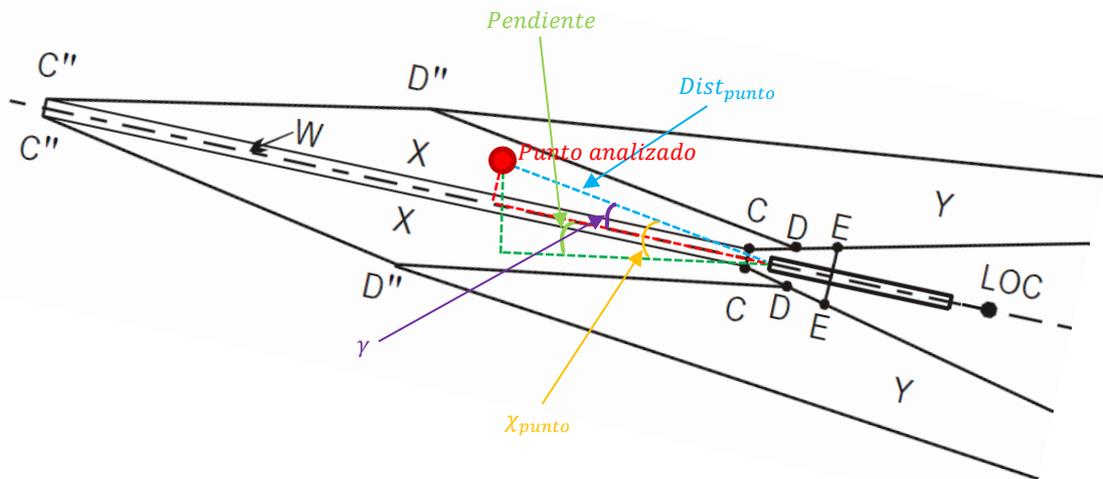


Figura 46. Coordenadas de un punto en metros

A continuación, con las coordenadas  $x$  e  $y$  calculadas, hay que averiguar en qué superficie está situado el punto. Para que el punto esté situado en la superficie de aproximación, su coordenada  $x$  debe ser mayor que  $-900$ . Una vez comprobado eso, existen tres posibilidades:

- Si la  $x$  es mayor que  $x_C$ , existen las siguientes opciones:
  - Que la  $y$  sea más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{CC''}$ . En este caso, el punto estaría en la superficie  $W$ .
  - Si no se cumple lo anterior, pero la  $y$  del punto es más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{DD''}$  y su  $x$  es inferior a  $x_{D''}$ , o la  $y$  del punto es más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{C''D''}$  y su  $x$  es mayor a  $x_{D''}$ , el punto pertenecería a la superficie  $X$ .
  - En caso contrario, si la  $y$  del punto es más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{E''D''}$  y su  $x$  es inferior a  $x_{D''}$ , el punto pertenecería a la superficie  $Y$ .
- Si la  $x$  está entre  $x_C$  y  $x_D$ , puede ocurrir lo siguiente:
  - Que la  $y$  sea más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{CD}$ . En este caso, el punto estaría dentro de los límites del plano horizontal.
  - Si no se cumple lo anterior, pero la  $y$  del punto es más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{DD''}$ , el punto pertenecería a la superficie  $X$ .
  - En caso contrario, si la  $y$  del punto es más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{E''D''}$ , el punto pertenecería a la superficie  $Y$ .
- Si no se dan ninguna de las dos opciones anteriores, las situaciones que pueden darse son:
  - Que la  $y$  sea más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{DE}$ . En este caso, el punto estaría dentro de los límites del plano horizontal.
  - En caso contrario, si la  $y$  del punto es más pequeña que la  $y$  que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{E''D''}$ , el punto pertenecería a la superficie  $Y$ .

Dependiendo de la superficie a la que pertenezca el punto, hay que comparar su altitud con una elevación diferente, que se calcula a partir de las expresiones de la Tabla 23 o será la elevación del umbral en el caso de pertenecer al plano horizontal.

Una vez comparadas las medidas anteriores, si el obstáculo penetra en la superficie se guarda su latitud, longitud y altitud en una variable, que se irá actualizando en cada iteración en la que se consiga la penetración de un obstáculo de mayor elevación. Al final, se identifica el obstáculo de mayor altitud que penetra en la superficie de aproximación, que era lo que se buscaba desde el principio.

El siguiente paso es buscar aquellos obstáculos que penetran en la superficie de aproximación frustrada y corregir sus altitudes con la expresión que se comentó anteriormente. Para ello, el proceso seguido es análogo al anterior. En ese sentido, se vuelven a desarrollar tres bucles para recorrer el mapa orográfico situado bajo las OAS. De nuevo, se establece la condición de que la longitud del punto esté entre las de los puntos  $E_1''$  y  $C_2''$ , y su latitud se sitúe entre las latitudes de  $D_1''$  y  $E_2''$ . En esos casos, se procede a calcular las coordenadas x e y del punto de la misma forma que antes. Para que el punto esté situado en la superficie de aproximación frustrada su coordenada x debe ser inferior a -900. En caso de que así sea, existen dos opciones:

- Que la coordenada y sea más pequeña que la y que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{EE''}$ . En este caso, el punto estaría en la superficie Z.
- En caso contrario, si la y es más pequeña que la y que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{E''D''}$ , el punto pertenecería a la superficie Y.

En ambos casos, habría que calcular la elevación de la superficie correspondiente en el punto asociado. Esto se haría aplicando las ecuaciones de la Tabla 23. Una vez resuelta esa elevación, se compara con la altitud del punto en cuestión. En caso de ser más baja, el punto penetraría en la superficie. Si esto es así, se aplica la ecuación de corrección comentada al principio del apartado. De esa forma, se obtiene la altura equivalente. Seguidamente, se guarda esta altura equivalente, la longitud y la latitud en unas variables que se irán actualizando en cada iteración únicamente cuando la altura equivalente de la iteración sea superior a la almacenada en ese instante. Finalmente, se obtiene la altura equivalente de todos los puntos situados dentro de los límites de la superficie de aproximación frustrada.

Hasta ahora se tienen las alturas más elevadas de cada tipo de obstáculo (aproximación y frustrada). En el caso de aproximación, esa altitud es de 629 m, y en el caso de frustrada es de 436 m. Para determinar la OCA/H, es necesario compararlas y extraer la mayor de las dos (629 m). La OCA/H es esa elevación más un margen asociado a la pérdida de altura o al error del altímetro. Considerando que se tiene baroaltímetro y que la categoría de aeronave es la D, ese margen (HL) es de 49 m. Por tanto, la OCH es de 678 m.

Una vez obtenida la OCA/H, el cálculo del SOC es inmediato. Como se dijo, el SOC se define mediante la altura y la distancia a las que el plano GP', que es un plano paralelo a la trayectoria de planeo y con origen en -900 m al nivel del umbral, alcanza la altitud OCA/H-HL. Esto se muestra gráficamente en la Figura 47.

Por tanto, para calcular la distancia del SOC al umbral bastaría con emplear la expresión siguiente. Teniendo en cuenta que este punto estaría situado sobre la prolongación del eje de la pista, conociendo esa distancia el punto estaría determinado.

$$Dist_{SOC-10} = \frac{OCH - HL - elev_{10}}{\tan \frac{3\pi}{180}} - 900$$

Después de esto, es necesario determinar el punto que pone fin a la fase intermedia (AFI) de la aproximación frustrada. Este punto, queda definido a partir de una distancia negativa desde el umbral, que, en las expresiones siguientes, viene dada por el parámetro t. Este punto también debe estar situado sobre la prolongación del eje de la pista y su elevación se calcula a partir de la distancia del mismo al SOC, considerando una pendiente del 2,5 %.

$$\begin{aligned} x_{AFI} &= t \\ \phi_{AFI} &= \phi_{10} + \cos(\chi_{Pista}) \times x_{AFI} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{AFI} &= \lambda_{10} + \sin(\chi_{Pista}) \times x_{AFI} \times Esc_{\lambda} \\ elev_{D''} &= OCH + (|x_{AFI}| - |Dist_{SOC}|) \times 0,025 \end{aligned}$$



no es inferior a  $x_{E''}$ , y la coordenada y es más pequeña que la y que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{EE''}$  o que la y que tendría el punto si perteneciera al segmento  $\overline{D''E''}$ , habría que comparar la z anteriormente calculada con la altitud del punto en cuestión. En caso de que la diferencia entre ambas sea inferior a 50 m, el punto no es válido y habría que iterar, de nuevo, con t. En la siguiente iteración, t sería 100 m inferior.

Por último, habría que situar los puntos FAP e IF. Estos puntos delimitan el tramo de aproximación intermedia y sus ubicaciones, como en otros puntos, vienen determinadas por un parámetro f, que, en este caso, hace referencia a la distancia existente hasta el FAP. El IF, por su parte, se determina sabiendo que está a 9000 m del FAP. Además, es necesario destacar que se trata de un tramo de pendiente horizontal a la elevación del FAP.

$$\begin{aligned}
 x_{FAP} &= f \\
 \phi_{FAP} &= \phi_{10} + \cos(\chi_{Pista}) \times x_{FAP} \times Esc_{\phi} \\
 \lambda_{FAP} &= \lambda_{10} + \sin(\chi_{Pista}) \times x_{FAP} \times Esc_{\lambda} \\
 elev_{FAP} &= elev_{10} + (x_{FAP} + 409) \times \tan \frac{3\pi}{180} \\
 x_{IF} &= x_{FAP} + 9000 \\
 \phi_{IF} &= \phi_{10} + \cos(\chi_{Pista}) \times x_{IF} \times Esc_{\phi} \\
 \lambda_{IF} &= \lambda_{10} + \sin(\chi_{Pista}) \times x_{IF} \times Esc_{\lambda} \\
 elev_{IF} &= elev_{FAP}
 \end{aligned}$$

Para comprobar la validez de los puntos es necesario garantizar que, en el tramo de aproximación intermedia, existe un MOC de 150 m. Además, en el tramo anterior al IF, el MOC debe ser de 300 m. El proceso de comprobación es análogo a los anteriores y se describe en detalle en el Anexo II (Apartado 7.2.2.1).

Con todo lo descrito anteriormente, se obtiene la ubicación de los puntos de referencia de los tramos analizados hasta el momento. Los resultados aparecen recogidos en la Tabla 24 y representados en la Figura 48. De nuevo, en el caso del FAP, ha sido necesario redondear la elevación a los 50 m inmediatos, tal y como se especifica en la normativa.

Punto	Localización	
DA/H	Latitud	38,8616 °
	Longitud	-3,9991 °
	Altitud	677,8 m
FAP	Latitud	38,8808 °
	Longitud	-4,1089 °
	Altitud	1200 m

IF	Latitud	38,8808 °
	Longitud	-4,1093 °
	Altitud	1191,5 m
SOC	Latitud	38,8588 °
	Longitud	-3,9830 °
	Altitud	677,8 m
AFI	Latitud	38,8428 °
	Longitud	-3,8914 °
	Altitud	881,7 m

Tabla 24. Ubicación de los puntos de referencia para la llegada a la pista 10

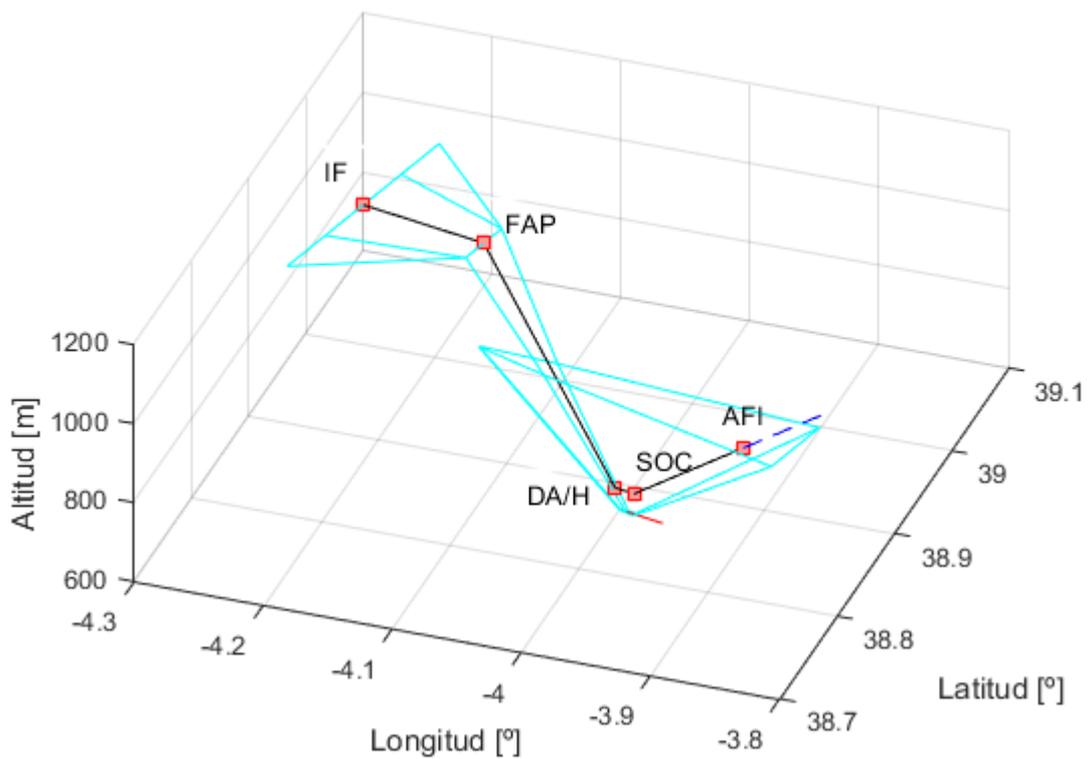


Figura 48. Llegada convencional de precisión por la pista 10

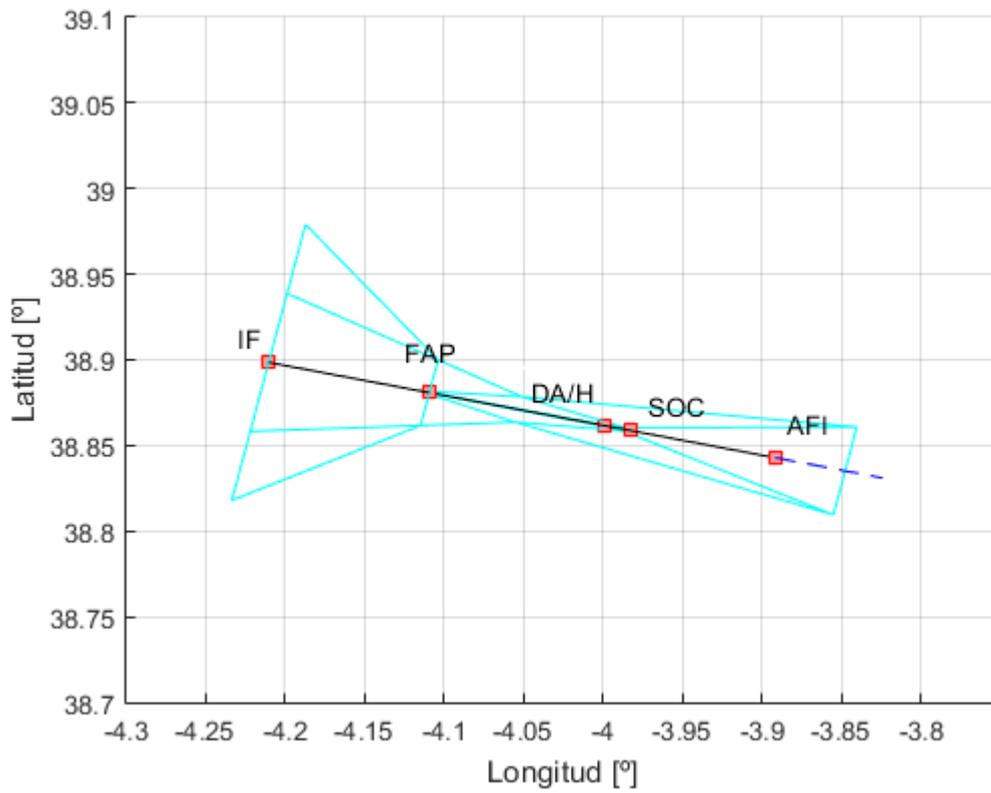


Figura 49. Vista cenital de la llegada por la pista 10

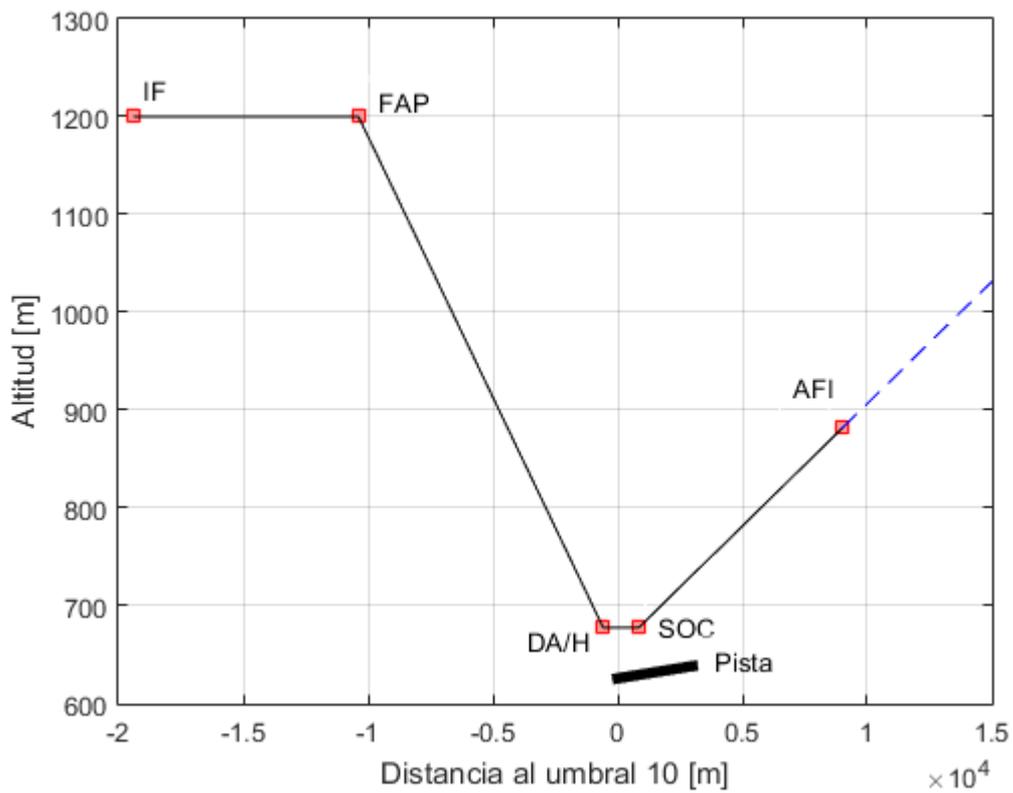


Figura 50. Perfil vertical de la llegada por la pista 10

### 3.2.2 Aproximación inicial y llegada

En este apartado, estarán contenidos aquellos tramos que se extienden desde el IF hasta aquel punto en el que se conecta con el tramo en ruta, que en este caso es CJN. Por tanto, el diseño de esta parte consiste en determinar la ubicación del IAF y las pendientes asociadas, de forma que se permita alcanzar niveles de altitud adecuados. Para ello, se asume que el procedimiento es convencional.

Llegados a este punto parece razonable definir la ruta que se sigue en estos tramos y que permite conectar el punto de entrada a la STAR (CJN) con los tramos finales de la llegada. En este caso, se opta por llegar a CJN y continuar por la aerovía R10 hasta intersectar el radial dado por TLD que conecta con el punto SP1, a 25 km del umbral medidos sobre el eje de la pista. Posteriormente, se sigue por el radial de TLD hasta SP1, donde se vuelve a virar para conseguir alinear la aeronave con la pista. De esa forma, el nivel de vuelo asociado a la salida de R10 es FL100. Por tanto, es necesario mantener una pendiente de descenso del 5,8% desde el punto en el que se abandona la aerovía R10, para alcanzar el IF en condiciones adecuadas. La Figura 51, recoge el camino descrito, en el que se tienen dos virajes.

En este caso, las interacciones con las SID/STAR de los aeropuertos circundantes se reducen a un punto en el que la aerovía R10 se cruza con MORAL 4C. Sin embargo, de la misma manera que ocurría en la aproximación para la pista 28, existen un margen de altitudes suficiente para que no haya problemas, ya que en R10 la aeronave viene con una pendiente de descenso del 1,5%, que garantiza que la altitud en el punto de cruce está por encima de los 14000 ft. En el caso de MORAL 4C se podría volar entre 10000 y 12000 ft.

En cuanto a los sectores de control, cabe destacar que el aeródromo se encuentra dentro del sector LECSBA1. Por tanto, la llegada trazada termina en ese sector. Previamente, habrá atravesado los sectores LECSRTA y LECSSEV, LECMZTI y LEMDALN. En ningún caso, se exceden los límites que impone la altitud mínima de sector.

Al igual que en los tramos anteriores, un aspecto determinante en el diseño que se plantea es el franqueamiento de obstáculos. Por ello, resulta lógico que el primer paso para determinar los puntos mencionados y las pendientes de los tramos correspondientes sea definir las áreas de franqueamiento de obstáculos. Se dispone de un área primaria y un área secundaria. La anchura del área secundaria es la mitad de la anchura total (que incluye el área secundaria y el área primaria). Por su parte, se define un valor del margen mínimo del franqueamiento de obstáculos (MOC) que tiene que ser respetado en el área primaria y que evoluciona de forma lineal a lo largo de la anchura del área secundaria, siendo cero en el extremo exterior de la misma. Téngase en cuenta que, en este caso, se tienen dos áreas de viraje.

Las semianchuras de las áreas de protección deben ir reduciéndose para alcanzar los 9200 m propios de la aproximación inicial. En ellas, se muestran también los valores de las tolerancias que son relevantes en la construcción de las áreas. En ese sentido y como se puede observar, existen dos tramos con diferentes anchuras. El primero de ellos, comienza en el IAF y presentará una semianchura de 9200 m. A los 46 km del IAF, esa semianchura varía de forma lineal hasta alcanzar el valor de 14800 m que es lo que se debe tener en ruta. La conexión de un tramo y otro se hace con un ángulo de 30°. Véase la Figura 52.

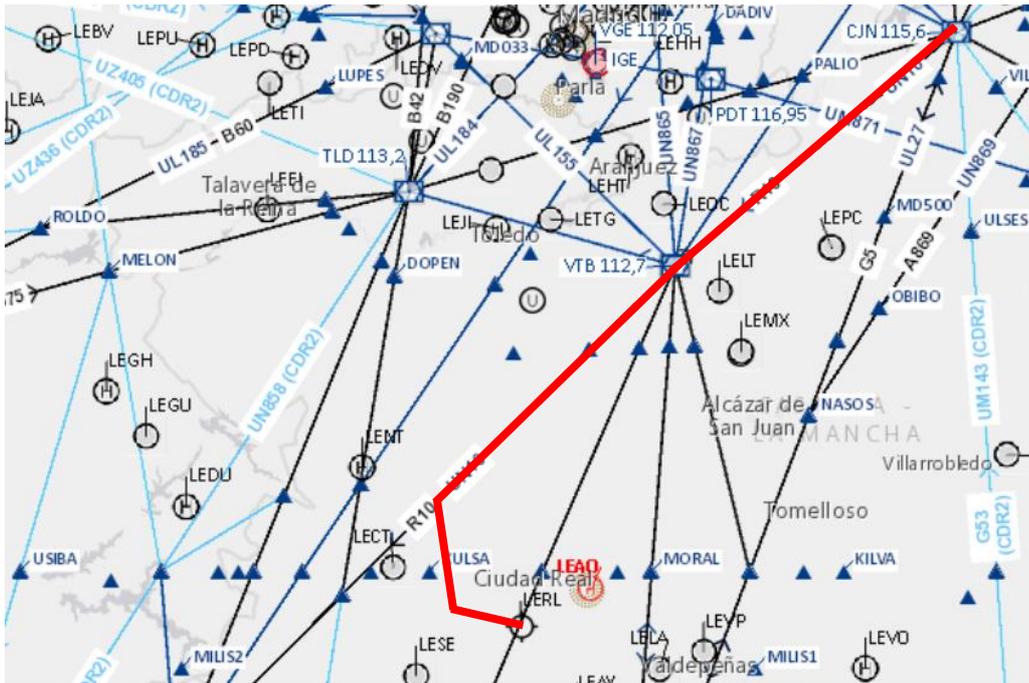


Figura 51. Llegada por la pista 10. Trayectoria

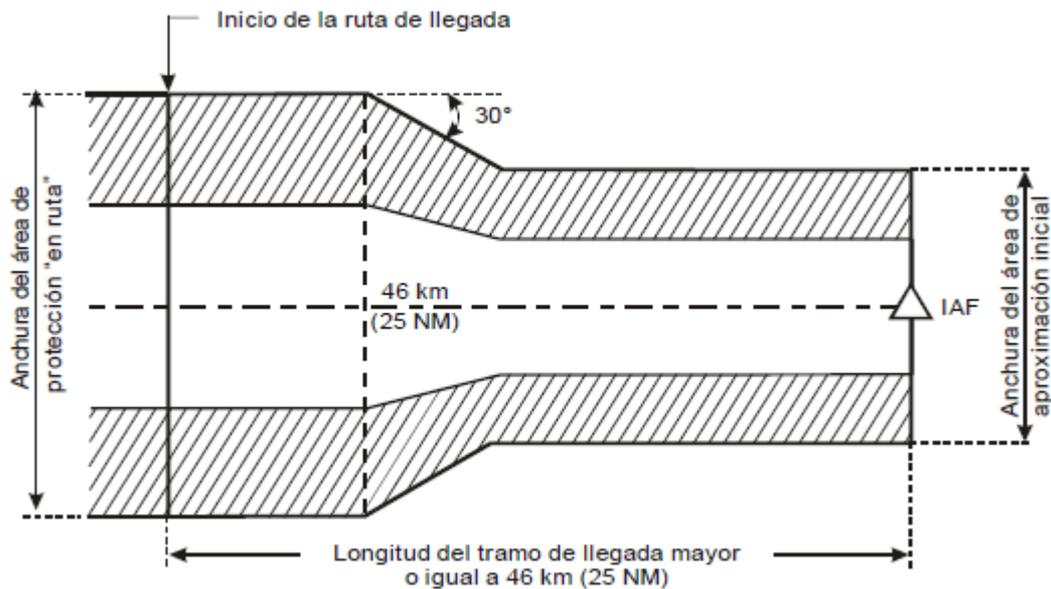


Figura 52. Anchura del área de protección en llegadas convencionales

A continuación, se recogen aquellas características relevantes que menciona el documento 8168 de cada uno de los tramos bajo consideración. Posteriormente, se resumirán las hipótesis empleadas, se desarrollarán las áreas de protección de virajes correspondientes y se describirá el procedimiento de comprobación del MOC.

- **Tramo de aproximación inicial.** El tramo de aproximación inicial es aquel en el que se realizan las maniobras necesarias para entrar en el tramo intermedio. En este caso, este tramo comienza en el punto de referencia de aproximación inicial (IAF) y termina en el punto de referencia de aproximación intermedia (IF). La longitud del tramo no está establecida por normativa, aunque debería ser la suficiente para permitir los cambios de altitud necesarios. Además, la pendiente de descenso óptima de este tramo es del 4%. Sin embargo, esta pendiente puede ser incrementada hasta un valor del 13,2%.

Se debe tener en cuenta que, en aproximaciones de precisión con ILS el ángulo entre la derrota de aproximación inicial y la de aproximación intermedia no debe exceder de 90°. En este caso, en el que ese ángulo es de 78 °, se necesita un radial que proporcione guía por lo menos durante 4 km, con el fin de facilitar el viraje. Puesto que todos los tramos que se presentan están guiados por estaciones VOR, no existen problemas asociados a este fenómeno. Por último, el MOC es de 300 m.

- **Tramo de llegada.** El tramo de llegada puede ser de dos tipos, tal y como se comentó en apartados anteriores: llegadas normalizadas por instrumentos y llegadas omnidireccionales o por un sector. En este caso, se diseña una llegada normalizada por instrumentos (STAR). Las STAR deben ser sencillas y de fácil comprensión, utilizando los puntos de referencia y de recorrido estrictamente necesarios. Además, este tramo debería estar preparado para el mayor número de categorías de aeronaves posible.

El tramo debe comenzar en un punto de referencia, por ejemplo, una instalación de radioayuda. Además, la llegada debe garantizar la transición desde la fase de ruta hasta la fase de aproximación inicial. Las áreas de protección ya fueron definidas de acuerdo con la Figura 52.

Por su parte, el MOC debe ser de, al menos, 300 m en el área primaria. En el área secundaria, se debe disponer de un MOC de 300 m en el borde interior, pero este MOC se irá reduciendo de forma lineal hasta cero en el borde exterior.

### 3.2.2.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño que se presentan en este apartado permiten cerrar el diseño que se está planteando. Dichas hipótesis y decisiones son:

- La llegada es del tipo llegada normalizada por instrumentos (STAR).
- El tramo aproximación inicial se considera alineado con la pista.
- La longitud del tramo de aproximación inicial es de 4000 m, lo que permite realizar la variación de altitudes entre la del tramo de aproximación intermedia y el de llegada.
- La pendiente desde el IF hasta el punto de intersección con R10 es del 5,8 % para que se alcance una altitud adecuada de salida de R10 (FL100).
- El vuelo desde CJN hasta salir de la aerovía R10 debe mantener una pendiente de 1,5% como mínimo. A partir de la salida de R10 se incrementa la pendiente.
- Se utilizan el método perfeccionado para la determinación del área de protección y el método de la espiral de vientos para la construcción del borde exterior del área de viraje.

### 3.2.2.2 Construcción del área de protección de virajes: Tramo TLD - VTB

Para determinar las áreas de viraje se tienen en cuenta varios parámetros. Como en apartados anteriores, la altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo tienen una influencia considerable en la construcción de la misma. Téngase en cuenta que, en este caso, se diseña el viraje con los criterios de aproximación inicial, ya que, aunque este se sitúa en el tramo de llegada, existe una distancia inferior a los 46 km desde el punto de viraje hasta el IAF.

La velocidad indicada (IAS) considerada es de 465 km/h, que es la velocidad de aproximación inicial recomendada por el documento anteriormente mencionado. A partir de ella se puede calcular la TAS con la expresión siguiente. En esta expresión se considera una altitud de 2939,9 m, que es la altitud del punto de interceptación de R10 o punto de viraje. También hay que definir la variable VAR. Esta variable hace referencia a la diferencia de temperatura en relación con las de la ISA en °C. Como en apartados anteriores, se considera una VAR de 23,05°C por ser más restrictiva que la que exige la normativa, que es de 15°C.  $H_v$ , de nuevo, sería la altitud del punto de viraje.

$$TAS = IAS \times \frac{1000}{3600} \times 171233 \times \frac{((288 + VAR) - 0,006496 \times H)^{0,5}}{(288 - 0,006496H)^{2,628}}$$

$$VAR = T_{ref} - (T_0 - 6,5 \times 10^{-3} \times H_{aeródromo}) = 23,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de 25°, como indica la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la siguiente expresión, estando su resultado expresado en ‰. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de las direcciones de las rectas que definen la aerovía R10 y la trayectoria seguida por la aeronave desde que sale de ella, que viene guiada por el VOR de TLD. Su valor es de  $\alpha = 44,38^\circ$ .

$$R = \frac{6355 \times \mu}{\pi V}$$

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma (15 °C). La V representa, de nuevo, a la TAS, y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. El radio de viraje para un valor dado de R se calcula con la siguiente expresión y su resultado es de 5232,7 m en este caso.

$$r = \frac{V}{20\pi R}$$

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral, del tiempo de reacción del piloto, del cronometraje del alejamiento y de la tolerancia de rumbo de la aeronave. En este caso, su valor es de 26 segundos volando a la velocidad (TAS) descrita anteriormente. Por su parte, hay que tener en cuenta la tolerancia asociada a la estación (VTB) que proporciona la guía. En este caso, al ser una estación VOR/DME, esa tolerancia se define como 460 m más el 1,25% de la distancia entre el punto de viraje y la estación.

Con todo lo anterior, el área de viraje queda establecida tal y como muestra la Figura 53. En ella, se representa en negro el área de protección que se define en este apartado. Además, se muestra en cian la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que será clave para la determinación del MOC. Para más detalle, véase el Anexo III (Apartado 7.3.2.1).

### 3.2.2.3 Construcción del área de protección de virajes: Tramo SP1 - TLD

De nuevo, la altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo tienen una influencia considerable en la construcción de esta área. Téngase en cuenta que, en este caso, como en el anterior, se diseña el viraje con los criterios de aproximación inicial, ya que, aunque este se sitúa en el tramo de llegada, existe una distancia inferior a los 46 km desde el punto de viraje hasta el IAF.

La velocidad indicada (IAS) considerada vuelve a ser de 465 km/h, que es la velocidad de aproximación inicial recomendada por el documento anteriormente mencionado. A partir de ella, se puede calcular la TAS con la expresión empleada en el apartado anterior. En esa expresión se considera una altitud de 1923,4 m, que es la altitud del punto SP1 o punto de viraje. También hay que definir la variable VAR, cuya expresión también ha sido indicada con anterioridad.

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de 25°, marcado por la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la expresión indicada en el apartado anterior, estando su resultado expresado en ‰. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de la dirección del radial seguido una vez completado el primer viraje (guiado por TLD) y la de la pista. Su valor es de  $\alpha = 78,01^\circ$ .

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma con la expresión del apartado 3.2.2.2. La V representa, de nuevo, a la TAS y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. El radio de viraje para el valor dado de R dado en este caso es de 4774,9 m.

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral, del tiempo de reacción del piloto, del cronometraje del alejamiento y de la tolerancia de rumbo de la aeronave. En este caso, su valor es de 26 segundos volando a la velocidad (TAS) descrita anteriormente. Por su parte, hay que tener en cuenta la tolerancia asociada a la estación (TLD) que proporciona la guía. En este caso, al ser una estación VOR/DME, esa tolerancia se define como 460 m más el 1,25% de la distancia entre el punto de viraje y la estación.

Con todo lo anterior, el área de viraje queda establecida tal y como muestra la Figura 53. En ella, se representa en rojo el área de protección que se define en este apartado. Además, se muestra en cian la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que será clave para la determinación del MOC. También en cian, se recoge el área de protección de la parte baja del procedimiento y, en negro, el área de protección del primer viraje. El proceso de determinación en detalle del área de viraje se recoge en el Anexo III (Apartado 7.3.2.1).

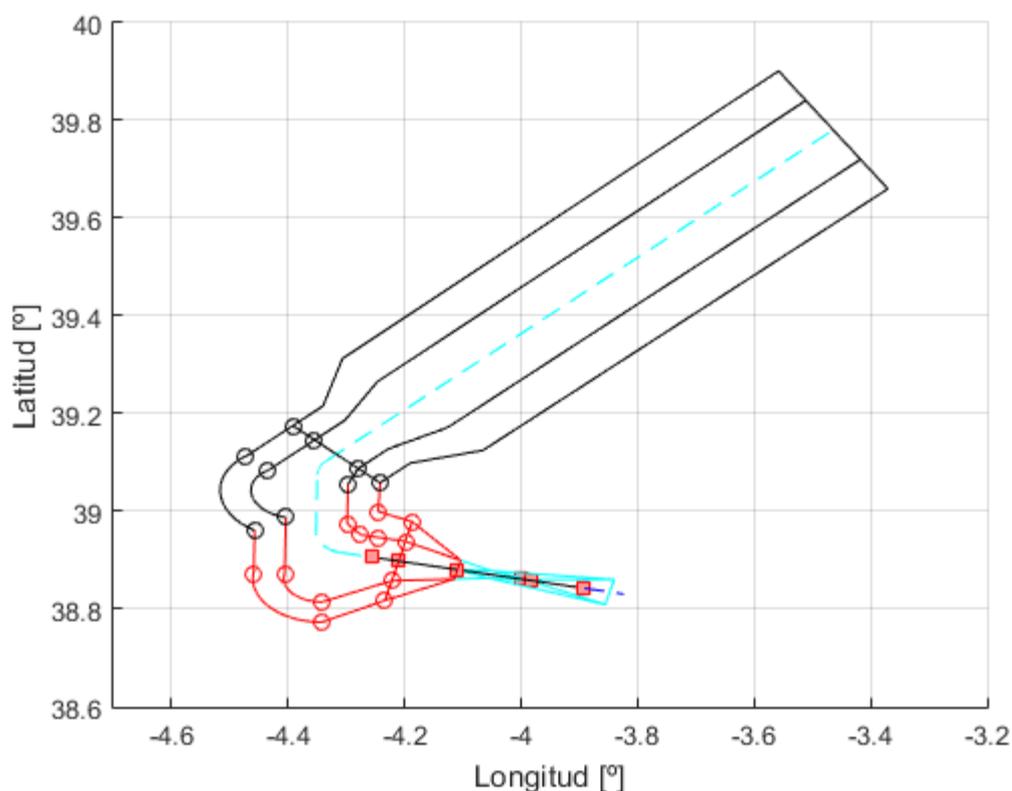


Figura 53. Áreas de viraje para la llegada por la pista 10

De nuevo, la trayectoria nominal, como en el resto de los casos, sigue un arco de círculo en los dos virajes realizados que se deforma debido a las escalas utilizadas. Su cálculo, por tanto, es análogo y depende de los puntos  $A_p$  y  $K_p$  en cada caso.

Por su parte, la elevación de los puntos vendrá determinada a partir de la elevación del punto  $IF$ , asumiendo una pendiente del 5,8% y midiendo la longitud de la curva seguida. Esta pendiente se mantiene desde el punto  $A_p$  del primer viraje. Previamente, se asume que la pendiente es del 1,5%. Sin embargo, la aeronave podría llegar con cualquier pendiente por encima de la anterior desde CJN siempre que esté dentro de los límites de la aerovía R10. La elección de este valor se hace porque, respecto a obstáculos, es lo más restrictivo.

#### 3.2.2.4 Procedimiento de comprobación del MOC

La comprobación del MOC es análoga a la realizada anteriormente, es decir, hay que recorrer el terreno y para cada punto se comprueba si está dentro de las áreas de protección. En caso afirmativo, se procede a verificar que se cumple con la restricción del MOC. Como en el resto de las comprobaciones, el proceso se encuentra descrito en detalle en el Anexo II (Apartado 7.2.2.2).

Además, hay que resaltar que se ha ido comprobando de forma progresiva. Es decir, se han hecho dos tipos de comprobaciones de los fragmentos del terreno que se muestran en la Figura 54 y en la Figura 55. Para el primero de los fragmentos, se han ejecutado los dos tipos mencionados anteriormente (véase el apartado 7.2.2.2). La distancia entre los obstáculos y la trayectoria en el primero de ellos es de unos 360 m y en el segundo de unos 2000 m. Para el segundo fragmento mostrado, sólo se ha ejecutado el segundo tipo, siendo la distancia entre los obstáculos y la trayectoria de unos 2000 m. No es necesario extender la comprobación al

resto del área porque ya se tiene una distancia lo suficientemente alta para que no haya problemas y, por inspección visual en los mapas de Google e Insignia, se llega a la conclusión de que no existen zonas que puedan suponer un riesgo. Por tanto, se concluye que el procedimiento diseñado es seguro. La Tabla 25 contiene las elevaciones y las coordenadas de los puntos de referencia del procedimiento.

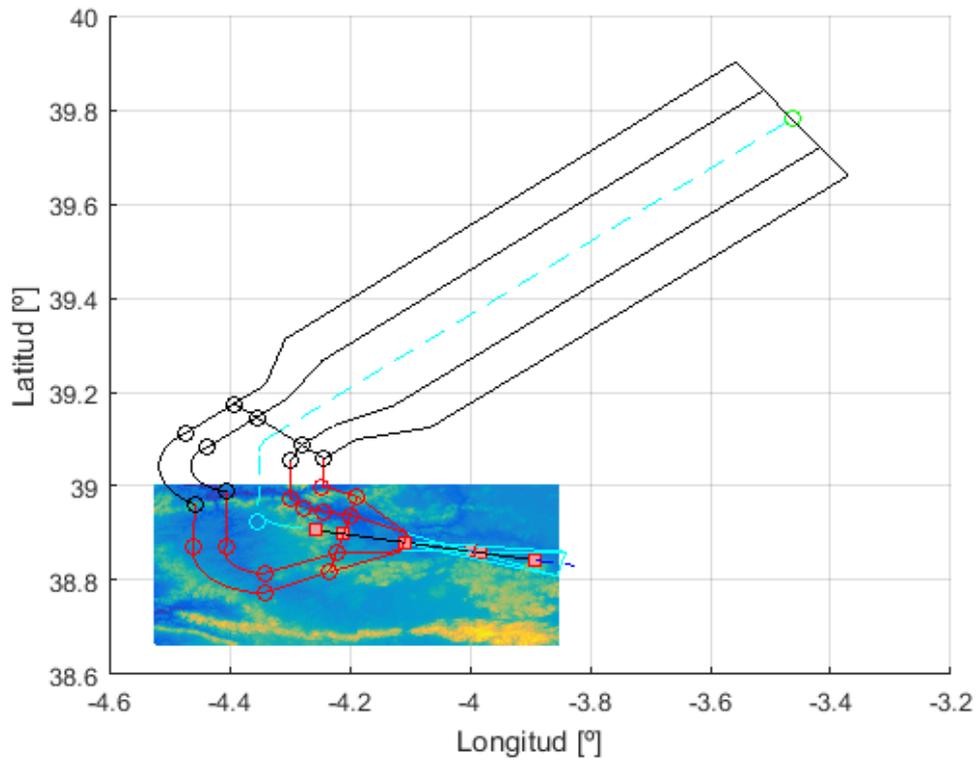


Figura 54. Terreno analizado (I). Llegada por la pista 10

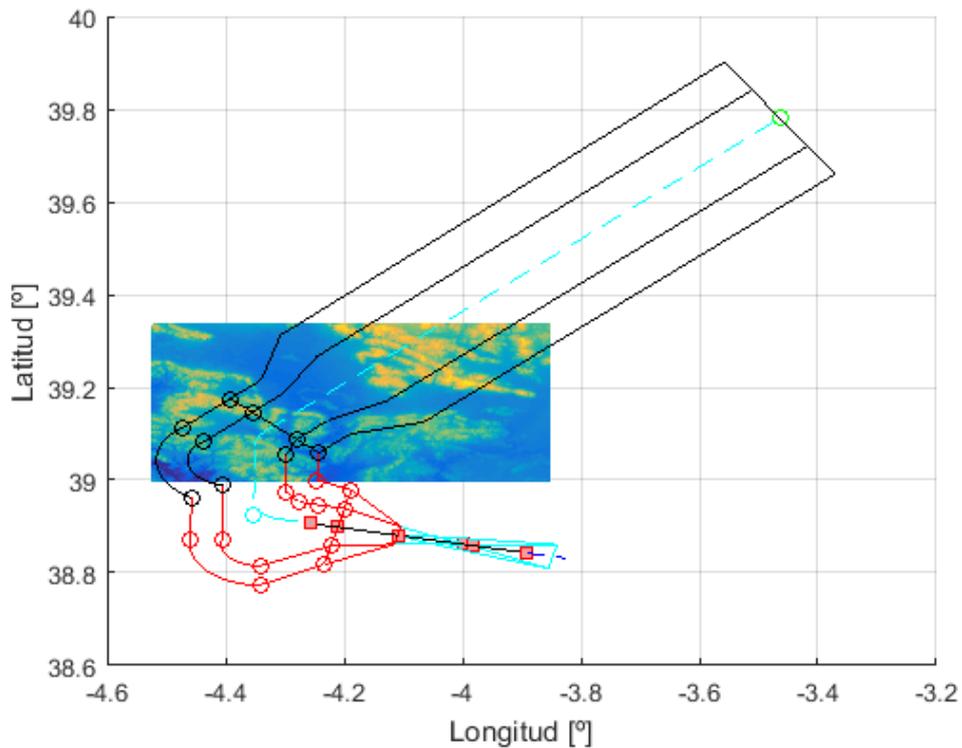


Figura 55. Terreno analizado (II). Llegada por la pista 10

<b>IAF</b>	Longitud	-4,2554 °
	Latitud	38,9063 °
	Altitud	1423,5 m
<b><math>K_{cent}</math> (Primer viraje)</b>	Longitud	-4,3177 °
	Latitud	39,1166 °
	Altitud	3051,2 m
<b><math>K_p</math> (Segundo viraje)</b>	Longitud	-4,3088 °
	Latitud	38,9157 °
	Altitud	1699,1 m
<b><math>A_p</math> (Segundo viraje)</b>	Longitud	-4,3518 °
	Latitud	38,9579 °
	Altitud	2076,1 m
<b><math>K_{p2}</math> (Primer viraje)</b>	Longitud	-4,3502 °
	Latitud	39,0724 °
	Altitud	2816,1 m
<b><math>A_{p2}</math> (Primer viraje)</b>	Longitud	-4,3325 °
	Latitud	39,1051 °
	Altitud	3051,2 m
<b>VTB</b>	Longitud	-3,4642 °
	Latitud	39,7807 °
	Altitud	4649,2 m
<b>CJN</b>	Longitud	-2,5447 °
	Latitud	40,3718 °
	Altitud	6047,4 m

Tabla 25. Puntos relevantes para la llegada por la pista 10

### 3.2.3 Fase final de la aproximación frustrada

El tramo de aproximación frustrada final se extiende hasta el punto donde puede comenzar una nueva aproximación, un circuito de espera o un retorno a un vuelo en ruta. Además, en esta fase se pueden realizar virajes. Este tramo final de la aproximación frustrada comienza en el punto donde se alcanza y puede mantenerse un margen mínimo de franqueamiento de obstáculos de 50 m. De esa forma, el MOC en esta fase debe ser de 50 m en el área primaria y contemplar una reducción lineal en el área secundaria hasta cero.

En este caso, se tiene una aproximación frustrada con viraje en la que se pretende llevar a la aeronave hasta el IAF de esta misma llegada, tal y como ocurría con la llegada por la pista 28. Bien es cierto que, en la práctica, la aproximación frustrada conecta con una STAR diferente, en general, o incluso lleva a la aeronave hasta un punto de referencia donde pueda volver a la fase de ruta. Sin embargo, por simplicidad se decide diseñar la frustrada con conexión a la misma STAR de la que procede.

Por otro lado, en cuanto a pendiente, el documento 8168 especifica que los criterios válidos para este tramo son los establecidos para la fase intermedia. La decisión que se toma al respecto es seguir con la pendiente de subida del 2,5% de la fase intermedia hasta alcanzar la altitud del IAF. A partir de entonces, la pendiente es nula y el vuelo se convertirá en horizontal.

Con las consideraciones anteriores, se procede a diseñar una ruta de aproximación frustrada que parta del punto FI y llegue al punto IAF. Esta trayectoria, que se recoge en la Figura 56, ha tenido que prestar atención a varios aspectos. El primero de ellos, va asociado a los espacios aéreos LER147 y LED25. El espacio LER147 se extiende desde la superficie hasta los 4500 ft de altitud, mientras que LED25 abarca hasta FL70. En vista de que la altitud del IAF de esta llegada está alrededor de los 1500 m, parece razonable que exista la necesidad de rodear estos espacios aéreos para no invadirlos.

Por otra parte, habrá que tener presente que la frustrada propuesta pasa por debajo de varias aerovías. Sin embargo, en todos los casos, la aeronave vuela por debajo del nivel de vuelo mínimo que limita a la aerovía. Por tanto, no existen problemas asociados a este evento. De la misma manera, tampoco existen interacciones con las SID/STAR de aeropuertos circundantes.

Por último, hay que tener en cuenta que, al tratarse de navegación convencional, los tramos deben ir asociados a radiales VOR cercanos. Por ello, se asume que las guías las dan las estaciones BLN, VTB y VAB. De esa forma, se tienen cuatro virajes que vienen dados por los puntos de intersección de los radiales mencionados. Véase la Figura 56.

A continuación, se procederá a la construcción del área de protección del primer viraje y, posteriormente, se comprobará el MOC en esa zona. Sin embargo, antes de esto, se recogerán las hipótesis que han sido y serán empleadas en el diseño de esta fase del procedimiento.

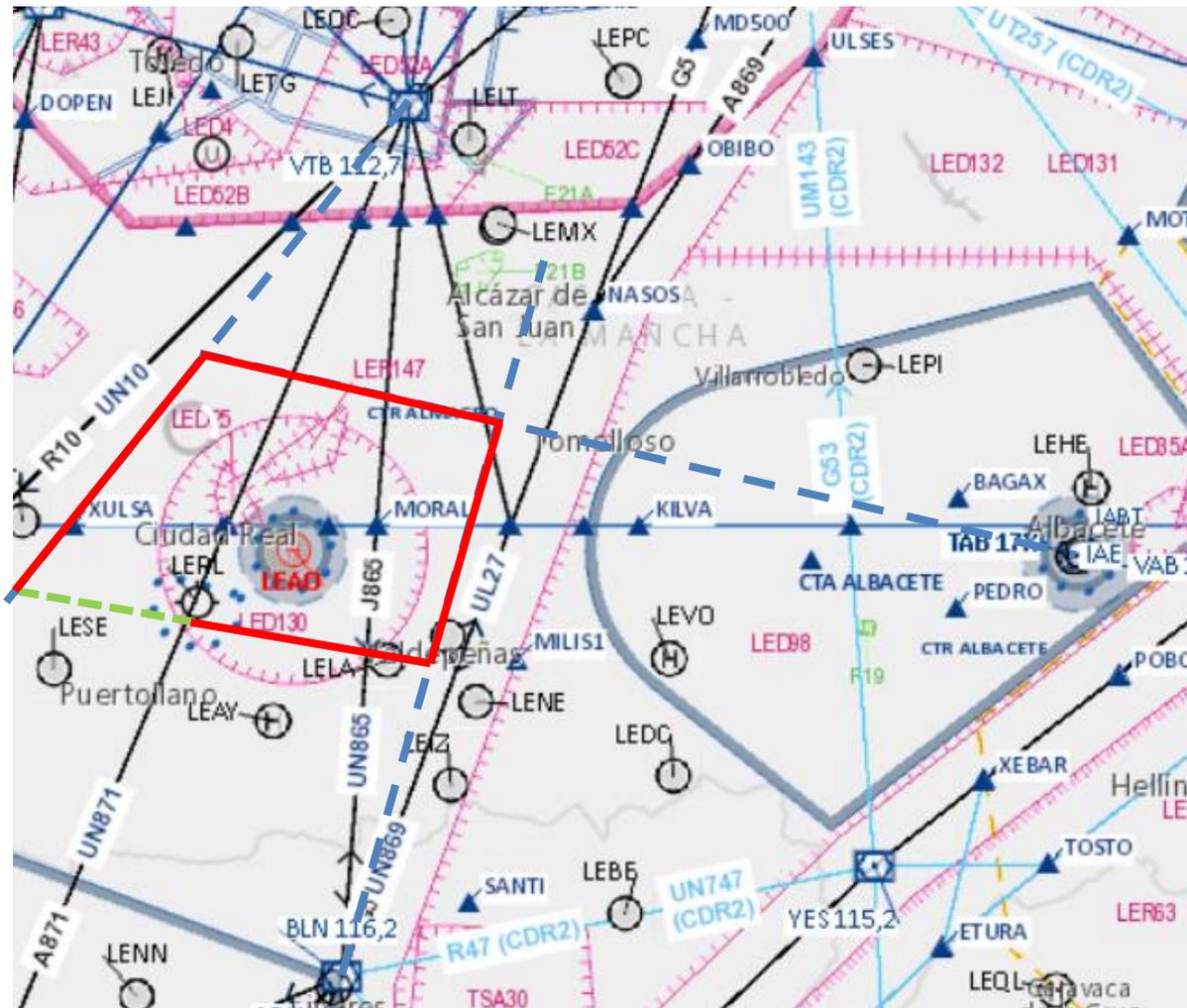


Figura 56. Fase final de aproximación frustrada para la salida por la pista 10. Trayectoria

### 3.2.3.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño empleadas para la resolución de las partes del procedimiento que se plantean en este apartado son:

- La pendiente de subida es del 2,5% hasta alcanzar la altitud del IAF. A partir de ahí, el vuelo es horizontal.
- La conexión se realiza con el IAF de la misma llegada.
- Los tramos vienen guiados por VAB, BLN y VTB.
- Se utilizan el método perfeccionado para la determinación del área de protección y el método de la espiral de vientos para la construcción del borde exterior del área de viraje.

### 3.2.3.2 Construcción del área de protección de virajes

Para determinar las áreas de viraje se tienen en cuenta aquellos criterios descritos en el capítulo 2 de la Parte I, Sección 4, Capítulo 6.4 del documento 8168 de la OACI [13], que son complementados con la información de la Parte II del mismo documento, referida a navegación convencional. A la hora de construir un área de protección de virajes hay que considerar parámetros tales como, la altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo, que tienen una influencia considerable. En este caso, se va a construir el área asociada al primer viraje realizado.

La velocidad indicada (IAS) considerada es de 490 km/h, que es la velocidad de aproximación frustrada recomendada por el documento anteriormente mencionado. A partir de ella, se puede calcular la TAS con la expresión especificada en el apartado 3.2.2.2. En esta expresión se considera una altitud de 946 m, que es la altitud establecida por la OACI para el cálculo de las protecciones de viraje en aproximación frustrada. Esta altitud se corresponde con la elevación del aeródromo y 300 m adicionales. Sin embargo, cabe destacar que para la comprobación de obstáculos sí que se considera la altitud real a la que estaría la aeronave, que es superior a la anterior. La variable VAR continúa siendo 23,05°C por las razones ya comentadas.

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de 15°, como marca la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la expresión comentada en el apartado 3.2.2.2, estando su resultado expresado en %/s. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de la dirección de la recta correspondiente al tramo guiado por BLN y la dirección de la pista. Su valor es de  $\alpha = 92,07^\circ$ .

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma. El radio de viraje para el valor dado de R es 8359,8 m y su expresión también se comentó en el apartado 3.2.2.2.

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral y del tiempo de reacción del piloto. En este caso, los efectos del cronometraje del alejamiento y de la tolerancia de rumbo de la aeronave no aplican. El valor de FTT es, por tanto, de 6 segundos volando a la velocidad (TAS) descrita anteriormente. Por su parte, hay que tener en cuenta, la tolerancia del punto de referencia, que viene dada a partir de la distancia entre el punto de viraje y la instalación de radioayuda correspondiente, que en este caso es el VOR del aeródromo. Como se trata de un VOR/DME, esa tolerancia se calcula como 460 m más el 1,25% de la distancia anteriormente mencionada.

Con todo lo anterior, el área de viraje queda establecida tal y como muestra la Figura 57. En ella, se representa en rojo el área de protección que se define en este apartado. Además, se presenta en cian la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que será clave para la determinación del MOC, y en azul los puntos SP1, SP2, SP3 y SP4 que dan lugar a los virajes. Finalmente, se destaca en negro el punto en el que se alcanza la altitud del IAF y, en magenta, se han representado los espacios aéreos comentados anteriormente. El Anexo III (Apartado 7.3.2.2) recoge el proceso de definición de esta área con un mayor nivel de detalle.

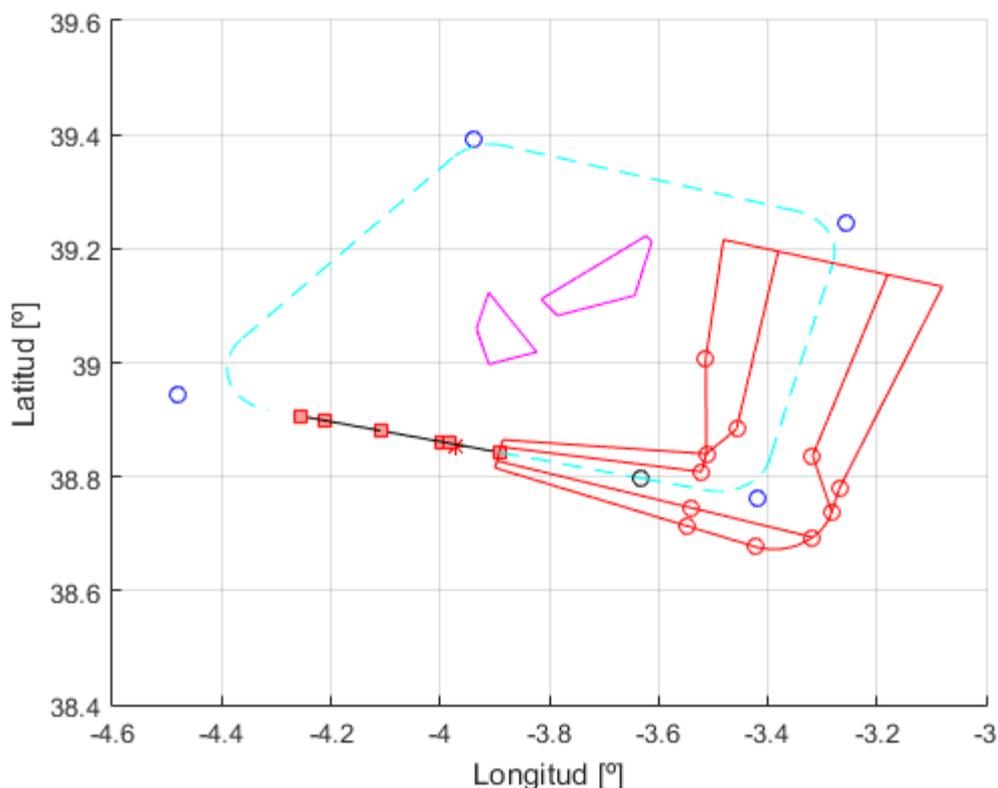


Figura 57. Área de viraje para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 10

Igualmente, la trayectoria nominal sigue un arco de círculo en el viraje que estará deformado por las escalas. Además, cabe destacar que las diferencias entre los parámetros de viraje asociados a los cuatro virajes existentes están localizadas en el ángulo de viraje y en las distancias desde los puntos A y K exteriores al punto de viraje  $SP_i$ . El resto de los parámetros son idénticos en todos ellos.

Por su parte, la elevación de los puntos viene determinada a partir de la elevación del punto  $AFI$ , asumiendo una pendiente del 2,5% y midiendo la longitud de la curva seguida. Esta pendiente se mantiene hasta el punto destacado en negro. Posteriormente, se asume que el vuelo es horizontal a la altitud del IAF.

### 3.2.3.3 Procedimiento de comprobación del MOC

La comprobación del MOC es análoga a la realizada anteriormente, es decir, hay que recorrer el terreno y para cada punto se comprueba si está dentro de las áreas de protección. En caso afirmativo, se procede a verificar que se cumple con la restricción del MOC. Como en el resto de las comprobaciones, el proceso se encuentra descrito en detalle en el Anexo II (Apartado 7.2.2.3).

Además, hay que resaltar que se ha ido comprobando de forma progresiva. Es decir, se han hecho dos comprobaciones de los fragmentos del terreno que se muestran en la Figura 58 y en la Figura 59. La distancia entre los obstáculos y la trayectoria es de unos 70 m en el primero de esos fragmentos y ronda los 500 m en el segundo. No es necesario extender la comprobación al resto del área porque ya se tiene una distancia lo suficientemente alta para que no haya problemas y, por inspección visual en los mapas de Google e Insignia, se llega a la conclusión de que no existen zonas que puedan suponer un riesgo. Por tanto, se concluye que el procedimiento diseñado es seguro. La Tabla 26 contiene las elevaciones y las coordenadas de los puntos de referencia del procedimiento.

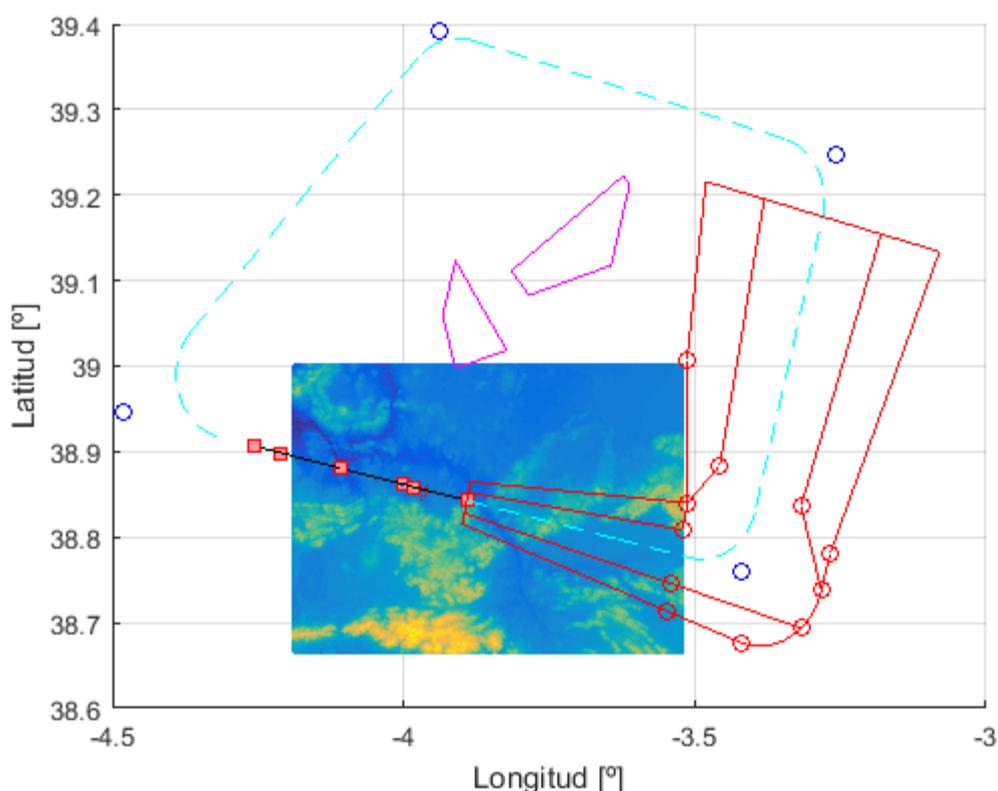


Figura 58. Terreno analizado (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10

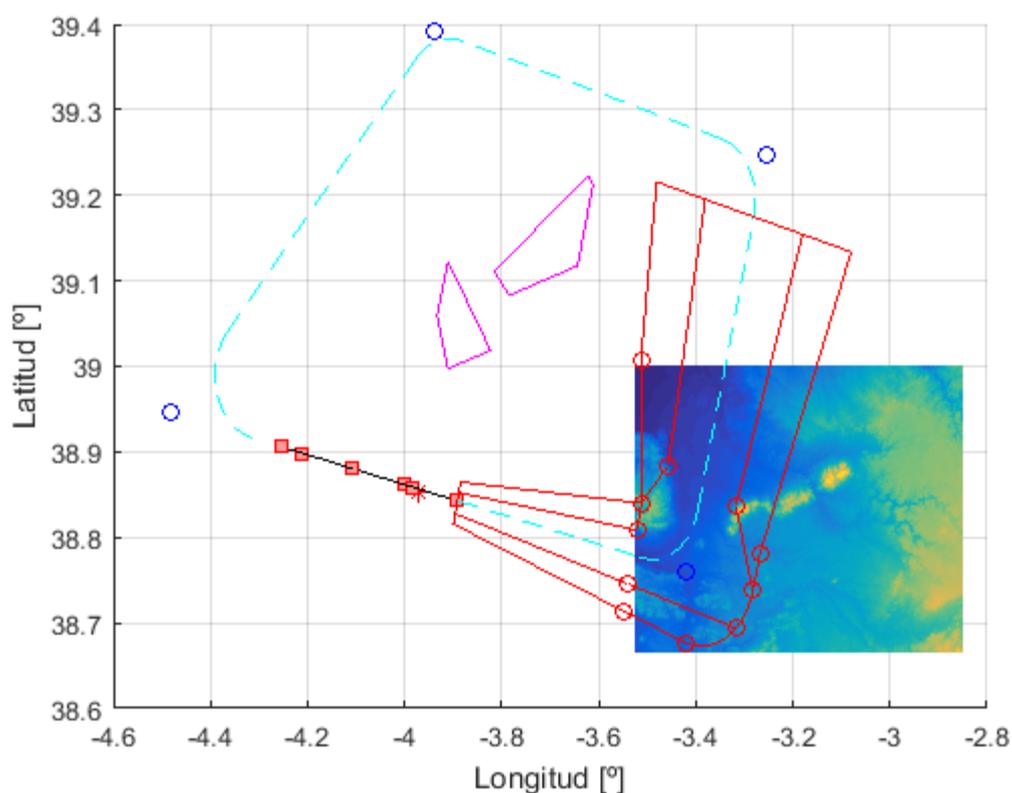


Figura 59. Terreno analizado (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10

<b><i>AFI</i></b>	Longitud	-3,8914 °
	Latitud	38,8428 °
	Altitud	881,7 m
<b><i>K<sub>p</sub></i></b>	Longitud	-3,5175 °
	Latitud	38,8357 °
	Altitud	1423,5 m
<b><i>A<sub>p</sub></i></b>	Longitud	-3,3947 °
	Latitud	38,8357 °
	Altitud	1423,5 m
<b><i>K<sub>cent</sub></i></b>	Longitud	-3,5296 °
	Latitud	38,7796 °
	Altitud	1423,5 m

$K_{p2}$	Longitud	-3,2804 °
	Latitud	39,1748 °
	Altitud	1423,5 m
$A_{p2}$	Longitud	-3,3480 °
	Latitud	39,2662 °
	Altitud	1423,5 m
$K_{p3}$	Longitud	-3,8810 °
	Latitud	39,3804 °
	Altitud	1423,5 m
$A_{p3}$	Longitud	-3,9765 °
	Latitud	39,3597 °
	Altitud	1423,5 m
$K_{p4}$	Longitud	-4,3636 °
	Latitud	39,0415°
	Altitud	1423,5 m
$A_{p4}$	Longitud	-4,3148 °
	Latitud	38,9157 °
	Altitud	1423,5 m

Tabla 26. Puntos relevantes para la aproximación frustrada de la llegada por la pista 10

### 3.2.4 Resumen del procedimiento

En este apartado se incluye un resumen del procedimiento. Dicho resumen está compuesto por dos figuras: una en la que se recogen los tramos de aproximación inicial, intermedia, final y frustrada (Figura 60) y otra que muestra el tramo de llegada (Figura 61). Cabe destacar que tanto las coordenadas como la altitud de los puntos se han ido mostrando a lo largo del apartado. Sin embargo, en la Tabla 27 se recopilan las altitudes de los puntos más relevantes que junto a las figuras anteriormente mencionadas permiten tener una visión general del procedimiento.

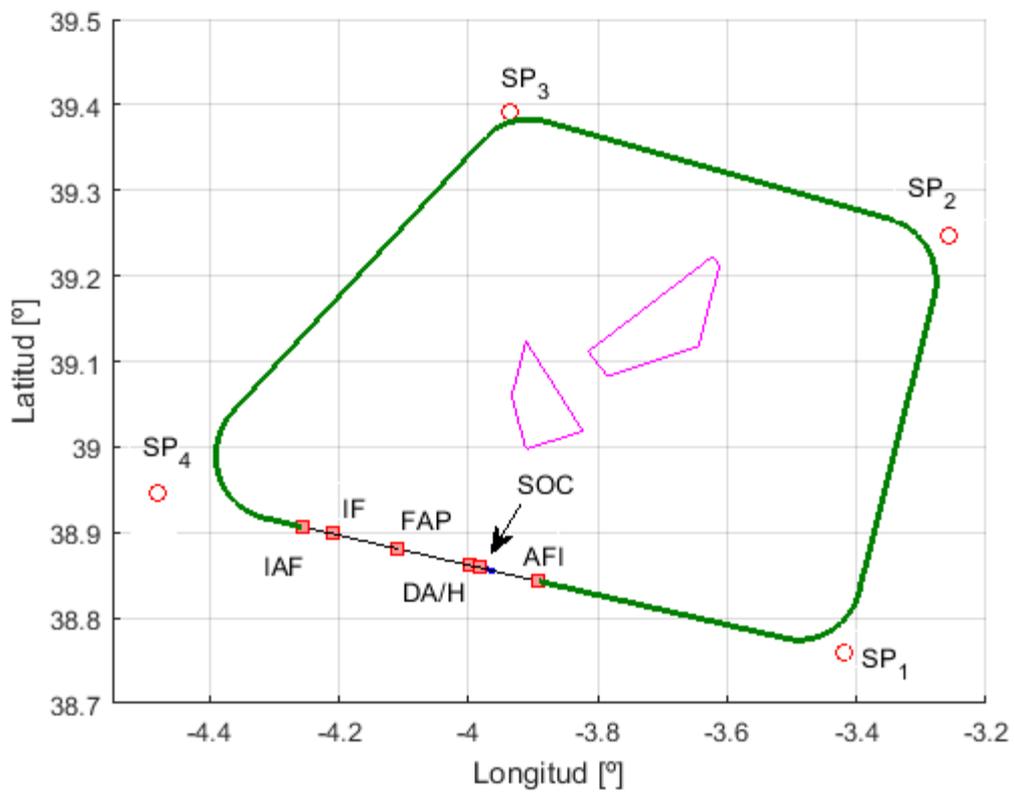


Figura 60. Tramos de aproximación inicial, intermedia, final y frustrada. Llegada por la pista 10

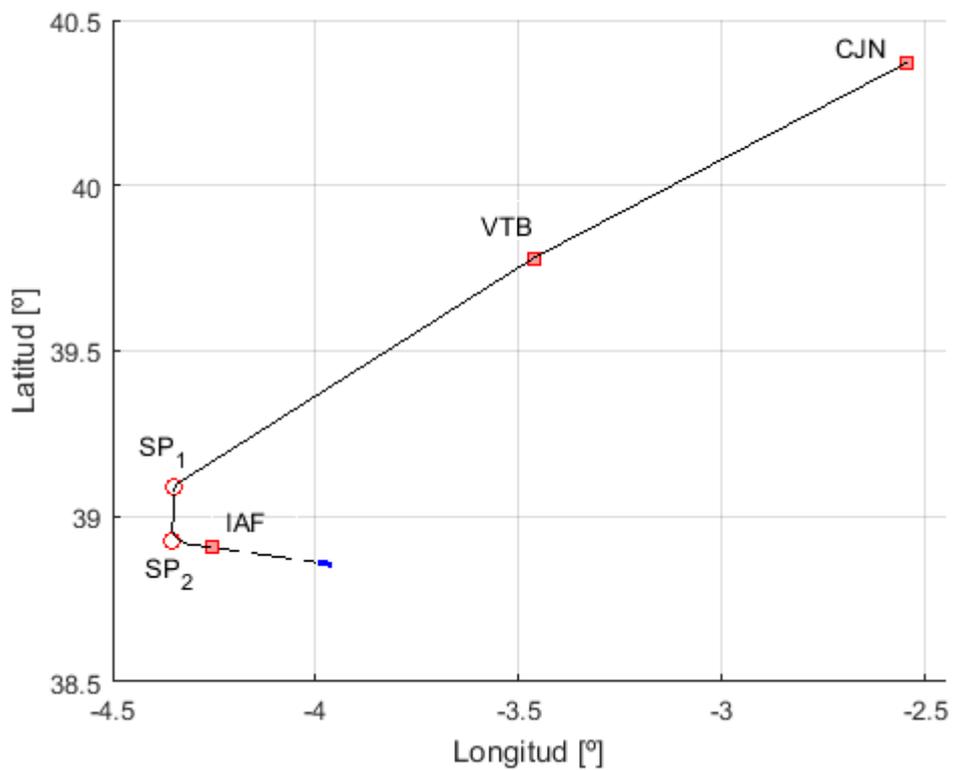


Figura 61. Tramo de llegada. Llegada por la pista 10

<b>Punto</b>	<b>Altitud [m]</b>
<b>SP<sub>1</sub></b> (Frustrada)	1423,5
<b>SP<sub>2</sub></b> (Frustrada)	1423,5
<b>SP<sub>3</sub></b> (Frustrada)	1423,5
<b>SP<sub>4</sub></b> (Frustrada)	1423,5
<b>SP<sub>2</sub></b> (Llegada)	1923,4
<b>SP<sub>1</sub></b> (Llegada)	2939,9
<b>SOC</b>	677,8
<b>AFI</b>	881,7
<b>DA/H</b>	677,8
<b>FAP</b>	1200
<b>IF</b>	1200
<b>IAF</b>	1423,5
<b>VTB</b>	4649,2
<b>CJN</b>	6047,4

Tabla 27. Altitudes de los puntos más relevantes. Llegada por la pista 10

## 4 DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS DE SALIDA

Los procedimientos de salida deben proporcionar el franqueamiento de obstáculos inmediatamente después del despegue y hasta que la aeronave intercepte un tramo de ruta. Además, estos procedimientos tienen que poder ser utilizados por todas las categorías de aeronaves, si fuera posible.

Los procedimientos de salida comienzan en el extremo de salida de la pista (DER), que es el extremo del área declarada conveniente para el despegue, es decir, el extremo de la pista o de la zona libre de obstáculos. Por otra parte, el final de un procedimiento de salida lo marca la conexión con el tramo siguiente o aquel punto en el que la PDG (pendiente de diseño de procedimientos) alcanza la altura mínima autorizada para la fase de vuelo siguiente.

Los principios de diseño de las salidas pasan por determinar qué tipo de salida se va a diseñar. En ese sentido, existen salidas en línea recta y salidas con viraje. Esta clasificación está asociada a la necesidad de realizar un viraje de más de  $15^\circ$  para alcanzar la guía de derrota proporcionada por la radioayuda correspondiente.

En los casos que se van a analizar a continuación, se ha considerado que las salidas son en línea recta. Esto se debe, principalmente, a que la radioayuda que proporciona la guía de derrota es el VOR/DME del aeropuerto que se comentó en el apartado 2.3. Además, se debe poder suministrar guía de derrota a menos de 20 km desde el extremo de salida de la pista (DER).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la aeronave debe permanecer alineada con la pista o con la guía de derrota, en su defecto, hasta que alcance los 120 m por encima de la pista y, antes de poder efectuar un viraje de más de  $15^\circ$ , se debe alcanzar un franqueamiento de obstáculos de 90 m.

En relación con el franqueamiento de obstáculos, es necesario definir dos conceptos que son determinantes en el diseño de las salidas: la OIS y la PDG. La OIS o superficie de identificación de obstáculos es una superficie inclinada que se utiliza para identificar los obstáculos en el área de salida. Su origen, para salidas en línea recta, está a una altura de 5 m por encima del DER y su pendiente es del 2,5%. Por su parte, la PDG o pendiente de diseño del procedimiento es la pendiente de ascenso publicada. Si ningún obstáculo penetra en la OIS, la PDG será la pendiente de la OIS más un 0,8%. Sin embargo, si existen obstáculos que penetran en la OIS, se debe ajustar la ruta de salida para evitarlo o aumentar la PDG para proporcionar el margen mínimo de franqueamiento de obstáculos por encima de la penetración, tal y como muestra la Figura 62.

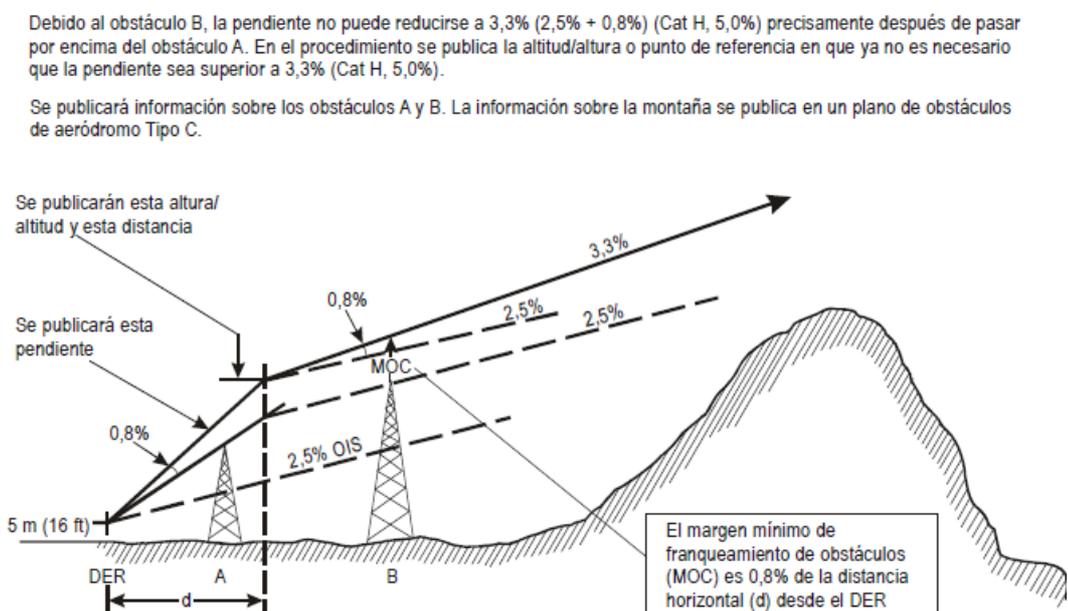


Figura 62. Definición de la PDG

## 4.1 Salida convencional por la pista 10

En el caso de diseñar un procedimiento de salida convencional en línea recta, que es lo que se pretende hacer en este apartado, es necesario tener en cuenta aquellas consideraciones generales a las que hace referencia el documento 8168, en el volumen II, parte I, sección 3 [13]. Sin embargo, esto se complementa con la parte II, sección 2 de ese mismo documento, en la que se habla de aspectos relacionados con los virajes o las tolerancias de los puntos de referencia.

A continuación, se va a dividir el proceso de diseño del procedimiento en dos partes. En la primera parte, se tendrá en cuenta la parte baja del procedimiento, es decir, aquel tramo en el que no se pueden realizar virajes. En la segunda parte, que se ocupará de la parte alta del procedimiento, se podrán considerar virajes y, por ello, habrá que tener en cuenta aspectos tales como las altitudes mínimas de sector o la interferencia con otros procedimientos.

### 4.1.1 Tramo sin viraje

Como se comentó anteriormente, en este primer tramo, se analiza la parte del procedimiento más cercana al suelo. Por ello, el elemento principal que se estudia es el franqueamiento de obstáculos, ya que es el tramo más afectado por los obstáculos del terreno. Para garantizar que la aeronave despega en condiciones de seguridad es necesario definir la PDG de forma correcta. Ese es el principal objetivo de este apartado.

Adicionalmente, se determina la superficie de identificación de obstáculos (OIS), que será clave en la definición de la PDG. También, es conveniente definir el punto de la trayectoria nominal a partir del cual los virajes están permitidos.

En primer lugar, se define la OIS. Esta superficie coincide en planta con el área de despegue y su pendiente es del 2,5%. El área de despegue, por su parte, viene definida como la intersección de un área de protección para el despegue y la superficie de protección asociada al VOR/DME que proporciona la guía de derrota.

El área de protección para el despegue presenta un borde interior de 300 m, perpendicular al eje en el extremo de la zona libre de obstáculos que coincide con el DER en este caso. A partir de los extremos del borde interior se definen dos bordes laterales que divergen con un ángulo de 15° respecto al eje de la pista.

Por otra parte, la superficie de protección asociada al VOR presenta un borde interior de 3700 m perpendicular a la derrota nominal que tiene que seguir la aeronave una vez que use la guía de derrota. A partir de los extremos del borde interior, se desarrollan dos bordes laterales que divergen con un ángulo de 7,8° respecto al eje de la pista. Además, existen dos bordes que delimitan la zona de área primaria y secundaria dentro de esta superficie de protección. Estos se sitúan de forma que la anchura del área secundaria sea la mitad de la semianchura del área primaria en cada punto.

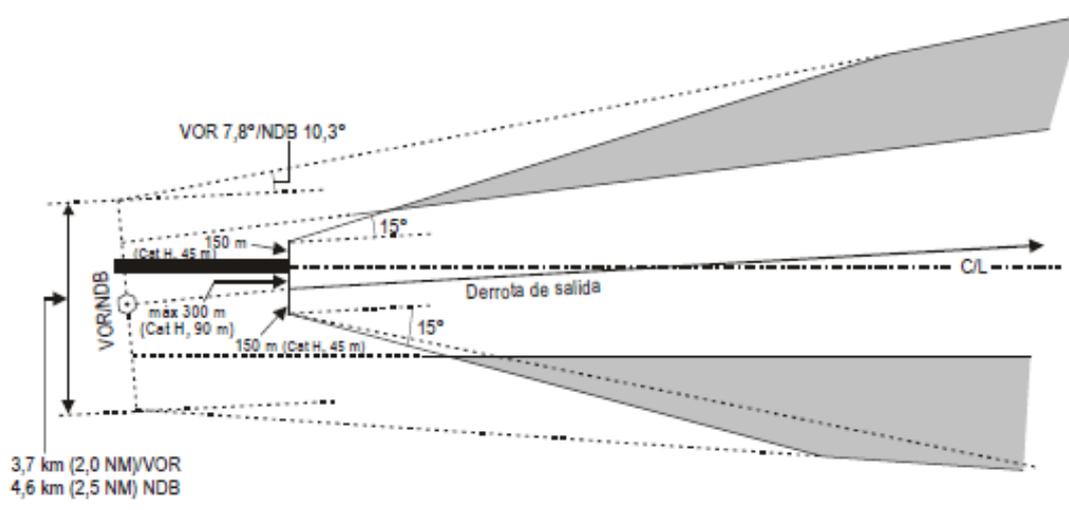


Figura 63. Definición de la OIS. Pista 10

A partir de las dos superficies descritas anteriormente, se calculan los puntos de intersección de estas y esos son los límites de la OIS, véase la Figura 63. Sin embargo, es necesario establecer un límite exterior. Este límite, que no está definido por normativa, se ha definido a partir de una inspección visual realizada con Google Earth. Para ello se ha establecido un polígono que presenta en el DER un borde con una anchura de 300 m perpendicular al eje de la pista y dos bordes laterales que divergen con un ángulo de  $15^\circ$  hasta las 50 NM, que se definieron como límites del estudio de la orografía en el apartado 2.1.1. A partir de esta superficie poligonal definida de forma aproximada, se obtienen algunos perfiles de elevación del terreno, como el que se muestra en la Figura 64. El resto de los perfiles analizados se recogen en el Anexo IV (7.4.1).

En vista de las elevaciones que se dan en esos perfiles, se llega a la conclusión de que los principales problemas de penetración se dan en las proximidades de los 30-40 km medidos a partir del DER siguiendo al eje de la pista, ya que son estas zonas las que presentan unas elevaciones superiores. Por ello, se decide extender la OIS hasta los 40 km a partir del DER.

Una vez definida la OIS en planta, hay que tener en cuenta que el borde interior está a 5 m por encima del DER. A partir del mismo, la pendiente es del 2,5% hasta el final de la OIS.

Lo único que quedaría por situar es precisamente el DER, que como se ha comentado, estaría en el extremo de la zona libre obstáculos. Esta zona se define como un rectángulo de 60x150 m situado a continuación del umbral (no desplazado) en el sentido del despegue. La Figura 65 muestra la ubicación de esta. En ella, la zona libre de obstáculos se denominada CWY. El Anexo 14 de la OACI [14] define esta zona como un área rectangular definida en el terreno o en el agua designada como área adecuada sobre la cual el avión puede efectuar una parte del ascenso inicial hasta una altura especificada. En este mismo documento se especifica que el terreno de esta zona no debería sobresalir de un plano inclinado con una pendiente del 1,25%, estando el límite inferior de ese plano a la elevación del eje de la pista al final del recorrido de despegue disponible.

Otra de las cuestiones que hay que abordar antes de pasar a describir el procedimiento seguido para determinar la PDG, es la selección del tipo de salida que se va a diseñar. Ya se ha comentado anteriormente que se trata de una salida en línea recta, ya que no se necesita realizar un viraje de más de  $15^\circ$  para alcanzar la guía de derrota proporcionada por la radioayuda correspondiente. Sin embargo, dentro de este grupo de salidas existen varios tipos. Teniendo en cuenta que se tiene guía de derrota, la clasificación existente se reduce a dos subgrupos: instalación en cabeza o en cola, y con guía de derrota desplazada. Debido a la ubicación del VOR, la salida debe agruparse dentro del subgrupo que presenta una guía de derrota desplazada.

Por último, se determinó que la derrota cruzase la dirección de la pista, tal y como se muestra en la Figura 63. La otra opción posible era suponer que la derrota permanecería paralela al eje de la pista. Sin embargo y en vista de los problemas que podrían venir asociados al terreno, se optó por la primera opción.

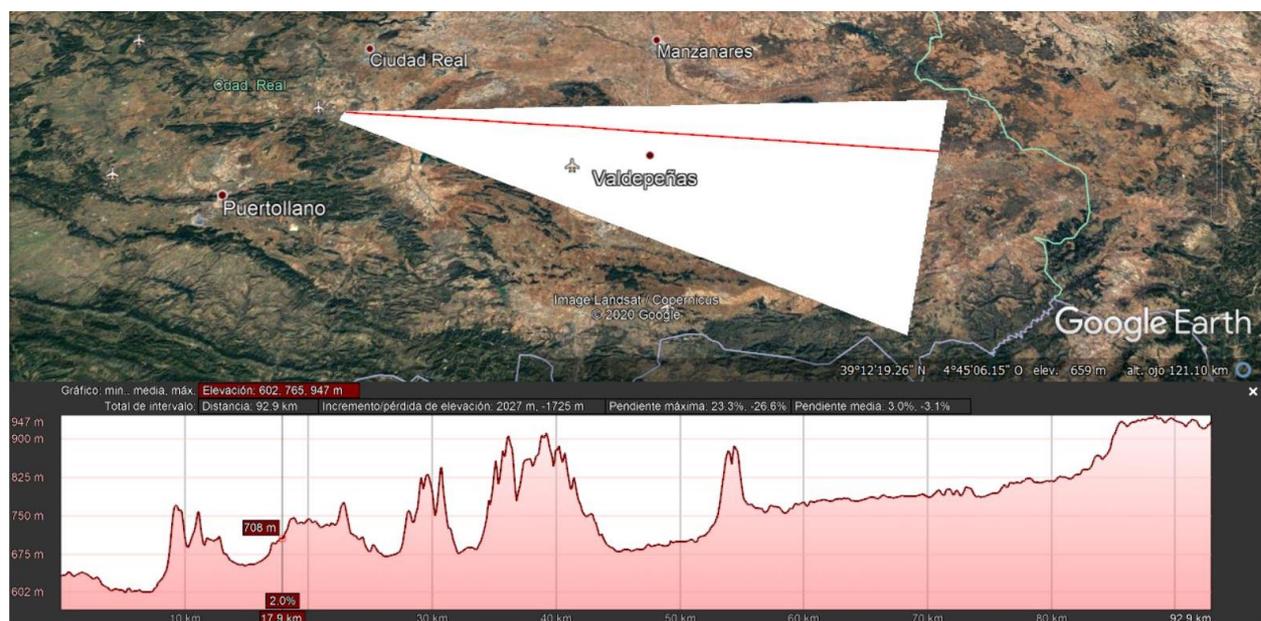


Figura 64. Perfil de elevación del terreno. Salida por la pista 10

A continuación, es necesario seguir un procedimiento para determinar la PDG en base a los obstáculos que penetran en la OIS. Con este procedimiento se pretende garantizar que las aeronaves volarán en condiciones de seguridad y que, por consiguiente, los obstáculos no suponen un riesgo para las operaciones aeronáuticas que sigan el procedimiento objeto de diseño. Sin embargo, antes de indicar el procedimiento seguido se recopilan las hipótesis empleadas en el mismo.

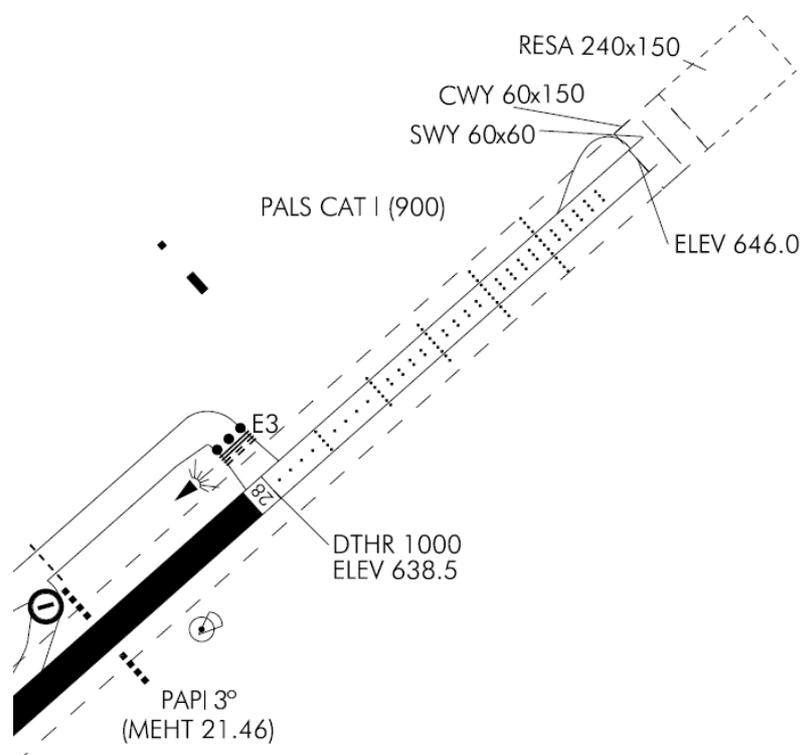


Figura 65. Zona libre de obstáculos en el umbral 28

#### 4.1.1.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño que se presentan en este apartado permiten cerrar el diseño que se está planteando. Dichas hipótesis y decisiones son:

- La elevación del DER es de 646,75 m. Es decir, es el resultado de sumar a la elevación del extremo de la pista una distancia que resulta del efecto de la pendiente del 1,25% sobre los 60 m de anchura que tiene la zona libre de obstáculos.
- La derrota de salida forma con la pista un ángulo de 1°. Esto se define de esa manera para evitar posibles problemas asociados a la orografía y poder conectar con la aerovía G5 a la altitud adecuada, como se verá posteriormente.
- Se asume que existe una estación VOR/DME en el aeropuerto que proporciona la guía de derrota.
- El viraje necesario para pasar de una trayectoria que siga el eje de la pista a una que se ajuste a la derrota de salida proporcionada por la radioayuda se asume instantáneo.

#### 4.1.1.2 Definición de la pendiente de diseño de procedimientos

El punto de partida para definir la PDG es determinar qué obstáculos penetran en la OIS y, por tanto, definir la OIS. En este apartado se ha explicado de forma teórica cómo se define esta superficie. Sin embargo, parece razonable dar algunas indicaciones sobre su implementación en MATLAB. De esa manera, es necesario definir, en primer lugar, el punto de intersección del DER con el eje de la pista. Este punto, que de ahora en adelante se denominará DER28, se define con las expresiones siguientes a partir del umbral de la cabecera 28 de la pista.

$$\begin{aligned}\phi_{DER28} &= \phi_{28} - \cos(\chi_{Pista}) \times 1060 \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{DER28} &= \lambda_{28} - \sin(\chi_{Pista}) \times 1060 \times Esc_{\lambda} \\ elev_{DER28} &= 646 + 60 \times 0,0125\end{aligned}$$

A partir del punto anterior, se define la OIS. Para ello, se necesita definir las dos superficies que se comentaron al inicio del apartado y, posteriormente, se calculan las intersecciones de las mismas. De esa forma, el área de protección para el despegue viene definida por cuatro puntos. A continuación, se desarrollan las expresiones que definen el punto  $OIS_4$  de la Figura 66. El resto de los puntos presentan una definición análoga.

$$\begin{aligned}\phi_{FinOIS1} &= \phi_{28} - \cos(\chi_{Pista}) \times 40000 \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FinOIS1} &= \lambda_{28} - \sin(\chi_{Pista}) \times 40000 \times Esc_{\lambda} \\ y_{OIS4} &= 150 + (40000 - 1060) \times \tan\left(\frac{15\pi}{180}\right) \\ \phi_{OIS4} &= \phi_{FinOIS1} + \cos\beta_2 \times y_{OIS4} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{OIS4} &= \lambda_{FinOIS1} + \sin\beta_2 \times y_{OIS4} \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

En cuanto al área de protección asociada al VOR viene definida por ocho puntos, ya que es necesario establecer cuáles son los límites entre el área primaria y las secundarias. Sin embargo, la definición de los mismos es análoga al caso anterior. Bien es cierto que esta superficie no se define en base a la inclinación de la pista. En este caso, es necesario tener en cuenta la desviación de  $1^\circ$  entre la pista y la guía de derrota que se comentó anteriormente.

A continuación, a modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas en la definición de alguno de los puntos que describen la superficie de protección asociada al VOR.

$$\begin{aligned}\chi_{VOR} &= \chi_{Pista} - \frac{\pi}{180} \\ \beta_{VOR} &= \frac{\pi}{2} + \chi_{VOR} \\ \beta_{VOR2} &= -\frac{\pi}{2} + \chi_{VOR} \\ \phi_{FinVOR} &= \phi_{VOR} - \cos(\chi_{VOR}) \times (40000 + Distancia_{VOR-28}) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FinVOR} &= \lambda_{VOR} - \sin(\chi_{VOR}) \times (40000 + Distancia_{VOR-28}) \times Esc_{\lambda} \\ y_{FinVOR} &= \frac{3700}{2} + (40000 + Distancia_{VOR-28}) \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right) \\ \phi_{VOR3} &= \phi_{FinVOR} + \cos(\beta_{VOR}) \times y_{FinVOR} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{VOR3} &= \lambda_{FinVOR} + \sin(\beta_{VOR}) \times y_{FinVOR} \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

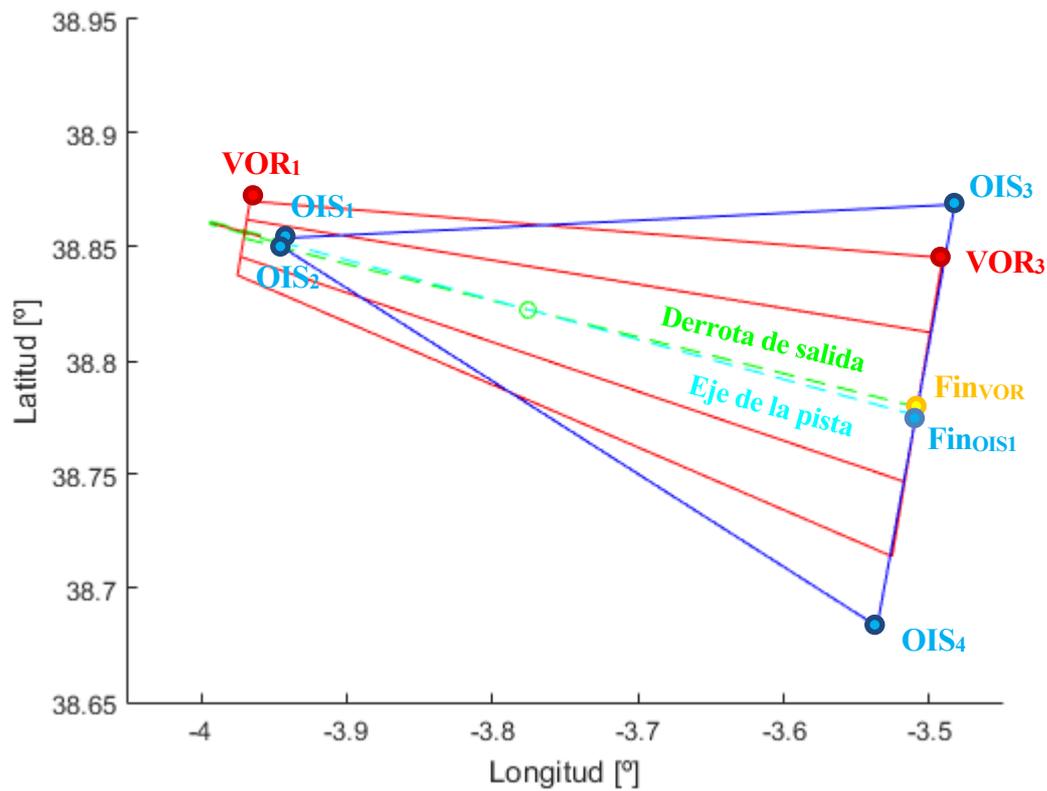


Figura 66. Definición de la OIS (I). Pista 10

Finalmente, habría que calcular las intersecciones de estas superficies, cuyo resultado se presenta en la Figura 67. Obsérvese que en esta figura hay cuatro puntos especialmente relevantes que están destacados en amarillo. De nuevo, como en los casos anteriores, se desarrolla la formulación de uno de ellos, puesto que la del resto es completamente análoga. Nótese que se va a tratar con rectas en el plano  $\lambda - \phi$  porque el resultado es el mismo que si se calculan las intersecciones a partir de las distancias y las orientaciones que se venían manejando.

$$m_{15-sup} = \frac{\phi_{OIS1} - \phi_{OIS3}}{\lambda_{OIS1} - \lambda_{OIS3}}$$

$$n_{15-sup} = \phi_{OIS1} - m_{15-sup} \times \lambda_{OIS1}$$

$$m_{VOR-sup} = \frac{\phi_{VOR1} - \phi_{VOR3}}{\lambda_{VOR1} - \lambda_{VOR3}}$$

$$n_{VOR-sup} = \phi_{VOR1} - m_{VOR-sup} \times \lambda_{VOR1}$$

$$\lambda_{Sup-Sec} = \frac{n_{15-sup} - n_{VOR-sup}}{m_{VOR-sup} - m_{15-sup}}$$

$$\phi_{Sup-Sec} = m_{VOR-sup} \times \lambda_{Sup-Sec} + n_{VOR-sup}$$

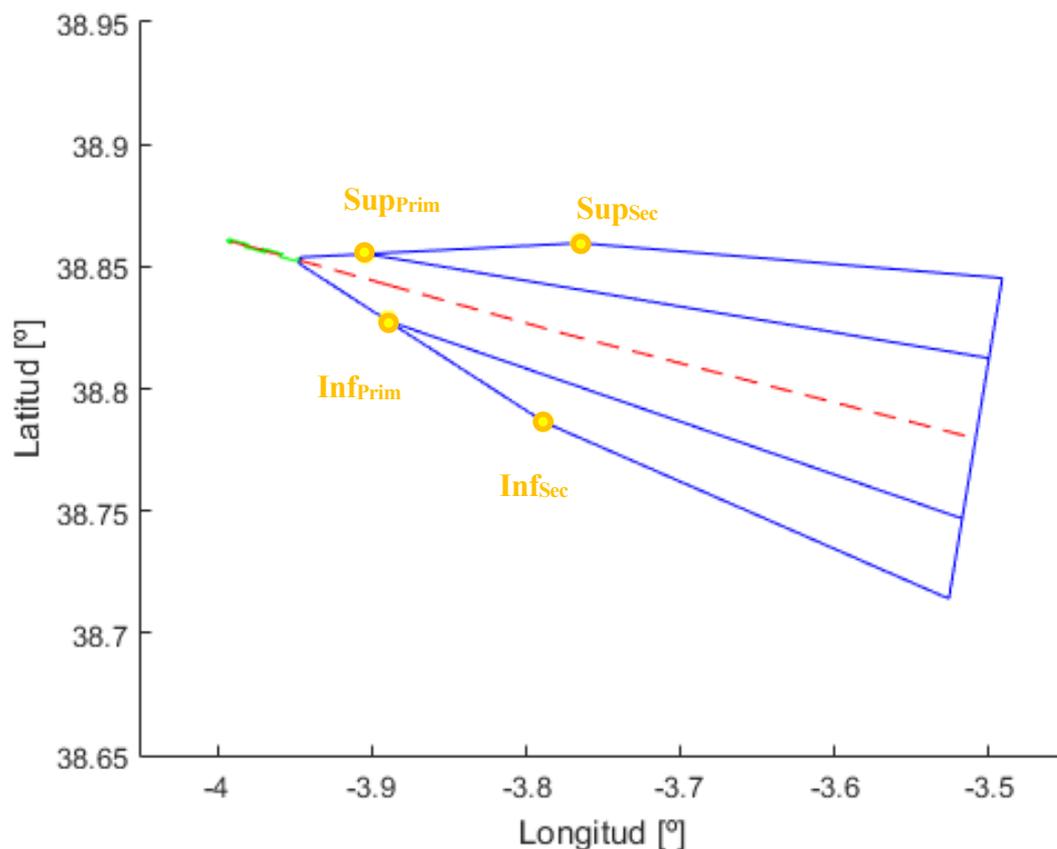


Figura 67. Definición de la OIS (II). Pista 10

Una vez definida la OIS, es necesario comprobar si hay obstáculos que penetren en ella. El proceso seguido es análogo a los procesos de comprobación del MOC empleados en apartados anteriores. De esa manera, se recorre el terreno y para cada punto se analiza si está por encima o por debajo de la superficie de identificación de obstáculos. Los detalles de este procedimiento se encuentran recogidos en el Anexo II (Apartado 7.2.3.1).

Una vez realizada esta primera comprobación, se llegó a la conclusión de que existían bastantes puntos que penetraban en la OIS. Por tanto, es necesario incrementar la pendiente de diseño por encima del 2,5%. El criterio que se ha seguido para establecer esa modificación es el que se muestra gráficamente en la Figura 62, es decir, se toma el valor de la pendiente almacenada que se comentó en el párrafo anterior y se mantiene ese valor hasta sobrepasar el obstáculo en cuestión. Posteriormente, se reduce esa pendiente a 2,5%. Si estableciendo ese cambio en la pendiente se consigue que ningún obstáculo penetre en la OIS modificada, ese es el valor que se buscaba desde el principio. En caso contrario, hay que prolongar la pendiente inicial (superior al 2,5%) más allá del obstáculo que supuso el incremento de pendiente de forma progresiva a partir de la distancia hasta el obstáculo. Es decir, en principio el cambio de pendiente se daría donde marque el obstáculo, pero, en caso de ser necesario, se iría retrasando ese cambio respecto al umbral de 100 m en 100 m hasta que no existan obstáculos penetrantes. En este caso, esa prolongación no es necesaria.

El proceso de comprobación es idéntico al anterior, pero con ciertas modificaciones en el cálculo de la variable  $z_{OIS}$ . Es decir, una vez que se verifica que el punto analizado del terreno está dentro de la superficie de la OIS en planta, hay que verificar que su altitud está por debajo de la que se consigue como resultado de las pendientes mencionadas y de la distancia recorrida sobre la trayectoria nominal con el cambio necesario para utilizar la guía de derrota. De esa forma, existen varias opciones en función de la localización del punto:

- Si la coordenada x del punto analizado está por debajo de la coordenada x asociada al punto de cambio de pendiente, la elevación se calcula de la siguiente manera:

$$z_{OIS} = elev_{DER28} + 5 + (x - 1060) \times Pend_{incr}$$

- Si la coordenada x del punto analizado está por encima de la coordenada x asociada al punto de cambio de pendiente, existen dos opciones:

- Que la coordenada x del punto analizado esté por debajo de la coordenada x asociada al punto de cambio de trayectoria, de forma que la elevación vendría dada por:

$$z_{OIS} = elev_{DER28} + 5 + x_{camb_{pend}} \times Pend_{incr} + (x - 1060 - x_{camb_{pend}}) \times 0,025$$

- Que la coordenada x del punto analizado esté por encima de la coordenada x asociada al punto de cambio de trayectoria, de forma que la elevación vendría dada por:

$$z_{OIS} = elev_{camb_{tray}} + (x - hip_{SV} - 1060) / \cos(\gamma'_1) \times \cos(\gamma'_2) \times 0,025$$

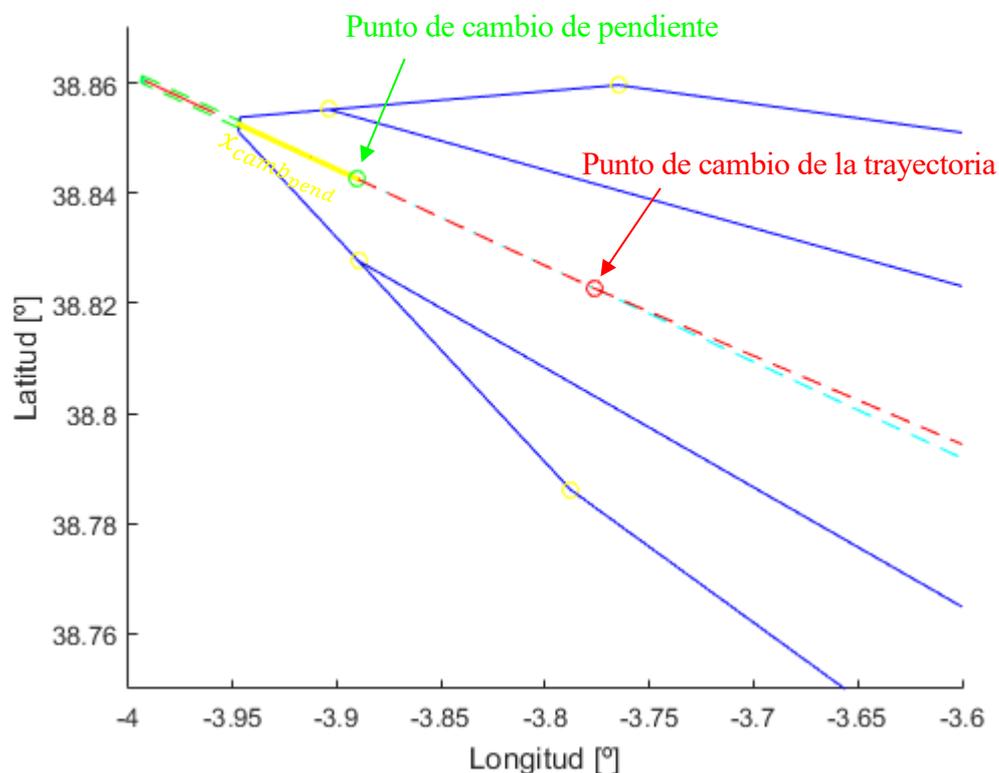


Figura 68. Cálculo de la elevación (II). Pista 10

De todo lo anterior, se concluye que se necesita un cambio de PDG que se da antes de sobrepasar el cambio en la derrota. Ese punto de cambio coincide (su coordenada x) con el obstáculo que supone la mayor pendiente. Es decir, no es necesario prolongar más la trayectoria que se recorre con la pendiente incrementada para cumplir con los criterios de seguridad frente a obstáculos. La Tabla 28 recoge los resultados obtenidos.

<b>PDG antes del cambio de pendiente</b>	3,92 %
<b>PDG después del cambio de pendiente</b>	3,3 %
<b>Coordenada x del cambio de pendiente (sobre la trayectoria)</b>	5072 m
<b>Coordenada x del cambio en la trayectoria</b>	15186,9 m
<b>Elevación del punto de cambio de PDG</b>	850,6 m
<b>Elevación del punto de cambio de trayectoria</b>	1184,4 m

Tabla 28. PDG para la salida por la pista 10

#### 4.1.1.3 Determinación del punto de viraje

Por último, se necesita calcular el punto a partir del cual se pueden realizar virajes. Este punto debe garantizar que se está a una altura de 120 m sobre el DER y que se tiene un MOC de 90 m. Por tanto, el procedimiento a seguir es iterativo. Es decir, se supone la ubicación de este punto, que garantiza siempre la restricción de los 120 m, y se comprueba que el MOC es de 90 m. De no ser así, se aleja el punto del umbral y se hace la misma comprobación para la nueva ubicación.

De esa forma, el proceso comienza por calcular la ubicación del punto a partir del cual están permitidos los virajes. Esta ubicación se calcula con las expresiones que se describen en las líneas siguientes y depende de la elevación supuesta para el punto. En principio, se supone que el parámetro  $s$  del que depende la elevación valdrá 0, ya que es lo mínimo que puede valer para garantizar el cumplimiento de la restricción de los 120 m. Posteriormente, si no se cumple la restricción del MOC se subirá el valor del parámetro de 10 en 10 m. Por otra parte, las expresiones que se presentan a continuación pertenecen al caso en el que el punto esté más cerca del umbral que el punto de cambio de pendiente. Bien es cierto que no en todas las iteraciones que se han realizado esto es así. Por ello, hay que implementar una condición que compruebe si el punto está antes o después del cambio de pendiente, para poder calcular la distancia al DER de forma correcta. También, hay que tener en cuenta que el punto que se está buscando se sitúa antes de que se dé la corrección de la derrota.

$$\begin{aligned}
 elev_{VIR} &= elev_{DER28} + 120 + s \\
 Dist_{VIR-28} &= \frac{elev_{VIR} - elev_{DER28} - 5}{0,0392} + 1060 \\
 \phi_{VIR} &= \phi_{DER28} - \cos(\chi_{Pista}) \times (Dist_{VIR-28} - 1060) \times Esc_{\phi} \\
 \lambda_{VIR} &= \lambda_{DER28} - \sin(\chi_{Pista}) \times (Dist_{VIR-28} - 1060) \times Esc_{\lambda}
 \end{aligned}$$

Una vez supuesta la ubicación del punto, se procede a realizar la comprobación del MOC de 90 m. De nuevo, el proceso consiste en recorrer el terreno y determinar, para cada punto, si está situado en el área primaria o secundaria de protección. En caso de que algún punto viole la restricción del MOC comentada, se modifica el parámetro  $s$  y se vuelve a realizar la comprobación. El proceso en detalle queda recogido en el Anexo II (Apartado 7.2.3.2).

Los resultados recogidos de la comprobación realizada se muestran en la Tabla 29 y los resultados globales obtenidos en este apartado se pueden ver en la Figura 69. Obsérvese que el punto que se buscaba, a partir del cual se permiten los virajes, está 190 m por encima del DER. Esto es consecuencia directa de la orografía y los riesgos que esta supone para las operaciones aeronáuticas.

$elev_{VIR}$	836,8 m
$Dist_{VIR-DER}$	5777,8 m
$lat_{VIR}$	38,8432 °
$long_{VIR}$	-3,8939 °

Tabla 29. Punto a partir del que se permite virar. Pista 10

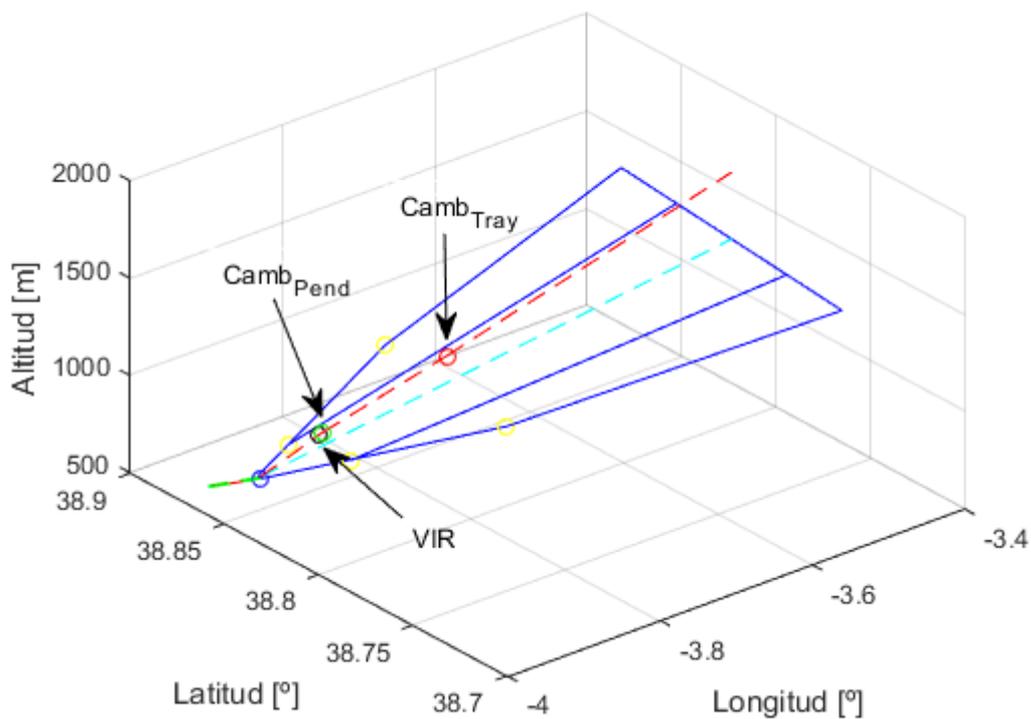


Figura 69. Salida por la pista 10. Tramo sin viraje

#### 4.1.2 Tramo con viraje

Una vez definida la parte baja del procedimiento, es necesario definir la parte alta del mismo. Este tramo en el que los virajes están permitidos es el que conecta con el tramo de ruta, en el que el MOC debe ser de 300 m. El objetivo de este tramo es, por tanto, definir una trayectoria segura en cuanto a obstáculos teniendo en cuenta la división en sectores del espacio aéreo, los límites de altitud impuestos en las aerovías y, por supuesto, la interacción con los procedimientos de otros aeropuertos cercanos.

De esa forma, se selecciona una primera trayectoria a seguir que consiste en continuar por el radial que marca la radioayuda que da la guía de derrota hasta Valdepeñas, donde se intersecta a la G5, de doble sentido. A continuación, se sigue por esa aerovía hasta llegar a NASOS y, posteriormente, a CJN. Durante todo el trayecto, la aeronave continúa ascendiendo con la pendiente del 3,3%. Es decir, cuando se empieza a virar para alcanzar la aerovía G5, se tiene una altitud de unos 2500 m y cuando se llega a CJN, ese valor se ve aumentado hasta los 7500 m (FL 240). Eso implica que en el punto de intersección de los dos radiales la aeronave estaría por debajo del nivel del límite inferior de G5. Por ello, es necesario aumentar la pendiente (PDG) calculada en el apartado anterior y extenderla hasta una distancia superior a la establecida, como se muestra en la Tabla 30. De esa forma cuando la aeronave entre en G5, lo hará a unos 3050 m, es decir, a FL100.

Una vez definida la ruta es necesario resaltar que, de la misma manera que ocurría con el procedimiento de llegada por la pista 28, existe un tramo común con la STAR 4 de Madrid que se recoge en el Anexo I de este documento. En este tramo, que va desde NASOS a CJN, habría que considerar una diferencia entre altitudes. En el caso de la STAR 4 de Madrid la máxima altitud en ese tramo es de FL 210. En la ruta que se está diseñando el nivel de vuelo alcanzado en ese tramo es de FL 100 como mínimo, que es lo que exige G5. Es decir, hay margen suficiente para que no existan problemas.

<b>PDG antes del cambio de pendiente</b>	6,3 %
<b>PDG después del cambio de pendiente</b>	3,3 %
<b>Coordenada x del cambio de pendiente (sobre la trayectoria)</b>	13771,5 m
<b>Coordenada x del cambio en la trayectoria</b>	15186,9 m
<b>Elevación del punto de cambio de pendiente</b>	1519,4 m
<b>Elevación del punto de cambio de trayectoria</b>	1566,1 m

Tabla 30. Modificación de la PDG para la salida por la pista 10

En cuanto a los sectores de control, cabe destacar que el aeródromo se encuentra dentro del sector LECSBA1. Por tanto, la salida trazada parte de este sector. Posteriormente, atravesaría el sector LECMCJI para acabar introduciéndose en LEMDALN y alcanzar CJN en LEMDERS. En ningún caso, se exceden los límites que impone la altitud mínima de sector.

Una vez establecido el camino a seguir en esta salida, que presenta un único viraje, hay que realizar un proceso de comprobación del MOC que debe ser superior a 90 m en todo el trayecto y debe alcanzar un valor de 300 m en CJN. Sin embargo, para poder llevar a cabo esta comprobación es necesario determinar las áreas de protección del viraje que se realiza en la interceptación de G5, no sin antes determinar cuáles son las hipótesis empleadas para ello, que serán de aplicación en todo el apartado.

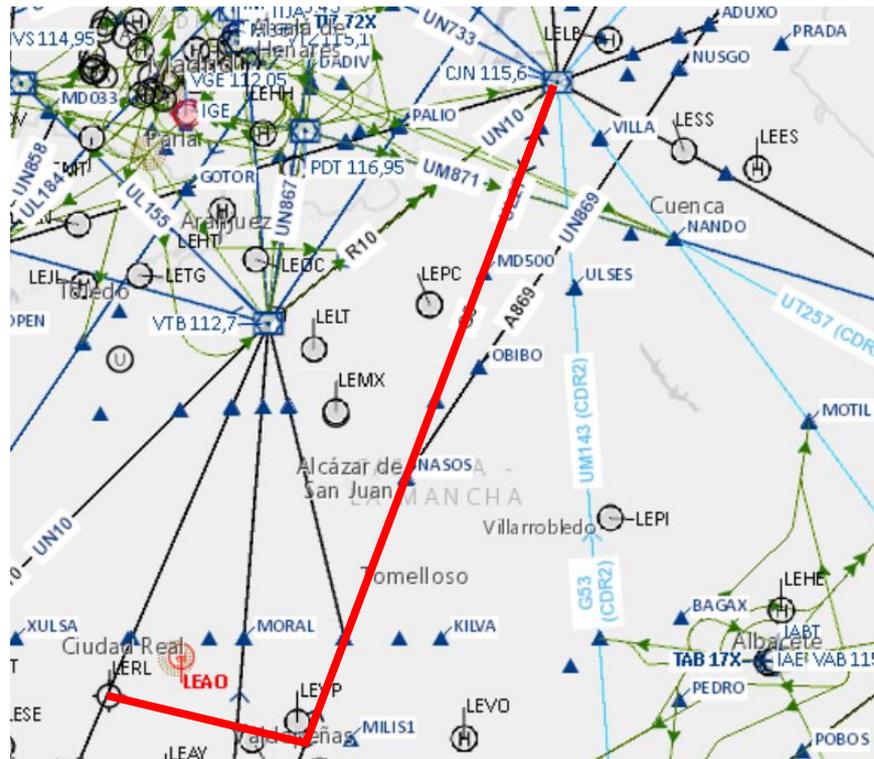


Figura 70. Salida por la pista 10. Trayectoria

#### 4.1.2.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Todas las hipótesis y decisiones de diseño empleadas en el apartado anterior serán aplicadas en este apartado. Además, existen otras que merece la pena destacar y que son las siguientes:

- Se utilizan el método perfeccionado para la determinación del área de protección y el método de la espiral de vientos para la construcción del borde exterior del área de viraje.
- Las áreas de protección se siguen ensanchando durante el viraje y seguirán haciéndolo en G5 hasta alcanzar la anchura de ruta.
- La elevación de cada punto se calcula a partir de la distancia recorrida sobre la trayectoria nominal, sin tolerancias.
- La aerovía G5 está delimitada por dos estaciones VOR: CEN y BLN. El cambio de una radioayuda a otra se supone en ANZAN, ya que en la AIP existe una diferencia de 1° entre el radial que sigue la aerovía antes y después de ANZAN.

#### 4.1.2.2 Construcción del área de protección de virajes

Para determinar las áreas de viraje es necesario tener en cuenta una serie de parámetros. La altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo tienen una influencia considerable.

La velocidad indicada (IAS) considerada es de 539 km/h, que es la velocidad de aproximación final incrementada en un 10%. A partir de ella se puede calcular la TAS con la expresión siguiente. En esta expresión se considera una altitud de 2824,1 m, que es la altitud del punto de interceptación de G5 o punto de viraje. También hay que definir la variable VAR, de la misma forma que en apartados anteriores.

$$TAS = IAS \times \frac{1000}{3600} \times 171233 \times \frac{((288 + VAR) - 0,006496 \times H)^{0,5}}{(288 - 0,006496H)^{2,628}}$$

$$VAR = T_{ref} - (T_0 - 6,5 \times 10^{-3} \times H_{aeródromo}) = 23,05 \text{ } ^\circ C$$

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de  $15^\circ$ , como indica la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la siguiente expresión, estando su resultado expresado en %s. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de las direcciones de las rectas que definen la aerovía G5 y la trayectoria seguida por la aeronave hasta interceptarla. Su valor es de  $\alpha = 80,64^\circ$ .

$$R = \frac{6355 \times \tan \mu}{\pi V}$$

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma. La V representa, de nuevo, a la TAS, y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. El radio de viraje para un valor dado de R se calcula con la siguiente expresión. Su valor es de 12253,4 m.

$$r = \frac{V}{20\pi R}$$

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral y del tiempo de reacción del piloto, y resulta ser de 6 segundos. Bien es cierto que esta tolerancia también hace referencia a la tolerancia en el cronometraje del alejamiento y a la tolerancia de rumbo de la aeronave, pero ninguna de las dos aplica en este caso. Por su parte, la tolerancia del punto de referencia debe tener en cuenta que el punto de viraje está definido a partir del VOR/DME del aeródromo. De esa forma, la precisión es de  $460 \text{ m} + 1,25\%$  de la distancia a la antena. Este valor equivale a la media cuadrática de la combinación de la precisión mínima, del margen de tolerancia del equipo de control y de la tolerancia técnica de vuelo.

Con todo lo anterior, el área de viraje queda establecida tal y como muestra la Figura 71. En ella, se representa en azul la OIS definida en el apartado anterior y en rojo el área de protección que se define en este apartado. Además, se presenta en cian la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que será clave para la determinación del MOC. El Anexo III (Apartado 7.3.3) recoge el proceso de definición de esta área con un mayor nivel de detalle.

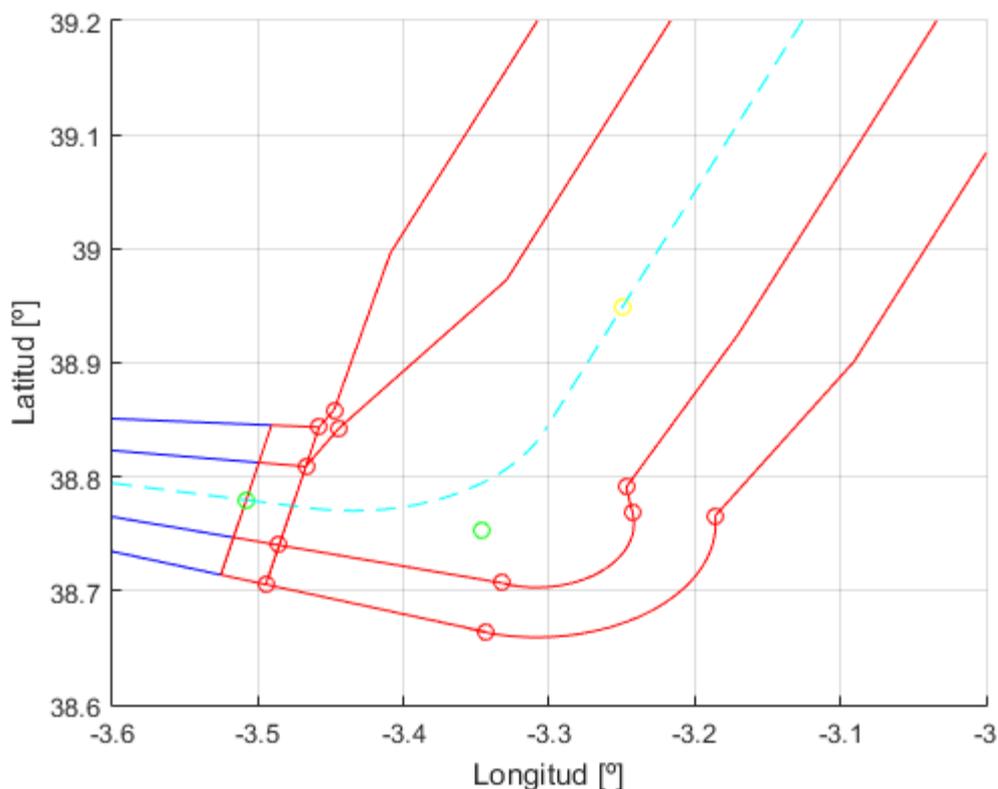


Figura 71. Área de viraje para la salida por la pista 10

De nuevo, la trayectoria nominal sigue un arco de círculo en el viraje delimitado por los puntos  $A_p$  y  $K_p$ , y deformado por los factores de escala

Por su parte, la elevación de los puntos vendrá determinada a partir de la elevación del punto  $K_{cent}$ , asumiendo una pendiente del 3,3% y midiendo la longitud de la curva seguida.

#### 4.1.2.3 Procedimiento de comprobación del MOC

La comprobación del MOC es análoga a la realizada anteriormente, es decir, hay que recorrer el terreno y para cada punto se comprueba si está dentro de las áreas de protección. En caso afirmativo, se procede a verificar que se cumple con la restricción del MOC (90 m en todo momento y 300 m al alcanzar CJN). Como en el resto de las comprobaciones, el proceso se encuentra descrito en detalle en el Anexo II (Apartado 7.2.3.3).

Además, hay que resaltar que se ha ido comprobando de forma progresiva. Es decir, se han hecho dos comprobaciones de los fragmentos del terreno que se muestran en la Figura 72 y en la Figura 73. En el primer caso, la distancia entre los obstáculos y la trayectoria es de unos 1400 m y el segundo es de unos 2400 m. No es necesario extender la comprobación al resto del área porque ya se tiene una distancia lo suficientemente alta para que no haya problemas y, por inspección visual en los mapas de Google e Insignia, se llega a la conclusión de que no existen zonas que puedan suponer un riesgo. Por tanto, se concluye que el procedimiento diseñado es seguro. La Tabla 31 contiene las elevaciones y las coordenadas de los puntos de referencia del procedimiento.

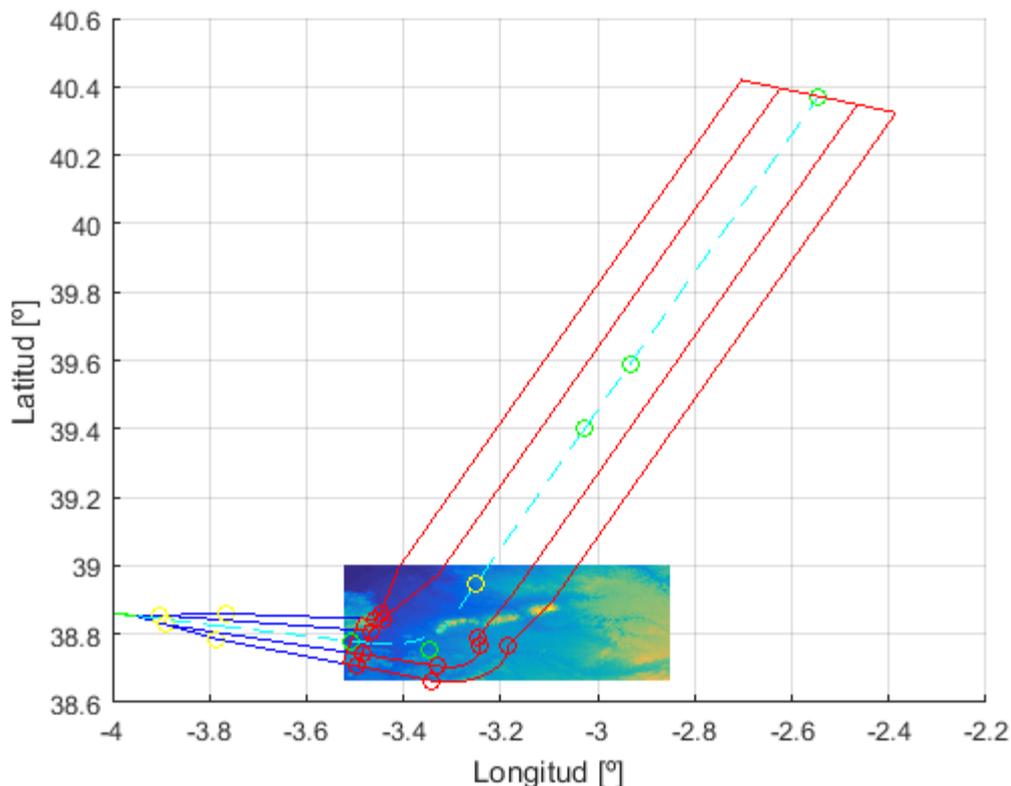


Figura 72. Terreno analizado (I). Pista 10

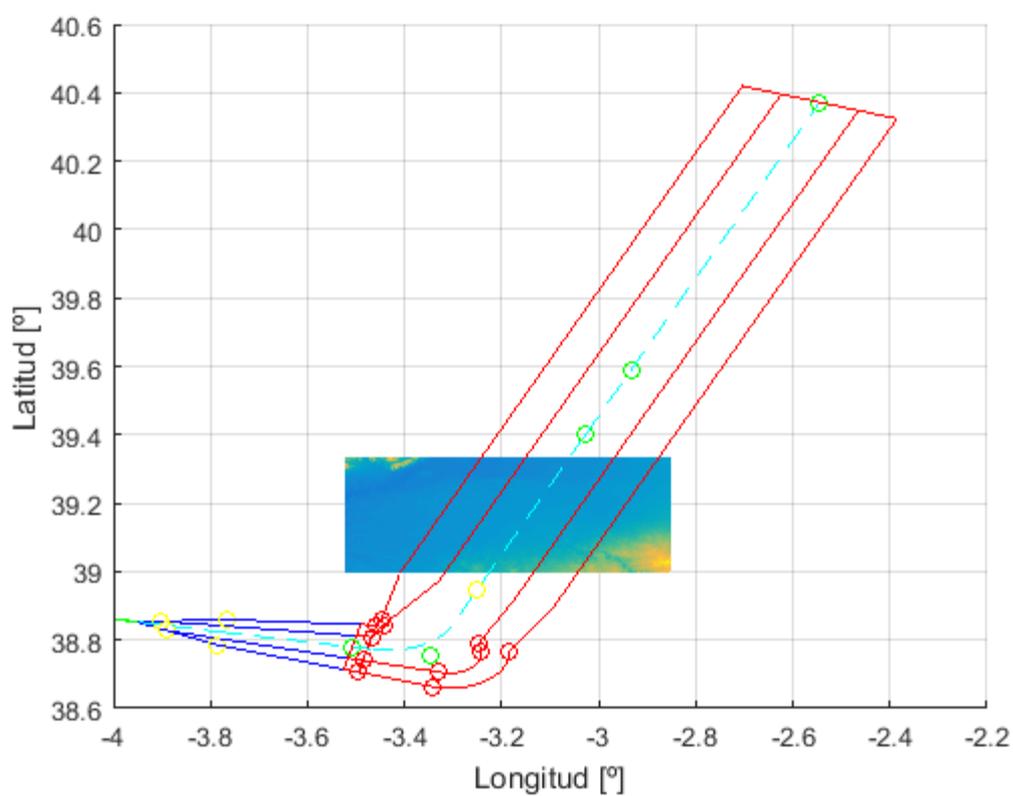


Figura 73. Terreno analizado (II). Pista 10

$Fin_{VOR}$	Longitud	-3,5081 °
	Latitud	38,7797 °
	Altitud	1625,3 m
$K_p$	Longitud	-3,4633 °
	Latitud	38,7725 °
	Altitud	2481,0 m
$K_{cent}$	Longitud	-3,4763 °
	Latitud	38,7746 °
	Altitud	2443,0 m
$A_p$	Longitud	-3,3031 °
	Latitud	38,8408 °
	Altitud	3050,1 m

<b><i>BLN<sub>cent</sub></i></b>	Longitud	-3,2498 °
	Latitud	38,9488 °
	Altitud	3475,6 m
<b><i>NASOS</i></b>	Longitud	-3,0278 °
	Latitud	39,3991 °
	Altitud	5249,9 m
<b><i>INTAX</i></b>	Longitud	-2,9338 °
	Latitud	39,5899 °
	Altitud	6001,4 m
<b><i>CJN</i></b>	Longitud	-2,5447 °
	Latitud	40,3718 °
	Altitud	9082,1 m

Tabla 31. Puntos relevantes para la salida por la pista 10

### 4.1.3 Resumen del procedimiento

En este apartado se incluye un resumen del procedimiento. Dicho resumen está compuesto por la Figura 74 en la que se muestra el procedimiento global de salida con todos los puntos significativos. Aunque las coordenadas y la altitud de los puntos se han ido mostrando a lo largo del apartado, en la Tabla 32, se recopilan las altitudes de los puntos más relevantes que, junto a la figura anteriormente mencionada, permiten tener una visión general del procedimiento.

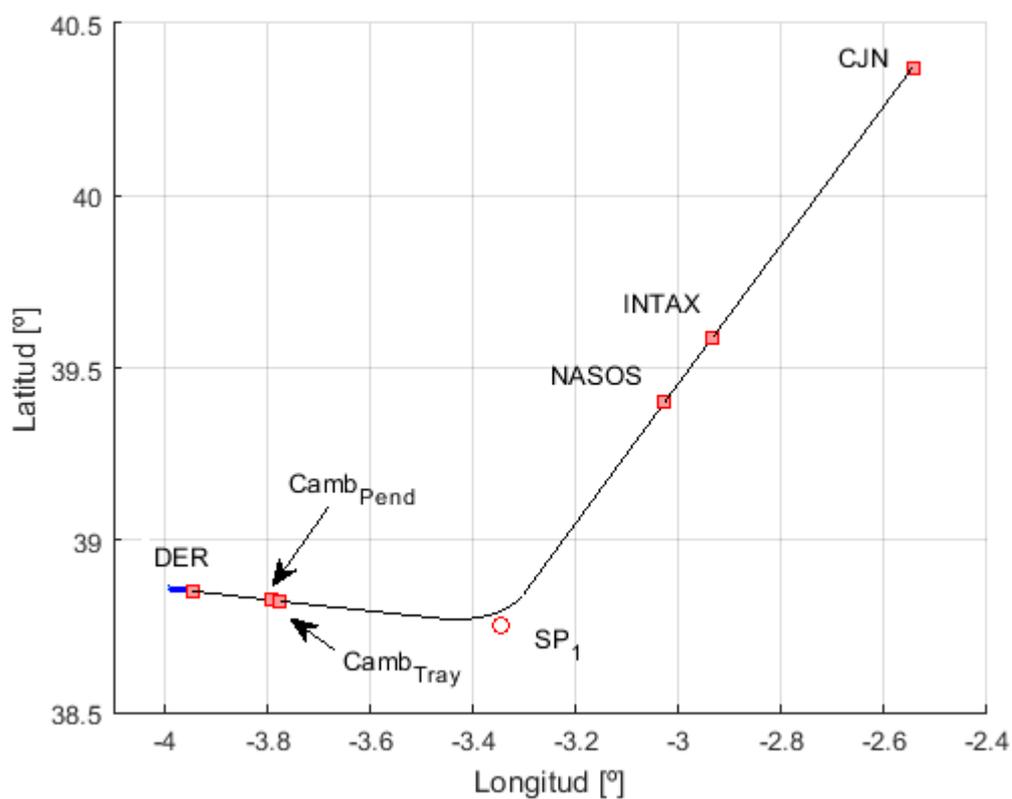


Figura 74. Llegada por la pista 10. Global

Punto	Altitud [m]
DER	646,75
Camb <sub>pend</sub>	1519,4
Camb <sub>Tray</sub>	1566,1
SP <sub>1</sub>	2824,1
NASOS	5249,9
INTAX	6001,4
CJN	9082,1

Tabla 32. Altitudes de los puntos más relevantes. Salida por la pista 10

## 4.2 Salida convencional por la pista 28

Al igual que en el caso anterior, para el diseño de la salida convencional en línea recta por la pista 28, es necesario tener en cuenta aquellas consideraciones generales a las que hace referencia el documento 8168, en el volumen II, parte I, sección 3 [13]. También, se complementa con la parte II, sección 2 de ese mismo documento, en la que se habla de aspectos relacionados con los virajes o las tolerancias de los puntos de referencia. Igualmente, se trata de un procedimiento convencional.

El proceso de diseño del procedimiento se divide en dos partes. En la primera parte, se tendrá en cuenta la parte baja del procedimiento, es decir, aquel tramo en el que no se pueden realizar virajes. En la segunda parte, que se ocupará de la parte alta del procedimiento, se podrán considerar virajes y, por ello, habrá que tener en cuenta aspectos tales como las altitudes mínimas de sector o la interferencia con otros procedimientos.

### 4.2.1 Tramo sin viraje

De nuevo, en este primer tramo, se analiza la parte del procedimiento más cercana al suelo. Por ello, el elemento principal que se estudia es el franqueamiento de obstáculos, ya que es el tramo más afectado por los obstáculos del terreno. Para garantizar que la aeronave despega en condiciones de seguridad es necesario definir la PDG de forma correcta. Adicionalmente, se determina la superficie de identificación de obstáculos (OIS), que es clave para la definición de la PDG. También, es conveniente definir el punto de la trayectoria nominal a partir del cual los virajes están permitidos.

En primer lugar, se define la OIS para lo que hay que determinar el área de despegue. El área de despegue, por su parte, viene definida como la intersección de un área de protección para el despegue y la superficie de protección asociada al VOR/DME que proporciona la guía de derrota. Como se indicó en el apartado anterior, el área de protección para el despegue presenta un borde interior de 300 m, perpendicular al eje en el extremo de la zona libre de obstáculos que coincide con el DER. A partir de los extremos del borde interior se definen dos bordes laterales que divergen con un ángulo de  $15^\circ$  respecto al eje de la pista.

De la misma manera, la superficie de protección asociada al VOR presenta un borde interior de 3700 m perpendicular a la derrota nominal que tiene que seguir la aeronave una vez que use la guía de derrota. A partir de los extremos del borde interior, se desarrollan dos bordes laterales que divergen con un ángulo de  $7,8^\circ$  respecto a la derrota. Además, existen dos bordes que delimitan la zona de área primaria y secundaria dentro de esta superficie de protección. Estos se sitúan de forma que la anchura del área secundaria sea la mitad de la semianchura del área primaria en cada punto.

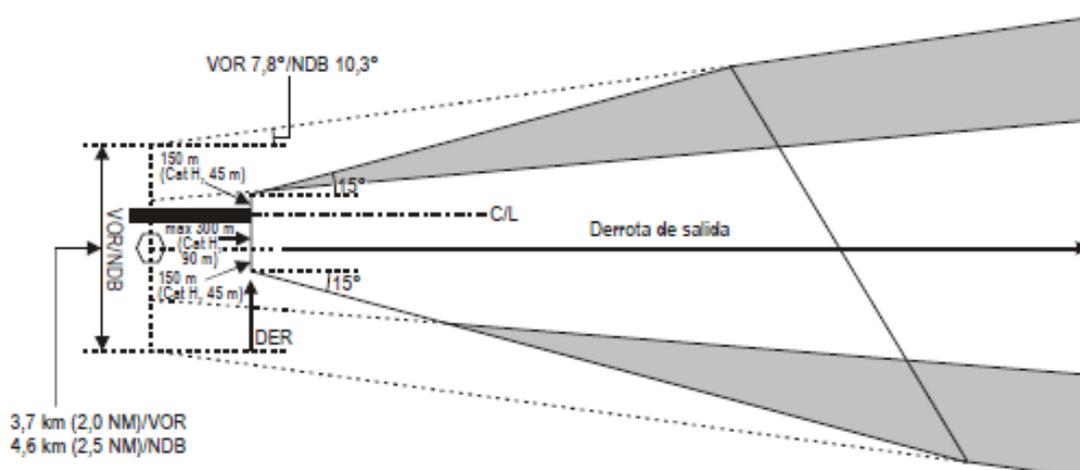


Figura 75. Definición de la OIS. Pista 28

A partir de las dos superficies descritas anteriormente, se calcula la intersección de estas y esos son los límites de la OIS, véase la Figura 75. Sin embargo, es necesario establecer un límite exterior. Para ello, se realiza una inspección visual con Google Earth, definiendo un polígono que presenta en el DER un borde con una anchura de 300 m perpendicular al eje de la pista y dos bordes laterales que divergen con un ángulo de  $15^\circ$  hasta las 50 NM, que se establecieron como límites del estudio de la orografía en el apartado 2.1.1. A partir de esta superficie poligonal definida de forma aproximada, se obtienen algunos perfiles de elevación del terreno, como el que se muestra en la Figura 76. El resto de los perfiles analizados se recogen en el Anexo III. Esos perfiles parecen indicar que es suficiente con establecer el límite exterior en las proximidades de los 30-40 km medidos a partir del DER siguiendo al eje de la pista. Por ello, se decide extender la OIS hasta los 40 km a partir del DER.

Una vez definida la OIS en planta, hay que tener en cuenta que el borde interior está a 5 m por encima del DER. A partir del mismo, la pendiente es del 2,5% hasta el final de la OIS.

Lo único que quedaría por situar es precisamente el DER, que como se ha comentado, estaría en el extremo de la zona libre obstáculos. Esta zona se define como un rectángulo de  $60 \times 150$  m situado a continuación del umbral en el sentido del despegue. La Figura 77 muestra la ubicación de esta. En ella, la zona libre de obstáculos se denominada CWY. Debido a las mismas consideraciones del caso anterior, obtenidas del Anexo 14 de la OACI [14], la zona libre de obstáculos presenta una pendiente del 1,25%, estando el límite inferior de ese plano a la elevación del eje de la pista al final del recorrido de despegue disponible.

Otra de las cuestiones que hay que abordar antes de pasar a describir el procedimiento seguido para determinar la PDG, es la selección del tipo de salida que se va a diseñar. Ya se ha comentado anteriormente que se trata de una salida en línea recta, ya que no se necesita realizar un viraje de más de  $15^\circ$  para alcanzar la guía de derrota proporcionada por la radioayuda correspondiente. Por la ubicación del VOR, la salida debe agruparse dentro del subgrupo que presenta una guía de derrota desplazada. Hasta aquí, la clasificación es idéntica a la de la otra pista. Sin embargo, se determinó que la derrota, en este caso, fuera paralela a la dirección de la pista, tal y como se muestra en la Figura 75. Esto se debe a la disposición del terreno, que parecía presentar mayores problemas si se realizaba un pequeño viraje.

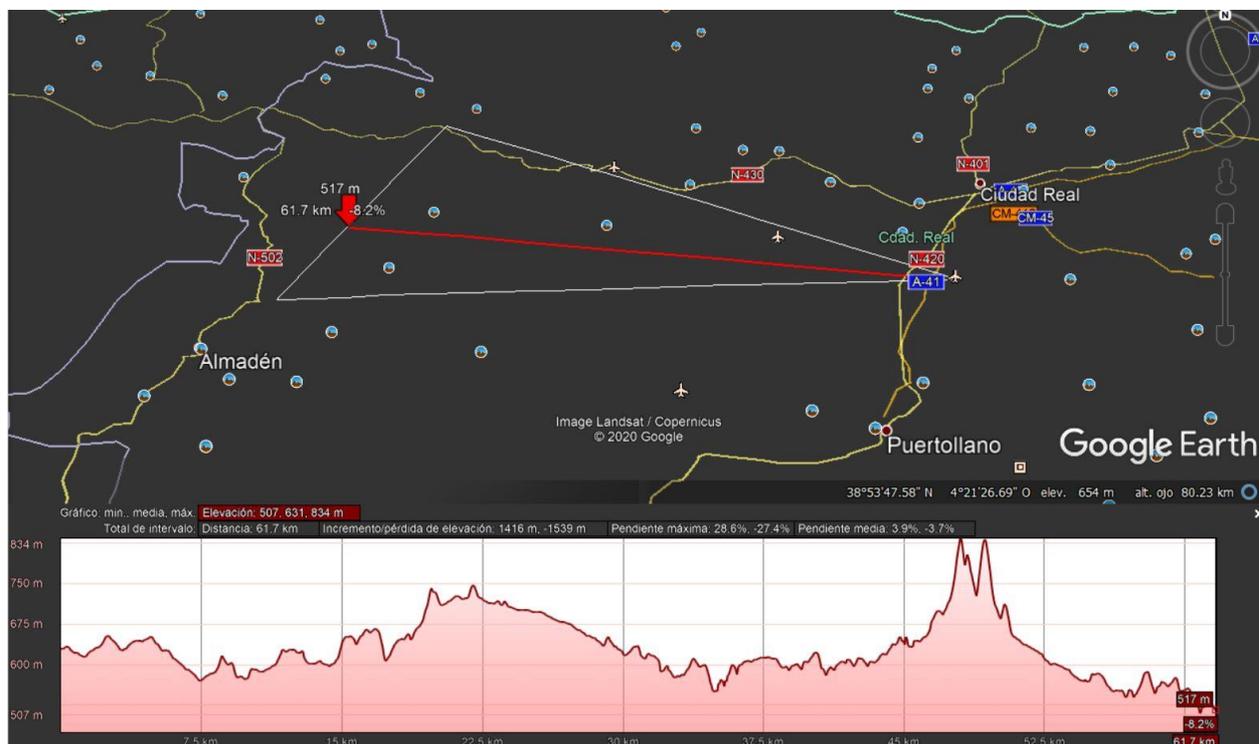


Figura 76. Perfil de elevación del terreno. Pista 28

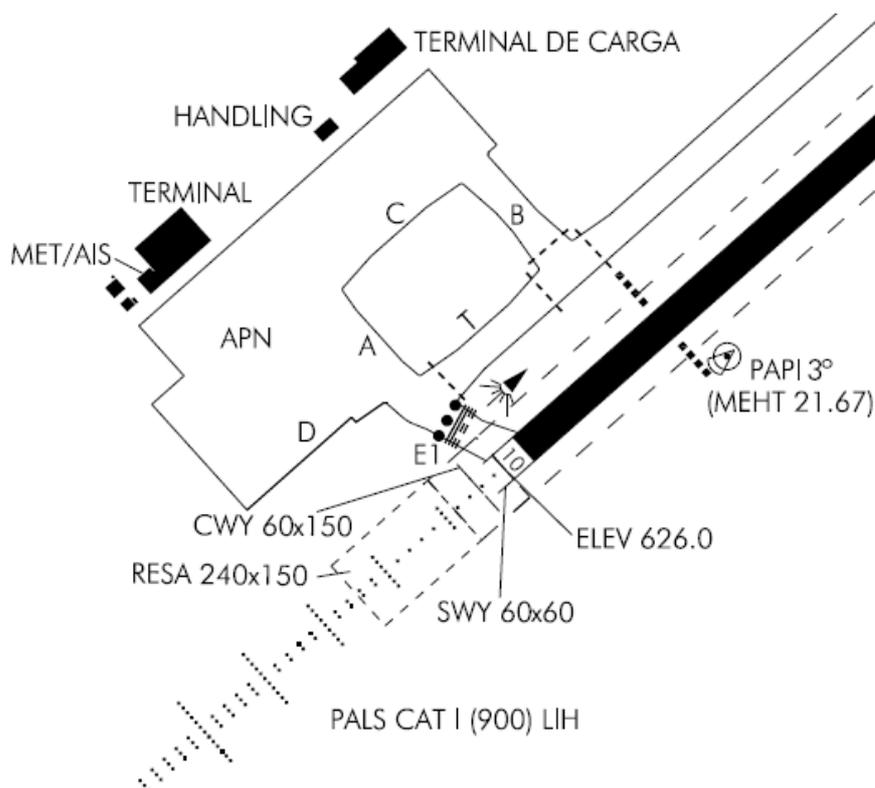


Figura 77. Zona libre de obstáculos en el umbral 10

A continuación, es necesario seguir un procedimiento para determinar la PDG en base a los obstáculos que penetran en la OIS. Este procedimiento, que pretende garantizar que las aeronaves vuelan en condiciones de seguridad, es completamente análogo al de la otra pista. Sin embargo, antes de indicar el procedimiento seguido, se recopilan las hipótesis empleadas en el mismo.

#### 4.2.1.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Las hipótesis y decisiones de diseño que se presentan en este apartado permiten cerrar el diseño que se está planteando. Dichas hipótesis y decisiones son:

- La derrota de salida es paralela a la dirección de la pista. Esto se define de esa manera para evitar posibles problemas asociados a la orografía.
- Se asume que existe una estación VOR/DME en el aeropuerto que proporciona la guía de derrota.
- La elevación del DER es 626,75 m. Es decir, es el resultado de sumar a la elevación del extremo de la pista una distancia que resulta del efecto de la pendiente del 1,25% sobre los 60 m de anchura que tiene la zona libre de obstáculos.

#### 4.2.1.2 Definición de la pendiente de diseño de procedimientos

El punto de partida para definir la PDG es determinar qué obstáculos penetran en la OIS y, por tanto, definir la OIS. En este apartado, se ha explicado de forma teórica cómo se define esta superficie. De esa manera, es necesario definir, en primer lugar, el punto de intersección del DER con el eje de la pista. Este punto, que de ahora en adelante se denominará DER10, se define con las expresiones siguientes a partir del umbral de la cabecera 10 de la pista.

$$\begin{aligned}\phi_{DER10} &= \phi_{10} - \cos(\chi_{Pista}) \times (-60) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{DER10} &= \lambda_{10} - \sin(\chi_{Pista}) \times (-60) \times Esc_{\lambda} \\ elev_{DER10} &= 626 + 60 \times 0,0125\end{aligned}$$

A partir del punto anterior, se define la OIS. Para ello, se necesita definir las dos superficies que se comentaron al inicio del apartado y, posteriormente, se calculan las intersecciones de las mismas. De esa forma, el área de protección para el despegue viene definida por cuatro puntos. A continuación, se desarrollan las expresiones que definen el punto  $OIS_4$  de la Figura 78. El resto de los puntos presentan una definición análoga.

$$\begin{aligned}\phi_{FinOIS} &= \phi_{10} - \cos(\chi_{Pista}) \times (-40000) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FinOIS} &= \lambda_{10} - \sin(\chi_{Pista}) \times (-40000) \times Esc_{\lambda} \\ y_{OIS4} &= 150 + (40000 - 60) \times \tan\left(\frac{15\pi}{180}\right) \\ \phi_{OIS4} &= \phi_{FinOIS} + \cos(\beta_2) \times y_{OIS4} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{OIS4} &= \lambda_{FinOIS} + \sin(\beta_2) \times y_{OIS4} \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

De nuevo, el área de protección asociada al VOR viene definida por ocho puntos, ya que es necesario establecer cuáles son los límites entre el área primaria y las secundarias. Sin embargo, la definición de estos es análoga al caso anterior.

A continuación, a modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas en la definición de alguno de los puntos que describen la superficie de protección asociada al VOR.

$$\begin{aligned}\chi_{VOR} &= \chi_{Pista} \\ \beta_{VOR} &= \frac{\pi}{2} + \chi_{VOR} \\ \beta_{VOR_2} &= -\frac{\pi}{2} + \chi_{VOR} \\ \phi_{FinVOR} &= \phi_{VOR} - \cos(\chi_{VOR}) \times (-40000 - Distancia_{VOR-10}) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{FinVOR} &= \lambda_{VOR} - \sin(\chi_{VOR}) \times (-40000 - Distancia_{VOR-10}) \times Esc_{\lambda} \\ y_{FinVOR} &= \frac{3700}{2} + (40000 + Distancia_{VOR-10}) \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right) \\ \phi_{VOR3} &= \phi_{FinVOR} + \sin(\beta_{VOR}) \times y_{FinVOR} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{VOR3} &= \lambda_{FinVOR} + \cos(\beta_{VOR}) \times y_{FinVOR} \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

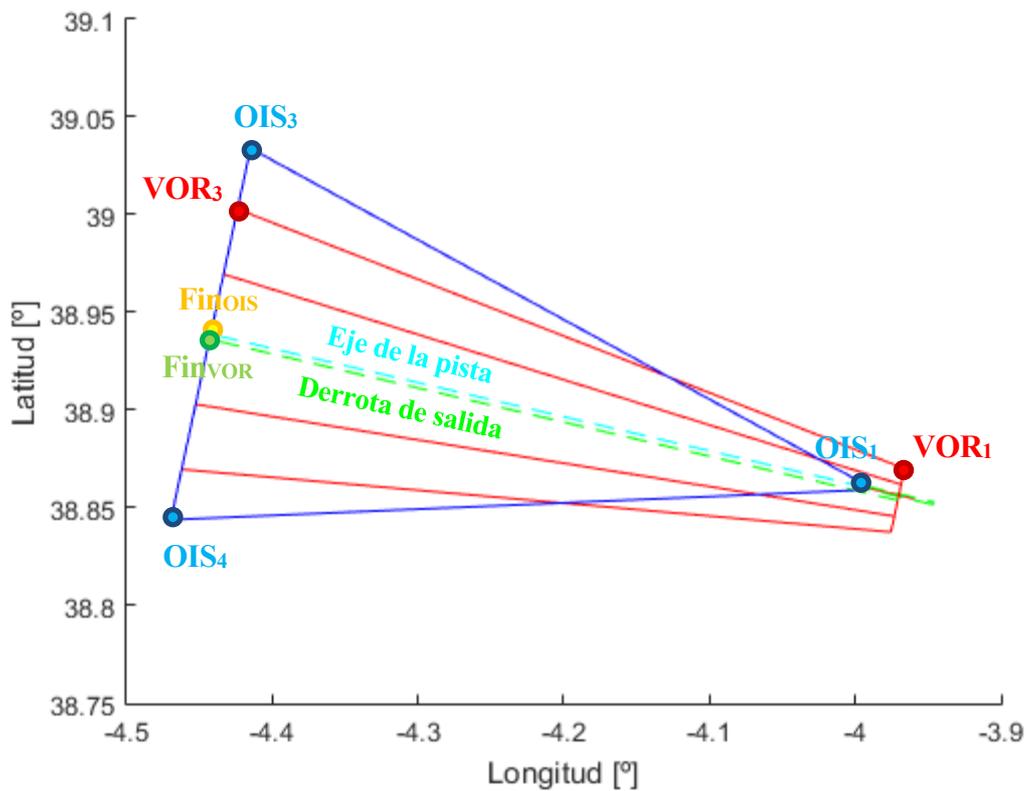


Figura 78. Definición de la OIS (I). Pista 28

Finalmente, habría que calcular las intersecciones de estas superficies, cuyo resultado se presenta en la Figura 79. Obsérvese que en esta figura hay cuatro puntos especialmente relevantes que están destacados en amarillo. De nuevo, como en los casos anteriores, se desarrolla la formulación de uno de ellos, puesto que la del resto es completamente análoga. Obsérvese que es idéntica a la empleada para la pista 10.

$$m_{15-sup} = \frac{\phi_{OIS1} - \phi_{OIS3}}{\lambda_{OIS1} - \lambda_{OIS3}}$$

$$n_{15-sup} = \phi_{OIS1} - m_{15-sup} \times \lambda_{OIS1}$$

$$m_{VOR-sup} = \frac{\phi_{VOR1} - \phi_{VOR3}}{\lambda_{VOR1} - \lambda_{VOR3}}$$

$$n_{VOR-sup} = \phi_{VOR1} - m_{VOR-sup} \times \lambda_{VOR1}$$

$$\lambda_{Sup-Sec} = \frac{n_{15-sup} - n_{VOR-sup}}{m_{VOR-sup} - m_{15-sup}}$$

$$\phi_{Sup-Sec} = m_{VOR-sup} \times \lambda_{Sup-Sec} + n_{VOR-sup}$$

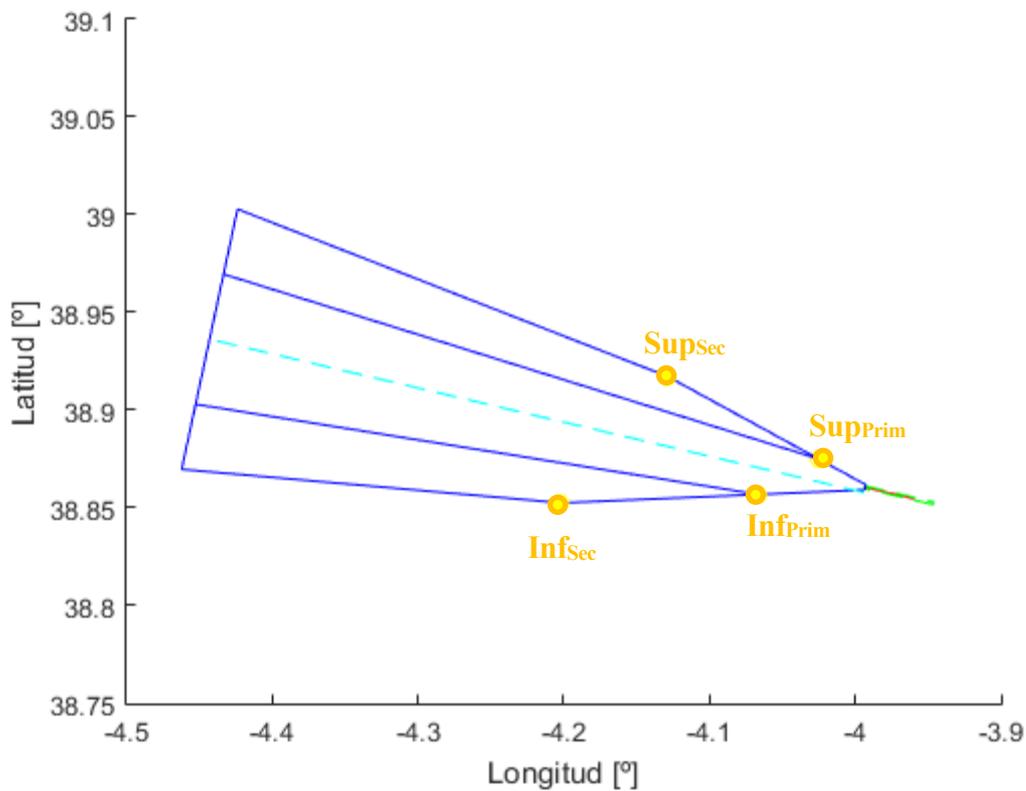


Figura 79. Definición de la OIS (II). Pista 28

Una vez definida la OIS, es necesario comprobar si hay obstáculos que penetren en ella. El proceso seguido es análogo a los procesos de comprobación del MOC empleados en apartados anteriores. De esa manera, se recorre el terreno y para cada punto se analiza si está por encima o por debajo de la superficie de identificación de obstáculos. Los detalles de este procedimiento se encuentran recogidos en el Anexo II (Apartado 7.2.4.1).

Tras esta primera comprobación, se llegó a la conclusión que se necesita un cambio de PDG. Ese punto de cambio coincide (su coordenada x) con el obstáculo que supone la mayor pendiente. Además, no es necesario prolongar más la trayectoria que se recorre con la pendiente incrementada para cumplir con los criterios de seguridad frente a obstáculos. La Tabla 33 recoge los resultados obtenidos.

<b>PDG antes del cambio de pendiente</b>	6,77 %
<b>PDG después del cambio de pendiente</b>	3,3 %
<b>Elevación del punto de cambio de PDG</b>	702,4 m
<b>Coordenada x del cambio de pendiente</b>	1103,8 m

Tabla 33. PDG para la salida por la pista 28

#### 4.2.1.3 Determinación del punto de viraje

Por último, se necesita calcular el punto a partir del cual se pueden realizar virajes. Este punto debe garantizar que se está a una altura de 120 m sobre el DER y que se tiene un MOC de 90 m. Por tanto, el procedimiento a seguir es iterativo, tal y como se hizo en la pista 10. Es decir, se supone la ubicación de este punto, que garantiza siempre la restricción de los 120 m, y se comprueba que el MOC es de 90 m. De no ser así, se aleja el punto del umbral y se hace la misma comprobación para la nueva ubicación.

De esa forma, el proceso comienza por calcular la ubicación del punto a partir del cual están permitidos los virajes. La variable  $y_{VOR}$  es la distancia que hay entre el VOR y el eje de la pista. En principio, se supone que el parámetro  $s$  del que depende la elevación valdrá 0, ya que es lo mínimo que puede valer para garantizar el cumplimiento de la restricción de los 120 m. Posteriormente, si no se cumple la restricción del MOC se sube el valor del parámetro (de 10 en 10 m).

$$elev_{VIR} = elev_{DER10} + 120 + s$$

$$Dist_{VIR-DER} = - \left( \frac{elev_{VIR} - elev_{cambPend} - x_{cambPend} + 60}{0.033} \right)$$

$$\phi_{VIR} = \phi_{10} - \cos(\chi_{Pista}) \times (Dist_{VIR-DER}) \times Esc_{\phi} + \cos \beta \times y_{VOR} \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{VIR} = \lambda_{10} - \sin(\chi_{Pista}) \times (Dist_{VIR-DER}) \times Esc_{\lambda} + \sin \beta \times y_{VOR} \times Esc_{\lambda}$$

Una vez supuesta la ubicación del punto, se procede a realizar la comprobación del MOC de 90 m. De nuevo, el proceso consiste en recorrer el terreno y determinar, para cada punto, si está situado en el área primaria o secundaria de protección. En caso de que algún punto viole la restricción del MOC comentada, se modifica el parámetro  $s$  y se vuelve a realizar la comprobación, de la misma forma que en la salida por la pista 10. El proceso en detalle queda recogido en el Anexo II (Apartado 7.2.4.2).

Los resultados recogidos de la comprobación realizada se muestran en la Tabla 34 y los resultados globales obtenidos en este apartado se pueden ver en la Figura 80. Obsérvese que el punto que se buscaba, a partir del cual se permiten los virajes, está 120 m por encima del DER. De nuevo, esto es consecuencia de la orografía y los riesgos que esta supone para las operaciones aeronáuticas.

$elev_{VIR}$	746,75 m
$Dist_{VIR-DER}$	2507,0 m
$lat_{VIR}$	38,8627 °
$long_{VIR}$	-4,0215°

Tabla 34. Punto a partir del que se permite virar. Pista 28

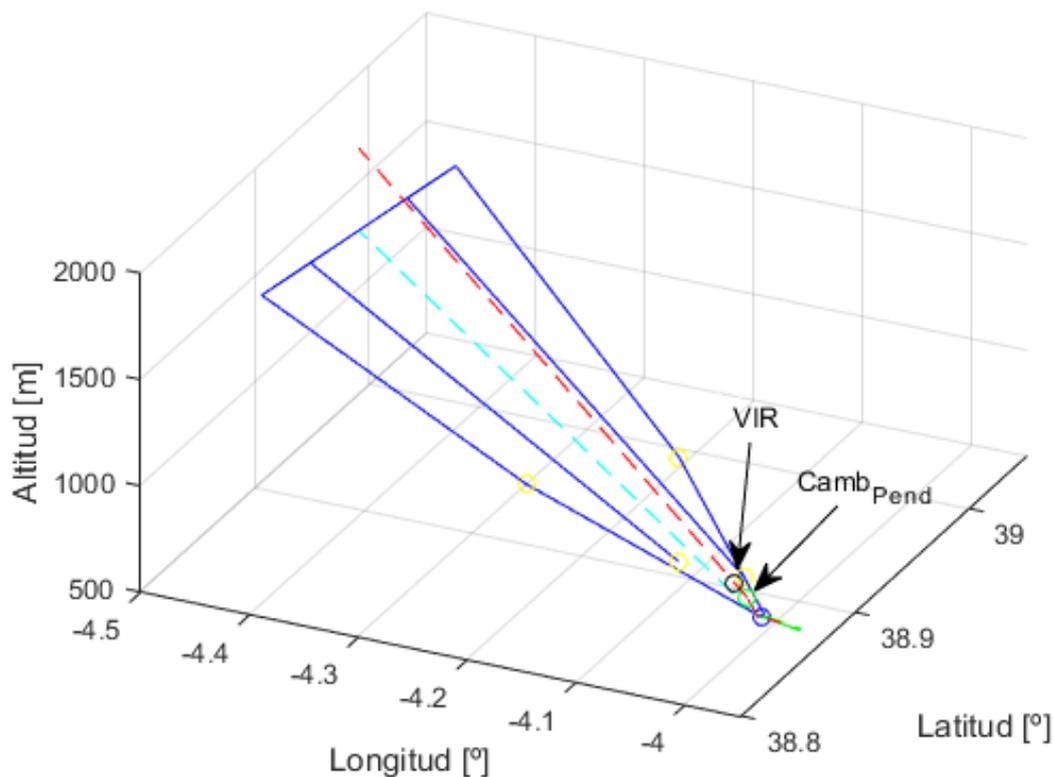


Figura 80. Salida por la pista 28. Tramo sin viraje

#### 4.2.2 Tramo con viraje

Una vez definida la parte baja del procedimiento, es necesario definir la parte alta del mismo. Este tramo en el que los virajes están permitidos es el que conecta con el tramo de ruta, en el que el MOC debe ser de 300 m.

Una primera opción de salida consiste en virar desde el radial que marca el VOR del aeródromo a uno que esté guiado por HIJ hasta alcanzar NASOS y, a partir de NASOS, tomar la aerovía G5 hasta CJN, tal y como se puede observar en la Figura 81. Esta trayectoria surge de analizar las salidas del aeropuerto de Sevilla. De esa manera, se llega a la conclusión de que las salidas convencionales no tienen que seguir aerovías establecidas, pero sí que deben ajustarse a radiales de las radioayudas cercanas. Por tanto, la trayectoria mencionada parece, en principio una buena opción. Sin embargo, cuando se intenta establecer el viraje y debido a que este es demasiado cerrado, la aeronave debería iniciar ese viraje antes del punto en el que se permiten, e incluso antes de despegar. Por ello, esta trayectoria no es viable.

Una segunda opción consiste en seguir el radial que marca el VOR del aeródromo hasta intersectar a la aerovía R10 de doble sentido. Posteriormente, la aeronave permanece en esa aerovía hasta VTB para seguir por la misma una vez superado VTB hasta CJN. Véase la Figura 82. Hay que tener en cuenta que en todo momento la pendiente de ascenso es de 3,3%. Es decir, cuando se empieza a virar para alcanzar la aerovía R10, se tiene una altitud de unos 2200 m y cuando se llega a CJN, ese valor se ve aumentado hasta los 8500 m. Eso implica que el punto de intersección de los dos radiales la aeronave estaría por debajo del nivel del límite inferior de R10. Es decir, sería necesario un incremento en la pendiente, tal y como se hizo en la salida por la pista 10.

Sin embargo, en la Figura 82, se puede observar que la intersección con la aerovía R10 se produce en las proximidades del paralelo  $39^{\circ} N$ , que es precisamente lo que divide la zona controlada por Sevilla, de la controlada por Madrid. Es decir, ese punto se convertiría en un punto de conflicto en cuanto a control. Por ello, se opta por establecer una tercera opción, esta vez ya sí válida, que consiste en virar desde el radial que marca el VOR del aeródromo a uno que esté guiado por TLD hasta alcanzar la aerovía R10. A partir de la intersección, se continúa por ella hasta VTB, y, posteriormente hasta CJN, tal y como se puede observar en la Figura 83. Es decir, se necesita realizar dos virajes antes de intersectar a la aerovía.

En este caso, las interacciones con las SID/STAR de los aeropuertos circundantes se reducen a un punto en el que la aerovía R10 se cruza con MORAL 4C, tal y como ocurría con la llegada para la pista 10. Sin embargo, existe un margen de altitudes suficiente para que no haya problemas, ya que en el punto de cruce la aeronave habrá alcanzado altitudes que superan los 14000 ft y en el caso de MORAL 4C se podría volar entre 10000 y 12000 ft.

En cuanto a los sectores de control, cabe destacar que el aeródromo se encuentra dentro del sector LECSBA1. Por tanto, la salida trazada parte de este sector. Posteriormente, atravesaría los sectores LECSRTA y LECSSEV para acabar introduciéndose en LECMZTI y alcanzar CJN en LEMDALN. En ningún caso, se exceden los límites que impone la altitud mínima de sector.

Además, como ocurría en el caso anterior, si se mantiene la pendiente del 3,3%, en el punto de intersección con la aerovía la altitud es inferior al FL95 que es el que limita la aerovía. Por tanto, se opta por aumentar la pendiente y mantenerla hasta que se intersecte con la aerovía. Véase la Tabla 35.

<b>PDG antes del cambio de pendiente</b>	6,77 %
<b>PDG después del cambio de pendiente</b>	4,51 %
<b>PDG después de intersectar a R10</b>	3,3 %
<b>Coordenada x del cambio de pendiente en R10 (sobre la trayectoria)</b>	53244 m
<b>Elevación del punto de cambio de PDG en R10</b>	3050,9 m

Tabla 35. Modificación de la PDG. Salida por la pista 28

Una vez establecido el camino a seguir en esta salida, hay que realizar un proceso de comprobación del MOC que debe ser superior a 90 m en todo el trayecto y debe alcanzar un valor de 300 m en CJN. Sin embargo, para poder llevar a cabo esta comprobación es necesario determinar las áreas de protección de los virajes que se realizan en la interceptación de R10 y, posteriormente, en VTB para seguir por la misma aerovía. Para ello, se necesita determinar cuáles son las hipótesis empleadas, que serán de aplicación en todo el apartado.

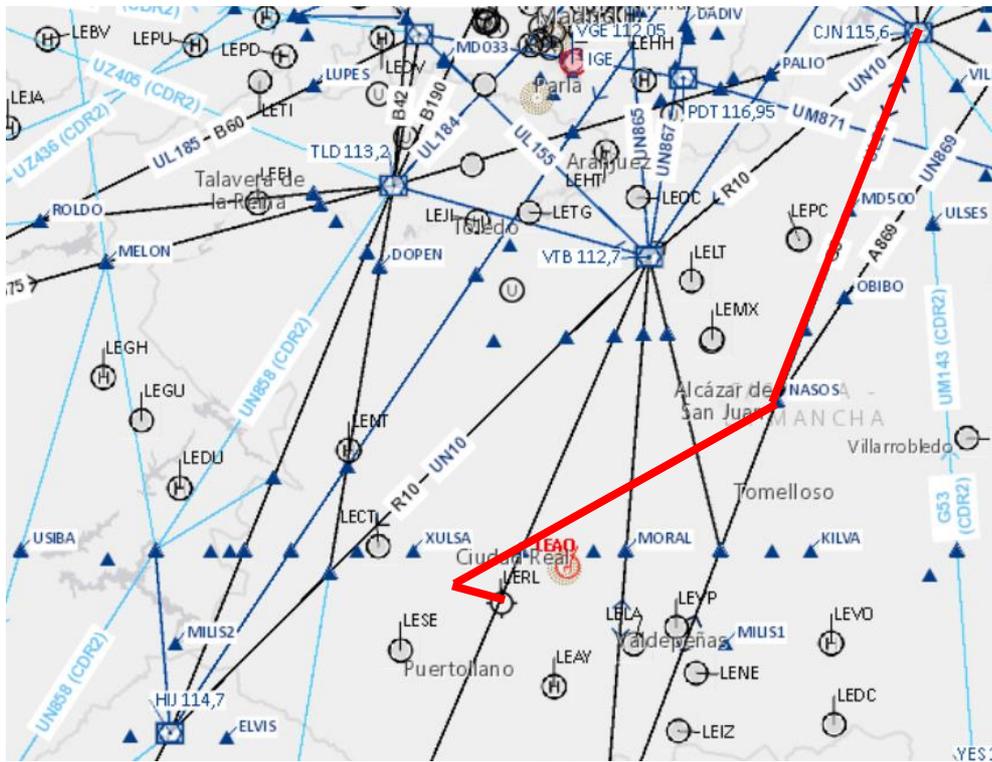


Figura 81. Primer diseño de la salida por la pista 28

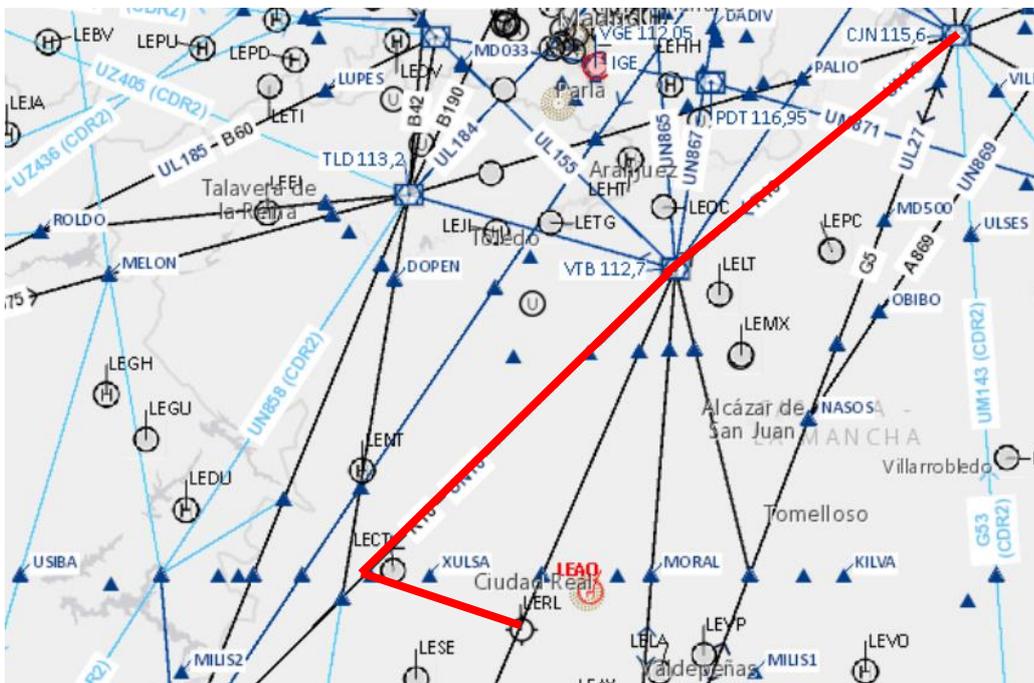


Figura 82. Salida por la pista 28. Segundo diseño

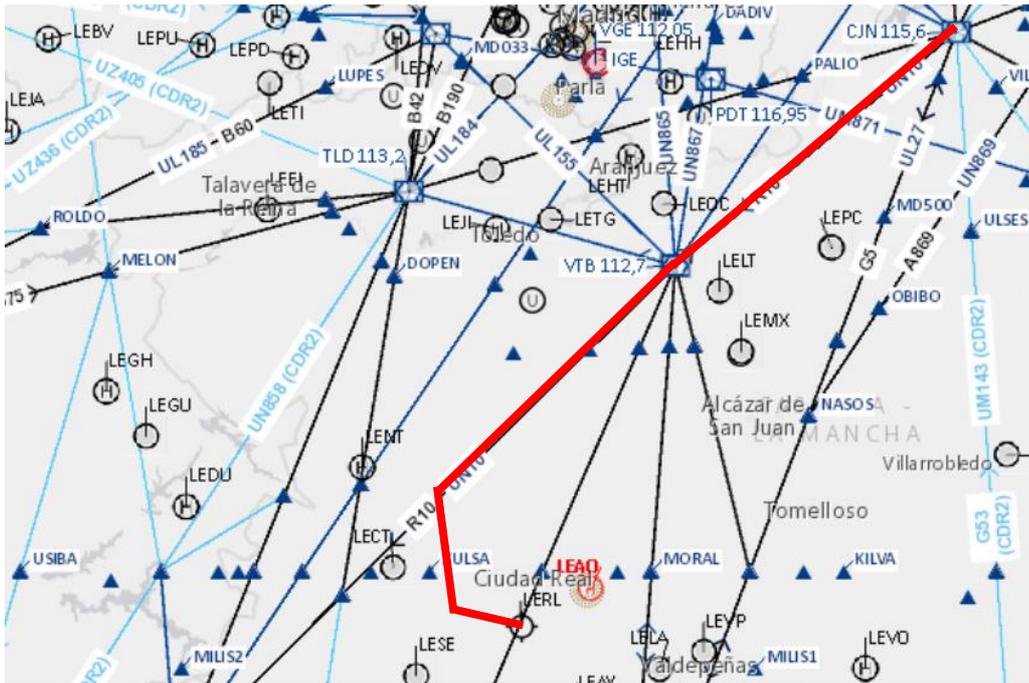


Figura 83. Salida por la pista 28. Tercer diseño

#### 4.2.2.1 Hipótesis realizadas y decisiones de diseño

Todas las hipótesis y decisiones de diseño empleadas en el apartado anterior serán aplicadas en este apartado. Además, existen otras que merece la pena destacar y que son las siguientes:

- Se utilizan el método perfeccionado para la determinación del área de protección y el método de la espiral de vientos para la construcción del borde exterior de las áreas de viraje.
- Las áreas de protección se siguen ensanchando durante el viraje y seguirán haciéndolo en R10 hasta alcanzar la anchura de ruta.
- La elevación de cada punto se calcula a partir de la distancia recorrida sobre la trayectoria nominal, sin tolerancias.
- La aerovía R10 está delimitada por dos estaciones VOR: HIJ y VTB. El cambio de una radioayuda a otra se supone en INPAN, ya que en la AIP existe una diferencia de 1° entre el radial que sigue la aerovía antes y después de INPAN.

#### 4.2.2.2 Determinación de la primera área de viraje

Para determinar las áreas de viraje, de nuevo, es necesario tener en cuenta una serie de parámetros. La altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo tienen una influencia considerable.

La velocidad indicada (IAS) considerada es de 539 km/h, que es la velocidad de aproximación final incrementada en un 10%. A partir de ella se puede calcular la TAS con la expresión siguiente. Como se puede ver, el valor de la TAS se ve modificado respecto al valor que se tenía en el viraje de la otra pista, ya que la altitud es diferente. En esta expresión se considera una altitud de 1326,4 m, que es la altitud del punto de viraje. También hay que definir la variable VAR, cuya expresión ya se mostró en el apartado 4.1.2.  $H$  sigue siendo la altitud del área de viraje.

$$TAS = IAS \times \frac{1000}{3600} \times 171233 \times \frac{((288 + VAR) - 0,006496 \times H)^{0,5}}{(288 - 0,006496H)^{2,628}}$$

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de  $15^\circ$ , como marca la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la expresión descrita anteriormente para el mismo, estando su resultado expresado en  $\%$ . En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de las direcciones de las rectas que definen el tramo posterior al viraje, guiado por TLD, y la trayectoria seguida por la aeronave hasta interceptarlo. Su valor es de  $\alpha = 70,17^\circ$ .

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma. La V representa, de nuevo, a la TAS, y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. La expresión empleada también se desarrolló en el apartado 4.1.2. Su valor es de 10509 m.

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral y del tiempo de reacción del piloto, y resulta ser de 6 segundos. Bien es cierto que esta tolerancia también hace referencia a la tolerancia en el cronometraje del alejamiento y a la tolerancia de rumbo de la aeronave, pero ninguna de las dos aplica en este caso. Por su parte, la tolerancia del punto de referencia debe tener en cuenta que el punto de viraje está definido a partir del VOR/DME del aeródromo. De esa forma, la precisión es de  $460\text{ m} + 1,25\%$  de la distancia a la antena. Este valor equivale a la media cuadrática de la combinación de la precisión mínima, del margen de tolerancia del equipo de control y de la tolerancia técnica de vuelo.

A partir de todos los parámetros anteriores, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. El resultado obtenido se muestra en la Figura 84. En ella, se representa en azul la OIS definida en el apartado anterior y en rojo el área de protección que se define en este apartado. Además, se presenta en cian la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que es clave para la determinación del MOC. El proceso de construcción en detalle se encuentra recogido en el Anexo III del presente documento (Apartado 7.3.4.1).

De nuevo, la trayectoria nominal sigue un arco de círculo en el viraje deformado por los factores de escala y delimitado por los puntos  $A_p$  y  $K_p$ .

Por su parte, la elevación de los puntos viene determinada a partir de la elevación del punto  $K_{cent}$ , asumiendo una pendiente del 4,51% y midiendo la longitud de la curva seguida.

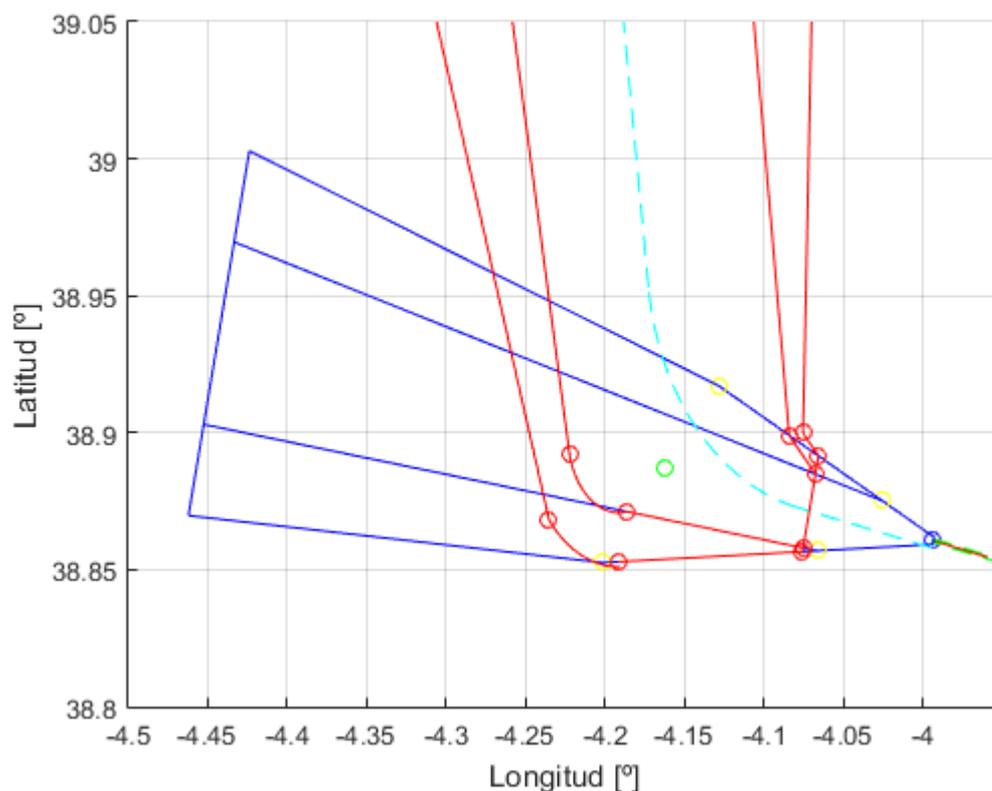


Figura 84. Área de viraje para la salida por la pista 28

#### 4.2.2.3 Determinación de la segunda área de viraje

Para determinar el área de viraje, de nuevo, es necesario tener en cuenta una serie de parámetros. La altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo tienen una influencia considerable.

La velocidad indicada (IAS) considerada es de 539 km/h, que es la velocidad de aproximación final incrementada en un 10%. A partir de ella se puede calcular la TAS con la misma expresión que se empleó para el primer viraje. El valor de la TAS se ve modificado respecto al anterior, ya que la altitud es diferente. En esta expresión se considera una altitud de 2818,3 m, que es la altitud del punto de viraje. También hay que definir la variable VAR, cuya expresión ya se mostró en el apartado 4.1.2.

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de  $15^\circ$ , como marca la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la expresión descrita anteriormente para el mismo, estando su resultado expresado en %/s. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de las direcciones de las rectas que definen el tramo posterior al viraje, guiado por TLD, y la trayectoria seguida por la aeronave hasta interceptarlo. Su valor es de  $\alpha = 52,21^\circ$ .

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma. La V representa, de nuevo, a la TAS, y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. La expresión empleada, también, se desarrolló en el apartado 4.1.2. Su valor es de 12246 m.

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral y del tiempo de reacción del piloto, y resulta ser de 6 segundos. Igualmente, esta tolerancia también hace referencia a la tolerancia en el cronometraje del alejamiento y a la tolerancia de rumbo de la aeronave, pero ninguna de las dos aplica en este caso. Por su parte, la tolerancia del punto de referencia debe tener en cuenta que el punto de viraje está definido a partir del VOR TLD. De esa forma, la precisión es de  $460\text{ m} + 1,25\%$  de la distancia a la antena, como ocurría en apartados anteriores.

Con todo lo anterior, el área de viraje queda establecida tal y como muestra la Figura 85. En ella, se representa en rojo el área asociada al primer viraje y en negro el área de protección que se define en este apartado. Además, se presenta en cian la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que es clave para la determinación del MOC. El proceso de construcción en detalle se encuentra recogido en el Anexo III del presente documento (Apartado 7.3.4.2).

Obsérvese que la trayectoria nominal sigue un arco de círculo en el viraje deformado por los factores de escala.

Por su parte, la elevación de los puntos viene determinada a partir de la elevación del punto  $K_{cent}$ , asumiendo una pendiente del 4,51% y midiendo la longitud de la curva seguida.

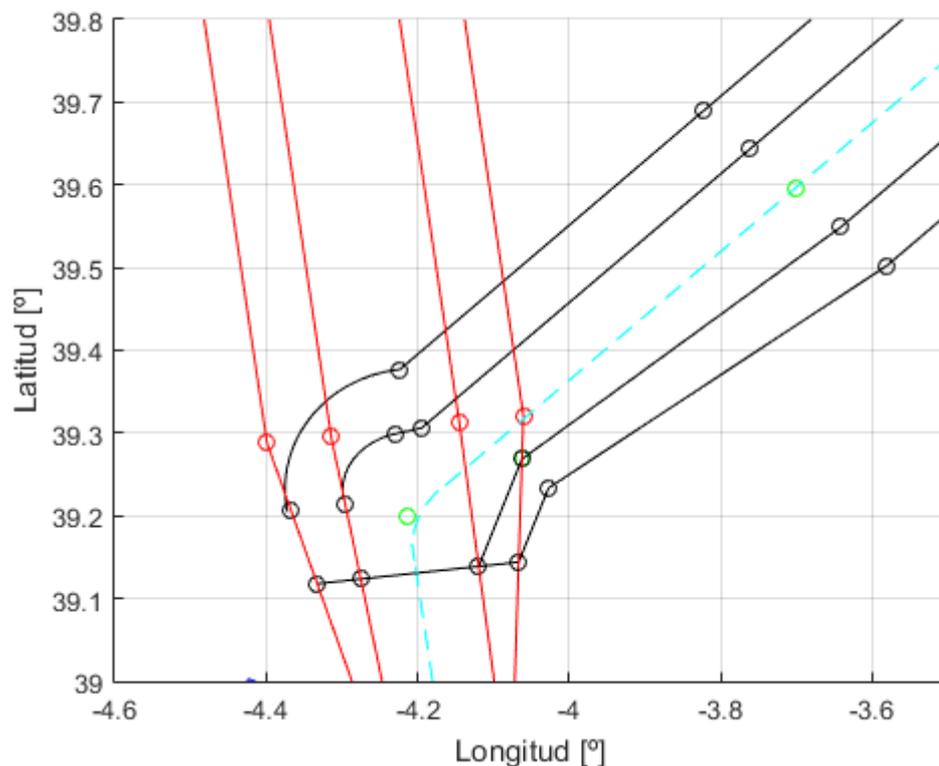


Figura 85. Área de viraje para la salida por la pista 28

#### 4.2.2.4 Determinación de la tercera área de viraje

En este tercer viraje, de nuevo, es necesario tener en cuenta la altitud, la velocidad indicada, el viento, el ángulo de inclinación lateral y las tolerancias técnicas de vuelo como parámetros influyentes en el viraje y en la construcción del área de protección.

La velocidad indicada (IAS) considerada sigue siendo 539 km/h, que es la velocidad de aproximación final incrementada en un 10%. A partir de ella se puede calcular la TAS con la misma expresión que se empleó para el primer viraje. El valor de la TAS se ve modificado respecto al anterior, ya que la altitud es diferente. En la expresión mencionada se considera una altitud de 5882,2 m, que es la altitud del punto VTB, que es el punto de viraje. También hay que definir la variable VAR, cuya expresión ya se mostró en el apartado 4.1.2.

Por su parte, se considera un ángulo de inclinación lateral de 15°, como marca la norma. El régimen de viraje (R) viene definido por la expresión descrita anteriormente para el mismo, estando su resultado expresado en %/s. En ella, la velocidad es la TAS en km/h. El ángulo de viraje se calcula a partir de las direcciones de las rectas que definen la aerovía R10 antes y después de VTB. Su valor es de  $\alpha = 5,44^\circ$ .

A partir de V y R, se calcula el radio de viraje al ángulo de inclinación lateral designado con aire en calma. La V representa, de nuevo, a la TAS, y R es el régimen de viraje calculado anteriormente. La expresión empleada también se desarrolló en el apartado 4.1.2. Su valor es de 10509 m.

Los únicos parámetros de entrada que faltarían por calcular se refieren a las tolerancias. La tolerancia técnica de vuelo contiene el efecto del tiempo para establecer la inclinación lateral y del tiempo de reacción del piloto, y resulta ser de 6 segundos. Bien es cierto que esta tolerancia también hace referencia a la tolerancia en el cronometraje del alejamiento y a la tolerancia de rumbo de la aeronave, pero ninguna de las dos aplica en este caso. Por su parte, la tolerancia del punto de referencia debe tener en cuenta que el punto de viraje está definido a partir del VOR VTB. De esa forma, esta tolerancia está definida como el radio del área que se presenta en la Figura 86. Ese radio viene dado por la siguiente expresión, ya que consiste en establecer un cono a partir del VOR de ángulo 50°.

$$zV = H \tan \alpha$$

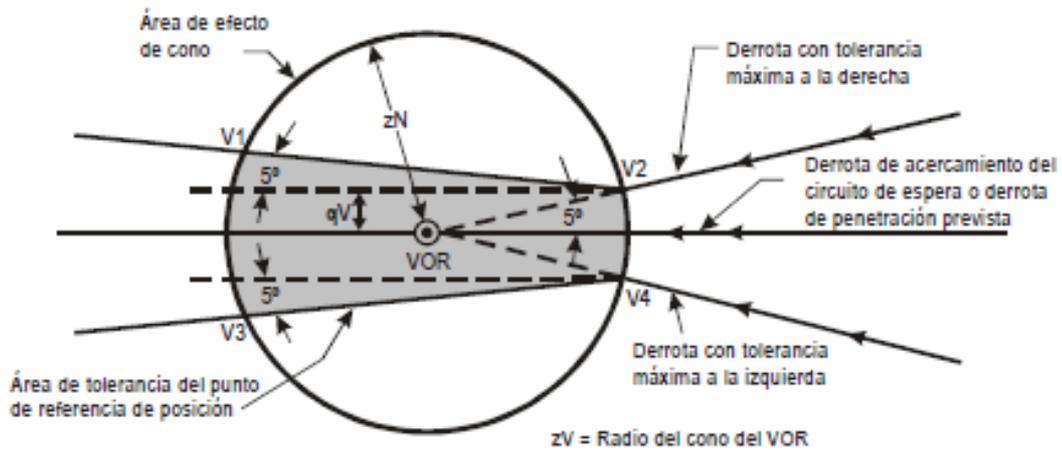


Figura 86. Tolerancia del punto de referencia sobre un VOR

Con todo lo anterior, el área de viraje queda establecida tal y como muestra la Figura 87. En ella, se representa en negro el área definida a partir del segundo viraje y en verde el área de protección que se define en este apartado. Además, se presenta en cian la trayectoria nominal seguida por la aeronave, que será clave para la determinación del MOC. El proceso de construcción en detalle se encuentra recogido en el Anexo III del presente documento (Apartado 7.3.4.3).

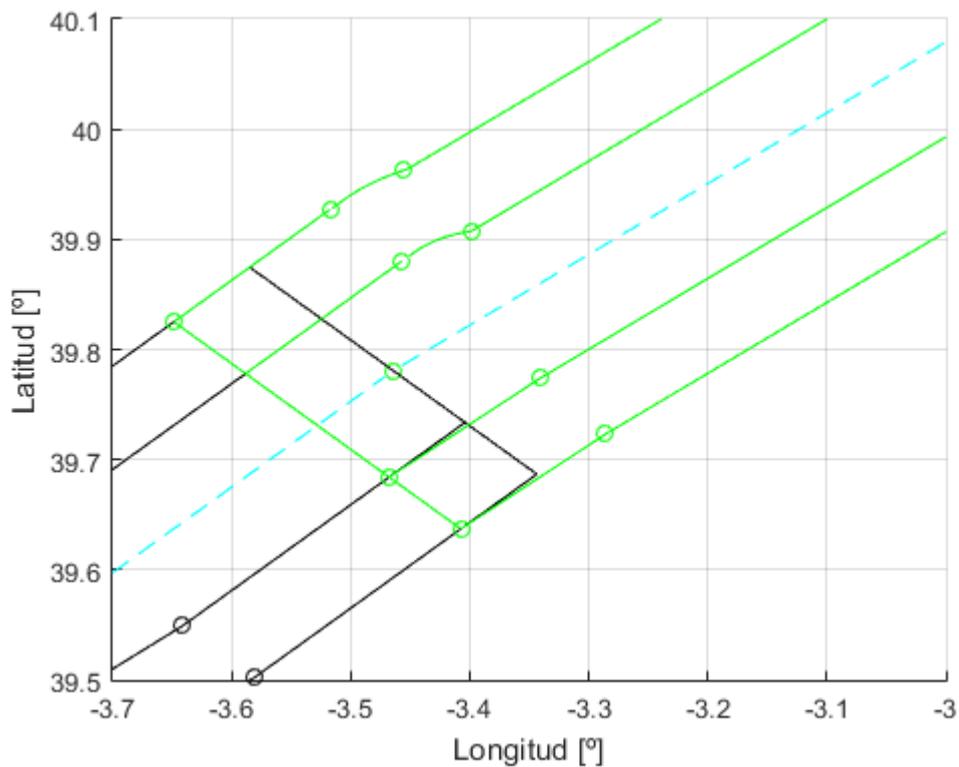


Figura 87. Área del tercer viraje para la salida por la pista 28

Como en los casos anteriores, la trayectoria nominal sigue un arco de círculo en el viraje deformado por los factores de escala.

Por su parte, la elevación de los puntos viene determinada a partir de la elevación del punto  $K_{cent}$ , asumiendo una pendiente del 3,3% y midiendo la longitud de la curva seguida. Obsérvese que una vez intersectada la aerovía R10, la pendiente se ve reducida al 3,3%.

#### 4.2.2.5 Procedimiento de comprobación del MOC

La comprobación del MOC es análoga a la realizada anteriormente, es decir, hay que recorrer el terreno y para cada punto se comprueba si está dentro de las áreas de protección. En caso afirmativo, se procede a verificar que se cumple con la restricción del MOC (90 m en todo momento y 300 m al alcanzar CJN). Como en el resto de las comprobaciones, el proceso se encuentra descrito en detalle en el Anexo II (Apartado 7.2.4.3).

Además, hay que resaltar que se ha comprobado el terreno situado bajo el área de protección del primer viraje. Es decir, se ha hecho la comprobación del fragmento del terreno que se muestran en la Figura 88. En este caso, la distancia entre los obstáculos y la trayectoria es de unos 350 m. No es necesario extender la comprobación al resto del área porque ya se tiene una distancia lo suficientemente alta para que no haya problemas y, por inspección visual en los mapas de Google e Insignia, se llega a la conclusión de que no existen zonas que puedan suponer un riesgo. Por tanto, se concluye que el procedimiento diseñado es seguro. La Tabla 36 contiene las elevaciones y las coordenadas de los puntos de referencia del procedimiento.

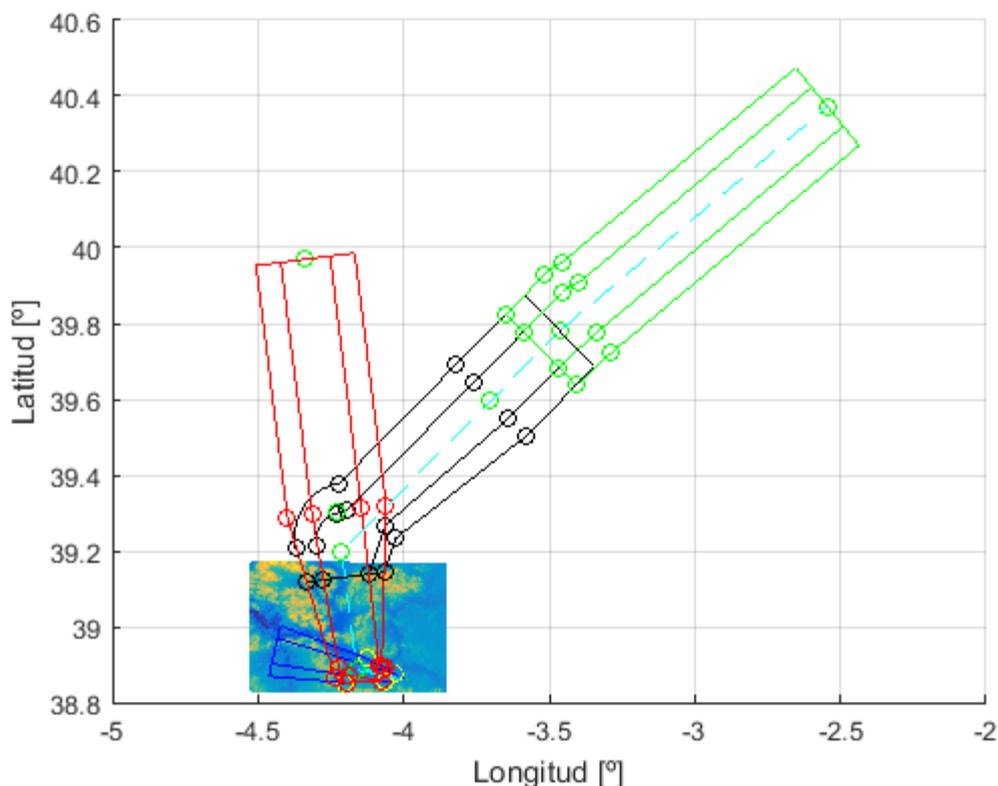


Figura 88. Terreno analizado. Salida por la pista 28

$K_p$ (Primer viraje)	Longitud	-4,0790 °
	Latitud	38,8728 °
	Altitud	993,5 m
$K_{cent}$ (Primer viraje)	Longitud	-4,0714 °
	Latitud	38,8714 °
	Altitud	963,2 m
$A_p$ (Primer viraje)	Longitud	-4,1726 °
	Latitud	38,9530 °
	Altitud	1574,0 m
$K_p$ (Segundo viraje)	Longitud	-4,2037 °
	Latitud	39,1451 °
	Altitud	2547,6 m
$K_{cent}$ (Segundo viraje)	Longitud	-4,2014 °
	Latitud	39,1308 °
	Altitud	2475,1 m
$A_p$ (Segundo viraje)	Longitud	-4,1635 °
	Latitud	39,2366 °
	Altitud	3050,9 m
$K_p$ (Tercer viraje)	Longitud	-3,4708 °
	Latitud	39,7756 °
	Altitud	5855,5 m
$K_{cent}$ (Tercer viraje)	Longitud	-3,5279 °
	Latitud	39,7311 °
	Altitud	5624,1 m

$A_p$ (Tercer viraje)	Longitud	-3,4570 °
	Latitud	39,7853 °
	Altitud	5909,0 m
$CJN$	Longitud	-2,5447 °
	Latitud	40,3718 °
	Altitud	9324,1 m

Tabla 36. Puntos relevantes para la salida por la pista 28

#### 4.2.3 Resumen del procedimiento

En este apartado se incluye un resumen del procedimiento. Dicho resumen está compuesto por la Figura 89 en la que se muestra el procedimiento global de salida con todos los puntos significativos. Aunque las coordenadas y la altitud de los puntos se han ido mostrando a lo largo del apartado, en la Tabla 37, se recopilan las altitudes de los puntos más relevantes que junto a la figura anteriormente mencionada permiten tener una visión general del procedimiento.

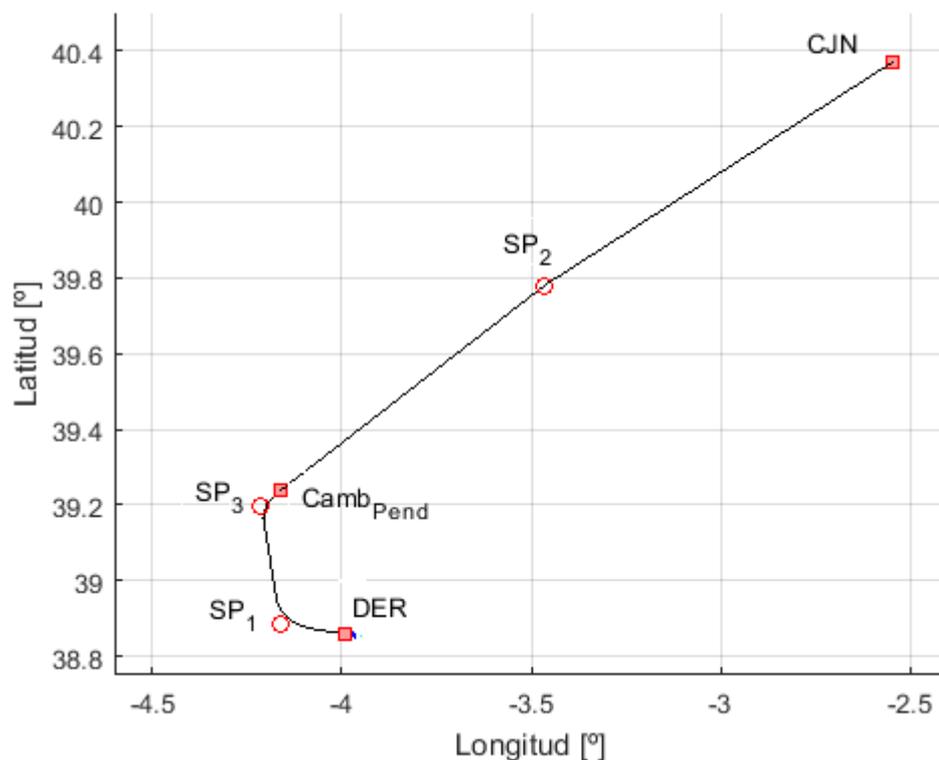


Figura 89. Llegada por la pista 28. Global

<b>Punto</b>	<b>Altitud [m]</b>
<b>DER</b>	626,75
<b>Camb<sub>pend</sub></b>	3060,9
<b>SP<sub>1</sub></b>	1326,4
<b>SP<sub>3</sub></b>	2818,3
<b>SP<sub>2</sub></b>	5882,2
<b>CJN</b>	9324,1

Tabla 37. Altitudes de los puntos más relevantes. Salida por la pista 28

# 5 OPTIMIZACIÓN

En este apartado, se pretende llevar a cabo el proceso de optimización de los procedimientos de llegada diseñados en el apartado anterior. Para ello, se ha tomado como referencia el proceso desarrollado en el artículo *Automatic Design of Aircraft Arrival Routes with Limited Turning Angle* [2]. Bien es cierto que se han realizado ciertas modificaciones para ajustar el método al caso del aeropuerto de Ciudad Real.

A continuación, se procede a definir el desarrollo teórico del método seguido. Este apartado se divide en dos partes claramente diferenciadas: la primera recoge el desarrollo teórico mencionado (5.1), y la segunda presenta los resultados obtenidos y su correspondiente análisis (5.2).

## 5.1 Desarrollo teórico

Tomando como base el artículo anteriormente mencionado, cabe destacar que el problema que se plantea pretende conseguir una solución óptima para las STAR desarrolladas de forma manual en el apartado 3.1 del presente documento. En ese sentido, se tienen que establecer ciertos parámetros de entrada que aseguran la obtención de la solución óptima para cada una de las pistas. Dichos parámetros se corresponden con los denominados puntos de entrada que, en este caso, son HIJ, TLD, BLN y CJN, la ubicación de los IF, es decir, los puntos de aproximación intermedia, y la dirección de la pista.

Los puntos de entrada han sido seleccionados de esa manera porque son puntos bien conectados dentro de la red de aerovías y, por su ubicación, permiten recoger tráfico en todas las direcciones. Como se puede apreciar en la Figura 90, CJN recoge el tráfico del norte y del este, BLN conecta con la zona del este y del sur, HIJ está asociado al sur y al oeste y, por último, TLD establece las conexiones con las zonas del oeste y del norte.

Bien es cierto que la utilización de estos puntos puede llevar a interacciones con las SID y STAR de los aeropuertos circundantes. Especialmente, con las STAR de Madrid. Sin embargo, es posible establecer ciertas separaciones verticales entre las aeronaves que permitan realizar las operaciones en condiciones de seguridad, tal y como ocurría con los procedimientos diseñados en los apartados anteriores.

Por otra parte, cabe destacar, que el artículo de base desarrolla un método que permite determinar de forma óptima las llegadas desde los denominados puntos de entrada (P) hasta la pista. Sin embargo, en este caso, se pretende optimizar únicamente la parte alta de la llegada, a partir de los IF. Es decir, que, en nuestra implementación del método, los IF juegan un papel análogo al que juegan los umbrales de la pista en el artículo.

De esa forma, el método que se ha utilizado parte de la definición de una malla compuesta por una serie de nodos en base a un parámetro  $L$  que se definirá en los apartados siguientes. Los ejes quedan definidos a partir de los nodos, es decir, serían los segmentos que van de unos nodos a otros.

Con esta malla, se genera un problema de optimización MILP en el que las variables de decisión están asociadas a las conexiones entre los nodos, como se verá más adelante. Este problema está sujeto a cinco restricciones que pretenden reducir la complejidad del tráfico aéreo en los nodos y garantizar la seguridad de las operaciones.

Por último, hay que tener en cuenta que se tienen dos posibles objetivos que consisten en la minimización del *path length* y del *tree weight*. Además, y puesto que estos objetivos, cuyo desarrollo detallado se hará en el apartado 5.1.4, son contradictorios, ya que no se puede mejorar uno sin empeorar el otro, se recurre a la curva de Pareto.

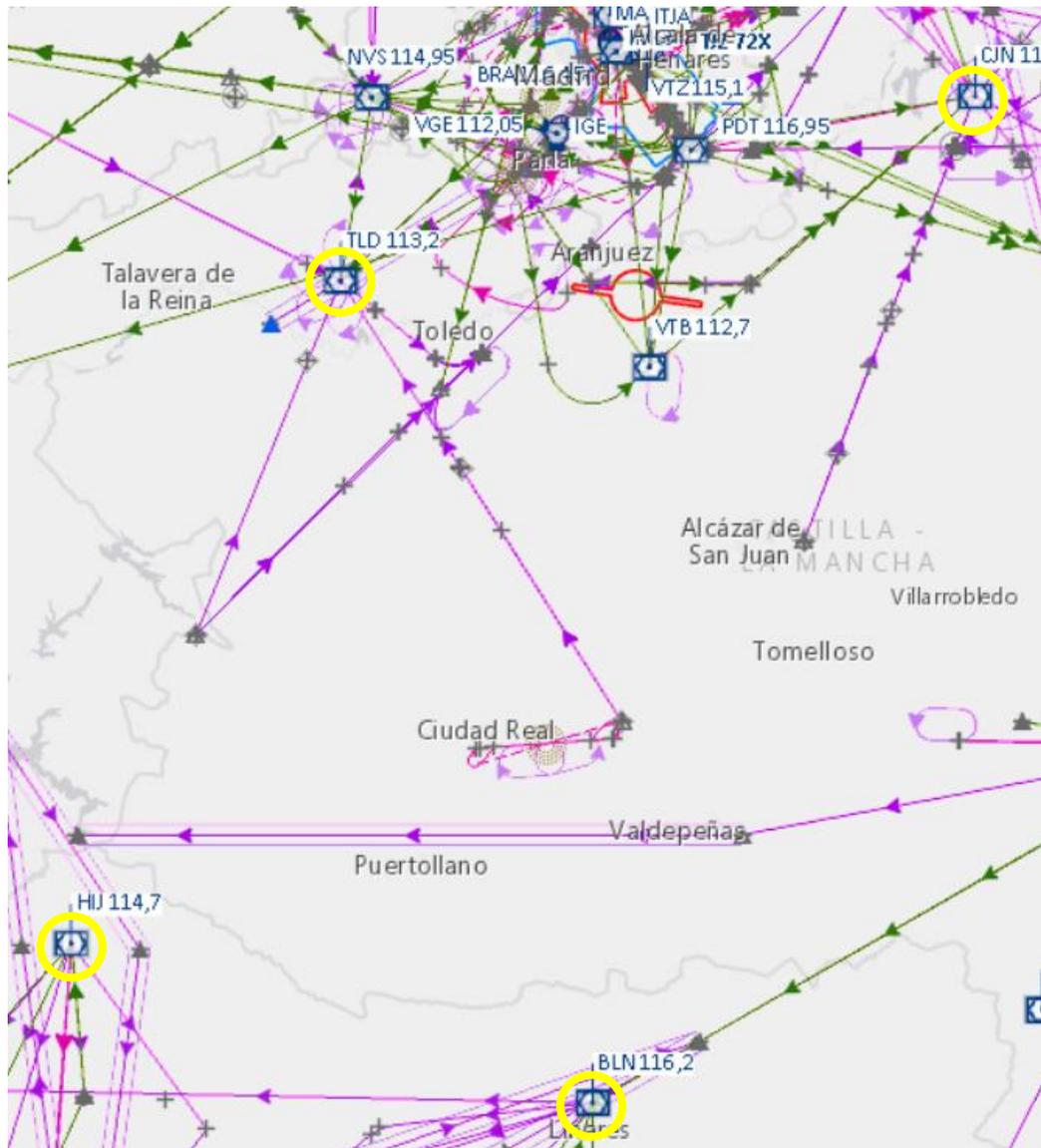


Figura 90. Ubicación de los puntos de entrada. Insignia

### 5.1.1 Generación de la malla

En primer lugar, merece la pena desarrollar en detalle la generación de la malla. La base para la determinación de la misma es el parámetro  $L$ . Este parámetro, que puede entenderse como la separación mínima entre los nodos, se puede determinar a partir de la ecuación que define el radio de viraje. En este caso, empleando una velocidad de 211,84 m/s y un ángulo de inclinación lateral de  $15^\circ$  es de unos 17 km. Obsérvese que tanto la velocidad como  $\mu$ , se han tomado de los diseños de los apartados anteriores para generar el valor máximo de  $r$ , ya que  $L$  viene definida como  $2r \tan(\alpha/2)$ , es decir, el mayor valor es el más restrictivo. En este caso, se ha tomado  $\alpha$  como  $45^\circ$  que es el límite establecido en la restricción del ángulo de viraje. Con ello y redondeando los resultados por encima, se obtiene un valor de  $L$  de 8 NM, es decir, unos 15000 m.

$$r = \frac{TAS^2}{g \tan \mu}$$

Una vez determinado  $L$ , la construcción de la malla es simple. Bastaría con utilizar ese valor como distancia entre filas y columnas consecutivas y determinar el número de divisiones en cada caso, de forma que se cubra la superficie limitada por los cuatro puntos de entrada. Sin embargo, es necesario tener en cuenta dos consideraciones:

- Los puntos de entrada no caen en los nodos de la malla. Por ello, hay que incluir cuatro nodos más al final. Si alguno de ellos, cae en un nodo no es necesario meterlo de esta manera.
- Es necesario establecer un nodo central que es el IF.

Estos nodos, incluidos sin tener en cuenta la restricción de la L que se explicará en el apartado 5.1.3, no tienen por qué cumplir con la restricción de la separación mínima entre los nodos. Por ello, hay que revisarlos una vez obtenida la solución.

Por último, merece la pena destacar que esta primera generación de la malla basada en un parámetro L de 15 km no será la definitiva. Aunque sea la recomendable, una malla de estas características supone capacidades computacionales inasumibles. Por ello, más adelante se verá que ese valor sufre un incremento de unos 10 km.

### 5.1.2 Variables de decisión

Las variables de decisión del problema son de dos tipos claramente diferenciados:  $f_e$  y  $x_e$ . Las variables del tipo  $f_e$  representan el flujo en cada eje, es decir, el número de veces que el segmento o eje  $e$  es utilizado. Esta variable debe ser positiva o nula. Además, cabe destacar que el subíndice  $e$  hace referencia al eje que va desde el nodo  $i$  hasta el nodo  $j$ . De esa forma, se tiene que  $e = (i, j)$ .

Por su parte, la variable  $x_e$  es una variable binaria que vale 0 cuando el segmento no se utilice y 1 cuando sea empleado al menos una vez en la solución.

En ambos casos, tanto para asegurar que el flujo es positivo, como para garantizar que la variable  $x_e$  es binaria, se necesitan restricciones. Dichas restricciones se desarrollarán en el siguiente apartado.

### 5.1.3 Restricciones

A partir de los puntos de entrada, la ubicación de los IF y la dirección de la pista, se desarrolla una solución asociada a una malla de puntos establecida en base a los criterios ya comentados. En ese sentido, hay que tener en cuenta cinco restricciones básicas que posteriormente se definen de forma matemática. Estas restricciones son:

- A cada nodo de la ruta pueden llegar un máximo de dos ejes. Esto permite que la atención necesaria de los controladores en esos puntos esté limitada y reduce la complejidad del tráfico.
- Separación mínima de los nodos. Puesto que tener dos nodos demasiado cerca no es beneficioso para el control, se requiere establecer un mínimo para la separación que se corresponde con un tamaño L, posteriormente definido.
- Los virajes no deben ser demasiado pronunciados. La dinámica de las aeronaves ya impone límites en el ángulo de viraje, pero es necesario establecer un mínimo que asegure que la maniobra es adecuada.
- Espacio aéreo. Las rutas no pueden sobrevolar regiones prohibidas, restringidas o con limitaciones asociadas al ruido, entre otros.
- Separación SID-STAR. Es necesario tener en cuenta que pueden darse cruces entre las STAR que se está diseñando y las SID desarrolladas anteriormente. En el momento del cruce, se necesita asegurar que la separación vertical es suficiente para que las operaciones se realicen en condiciones de seguridad adecuadas.

Por tanto, lo primero que hay que hacer es discretizar el espacio a partir de la variable L, generando una malla. El paso para la generación de esa malla es L, puesto que, de esa forma, se estaría cumpliendo con la segunda de las limitaciones anteriormente comentadas.

Para asegurar que la variable  $x_e$  sea una variable binaria y que  $f_e$  sea positiva se han empleado las variables  $lb$  y  $ub$  (lower bound y upper bound). Se trata de los límites superiores e inferiores de las variables incógnitas. Es decir, estas variables vienen definidas como dos vectores columna, cuya longitud es el número de incógnitas existentes. Su valor es siempre cero, en el caso del  $lb$ , y 1 o el número de nodos menos uno, en el caso del  $ub$ , dependiendo de si la posición del vector está asociada a  $f_e$  o a  $x_e$ . Obsérvese que, en realidad,  $f_e$  no tiene un límite superior impuesto, pero su valor no puede ser en ningún caso superior al número de nodos menos uno, porque no existen más posibilidades de conexión con el eje  $e$ .

Por último, se necesita de las variables  $A$ ,  $A_{eq}$ ,  $b$  y  $b_{eq}$ . Estas variables hacen referencia a las restricciones a las que está sujeto el problema. De esa forma, se definen como se muestra a continuación.

$$A \cdot x \leq b$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq}$$

En ese sentido,  $A$  y  $A_{eq}$  son matrices y  $b$  y  $b_{eq}$  son vectores columna. Las dimensiones de  $A$  y  $A_{eq}$  son tales que tengan tantas columnas como incógnitas haya en el problema y tantas filas como restricciones haya. Por su parte los vectores columna  $b$  y  $b_{eq}$  tendrán longitudes que son iguales al número de restricciones.

### 5.1.3.1 Grado en los nodos

Para la definición de las variables anteriores es necesario determinar matemáticamente las restricciones del problema. En ese sentido, se comienza por detallar la restricción del grado en los nodos que se correspondería con la primera limitación impuesta al principio del apartado. Sin embargo, es necesario diferenciar entre tres casos, ya que los segmentos analizados pueden ser interiores o tener como salida o entrada el IF correspondiente o algún punto de entrada de los cuatro mencionados. Por tanto, los tres casos posibles son:

- Si el segmento es interior pueden tener dos entradas y una salida. Es decir:

$$\sum_{k:(k,i) \in E} x_{ki} \leq 2$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij} \leq 1$$

- Si el segmento está en contacto con el IF, solo puede tener una entrada y no debe presentar ninguna salida. Cabe destacar que el hecho de tener una única entrada es para garantizar que la aeronave llega a la pista alineada con ella. De esa forma, se tienen las siguientes expresiones:

$$\sum_{k:(k,r) \in E} x_{kr} = 1$$

$$\sum_{j:(r,j) \in E} x_{rj} = 0$$

- Si el segmento está en contacto con alguno de los puntos de entrada, solo puede tener una salida y no tendrá ninguna entrada. Por tanto, se tiene lo siguiente:

$$\sum_{k:(k,i) \in E} x_{ki} = 0$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij} = 1$$

Por tanto, de las expresiones anteriores se obtienen dos restricciones para cada nodo de la malla o dos filas de la matriz  $A$  o  $A_{eq}$  según corresponda. De esa manera, se establece un bucle que recorra los nodos y encuentre los posibles segmentos en los que el nodo en cuestión sea entrada o salida. En esos casos, la componente de la fila de  $A$  o  $A_{eq}$  y la columna asociada al segmento vale 1. El resto de las componentes son 0. Por su parte, la componente de  $b$  o  $b_{eq}$  correspondiente vale 0, 1 o 2 según se indica en las expresiones anteriores.

### 5.1.3.2 Ángulo de viraje

Otras de las restricciones que se plantea está asociada al ángulo de viraje. De esa manera, se establece un límite inferior que impone que los segmentos no puedan formar un ángulo inferior a uno impuesto que, en este caso, se asume que es  $45^\circ$ . La expresión matemática de esta limitación se expresa a continuación. En ella,  $A_e$  hace referencia a todos aquellos segmentos que forman un ángulo menor de  $45^\circ$  con el segmento  $e$  y son contiguos al mismo y  $a_e = |A_e|$ . Si se observa la Figura 91, estos segmentos estarían situados en la zona azul.

Como puede observarse, si el segmento  $e$  es utilizado, todos los segmentos situados en la zona azul que estarían asociados a la variable  $x_f$  de la expresión, no pueden usarse. De esa manera,  $x_f$  vale cero y se cumple la expresión. En el caso, de que alguno de los segmentos de la zona azul sea utilizado,  $x_f$  sería distinta de cero y la única forma en la que la expresión podría cumplirse es que  $x_e$  fuera nulo, es decir, que el segmento  $e$  no sea utilizado.

$$a_e x_e + \sum_{f \in A_e} x_f \leq a_e$$

En este caso, se incrementa el número de filas de  $A$ , ya que se desarrolla una restricción por segmento posible. Es decir, se ejecuta un bucle que recorra todos los segmentos posibles. A continuación, se busca, en cada iteración del bucle, aquellos segmentos cuya entrada se corresponda con la salida del segmento analizado en dicha iteración. Posteriormente, se calcula el ángulo existente entre el segmento analizado y cada uno de los segmentos anteriormente mencionados. El cálculo del ángulo se hará a partir de las direcciones de los segmentos, aplicando la corrección de cuadrante necesaria según la orientación de los segmentos.

En cada iteración y cuando el ángulo calculado sea menor que  $45^\circ$ , la componente asociada a la variable  $x_e$  que corresponda de  $A$  se hace 1. Además, la componente asociada al segmento analizado en esa iteración es  $a_e$ , que es el contador del número de segmentos localizados, cuya inclinación respecto al analizado en dicha iteración sea inferior a  $45^\circ$ . En cada iteración se define una componente de  $b$ . Dicha componente también es  $a_e$ .

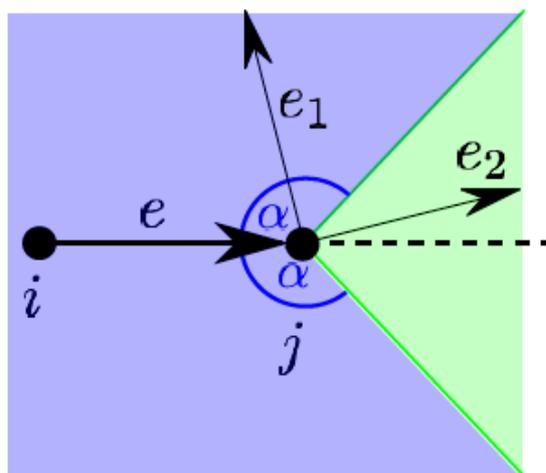


Figura 91. Restricción del ángulo de viraje [2]

### 5.1.3.3 Interacción con la SID

La siguiente restricción está asociada a la SID. El cruce con la SID debe darse de forma que las diferencias de elevación entre SID y STAR sean las suficientes como para que las operaciones se den en condiciones de seguridad adecuadas. Teniendo en cuenta que la SID presenta un ascenso del 3,3%, ya que esto correspondería a la PDG básica, y la STAR presenta un ángulo de descenso de 3° impuesto por el sistema PAPI del aeropuerto, el cruce debería darse a 16 km como mínimo del DER para que la separación vertical sea de unos 300 m.

Por tanto, para desarrollar las componentes de  $A$  y  $b$  se determina la intersección del tramo correspondiente de la salida con cada segmento posible. En este caso, puesto que la distancia debe ser superior a 16 km, bastaría con analizar los primeros tramos de las salidas. La intersección, en cada caso, se calcula con los parámetros  $m$  y  $n$ , como en el resto del documento. Es decir, es necesario establecer un bucle que recorra todos los segmentos posibles y determine la intersección de esos segmentos con el tramo de la salida correspondiente. Si la intersección está en la extensión de la recta que marca el tramo de salida, se calcula la distancia entre esa intersección y el DER. La ecuación de la restricción se correspondería con la expresada a continuación. De esa manera, en cada iteración y en caso de que la intersección esté dentro del tramo de salida, se define una fila de  $A$ , cuya componente en la posición asociada a  $x_e$  sea  $-(Dist_{int} - 16000)$ . Por su parte, la componente de  $b$  correspondiente es cero.

$$Dist_{int} \cdot x_e \geq 16000 \cdot x_e$$

### 5.1.3.4 Flujos

A continuación, es necesario imponer restricciones asociadas a las variables  $f_e$ . En primer lugar, se desarrolla la restricción del sumatorio de flujos, cuya expresión se define en las líneas siguientes. Esta expresión se desarrolla para cada nodo de la malla, es decir, se establece un bucle que recorra los nodos. Posteriormente, se determinan aquellas posiciones del vector de segmentos posibles que tengan al nodo como entrada o salida, generando una fila de  $A_{eq}$  cuyas posiciones asociadas al segmento mencionado valgan -1 o 1, respectivamente. En cuanto al vector  $b_{eq}$ , la componente asociada a cada fila de  $A_{eq}$ , toma el valor que corresponda según la ecuación siguiente, es decir, P, -1 o 0, dependiendo de si el nodo es interior, pertenece a la pista (o al IF, en este caso) o es un punto de entrada.

$$\sum_{k:(k,i) \in E} f_{ki} - \sum_{j:(i,j) \in E} f_{ij} = \begin{cases} |P| & i = r \\ -1 & i \in P \\ 0 & i \in V\{P \cup r\} \end{cases}$$

Además de la restricción anterior, los flujos máximos existentes en cada segmento son P, es decir, el número de entradas, si el segmento se usa. La ecuación siguiente, recoge lo anterior de forma matemática. En ese sentido, existiría una nueva restricción por cada segmento posible. Esto hace que se tengan nuevas filas en  $A$ , cuyo valor asociado a la posición de  $x_e$  es -1, y cuyo valor asociado a  $f_e$  es  $1/P$ . Por su parte,  $b$  vale cero en todos los casos.

$$x_e \geq f_e/P$$

La expresión anterior no garantiza que, cuando el flujo sea nulo, el segmento permanezca inutilizado, es decir,  $x_e$  valga cero. Esto se puede imponer si se introduce una restricción más, al margen de las que desarrolla el artículo. Esta restricción, cuya formulación se recoge a continuación, se define para cada segmento posible e impone un valor de 1 a cada posición de  $A$  asociada a  $x_e$  y un valor de -1 a las asociadas a  $f_e$ . Es decir, en cada fila de  $A$ , se tienen únicamente dos posiciones no nulas, que son las especificadas anteriormente. Por su parte,  $b$  sigue siendo cero en todos los casos.

$$x_e \leq f_e$$

### 5.1.3.5 Alineación con la pista

Otra cuestión importante que es necesario imponer, es que la aeronave tome el segmento de aproximación intermedia alineada con la pista. Para ello, se buscan todos aquellos segmentos que estén en contacto con el IF. A continuación, se determina la orientación de esos segmentos, es decir, su dirección, a partir de la longitud y la latitud de los nodos que definen sus extremos. De esa manera, se tiene una nueva fila de  $A_{eq}$  cuyas posiciones asociadas a los segmentos comentados sean las direcciones de los mismos, ya que la expresión asociada a esta restricción es la que se muestra a continuación. Por su parte,  $b_{eq}$  debe ser igual a la dirección de la pista.

$$\chi_{seg} \cdot x_e = \chi_{pista}$$

### 5.1.3.6 Espacio aéreo

En principio, no se han considerado las restricciones de espacio aéreo en ningún momento para la resolución del problema. Es decir, en las matrices  $A$  y  $A_{eq}$  y, consecutivamente, en los vectores  $b$  y  $b_{eq}$  no habrá componentes asociadas a los obstáculos. Esta restricción requiere de un postprocesado de las soluciones para garantizar que se cumple, aunque no aparezca en la resolución del problema de optimización.

### 5.1.3.7 Tree weight

Por último, es necesario desarrollar una restricción más, que únicamente será aplicable a partir de la segunda ejecución del programa cuando se optimice bajo el objetivo de *path length*, una vez se haya determinado la primera solución de la frontera de Pareto. Esta restricción debe servir como limitación del *tree weight* al valor obtenido en la ejecución anterior. Su expresión se recoge en las líneas siguientes y, en ella, el superíndice  $i$  hace referencia a la ejecución en la que se calcula el *tree weight*. Por tanto, se estaría definiendo una fila más de  $A$  en la que cada componente asociada a cada  $x_e$  debe ser la longitud del segmento en cada caso. En cuanto a  $b$ , en este caso, debe ser el *tree weight* de la ejecución anterior.

$$\left[ \sum_{e \in E} l_e x_e \right]^i \leq \left[ \sum_{e \in E} l_e x_e \right]^{i-1}$$

## 5.1.4 Función objetivo

Teniendo en cuenta las limitaciones anteriores, cabe destacar que el problema que se va a plantear presenta dos objetivos: *path length* y *tree weight*. El primero de ellos hace referencia a la longitud total de la ruta desde el punto de entrada hasta alcanzar la pista. En este caso, la longitud de cada eje utilizado se cuenta tantas veces como la aeronave recorra dicho eje. En el caso del *tree weight*, se hace referencia a la longitud obtenida de la suma de las longitudes de todos los ejes empleados en la solución. Obsérvese que, en este caso, cada eje se cuenta una sola vez.

Puesto que los objetivos presentan tendencias opuestas, es decir, no se puede mejorar uno sin sacrificar el otro, se determinan los puntos de la frontera de Pareto. En ese sentido, la metodología a emplear consiste en obtener la solución óptima para la función objetivo de *path length* y calcular el *tree weight* a partir de ella. En la siguiente ejecución, se limita el *tree weight* al valor obtenido en la primera ejecución. El procedimiento se repite hasta obtener los puntos que definen la frontera de Pareto, limitando el *tree weight*, en cada caso, con el valor obtenido en la ejecución anterior. También, hay que localizar la solución óptima para la función objetivo del *tree weight*, ya que esta supone obtener el otro extremo de la curva de Pareto mencionada.

Llegados a este punto merece la pena destacar que el problema planteado se corresponde con un problema de programación lineal de enteros mixtos (MILP). Por ello, se emplea para la resolución del mismo el algoritmo *intlinprog* de Gurobi. Este algoritmo necesita como input una variable  $f$ , que se determina a partir de la función objetivo ( $\min_x f^T x$ ). En este caso, se ha dicho que el problema presenta dos posibles funciones objetivo que se recogen en las líneas siguientes.

$$\min \sum_{e \in E} l_e f_e$$

$$\min \sum_{e \in E} l_e x_e$$

Por tanto, la variable  $f$  está asociada a  $l_e$ , que es un vector que contiene a las longitudes de todos los ejes posibles que pueden existir a partir de los nodos de la malla. Obsérvese que cuando se optimiza con la función objetivo *path length* la variable  $f$  se anula en las posiciones asociadas a  $x_e$ . Por el contrario, cuando se optimiza en función del *tree weight* se anulan las posiciones asociadas a  $f_e$ .

## 5.2 Resultados y análisis

Una vez comentado el desarrollo teórico del problema, se procede a su resolución. En ese sentido, cabe destacar que, en un principio, se intentó resolver el problema con el algoritmo *intlinprog* de MATLAB, cuyo comando se define en la línea siguiente. Más adelante, se verá que este algoritmo de MATLAB presenta ciertas dificultades que conllevan a la resolución del problema con Gurobi.

Además de  $f$ , este algoritmo de resolución necesita otros inputs. Entre ellos está la variable *intcon*, que asegura que todos los resultados que da el programa como solución sean enteros. De esa forma, la variable *intcon* es un vector fila que tiene la misma longitud que  $f$ .

$$[sol, costopt, exitflag, output] = intlinprog(f, intcon, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, opts)$$

También, se incluye como input la variable *opts*. Esta variable sirve para desactivar el *display* que viene activado por defecto en MATLAB y que consiste en una visualización iterativa de la solución. Esto permite aumentar la eficiencia del programa y reducir el tiempo de ejecución.

Sin embargo, antes de pasar a analizar los resultados obtenidos mediante el empleo del método comentado anteriormente, es necesario tener en cuenta varias consideraciones que han llevado a la modificación de la malla y de la propia ejecución del programa.

En el apartado anterior, se dijo que se iba a seleccionar un valor del parámetro L de 15000 m. Sin embargo, cuando se comenzó a ejecutar el programa y debido a la enorme cantidad de variables y restricciones, los tiempos de ejecución se escapaban del margen admisible. Como ejemplo, si se tomaba una malla desarrollada con un parámetro L de 60 km en un ordenador de 16 GB de RAM y con un procesador Intel (R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz, la ejecución tardaba unos segundos. Cuando se reducía L a 40 km, los tiempos superaban los cinco minutos. En ese último caso, las matrices  $A$  y  $A_{eq}$  presentaban dimensiones de  $17500 \times 9000$  elementos. En el caso de una L de 60 km, esas dimensiones eran de  $3000 \times 1500$ . Es decir, existe una relación de 35 en el número de elementos y de unos 300 en el tiempo.

Si se considera la malla que inicialmente se pretendía emplear, se estaría hablando de matrices de  $1000000 \times 500000$  elementos. Es decir, existiría una relación de unos 100000 con el caso en el que el parámetro L valía 60 km. Esto supone que la relación de tiempos sea de, aproximadamente, 1000000. Por tanto, se necesitaría alrededor de un mes para generar únicamente las matrices asociadas a las restricciones. Posteriormente, habría que sumarle el tiempo de ejecución de *intlinprog* para la obtención de los puntos de Pareto en cada pista.

Además de los problemas asociados a los tiempos de ejecución, existe otro relacionado con la memoria. En el caso que se está analizando en el que las matrices presentan dimensiones excesivamente grandes, no hay memoria suficiente para contenerlas, ya que se necesitarían centenas de TB. La utilización del comando *sparse* apenas alivió estos problemas.

Por todo lo anterior y teniendo en cuenta que los programas se optimizaron al máximo para conseguir la mayor eficiencia, se optó por elevar el valor del parámetro  $L$  hasta que los tiempos de ejecución fueran aceptables. De esa manera, se obtuvieron unos primeros resultados para un valor de  $L$  de 25 Km, en principio. En este caso, las matrices resultan tener dimensiones de  $120000 \times 60000$ , lo que reduce los tiempos al orden de días (sumando el tiempo de generación de matrices y de ejecución del algoritmo).

Una vez establecido el tamaño de la malla, para el caso de la pista 10, ha sido necesario modificar varios parámetros de los recogidos en las opciones de *intlinprog*. En ese sentido la variable *opts*, comentada en el apartado anterior, recoge todas las modificaciones realizadas. En principio, se modificó el tiempo máximo de ejecución y, también, las variables *LPMaxIter* y *RootLPMaxIter* que hacen referencia al número máximo de iteraciones del algoritmo de resolución. En concreto, *LPMaxIter* está asociada al número máximo de iteraciones por nodo durante el proceso de Branch-and-bound. Por su parte, *RootLPMaxIter* hace referencia al número máximo de iteraciones empleadas para la resolución del problema de programación lineal inicial. Esto evitaba que el programa dejase de ejecutarse por cuestiones ajenas a la convergencia del algoritmo.

Por otro lado, se modificó la variable *CutGeneration* de *basic* a *intermediate*. Esto se hizo para reducir los tiempos de ejecución de *intlinprog* en las últimas ejecuciones, ya que al introducir restricciones del *tree weight* más estrictas, se presentaban tiempos de ejecución mayores. Esta opción agrega restricciones adicionales de desigualdad lineal al problema. Estas restricciones intentan limitar la región factible de las relajaciones LP que *intlinprog* utiliza. De esa forma, la solución estará más o menos cerca de los enteros que se estaban imponiendo. El tipo de corte es lo que se elige con esta opción. El método *intermediate* incluye más tipos que el *basic*. Sin embargo, con esto, las reducciones de tiempo que se consiguen son suficientes para acelerar el proceso, pero no llegan a ser las necesarias para poder reducir la malla. De hecho, el ahorro conseguido es de un par de segundos para el caso de una  $L$  de 50 km.

Con todas las consideraciones anteriores se obtuvieron unos primeros resultados a partir del algoritmo *intlinprog* de MATLAB. Sin embargo, esos resultados presentaban ciertas anomalías, puesto que se llegaba a soluciones cuyos valores de *path length* y *tree weight* eran superiores a los de la solución de la siguiente iteración, lo que carece de sentido, porque la curva de Pareto debería ser decreciente. Observando las variables de salida del algoritmo *intlinprog* se pudo llegar a la conclusión de que en esos casos el criterio de detención de la ejecución no era el correcto y, por tanto, la solución no era admisible.

Además, existía otro problema asociado. Las soluciones mencionadas en el párrafo anterior han sido obtenidas bajo el criterio de minimización de *path length*. Sin embargo, la curva de Pareto requiere de una optimización en base al criterio de *tree weight* para obtener el extremo inferior de la curva. Computacionalmente, la obtención de ese punto es mucho más costosa. De hecho, ejecutando el programa con mallas de un valor de  $L$  de 30 Km, no se consiguió obtener la solución, aun empleando tiempos de ejecución superiores a cinco días.

Por esa razón y por las anomalías presentes en las soluciones obtenidas, se optó por realizar la optimización con Gurobi [8]. Se trata de un solver de optimización más potente que permite obtener resultados en tiempos considerablemente inferiores. Este solver presenta una versión de la función *intlinprog* modificada que permite ejecutar el programa que se desarrolló para MATLAB sin cambios sustanciales. De hecho, la única modificación relevante realizada está asociada al vector de opciones. En este caso, se han considerado las opciones establecidas por defecto.

Al igual que pasaba con MATLAB, la optimización con el *tree weight* como función objetivo supone un cuello de botella en los tiempos de ejecución. En concreto, el caso de la pista 28 es el que presenta un mayor coste computacional. Para el caso de MATLAB este caso no podía resolverse, ni siquiera para mallas cuyo parámetro L fuera grande. Sin embargo, empleando Gurobi se ha podido ejecutar el caso de  $L = 25$  Km. Cabe destacar que un valor del parámetro L más pequeño, hacía que los tiempos de ejecución fueran inadmisibles. De hecho, el caso comentado de  $L = 25$  Km tarda unos cuatro días.

Los resultados obtenidos con Gurobi se presentan en las figuras siguientes. Obsérvese que en el caso de la pista 10 la quinta solución coincide con la obtenida con el mínimo *tree weight* como función objetivo. Por eso, en las gráficas los puntos se solapan. Además, cabe destacar que en este caso no se observa ninguna anomalía. Las variables de salida de la solución muestran que la resolución se realiza de forma adecuada. En concreto, la *exitflag* es 1 en todos los casos, al contrario de lo que ocurría cuando se empleaba únicamente MATLAB. Esto denota que el algoritmo converge correctamente.

En la Figura 92 y en la Figura 94, se ha seguido el mismo código de simbología y colores empleados en la Figura 93 y en la Figura 95. Con el objetivo de aclarar las representaciones, cabría destacar que en ellas aparecen, en magenta, el mallado. En azul, se han representado los puntos de entrada (HIJ, CJN, TLD y BLN). En verde, se muestran los umbrales y, en rojo, el IF. Por último, las discontinuas en cian representan la SID correspondiente y las continuas de colores hacen referencia a las soluciones comentadas.

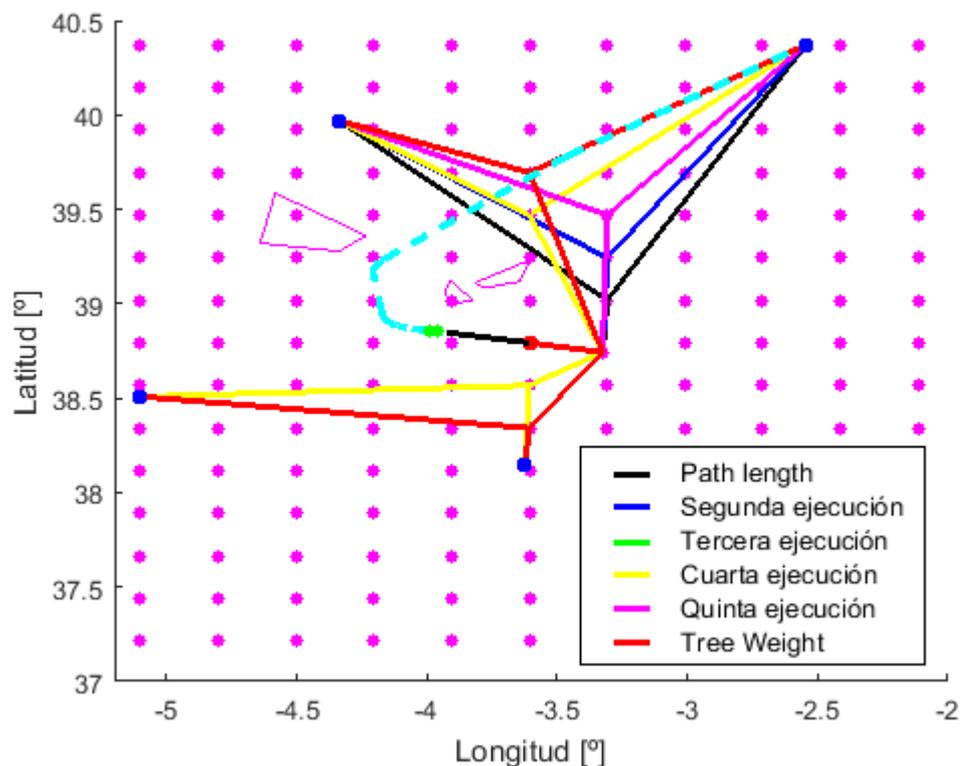


Figura 92. Soluciones de la optimización de la llegada a la pista 28 para  $L = 25$  Km y Gurobi

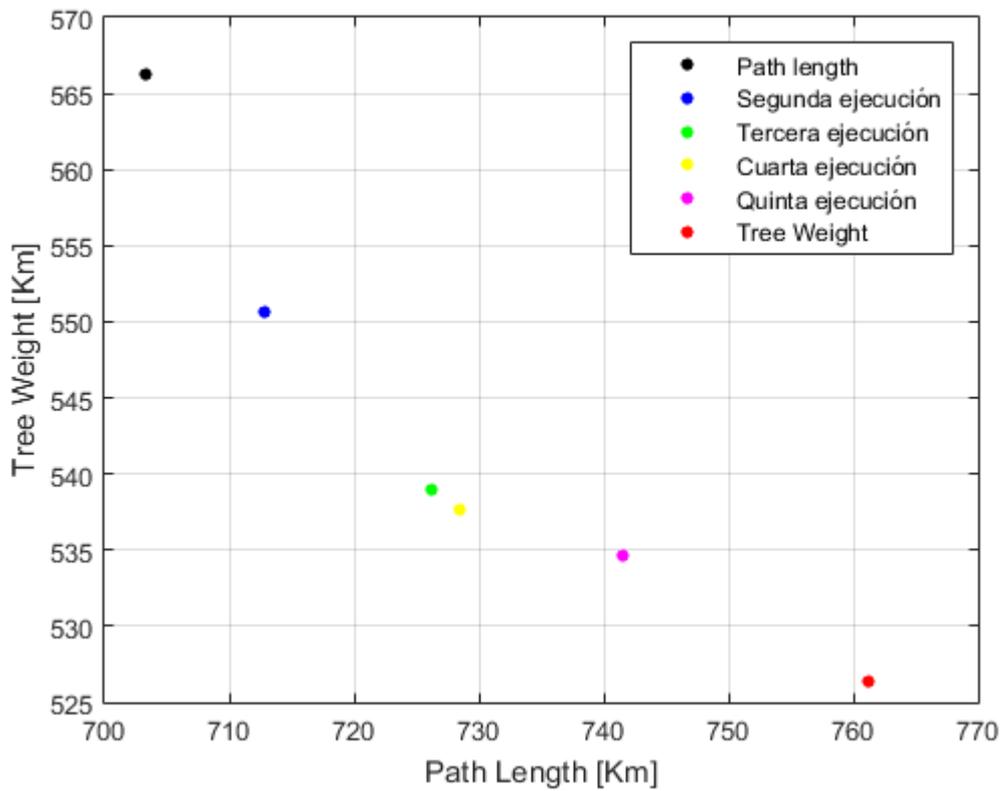


Figura 93. Soluciones óptimas de Pareto de la llegada para la pista 28 para L = 25 Km y Gurobi

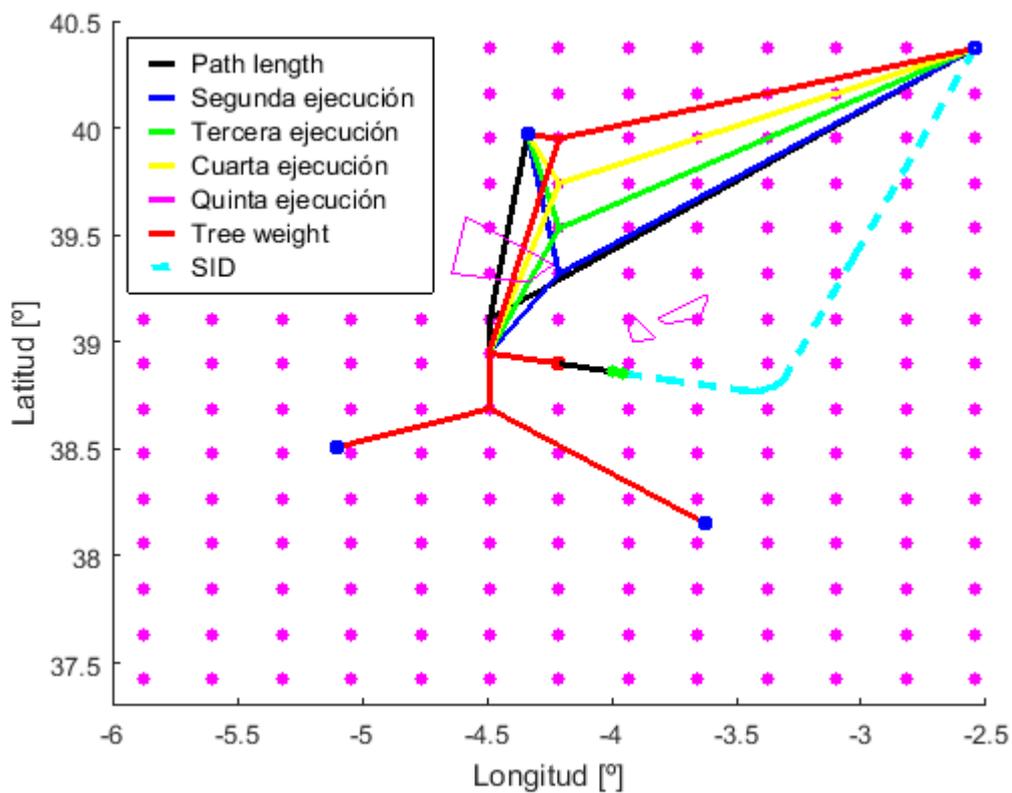


Figura 94. Soluciones de la optimización de la llegada para la pista 10 para L = 25 Km y Gurobi

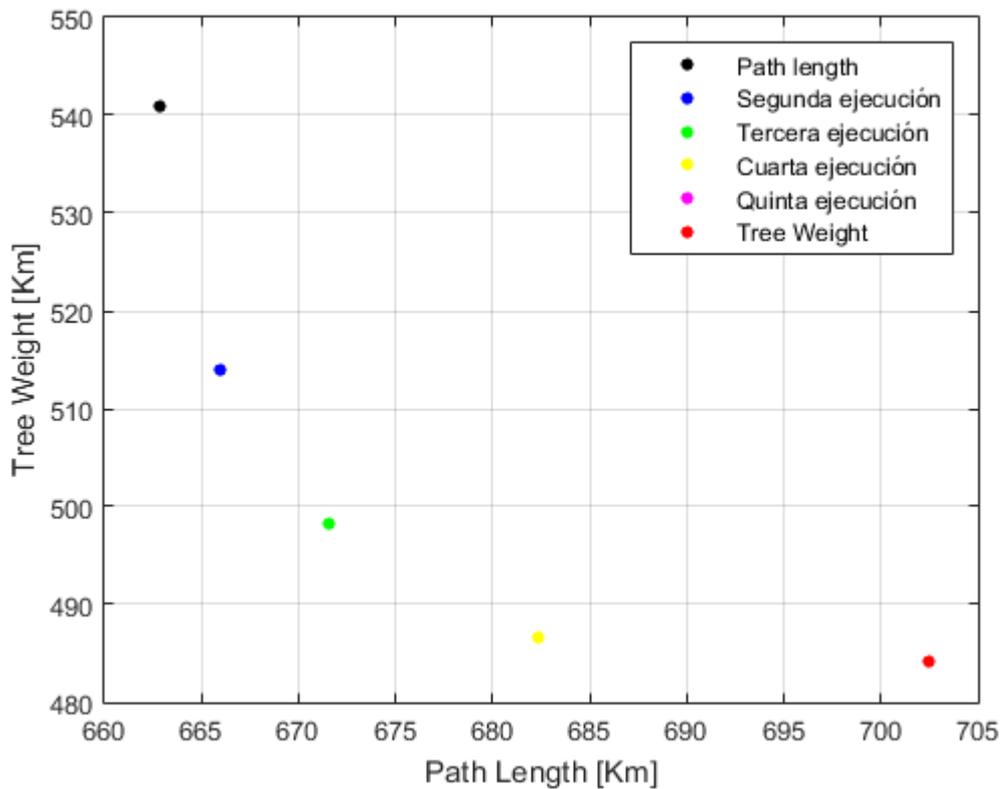


Figura 95. Soluciones óptimas de Pareto de la llegada para la pista 10 para  $L = 25$  Km y Gurobi

Por otro lado, y como se indicó en el apartado anterior, se necesita llevar a cabo un postprocesado de los resultados obtenidos, ya que existen ciertas regiones que están señalizadas en magenta en las figuras anteriores y que son regiones en las que el vuelo está prohibido o limitado en ciertos niveles de altitud. La Figura 92 muestra que las soluciones obtenidas para la pista 28 no suponen ningún problema en cuanto a restricciones de espacio aéreo. Sin embargo, la Figura 94 pone de relieve que existen ciertos tramos de las soluciones de la pista 10 que sí intersectan con una de las tres regiones consideradas en las que el vuelo está restringido o prohibido. Dicha región denominada LER146 se corresponde con un parque nacional en el que el sobrevuelo está prohibido desde la superficie hasta FL70. Si se considera que el descenso se da con una pendiente de  $3^\circ$  que es la que marcan los sistemas PAPI del aeropuerto y teniendo en cuenta que se recorren más de 60 km antes de intersectar a LER146, se llega a la conclusión de que la altitud que tiene la aeronave supera los 3000 m. Por tanto, está fuera de la región que se está analizando.

A continuación, y a partir de las soluciones anteriores, se construyó la llamada frontera de Pareto para cada pista. Se trata de una curva que viene definida por las soluciones obtenidas en la que se puede ver la dependencia de las dos funciones objetivo. Los puntos situados sobre esa curva representan soluciones óptimas. Sin embargo, aquellos puntos que están situados por encima de la misma se corresponden con soluciones no óptimas. Las representaciones de la curva de Pareto en los casos analizados son estrictamente decrecientes, que es lo que cabe esperar teniendo en cuenta las tendencias opuestas de las funciones objetivo.

Cabe destacar que para ambas pistas los resultados son similares, aunque los valores obtenidos para ambas funciones objetivos son superiores en el caso de la pista 28. Es decir, el *tree weight* está entre 480 y 570 km en todos los casos, y el *path length* está entre los 660 y los 710 km en el caso de la pista 10, y entre 700 y 760 km en el caso de la pista 28. Además, parece que las diferencias entre una solución y la siguiente son mayores en *tree weight* que en *path length* en los puntos cercanos a la optimización en base al criterio de *path length* y la tendencia se invierte en el extremo opuesto.

En el caso de optimización con el objetivo del *tree weight*, las soluciones se unen antes, es decir, el tramo en el que las soluciones procedentes de TLD y CJN es común es más largo para ambas pistas. En el caso de HIJ y BLN, ocurre lo mismo en la llegada para la pista 28. Para la pista 10 no afecta porque todas las soluciones coinciden.

En relación con lo anterior, parece que las soluciones son bastante similares por el sur. Por tanto, la libertad de diseño está muy limitada. De hecho, para la pista 10, esa libertad de diseño no existe. Todas las soluciones se solapan. Sin embargo, por el norte sí que se aprecia una libertad de diseño mayor. Esto se puede justificar si se piensa en el espacio existente entre los puntos de entrada y la pista (o el IF, en este caso), que resulta ser considerablemente mayor por el norte.

Por último y en virtud de seleccionar una solución de todas las que se presentan en este apartado, se puede decir que la tercera solución (verde) es la que daría mejores resultados para ambas pistas, ya que supone un buen compromiso entre *path length* y *tree weight*. De hecho, para las dos pistas se consiguen reducciones considerables de *tree weight* sin empeorar de forma excesiva el *path length*. Además, la interacción de esta solución con la SID (para la pista 28) y con las zonas restringidas (para la pista 10) es bastante reducida. Véase la Figura 96 y la Figura 97.

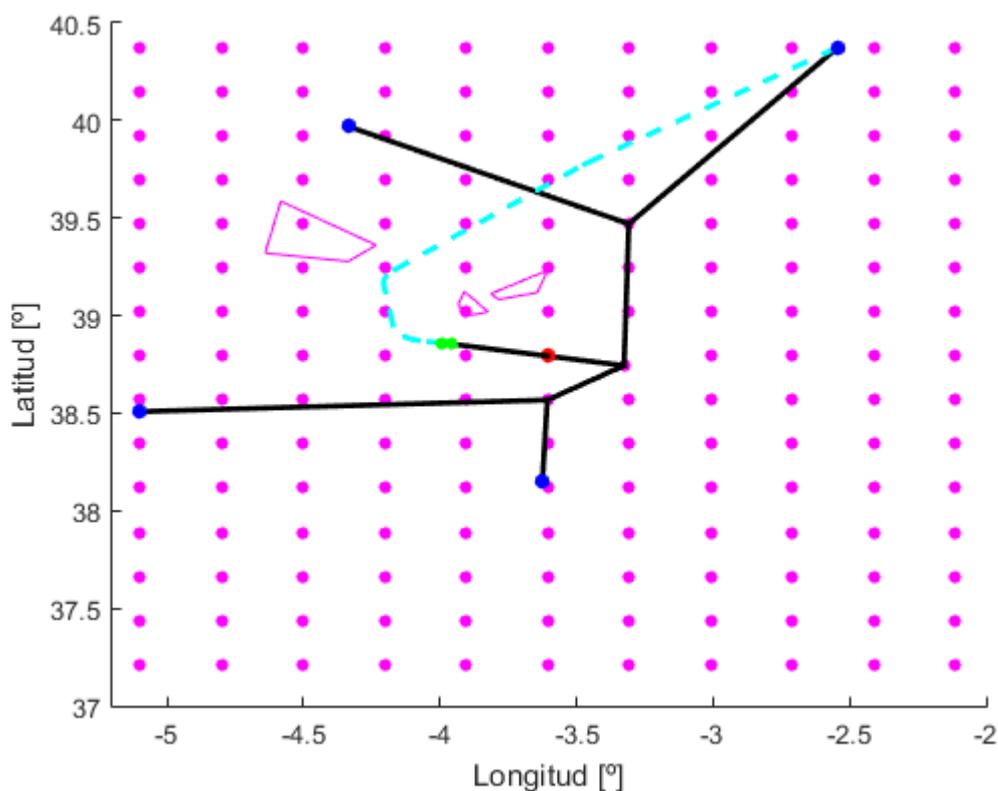


Figura 96. Tercera solución de la llegada para la pista 28

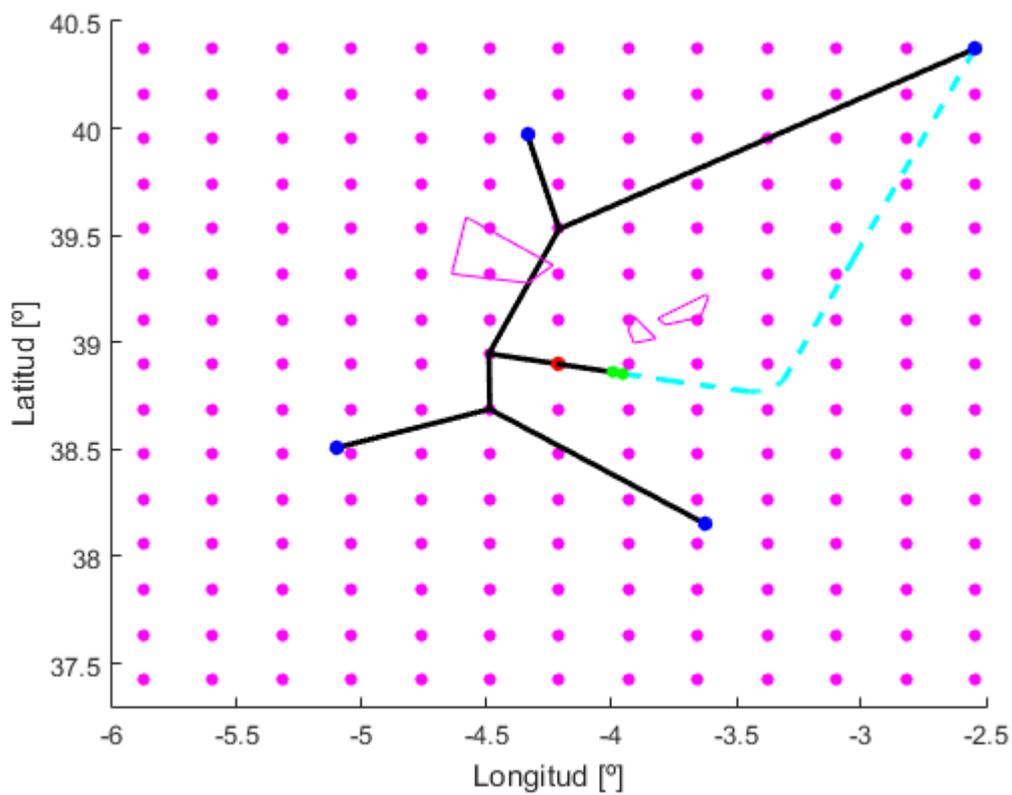


Figura 97. Tercera solución de la llegada para la pista 10

## 6 CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

---

El trabajo que se ha realizado tenía como objetivo fundamental el diseño de procedimientos de carácter instrumental en el aeropuerto de Ciudad Real. Es cierto que este trabajo se ha ido moldeando a lo largo de su realización, modificando su alcance en función de los resultados que se iban obteniendo. De esa manera, se optó por realizar un diseño convencional de las salidas. En cuanto a las llegadas, se desarrolló un procedimiento convencional y de precisión para una de las pistas, y uno RNP de no precisión para la otra.

Por último, una vez realizado el diseño de los procedimientos anteriormente mencionados, se llevó a cabo un proceso de optimización del tipo MILP de los tramos de aproximación inicial y llegada, es decir, desde los puntos de entrada hasta el IF para las dos pistas.

Como aspectos positivos del trabajo, merece la pena destacar que los diseños conseguidos han sido generados con el mayor grado de realismo posible, siguiendo la norma y teniendo en cuenta las restricciones del espacio aéreo y los obstáculos del terreno. Además, la interacción con los procedimientos existentes en los aeropuertos circundantes es mínima y los valores obtenidos de pendientes de ascenso y descenso, y de altitudes de los diferentes puntos de referencia son similares a los de otros aeropuertos.

Por otra parte, el haber conseguido implementar el algoritmo de optimización supone un gran logro, si se piensa en las limitaciones computacionales que se tenían y en la gran cantidad de consideraciones que se deben tener en cuenta para ello.

A pesar de esto, no se debe pasar por alto que se han ido realizando una serie de hipótesis a lo largo de todo el trabajo. Algunas de ellas se han justificado a partir de la normativa o de cuestiones operacionales. Sin embargo, ha habido casos en los que las decisiones se han tomado por simplicidad. Aunque se ha intentado en todo momento realizar el trabajo de la forma más realista posible, no deja de tener un carácter académico y, por tanto, presenta ciertas limitaciones de complejidad y tiempo.

También, es necesario tener presente cuáles han sido los factores limitantes del trabajo. En ese sentido, cabe destacar que, en la parte de diseño manual descrita en el apartado 3, han sido especialmente limitantes los obstáculos. De hecho, la mayor parte de las decisiones se han tomado en base a la disposición de los mismos. El MOC ha sido el parámetro de control más influyente en el diseño y su cumplimiento ha llevado, en ciertas ocasiones, a la modificación de las pendientes de ascenso y descenso, y del recorrido a seguir por la aeronave.

Bien es cierto que, al margen de los aspectos operacionales que deben garantizar la seguridad y la eficiencia de las operaciones aeronáuticas, existe un factor limitante de gran importancia. Se trata de la capacidad computacional. Las limitaciones asociadas a este aspecto se han mostrado tanto en el apartado de diseño manual, en el que el terreno se ha tenido que considerar por fragmentos, como en el apartado de optimización, en el que la malla ha tenido que ser adaptada.

En cuanto a líneas de trabajo futuras, la selección de los tipos de procedimientos diseñados parece dejar abiertas una variedad de posibilidades a cubrir en trabajos futuros, en los que puede optarse por diseñar todos los procedimientos RNP o incluso modelar alguno de ellos en otro formato RNAV.

Además, cabe destacar que, en los cuatro procedimientos determinados, el punto de referencia o entrada es CJN. Sin embargo, la optimización pone de relieve que existen otros puntos próximos que podrían servir como posibles entradas para otros procedimientos. En estos procedimientos habrá que tener muy en cuenta la interacción entre los mismos, ya que se debe garantizar la seguridad de las operaciones.

En relación con lo anterior, hay que tener en consideración el siguiente aspecto. En el proceso de optimización se han tomado como puntos de entrada BLN, HIJ, TLD y CJN. Algunos de estos puntos, especialmente los del norte, (TLD y CJN) quizás estén demasiado sobrecargados. En concreto, TLD y CJN son puntos muy cercanos al aeropuerto Adolfo-Suárez-Madrid-Barajas. La densidad de tráfico que se maneja en ese aeropuerto es muy elevada. Por ello, habría que consultar con el proveedor de servicios de navegación aérea si la carga de tráfico que experimentan estos puntos permitiría establecer ahí las conexiones.

Por otra parte, se podría pensar en realizar los procesos en un ordenador más potente capaz de analizar una mayor cantidad de datos. De esa manera, podría plantearse la optimización con la malla de 8 NM que se comentó al principio y que venía determinada por cuestiones puramente operacionales.

Por último, cabe destacar que la optimización presenta una gran variedad de líneas futuras. En principio podría plantearse optimizar las salidas o realizar las llegadas considerando el tramo final con las restricciones que fueran necesarias. Además, conviene resaltar que las restricciones de espacio aéreo, en este caso, se han considerado con un postprocesado posterior. Podría plantearse la idea de incluirlo en las restricciones del problema de optimización. Esto tendrá, posiblemente, un costo computacional adicional que será necesario cubrir con un ordenador más potente o incrementando aún más el tamaño de la malla, con los efectos perjudiciales que esto pudiera tener.

# REFERENCIAS

---

1. Aena. (2020). *Estadísticas de tráfico aéreo*. Obtenido de <http://www.aena.es/csee/Satellite?c=Page&cid=1113582476715&pagename=Estadisticas%2FEstadisticas>
2. Andersson Granberg, T., Polishchuk, T., Valentin, P., & Schmidt, C. (2016). Automatic Design of Aircraft Arrival Routes with Limited Turning Angle. *16th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*.
3. Centro Nacional de Información Geográfica. (s.f.). *Centro de Descargas*. Obtenido de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDA2#>
4. ENAIRE. (19 de Diciembre de 2019). *AIP España*. Obtenido de [https://ais.enaire.es/AIP/AIPS/AMDT\\_328\\_2020\\_AIRAC\\_05\\_2020/AIP.html](https://ais.enaire.es/AIP/AIPS/AMDT_328_2020_AIRAC_05_2020/AIP.html)
5. ENAIRE. (s.f.). *Insignia*. Obtenido de <https://insignia.enaire.es/>
6. Fernández-Coppel, I. A. (s.f.). *Las coordenadas geográficas y la proyección UTM (Universal Transversal Mercator). El datum*. Palencia: Universidad de Valladolid.
7. Google. (2020). *GoogleMaps*. Obtenido de <https://www.google.es/maps/preview>
8. Gurobi Optimization,LLC. (s.f.). *Gurobi optimization*. Obtenido de <https://www.gurobi.com/>
9. Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Servicio Web de Transformación de Coordenadas*. Obtenido de <https://www.ign.es/wcts-app/>
10. Instituto Nacional de Estadística. (2019). *INE*. Obtenido de <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2866&L=0>
11. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (9 de Agosto de 2006). *Plan director del aeropuerto de Ciudad Real*. Obtenido de <https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/politicas-aeroportuarias/integracion-territorial-aeroportuaria/planes-directores/plan-director-del-aeropuerto-de-ciudad-real>
12. OACI. (2006). Documento 8168. Volumen I. Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos. En *Operaciones de aeronaves*.
13. OACI. (2006). Documento 8168. Volumen II. Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos. En *Operaciones de aeronaves*.
14. OACI. (2009). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. En *Aeródromos. Volumen I. Diseño y operaciones de aeródromos*.



## ANEXO I: SID y STAR de aeropuertos circundantes

En este anexo se incluyen las cartas más relevantes para el diseño de los procedimientos que se recogen en este proyecto. El objetivo fundamental de este anexo es verificar que no existen interferencias entre las llegadas y salidas diseñadas y las ya existentes o que esas interferencias son asumibles. De esa forma, se incluyen las cartas de los aeropuertos cuya densidad de tráfico es mayor y pueden suponer un problema para los procedimientos diseñados (Madrid y Sevilla). También, se incluyen las cartas asociadas al aeropuerto de Albacete, ya que como se vio en el apartado 2.4.3, es el que más interferencia puede suponer.

### 7.1.1 Madrid

Analizando las cartas del aeropuerto Adolfo Suárez-Madrid Barajas, se llega a la conclusión de que las principales interferencias se dan con las STAR. En las SID el punto más cercano a los procedimientos que se han diseñado es VTB. Por ello, se centra la atención en las STAR y, en vista de las figuras que se muestran a continuación (Figura 98 y Figura 99), parece razonable prestar una especial atención a la STAR 3.

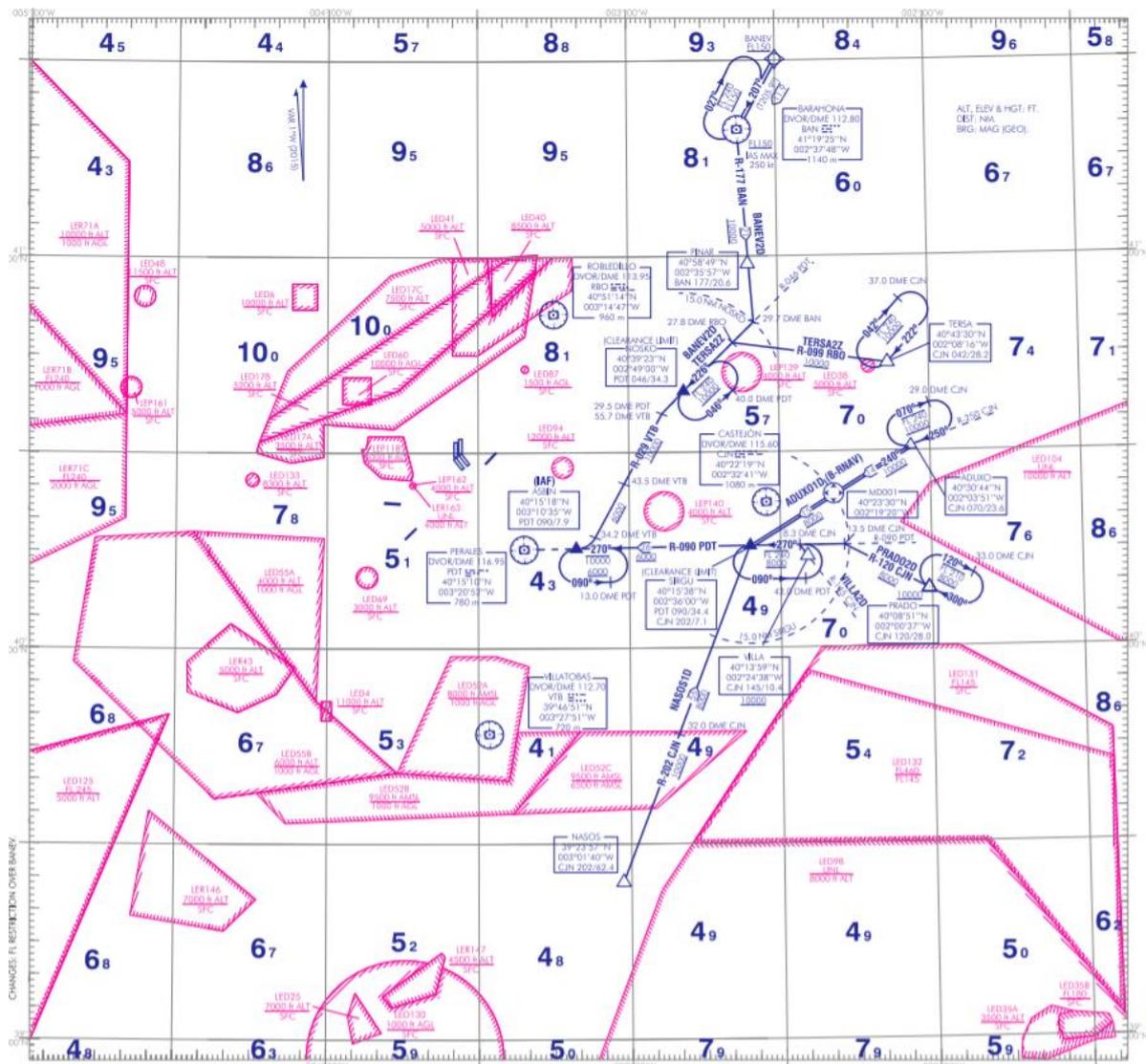


Figura 98. STAR 4 RWY 32R/32L. Madrid-Barajas

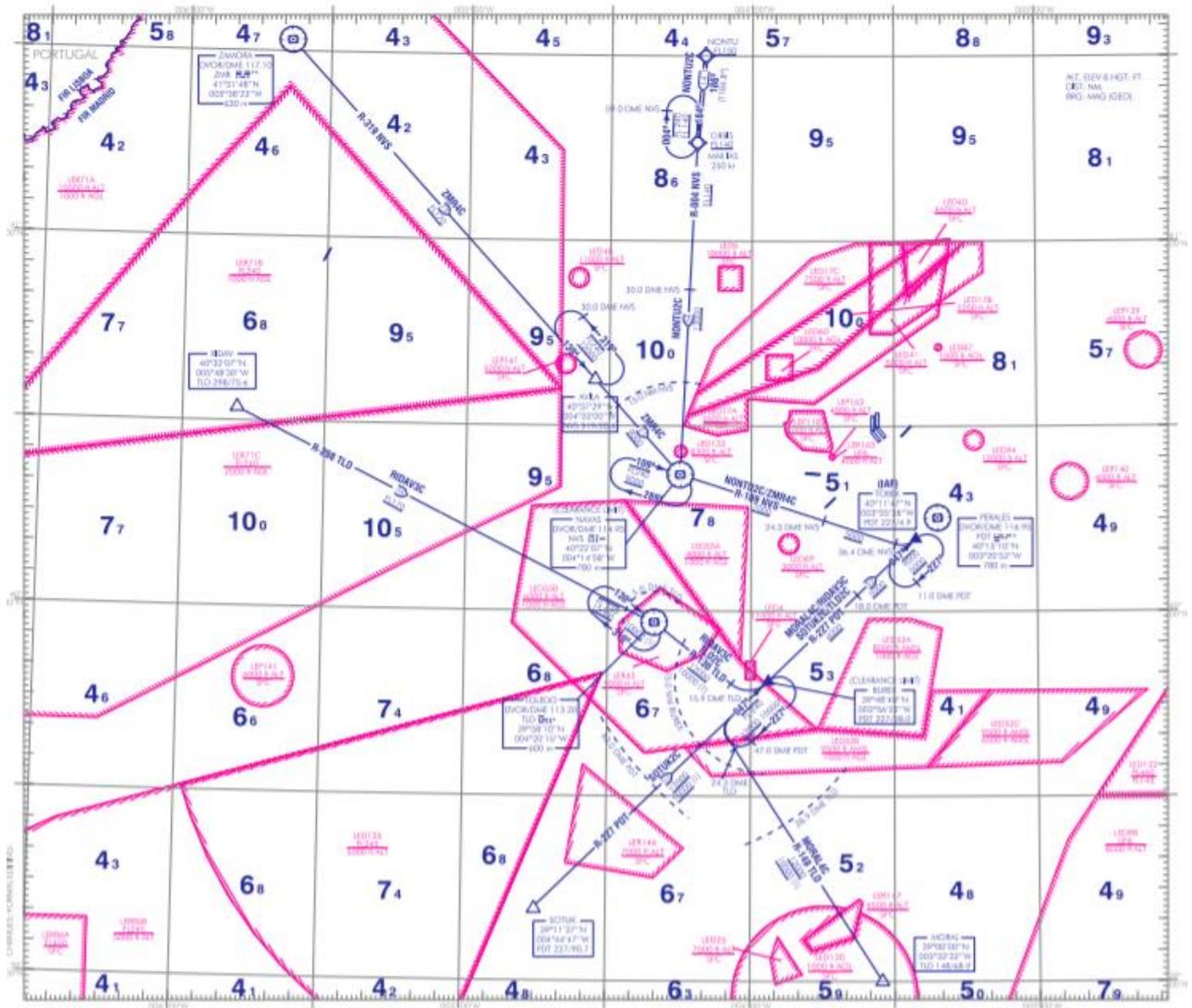


Figura 99. STAR 3 RWY 32R/32L. Madrid-Barajas

Como se puede observar en la Figura 99, el tramo que puede suponer un problema mayor (MORAL 4C) presenta altitudes de 10000 ft como mínimo. Eso quiere decir que existen interferencias con los procedimientos diseñados que hay que solucionar por medio del establecimiento de ciertos valores en las pendientes.

### 7.1.2 Sevilla

En cuanto al aeropuerto de Sevilla, como puede observarse en las figuras siguientes (Figura 100 y Figura 101) que se corresponden con las STAR de las pistas 27 y 09, los procedimientos no presentan interferencias. Los puntos más cercanos a los procedimientos diseñados son HIJ y BLN. Teniendo en cuenta que con las SID ocurre lo mismo, los problemas son inexistentes.

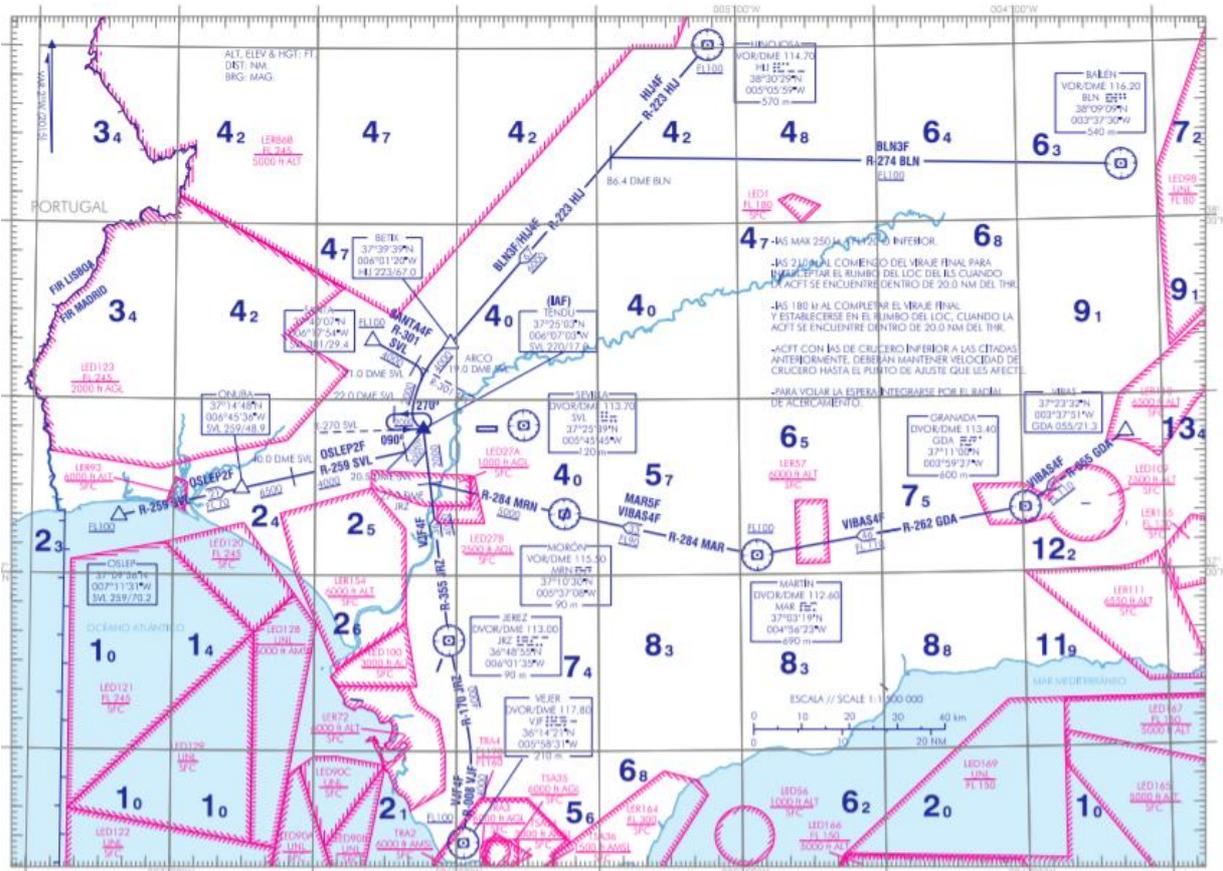


Figura 100. STAR 1 RWY 09. Sevilla

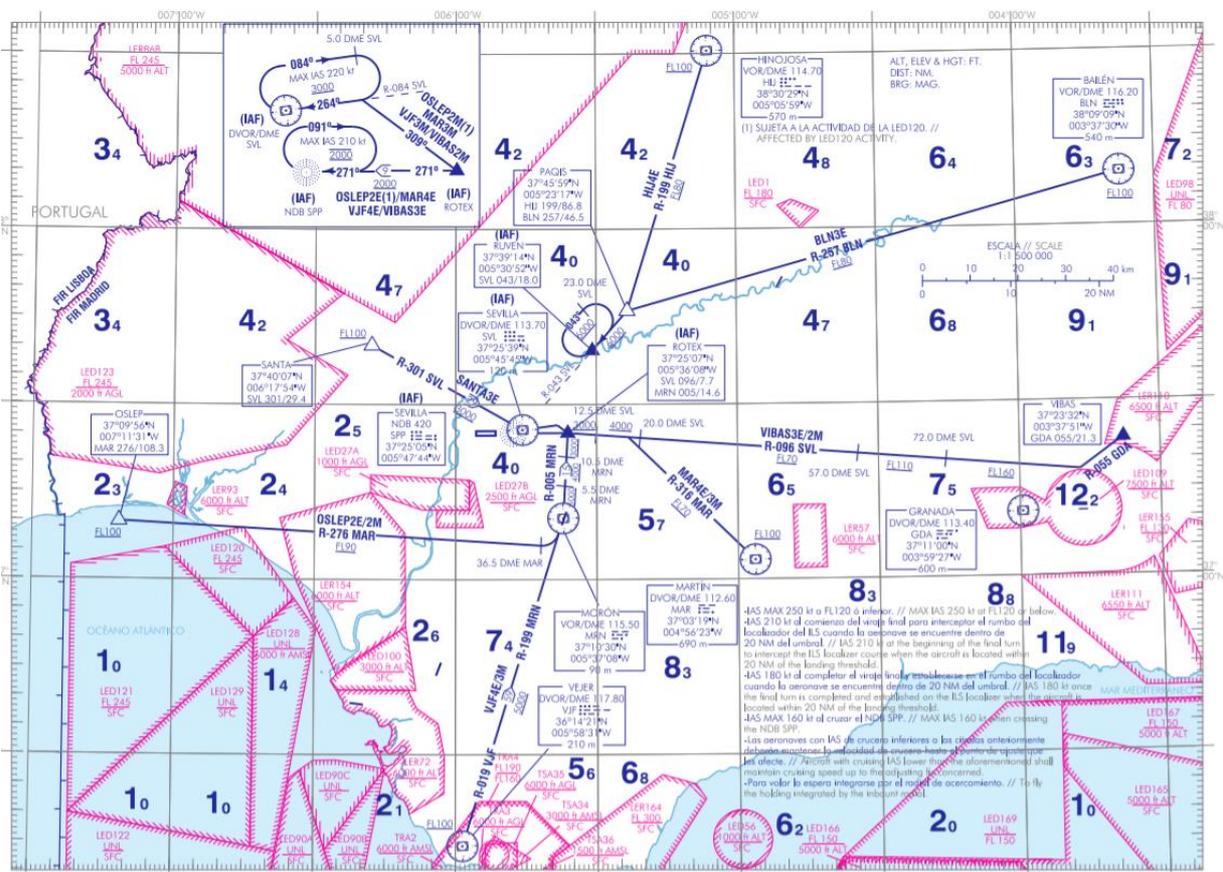


Figura 101. STAR 3 RWY 27. Sevilla



## ANEXO II: Comprobación del franqueamiento de obstáculos

### 7.2.1 Llegada RNP de no precisión por la pista 28

#### 7.2.1.1 Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada

En primer lugar, se realiza la comprobación del MOC de 75 m en el tramo de aproximación final y del MOC de 30 m en el tramo de aproximación frustrada intermedia. Para ello, en ambos casos, se sigue un procedimiento que comienza por establecer un conjunto de tres bucles que iteren en el número de fragmentos del mapa, latitud y longitud. De esa manera, se recorrerán todos los puntos del mapa orográfico. A continuación, se establece una condición que para el caso del MOC de 75 m comprueba si el punto se sitúa entre las longitudes del punto FAS<sub>5</sub> y la intersección de la recta que pasa por el MAPt y es perpendicular al eje de la pista. En el caso del MOC de 30 m se cuestiona si el punto se sitúa entre las longitudes del punto anterior y el punto OAS<sub>7</sub>. Después de esto, se calculan los puntos de las rectas que definen los bordes interiores y exteriores de las áreas primarias y secundarias más cercanos en longitud al punto que se está analizando, es decir, los puntos 1, 2, 3 y 4 de la Figura 103. Para ello, se utiliza la función *min* de MATLAB.

El paso siguiente es establecer otra condición para determinar si el punto está situado en el área primaria o secundaria o fuera de ambas. Para ello, se cuestiona si la latitud del punto analizado está entre las latitudes de 1 y 2, de 2 y 3 o de 3 y 4. En el primero y en el tercero de los casos, el punto estaría contenido en el área secundaria. En el segundo caso, se trataría de un punto del área primaria.

En los tres casos, habría que calcular la diferencia entre la altitud del punto analizado y la elevación del área de franqueamiento de obstáculos. En el caso del MOC de 75 m, esa elevación aumenta de forma progresiva desde el punto de contacto con una pendiente de 3°. En el caso del MOC de 30 m, si el punto está situado más cerca del umbral que el SOC, esa elevación es la de la OCH, y si el punto está situado a una distancia del umbral superior al del SOC, la elevación depende de la distancia al SOC y aumenta con una pendiente del 2,5 %.

De cualquier forma, habría que comparar esa diferencia entre la elevación y la altitud con el MOC que es de 75 m o de 30 m, en función del caso y en el área primaria. En el área secundaria, se establece una relación lineal que varía con la latitud. Es decir, el MOC varía desde 75 m o 30 m en 2 y 3, hasta 0 m en 1 y 4.

La comprobación debe asegurar que la diferencia en elevación comentada sea mayor que el MOC en cada caso. De no ser así, el valor de *s* no es válido. Es decir, habría que modificar su valor y volver a iterar.

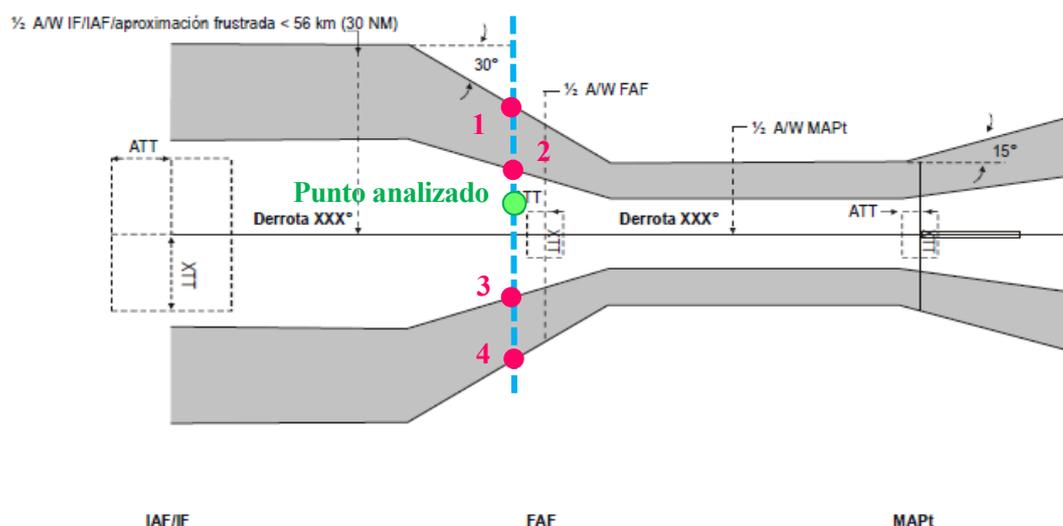


Figura 103. Ejemplo de comprobación del MOC

Otra de las comprobaciones que se realizan está asociada al tramo de aproximación intermedia y consiste en garantizar que el MOC es de 150 m en el área primaria, reduciéndose de forma lineal en el área secundaria. El proceso de comprobación es análogo a los anteriores.

Por tanto, utilizando las áreas correspondientes al tramo mencionado, se desarrollan tres bucles que recorren el mapa orográfico, tal y como se comentó en las comprobaciones anteriores. Posteriormente, se establece una condición que cuestione si el punto está dentro del tramo en longitud. Es decir, hay que determinar que la longitud del punto está entre las de los puntos  $FAS_7$  y  $FAS_4$ . A continuación, se establece otra condición que responde a la pregunta de si el punto analizado tiene la latitud comprendida entre la de los puntos 2 y 3 asociados que, de nuevo, son calculados con el comando *min* de MATLAB. En caso afirmativo, se resta la altitud correspondiente a la elevación del área de franqueamiento, que en este caso es constante en todo el tramo e igual a la del FAF. Esta diferencia debe ser superior a 150 m.

Por otro lado, hay que calcular los puntos 1 y 4 y, de forma análoga a la comentada para los casos anteriores, comprobar si el punto está situado en alguno de los dos fragmentos de área secundaria. En estos fragmentos, se establecen leyes lineales dependientes de las latitudes de los puntos, con las que el MOC evoluciona entre 150 y 0, y que permiten establecer una comprobación entre la diferencia de la elevación del área y la altitud correspondiente, y el MOC calculado, de forma que se determine si el FAF es válido o no.

### 7.2.1.2 Aproximación inicial y llegada

Para comprobar el MOC de 300 m, hay que establecer tres bucles que recorran el terreno (fragmento del mapa, fila y columna de la matriz del terreno). Seguidamente, se establece una primera condición para descartar puntos que están fuera del área de protección. De esa forma, se determina si el punto posee una longitud comprendida entre las longitudes de los puntos  $NAS_1$  y  $FAS_8$  (véase Figura 104). En caso de ser así, se calculan dos rectas que pasan por el punto en cuestión y que son perpendiculares a cada uno de los radiales que definen el viraje.

A continuación, se calculan las intersecciones de las rectas mencionadas con los respectivos radiales, dando lugar a los puntos  $Cent_1$  y  $Cent_2$ . Dependiendo de las longitudes de estos puntos, se está en una situación u otra. De esa manera se tienen los siguientes casos:

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  está entre las longitudes de los puntos  $K_p$  e  $IF$ , el punto pertenece al tramo recto 1 de la trayectoria nominal. En ese caso, se calcularán las intersecciones de la perpendicular al tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, que son las rectas que unen los puntos  $FAS_7$  y  $A_{int}$ , y  $FAS_8$  y el punto D. La metodología a seguir para el cálculo de dichas intersecciones es la empleada en otros casos, cuyo desarrollo estaba basado en la determinación de las coordenadas de dos puntos (1 y 2) en base a los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersectan. Sin embargo, existen varias situaciones en las que 1 y 2 necesitan ser recalculados:
  - Si la latitud de 1 es más pequeña que la de  $A_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{NAS_2K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $D$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{DF}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $F$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{FE}$ .

- Si la longitud del punto  $Cent_2$  está entre las longitudes de los puntos  $A_p$  y  $NASOS$ , el punto pertenece al tramo recto 2 de la trayectoria nominal. De nuevo, se calculan las intersecciones de la perpendicular al segundo tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, tal y como se observa en la Figura 105. La forma de hacerlo es la misma que en el caso anterior y el resultado vuelve a ser la ubicación de los puntos 1 y 2. En principio, se calculan los puntos 1 y 2 como las intersecciones de la perpendicular a la trayectoria con las rectas  $NAS_2K_{int}$  y  $NAS_1K_{ext}$ . Sin embargo, existen varias opciones, en función de la posición del punto analizado, en las que 1 y 2 deben ser recalculados:
  - Si la latitud de 1 es más pequeña que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $K_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{ext}K_{ext}}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $A_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{ext}B}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $B$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{BP_2}$ .
- Si la longitud del punto  $Cent_1$  es superior a la del punto  $K_p$  y la de  $Cent_2$  es inferior a la de  $A_p$ , el punto pertenece al tramo curvo. En principio, se calcula el punto 1 como el resultado de la intersección de la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$  con la perpendicular a la trayectoria nominal. Sin embargo, si la latitud del punto 1 es superior a la del punto  $K_{int}$ , hay que recalcular 1 como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{NAS_2K_{int}}$ .

Por su parte, el punto 2 se calcula como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{K_{ext}A_{ext}}$ . Si la latitud de 2 es inferior a la latitud de  $A_{ext}$ , es necesario recalcular el punto 2 y hay varias opciones:

- Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $A_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{ext}B}$ .
- Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $B$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{BP_2}$ .
- Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $P_2$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la curva generada mediante el *spline*.
- Si la longitud de 2 es más pequeña que la de  $P_1$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{EP_1}$ .

Obsérvese que, en los casos de manejar curvas, las intersecciones vendrán asociadas a rectas que se definen a partir de la discretización de la curva, al igual que se hace con la variable  $\chi_{tan}^{i-1}$ . Las perpendiculares a la curva que describe la trayectoria nominal vienen dadas por las tangentes a la curva en cada punto desfasadas un ángulo de  $90^\circ$ .

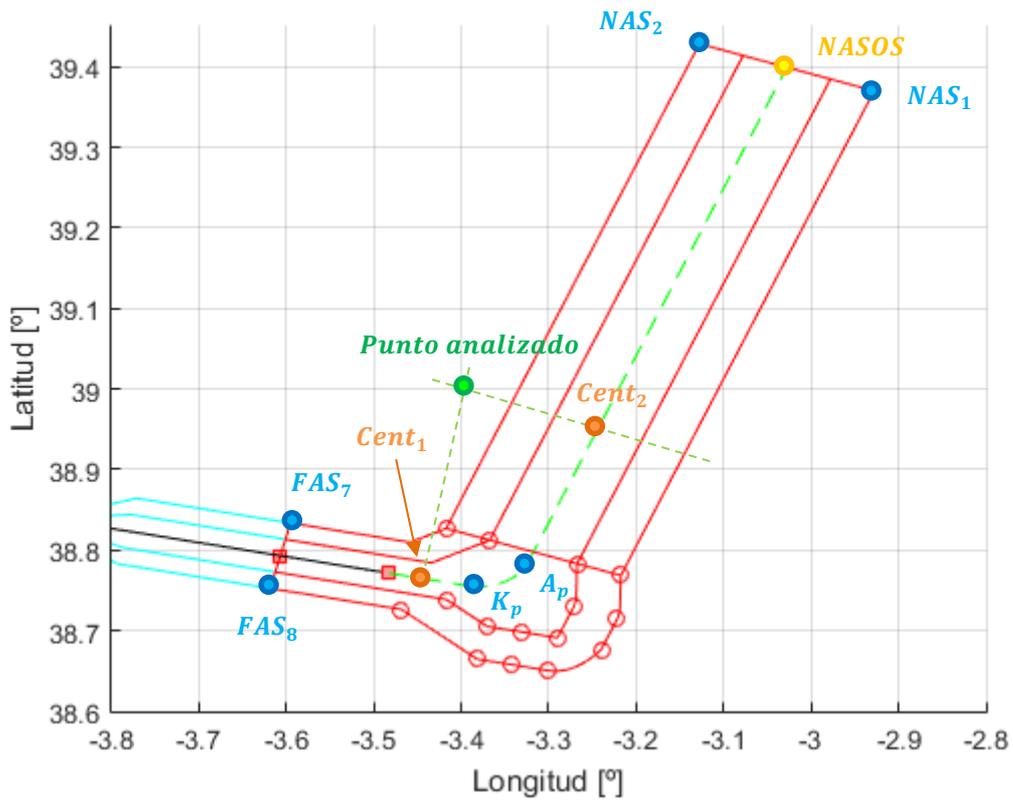


Figura 104. Comprobación del MOC (I). Llegada RNP por la pista 28

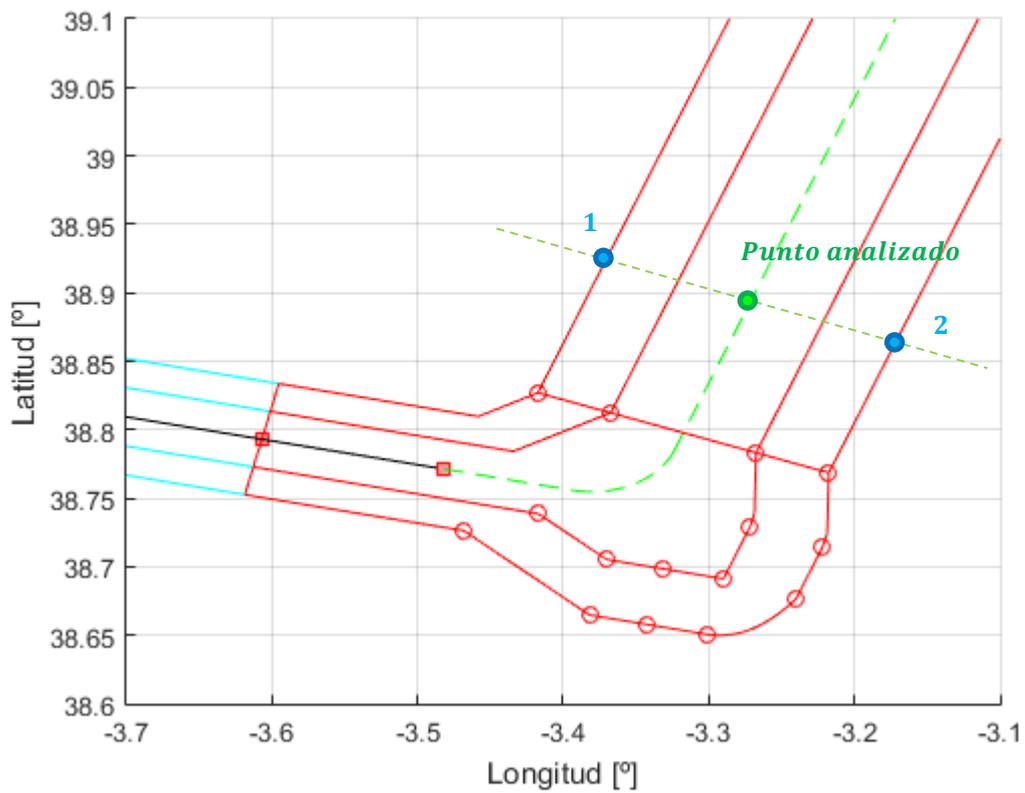


Figura 105. Comprobación del MOC (II). Llegada RNP por la pista 28

En cualquiera de los casos anteriores y una vez que se calculan los puntos 1 y 2, el procedimiento a seguir es simple. Primero, hay que determinar si el punto está contenido en el área de protección, es decir, se comprueba si la latitud y la longitud del punto analizado está entre las de los puntos 1 y 2. En caso de que el punto esté dentro del área, se calcula una elevación. Esta elevación depende del tramo en el que se ubique el punto. De esa forma, se determina la intersección de la perpendicular a la trayectoria que pase por el punto en función del tramo, se calcula la distancia recorrida sobre la trayectoria y, asumiendo que se tiene una pendiente del 6,6% si se está por debajo de  $A_p$ , y una pendiente nula, si se está por encima, se determina la elevación correspondiente al área de protección. A modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas para un punto situado en el tramo recto 1. En el tramo curvo, el proceso es análogo y, en el tramo recto 2, la elevación es siempre la de  $A_p$ . Por último, se resta a la elevación anterior la altitud del punto analizado y se comprueba que ese valor está por encima del MOC.

$$Dist_{pto-IF} = \frac{\phi_{IF} - \phi_{Cent1}}{\cos(\chi_{pista}) Esc\phi}$$

$$Z_{comp} = elev_{IF} + 0,066 \times Dist_{pto-IF}$$

Cabe destacar, que en esta comprobación no se ha hecho distinción alguna entre el área primaria y secundaria. Realmente, habría que determinar la distancia entre los obstáculos y la trayectoria asumiendo que existe una reducción lineal de esta en las áreas secundarias. Sin embargo, si se comprueba que la mínima distancia entre los obstáculos y la trayectoria es superior a un valor determinado (300 m, en este caso), asumiendo que toda el área es primaria, se cumple también la restricción en el área secundaria, ya que esta es menos restrictiva.

### 7.2.1.3 Fase final de la aproximación frustrada

Para comprobar el MOC de 50 m, hay que establecer tres bucles que, de la misma forma que en el caso anterior, recorran el terreno. Seguidamente, se establece una primera condición para descartar puntos que están fuera del área de protección. De esa forma, se determina si el punto posee una longitud comprendida entre las longitudes de los puntos  $1_1$  y  $P_1$  (véase Figura 106). En caso de ser así, se calculan dos rectas que pasan por el punto en cuestión y que son perpendiculares a cada uno de los radiales que definen el viraje.

A continuación, se calculan las intersecciones de las rectas mencionadas con los respectivos radiales, dando lugar a los puntos  $Cent_1$  y  $Cent_2$ . Dependiendo de las longitudes de estos puntos, se está en una situación u otra. De esa manera se tienen los siguientes casos:

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  está entre las longitudes de los puntos  $K_p$  y  $FI$ , el punto pertenece al tramo recto 1 de la trayectoria nominal. En ese caso, se calculan las intersecciones de la perpendicular al tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, que son las rectas que unen los puntos  $FI_1$  y  $OAS_1$ , y  $FI_2$  y  $OAS_2$ . La metodología a seguir para el cálculo de dichas intersecciones es la empleada en los casos anteriores, cuyo desarrollo estaba basado en la determinación de las coordenadas de dos puntos (1 y 2) en base a los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersectan. Sin embargo, existen varias situaciones en las que 1 y 2 necesitan ser recalculados:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $OAS_1$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{OAS_1 K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int} K_{int}}$ .
  - Si la longitud de 2 es más pequeña que la de  $OAS_2$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{OAS_2 K_{ext}}$ .
  - Si la latitud de 2 es más grande que la de  $K_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{ext} A_{ext}}$ .

- Si la longitud del punto  $Cent_2$  está entre las longitudes de los puntos  $A_p$  y  $K_{p2}$ , el punto pertenece al tramo recto 2 de la trayectoria nominal. De nuevo, se calculan las intersecciones de la perpendicular al segundo tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, tal y como se observa en la Figura 107. La forma de hacerlo es la misma que en el caso anterior y el resultado vuelve a ser la ubicación de los puntos 1 y 2. En principio, se calculan los puntos 1 y 2 como las intersecciones de la perpendicular a la trayectoria con las rectas  $A_{int}K_{int}$  y  $FD$ . Sin embargo, existen varias opciones en función de la posición del punto analizado:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $A_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $A_{int}Camb_{1_1}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $Camb_{1_1}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $Camb_1Camb_{1_1}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $Camb_1$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $Camb_11_1$ .
  - Si la latitud de 2 es más grande que la de  $D$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $D1_2$ .
- Si la longitud del punto  $Cent_1$  es inferior a la del punto  $K_p$  y la de  $Cent_2$  es inferior a la de  $A_p$ , el punto pertenece al tramo curvo. En principio, se calcula el punto 1 como el resultado de la intersección de la recta  $A_{int}K_{int}$  con la perpendicular a la trayectoria nominal.

Por su parte, el punto 2 se calcula como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $K_{ext}A_{ext}$ . Si la latitud de 2 es inferior a la latitud de  $A_{ext}$ , es necesario recalcular el punto 2 y hay varias opciones:

- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $A_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $A_{ext}Tan_1^{ext}$ .
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $Tan_1^{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $Tan_1^{ext}P_2$ .
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $P_2$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la circunferencia que une  $P_1$  y  $P_2$ .
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $P_1$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $EP_1$ .
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $E$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con el tramo curvo entre E y F sobre la espiral desplazada.
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $F$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $FD$ .

Obsérvese que, en los casos de manejar curvas, las intersecciones vienen asociadas a rectas que se definen a partir de la discretización de la curva. Las perpendiculares a la curva que describe la trayectoria nominal vienen dadas por las tangentes a la curva en cada punto desfasadas un ángulo de  $90^\circ$ .

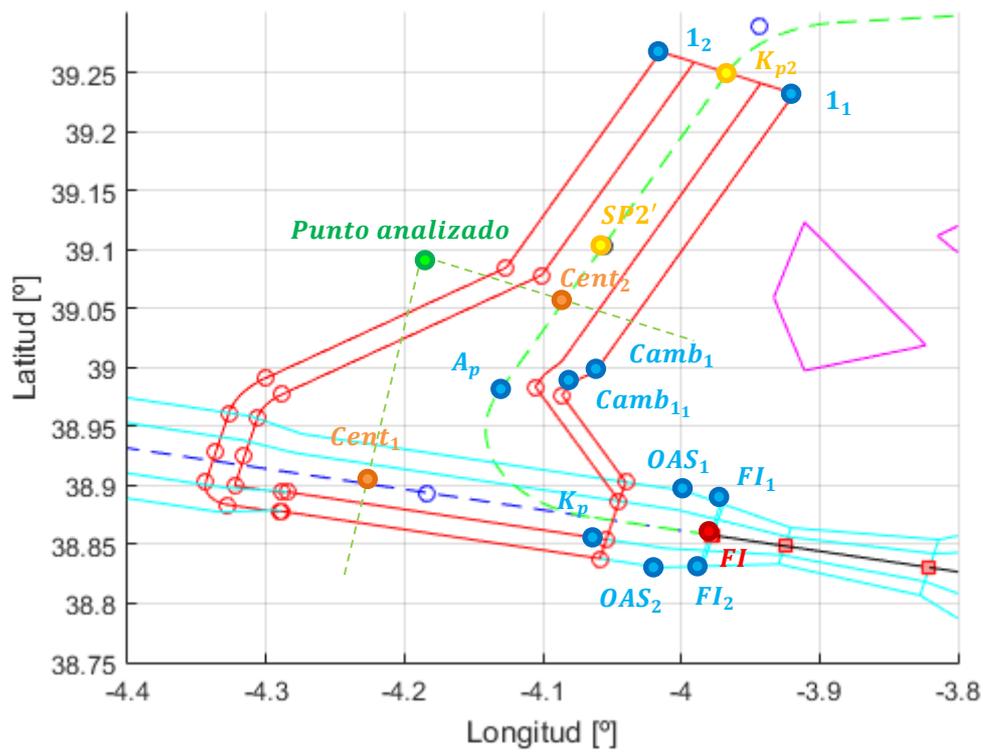


Figura 106. Comprobación del MOC (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28

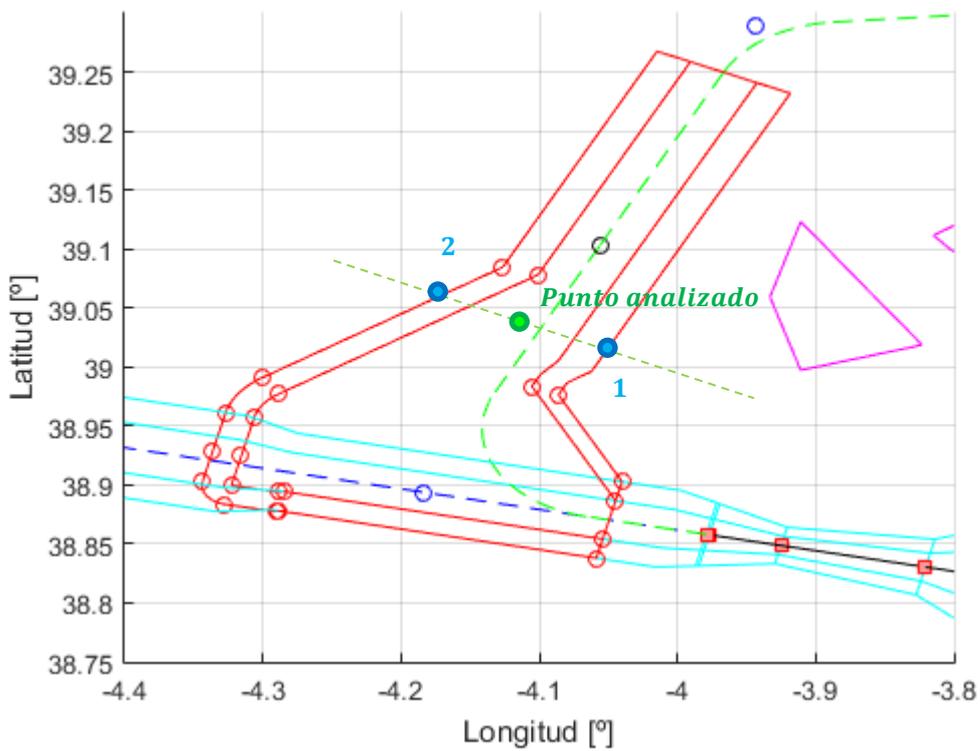


Figura 107. Comprobación del MOC (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 28

En cualquiera de los casos anteriores y una vez que se calculan los puntos 1 y 2, el procedimiento a seguir es análogo al del apartado 7.2.1.2. En caso de que el punto esté dentro del área, se calcula una elevación. De esa forma, se determina la intersección de la perpendicular a la trayectoria que pase por el punto en función del tramo, se calcula la distancia recorrida sobre la trayectoria y, asumiendo que se tiene una pendiente del 2,5% si se está por debajo de  $SP_2'$ , y una pendiente nula, si se está por encima, se determina la elevación correspondiente al área de protección. A modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas para un punto situado en el tramo recto 1. En el resto de los tramos, el proceso es análogo. Por último, se resta a la elevación anterior la altitud del punto analizado y se comprueba que se cumple con la restricción del MOC.

$$Dist_{pto-FI} = \frac{\phi_{Cent1} - \phi_{FI}}{\cos(\chi_{pista}) Esc_{\phi}}$$

$$Z_{comp} = elev_{FI} + 0,025 \times Dist_{pto-FI}$$

Cabe destacar, que en esta comprobación no se ha hecho distinción alguna entre el área primaria y secundaria. Realmente, habría que determinar la distancia entre los obstáculos y la trayectoria asumiendo que existe una reducción lineal de este en las áreas secundarias. Sin embargo, si se comprueba que esa distancia es superior al MOC (50 m, en este caso), asumiendo que toda el área es primaria, se cumple también la restricción en el área secundaria, ya que esta es menos restrictiva.

Por otra parte, en el viraje de la aproximación frustrada, los criterios de franqueamiento de obstáculos presentan ciertas modificaciones. De esa manera, el documento 8168 de OACI establece que en el área de inicio de virajes la elevación de los obstáculos debe ser inferior a la altura de viraje menos 50 m y que en el área de viraje los obstáculos deben ser más bajos de  $TNA/H + d_o \tan Z - MOC$ . En esta última expresión  $Z$  será el 2,5% de la pendiente,  $TNA/H$  es la altura de viraje y  $d_o$  es la distancia medida desde el obstáculo al punto más cercano del límite del área de inicio de viraje. Sin embargo, obsérvese que considerar un MOC de 50 m permite tener en cuenta ambas restricciones, ya que es más limitante de lo que impone la expresión anterior. Por tanto, únicamente es necesario realizar la comprobación del MOC de 50 m.

## 7.2.2 Llegada convencional de precisión por la pista 10

### 7.2.2.1 Aproximación final, intermedia y fases inicial e intermedia de la aproximación frustrada

Comenzando por la comprobación del MOC de 150 m, se vuelven a ejecutar los tres bucles que permiten recorrer el mapa orográfico del terreno en este tramo. A continuación, se introduce una condición para comprobar si la longitud del punto está entre las de los puntos  $D_1''$  y  $IF_2$  y su latitud está entre las latitudes de  $IF_1$  e  $IF_2$  (véase la Figura 108). Los puntos  $IF_1$  e  $IF_2$  son puntos situados sobre las líneas que delimitan el área de franqueamiento de obstáculos. Es decir, están situados a una distancia  $x_{IF}$  desde el umbral y su coordenada y asociada está situada a 9200 m del eje de la pista. Por otra parte, se determinan los puntos  $IF_1'$  e  $IF_2'$ , que están situados a la misma distancia  $x_{IF}$  del umbral y cuya coordenada y está a 4600 m del eje de la pista. Por tanto, estos dos puntos definen el límite del área primaria, mientras que los dos anteriores delimitan el área secundaria.

El siguiente paso, es calcular las coordenadas x e y en metros del punto objeto de análisis. El proceso es idéntico al desarrollado en otros casos. Una vez calculadas estas coordenadas, hay tres opciones:

- Que la coordenada x esté entre  $x_{D_1''}$  y  $x_{C_1''}$ , y la coordenada y esté entre las coordenadas y que se tendrían si el punto (con su coordenada x asociada) perteneciera a los segmentos  $\overline{D_1''C_1''}$  y  $\overline{D_1''IF_1'}$ .
- Que la coordenada x esté entre  $x_{IF}$  y  $x_{C_1''}$ , y la coordenada y esté por debajo de la coordenada y que se tendría si el punto perteneciera al segmento  $\overline{D_1''IF_1'}$ .
- Que la coordenada x esté entre  $x_{IF}$  y  $x_{C_1''}$ , y sea mayor que  $x_{FAP}$ , y no estando en ninguno de los casos anteriores, la coordenada y esté por debajo de la coordenada y que se tendría si el punto perteneciera al segmento  $\overline{FAP_1IF_1'}$ .

En los dos primeros casos, el punto estaría dentro del área primaria. Por tanto, habría que calcular una coordenada  $z$  asociada con la ecuación que se presenta en las líneas siguientes, compararla con la altitud y garantizar que la diferencia entre ambas es al menos 150 m. En caso contrario, habría que modificar  $f$ .

$$z = elev_{10} + (x + 409) \times \tan \frac{3\pi}{180}$$

Por otra parte, en el tercero de los casos, el punto estaría en el área secundaria. En este caso, el valor del MOC se ve modificado. Se genera una relación lineal entre los puntos asociados a la coordenada  $x$  de los segmentos  $\overline{FAP_1IF_1}$  y  $\overline{D''IF_1'}$ . Esta relación será función de la  $y$ , y valdrá 0 en el segmento  $\overline{FAP_1IF_1}$  y 150 en el segmento  $\overline{D''IF_1'}$ . La coordenada  $z$ , en esta situación se calcula de la misma forma que antes y, de nuevo, habría que compararla con la altitud. Sin embargo, esta vez la diferencia debe ser mayor que el valor del MOC correspondiente que se ha calculado con la relación lineal. En caso de no ser así, se tendría que modificar el valor de  $f$ .

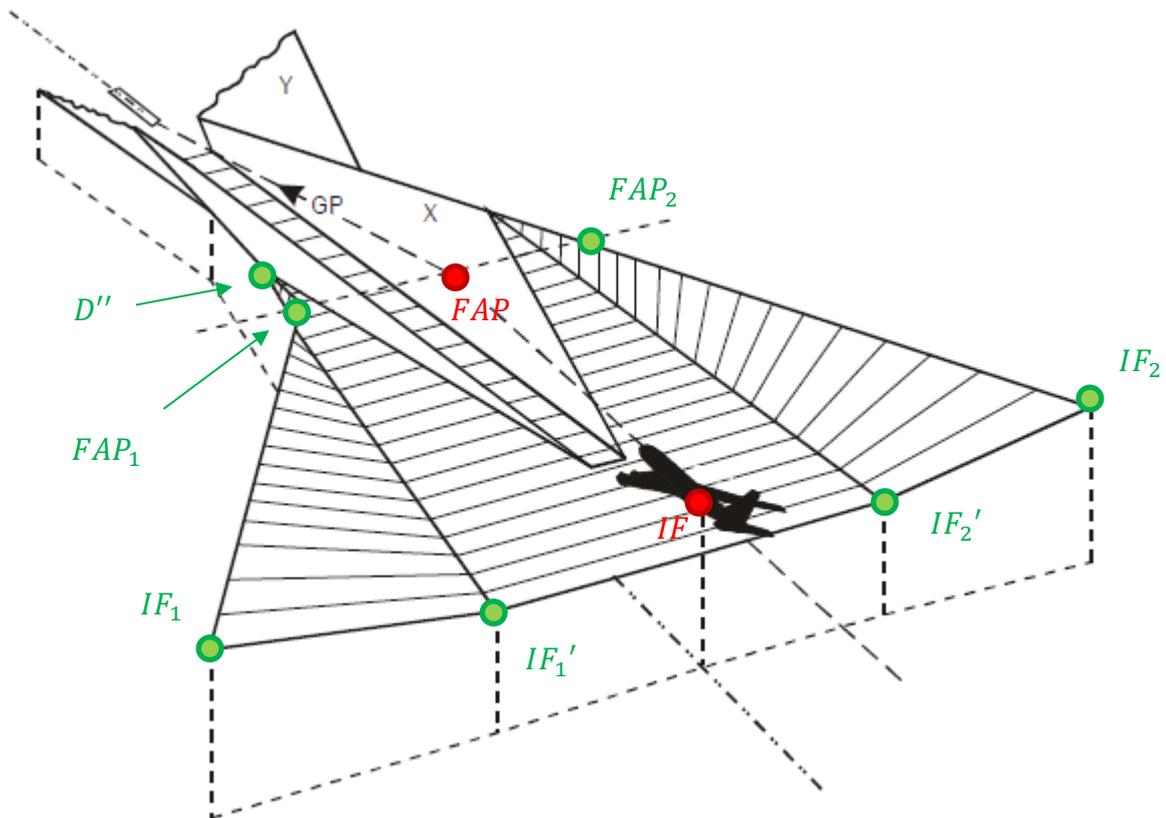


Figura 108. Área de franqueamiento de obstáculos en el tramo de aproximación intermedia

Por último, hay que comprobar que cuando se supera el IF, el MOC es de 300 m. Para ello, hay que iniciar, de nuevo, los bucles para recorrer el mapa orográfico. También, se impone la condición de que la longitud del punto sea más pequeña que la de  $IF_1$  y que su latitud esté entre las latitudes  $39,1^\circ$  y la del punto  $IF_2$ . Esto permite obtener una región lo suficientemente amplia del tramo siguiente.

A continuación, se calculan las coordenadas  $x$  e  $y$  del punto con el mismo procedimiento empleado en todos los casos anteriores. Posteriormente, se verifica que la coordenada  $x$  del punto es superior a  $x_{IF}$ . En ese caso, se calcula la coordenada  $z$  con la expresión que se utilizó en el caso anterior. Esta coordenada se compara con la altitud del punto y se verifica que la diferencia entre ambas es superior a 300 m. En caso contrario, también habría que modificar  $f$ , aumentándolo. De esa manera, se alejaría el FAP del umbral.

En las dos comprobaciones realizadas, la modificación de  $f$  se hace de 1000 m en 1000 m, en principio, y una vez determinado el intervalo donde se situará el FAP, se procede a iterar con un paso de 100 m.

### 7.2.2.2 Aproximación inicial y llegada

Para comprobar el MOC de 300 m, se realizan dos tipos de comprobaciones. Cada una de ellas va asociada a uno de los virajes. A continuación, se define la construcción de ambas.

Para la primera comprobación (primer tipo), hay que establecer tres bucles interiores que recorran el terreno (fragmento del mapa, fila y columna de la matriz del terreno). Seguidamente, se establece una primera condición para descartar puntos que están fuera del área de protección. De esa forma, se determina si el punto posee una longitud comprendida entre las longitudes de los puntos  $IF_1$  y  $-4,6$  (véase Figura 109). En caso de ser así, se calculan dos rectas que pasan por el punto en cuestión y que son perpendiculares a cada uno de los radiales que definen el viraje, es decir, el radial guiado por TLD y el eje de la pista.

A continuación, se calculan las intersecciones de las rectas mencionadas con los respectivos radiales, dando lugar a los puntos  $Cent_1$  y  $Cent_2$ . Dependiendo de las longitudes de estos puntos, se está en una situación u otra. De esa manera se tienen los siguientes casos:

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  está entre las longitudes de los puntos  $K_p$  e  $IF$ , el punto pertenece al tramo recto 1 de la trayectoria nominal. En ese caso, se calculan las intersecciones de la perpendicular al tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, que son las rectas que unen los puntos  $IF_1$  y  $K_{intAux}$ , e  $IF_2$  y el punto P del segundo viraje. La metodología a seguir para el cálculo de dichas intersecciones es la empleada en los casos anteriores, cuyo desarrollo estaba basado en la determinación de las coordenadas de dos puntos (1 y 2) en base a los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersectan. Sin embargo, existen varias situaciones en las que 1 y 2 necesitan ser recalculados:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{intAux}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}K_{int}}$ , siendo  $K_{int}$  el punto K asociado al primer viraje.
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{Camb_{12}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de P del segundo viraje, el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con el tramo curvo del área secundaria del segundo viraje.
- Si la longitud del punto  $Cent_2$  está entre las longitudes de los puntos  $A_p$  y  $K_{p2}$ , el punto pertenece al tramo recto 2 de la trayectoria nominal. De nuevo, se calculan las intersecciones de la perpendicular al segundo tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección. La forma de hacerlo es la misma que en el caso anterior y el resultado vuelve a ser la ubicación de los puntos 1 y 2. En principio, se calcularán los puntos 1 y 2 como las intersecciones de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{IF_1FAP_1'}$  y el tramo curvo del área secundaria del primer viraje. Sin embargo, existen varias situaciones, en función de la posición del punto analizado, en las que 1 y 2 necesitan ser recalculados:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $IF_1$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}IF_1}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{intAux}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}K_{int}}$ , siendo  $K_{int}$  el punto K asociado al primer viraje.
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{Camb_{12}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de P del primer viraje, el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{P_1A_{ext2}}$ .
- Si la longitud del punto  $Cent_1$  es superior a la del punto  $K_p$  y la de  $Cent_2$  es inferior a la de  $A_p$ , el punto pertenece al tramo curvo. En principio, se calcula el punto 1 como el resultado de la intersección de la recta  $\overline{IF_1FAP_1'}$  con la perpendicular a la trayectoria nominal. Sin embargo, si la latitud del punto 1 necesita ser recalculado en las siguientes situaciones:

- Si la latitud de 1 es más grande que la de  $IF_1$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}IF_1}$ .
- Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{intAux}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}K_{int}}$ , siendo  $K_{int}$  el punto K asociado al primer viraje.
- Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{Camb_{1_2}K_{int}}$ .

Por su parte, el punto 2 se calcula como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta que une el punto  $IF_2$  y el punto P del segundo viraje. Si la latitud de 2 es inferior a la latitud de P, será necesario recalculer el punto 2 y habrá varias opciones:

- Si la latitud de 2 es más pequeña que la de P del segundo viraje, el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con el tramo curvo del área secundaria del segundo viraje.
- Si la latitud de 2 es más grande que la de A del segundo viraje, el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{P_1A_{ext2}}$ .
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $P_1$  o punto P del primer viraje, el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con el tramo curvo del área secundaria del primer viraje.

Para la segunda comprobación (segundo tipo), hay que establecer, como en el caso anterior, tres bucles interiores que recorran el terreno. Seguidamente, se establece una primera condición para descartar puntos que están fuera del área de protección. De esa forma, se determina si el punto posee una longitud comprendida entre las longitudes de los puntos  $Camb_{1_2}$  y  $-4,6$  (véase Figura 109). En caso de ser así, se calculan dos rectas que pasan por el punto en cuestión y que son perpendiculares a cada uno de los radiales que definen el viraje, es decir, el radial guiado por TLD y el guiado por VTB.

A continuación, se calculan las intersecciones de las rectas mencionadas con los respectivos radiales, dando lugar a los puntos  $Cent_1$  y  $Cent_2$ . Dependiendo de las longitudes de estos puntos, se está en una situación u otra. De esa manera se tienen los siguientes casos:

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  está entre las longitudes de los puntos  $A_{p2}$  e  $Camb_{1_2}$ , el punto pertenece al tramo recto 2 de la trayectoria nominal. Obsérvese que la recta 1 de este bucle ya se ha tenido en cuenta en el bucle anterior. En ese caso, se calculan las intersecciones de la perpendicular al tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, que son las rectas que unen los puntos  $IF_1$  y  $FAP_1'$ , y  $A_{ext2}$  con  $K_{ext2}$ . La metodología a seguir para el cálculo de dichas intersecciones es la empleada en los casos anteriores, cuyo desarrollo estaba basado en la determinación de las coordenadas de dos puntos (1 y 2) en base a los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersectan. Sin embargo, existen varias situaciones en las que 1 y 2 necesitan ser recalculados:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $IF_1$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}IF_1}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{intAux}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}K_{int}}$ , siendo  $K_{int}$  el punto K asociado al primer viraje.
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{Camb_{1_2}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 2 es más grande que la de  $K_{ext2}$ , a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{Camb_{1_1}K_{ext2}}$ .

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  es superior a la del punto  $K_{p2}$  y la de  $Cent_2$  es inferior a la de  $A_{p2}$ , el punto pertenece al tramo curvo. En principio, se calcula el punto 1 como el resultado de la intersección de la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$  con la perpendicular a la trayectoria nominal. Sin embargo, existen varias situaciones en las que habría que recalcular 1:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $IF_1$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}IF_1}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{intAux}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{K_{intAux}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{Camb_{12}K_{int}}$ .

Por su parte, el punto 2 se calcula como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la curva asociada al primer viraje. Si la latitud de 2 es inferior a la latitud de  $A_{ext2}$ , es necesario recalcular el punto 2 y habrá varias opciones:

- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $A_{ext2}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{ext2}K_{ext2}}$ .
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $K_{ext2}$ , a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{Camb_{11}K_{ext2}}$ .

Obsérvese que, en los casos de manejar curvas, tanto en el primer bucle, como en el segundo, las intersecciones vienen asociadas a rectas que se definen a partir de la discretización de la curva, al igual que se hace con la variable  $\chi_{tan}^{i-1}$ . Las perpendiculares a la curva que describe la trayectoria nominal vienen dadas por las tangentes a la curva en cada punto desfasadas un ángulo de  $90^\circ$ .

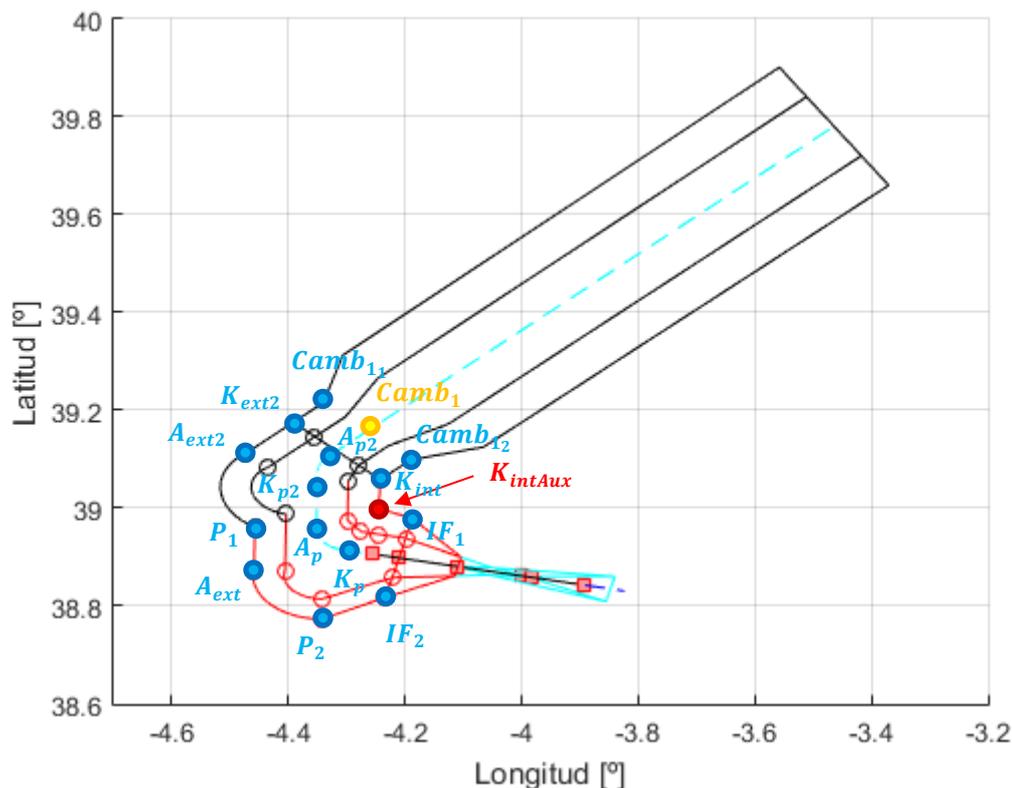


Figura 109. Comprobación del MOC (I). Llegada convencional por la pista 10

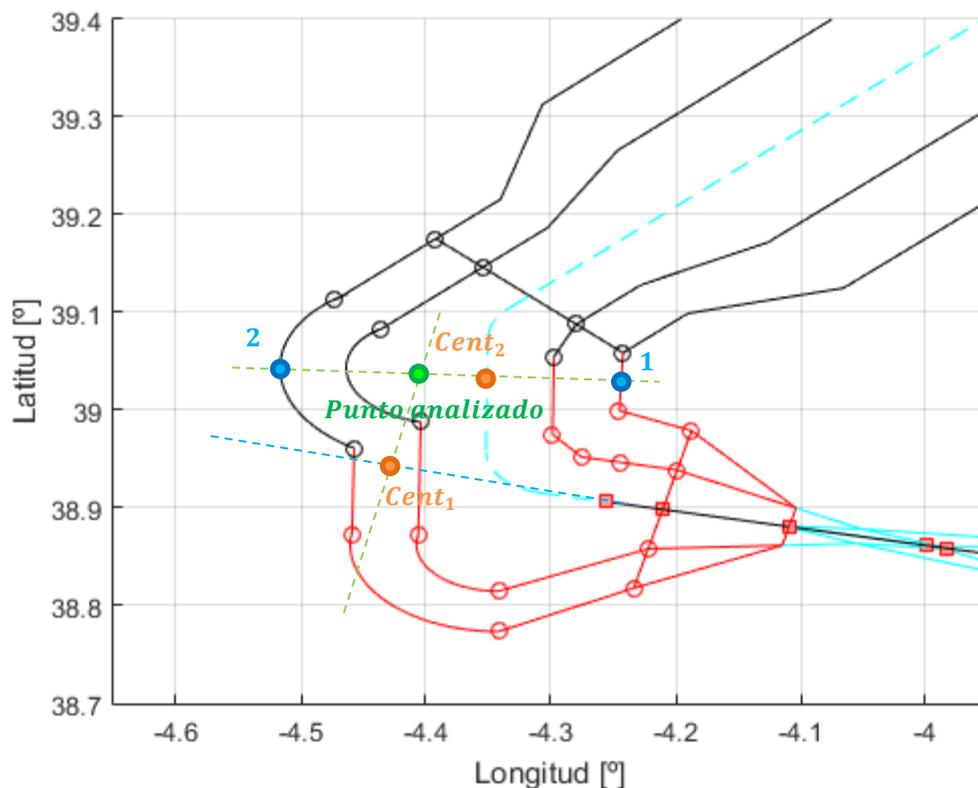


Figura 110. Comprobación del MOC (II). Llegada convencional por la pista 10

Obsérvese que en la Figura 110, las rectas representadas en verde serían las perpendiculares a cada tramo de la trayectoria que pasan por el punto analizado. Sin embargo, no parecen ser perpendiculares. Esto es un efecto de los factores de escala existentes. De ahí que los ángulos estén algo distorsionados.

En cualquiera de los casos anteriores y una vez que se calculan los puntos 1 y 2, el procedimiento a seguir consiste en determinar si el punto está contenido en el área de protección, es decir, comprobar si la latitud y la longitud del punto analizado está entre las de los puntos 1 y 2. En caso de que el punto esté dentro del área, se calcula una elevación. De esa forma, se determina la intersección de la perpendicular a la trayectoria que pasa por el punto en función del tramo, se calcula la distancia recorrida sobre la trayectoria y, asumiendo que se tiene una pendiente del 5,8% si se está por debajo de  $A_{p2}$ , y una pendiente del 1,5%, si se está por encima, se determina la elevación correspondiente al área de protección. A modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas para un punto situado en el tramo recto 1. En el resto de los tramos, el proceso es análogo. Por último, se resta a la elevación anterior la altitud del punto analizado y se comprueba la restricción del MOC.

$$Dist_{pto-IF} = \left| \frac{\phi_{IF} - \phi_{Cent1}}{\cos(\chi_{Pista}) Esc_{\phi}} \right|$$

$$Z_{comp} = elev_{IF} + 0,058 \times Dist_{pto-IF}$$

Cabe destacar, que en esta comprobación no se ha hecho distinción alguna entre el área primaria y secundaria, ya que si se comprueba que la distancia entre los obstáculos y la trayectoria es superior a un MOC determinado (300 m, en este caso), asumiendo que toda el área es primaria, se cumple también la restricción en el área secundaria, ya que esta es menos restrictiva.

### 7.2.2.3 Fase final de aproximación frustrada

Para comprobar el MOC de 50 m, hay que establecer tres bucles que, de la misma forma que en el caso anterior, recorran el terreno. Seguidamente, se establece una primera condición para descartar puntos que están fuera del área de protección. De esa forma, se determina si el punto posee una longitud comprendida entre las longitudes de los puntos  $AFI_1$  y  $BLN_3$  (véase Figura 111). En caso de ser así, se calculan dos rectas que pasan por el punto en cuestión y que son perpendiculares a cada uno de los radiales que definen el viraje.

A continuación, se calculan las intersecciones de las rectas mencionadas con los respectivos radiales, dando lugar a los puntos  $Cent_1$  y  $Cent_2$ . Dependiendo de las longitudes de estos puntos, se está en una situación u otra. De esa manera se tienen los siguientes casos:

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  está entre las longitudes de los puntos  $K_p$  y  $AFI$ , el punto pertenece al tramo recto 1 de la trayectoria nominal. En ese caso, se calculan las intersecciones de la perpendicular al tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, que son las rectas que unen los puntos  $AFI_1$  y  $K_{int}$ , y  $AFI_2$  y  $K_{ext}$ . La metodología a seguir para el cálculo de dichas intersecciones es la empleada en los casos anteriores, cuyo desarrollo estaba basado en la determinación de las coordenadas de dos puntos (1 y 2) en base a los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersectan. Sin embargo, existen varias situaciones en las que 1 y 2 necesitan ser recalculados (véase la Figura 112):
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $A_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}BLN_4}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $BLN_4$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{BLN_3BLN_4}$ .
  - Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $K_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{ext}K_{ext}}$ .
- Si la longitud del punto  $Cent_2$  está entre las longitudes de los puntos  $A_p$  y  $K_{p2}$ , el punto pertenece al tramo recto 2 de la trayectoria nominal. De nuevo, se calculan las intersecciones de la perpendicular al segundo tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección. La forma de hacerlo es la misma que en el caso anterior y el resultado vuelve a ser la ubicación de los puntos 1 y 2. En principio, se calculan los puntos 1 y 2 como las intersecciones de la perpendicular a la trayectoria con las rectas  $\overline{AFI_2K_{int}}$  y  $\overline{PF}$ . Sin embargo, existen varias opciones en función de la posición del punto analizado:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $A_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}BLN_4}$ .
  - Si la latitud de 2 es más grande que la de  $F$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{FBLN_3}$ .
- Si la longitud del punto  $Cent_1$  es superior a la del punto  $K_p$  y la de  $Cent_2$  es inferior a la de  $A_p$ , el punto pertenece al tramo curvo. En principio, se calcula el punto 1 como el resultado de la intersección de la recta  $\overline{AFI_2K_{int}}$  con la perpendicular a la trayectoria nominal. Sin embargo, existen situaciones en las que debe ser recalculado:
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $K_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $A_{int}$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{int}BLN_4}$ .
  - Si la latitud de 1 es más grande que la de  $BLN_4$ , el punto 1 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{BLN_3BLN_4}$ .

Por su parte, el punto 2 se calcula como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{AFI_1K_{ext}}$ . Si la latitud de 2 es inferior a la latitud de  $K_{ext}$ , es necesario recalculer el punto 2 y hay varias opciones:

- Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $K_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{A_{ext}K_{ext}}$ .
- Si la latitud de 2 es más pequeña que la de  $A_{ext}$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la espiral definida anteriormente.
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $P$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{PF}$ .
- Si la latitud de 2 es más grande que la de  $F$ , el punto 2 se calcula a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con la recta  $\overline{FBLN_4}$ .

Obsérvese que, en los casos de manejar curvas, las intersecciones vienen asociadas a rectas que se definen a partir de la discretización de la curva, como en apartados anteriores. Las perpendiculares a la curva que describe la trayectoria nominal vienen dadas por las tangentes a la curva en cada punto desfasadas un ángulo de  $90^\circ$ .

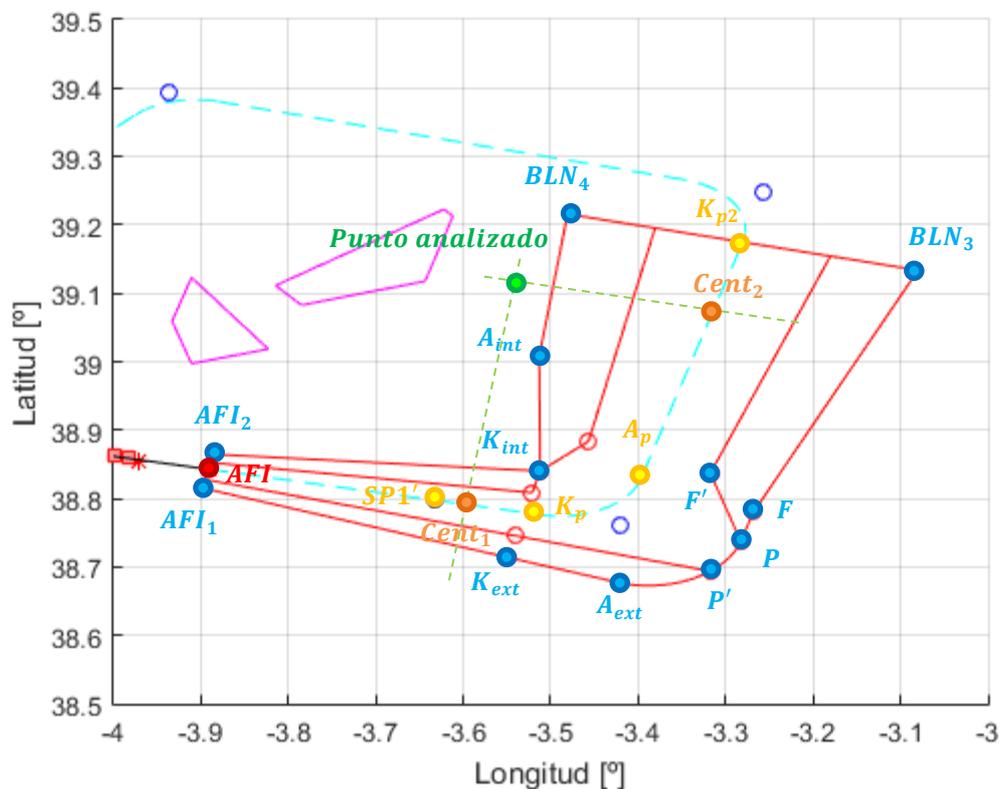


Figura 111. Comprobación del MOC (I). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10

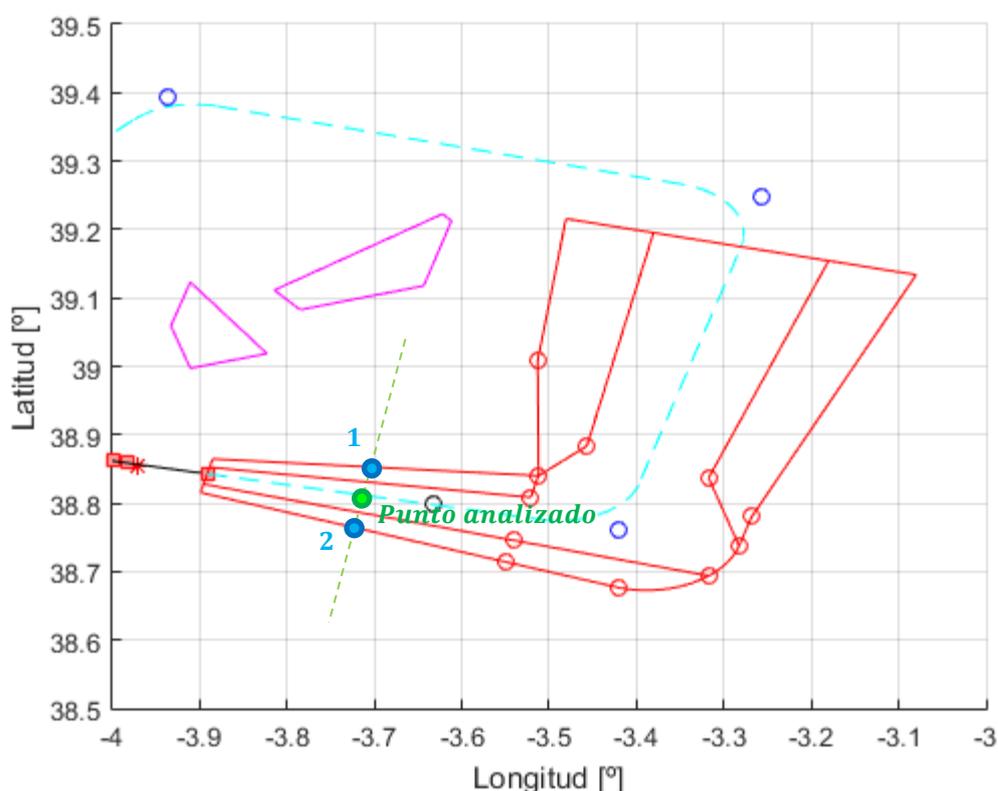


Figura 112. Comprobación del MOC (II). Aproximación frustrada de la llegada por la pista 10

En cualquiera de los casos anteriores y una vez que se calculan los puntos 1 y 2, el procedimiento a seguir es análogo al desarrollado en los apartados anteriores. En caso de que el punto esté dentro del área, se calcula una elevación. De esa forma, se determina la intersección de la perpendicular a la trayectoria que pase por el punto en función del tramo, se calcula la distancia recorrida sobre la trayectoria y, asumiendo que se tiene una pendiente del 2,5% si se está por debajo de  $SP_1'$ , y una pendiente nula, si se está por encima, se determina la elevación correspondiente al área de protección. A modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas para un punto situado en el tramo recto 1 antes del punto  $SP_1'$ . En el resto de los tramos, la elevación siempre es la del IAF. Por último, se resta a la elevación anterior la altitud del punto analizado y se comprueba la restricción del MOC.

$$Dist_{pto-AFI} = \frac{\phi_{AFI} - \phi_{Cent1}}{\cos(\chi_{Pista}) ESC_{\phi}}$$

$$Z_{comp} = elev_{AFI} + 0,025 \times Dist_{pto-AFI}$$

Cabe destacar, que en esta comprobación no se ha hecho distinción alguna entre el área primaria y secundaria, como en el resto de los apartados. Sin embargo, si se comprueba que la distancia entre los obstáculos y la trayectoria es superior a un valor del MOC determinado (50 m, en este caso), asumiendo que toda el área es primaria, se cumple también la restricción en el área secundaria, ya que esta es menos restrictiva.

Por otra parte, como ocurría en la pista 28, en el viraje de la aproximación frustrada, los criterios de franqueamiento de obstáculos presentan ciertas modificaciones. De esa manera, el documento 8168 de OACI establece que en el área de inicio de virajes la elevación de los obstáculos debe ser inferior a la altura de viraje menos 50 m y que, en el área de viraje, los obstáculos deben ser más bajos de  $TNA/H + d_o \tan Z - MOC$ . En esta última expresión  $Z$  será el 2,5% de la pendiente,  $TNA/H$  es la altura de viraje y  $d_o$  es la distancia medida desde el obstáculo al punto más cercano del límite del área de inicio de viraje. Sin embargo, obsérvese que considerar un MOC de 50 m permite tener en cuenta ambas restricciones, ya que es más limitante de lo que impone la expresión anterior. Por tanto, únicamente será necesario comprobar que la mínima distancia entre los obstáculos y la trayectoria es 50 m.

## 7.2.3 Salida convencional por la pista 10

### 7.2.3.1 Definición de la PDG

Una vez definida la OIS en el apartado 4.1.1.2, es necesario comprobar si hay obstáculos que penetren en ella. Para ello se establecen tres bucles que permiten iterar en latitud, longitud y número de fragmento del terreno. De esa forma, se pretende recorrer todos los puntos del terreno comprobando si están o no dentro de la OIS y, en caso afirmativo, verificando que la altitud del punto está por debajo de la del punto correspondiente de la OIS, cuya elevación es resultado de la pendiente del 2,5% comentada.

Para cada punto del terreno, se establece una condición que determina si la longitud del punto está entre las longitudes de los puntos  $VOR_3$  y  $OIS_2$ . En caso de ser así, se calcula la coordenada  $x$  del punto. Esta coordenada  $x$  pertenece al sistema de referencia que tiene su origen en el umbral, cuyo eje  $x$  contiene al eje de la pista y es negativo pasado el umbral en el sentido de aterrizaje, y cuyo eje  $y$  es perpendicular al mismo. El modo de obtenerla ya se explicó cuando se habló del proceso de diseño en el apartado 3.2.1. De nuevo, hay que tener un especial cuidado con los signos en función del cuadrante donde esté situado el punto.

A continuación, se determina en qué región del bucle se halla el punto en función de su coordenada  $x$  y, en base a esto, se establecen los límites correspondientes en latitud. Es decir, existen tres posibilidades:

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre 1060 y la coordenada  $x$  del punto  $Inf_{Sec}$ , la coordenada  $y$  está delimitada por las coordenadas  $y_1$  y  $y_2$ . Estas coordenadas se calculan a partir de la coordenada  $x$  del punto y de los parámetros  $m$  y  $n$  correspondientes a las rectas que delimiten la región. En este primer caso, las expresiones empleadas son las siguientes.

$$y_1 = m_{15-Sup} \times x + n_{15-Sup}$$

$$y_2 = m_{15-Inf} \times x + n_{15-Inf}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $Inf_{Sec}$  y la coordenada  $x$  del punto  $Sup_{Sec}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{15-Sup} \times x + n_{15-Sup}$$

$$y_2 = m_{VOR-Inf} \times x + n_{VOR-Inf}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $Sup_{Sec}$  y la coordenada  $x$  del punto  $Fin_{OIS1}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{VOR-Sup} \times x + n_{VOR-Sup}$$

$$y_2 = m_{VOR-Inf} \times x + n_{VOR-Inf}$$

En cualquiera de los casos anteriores, es necesario calcular la latitud del punto que esté situado a la misma distancia del umbral que el punto analizado y sobre el eje de la pista (Cent). Esta latitud permite obtener las latitudes de los puntos 1 y 2 que son los puntos de intersección de la perpendicular al eje de la pista que pasa por el punto analizado con las rectas correspondientes de la OIS. La Figura 113 puede servir de apoyo a la explicación realizada.

$$\phi_{cent} = \phi_{28} - \cos(\chi_{Pista}) \times x \times Esc_{\phi}$$

$$\phi_1 = \phi_{cent} + \cos \beta \times y_1 \times Esc_{\phi}$$

$$\phi_2 = \phi_{cent} + \cos \beta \times y_2 \times Esc_{\phi}$$

Obsérvese que en esta comprobación solo se consideran los bordes exteriores de las áreas de protección, ya que lo que se está buscando son aquellos puntos del terreno que superen en altura a la OIS, pero hasta ahora no se habla de MOC.

Por último, si la coordenada  $x$  del punto analizado está entre 1060 y la coordenada  $x$  del punto  $Fin_{OIS1}$ , y la latitud del punto está entre las latitudes del punto 1 y 2, el punto está dentro de la OIS y, por tanto, es necesario comprobar su altitud. De esa manera, definiendo la elevación de la proyección del punto sobre la OIS con las expresiones siguientes, si la altitud está por encima de esa elevación, el punto penetra en la superficie. En ese caso, se almacena una pendiente que está calculada como el cociente de la diferencia entre la altitud y la elevación mencionada, y una distancia que viene definida como aquella que se recorre sobre la trayectoria nominal hasta llegar a la proyección del punto en cuestión sobre la OIS.

Como se puede deducir de las expresiones siguientes, a la hora de calcular la elevación hay que tener en cuenta la ligera corrección de la trayectoria que ha de realizarse para poder hacer uso de la guía de derrota (véase la Figura 114). En ese sentido y puesto que la elevación ha de medirse en base a la trayectoria nominal seguida por la aeronave, se tienen dos opciones:

- Que el punto tenga una coordenada  $x$  que no supere a la coordenada  $x$  del punto de cambio de trayectoria. En ese caso, la elevación vendría definida como:

$$z_{OIS} = elev_{DER28} + 5 + (x - 1060) \times 0,025$$

- Que el punto tenga una coordenada  $x$  que sí supere a la coordenada  $x$  del punto de cambio de trayectoria. En ese otro caso, la elevación vendría dada por:

$$z_{OIS} = elev_{camb_{Tray}} + (x - hip_{SV} - 1060) / \cos(\gamma'_1) \times \cos(\gamma'_2) \times 0,025$$

Las variables empleadas en la expresión anterior vienen recogidas en la Figura 114. De esa manera, la elevación de un punto cuya coordenada  $x$  supere a la coordenada  $x$  del punto donde la trayectoria cambia, podría calcularse a partir de la elevación del punto de cambio de trayectoria, sumando a esa elevación un incremento obtenido de recorrer una cierta distancia sobre la trayectoria nominal con la pendiente de ascenso al 2,5%. Sin embargo, es necesario comentar que, puesto que la coordenada  $x$  está definida sobre el eje de la pista, hay que realizar la correspondiente proyección de la misma sobre la derrota de salida que implica la radioayuda.

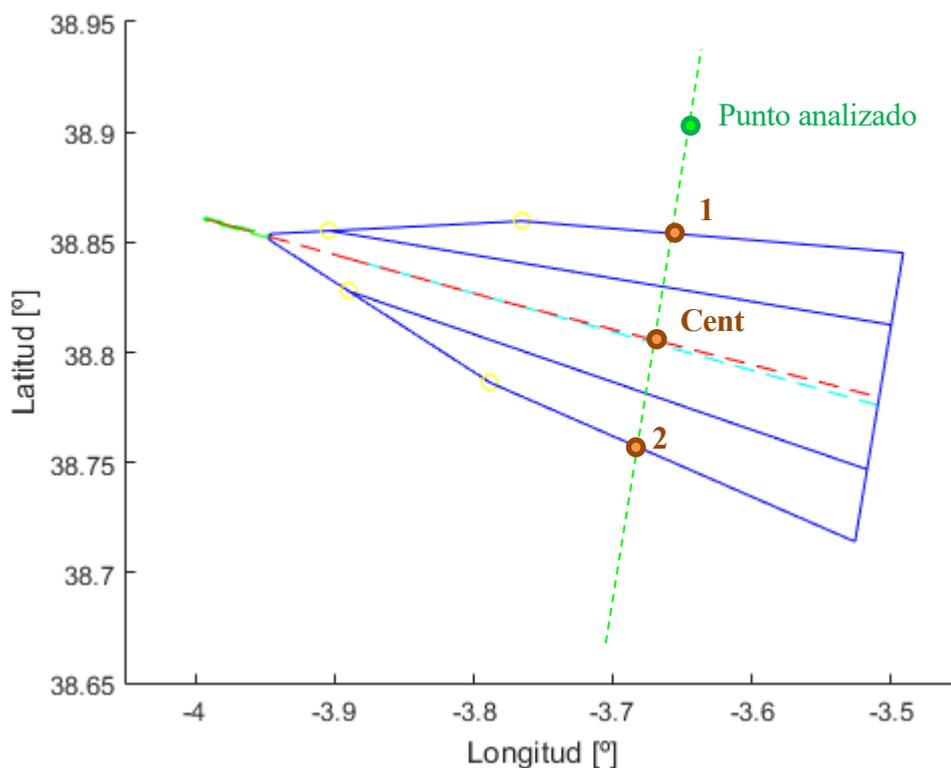


Figura 113. Comprobación de obstáculos en la OIS. Pista 10

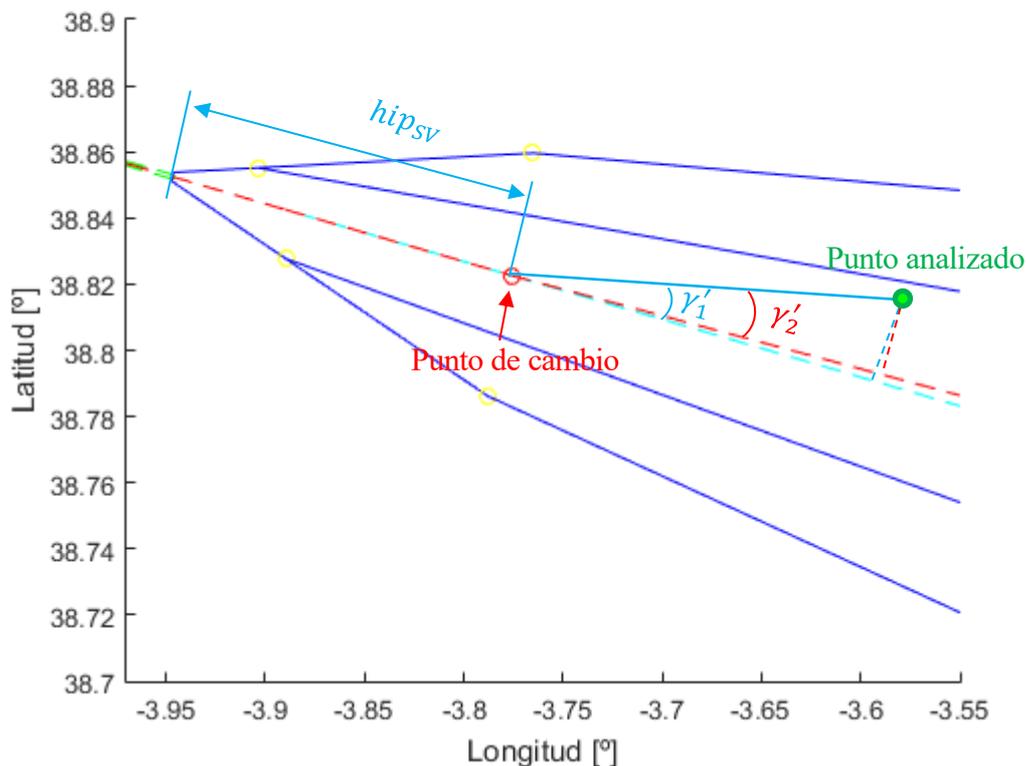


Figura 114. Cálculo de la elevación (I). Pista 10

### 7.2.3.2 Determinación del punto de viraje

Una vez supuesta la ubicación del punto, tal y como se explicó en el apartado 4.1.1.3, se procede a realizar la comprobación del MOC de 90 m. Para ello, se comienza un bucle idéntico al del caso anterior que recorra los puntos del terreno y calcule las coordenadas  $x$  en caso de ser necesario. También se hace de forma similar el cálculo de las variables  $\phi_1$  y  $\phi_2$ . Sin embargo, al contrario de lo que ocurría en el caso anterior, el hecho de que el punto pertenezca al área primaria o secundaria cobra una especial relevancia. De esa forma, las opciones a analizar si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto a partir del cual están permitidos los virajes y la coordenada  $x$  del punto donde termina la OIS, son las siguientes:

- Si la coordenada  $x$  del punto está por debajo la coordenada  $x$  del punto  $\text{Sup}_{\text{Prim}}$ , la coordenada  $y$  está delimitada por las coordenadas  $y_1$  e  $y_2$ . Estas coordenadas se calculan a partir de la coordenada  $x$  del punto y de los parámetros  $m$  y  $n$  correspondientes a las rectas que delimiten la región. En este primer caso, las expresiones empleadas son las siguientes.

$$y_1 = m_{15-\text{Sup}} \times x + n_{15-\text{Sup}}$$

$$y_2 = m_{15-\text{Inf}} \times x + n_{15-\text{Inf}}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $\text{Sup}_{\text{Prim}}$  y la coordenada  $x$  del punto  $\text{Inf}_{\text{Prim}}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{15-\text{Sup}} \times x + n_{15-\text{Sup}}$$

$$y_2 = m_{15-\text{Inf}} \times x + n_{15-\text{Inf}}$$

$$y_{1'} = m_{\text{VOR-SupPrim}} \times x + n_{\text{VOR-SupPrim}}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $\text{Inf}_{\text{prim}}$  y la coordenada  $x$  del punto  $\text{Inf}_{\text{sec}}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{15\text{-Sup}} \times x + n_{15\text{-Sup}}$$

$$y_2 = m_{15\text{-Inf}} \times x + n_{15\text{-Inf}}$$

$$y_{2'} = m_{\text{VOR-InfPrim}} \times x + n_{\text{VOR-InfPrim}}$$

$$y_{1'} = m_{\text{VOR-SupPrim}} \times x + n_{\text{VOR-SupPrim}}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $\text{Inf}_{\text{sec}}$  y la coordenada  $x$  del punto  $\text{Sup}_{\text{sec}}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{15\text{-Sup}} \times x + n_{15\text{-Sup}}$$

$$y_2 = m_{\text{VOR-Inf}} \times x + n_{\text{VOR-Inf}}$$

$$y_{2'} = m_{\text{VOR-InfPrim}} \times x + n_{\text{VOR-InfPrim}}$$

$$y_{1'} = m_{\text{VOR-SupPrim}} \times x + n_{\text{VOR-SupPrim}}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $\text{Sup}_{\text{sec}}$  y la coordenada  $x$  del punto  $\text{Fin}_{\text{OIS1}}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{\text{VOR-Sup}} \times x + n_{\text{VOR-Sup}}$$

$$y_2 = m_{\text{VOR-Inf}} \times x + n_{\text{VOR-Inf}}$$

$$y_{2'} = m_{\text{VOR-InfPrim}} \times x + n_{\text{VOR-InfPrim}}$$

$$y_{1'} = m_{\text{VOR-SupPrim}} \times x + n_{\text{VOR-SupPrim}}$$

En cada caso, hay que calcular las variables  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_{1'}$  y  $\phi_{2'}$ , según corresponda, con las expresiones que ya se utilizaron en las comprobaciones anteriores a partir de la variable  $\phi_{\text{cent}}$ . Estas variables permiten establecer los límites en latitud para el punto objeto de análisis. De esa manera, por comparación de latitudes, se determina si el punto está en el área primaria, secundaria o en ninguna de las dos. Si el punto está en el área primaria, hay que restar la variable  $z_{\text{OIS}}$  de las comprobaciones anteriores con la altitud del punto analizado y observar que la diferencia es mayor que 90 m. En caso de que el punto esté en alguna de las áreas secundarias, se genera una variable llamada MOC que es el resultado de establecer una relación lineal entre los extremos del área secundaria, siendo esta variable 90 en el borde interior que conecta con el área primaria y 0 en el exterior. A modo de ejemplo, se incluye la expresión empleada para aquellos casos en los que el punto esté en el área secundaria superior, es decir, su latitud venga delimitada por las de los puntos 1 y 1' de la Figura 115.

$$MOC = 90 - \frac{90}{\phi_1 - \phi_{1'}} \times (\phi_{\text{pto}} - \phi_{1'})$$

Por tanto, la comprobación consistiría en restar la variable  $z_{\text{OIS}}$  de las comprobaciones anteriores con la altitud del punto analizado y observar que la diferencia es mayor que el valor de la variable MOC. Bien es cierto que es necesario comentar que la variable  $z_{\text{OIS}}$  presenta una ligera variación con respecto a la empleada en las comprobaciones anteriores, ya que, en este caso, está calculada con los valores de las pendientes de la Tabla 28, que son superiores a los valores que se empleaban en las otras comprobaciones en un 0,8 %.

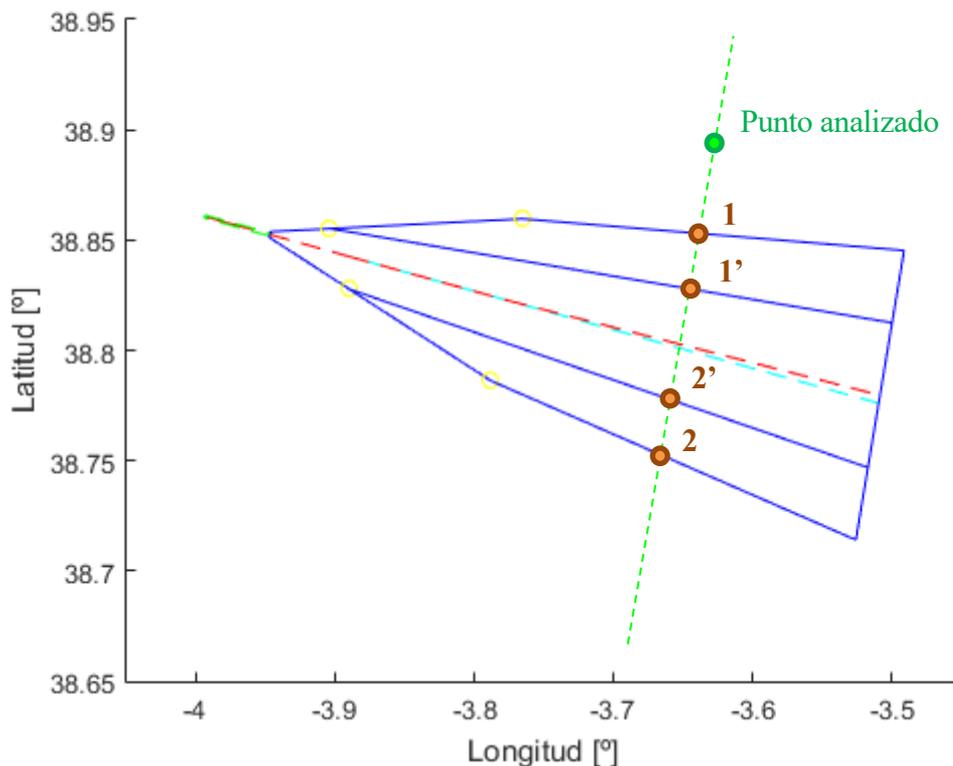


Figura 115. Determinación del punto a partir del cual se pueden realizar virajes. Pista 10

### 7.2.3.3 Tramo con viraje

Para comprobar el MOC, hay que establecer tres bucles que, de la misma forma que en el apartado anterior, recorran el terreno. Seguidamente, se establece una primera condición para descartar puntos que están fuera del área de protección. De esa manera, se determina si el punto posee una longitud comprendida entre las longitudes de los puntos  $CJN_3$  y  $VOR_4$  de la Figura 116. En caso de ser así, se calculan dos rectas que pasan por el punto en cuestión y que son perpendiculares a cada uno de los radiales que definen el viraje.

A continuación, se calculan las intersecciones de las rectas mencionadas con los respectivos radiales, dando lugar a los puntos  $Cent_1$  y  $Cent_2$ . Dependiendo de las longitudes de estos puntos, se está en una situación u otra. De esa forma, se tienen los siguientes casos:

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  está entre las longitudes de los puntos  $K_p$  y  $Fin_{VOR}$ , el punto pertenece al primer tramo recto de la trayectoria nominal. En ese caso, se calculan las intersecciones de la perpendicular al primer tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, que son las rectas que unen los puntos K del borde interior y exterior con los puntos que están a la altura de  $Fin_{VOR}$ . La metodología a seguir para el cálculo de dichas intersecciones será la empleada en los casos anteriores, cuyo desarrollo estaba basado en la determinación de las coordenadas de dos puntos (1 y 2) en base a los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersectan.
- Si la longitud del punto  $Cent_2$  está entre las longitudes de los puntos  $A_p$  y  $CJN$ , el punto pertenece al segundo tramo recto de la trayectoria nominal. De nuevo, se calculan las intersecciones de la perpendicular al segundo tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, tal y como se observa en la Figura 117. La forma de hacerlo es la misma que en el caso anterior y el resultado vuelve a ser la ubicación de los puntos 1 y 2. Sin embargo, existen varias opciones en función de la posición del punto analizado:

- Si la longitud de  $Cent_2$  es más pequeña que la del punto donde se tiene una semianchura de protección de 14800 m ( $BLN_{cent}$ ), el punto está situado en la franja en la que existe un ensanchamiento del área de  $7,8^\circ$ . Por tanto, los puntos 1 y 2 se calculan a partir de la intersección de la perpendicular a la trayectoria nominal con las rectas  $\overline{A_{int}BLN_2}$  y  $\overline{FBLN_3}$ , tal y como muestra la Figura 117.
- Si la longitud de  $Cent_2$  es más grande que la del punto donde se tiene una semianchura de protección de 14800 m ( $BLN_{cent}$ ), el punto está situado en la franja en la que la anchura del área es constante. Por ello, las intersecciones, en este caso, vienen dadas por la perpendicular a la trayectoria nominal y las rectas  $\overline{BLN_2CJN_2}$  y  $\overline{BLN_3CJN_3}$
- Si la longitud del punto  $Cent_1$  es superior a la del punto  $K_p$  y la de  $Cent_2$  es inferior a la de  $A_p$ , el punto pertenece al tramo curvo. En principio, se calcula el punto 1 como el resultado de la intersección de la recta  $\overline{A_{int}BLN_2}$  con la perpendicular a la trayectoria nominal. Sin embargo, si la latitud del punto 1 es inferior a la del punto  $A_{int}$ , hay que recalcularlo como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{K_{int}A_{int}}$ .

Por su parte, el punto 2 se calcula como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{K_{ext}A_{ext}}$ . Si la latitud de 2 es inferior a la latitud de  $A_{ext}$ , es necesario recalcularlo y hay dos opciones:

- Si la latitud de 2 es inferior a la latitud del punto que marca el final de la curva exterior (P), el punto 2 se recalcularía como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la tangente correspondiente a la curva exterior.
- Si la latitud no es inferior a la latitud del punto que marca el final de la curva exterior (P), el punto 2 se recalcularía como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{PBLN_3}$ .

Obsérvese que, en los casos de manejar curvas, las intersecciones vienen asociadas a rectas que se definen a partir de la discretización de la curva, como en el resto de los apartados.

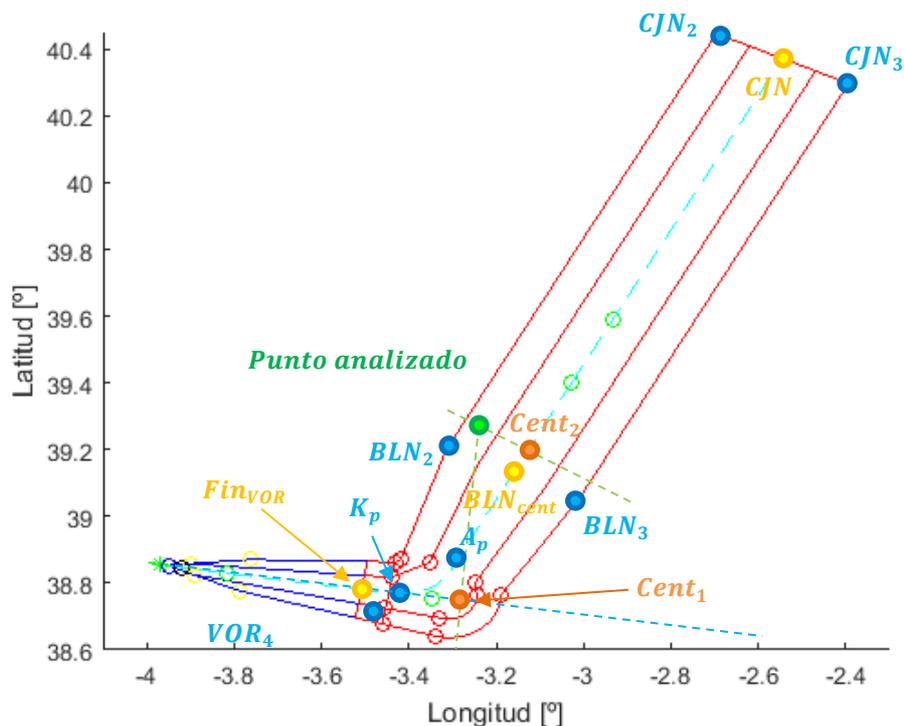


Figura 116. Comprobación del MOC (I). Salida por la pista 10

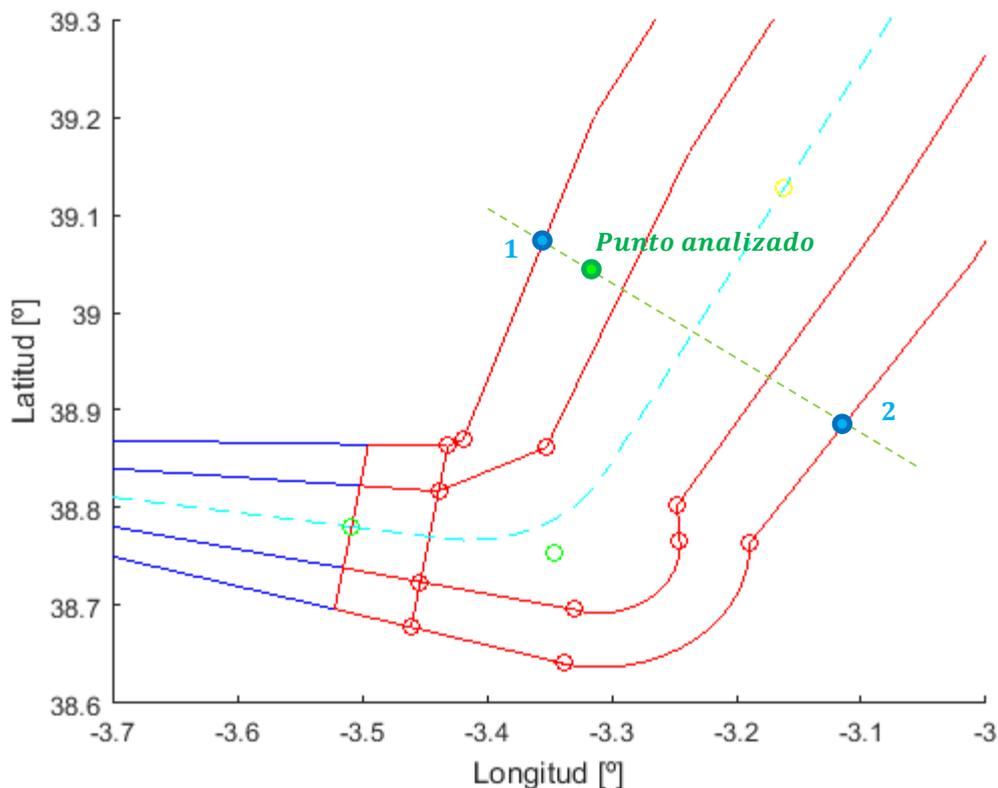


Figura 117. Comprobación del MOC (II). Salida por la pista 10

En cualquiera de los casos anteriores y una vez que se calculan los puntos 1 y 2, el procedimiento a seguir es simple. Primero, hay que determinar si el punto está contenido en el área de protección, es decir, se comprueba si la latitud y la longitud del punto analizado está entre las de los puntos 1 y 2. En caso de que el punto esté dentro del área, se calcula una elevación. Esta elevación depende del tramo en el que se ubique el punto. De esa forma, se determina la intersección de la perpendicular a la trayectoria que pase por el punto en función del tramo, se calcula la distancia recorrida sobre la trayectoria y, asumiendo que se tiene una pendiente del 3,3%, se determina la elevación correspondiente al área de protección. A modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas para un punto situado en el segundo tramo recto. En el resto de los casos, el proceso es análogo. Por último, se resta a la elevación anterior la altitud del punto analizado y se comprueba el cumplimiento de la restricción del MOC.

$$Dist_{pto-A_p} = \sqrt{(long_{Cent_2} - long_{A_p})^2 + (lat_{Cent_2} - lat_{A_p})^2}$$

$$Z_{comp} = elev_{A_p} + 0,033 \times Dist_{pto-A_p}$$

Cabe destacar, que en esta comprobación no se ha hecho distinción alguna entre el área primaria y secundaria. Realmente, habría que determinar la distancia entre los obstáculos y la trayectoria asumiendo que existe una reducción lineal de este en las áreas secundarias. Sin embargo, si se comprueba que esa distancia es superior a un valor determinado, asumiendo que toda el área es primaria, se cumple también la restricción en el área secundaria, ya que esta es menos restrictiva.

## 7.2.4 Salida convencional por la pista 28

### 7.2.4.1 Definición de la PDG

Una vez definida la OIS tal y como se especificó en el apartado 4.2.1.2, es necesario comprobar si hay obstáculos que penetren en ella. Para ello se establecen tres bucles que permiten iterar en latitud, longitud y número del fragmento del terreno. De esa forma, se pretende recorrer todos los puntos del terreno comprobando si están o no dentro de la OIS y, en caso afirmativo, verificar que la altitud del punto está por debajo de la del punto correspondiente de la OIS, cuya elevación es resultado de la pendiente del 2,5% comentada.

Al igual que el caso anterior, para cada punto del terreno, se establece una condición que determina si la longitud del punto está entre las longitudes de los puntos  $VOR_4$  y  $OIS_1$ . En caso de ser así, se calcula la coordenada  $x$  del punto. Esta coordenada  $x$  pertenece al sistema de referencia que tiene su origen en el umbral, cuyo eje  $x$  contiene al eje de la pista y es negativo pasado el umbral en el sentido de despegue, y cuyo eje  $y$  es perpendicular al mismo. El modo de obtenerla ya se explicó cuando se habló del proceso de diseño en el apartado 3.2.1. De nuevo, hay que tener un especial cuidado con los signos en función del cuadrante donde esté situado el punto.

A continuación, se determina en qué región se halla el punto en función de su coordenada  $x$  y en base a esto se establecen los límites correspondientes en latitud. Es decir, existen tres posibilidades:

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre  $-60$  y la coordenada  $x$  del punto  $Sup_{Sec}$  de la figura anterior, la coordenada  $y$  está delimitada por las coordenadas  $y_1$  y  $y_2$ . Estas coordenadas se calculan a partir de la coordenada  $x$  del punto y de los parámetros  $m$  y  $n$  correspondientes a las rectas que delimiten la región. En este primer caso, las expresiones empleadas son las siguientes.

$$y_1 = m_{15-Sup} \times x + n_{15-Sup}$$

$$y_2 = m_{15-Inf} \times x + n_{15-Inf}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $Inf_{Sec}$  y la coordenada  $x$  del punto  $Sup_{Sec}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{VOR-Sup} \times x + n_{VOR-Sup}$$

$$y_2 = m_{15-Inf} \times x + n_{15-Inf}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $Inf_{Sec}$  y la coordenada  $x$  del punto  $Fin_{OIS}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{VOR-Sup} \times x + n_{VOR-Sup}$$

$$y_2 = m_{VOR-Inf} \times x + n_{VOR-Inf}$$

En cualquiera de los casos anteriores, es necesario calcular la latitud del punto que esté a la misma distancia del umbral que el punto analizado y esté situado sobre el eje de la pista (Cent). Esta latitud permite obtener las latitudes de los puntos 1 y 2 que son los puntos de intersección de la perpendicular al eje de la pista que pasa por el punto analizado con las rectas correspondientes de la OIS. La Figura 118 puede servir de apoyo a la explicación realizada.

$$\phi_{cent} = \phi_{10} - \cos(\chi_{Pista}) \times x \times Esc_{\phi}$$

$$\phi_1 = \phi_{cent} + \cos \beta \times y_1 \times Esc_{\phi}$$

$$\phi_2 = \phi_{cent} + \cos \beta \times y_2 \times Esc_{\phi}$$

Obsérvese que en esta comprobación solo se consideran los bordes exteriores de las áreas de protección, ya que lo que se está buscando son aquellos puntos del terreno que superen en altura a la OIS, pero hasta ahora no se habla de MOC.

Por último, si la coordenada  $x$  del punto analizado está entre  $-60$  y la coordenada  $x$  del punto  $Fin_{OIS}$ , y la latitud del punto está entre las latitudes del punto 1 y 2, el punto está dentro de la OIS y, por tanto, es necesario comprobar su altitud. De esa manera, definiendo la elevación de la proyección del punto sobre la OIS con la expresión siguiente, si la altitud está por encima de esa elevación, el punto penetra en la superficie. En ese caso, se almacena una pendiente que está calculada como el cociente de la diferencia entre la altitud y la elevación mencionada, y una distancia que viene definida como aquella que se recorre sobre la trayectoria nominal hasta llegar a la proyección del punto en cuestión sobre la OIS.

$$z_{OIS} = elev_{DER10} + 5 + |(x + 60)| \times 0,025$$

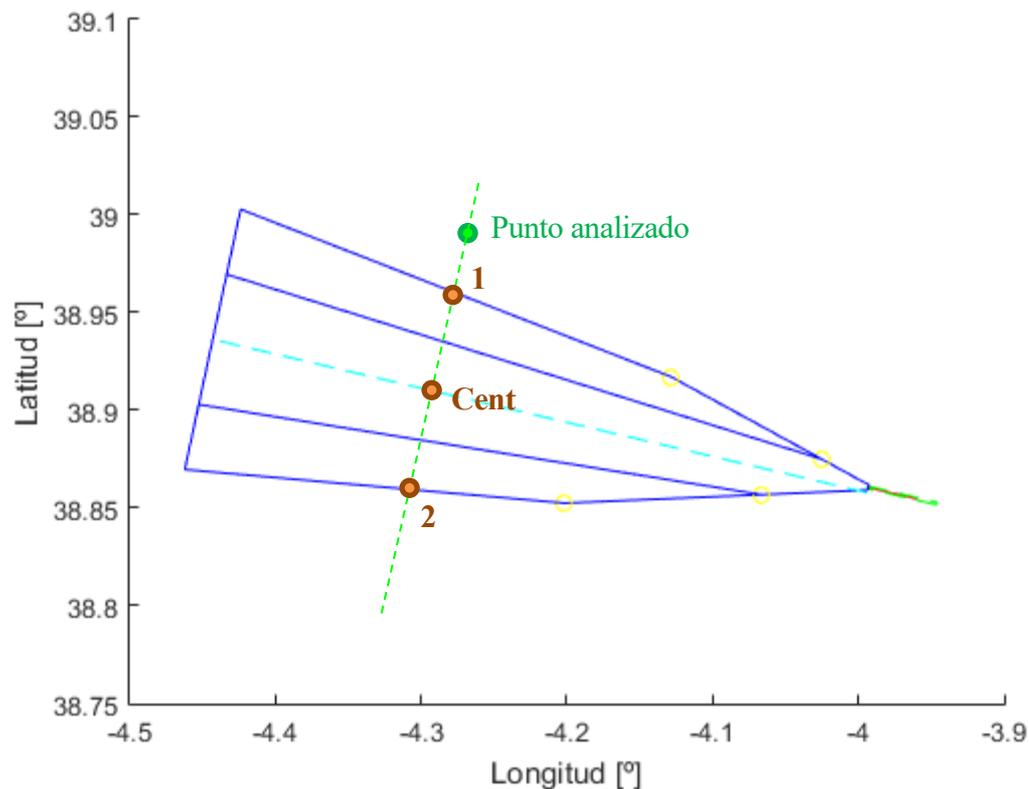


Figura 118. Comprobación de obstáculos en la OIS. Pista 28

#### 7.2.4.2 Determinación del punto de viraje

Una vez supuesta la ubicación del punto, tal y como se explicó en el apartado 4.2.1.3, se procede a realizar la comprobación del MOC de 90 m. Para ello, se comienza un bucle idéntico al del caso anterior que recorra los puntos del terreno y calcule las coordenadas  $x$  en caso de ser necesario. También se hace de forma similar el cálculo de las variables  $\phi_1$  y  $\phi_2$ . Sin embargo, al contrario de lo que ocurría en el caso anterior, el hecho de que el punto pertenezca al área primaria o secundaria cobra una especial relevancia. De esa forma, las opciones a analizar si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto a partir del cual están permitidos los virajes y la coordenada  $x$  del punto donde termina la OIS, son las siguientes:

- Si la coordenada  $x$  del punto está por debajo de la coordenada  $x$  del punto a partir del cual están permitidos los virajes y por encima de la del punto  $Sup_{prim}$ , la coordenada  $y$  está delimitada por las coordenadas  $y_1$  e  $y_2$ . Estas coordenadas se calculan a partir de la coordenada  $x$  del punto y de los parámetros  $m$  y  $n$  correspondientes a las rectas que delimiten la región. En este primer caso, las expresiones empleadas serán las siguientes.

$$y_1 = m_{15-Sup} \times x + n_{15-Sup}$$

$$y_2 = m_{15-Inf} \times x + n_{15-Inf}$$

- Si no se cumple lo anterior y la coordenada  $x$  del punto está por encima de la coordenada  $x$  del punto  $\text{Inf}_{\text{Prim}}$ , la coordenada  $y$  está delimitada por las coordenadas  $y_1$ ,  $y_1'$  e  $y_2$ . Las expresiones empleadas serán las siguientes.

$$y_1 = m_{15-Sup} \times x + n_{15-Sup}$$

$$y_2 = m_{15-Inf} \times x + n_{15-Inf}$$

$$y_{1'} = m_{VOR-SupPrim} \times x + n_{VOR-SupPrim}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $\text{Inf}_{\text{Prim}}$  y la coordenada  $x$  del punto  $\text{Sup}_{\text{Sec}}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{15-Sup} \times x + n_{15-Sup}$$

$$y_2 = m_{15-Inf} \times x + n_{15-Inf}$$

$$y_{1'} = m_{VOR-SupPrim} \times x + n_{VOR-SupPrim}$$

$$y_{2'} = m_{VOR-InfPrim} \times x + n_{VOR-InfPrim}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $\text{Sup}_{\text{Sec}}$  y la coordenada  $x$  del punto  $\text{Inf}_{\text{Sec}}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{VOR-Sup} \times x + n_{VOR-Sup}$$

$$y_2 = m_{15-Inf} \times x + n_{15-Inf}$$

$$y_{2'} = m_{VOR-InfPrim} \times x + n_{VOR-InfPrim}$$

$$y_{1'} = m_{VOR-SupPrim} \times x + n_{VOR-SupPrim}$$

- Si la coordenada  $x$  del punto está entre la coordenada  $x$  del punto  $\text{Sup}_{\text{Sec}}$  y la coordenada  $x$  del punto  $\text{Fin}_{\text{OIS1}}$ , la coordenada  $y$  viene dada por:

$$y_1 = m_{VOR-Sup} \times x + n_{VOR-Sup}$$

$$y_2 = m_{VOR-Inf} \times x + n_{VOR-Inf}$$

$$y_{2'} = m_{VOR-InfPrim} \times x + n_{VOR-InfPrim}$$

$$y_{1'} = m_{VOR-SupPrim} \times x + n_{VOR-SupPrim}$$

En cada caso, habrá que calcular las variables  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_{1'}$  y  $\phi_{2'}$ , según corresponda, con las expresiones que ya se utilizaron en las comprobaciones anteriores a partir de la variable  $\phi_{\text{cent}}$ . Estas variables permiten establecer los límites en latitud para el punto objeto de análisis. De esa manera, por comparación de latitudes, se determina si el punto está en el área primaria, secundaria o en ninguna de las dos. Si el punto está en el área primaria, hay que restar la variable  $z_{\text{OIS}}$  de las comprobaciones anteriores con la altitud del punto analizado y observar que la diferencia es mayor que 90 m. En caso de que el punto esté en alguna de las áreas secundarias, se genera una variable llamada MOC que es el resultado de establecer una relación lineal entre los extremos del área secundaria, siendo esta variable 90 en el borde interior que conecta con el área primaria y 0 en el exterior. A modo de ejemplo, se incluye la expresión empleada para aquellos casos en los que el punto esté en el área secundaria superior, es decir, su latitud venga delimitada por las de los puntos 1 y 1' de la Figura 119.

$$MOC = 90 - \frac{90}{\phi_1 - \phi_{1'}} \times (\phi_{\text{Pto}} - \phi_{1'})$$

Por tanto, la comprobación consistiría en restar la variable  $z_{\text{OIS}}$  de las comprobaciones anteriores con la altitud del punto analizado y observar que la diferencia es mayor que el valor de la variable MOC. Bien es cierto que es necesario comentar que la variable  $z_{\text{OIS}}$  presenta una ligera variación con respecto a la empleada en las comprobaciones anteriores, ya que, en este caso, está calculada con el valor de la PDG, que es superior a los valores que se empleaban en las otras comprobaciones en un 0,8 %.

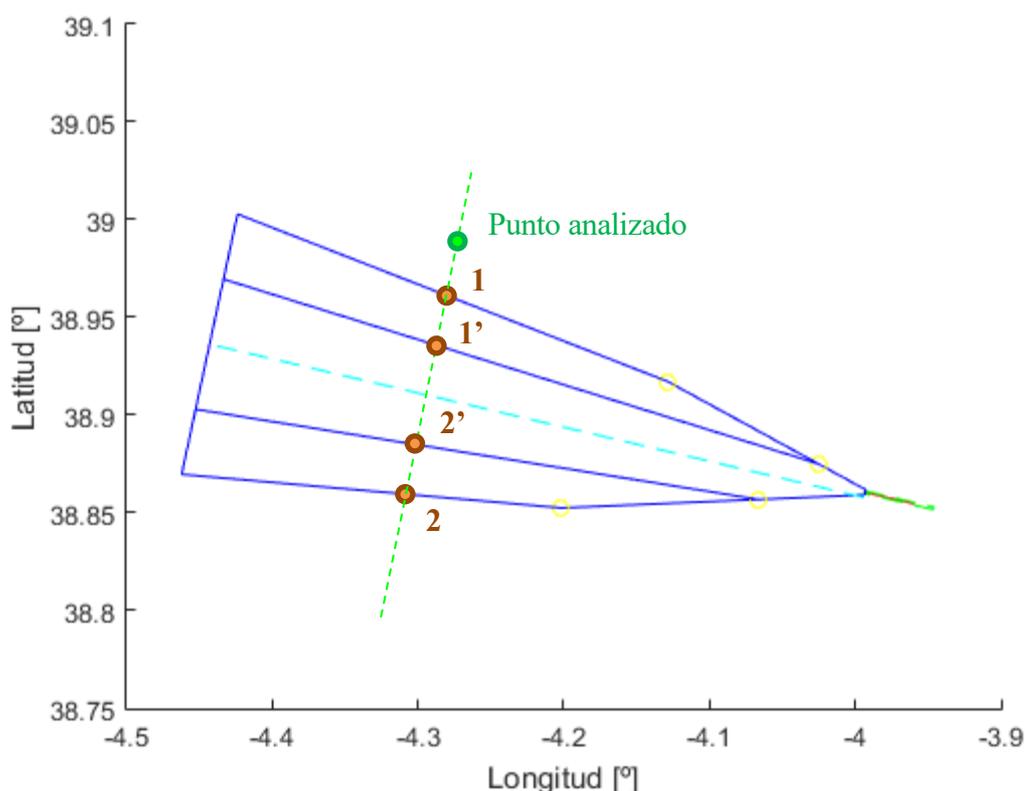


Figura 119. Determinación del punto a partir del cual se pueden realizar virajes. Pista 28

#### 7.2.4.3 Tramo con viraje

Para comprobar el MOC, hay que establecer tres bucles que, de la misma forma que en el apartado anterior, recorra el terreno. Seguidamente, se establece una primera condición para descartar puntos que están fuera del área de protección. De esa manera, se determina si el punto posee una longitud comprendida entre las longitudes de los puntos  $K_{int}$  del primer viraje y  $K_{ext}$  del segundo viraje (véase la Figura 120). En caso de ser así, se calculan dos rectas que pasan por el punto en cuestión y que son perpendiculares a cada uno de los radiales que definen el primer viraje. Obsérvese que esta comprobación viene asociada al primer viraje. Por tanto, a partir de ahora y, en caso de que no se diga lo contrario, todos los puntos representativos son del primer viraje.

A continuación, se calculan las intersecciones de las rectas mencionadas con los respectivos radiales, dando lugar a los puntos  $Cent_1$  y  $Cent_2$ . Dependiendo de las longitudes de estos puntos, se está en una situación u otra. De esa forma, se tienen los siguientes casos:

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  está entre las longitudes de los puntos  $K_p$  y  $K_{cent}$ , el punto pertenece al primer tramo recto de la trayectoria nominal. En ese caso, se calcula la intersección de la perpendicular al primer tramo con las rectas que delimitan el área de protección, es decir, las rectas que unen los puntos  $A_{ext}$  con  $K_{ext}$  y  $A_{int}$  con  $K_{int}$ . La metodología a seguir para el cálculo de dicha intersección es la empleada en los casos anteriores, cuyo desarrollo estaba basado en la determinación de las coordenadas de dos puntos (1 y 2) en base a los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersectan.
- Si la longitud del punto  $Cent_2$  está entre las longitudes de los puntos  $A_p$  y  $K_{p_3}$ , siendo  $K_{p_3}$  aquel donde comienza el segundo viraje, el punto pertenece al segundo tramo recto de la trayectoria nominal. De nuevo, se calculan las intersecciones de la perpendicular al segundo tramo con las rectas que delimitan las áreas de protección, tal y como se observa en la Figura 121. En este caso, esas rectas son las que unen  $A_{int}$  con  $K_{int_3}$ , siendo  $K_{int_3}$  el punto K del borde interior del segundo viraje, y P con  $K_{ext_3}$ , siendo  $K_{ext_3}$  el punto K del borde exterior del segundo viraje. La forma de hacerlo es la misma que en el caso anterior y el resultado vuelve a ser la ubicación de los puntos 1 y 2.

- Si la longitud del punto  $Cent_1$  es inferior a la del punto  $K_p$  y la de  $Cent_2$  es inferior a la de  $A_p$ , el punto pertenece al tramo curvo. En principio, se calcula el punto 1 como el resultado de la intersección de la recta  $\overline{A_{int}K_{int}}$  con la perpendicular a la trayectoria nominal. Sin embargo, si la latitud del punto 1 es superior a la del punto  $A_{int}$ , hay que recalcularlo como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{A_{int}K_{int3}}$ .

Por su parte, el punto 2 se calcula como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{K_{ext}A_{ext}}$ . Si la latitud de 2 es inferior a la latitud de  $A_{ext}$ , es necesario recalcularlo el punto 2 y hay dos opciones:

- Si la latitud de 2 es inferior a la latitud del punto  $A_{ext}$ , el punto 2 se recalcularía como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la tangente correspondiente a la curva exterior.
- Si la latitud de 2 es superior a la latitud del punto P/F, el punto 2 se recalcularía como la intersección de la perpendicular a la trayectoria con la recta  $\overline{FK_{ext3}}$ .

En los casos de manejar curvas, las intersecciones, de nuevo, vienen asociadas a rectas que se definen a partir de la discretización de la curva y las perpendiculares a la curva que describe la trayectoria nominal vienen dadas por las tangentes desfasadas un ángulo de  $90^\circ$ .

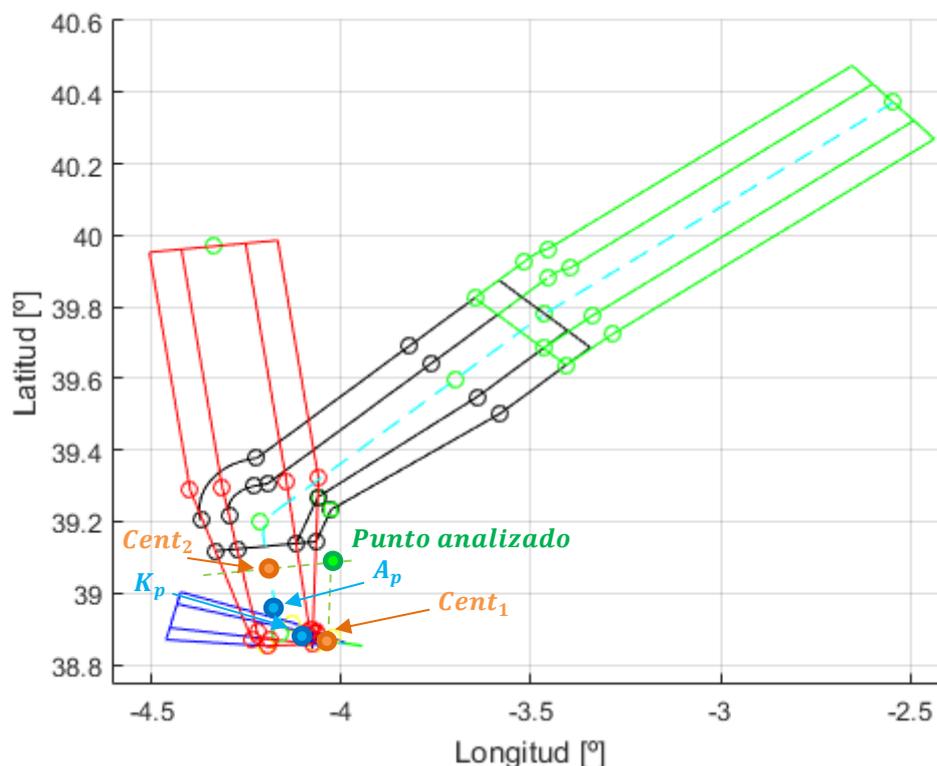


Figura 120. Comprobación del MOC (I). Salida por la pista 28

En cualquiera de los casos anteriores y una vez que se calculan los puntos 1 y 2, el procedimiento a seguir es simple. Primero, hay que determinar si el punto está contenido en el área de protección en función de los puntos 1 y 2. En caso de que el punto esté dentro del área, se calcula una elevación. De esa forma, se determina la intersección de la perpendicular a la trayectoria que pase por el punto en función del tramo, se calcula la distancia recorrida sobre la trayectoria y asumiendo que se tiene una pendiente del 4,51%, se determina la elevación correspondiente al área de protección. A modo de ejemplo, se incluyen las expresiones empleadas para un punto situado en el segundo tramo recto. En el resto de los casos, el proceso es análogo. Por último, se resta a la elevación anterior la altitud del punto analizado y se comprueba el cumplimiento de la restricción del MOC.

$$Dist_{pto-A_p} = \frac{\phi_{Cent2} - \phi_{Ap}}{\cos(\chi_{SP1-TLD}) Esc_{\phi}}$$

$$Z_{comp} = elev_{Ap} + 0,0451 \times Dist_{pto-A_p}$$

De nuevo, cabe destacar, que en esta comprobación no se ha hecho distinción alguna entre el área primaria y secundaria, ya que, si se comprueba que dicha distancia es superior a un valor determinado, asumiendo que toda el área es primaria, se cumple también la restricción en el área secundaria, ya que esta es menos restrictiva.

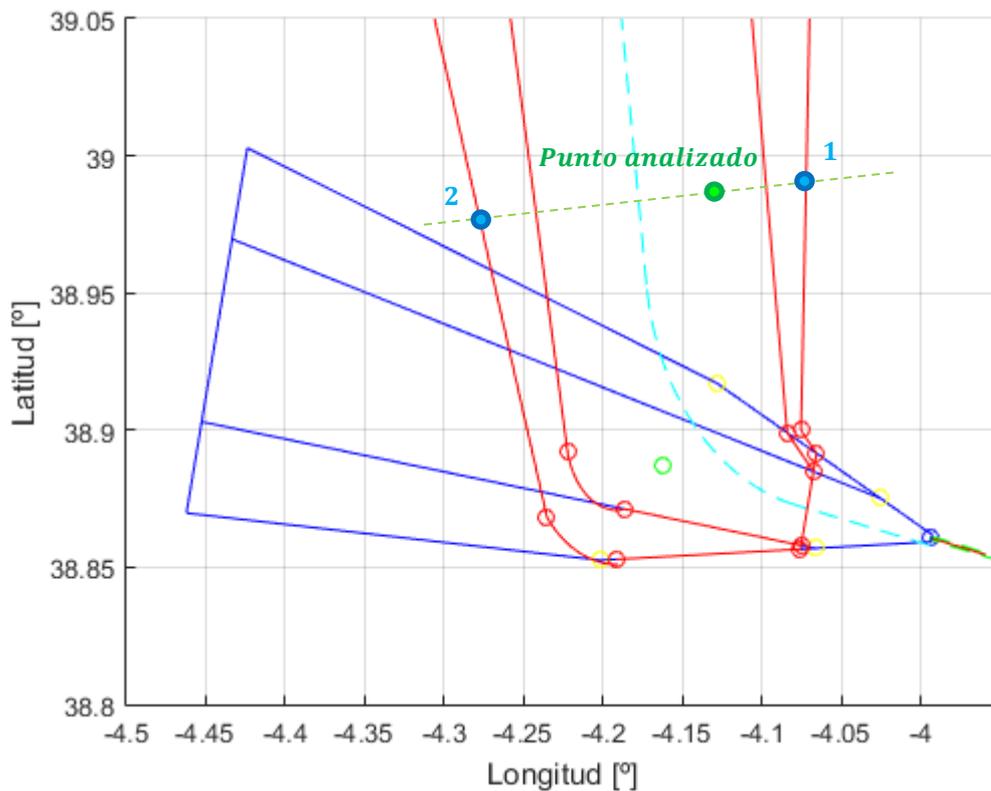


Figura 121. Comprobación del MOC (II). Salida por la pista 28

## ANEXO III: Construcción de las áreas de viraje

### 7.3.1 Llegada RNP de no precisión por la pista 28

#### 7.3.1.1 Aproximación inicial y llegada

A partir de todos los parámetros definidos en el apartado 3.1.2.2, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 123. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP1, cuya definición viene asociada a la intersección de dos radiales. Las expresiones empleadas son, por tanto, las que se desarrollan en las líneas siguientes. Téngase en cuenta que el punto NASOS viene determinado en la Figura 31. Por su parte, los puntos BLN y ANZAN son puntos situados en la misma aerovía G5. Las coordenadas exactas de estos puntos de referencia se han obtenido a partir de Insignia [5].

$$m_{Pista} = \frac{\phi_{10} - \phi_{28}}{\lambda_{10} - \lambda_{28}}$$

$$m_{BLN-ANZAN} = \frac{\phi_{BLN} - \phi_{ANZAN}}{\lambda_{BLN} - \lambda_{ANZAN}}$$

$$n_{BLN-ANZAN} = \phi_{BLN} - m_{BLN-ANZAN} \times \lambda_{BLN}$$

$$n_{Pista} = \phi_{IAF} - m_{Pista} \times \lambda_{IAF}$$

$$\lambda_{SP1} = \frac{n_{BLN-ANZAN} - n_{VOR}}{m_{Pista} - m_{BLN-ANZAN}}$$

$$\phi_{SP1} = m_{Pista} \times \lambda_{SP1} + n_{Pista}$$

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP1, considerando una distancia que es igual a la suma del ATT y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También hay que tener en cuenta que el área de protección venía con una semianchura constante de 9260 m desde NASOS. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas y la única diferencia existente con las anteriores es que la variable  $y_K$  se reduce a la mitad y/o el ángulo  $\beta_{SP1-NASOS_2}$  pasa a ser  $\beta_{SP1-NASOS}$  según el caso.

$$Dist_{SP1-K} = ATT + r \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$\chi_{SP1-NASOS} = \arctan \left( \cos \phi_{ARP} \frac{\lambda_{SP1} - \lambda_{NASOS}}{\phi_{SP1} - \phi_{NASOS}} \right)$$

$$\beta_{SP1-NASOS} = \frac{\pi}{2} + \chi_{SP1-NASOS}$$

$$\beta_{SP1-NASOS_2} = -\frac{\pi}{2} + \chi_{SP1-NASOS}$$

$$\phi_{K_{cent}} = \phi_{SP1} + \cos (\chi_{SP1-NASOS}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{K_{cent}} = \lambda_{SP1} + \sin (\chi_{SP1-NASOS}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\lambda}$$

$$y_K = 9260$$

$$\phi_{K_{int}} = \phi_{K_{cent}} + \cos (\beta_{SP1-NASOS_2}) \times y_K \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{K_{int}} = \lambda_{K_{cent}} + \sin (\beta_{SP1-NASOS_2}) \times y_K \times Esc_{\lambda}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área primaria del tramo posterior al viraje con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP1. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección de VOR del aeródromo. Esta área presenta una semianchura de 4630 m, ya que viene del tramo de aproximación inicial. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Una vez alcanzados los puntos A y A' del borde interior del área permanece con una anchura constante hasta llegar al punto donde se empieza a estrechar para obtener la semianchura de 2690 m propia del FAF.

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP1). Esta distancia es el resultado de restar a la distancia de inicio de viraje el ATT y el efecto de tiempo de reacción del piloto. De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga.

$$Dist_{SP1-A} = r \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) - ATT - T_{reacción}$$

$$\phi_{A_{cent}} = \phi_{SP1} + \cos(\chi_{SP1-NASOS}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{cent}} = \lambda_{SP1} + \sin(\chi_{SP1-NASOS}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\lambda}$$

$$y_A = 9260$$

$$\phi_{A_{ext}} = \phi_{A_{cent}} + \cos(\beta_{SP1-NASOS}) \times y_A \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{ext}} = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\beta_{SP1-NASOS}) \times y_A \times Esc_{\lambda}$$

El borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento. En el método de la espiral de viento, el área se basa en un radio de viraje calculado para el valor de la TAS y el ángulo de inclinación lateral de 25°. El límite exterior del área de viraje se construye utilizando una espiral derivada del radio de viraje con aire en calma. La espiral, por su parte, se crea aplicando el efecto del viento ( $E_{\theta}$ ) que se define como indica la expresión que se presenta a continuación. La espiral de viento propiamente dicha se define a partir de  $E_{\theta}$  en una serie de intervalos especificados. En este caso, se consideran 360 intervalos en los 180° que definen la espiral. A partir de esas divisiones, se determinan los puntos  $b_1, c_1 \dots n_1$  añadiendo una distancia de  $E_{\theta}$  al radio de aire en calma. Posteriormente, se calculan los puntos  $b_2, c_2 \dots n_2$ , localizados a un ángulo  $\arcsen\left(\frac{w}{V}\right)$ . La espiral resulta de trazar la curva que une los puntos  $b_2, c_2 \dots n_2$ . Véase la Figura 122.

$$\Omega = g \frac{\tan\left(\frac{25\pi}{180}\right)}{V}$$

$$r_{esp} = \frac{y_A}{2}$$

$$E_{\theta} = \frac{\theta}{\Omega} \times w$$

Obsérvese que, en las expresiones anteriores, se ha asumido un viento de 121,38 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI para la construcción de espirales de viento en el tramo de aproximación inicial. Este valor se obtiene de la expresión siguiente.

$$w = (12 \times H + 87)$$

Donde H expresa la altura del punto de viraje en km y w será el viento en km/h.

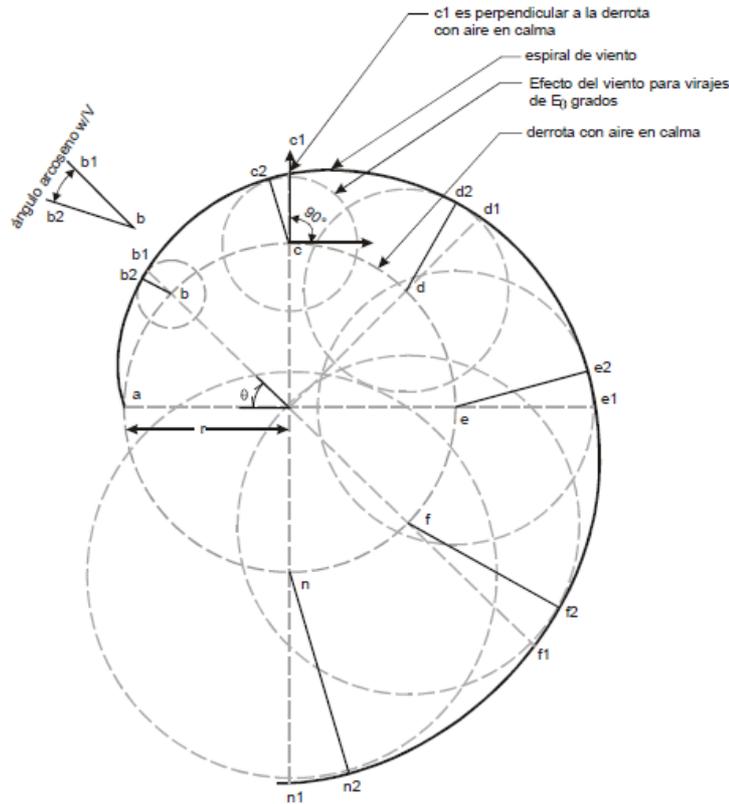


Figura 122. Espiral de viento

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el borde exterior del área de protección que se está desarrollando viene determinado por la espiral más desfavorable entre las tres que se muestran en la Figura 123. Las expresiones anteriores son de utilidad para el establecimiento de la espiral que comienza en el punto  $A_{ext}'$ . Sin embargo, la definición del resto de espirales es completamente análoga.

Las expresiones empleadas para la implementación de la espiral comentada serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tienen las espirales definidas hasta un valor de  $\theta$  de  $180^\circ$ , es necesario limitarlas por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo se calcula teniendo en cuenta que debe ser tangente a las curvas y formar un ángulo de  $30^\circ$  con la derrota nominal. De esa forma, para cada punto calculado de la espiral de vientos se determina una dirección ( $\chi_{tan}$ ) y, posteriormente, se verá cuál de esas direcciones forma un ángulo de  $30^\circ$  con la derrota.

$$\begin{aligned} \phi_b &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\theta + \chi_{SP1-NASOS}) \times r_{esp} \times Esc\phi \\ \lambda_b &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\theta + \chi_{SP1-NASOS}) \times r_{esp} \times Esc\lambda \\ \phi_{b_1} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\theta + \chi_{SP1-NASOS}) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\phi \\ \lambda_{b_1} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\theta + \chi_{SP1-NASOS}) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\lambda \\ \phi_{b_2} &= \phi_b + \cos\left(\theta + \chi_{SP1-NASOS} - a \sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\phi \\ \lambda_{b_2} &= \lambda_b + \sin\left(\theta + \chi_{SP1-NASOS} - a \sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\lambda \\ \chi_{tan}^{i-1} &= \arctan\left(\cos\phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right) \end{aligned}$$

Como se puede observar en la Figura 123, la espiral más restrictiva y a la que se une la tangente que forma  $30^\circ$  con la derrota nominal es aquella que parte de un punto desplazado de  $A_{ext}'$  una distancia  $y_A$  en dirección perpendicular a la derrota previa al viraje. De esa forma, el punto de tangencia de la recta y la curva mencionadas se correspondería con el punto F<sup>7</sup>.

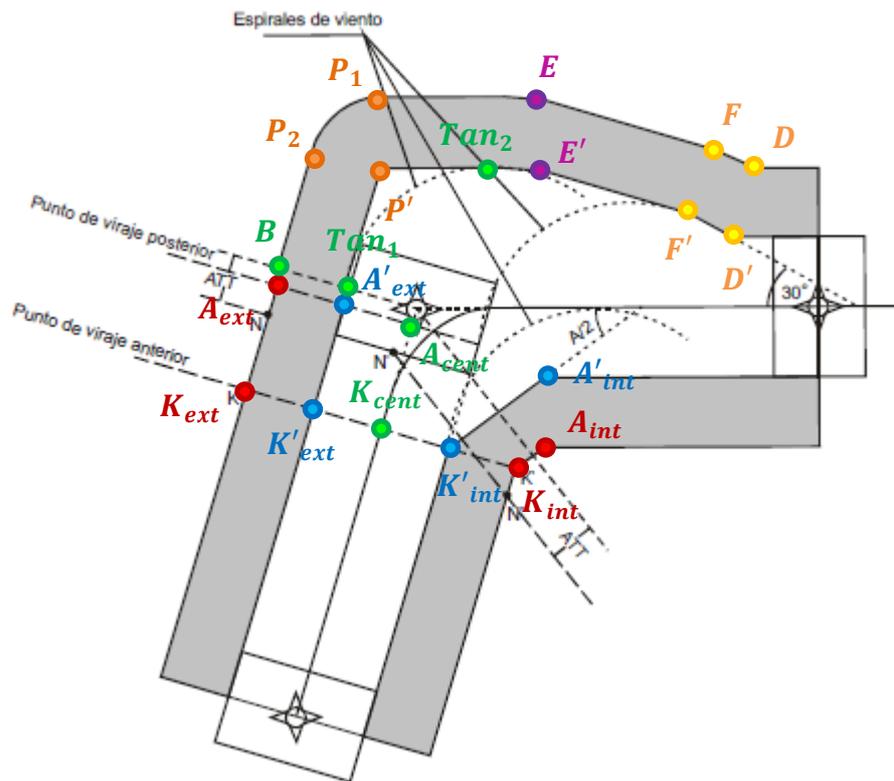


Figura 123. Área de protección de virajes RNAV y RNP

Una vez determinado el punto F', es necesario calcular la ubicación del punto D'. Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de 30° con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada al VOR del aeródromo. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que establecer los parámetros  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para determinar la longitud y la latitud del punto D'.

A continuación, se calculan aquellos puntos de la espiral definida (la que comienza en  $A_{ext}'$ ) que estén asociados a un valor de la variable  $\chi_{tan}$  que sea igual a la derrota precedente y a la derrota posterior al viraje. De esa manera, se tienen identificados dos puntos ( $Tan_1$  y  $Tan_2$ ) de la espiral. Por ellos, se trazan dos rectas cuyas direcciones sean iguales a las derrotas mencionadas. La intersección de esas rectas da lugar al punto P'. Por tanto, sólo faltaría determinar el punto E'. Este punto es el resultado de la intersección de una recta que pasa por el punto F' y cuya dirección viene dada por la perpendicular a la derrota precedente al viraje, y la recta tangente a la curva que pasa por el punto  $Tan_2$ . Todas las intersecciones mencionadas se calculan a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que interseccionan, tal y como se ha comentado en otros casos.

En cuando al borde exterior del área secundaria, todos los puntos se calculan desplazando los puntos del área primaria una distancia  $\frac{y_A}{2}$  en la dirección perpendicular que corresponda en cada caso. Cabe destacar que, en el caso del punto P', esa traslación da lugar a los puntos  $P_1$  y  $P_2$ , debido a la existencia de las dos perpendiculares asociadas a cada tramo. La unión de los mismos se establece generando una curva por interpolación mediante el comando *spline*. A modo de ejemplo, se muestran las expresiones asociadas al punto  $P_2$ . El resto de las expresiones son análogas.

$$\phi_{P_2} = \phi_P + \cos(\beta_{SP1-NASOS}) \times \left(\frac{y_A}{2}\right) \times ESC_\phi$$

$$\lambda_{P_2} = \lambda_P + \sin(\beta_{SP1-NASOS}) \times \left(\frac{y_A}{2}\right) \times ESC_\lambda$$

### 7.3.1.2 Fase final de la aproximación frustrada

A partir de todos los parámetros definidos en el apartado 3.1.3.2, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 124. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP1, cuya definición viene asociada a las expresiones siguientes. Cabe destacar que este punto se ha tomado a 20 km del umbral para poder bordear los espacios D y R anteriormente mencionados. Por su parte, los puntos SP2, SP3 y SP4 se han ubicado en base al mismo criterio (no sobrevolar los espacios D y R). Las coordenadas exactas de estos puntos de referencia se han obtenido a partir de Insignia [5].

$$\begin{aligned} Dist_{SP1-28} &= -20000 \\ \phi_{SP1} &= \phi_{28} - \cos(\chi_{pista}) \times Dist_{SP1-28} \times Esc\phi \\ \lambda_{SP1} &= \lambda_{28} - \sin(\chi_{pista}) \times Dist_{SP1-28} \times Esc\lambda \end{aligned}$$

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP1, considerando una distancia que es igual a la suma del ATT y la distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También hay que tener en cuenta que el área de protección venía con una semianchura constante de 3700 m desde FI. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas y la única diferencia existente con las anteriores es que la variable  $y_K$  se reduce a la mitad y/o el ángulo  $\beta$  pasa a ser  $\beta_2$  según el caso.

$$\begin{aligned} Dist_{SP1-K} &= ATT + r \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right) \\ \phi_{K_{cent}} &= \phi_{SP1} - \cos(\chi_{pista}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc\phi \\ \lambda_{K_{cent}} &= \lambda_{SP1} - \sin(\chi_{pista}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc\lambda \\ y_K &= 3700 \\ \phi_{K_{int}} &= \phi_{K_{cent}} + \cos(\beta) \times y_K \times Esc\phi \\ \lambda_{K_{int}} &= \lambda_{K_{cent}} + \sin(\beta) \times y_K \times Esc\lambda \end{aligned}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área primaria del tramo posterior al viraje con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP1. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección del tramo posterior al viraje. Esa área presenta una semianchura de 3700 m, tal y como indica la Tabla 13. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Una vez alcanzados los puntos A y A' del borde interior el área permanece con una anchura constante hasta llegar a los 28 km del ARP medidos sobre la trayectoria, donde se empieza a ensancharse para obtener la semianchura de 4630 m.

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP1). Esta distancia es el resultado de restar a la distancia de inicio de viraje el ATT y el efecto de tiempo de reacción del piloto. De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga.

$$\begin{aligned}
Dist_{SP1-A} &= r \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) - ATT - T_{reacción} \\
\phi_{A_{cent}} &= \phi_{SP1} + \cos(\chi_{pista}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{A_{cent}} &= \lambda_{SP1} + \sin(\chi_{pista}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\lambda} \\
y_A &= 3700 \\
\phi_{A_{ext}} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\beta_2) \times y_A \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{A_{ext}} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\beta_2) \times y_A \times Esc_{\lambda}
\end{aligned}$$

El borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento descrito en el apartado 7.3.1.1. En el método de la espiral de viento, el área se basa en un radio de viraje calculado para el valor de la TAS y en el ángulo de inclinación lateral que, en este caso, es de 15°. El límite exterior del área de viraje se construye utilizando una espiral derivada del radio de viraje con aire en calma. Véase la Figura 122.

$$\begin{aligned}
\Omega &= g \frac{\tan\left(\frac{15\pi}{180}\right)}{V} \\
r_{esp} &= \frac{y_A}{2} \\
E_{\theta} &= \frac{\theta}{\Omega} \times w
\end{aligned}$$

Obsérvese que en las expresiones anteriores se ha asumido un viento de 56 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI [13] para la construcción de espirales de viento en aproximaciones frustrada.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el borde exterior del área de protección que se está desarrollando viene determinado por la espiral más desfavorable entre las tres que se muestran en la Figura 124. Las expresiones anteriores son de utilidad para el establecimiento de la espiral que comienza en el punto  $A_{ext}'$ . Sin embargo, la definición del resto de espirales es completamente análoga.

Las expresiones empleadas para la implementación de la espiral comentada serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tienen las espirales definidas hasta un valor de  $\theta$  de 180°, es necesario limitarlas por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo se calcula teniendo en cuenta que debe ser tangente a las curvas y formar un ángulo de 30° con la derrota nominal. De esa forma, para cada punto calculado de la espiral de vientos se determina una dirección ( $\chi_{tan}$ ) y, posteriormente, se verá cuál de esas direcciones forma un ángulo de 30° con la derrota.

$$\begin{aligned}
\phi_b &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\theta + \beta_2) \times r_{esp} \times Esc_{\phi} \\
\lambda_b &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\theta + \beta_2) \times r_{esp} \times Esc_{\lambda} \\
\phi_{b_1} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\theta + \beta_2) \times (r_{esp} + E_{\theta}) \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{b_1} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\theta + \beta_2) \times (r_{esp} + E_{\theta}) \times Esc_{\lambda} \\
\phi_{b_2} &= \phi_b + \cos\left(\theta + \beta_2 - a \sin\left(\frac{w}{V}\right)\right) \times E_{\theta} \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{b_2} &= \lambda_b + \sin\left(\theta + \beta_2 - a \sin\left(\frac{w}{V}\right)\right) \times E_{\theta} \times Esc_{\lambda} \\
\chi_{tan}^{i-1} &= \arctan\left(\cos \phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)
\end{aligned}$$

Como se puede observar en la Figura 124, la espiral más restrictiva y a la que se une la tangente que forma  $30^\circ$  con la derrota nominal es aquella que parte de un punto desplazado de  $A_{ext}'$  una distancia  $y_A$  en dirección perpendicular a la derrota previa al viraje. De esa forma, el punto de tangencia de la recta y la curva mencionadas se correspondería con el punto  $F'$ .

Una vez determinado el punto  $F'$ , es necesario calcular la ubicación del punto  $D'$ . Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de  $30^\circ$  con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada al tramo posterior al viraje. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que establecer los parámetros  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para determinar la longitud y la latitud del punto  $D'$ .

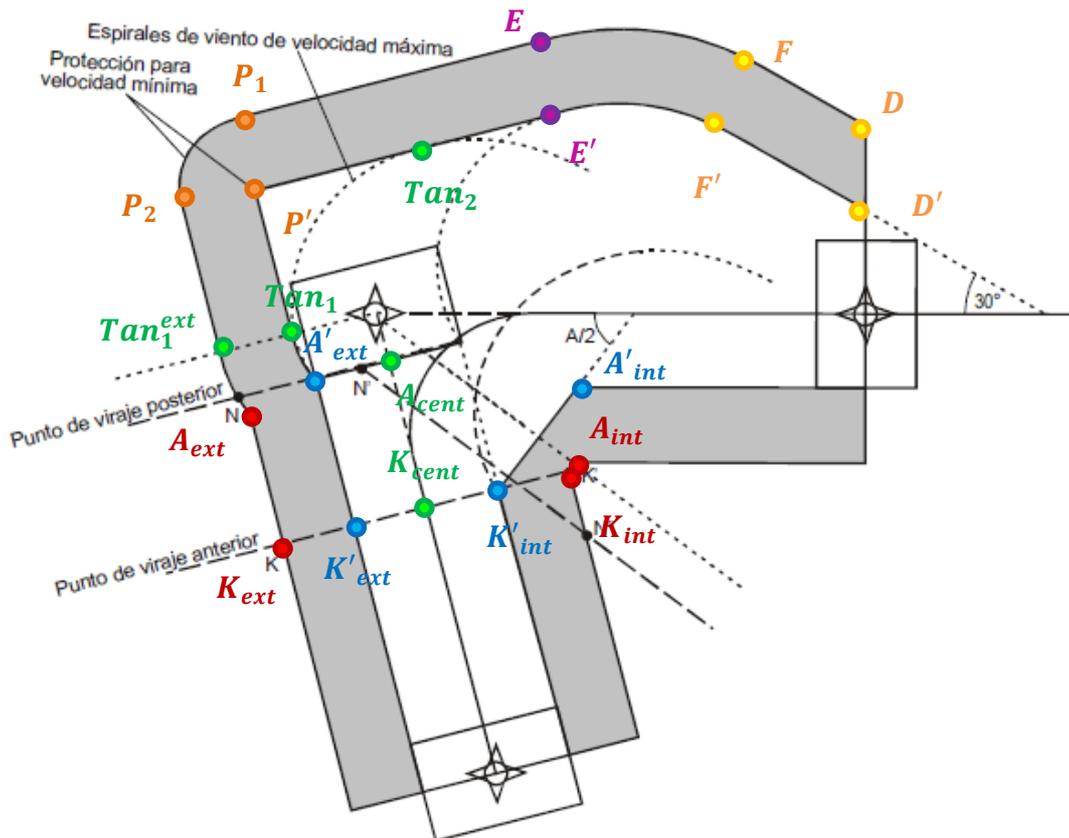


Figura 124. Área de protección de virajes RNAV y RNP (II)

A continuación, se calculan aquellos puntos de la espiral definida (la que comienza en  $A_{ext}'$ ) que estén asociados a un valor de la variable  $\chi_{tan}$  que sea igual a la derrota precedente al viraje y a su perpendicular. De esa manera, se tienen identificados dos puntos ( $Tan_1$  y  $Tan_2$ ) de la espiral. Por ellos, se trazan dos rectas cuyas direcciones sean iguales a las mencionadas. La intersección de esas rectas da lugar al punto  $P'$ . Por tanto, sólo faltaría determinar el punto  $E'$ . Este punto es el punto de la espiral desplazada en el que intersece la recta tangente a la espiral definida anteriormente que pasa por el punto  $Tan_2$ . Todas las intersecciones mencionadas se calculan a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas que intersecan, tal y como se ha comentado en otros casos. En el caso de  $E'$  la intersección viene dada por la recta tangente a la espiral definida anteriormente que pasa por el punto  $Tan_2$ , y la perpendicular a la recta que pasa por  $A_{ext}$  y es perpendicular a la trayectoria. En realidad, lo que se busca es el punto de la espiral desplazada cuya distancia a la recta que pasa por  $A_{ext}$  y es perpendicular a la trayectoria sea la misma que la distancia entre  $Tan_2$  y esa misma recta. Obsérvese que entre los puntos  $E'$  y  $F'$  el límite del área primaria viene impuesto por la espiral desplazada.

En cuanto al borde exterior del área secundaria, todos los puntos se calculan desplazando los puntos del área primaria una distancia  $\frac{\gamma A}{2}$  en la dirección perpendicular que corresponda en cada caso. Las consideraciones establecidas para el punto P' en el apartado 7.3.1.1 son igualmente válidas en este apartado.

### 7.3.2 Llegada convencional de precisión por la pista 10

#### 7.3.2.1 Aproximación inicial y llegada

##### Tramos TLD - VTB

A partir de todos los parámetros descritos en el apartado 3.2.2.2, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 125. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP2, cuya definición viene asociada a la intersección de dos radiales. Las expresiones empleadas son, por tanto, las que se desarrollan en las líneas siguientes. Téngase en cuenta que los puntos VTB, HIJ, CJN y TLD son puntos cuyas coordenadas exactas se han obtenido a partir de Insignia [5]. Además, el punto SP1, que hace referencia al segundo viraje, se definirá adecuadamente cuando se construya el área de protección del mismo.

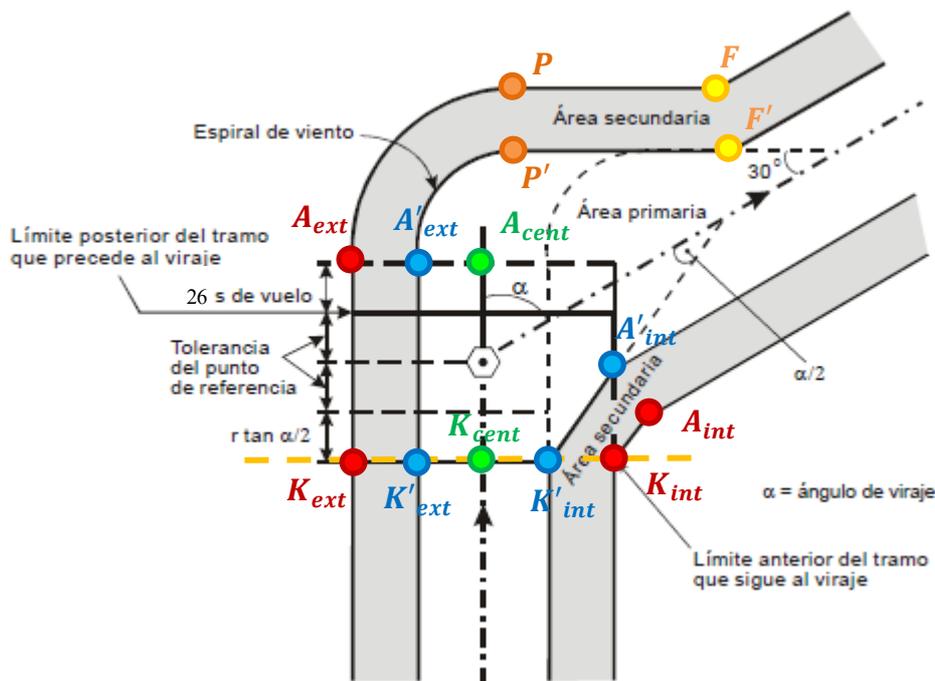


Figura 125. Área de protección de virajes para llegadas convencionales

$$m_{SP1-TLD} = \frac{\phi_{SP1} - \phi_{TLD}}{\lambda_{SP1} - \lambda_{TLD}}$$

$$n_{SP1-TLD} = \phi_{SP1} - m_{SP1-TLD} \times \lambda_{SP1}$$

$$m_{HIJ-VTB} = \frac{\phi_{HIJ} - \phi_{VTB}}{\lambda_{HIJ} - \lambda_{VTB}}$$

$$n_{HIJ-VTB} = \phi_{HIJ} - m_{HIJ-VTB} \times \lambda_{HIJ}$$

$$\lambda_{SP2} = \frac{n_{HIJ-VTB} - n_{SP1-TLD}}{m_{SP1-TLD} - m_{HIJ-VTB}}$$

$$\phi_{SP2} = m_{SP1-TLD} \times \lambda_{SP2} + n_{SP1-TLD}$$

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP2, considerando una distancia que es igual a la suma de la tolerancia del punto de referencia y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También hay que tener en cuenta que el área de protección venía con una semianchura constante de 9200 m desde los 46 km del IAF. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas y la única diferencia existente con las anteriores es que la variable  $y_K$  se reduce a la mitad o/y el ángulo  $\beta_{HIJ-VTB}$  pasa a ser  $\beta_{HIJ-VTB_2}$  según el caso.

$$Dist_{SP2-K} = T_{ptoRef} + r \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$\chi_{HIJ-VTB} = \text{atan} \left( \frac{\lambda_{VTB} - \lambda_{SP2}}{\phi_{VTB} - \phi_{SP2}} \cos(\phi_{ARP}) \right)$$

$$\beta_{HIJ-VTB} = \frac{\pi}{2} + \chi_{HIJ-VTB}$$

$$\beta_{HIJ-VTB_2} = -\frac{\pi}{2} + \chi_{HIJ-VTB}$$

$$\phi_{K_{cent}} = \phi_{SP2} + \cos(\chi_{HIJ-VTB}) \times (Dist_{SP2-K}) \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{K_{cent}} = \lambda_{SP2} + \sin(\chi_{HIJ-VTB}) \times (Dist_{SP2-K}) \times Esc_{\lambda}$$

$$y_K = 9200$$

$$\phi_{K_{int}} = \phi_{K_{cent}} + \cos(\beta_{HIJ-VTB}) \times y_K \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{K_{int}} = \lambda_{K_{cent}} + \sin(\beta_{HIJ-VTB}) \times y_K \times Esc_{\lambda}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área primaria del tramo posterior al viraje con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP2. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección previa a los 46 km del IAF. Esta área presenta una semianchura de 9200 m. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Cabe destacar que el borde interior se verá modificado cuando se construya el área del segundo viraje.

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP2). Esta distancia es el resultado de sumar a la tolerancia técnica de vuelo la distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$ . De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga.

$$Dist_{SP2-A} = T_{ptoRef} + FTT$$

$$\phi_{A_{cent}} = \phi_{SP2} + \cos(\chi_{HIJ-VTB}) \times (-Dist_{SP2-A}) \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{cent}} = \lambda_{SP2} + \sin(\chi_{HIJ-VTB}) \times (-Dist_{SP2-A}) \times Esc_{\lambda}$$

$$y_A = 9200$$

$$\phi_{A_{ext}} = \phi_{A_{cent}} + \cos(\beta_{HIJ-VTB_2}) \times y_A \times Esc\phi$$

$$\lambda_{A_{ext}} = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\beta_{HIJ-VTB_2}) \times y_A \times Esc\lambda$$

El borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento. En el método de la espiral de viento, el área se basa en el radio de viraje calculado para el valor de la TAS correspondiente y un ángulo de inclinación lateral de 25°. El límite exterior del área de viraje se construye utilizando una espiral derivada del radio de viraje con aire en calma. Véase la Figura 122 y el apartado 7.3.1.1.

$$\Omega = g \frac{\tan\left(\frac{25\pi}{180}\right)}{V}$$

$$r_{esp} = \frac{y_A}{2}$$

$$E_\theta = \frac{\theta}{\Omega} \times w$$

Obsérvese que en las expresiones anteriores se ha asumido un viento de 122,49 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI para la construcción de espirales de viento en aproximaciones iniciales. Este valor se obtiene de la expresión siguiente.

$$w = (12 \times H + 87)$$

Donde H expresa la altura del punto de viraje en km y w será el viento en km/h.

Las expresiones empleadas para la implementación de la espiral comentada serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tiene la espiral definida hasta un valor de  $\theta$  de 180°, es necesario limitarla por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo se calcula teniendo en cuenta que debe ser tangente a la curva y formar un ángulo de 30° con la derrota nominal. De esa forma, para cada punto calculado de la espiral de vientos, se determina una dirección ( $\chi_{tan}$ ) y, posteriormente, se verá cuál de esas direcciones forma un ángulo de 30° con la derrota. Esta metodología ya se utilizó en apartados anteriores, pero existen pequeñas diferencias en las expresiones debidas a la definición de los ángulos fundamentalmente.

$$\phi_b = \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{HIJ-VTB} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\phi$$

$$\lambda_b = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{HIJ-VTB} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\lambda$$

$$\phi_{b_1} = \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{HIJ-VTB} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\phi$$

$$\lambda_{b_1} = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{HIJ-VTB} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\lambda$$

$$\phi_{b_2} = \phi_b + \cos\left(\chi_{HIJ-VTB} - \theta - \pi/2 + \text{asin}\left(\frac{w}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\phi$$

$$\lambda_{b_2} = \lambda_b + \sin\left(\chi_{HIJ-VTB} - \theta - \pi/2 + \text{asin}\left(\frac{w}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\lambda$$

$$\chi_{tan}^{i-1} = \arctan\left(\cos\phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)$$

De esa forma, el punto de tangencia de la recta y la curva mencionadas se correspondería con el punto P'. Una vez determinado el punto P', es necesario calcular la ubicación del punto F'. Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de 30° con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada al tramo siguiente. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que establecer los parámetros  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para determinar la longitud y la latitud del punto F'. Cabe destacar que, en este caso, P' y F' coinciden, ya que el tramo tangente es inexistente porque quedaría dentro del área primaria del área de protección del tramo posterior al viraje.

En cuando al borde exterior del área secundaria, el tramo curvo empieza en el punto  $A_{ext}$ . A partir de cada punto de la espiral del área primaria, se calcula la dirección de la recta perpendicular a  $\chi_{tan}$  en cada caso, restando a dicha variable un valor de  $\frac{\pi}{2}$  y corrigiendo el resultado en función del cuadrante. De esa forma, se puede trasladar el punto en cuestión una distancia  $\frac{y_A}{2}$  sobre la perpendicular descrita, estableciendo una espiral “concéntrica”. El punto P, está, por tanto, a una distancia  $\frac{y_A}{2}$  de P', medida sobre la perpendicular a la tangente a la curva en P.

$$\begin{aligned}\phi_{b_2}^{Sec} &= \phi_{b_2} + \cos\left(\chi_{tan} - \frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{y_A}{2}\right) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{b_2}^{Sec} &= \lambda_{b_2} + \sin\left(\chi_{tan} - \frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{y_A}{2}\right) \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

Por último, el punto F coincidiría con P porque, en este caso la paralela al tramo  $\overline{P'F'}$  anterior intersectaría a la recta que delimita el área de protección asociada a TLD en un punto que estaría dentro del área secundaria asociada a TLD. Además, tanto el punto F, como el punto F' se unen a las rectas que marcan el área de protección del tramo siguiente, manteniendo la semianchura de los 9200 m propios del tramo de aproximación inicial. Con todo lo anterior, el área de viraje queda establecida tal y como muestra la Figura 53.

### **Tramo SP1-TLD**

A partir de los parámetros definidos en el apartado 3.2.2.3, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 125. Las coordenadas de estos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP1, situado a 32 km del umbral sobre el eje de la pista.

$$\begin{aligned}\phi_{SP1} &= \phi_{10} - \cos(\chi_{pista}) \times (-32000) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{SP1} &= \lambda_{10} - \sin(\chi_{pista}) \times (-32000) \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP1, considerando una distancia que es igual a la suma de la tolerancia del punto de referencia y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. Obsérvese que esta distancia varía respecto al viraje anterior porque el ángulo es distinto. También hay que tener en cuenta que el área de protección venía con una semianchura constante de 9200 m desde los 46 km del IAF. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas y la única diferencia existente con las anteriores es que la variable  $y_K$  se reduce a la mitad o/y el ángulo  $\beta_{SP1-TLD}$  pasa a ser  $\beta_{SP1-TLD_2}$  según el caso.

$$\begin{aligned}Dist_{SP1-K} &= T_{ptoRef} + r \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \chi_{SP1-TLD} &= atan\left(\frac{\lambda_{SP1} - \lambda_{TLD}}{\phi_{SP1} - \phi_{TLD}} \cos(\phi_{ARP})\right) \\ \beta_{SP1-TLD} &= \frac{\pi}{2} + \chi_{SP1-TLD} \\ \beta_{SP1-TLD_2} &= -\frac{\pi}{2} + \chi_{SP1-TLD} \\ \phi_{K_{cent}} &= \phi_{SP1} + \cos(\chi_{SP1-TLD}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{K_{cent}} &= \lambda_{SP1} + \sin(\chi_{SP1-TLD}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\lambda} \\ y_K &= 9200 \\ \phi_{K_{int}} &= \phi_{K_{cent}} + \cos(\beta_{SP1-TLD}) \times y_K \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{K_{int}} &= \lambda_{K_{cent}} + \sin(\beta_{SP1-TLD}) \times y_K \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

A continuación, se definirán los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área primaria del tramo posterior al viraje con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP1. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección previa a los 46 km del IAF. Esta área presenta una semianchura de 9200 m. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Cabe destacar que el borde interior se ve modificado, ya que existe un solape de las áreas de protección secundarias de los dos virajes realizados. Por ello, se opta por construir un límite interior que una el punto K del borde interior del segundo viraje con un punto K auxiliar del borde interior del primer viraje. Este último punto, se determina como la intersección de una recta que pase por el punto  $IF_1$  y que forme un ángulo de  $\frac{\alpha}{2}$  con el eje de la pista, y la recta que marca el límite del área de protección secundaria del primer viraje.

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP1). Esta distancia es el resultado de sumar a la tolerancia técnica de vuelo la distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$ . De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga.

$$\begin{aligned} Dist_{SP1-A} &= T_{ptoRef} + FTT \\ \phi_{A_{cent}} &= \phi_{SP1} + \cos(\chi_{SP1-TLD}) \times (Dist_{SP1-A}) \times Esc\phi \\ \lambda_{A_{cent}} &= \lambda_{SP1} + \sin(\chi_{SP1-TLD}) \times (Dist_{SP1-A}) \times Esc\lambda \\ y_A &= 9200 \\ \phi_{A_{ext}} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\beta_{SP1-TLD2}) \times y_A \times Esc\phi \\ \lambda_{A_{ext}} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\beta_{SP1-TLD2}) \times y_A \times Esc\lambda \end{aligned}$$

El borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento. En el método de la espiral de viento, el área se basa en un radio de viraje calculado para el valor de la TAS y el ángulo de inclinación lateral de 25°. La espiral resulta de trazar la curva que une los puntos  $b_2, c_2 \dots n_2$ , como en el caso anterior. Véase la Figura 122.

$$\begin{aligned} \Omega &= g \frac{\tan\left(\frac{25\pi}{180}\right)}{V} \\ r_{esp} &= \frac{y_A}{2} \\ E_\theta &= \frac{\theta}{\Omega} \times w \end{aligned}$$

Obsérvese que en las expresiones anteriores se ha asumido un viento de 111,45 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI para la construcción de espirales de viento en aproximaciones iniciales. Este valor se obtiene de la misma expresión usada en el apartado anterior.

Las expresiones empleadas para la implementación de la espiral comentada serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que, una vez se tiene la espiral definida hasta un valor de  $\theta$  de 180°, es necesario limitarla por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo se calcula teniendo en cuenta que debe ser tangente a la curva y formar un ángulo de 30° con la derrota nominal, tal y como ocurría en el anterior apartado. Por tanto, el procedimiento es análogo.

$$\begin{aligned}
\phi_b &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{SP1-TLD} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\phi \\
\lambda_b &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{SP1-TLD} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\lambda \\
\phi_{b_1} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{SP1-TLD} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\phi \\
\lambda_{b_1} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{SP1-TLD} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\lambda \\
\phi_{b_2} &= \phi_b + \cos\left(\chi_{SP1-TLD} - \theta - \pi/2 + \text{asin}\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\phi \\
\lambda_{b_2} &= \lambda_b + \sin\left(\chi_{SP1-TLD} - \theta - \pi/2 + \text{asin}\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\lambda \\
\chi_{tan}^{i-1} &= \arctan\left(\cos\phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)
\end{aligned}$$

De esa forma, el punto de tangencia de la recta y la curva mencionadas se correspondería con el punto P'. Una vez determinado el punto P', es necesario calcular la ubicación del punto F'. Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de 30° con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada al tramo siguiente. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que establecer los parámetros  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para determinar la longitud y la latitud del punto F'. Puesto que este punto resulta localizarse dentro del área de protección del tramo siguiente, se opta por asumir que F' coincide con el punto que marca el extremo del área primaria en el IF.

En cuando al borde exterior del área secundaria, el tramo curvo empieza en el punto  $A_{ext}$ . A partir de cada punto de la espiral del área primaria, se calcula la dirección de la recta perpendicular a  $\chi_{tan}$  en cada caso, restando a dicha variable un valor de  $\frac{\pi}{2}$  y corrigiendo el resultado en función del cuadrante. El punto P, está, por tanto, a una distancia  $\frac{y_A}{2}$  de P', medida sobre la perpendicular a la tangente a la curva en P. Las expresiones son las mismas que se emplearon en el viraje anterior.

Por último, el punto F coincidiría con el punto que marca el extremo del área secundaria en el IF. Además, tanto el punto F, como el punto F' se unen a las rectas que marcan el área de protección del tramo siguiente, que son las áreas construidas cuando se diseñó el tramo sin viraje del procedimiento.

### 7.3.2.2 Fase final de aproximación frustrada

A partir de los parámetros definidos en el apartado 3.2.3.2, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. De nuevo, lo primero que es necesario definir son los puntos K y K'. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP1, cuya definición viene asociada a la intersección del radial que viene de BLN y la prolongación del eje de la pista. Cabe destacar que el radial mencionado se ha tomado para poder bordear los espacios D y R. Por su parte, los puntos SP2, SP3 y SP4 se han ubicado en base a los mismos criterios (no sobrevolar los espacios D y R, y seguir radiales VOR). Las coordenadas exactas de estos puntos de referencia (BLN y 2) se han obtenido a partir de Insignia [5].

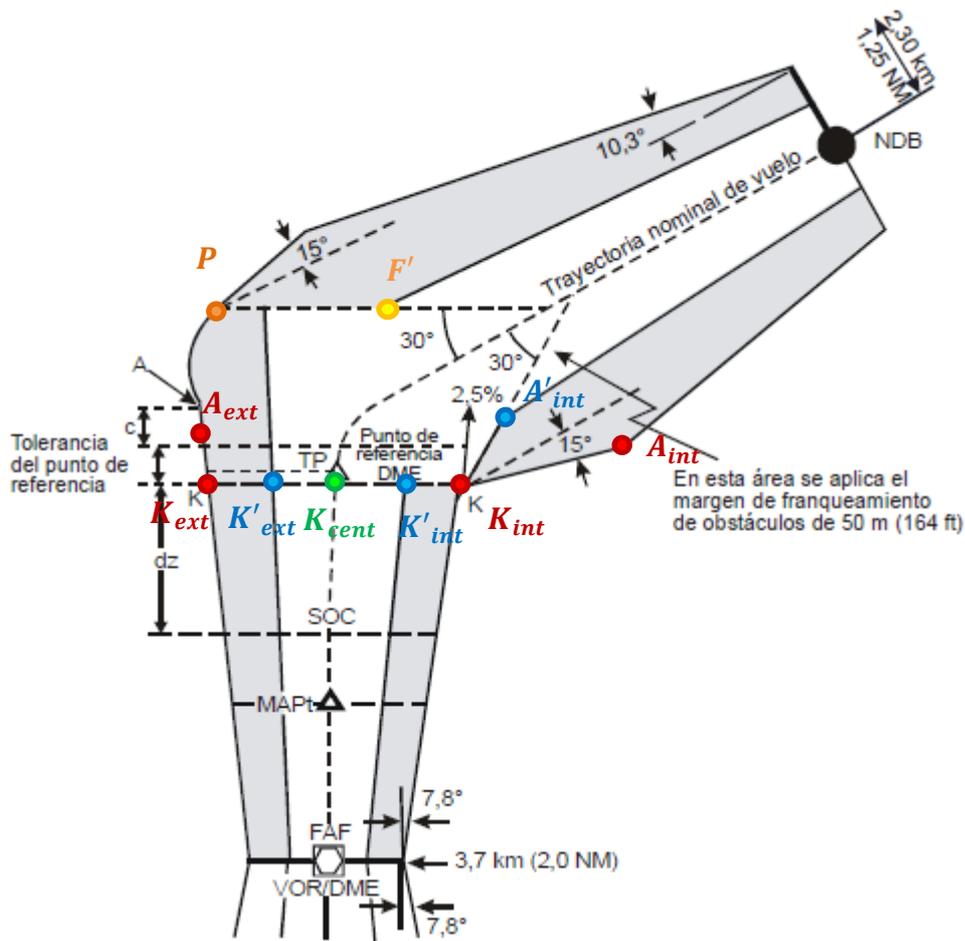


Figura 126. Área de protección de virajes en aproximación frustrada

$$m_{BLN} = \frac{\phi_2 - \phi_{BLN}}{\lambda_2 - \lambda_{BLN}}$$

$$m_{Pista} = \frac{\phi_{10} - \phi_{28}}{\lambda_{10} - \lambda_{28}}$$

$$n_{BLN} = \phi_{BLN} - m_{BLN} \times \lambda_{BLN}$$

$$n_{Pista} = \phi_{IAF} - m_{Pista} \times \phi_{IAF}$$

$$\lambda_{SP1} = \frac{n_{BLN} - n_{Pista}}{m_{Pista} - m_{BLN}}$$

$$\phi_{SP1} = m_{BLN} \times \lambda_{SP1} + n_{BLN}$$

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP1, considerando una distancia que es igual a la suma del ATT y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También hay que tener en cuenta que el área de protección venía ensanchándose desde una anchura de 3700 m desde VOR y con un ángulo de 7,8°. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas y la única diferencia existente con las anteriores es que la variable  $y_K$  se reduce a la mitad y/o el ángulo  $\beta$  pasa a ser  $\beta_2$  según el caso. Obsérvese que se ha tenido en cuenta que el VOR está desplazado una distancia  $y_{VOR}$  en perpendicular al eje de la pista. Por ello, se ha introducido el punto  $K_{aux}$  en las expresiones siguientes, haciendo referencia a la intersección de la perpendicular al eje de la pista que pasa por  $K_{cent}$  con la paralela al eje de la pista que pasa por el VOR.

$$\begin{aligned}
Dist_{SP1-K} &= Tol_{PtoRef} + r \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\
\phi_{K_{cent}} &= \phi_{SP1} + \cos(\chi_{Pista}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{K_{cent}} &= \lambda_{SP1} + \sin(\chi_{Pista}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\lambda} \\
\chi_{K_{aux}} &= atan\left(\frac{\lambda_{K_{aux}} - \lambda_{VOR}}{\phi_{K_{aux}} - \phi_{VOR}} \cos(\phi_{ARP})\right) \\
Dist_{K_{aux}} &= \frac{\phi_{K_{aux}} - \phi_{VOR}}{\cos(\chi_{K_{aux}}) Esc_{\phi}} \\
y_K &= \frac{3700}{2} + Dist_{K_{aux}} \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right) \\
\phi_{K_{int}} &= \phi_{K_{cent}} + \cos(\beta) \times (y_K - y_{VOR}) \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{K_{int}} &= \lambda_{K_{cent}} + \sin(\beta) \times (y_K - y_{VOR}) \times Esc_{\lambda}
\end{aligned}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área primaria del tramo posterior al viraje con la recta que parte del punto K del borde interior y forma un ángulo de 30° con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP1. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la recta que pasa por el punto  $K_{int}$  y tiene una dirección que difiere de la de la trayectoria seguida una vez completado el viraje en 15°, y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección del tramo posterior al viraje. Esta área viene ensanchándose desde BLN con un ángulo de 7,8°. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Una vez alcanzados los puntos A y A' del borde interior el área continúa ensanchándose con el ángulo de 7,8° hasta alcanzar la semianchura de 14800 m.

En cuanto al borde exterior, la definición del punto A se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP1). Esta distancia es el resultado de sumar la tolerancia del punto de referencia y la tolerancia técnica de vuelo. De la misma forma a como se hacía con los puntos K y K', es necesario tener en cuenta que el VOR del aeródromo está desplazado respecto al eje de la pista. Por ello, se ha introducido el punto  $A_{aux}$  en las expresiones siguientes, haciendo referencia a la intersección de la perpendicular al eje de la pista que pasa por  $A_{cent}$  con la paralela al eje de la pista que pasa por el VOR.

$$\begin{aligned}
Dist_{SP1-A} &= Tol_{PtoRef} + FTT \\
\phi_{A_{cent}} &= \phi_{SP1} - \cos(\chi_{Pista}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{A_{cent}} &= \lambda_{SP1} - \sin(\chi_{Pista}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\lambda} \\
\chi_{A_{aux}} &= atan\left(\frac{\lambda_{A_{aux}} - \lambda_{VOR}}{\phi_{A_{aux}} - \phi_{VOR}} \cos(\phi_{ARP})\right) \\
Dist_{A_{aux}} &= \frac{\phi_{A_{aux}} - \phi_{VOR}}{\cos(\chi_{A_{aux}}) Esc_{\phi}} \\
y_A &= \frac{3700}{2} + Dist_{A_{aux}} \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right) \\
\phi_{A_{ext}} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\beta_2) \times (y_A + y_{VOR}) \times Esc_{\phi} \\
\lambda_{A_{ext}} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\beta_2) \times (y_A + y_{VOR}) \times Esc_{\lambda}
\end{aligned}$$

El borde exterior del área secundaria se construye con el método de la espiral de viento. En el método de la espiral de viento, el área se basa en un radio de viraje calculado para el valor de la TAS correspondiente y un ángulo de inclinación lateral de 15°. El límite exterior del área de viraje se construye utilizando una espiral derivada del radio de viraje con aire en calma. Véase la Figura 122 y el apartado 7.3.1.1 donde se detalla el método.

$$\Omega = g \frac{\tan\left(\frac{15\pi}{180}\right)}{V}$$

$$r_{esp} = y_A$$

$$E_\theta = \frac{\theta}{\Omega} \times w$$

Obsérvese que en las expresiones anteriores se ha asumido un viento de 56 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI para la construcción de espirales de viento en aproximaciones frustrada.

Las expresiones empleadas para la implementación de la espiral comentada serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tiene la espiral definida hasta un valor de  $\theta$  de 180°, es necesario limitarla por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo, según la Figura 126, se calcularía teniendo en cuenta que debe ser tangente a la curva y formar un ángulo que difiera en 15° de la trayectoria seguida una vez completado el viraje. Sin embargo, esto es así si la radioayuda se encuentra en la ubicación marcada en el caso D de la Figura 127. En este caso, la radioayuda se corresponde con el caso C de la misma figura. Por ello, el punto P vendrá dado por aquel punto de la curva donde la tangente a la misma es paralela a la trayectoria seguida después del viraje. De esa forma, para cada punto calculado de la espiral de vientos se determina una dirección ( $\chi_{tan}$ ) y, posteriormente, se verá cuál de esas direcciones es paralela a la derrota.

$$\phi_b = \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{Pista} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc_\phi$$

$$\lambda_b = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{Pista} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc_\lambda$$

$$\phi_{b_1} = \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{Pista} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc_\phi$$

$$\lambda_{b_1} = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{Pista} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc_\lambda$$

$$\phi_{b_2} = \phi_b + \cos\left(\chi_{Pista} - \theta - \pi/2 + a \sin\left(\frac{w}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc_\phi$$

$$\lambda_{b_2} = \lambda_b + \sin\left(\chi_{Pista} - \theta - \pi/2 + a \sin\left(\frac{w}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc_\lambda$$

$$\chi_{tan}^{i-1} = \arctan\left(\cos \phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)$$

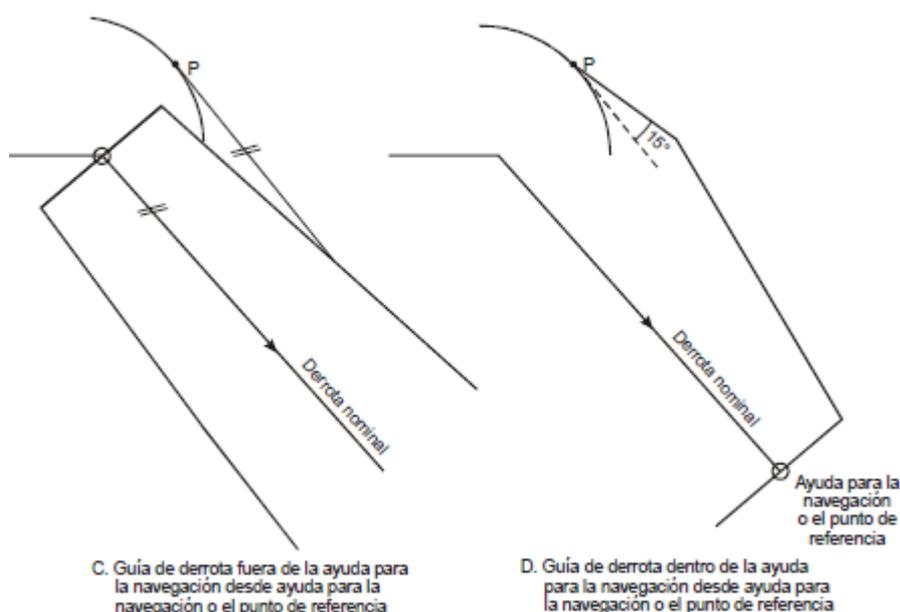


Figura 127. Borde exterior para virajes en aproximación frustrada. Pista 10

A partir del punto P, se puede localizar el punto F. Este punto viene dado por la intersección de la tangente a la derrota nominal posterior al viraje que pasa por el punto P con el área de protección asociada a BLN. El método de cálculo es el habitual, que se ha utilizado varias veces para la determinación de intersecciones.

En cuanto al borde exterior del área primaria, viene dado por el punto donde el área de protección del VOR del aeródromo interseca a la espiral de viento. Este punto, al que se le denomina P', se determina estableciendo qué punto de la espiral tiene una latitud que es la calculada a partir de la recta que define el área de protección primaria asociada al VOR y la longitud de dicho punto.

Por otro lado, es necesario determinar el punto F'. Este punto viene dado por la intersección de la recta que forma 30 ° con la trayectoria después del viraje y pasa por el punto P, con el área de protección primaria asociada a BLN.

### 7.3.3 Salida convencional por la pista 10

A partir de los parámetros definidos en el apartado 4.1.2.2, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 128. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP1, cuya definición viene asociada a la intersección de dos radiales. Las expresiones empleadas son, por tanto, las que se desarrollan en las líneas siguientes. Téngase en cuenta que el punto NASOS viene determinado en la Figura 70. Por su parte, INTAX es el punto designado situado al norte de este dentro de la misma aerovía G5. Las coordenadas exactas de estos puntos de referencia se han obtenido a partir de Insignia [5].

$$m_{Nasos-Intax} = \frac{\phi_{INTAX} - \phi_{NASOS}}{\lambda_{INTAX} - \lambda_{NASOS}}$$

$$n_{Nasos-Intax} = \phi_{INTAX} - m_{Nasos-Intax} \times \lambda_{INTAX}$$

$$m_{VOR} = \frac{\phi_{FinVOR} - \phi_{VOR}}{\lambda_{FinVOR} - \lambda_{VOR}}$$

$$n_{VOR} = lat_{FinVOR} - m_{VOR} \times \lambda_{FinVOR}$$

$$\lambda_{SP1} = \frac{n_{Nasos-Intax} - n_{VOR}}{m_{VOR} - m_{Nasos-Intax}}$$

$$\phi_{SP1} = m_{VOR} \times \lambda_{SP1} + n_{VOR}$$

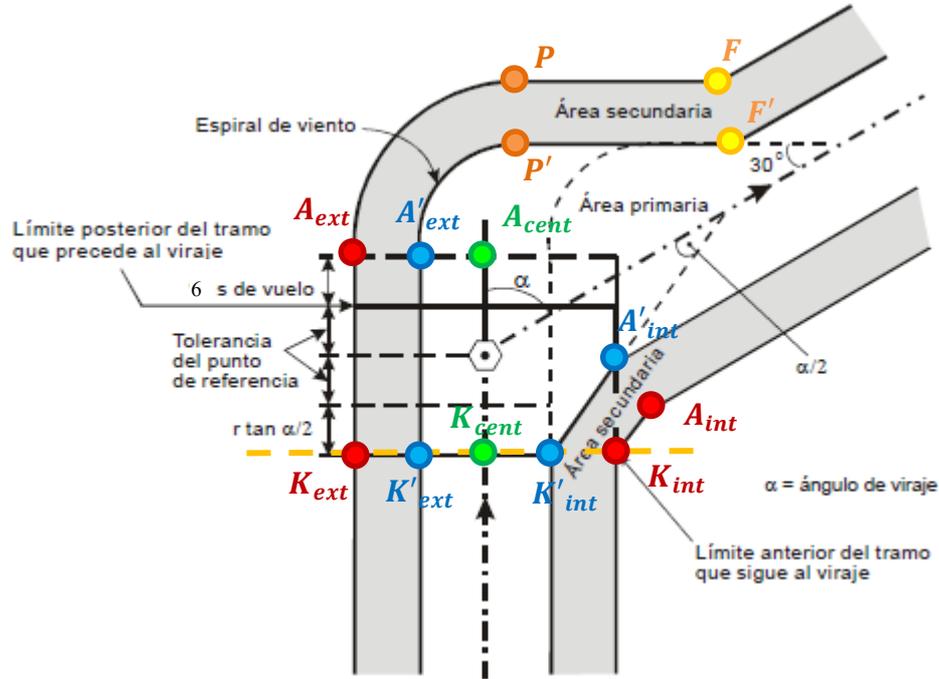


Figura 128. Área de protección de virajes

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP1, considerando una distancia que es igual a la suma de la tolerancia del punto de referencia y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También, hay que tener en cuenta que el área de protección venía ensanchándose con un ángulo de divergencia de  $7,8^\circ$  desde el VOR del aeródromo. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas y la única diferencia existente con las anteriores es que la variable  $y_K$  se reduce a la mitad o/y el ángulo  $\beta_{VOR}$  pasa a ser  $\beta_{VOR_2}$  según el caso.

$$Dist_{SP1-K} = Tol_{ptoRef} + r \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\chi_{VOR} = \chi_{Pista} - \frac{\pi}{180}$$

$$\phi_{K_{cent}} = \phi_{SP1} - \cos(\chi_{VOR}) \times (-Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{K_{cent}} = \lambda_{SP1} - \sin(\chi_{VOR}) \times (-Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\lambda}$$

$$\chi_{SP1-VOR} = \text{atan}\left(\frac{\lambda_{SP1} - \lambda_{VOR}}{\phi_{SP1} - \phi_{VOR}} \cos(\phi_{ARP})\right)$$

$$Dist_{SP1-VOR} = \frac{\phi_{VOR} - \phi_{SP1}}{\cos(\chi_{SP1-VOR}) Esc_{\phi}}$$

$$y_K = \frac{3700}{2} + (Dist_{SP1-VOR} - Dist_{SP1-K}) \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right)$$

$$\beta_{VOR} = \chi_{VOR} + \frac{\pi}{2}$$

$$\beta_{VOR_2} = \chi_{VOR} - \frac{\pi}{2}$$

$$\phi_{K_{int}} = \phi_{K_{cent}} + \cos(\beta_{VOR}) \times y_K \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{K_{int}} = \lambda_{K_{cent}} + \sin(\beta_{VOR}) \times y_K \times Esc_{\lambda}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área secundaria con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP1. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección de BLN. Esta segunda recta comienza a 1850 m de BLN sobre la perpendicular a la aerovía G5 y tiene un ángulo de divergencia de  $7,8^\circ$  hasta alcanzar la semianchura de 14800 m, que se corresponde con la semianchura del área de protección de una estación VOR en ruta. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes.

Una vez alcanzado el punto A del borde interior, el área se sigue ensanchando con el ángulo de divergencia de  $7,8^\circ$  hasta obtener la semianchura de 14800 m a una distancia de 94537 m de BLN. En el caso de A', el área debe reducir su semianchura para alcanzar los 14800 m a la distancia de BLN comentada. A partir de entonces la anchura se mantiene constante hasta CJN, pasando por NASOS e INTAX.

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP1). Esta distancia es el resultado de la suma de la tolerancia del punto de referencia y una tolerancia técnica de vuelo de 6 segundos volando a la velocidad TAS establecida. De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga.

$$Dist_{SP1-A} = Tol_{ptoref} + FTT$$

$$\phi_{A_{cent}} = \phi_{SP1} - \cos(\chi_{VOR}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{cent}} = \lambda_{SP1} - \sin(\chi_{VOR}) \times Dist_{SP1-A} \times Esc_{\lambda}$$

$$y_A = \frac{3700}{2} + (Dist_{SP1-VOR} + Dist_{SP1-A}) \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right)$$

$$\phi_{A_{ext}} = \phi_{A_{cent}} + \cos(\beta_{VOR_2}) \times y_A \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{ext}} = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\beta_{VOR_2}) \times y_A \times Esc_{\lambda}$$

El tramo curvo del borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento. La curva comienza en el punto A' y termina en el punto P' en el que la tangente del área forma un ángulo de  $30^\circ$  con la derrota nominal. En el método de la espiral de viento, el área se basa en un radio de viraje calculado para el valor de la TAS correspondiente y un ángulo de inclinación lateral de  $15^\circ$ . El límite exterior del área de viraje se construye utilizando una espiral derivada del radio de viraje con aire en calma. El método detallado se recoge en el apartado 7.3.1.1.

$$\Omega = g \frac{\tan\left(\frac{15\pi}{180}\right)}{V}$$

$$r_{esp} = \frac{y_A}{2}$$

$$E_{\theta} = \frac{\theta}{\Omega} \times w$$

Obsérvese que, en las expresiones anteriores, se ha asumido un viento de 56 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI para la construcción de espirales de viento en salidas.

Las expresiones empleadas para la implementación serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tiene la espiral definida hasta un valor de  $\theta$  de  $180^\circ$ , es necesario limitarla por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo se calcula teniendo en cuenta que debe ser tangente a la curva y formar un ángulo de  $30^\circ$  con la derrota nominal. De esa forma, para cada punto calculado de la espiral de vientos se determinará una dirección ( $\chi_{tan}$ ) y, posteriormente, se verá cuál de esas direcciones forma un ángulo de  $30^\circ$  con la derrota.

$$\begin{aligned}\phi_b &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{VOR} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\phi \\ \lambda_b &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{VOR} - \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\lambda \\ \phi_{b_1} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{VOR} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\phi \\ \lambda_{b_1} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{VOR} - \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\lambda \\ \phi_{b_2} &= \phi_b + \cos\left(\chi_{VOR} - \theta - \pi/2 + a \sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\phi \\ \lambda_{b_2} &= \lambda_b + \sin\left(\chi_{VOR} - \theta - \pi/2 + a \sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\lambda \\ \chi_{tan}^{i-1} &= \arctan\left(\cos\phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)\end{aligned}$$

Una vez determinado el punto que marca el final del tramo curvo (P'), sólo faltaría por limitar el tramo tangente, es decir, establecer el punto F'. Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de  $30^\circ$  con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada a BLN. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que establecer los parámetros  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para determinar la longitud y la latitud del punto F'.

En cuanto al borde exterior del área secundaria, el tramo curvo empieza en el punto  $A_{ext}$ . A partir de cada punto de la espiral del área primaria, se calcula la dirección de la recta perpendicular a  $\chi_{tan}$  en cada caso, restando a dicha variable un valor de  $\frac{\pi}{2}$  y corrigiendo el resultado en función del cuadrante. El punto P, está, por tanto, a una distancia  $\frac{y_A}{2}$  de P', medida sobre la perpendicular a la tangente a la curva en P.

$$\begin{aligned}\phi_{b_2}^{Sec} &= \phi_{b_2} + \cos\left(\chi_{tan} - \frac{\pi}{2}\right) \times \left(-\frac{y_A}{2}\right) \times Esc\phi \\ \lambda_{b_2}^{Sec} &= \lambda_{b_2} + \sin\left(Pend_{tan} + \frac{\pi}{2}\right) \times \left(-\frac{y_A}{2}\right) \times Esc\lambda\end{aligned}$$

Por último, el punto F coincidiría con P porque, en este caso la paralela al tramo  $\overline{P'F'}$  anterior intersectaría a la recta que delimita el área de protección asociada a BLN en un punto que estaría fuera del área curva. Además, tanto el punto F, como el punto F' se unen a las rectas que marcan el área de protección del VOR correspondiente (BLN), ensanchándose con un ángulo de  $7,8^\circ$  hasta alcanzar la semianchura de los 14800 m propios del tramo en ruta. A partir de entonces, la anchura se mantiene constante hasta CJN.

### 7.3.4 Salida convencional por la pista 28

#### 7.3.4.1 Construcción de la primera área de viraje

A partir de los parámetros definidos en el apartado 4.2.2.2, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 128. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP1, que se define como un punto situado a 15000 del umbral de la cabecera 10 de la pista sobre la derrota paralela al eje de la pista y marcada por el VOR del aeródromo. Las expresiones empleadas son, por tanto, las que se desarrollan en las líneas siguientes.

$$\begin{aligned}\lambda'_{SP1} &= \lambda_{um10} - \sin(\chi_{Pista}) \times (-15000) \times Esc_{\lambda} \\ \lambda_{SP1} &= \lambda_{SP1}' + \sin \beta \times (y_{VOR}) \times Esc_{\lambda} \\ \phi'_{SP1} &= \phi_{um10} - \cos(\chi_{Pista}) \times (-15000) \times Esc_{\phi} \\ \phi_{SP1} &= \phi'_{SP1} + \cos \beta \times (y_{VOR}) \times Esc_{\phi}\end{aligned}$$

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP1, considerando una distancia que es igual a la suma de la tolerancia del punto de referencia y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También hay que tener en cuenta que el área de protección venía ensanchándose con un ángulo de divergencia de  $7,8^\circ$  desde el VOR del aeródromo. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas, pero hay que tener en cuenta que la derrota está desplazada una distancia  $y_{VOR}$  del eje de la pista. A modo de ejemplo, se incluyen las expresiones asociadas al punto  $K_{int}$ .

$$\begin{aligned}Dist_{SP1-K} &= Tol_{PtoRef} + r \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \phi_{K_{cent}} &= \phi_{SP1} - \cos(\chi_{Pista}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{K_{cent}} &= \lambda_{SP1} - \sin(\chi_{Pista}) \times (Dist_{SP1-K}) \times Esc_{\lambda} \\ \chi_{SP1-VOR} &= atan\left(\frac{\lambda_{SP1} - \lambda_{VOR}}{\phi_{SP1} - \phi_{VOR}} \cos(\phi_{ARP})\right) \\ Dist_{SP1-VOR} &= \frac{\phi_{SP1} - \phi_{VOR}}{\cos(\phi_{ARP}) Esc_{\phi}} \\ y_K &= \frac{3700}{2} + (Dist_{SP1-VOR} - Dist_{SP1-K}) \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right) \\ y_{K_{sec_{sup}}} &= m_{15-Sup} \times -(Dist_{K'_{DER}} + 60) + n_{15-Sup} \\ \phi_{K_{int}} &= \phi_{K_{cent}} + \cos \beta \times y_{K_{sec_{sup}}} \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{K_{int}} &= \lambda_{K_{cent}} + \sin \beta \times y_{K_{sec_{sup}}} \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área secundaria con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP1. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determinará la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección de TLD. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Una vez alcanzados los puntos  $A_{int}$  y  $A'_{int}$  (véase la Figura 129), el área se sigue ensanchando con el ángulo de divergencia de  $7,8^\circ$  hasta obtener la semianchura de 14800 m. A partir de entonces, la anchura se mantiene constante.

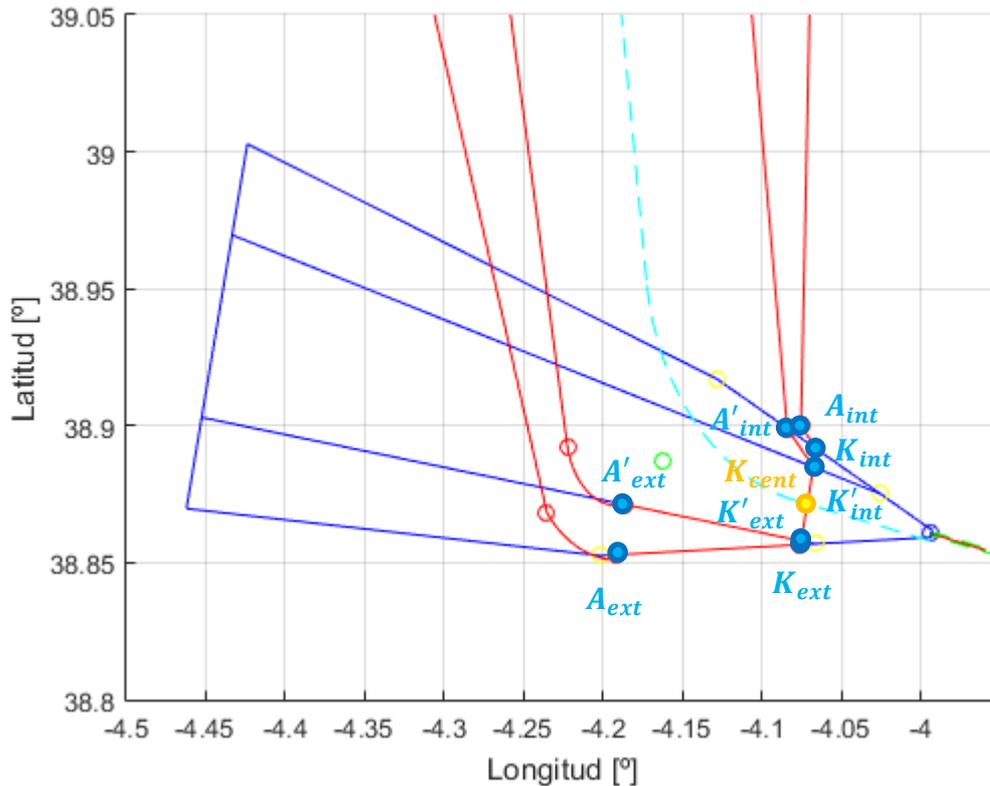


Figura 129. Construcción del borde interior. Primera área de viraje. Pista 28

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP1). Esta distancia es el resultado de la suma de la tolerancia del punto de referencia y una tolerancia técnica de vuelo de 6 segundos volando a la velocidad TAS establecida. De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga. Como puede verse, estas expresiones son idénticas a las de la pista 10.

$$Dist_{SP1-A} = Tol_{ptoRef} + FTT$$

$$\phi_{A_{cent}} = \phi_{SP1} - \cos(\chi_{Pista}) \times (-Dist_{SP1-A}) \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{cent}} = \lambda_{SP1} - \sin(\chi_{Pista}) \times (-Dist_{SP1-A}) \times Esc_{\lambda}$$

$$y_A = \frac{3700}{2} + (Dist_{SP1-VOR} + Dist_{SP1-A}) \times \tan\left(\frac{7,8\pi}{180}\right)$$

$$\phi_{A_{ext}} = \phi_{A_{cent}} + \cos \beta_2 \times y_A \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{ext}} = \lambda_{A_{cent}} + \sin \beta_2 \times y_A \times Esc_{\lambda}$$

El tramo curvo del borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento con un ángulo de inclinación lateral de 15°. La curva comienza en el punto A' y termina en el punto P' en el que la tangente del área forma un ángulo de 30° con la derrota nominal. La metodología seguida y las expresiones empleadas son las mismas que se utilizaron en el apartado 7.3.1.1. Obsérvese que, de nuevo, en las expresiones anteriores se ha asumido un viento de 56 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI [13] para la construcción de espirales de viento en las salidas.

Las expresiones empleadas para la implementación serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tiene la espiral definida hasta un valor de  $\theta$  de 180°, es necesario limitarla por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo se calcula teniendo en cuenta que debe ser tangente a la curva y formar un ángulo de 30° con la derrota nominal. De esa forma, para cada punto calculado de la espiral de vientos se determina una dirección ( $\chi_{tan}$ ) y, posteriormente, se verá cuál de esas direcciones forma un ángulo de 30° con la derrota.

$$\begin{aligned}\phi_b &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{Pista} + \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\phi \\ \lambda_b &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{Pista} + \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\lambda \\ \phi_{b_1} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{Pista} + \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\phi \\ \lambda_{b_1} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{Pista} + \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\lambda \\ \phi_{b_2} &= \phi_b + \cos\left(\chi_{Pista} + \theta - \frac{\pi}{2} - a\sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\phi \\ \lambda_{b_2} &= \lambda_b + \sin\left(\chi_{Pista} + \theta - \frac{\pi}{2} - a\sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\lambda \\ \chi_{tan}^{i-1} &= \arctan\left(\cos\phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)\end{aligned}$$

Una vez determinado el punto que marca el final del tramo curvo (P'), sólo faltaría por limitar el tramo tangente, es decir, establecer el punto F'. Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de 30° con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada al VOR TLD. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que establecer los parámetros  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para determinar la longitud y la latitud del punto F'. Sin embargo, en este caso, el punto F' quedaría dentro del área de protección asociada al VOR. Por tanto, se toma P' = F' y no existirá el tramo tangente.

En cuanto al borde exterior del área secundaria, el tramo curvo empieza en el punto  $A_{ext}$ . A partir de cada punto de la espiral del área primaria, se calcula la dirección de la recta perpendicular a  $\chi_{tan}$  en cada caso, restando a dicha variable un valor de  $\frac{\pi}{2}$  y corrigiendo el resultado en función del cuadrante. El punto P, está, por tanto, a una distancia  $\frac{y_A}{2}$  de P', medida sobre la perpendicular a la tangente a la curva en P.

$$\begin{aligned}\phi_{b_2}^{sec} &= \phi_{b_2} + \cos\left(\chi_{tan} - \frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{y_A}{2}\right) \times Esc\phi \\ \lambda_{b_2}^{sec} &= \lambda_{b_2} + \sin\left(\chi_{tan} - \frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{y_A}{2}\right) \times Esc\lambda\end{aligned}$$

Por último, el punto F, que es igual al punto P, en este caso, es aquel que está situado a una distancia  $\frac{y_A}{2}$  del punto final de la espiral primaria, medida sobre la perpendicular a la tangente de la espiral en ese punto. Además, tanto el punto F, como el punto F' se unen a las rectas que marcan el área de protección del VOR correspondiente (TLD), ensanchándose con un ángulo de 7,8 ° hasta alcanzar la semianchura de los 14800 m propios del tramo en ruta.

### 7.3.4.2 Construcción de la segunda área de viraje

A partir de los parámetros definidos en el apartado 4.2.2.3, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 128. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado SP3, cuya definición viene asociada a la intersección de dos radiales. Las expresiones empleadas son, por tanto, las que se desarrollan en las líneas siguientes. Téngase en cuenta que los puntos HIJ, TLD y VTB vienen determinados por sus coordenadas exactas que se han obtenido a partir de Insignia [5].

$$m_{HIJ-VTB} = \frac{\phi_{HIJ} - \phi_{VTB}}{\lambda_{HIJ} - \lambda_{VTB}}$$

$$n_{HIJ-VTB} = \phi_{HIJ} - m_{HIJ-VTB} \times \lambda_{HIJ}$$

$$m_{SP1-TLD} = \frac{\phi_{SP1} - \phi_{TLD}}{\lambda_{SP1} - \lambda_{TLD}}$$

$$n_{SP1-TLD} = \phi_{SP1} - m_{SP1-TLD} \times \lambda_{SP1}$$

$$\lambda_{SP3} = \frac{n_{HIJ-VTB} - n_{SP1-TLD}}{m_{SP1-TLD} - m_{HIJ-VTB}}$$

$$\phi_{SP3} = m_{SP1-TLD} \times \lambda_{SP3} + n_{SP1-TLD}$$

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de SP3, considerando una distancia que es igual a la suma de la tolerancia del punto de referencia y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También hay que tener en cuenta que el área de protección venía ensanchándose con un ángulo de divergencia de  $7,8^\circ$  desde el VOR del aeródromo. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' pretenden encontrar la intersección de la perpendicular al tramo que precede al viraje que pasa por  $K_{cent}$  con las áreas de protección asociadas a ese tramo, que se están ensanchando con un ángulo de  $7,8^\circ$ .

$$Dist_{SP3-K} = Tol_{ptoRef} + r \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$\chi_{SP1-TLD} = atan \left( \frac{\lambda_{TLD} - \lambda_{SP1}}{\phi_{TLD} - \phi_{SP1}} \cos(\phi_{ARP}) \right)$$

$$\phi_{K_{cent}} = \phi_{SP3} - \cos(\chi_{SP1-TLD}) \times (Dist_{SP3-K}) \times Esc\phi$$

$$\lambda_{K_{cent}} = \lambda_{SP3} - \sin(\chi_{SP1-TLD}) \times (Dist_{SP3-K}) \times Esc\lambda$$

$$m_{TLD12} = \frac{\phi_{TLD2} - \phi_{TLD1}}{\lambda_{TLD2} - \lambda_{TLD1}}$$

$$n_{TLD12} = \phi_{K_{cent}} - m_{TLD12} \times \lambda_{K_{cent}}$$

$$m_{A_{int1}-TLD1} = \frac{\phi_{A_{int1}} - \phi_{TLD1}}{\lambda_{A_{int1}} - \lambda_{TLD1}}$$

$$n_{A_{int1}-TLD1} = \phi_{A_{int1}} - m_{A_{int1}-TLD1} \times \lambda_{A_{int1}}$$

$$\phi_{K_{int}} = \frac{n_{TLD12} - n_{A_{int1}-TLD1}}{m_{A_{int1}-TLD1} - m_{TLD12}}$$

$$\lambda_{K_{int}} = m_{TLD12} \times \phi_{K_{int}} + n_{TLD12}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área secundaria con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP3. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta perpendicular a la derrota que pasa por A'. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Una vez alcanzados los puntos  $A_{int}$  y  $A'_{int}$  (véase la Figura 130), estos puntos se unirán a  $VTB_1$  y  $VTB_1'$ , que es donde se alcanza la semianchura de 14800 m, propia de la protección en ruta asociada a estaciones VOR.

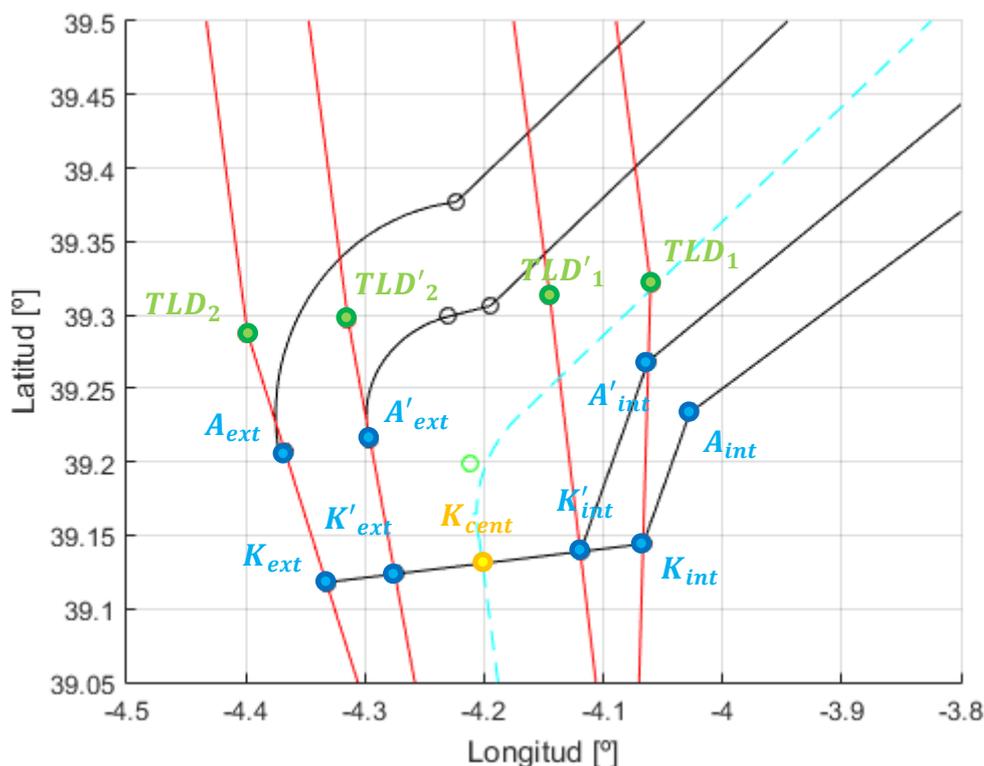


Figura 130. Construcción del borde interior. Segunda área de viraje. Pista 28

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (SP3). Esta distancia es el resultado de la suma de la tolerancia del punto de referencia y una tolerancia técnica de vuelo de 6 segundos volando a la velocidad TAS establecida. De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga. Como puede observarse la metodología empleada es idéntica a la que se usó para los puntos K.

$$Dist_{SP1-A} = Tol_{ptoRef} + FTT$$

$$\phi_{A_{cent}} = \phi_{SP3} - \cos(\chi_{SP1-TLD}) \times (-Dist_{SP3-A}) \times Esc_{\phi}$$

$$\lambda_{A_{cent}} = \lambda_{SP3} - \sin(\chi_{SP1-TLD}) \times (-Dist_{SP3-A}) \times Esc_{\lambda}$$

$$m_{SP3-A} = m_{SP1-SP3}$$

$$n_{SP3-A} = \phi_{A_{cent}} - m_{SP3-A} \times \lambda_{A_{cent}}$$

$$\phi_{A_{ext}} = \frac{n_{SP3-A} - n_{A_{ext1-TLD2}}}{m_{A_{ext1-TLD1}} - m_{SP3-A}}$$

$$\lambda_{A_{ext}} = m_{SP3-A} \times \phi_{A_{ext}} + n_{SP3-A}$$

El tramo curvo del borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento con un ángulo de inclinación lateral de 15°. La curva comienza en el punto A' y termina en el punto P' en el que la tangente al área forma un ángulo de 30° con la derrota nominal. La metodología seguida y las expresiones empleadas son las mismas que se utilizaron en el apartado 7.3.1.1. Obsérvese que, de nuevo, en las expresiones anteriores se ha asumido un viento de 56 km/h que es el que recomienda el Documento 8168 de OACI [13].

Las expresiones empleadas para la implementación serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tiene la espiral definida hasta un valor de  $\theta$  de 180°, es necesario limitarla por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo debe ser tangente a la curva y formar un ángulo de 30° con la derrota nominal. De esa forma, para cada punto calculado de la espiral de vientos se determina la dirección  $\chi_{tan}$  y se verá cuál de esas direcciones forma un ángulo de 30° con la derrota.

$$\phi_b = \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{SP1-TLD} + \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\phi$$

$$\lambda_b = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{SP1-TLD} + \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\lambda$$

$$\phi_{b_1} = \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{SP1-TLD} + \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\phi$$

$$\lambda_{b_1} = \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{SP1-TLD} + \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\lambda$$

$$\phi_{b_2} = \phi_b + \cos\left(\chi_{SP1-TLD} + \theta - \pi/2 - a \sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\phi$$

$$\lambda_{b_2} = \lambda_b + \sin\left(\chi_{SP1-TLD} + \theta - \pi/2 - a \sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\lambda$$

$$\chi_{tan}^{i-1} = \arctan\left(\cos\phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)$$

Una vez determinado el punto que marca el final del tramo curvo (P'), sólo faltaría por limitar el tramo tangente, es decir, establecer el punto F'. Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de 30° con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada a VTB. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que determinar  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para calcular la longitud y la latitud del punto F'.

En cuanto al borde exterior del área secundaria, el tramo curvo empieza en el punto  $A_{ext}$ . A partir de cada punto de la espiral del área primaria, se calcula la dirección de la recta perpendicular a  $\chi_{tan}$  en cada caso, restando a dicha variable un valor de  $\frac{\pi}{2}$  y corrigiendo el resultado en función del cuadrante. El punto P, está, por tanto, a una distancia  $\frac{Y_A}{2}$  de P', medida sobre la perpendicular a la tangente a la curva en P.

$$\phi_{b_2}^{Sec} = \phi_{b_2} + \cos\left(\chi_{tan} - \frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{Y_A}{2}\right) \times Esc\phi$$

$$\lambda_{b_2}^{Sec} = \lambda_{b_2} + \sin\left(\chi_{tan} - \frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{Y_A}{2}\right) \times Esc\lambda$$

Por último, el punto F que, en este caso coincide con el punto P, viene dado por la intersección de la curva "concéntrica" a la espiral de viento con la recta que delimita el área secundaria de protección del tramo posterior al viraje, asociada a VTB. El método de cálculo de esta intersección vuelve a ser el empleado en los apartados anteriores, basado en  $m$  y  $n$ .

### 7.3.4.3 Construcción de la tercera área de viraje

A partir de los parámetros definidos en el apartado 4.2.2.4, se determinan los bordes interior y exterior del viraje, tanto de las áreas primarias, como de las secundarias. Lo primero que es necesario definir son los puntos K y K' de la Figura 128. Las coordenadas de los mismos se establecen a partir de las coordenadas del punto de viraje, denominado VTB, cuya definición viene asociada a coordenadas exactas que se han obtenido a partir de Insignia [5].

Por tanto, los puntos K y K' se calculan a partir de las coordenadas de VTB, considerando una distancia que es igual a la suma de la tolerancia del punto de referencia y de una distancia  $r \tan \frac{\alpha}{2}$  que marca el inicio del viraje. También hay que tener en cuenta que el área de protección presenta una anchura constante, ya que se ha alcanzado los 14800 m de semianchura de los tramos en ruta en el tramo anterior. De esa forma, las expresiones siguientes definen el punto K del borde interior. Las expresiones que definen el punto K del borde exterior y los puntos K' de ambos bordes son completamente análogas y la única diferencia existente con las anteriores es que la variable  $y_K$  se reduce a la mitad o/y  $\beta_{HIJ-VTB}$  pasa a ser  $\beta_{HIJ-VTB_2}$  según el caso.

$$\begin{aligned}\chi_{HIJ-VTB} &= \text{atan} \left( \frac{\lambda_{VTB} - \lambda_{SP3}}{\lambda_{VTB} - \phi_{SP3}} \cos(\phi_{ARP}) \right) \\ \beta_{HIJ-VTB} &= \chi_{HIJ-VTB} + \frac{\pi}{2} \\ \beta_{HIJ-VTB_2} &= \chi_{HIJ-VTB} - \frac{\pi}{2} \\ Dist_{VTB-K} &= Tol_{ptoRef} + r \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right) \\ \phi_{K_{cent}} &= \phi_{VTB} - \cos(\chi_{HIJ-VTB}) \times (Dist_{VTB-K}) \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{K_{cent}} &= \lambda_{VTB} - \sin(\chi_{HIJ-VTB}) \times (Dist_{VTB-K}) \times Esc_{\lambda} \\ y_K &= 14800 \\ \phi_{K_{int}} &= \phi_{K_{cent}} - \cos(\beta_{HIJ-VTB}) \times y_K \times Esc_{\phi} \\ \lambda_{K_{int}} &= \lambda_{K_{cent}} - \sin(\beta_{HIJ-VTB}) \times y_K \times Esc_{\lambda}\end{aligned}$$

A continuación, se definen los puntos A y A' del borde interior. Para el punto A', se necesita encontrar la intersección del borde interior del área secundaria con la recta que parte del punto K' del borde interior y forma un ángulo  $\frac{\alpha}{2}$  con la derrota que hay que seguir una vez se complete el viraje. La metodología utilizada para calcular esa intersección es la misma que se usaba para la determinación del punto SP3 del caso anterior. Es decir, se calculan los parámetros  $m$  y  $n$  de ambas rectas y se determina la latitud y la longitud del punto en cuestión a partir de ellos.

Por su parte, el punto A del borde interior se determina a partir de la intersección de la paralela al borde interior del área primaria que pasa por el punto  $K_{int}$  y la recta que describe el límite del área secundaria asociada a la protección del tramo siguiente. Esta segunda recta comienza a 14800 m de VTB sobre la perpendicular a la aerovía R10 y mantiene esa anchura constante hasta CJN. La metodología asociada al cálculo de la intersección es la misma que en los casos anteriores, es decir, a partir de los parámetros  $m$  y  $n$  de las rectas correspondientes. Una vez alcanzados los puntos  $A_{int}$  y  $A'_{int}$ , el área mantiene la semianchura de 14800 m constante.

En cuanto al borde exterior, la definición de los puntos A y A' se establece a partir de una cierta distancia del punto de viraje (VTB). Esta distancia es el resultado de la suma de la tolerancia del punto de referencia y una tolerancia técnica de vuelo de 6 segundos volando a la velocidad TAS establecida. De esa manera, se tienen las siguientes expresiones, en las que se muestra la definición de A, siendo la de A' análoga.

$$\begin{aligned}
Dist_{VTB-A} &= Tol_{ptoRef} + FTT \\
\phi_{A_{cent}} &= \phi_{VTB} + \cos(\chi_{HIJ-VTB}) \times (Dist_{SP1-A}) \times Esc\phi \\
\lambda_{A_{cent}} &= \lambda_{VTB} + \sin(\chi_{HIJ-VTB}) \times (-Dist_{SP1-A}) \times Esc\lambda \\
y_A &= 14800 \\
\phi_{A_{ext}} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\beta_{HIJ-VTB_2}) \times y_A \times Esc\phi \\
\lambda_{A_{ext}} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\beta_{HIJ-VTB_2}) \times y_A \times Esc\lambda
\end{aligned}$$

El tramo curvo del borde exterior del área primaria se construye con el método de la espiral de viento con un ángulo de inclinación lateral de 15°. La curva comienza en el punto A' y termina en el punto P' en el que la tangente al área forma un ángulo de 30° con la derrota nominal. La metodología seguida y las expresiones empleadas son las mismas que se utilizaron en el apartado 7.3.1.1. Obsérvese que, de nuevo, en las expresiones anteriores se ha asumido un viento de 56 km/h que es el que recomienda la OACI para la construcción de espirales de viento en las salidas.

Las expresiones empleadas para la implementación serían las que se expresan en las líneas siguientes. Bien es cierto que una vez se tiene la espiral definida hasta un valor de  $\theta$  de 180°, es necesario limitarla por el tramo recto que terminaría de definir el área de viraje. Este tramo debe ser tangente a la curva y formar un ángulo de 30° con la derrota nominal. Por tanto, se calcula de forma análoga a la de los casos anteriores.

$$\begin{aligned}
\phi_b &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{HIJ-VTB} + \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\phi \\
\lambda_b &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{HIJ-VTB} + \theta - \pi/2) \times r_{esp} \times Esc\lambda \\
\phi_{b_1} &= \phi_{A_{cent}} + \cos(\chi_{HIJ-VTB} + \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\phi \\
\lambda_{b_1} &= \lambda_{A_{cent}} + \sin(\chi_{HIJ-VTB} + \theta - \pi/2) \times (r_{esp} + E_\theta) \times Esc\lambda \\
\phi_{b_2} &= \phi_b + \cos\left(\chi_{HIJ-VTB} + \theta - \pi/2 - a\sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\phi \\
\lambda_{b_2} &= \lambda_b + \sin\left(\chi_{HIJ-VTB} + \theta - \pi/2 - a\sin\left(\frac{W}{V}\right)\right) \times E_\theta \times Esc\lambda \\
\chi_{tan}^{i-1} &= \arctan\left(\cos\phi_{ARP} \frac{\lambda_{b_2}^i - \lambda_{b_2}^{i-1}}{\phi_{b_2}^i - \phi_{b_2}^{i-1}}\right)
\end{aligned}$$

Una vez determinado el punto que marca el final del tramo curvo (P'), sólo faltaría por limitar el tramo tangente, es decir, establecer el punto F'. Este punto se calcula como la intersección de la recta tangente a la curva que forma un ángulo de 30° con la derrota nominal y la recta que delimita el área primaria de protección asociada al VOR VTB. La metodología seguida para el cálculo de dicha intersección es la misma que se empleó anteriormente, es decir, hay que establecer los parámetros  $m$  y  $n$  de cada recta y utilizarlos para determinar la longitud y la latitud del punto F'.

Sin embargo, debido al ángulo diminuto que presenta el viraje, el punto F' quedaría más alejado de la derrota nominal que el punto P'. Por ello, se opta por determinar que F' esté en el mismo punto que P' y que, por tanto, no exista tramo recto tangente al curvo.

En cuanto al borde exterior del área secundaria, el tramo curvo empezará en el punto  $A_{ext}$ . A partir de cada punto de la espiral del área primaria, se calcula la dirección de la recta perpendicular a  $\chi_{tan}$  en cada caso, restando a dicha variable un valor de  $\frac{\pi}{2}$  y corrigiendo el resultado en función del cuadrante. Es decir, la metodología y las expresiones empleadas son idénticas a las del caso anterior.

Por último, el punto F se calcularía como aquel que está situado a una distancia de F' de 7400 m sobre la perpendicular a la derrota. Por su parte, el punto P es el más cercano a F que pertenezca a la curva. Además, tanto el punto F, como el punto F' se unen a las rectas que marcan el área de protección del VOR correspondiente (VTB). A partir de entonces, la anchura se mantiene constante hasta CJN.

## ANEXO IV: Perfiles de elevación del terreno

### 7.4.1 Salida por la pista 10

En este anexo se incluyen varias muestras de la inspección visual realizada en el terreno cercano al aeropuerto de Ciudad Real y que ha servido para establecer un límite de extensión para la OIS en la salida por la pista 10.

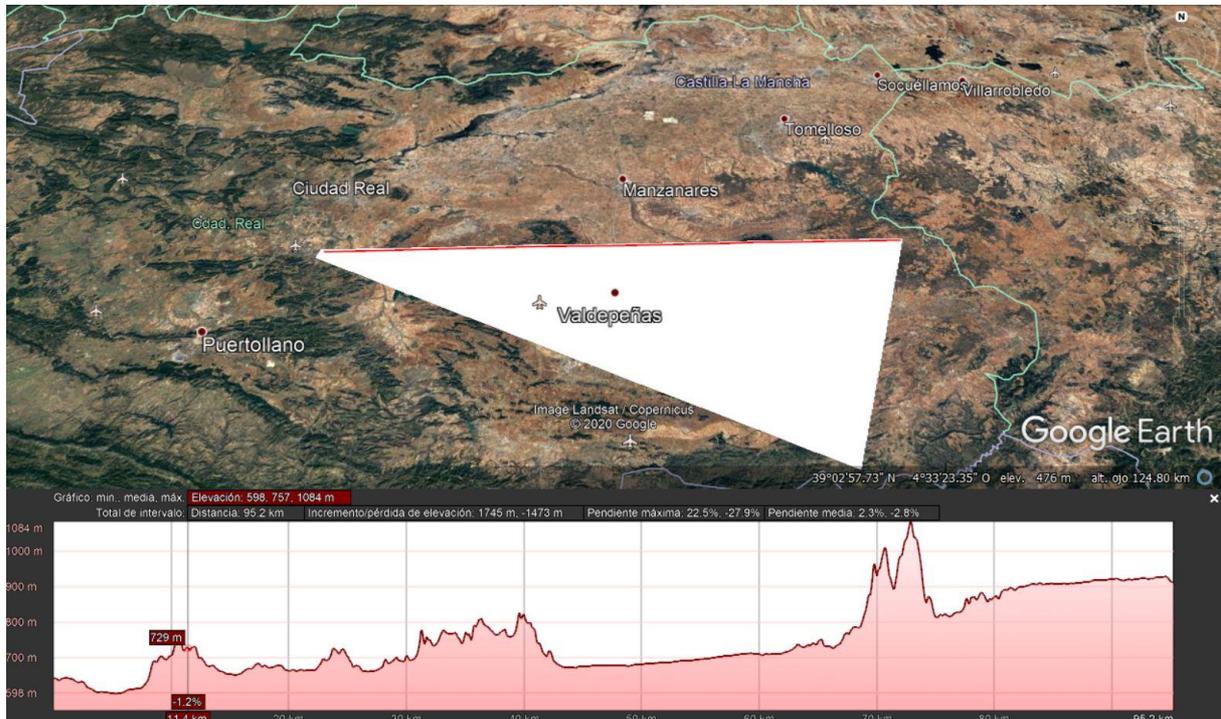


Figura 131. Perfil de elevación del terreno (II). Salida por la pista 10

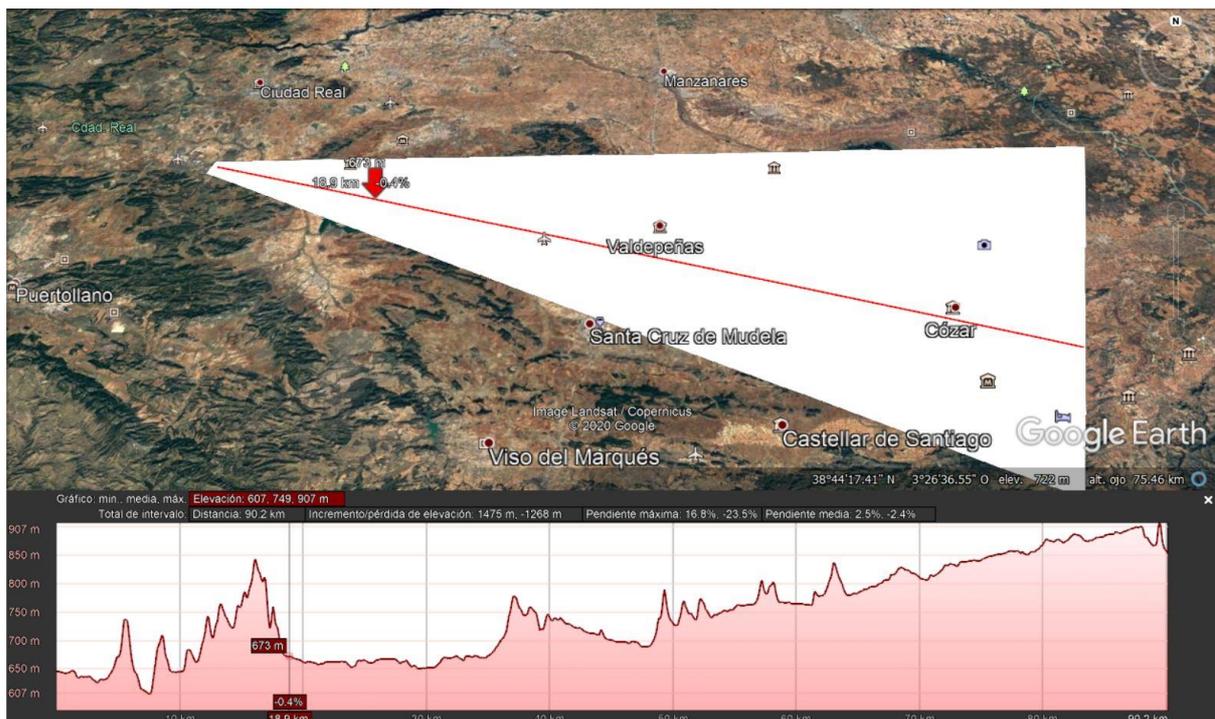


Figura 132. Perfil de elevación del terreno (III). Salida por la pista 10

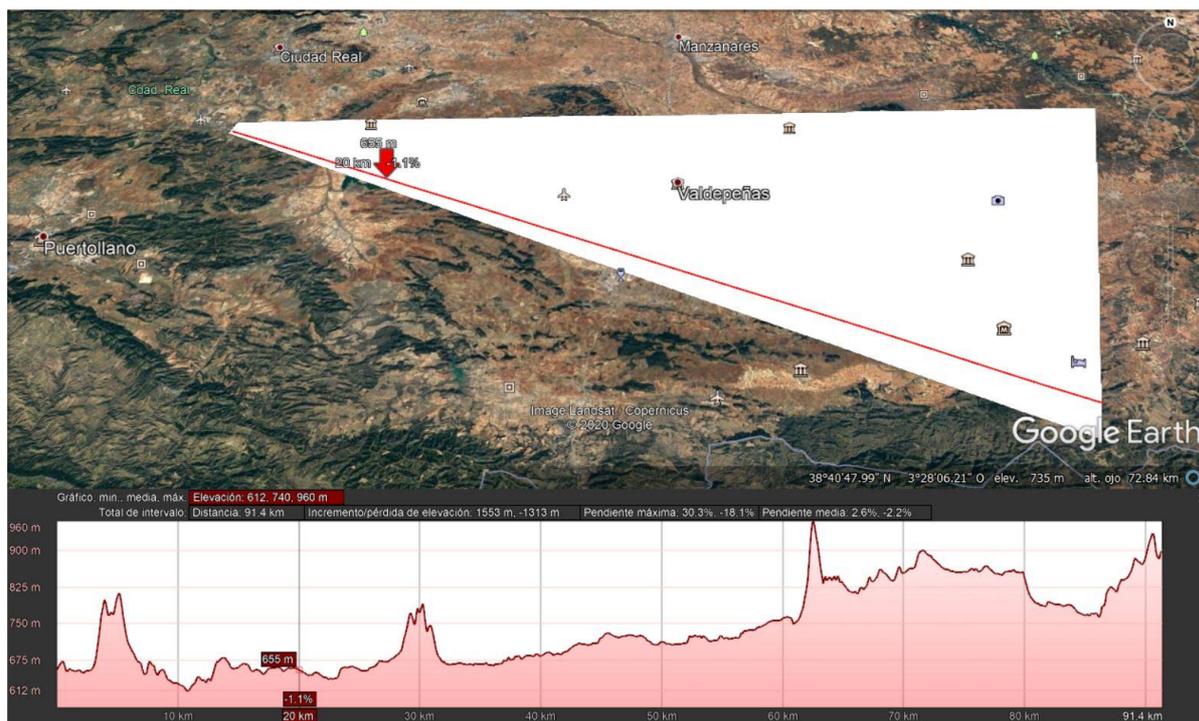


Figura 133. Perfil de elevación del terreno (IV). Salida por la pista 10

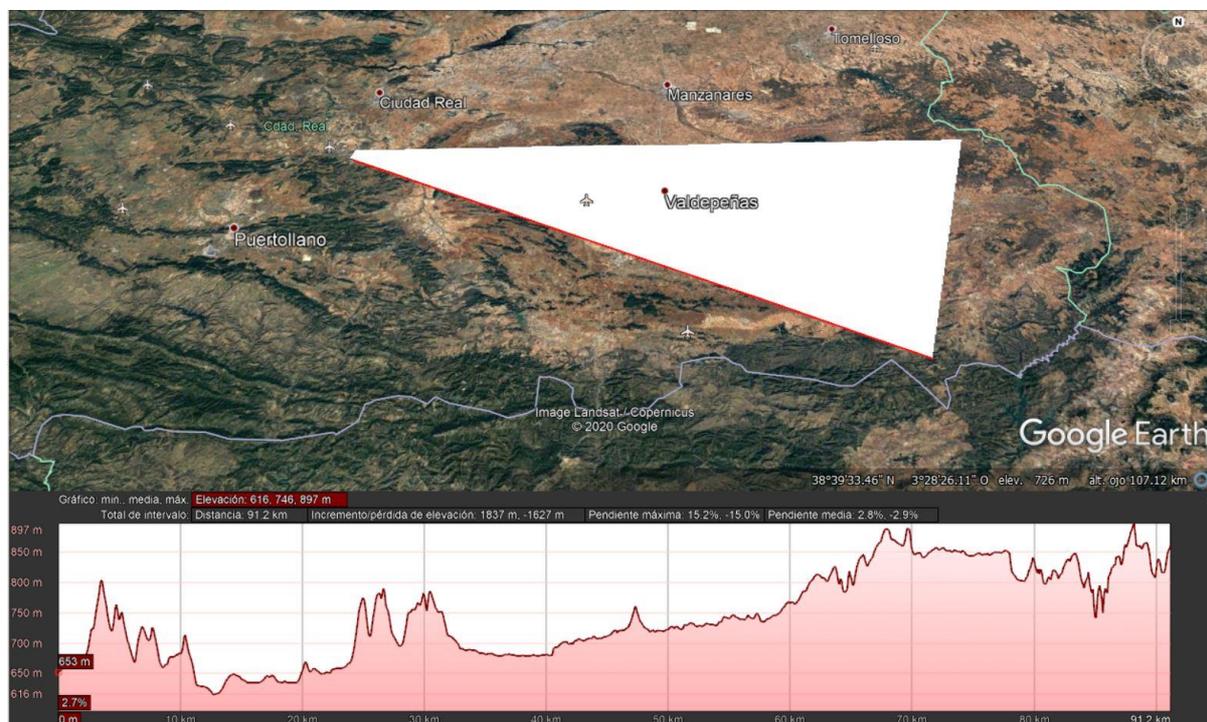


Figura 134. Perfil de elevación del terreno (V). Salida por la pista 10

### 7.4.2 Salida por la pista 28

En este anexo se incluyen varias muestras de la inspección visual realizada en el terreno cercano al aeropuerto de Ciudad Real y que ha servido para establecer un límite de extensión para la OIS en la salida por la pista 28.

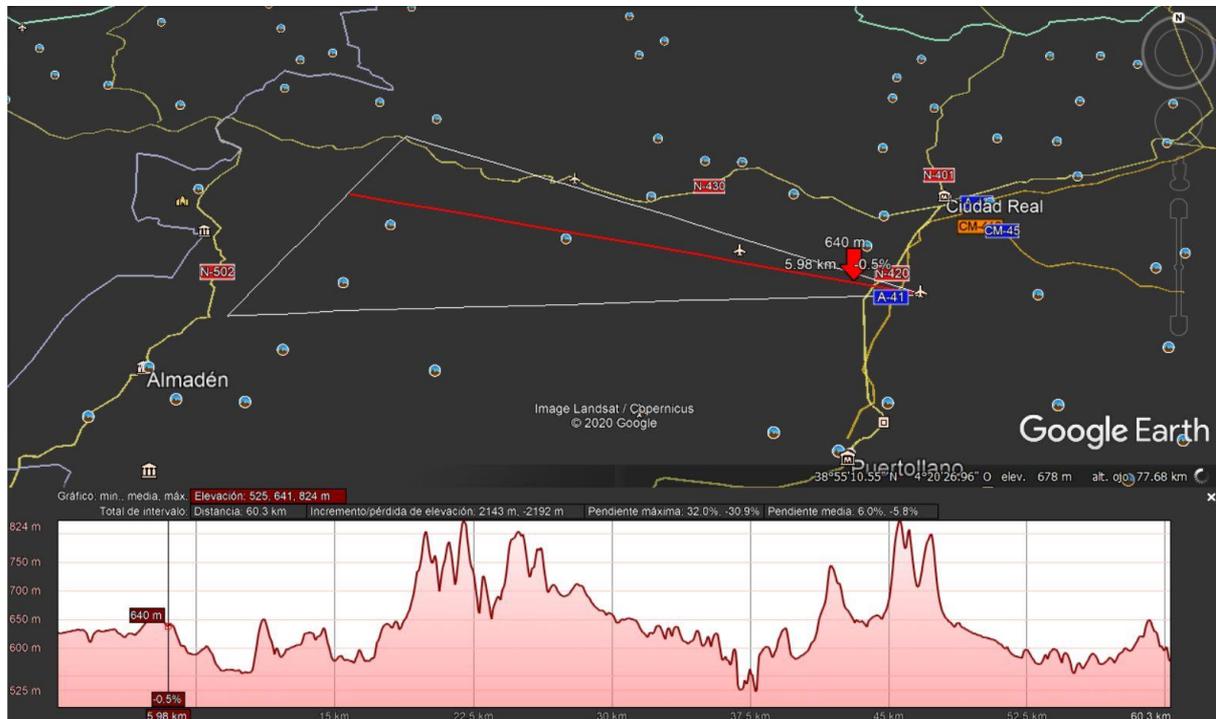


Figura 135. Perfil de elevación del terreno (II). Salida por la pista 28

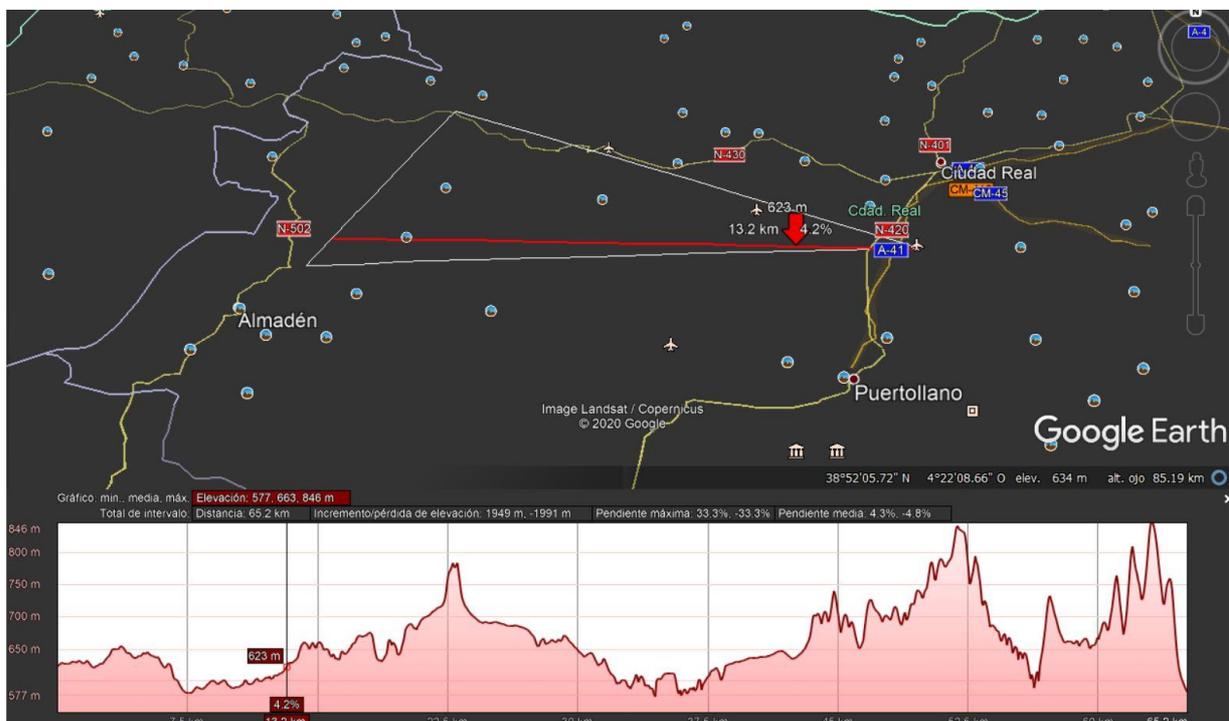


Figura 136. Perfil de elevación del terreno (III). Salida por la pista 28

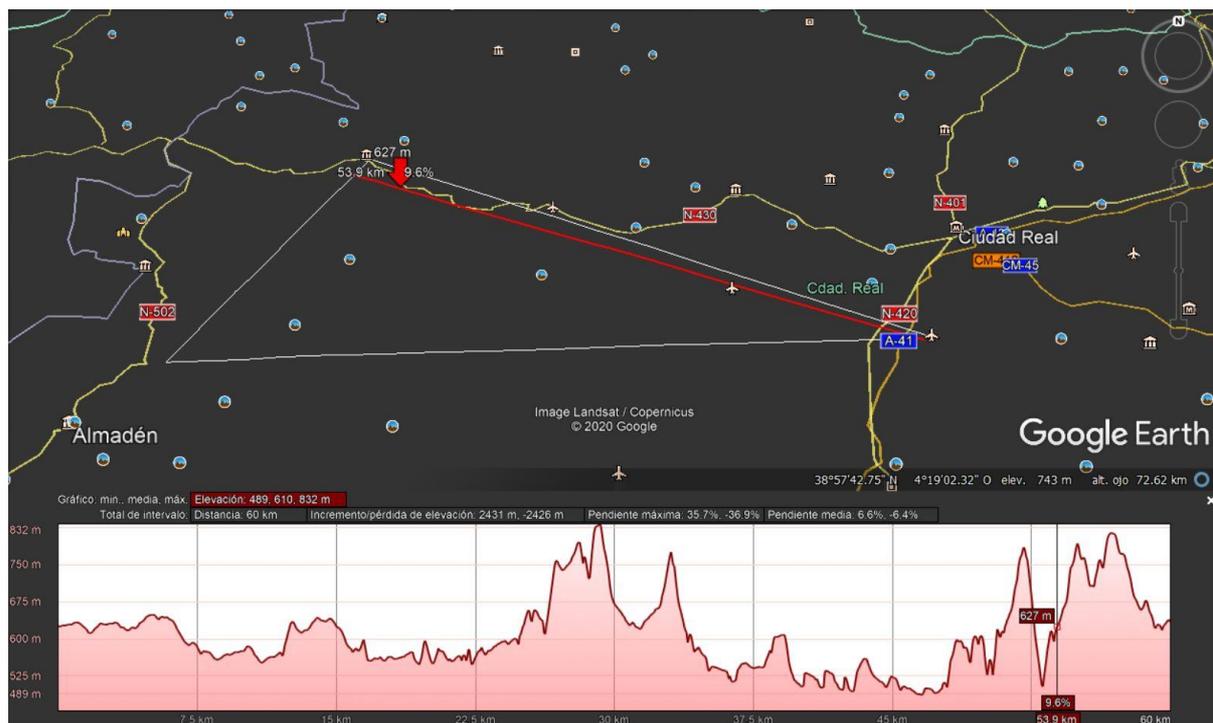


Figura 137. Perfil de elevación del terreno (IV). Salida por la pista 28