



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño de procedimientos de aproximación instrumentales
con guiado vertical en el aeropuerto de La Palma.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Moya Company, Joan

Tutor/a: Yuste Pérez, Pedro

Cotutor/a: Vila Carbó, Juan Antonio

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

**DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS
DE APROXIMACIÓN
INSTRUMENTALES CON GUIADO
VERTICAL EN EL AEROPUERTO
DE LA PALMA**



CURSO 2021/2022

Autor: Joan Moya Company

Tutor: Pedro Yuste Pérez

Cotutor: Juan Antonio Vila Carbó

TABLA DE CONTENIDO

PARTE I MEMORIA.....	13
1. Introducción.....	14
2. Aeropuerto de La Palma	15
2.1 Infraestructura actual.....	16
2.2 Procedimientos actuales.....	17
2.3 Tráfico y flota.....	17
2.4 Meteorología	18
2.4.1 Viento del Norte y Noreste	18
2.4.2 Viento del Este y Sudeste	19
2.4.3 Vientos del Sur.....	20
2.4.4 Vientos del Sudoeste.....	20
2.4.5 Vientos del Oeste	21
2.4.6 Vientos del Noroeste	21
3. PBN.....	22
3.1 Especificaciones RNAV y RNP.....	24
3.2 GNSS básico.....	25
3.3 Sistemas de aumentación de GNSS.....	27
3.4 EGNOS.....	28
4. Propuesta de procedimientos de aproximaciones para el aeropuerto de La Palma	30
4.1 Aproximación APV-SBAS.....	30
4.1.1 Generalidades	30
4.1.2 Tramo APV: VPA 3°	31
4.1.3 Tramo APV: VPA 3,5°	38
4.1.4 Aproximación intermedia	41
4.1.5 Aproximación inicial	42
4.1.6 Protección de virajes de paso.....	43
4.1.7 Aproximación frustrada.....	46
4.1.8 Aproximación frustrada con viraje.....	47

4.1.9	Protección para el tramo visual.....	51
4.2	Señal de EGNOS en La Palma	52
4.2.1	Disponibilidad SIS	52
4.2.2	Disponibilidad APV-I.....	53
4.2.3	Continuidad APV-I.....	54
4.2.4	Integridad APV-I.....	54
4.2.5	Precisión APV-I.....	54
4.3	Aproximación APV-BARO.....	55
4.3.1	Generalidades	55
4.3.2	Protección para el tramo visual.....	55
4.3.3	Área de Aproximación visual (en circuito).....	56
4.3.4	Tramo APV: VPA 3°	58
4.3.5	OAS APV-BARO	60
4.3.6	Tramo APV: VPA 3,5°	63
4.3.7	Aproximación intermedia	67
4.3.8	Aproximación inicial	68
4.3.9	Aproximación frustrada.....	68
4.4	Solución alternativa: aproximación LNAV.....	71
4.4.1	Protección para el tramo visual.....	71
4.4.2	Aproximación final.....	71
4.4.3	Aproximación intermedia	72
4.4.4	Aproximación inicial	73
4.4.5	Aproximación frustrada.....	74
4.5	Circuitos de espera asociados.....	76
4.6	Resultados.....	77
5.	Conclusiones.....	78
6.	Anexo: funciones de MATLAB.....	80
6.1	APV-SBAS.....	80
6.1.1	Constantes_OAS	80
6.1.2	Rotacion_OAS.....	80
6.1.3	Coord_OAS	81
6.1.4	Superficies	81

6.1.5	OpenKml	82
6.2	Obstáculos de APV-SBAS.....	82
6.2.1	Extract_data.....	82
6.2.2	Kmlfiles	83
6.2.3	Rotacion_OBST	83
6.2.4	Comparacion	83
6.2.5	Ordenar_elevacion	84
6.3	Maniobra visual (en circuito)	84
6.3.1	CircuitoVisual	84
6.3.2	Rotacion_CIRC	85
6.3.3	Comparacion_CIRC y Comparacion_CIRC_restriccion.....	85
6.4	APV-BARO.....	85
6.4.1	Calculo_FAP.....	86
6.4.2	Calculo_FAS.....	86
6.4.3	Vertical_path_final	87
6.4.4	Areas_final	87
6.4.5	Areas_ground	87
PARTE II: PRESUPUESTO		89
1.	Horas de trabajo.....	90
2.	Software.....	91
3.	Hardware.....	92
4.	Costes indirectos	93
5.	Coste total.....	94
PARTE III: PLIEGO DE CONDICIONES.....		95
5.1	Especificaciones de aeronave y tripulación	96
5.2	Compatibilidad con procedimientos existentes	96
5.3	Especificaciones de diseño.....	97
5.4	Otras consideraciones.....	97
PARTE IV: CARTAS.....		98
BIBLIOGRAFÍA.....		106

Abreviaturas

ABAS	Aircraft-Based Augmentation System
AEMET	Agencia Estatal De Meteorología
AIP	Aeronautical Information Publication
AL	Alert Llimit
APV	Approach Procedures With Vertical Guidance
ASDA	Accelerate Stop Distance Available
ATT	Along Track Tolerance
CDA	Continuous Descent Arrival
CFIT	Controlled Flight Into Terrain
DF	Direct to Fix
DME	Distance Measuring Equipment
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESSP	European Satellite Services Provider
ETSO	European Technical Standard Orders
EWAN	Egnos Wide Area Network
FAF	Final Approach Fix
FAP	Final Approach Point
FAS	Final Approach Surface
FDE	Failure Detection And Exclusion
GAGAN	Gps Aided Geo Augmented Navigation System
GARP	Gbas Approach Reference Point
GBAS	Ground Based Augmentation System
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GP	Glide Path
GPS	Global Positioning System
HL	Height Loss
HNSE	Horizontal Navigation System Error
HSI	Horizontal Safety Index
IAF	Initial Approach Fix
IAS	Indicated Air Speed
IF	Intermediate Fix
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
ISA	International Standard Atmosphere
LDA	Landing Distance Available
LLA	Latitude Longitude Altitude
LNAV	Lateral Navigation
LP	Localizer Performance
LPV	Localizer Performance with Vertical Guidance
LTP	Landing Threshold Point

MAHF	Missed Approach Holding Fix
MAPt	Missed Approach Point
MATF	Missed Approach Turning Fix
MCC	Mission Control Centre
MOC	Minimum Obstacle Clearance
MOPS	Minimum Operational Performance Standards
MSAS	Mtsat Augmentation System
NDB	Non-Directional Beacon
NED	North East Down
NLES	Navigation Land Earth Station
NOTAM	Notice To Airmen
NPA	Non-Precision Approach
NSE	Navigation System Error
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OAS	Obstacle Assessment surface
OCA	Obstacle Clearance Altitude
OCH	Obstacle Clearance Height
OCS	Obstacle Clearance Surface
PBN	Performance Based Navigation
PL	Protection Level
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RDH	Reference Datum Height
RIMS	Ranging And Integrity Monitoring Station
RNAV	Area Navigation
RNP	Required Navigation Performance
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
RVR	Runway Visual Range
SARPs	Standards And Recommended Practices
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring
SIB	Safety Information Bulletin
SID	Standard Instrument Departure
SIS	Signal In Space
SOC	Start Of Climb
SSD	Service Definition Document
STAR	Standard Instrument Arrival
TAS	True Airspeed
TODA	Take-Off Distance Available
TORA	Take-Off Runway Available
TP	Turning Point
UTC	Coordinated Universal Time
VAC	Visual Approach Chart
VHF	Very High Frequency
VNAV	Vertical Navigation
VOR	Very High Frequency Omnidirectional Range
VPA	Vertical Path Angle

VSI	Vertical Safety Index
VNSE	Vertical Navigation System Error
VSS	Visual Segment Surface
WAAS	Wide Area Augmentation System

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Ubicación del Aeropuerto de La Palma.....	15
Ilustración 2. Imagen aérea del Aeropuerto de La Palma.	16
Ilustración 3. Sistema de luces de obstáculos.....	17
Ilustración 4. Vientos del noreste.....	19
Ilustración 5. Calima ocasionada por vientos del sudeste.	20
Ilustración 6. Situación en La Palma con vientos del oeste.	21
Ilustración 7. Navegación convencional a la izquierda, navegación basada en prestaciones a la derecha.....	22
Ilustración 8. Especificaciones RNP y RNAV.	24
Ilustración 9. Medición de una posición durante 12 horas, datos cada 30 segundos.....	26
Ilustración 10. Esquema de GBAS.....	28
Ilustración 11. Esquema de funcionamiento de EGNOS.	29
Ilustración 12. Sistema de coordenadas OAS.	31
Ilustración 13. Captura del software de PANS-OPS para el cálculo de las OAS.	32
Ilustración 14. OAS de categoría D para un VPA de 3°.....	33
Ilustración 15. OAS de categoría D extendidas hasta el FAP.....	34
Ilustración 16. Rotación de ejes.....	35
Ilustración 17. Ecuación de un plano a cada lado del mismo.....	35
Ilustración 18. Posición de los obstáculos más elevados, N.º 1218 y 1219 en aproximación frustrada y 346 en aproximación. La flecha amarilla indica la vista de la Ilustración 19.	36
Ilustración 19. Situación de los obstáculos más elevados.	36
Ilustración 20. Posición del obstáculo determinante, N.º 346. La flecha amarilla indica la vista de la Ilustración 21.....	37
Ilustración 21. Posición del obstáculo determinante.....	37
Ilustración 22. OAS de categoría D extendidas hasta el FAP.....	39
Ilustración 23. Posición de los obstáculos más elevados. Los cuatro primeros de la Tabla 17 coinciden con el caso de VPA de 3,5°.....	39

Ilustración 24. Esquema de las áreas primaria y secundaria.....	41
Ilustración 25. Enlace entre la aproximación final y aproximación intermedia.	41
Ilustración 26. Aproximación intermedia en 3D, con una longitud de 19 km.	42
Ilustración 27. Posición del viraje del tramo inicial.	42
Ilustración 28. Procedimiento para construir la espiral de viento.	44
Ilustración 29. Procedimiento para construir un viraje de paso.....	45
Ilustración 30. Construcción del viraje de paso para categoría D.	45
Ilustración 31. Aproximación inicial, 2D, AutoCAD.....	46
Ilustración 32. Aproximación inicial, 3D, Google Earth.....	46
Ilustración 33. Franqueamiento de obstáculos en aproximación frustrada en línea recta.....	47
Ilustración 34. Aproximación frustrada en línea recta.	47
Ilustración 35. Procedimiento para calcular un viraje en aproximación frustrada.....	49
Ilustración 36. Viraje de sobrevuelo en aproximación frustrada para categoría D.	50
Ilustración 37. Aproximación frustrada, hasta el IAF NASOL.	50
Ilustración 38. Superficie con pendiente igual a la pendiente de frustrada, situada 50 m por debajo del procedimiento.	51
Ilustración 39. Procedimiento APV-SBAS completo en 2D.....	51
Ilustración 40. VSS para una aproximación APV.	52
Ilustración 41. VSS para la aproximación APV-SBAS en La Palma.....	52
Ilustración 42. Disponibilidad APV-I en los últimos 6 meses en La Palma. 53	
Ilustración 43. Continuidad APV-I en los últimos 6 meses en La Palma.....	54
Ilustración 44. VSS para la aproximación APV-BARO con VPA de 3º en La Palma.....	56
Ilustración 45. Maniobra visual para categoría D.....	57
Ilustración 46. Límite de la zona en la que se ignoran los obstáculos en el cálculo de la OCA/H.	58
Ilustración 47. Geometría de las OAS APV-BARO.	62

Ilustración 48. OAS APV-BARO en La Palma.	63
Ilustración 49. OAS APV-BARO en La Palma. VPA de 3,5°.	64
Ilustración 50. Superficie Z en línea recta con VPA de 3,5°.	65
Ilustración 51. Obstáculos que penetran la superficie Z.	66
Ilustración 52. OAS APV-BARO en La Palma. VPA de 3,5° y procedimiento desplazado 15°.	66
Ilustración 53. Enlace de áreas de diferente anchura en APV-BARO.	67
Ilustración 54. Aproximación intermedia con viraje en el IF.	67
Ilustración 55. Aproximación inicial e intermedia, vista 2D.	68
Ilustración 56. Aproximación inicial e intermedia, vista 3D.	68
Ilustración 57. Viraje de aproximación frustrada en el MAPt seguido de un tramo DF.	70
Ilustración 58. Aproximación frustrada para APV-BARO con VPA de 3° en La Palma.	70
Ilustración 59. VSS para una aproximación desplazada 15°.	71
Ilustración 60. Distancia mínima a la que el eje del procedimiento cruza la prolongación del eje de pista.	72
Ilustración 61. Aproximación final, procedimiento LNAV desplazado 15°... ..	72
Ilustración 62. Aproximación intermedia, procedimiento LNAV desplazado 15°.	73
Ilustración 63. Aproximación inicial, procedimiento LNAV desplazado 15°. 73	
Ilustración 64. Obstáculo determinante para el procedimiento LNAV, vista cenital.	74
Ilustración 65. Obstáculo determinante para el procedimiento LNAV.	74
Ilustración 66. En rojo, zona afectada por obstáculos en el viraje de aproximación frustrada.	75
Ilustración 67. Obstáculos que superan la superficie de aproximación frustrada en el viraje.	75
Ilustración 68. Aproximación frustrada para el procedimiento LNAV.	76

Lista de tablas

Tabla 1. Características físicas de la pista.	16
Tabla 2. Requerimientos de performance de OACI.	27
Tabla 3. XTT, ATT y semianchura del área para RNP APCH (aviones) en las fases de vuelo de aproximación inicial/intermedia/final/frustrada (m).	31
Tabla 4. Velocidades de viraje máximas dentro de un radio de 10 NM del aeropuerto de La Palma.....	31
Tabla 5. Constantes OAS de categorías A y B para un VPA de 3°.....	33
Tabla 6. Constantes OAS de categorías C y D para un VPA de 3°.	33
Tabla 7. Coordenadas OAS de categorías A y B para un VPA de 3°.....	33
Tabla 8. Coordenadas OAS de categorías C y D para un VPA de 3°.....	33
Tabla 9. Obstáculo que penetran en las OAS.	36
Tabla 10. Obstáculos después de calcular la altura en aproximación equivalente.	37
Tabla 11. Margen de pérdida de altura/error de altímetro.	38
Tabla 12. OCA/H para una aproximación SBAS con VPA de 3°.	38
Tabla 13. Constantes OAS de categorías A y B para un VPA de 3,5°.....	38
Tabla 14. Constantes OAS de categorías C y D para un VPA de 3,5°.	38
Tabla 15. Coordenadas OAS de categorías A y B para un VPA de 3,5°.....	38
Tabla 16. Coordenadas OAS de categorías C y D para un VPA de 3,5°.....	39
Tabla 17. Obstáculo que penetran en las OAS.	40
Tabla 18. Obstáculos después de calcular la altura en aproximación equivalente.	40
Tabla 19. OCA/H para una aproximación SBAS con VPA de 3,5°.	40
Tabla 20. Coordenada x de la OCA para categoría D.....	40
Tabla 21. Coordenadas LLA del punto de viraje.	42
Tabla 22. Parámetros para el cálculo del viraje de paso.....	43
Tabla 23. Velocidades verdaderas.....	43
Tabla 24. Parámetros para calcular un viraje en aproximación frustrada. .	48
Tabla 25. Disponibilidad SIS en La Palma.....	53

Tabla 26. Valores de disponibilidad APV-I en los últimos 6 meses en La Palma.....	53
Tabla 27. Precisión APV-I en los últimos 6 meses en La Palma.....	55
Tabla 28. Parámetros que definen la geometría del área de maniobra visual.	57
Tabla 29. MOC para aproximación visual (en circuito).....	57
Tabla 30. OCA/H de aproximación visual en La Palma.	58
Tabla 31. OCA/H de maniobra visual, una vez aplicada la reducción.	58
Tabla 32. Porcentaje de veces en el que la temperatura se encuentra en un rango determinado para cada hora del día. Periodo de observación: 2002-2016. Fuente: AEMET.	59
Tabla 33. Comparación del VPA efectivo y del promulgado según la elevación y temperatura. Naranja: prohibido. Amarillo: no normalizado. Verde: óptimo.	60
Tabla 34. Valores que definen el FAS con VPA de 3°.	61
Tabla 35. OCA/H de APV-BARO para VPA de 3°, restringida a OCA/H de maniobra visual.	63
Tabla 36. Valores que definen el FAS con VPA de 3,5°.	64
Tabla 37. Punto de viraje en aproximación inicial.	68
Tabla 38. Cálculo de la distancia de transición.	69
Tabla 39. Distancia de transición y SOC para cada categoría.	69
Tabla 40. Punto de viraje en aproximación inicial.	73
Tabla 41. OCA/H para procedimiento LNAV.	74
Tabla 42. Distancia de transición y SOC para cada categoría, aproximación LNAV.	75
Tabla 43. OCA/H final para el procedimiento LNAV, con una pendiente de frustrada del 2,5%.	76
Tabla 44. Resultados para los distintos procedimientos diseñados.	77
Tabla 45. Función "Constantes_OAS".....	80
Tabla 46. Función "Rotacion_OAS".....	81
Tabla 47. Función "Coord_OAS".	81
Tabla 48. Función "Superficies".	81

Tabla 49. Función "OpenKml".....	82
Tabla 50. Función "Extract_data".....	82
Tabla 51. Función "Kmlfiles".....	83
Tabla 52. Función "Rotacion_OBST".....	83
Tabla 53. Función "Comparacion".....	83
Tabla 54. Función "Ordenar_elevacion".....	84
Tabla 55. Función "CircuitoVisual".....	85
Tabla 56. Función "Calculo_FAP".....	86
Tabla 57. Función "Calculo_FAS".....	86
Tabla 58. Función "Vertical_path_final".....	87
Tabla 59. Función "Areas_final".....	87
Tabla 60. Función "Areas_ground".....	87
Tabla 61. Porcentaje de tiempo dedicado a las actividades.....	90
Tabla 62. Coste de software.....	92
Tabla 63. Hardware utilizado.....	92
Tabla 64. Coste de hardware.....	93
Tabla 65. Potencia de los dispositivos y porcentaje del tiempo de uso.....	93
Tabla 66. Coste de luz.....	94
Tabla 67. Coste total.....	94

PARTE I

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se detalla el diseño de procedimientos con guiado vertical o APV para la cabecera 36 del aeropuerto de La Palma, es decir, procedimientos de navegación basada en prestaciones que se apoyan en los sistemas navegación por satélite para determinar la posición de la aeronave. Se van a estudiar los procedimientos APV con dos métodos de guiado vertical: barométrico y sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS), probando diferentes configuraciones y variando ciertos parámetros en cada uno de ellos, con el objetivo de lograr una mejora en la seguridad y la eficiencia respecto a los procedimientos actuales.

El aeropuerto de La Palma resulta de especial interés, primero por las características físicas de la isla de La Palma, con grandes macizos montañosos que dificultan el diseño de cualquier procedimiento de aproximación por instrumentos, y segundo, por la poca infraestructura de radioayudas presente en el aeropuerto.

El documento se divide en tres partes. En primer lugar, se realizará una introducción del aeropuerto de La Palma, analizando las estadísticas de tráfico y la flota que opera habitualmente, y de infraestructura de este. Además, se estudiarán las principales características de la isla, en cuanto a la meteorología y orografía.

A continuación, se introducirá el concepto de PBN (*“Performance Based Navigation”*), y las distintas especificaciones de RNAV (*“Area Navigation”*) y RNP (*“Required Navigation Performance”*) que se utilizan hoy en día, centrándose en aquellas que se utilizan en los procedimientos de aproximación. También se explicarán brevemente las distintas formas de guiado lateral y vertical que se utilizarán en dichos procedimientos.

Finalmente, se diseñarán aproximaciones APV, utilizando la navegación vertical barométrica y la navegación con sistemas de aumentación basados en satélites como los dos sistemas de guiado vertical. Esto se hará principalmente siguiendo el Documento 8168 Volumen II de la OACI, *“Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos”*.

Para el desarrollo del último punto del proyecto se van a emplear los siguientes programas informáticos: MATLAB, Mathematica y Excel para la realización de funciones y cálculos de los procedimientos, incluyendo el procesamiento de los datos de obstáculos del aeropuerto, AutoCAD para el diseño en 2D de estos y Google Earth para su representación en 3D.

2. AEROPUERTO DE LA PALMA

El Aeropuerto de La Palma se sitúa en el lado este de La Palma, aproximadamente a 8 km al sur de Santa Cruz de La Palma, capital de la isla. Esta pertenece a la provincia de Santa Cruz de Tenerife y se encuentra al noroeste del archipiélago de Canarias. Según datos del Instituto Nacional de Estadística, en 2021 la isla contaba con una población de 83380 personas.



Ilustración 1. Ubicación del Aeropuerto de La Palma.

La isla, también llamada ‘La isla bonita’, es de origen volcánico y tiene una superficie total de 708 km². Cuenta con 24865 hectáreas de espacios protegidos y tiene una gran diversidad de ecosistemas, vegetación y fauna. Cuenta con numerosos parajes naturales, algunos de gran valor científico como el Parque natural de Cumbre Vieja, formado por una cadena de volcanes, o el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, lo que la convierte en un destino muy atractivo para los turistas. La erupción más reciente ocurrió el pasado septiembre de 2021, obligando a cancelar numerosos vuelos. En 2002, la Unesco reconoció la isla como Reserva Mundial de la Biosfera.

Su construcción se remonta a la década de 1970, cuando las limitaciones operativas del antiguo aeropuerto de Buenavista (las operaciones se suspendían más del quince por ciento de las veces debido a las lluvias y vientos cruzados) obligaron a buscar un nuevo emplazamiento. La nueva pista se situó en la costa este de la isla, en el municipio de Mazo, y tras una ampliación, abrió al tráfico el 1 de abril de 1980. En 2011 se inauguraron nuevas instalaciones, entre las que se encuentran una nueva terminal y torre de control, que conforman la configuración actual del aeropuerto.

El aeropuerto de La Palma es de tipo civil y de carácter público. El gestor, como todos los aeropuertos españoles, es Aena.



Ilustración 2. Imagen aérea del Aeropuerto de La Palma.

2.1 INFRAESTRUCTURA ACTUAL

Como ya se ha comentado, el aeropuerto cuenta con una pista en dirección norte-sur, cuyas cabeceras actuales son 36 y 18, siendo la primera la cabecera preferente tanto para aterrizajes como para despegues. Esta pista tiene una longitud de más de 2 km y una anchura de 45 metros. Además, ambas cabeceras tienen el umbral desplazado y cuentan con una plataforma de viraje, de forma que el rodaje se realiza en pista hasta las salidas de esta en las calles A, B y C, de 24.5 metros de ancho.

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
18 (1) (2)	179.01°GEO 184°MAG	2110 x 45	283809.35N 0174520.87W	THR: 20.3 m / 67 ft TDZ: No	No	150 x 150	2230 x 150	No	90 x 90	RWY: ASPH PCN 60/F/A/W/T (3) SWY: No
36 (4) (5)	359.01°GEO 004°MAG	2200 x 45	283702.54N 0174519.57W	THR: 31.7 m / 104 ft TDZ: No	No	112 x 150	2260 x 150 (6)	No	90 x 90	RWY: ASPH PCN 60/F/A/W/T (3) SWY: No
RWY		TORA (m)		TODA (m)		ASDA (m)		LDA (m)		
18 (1) (2)		2110		2260		2110		2058		
36 (3) (4)		2200		2312		2200		2058		

Tabla 1. Características físicas de la pista.

En cuanto al estacionamiento de aeronaves, se tienen los siguientes puestos de estacionamiento:

- Aeronaves de letra de clave D: PRKG 09, 12, 15 y 16.
- Aeronaves de letra de clave E: PRKG 4A, 6A, 11 y 14.

Otras de las instalaciones de interés son: las terminales de pasajeros y de carga, la torre de control, la central eléctrica y el servicio de salvación y extinción de incendios.

Hay que destacar que el sistema de iluminación no solo consiste en las luces habituales que se encuentran en cualquier aeropuerto y sus alrededores, sino que hay un sistema de iluminación de obstáculos que se activa bajo petición a torre de control por parte de las aeronaves. Este sistema se extiende por la parte sudeste de la isla e ilumina los obstáculos más importantes en la aproximación a la pista 36, desde 500 metros antes del umbral hasta 4000 metros.

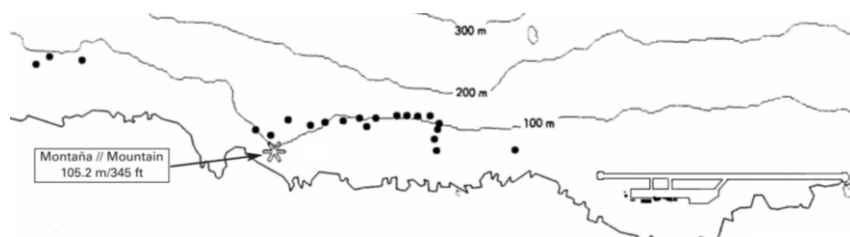


Ilustración 3. Sistema de luces de obstáculos.

2.2 PROCEDIMIENTOS ACTUALES

Las únicas ayudas de las que disponen las aeronaves que operan en la actualidad en La Palma son un DME (*“Distance Measuring Equipment”*) y un NDB (*“Non-Directional Beacon”*), ambos situados al sur del aeropuerto. Es por ello que los únicos procedimientos de aproximación instrumental publicados en las cartas del AIP (*“Aeronautical Information Publication”*) son NDB, uno para cada cabecera. Estos son procedimientos de no precisión (NPA). Además, en el AIP se encuentra una carta de aproximación visual (VAC). El aeropuerto cuenta también con una carta de salidas normalizadas por instrumentos o SID, y con dos cartas de llegadas: llegada estándar por instrumentos, STAR; y de descenso continuo, CDA.

Por otro lado, para medir ciertas distancias en el posicionamiento de los puntos de referencia, como por ejemplo el IAF y su circuito de espera asociado, se utilizan las radioayudas situadas en las islas vecinas del archipiélago canario, concretamente el VOR de Tenerife Norte y el VOR de Tenerife Sur.

2.3 TRÁFICO Y FLOTA

En el año 2019, antes de la pandemia del Coronavirus, se realizaron un total de 22612 operaciones contando los aterrizajes y los despegues. Esto supone un 1% del total de las operaciones realizadas en aeropuertos españoles, y son

valores similares a aeropuertos como Girona-Costa Brava y Reus. Ese año, el número de pasajeros embarcados y desembarcados fue de 1483778 y se transportaron 465698 kilogramos de carga.

La mayoría del tráfico que alberga el aeropuerto de La Palma es nacional, sobre todo de enlaces entre las islas del archipiélago, pero también de vuelos diarios a la península. Estos suponen aproximadamente un 89% de las operaciones anuales en 2019. En resto de vuelos provienen mayoritariamente de estados miembros del Espacio Schengen.

En relación con lo anterior, como las distancias entre las islas son reducidas, la aeronave más utilizada es del tipo ATR en sus distintas variantes. Esta es una aeronave comercial de categoría B o C, según la variante, para vuelos regionales propulsada por dos motores turbohélice. Los vuelos a la península ibérica y al resto de países europeos se realizan principalmente con aeronaves de alcance medio y fuselaje estrecho como son las familias de aviones A320 y Boeing 737, e incluso con aviones de fuselaje ancho y categoría de estela turbulenta H como el Boeing 767 o el Boeing 787. En general, se permite la operación de aeronaves 4D y 4E (hasta A330-900 NEO). La compañía Binter es la que realiza el mayor número de operaciones en este aeropuerto.

2.4 METEOROLOGÍA

En este apartado se van a estudiar los efectos más habituales que se producen en el aeropuerto de La Palma dependiendo de las situaciones del viento.

2.4.1 *Viento del Norte y Noreste*

Los alisios son los vientos más frecuentes en el archipiélago canario. Estos provienen de las latitudes subtropicales y avanzan hacia el Ecuador y ocurren cuando el anticiclón de las Azores se sitúa en el centro de Atlántico Norte a la altura de las islas portuguesas de las Azores, su posición habitual.

Dependiendo de la relación entre la componente norte y el componente este, se producirán dos situaciones diferentes en el aeropuerto. En primer lugar, cuando la componente norte del viento es más fuerte, este tiende a acelerarse por confluencia, y provoca vientos más fuertes en el aeropuerto, con eventos de cizalladura y turbulencias puntuales. En estos casos, las masas de aire suelen arrastrar más humedad en los niveles bajos, aumentando el tamaño y cantidad de nubes e incluso produciendo precipitaciones de carácter débil. En cambio, si es la componente este la que tiene más fuerza, se produce una zona de calmas en el aeropuerto, ya que el aire tiende a desviarse por el norte de la isla.

En general, las operaciones aeronáuticas no se ven afectadas, ya que el viento sopla de forma longitudinal a la pista y no suele suponer problemas para los pilotos, excepto cuando el viento es muy débil. Esta situación puede ocasionar nubosidad con un techo de nubes muy bajo que puede impedir las aproximaciones.

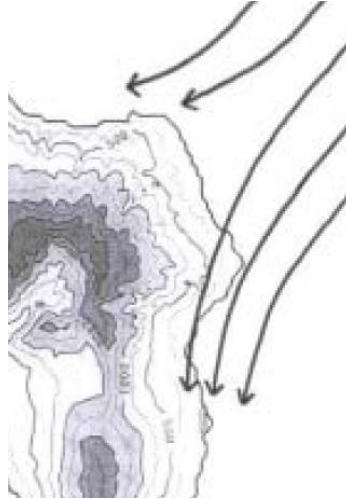


Ilustración 4. Vientos del noreste.

2.4.2 Viento del Este y Sudeste

En situaciones de viento del este se produce el efecto contrario a los vientos alisios. En este caso, el viento se divide a cada lado de la isla, provocando vientos flojos y variables por difluencia.

Si los vientos vienen del sudeste, ocurre una situación muy similar, solo que esta vez llega al aeropuerto en dirección longitudinal a la pista. Debido a la sequedad, las nubes son escasas en las capas bajas de la atmósfera, aunque en las altas en ocasiones aparecen tormentas. En estos casos, para no tener viento de cola, la pista que se utiliza para los despegues y aterrizajes es la 18.

Se trata de viento proveniente del Sáhara, por lo que, además de ser más cálido y seco, contiene partículas pequeñas de polvo y arena que pueden producir calimas. En algunos casos llegan a ser fuertes y dificultan los aterrizajes.

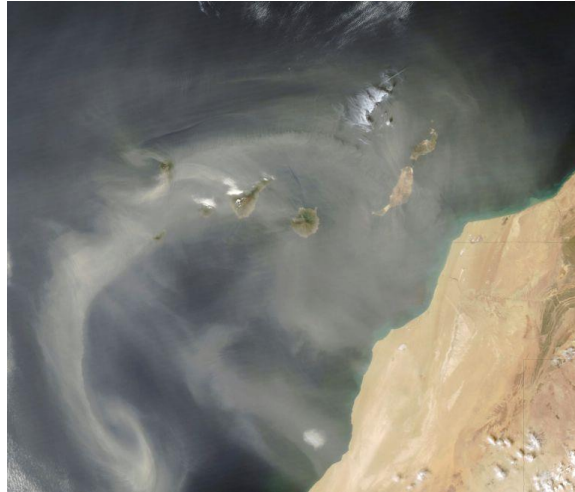


Ilustración 5. Calima ocasionada por vientos del sudeste.

2.4.3 Vientos del Sur

Cuando una borrasca se sitúa al oeste del archipiélago se producen periodos de viento del sur. Estos periodos suelen ser de corta duración, ya que las borrascas se van desplazando hacia el norte.

Los vientos del sur tienen una intensidad considerable en la zona del aeropuerto debido principalmente a dos efectos. El primero tiene que ver con la confluencia del viento al alinearse a cada lado de la isla, que aumenta la velocidad del mismo. El segundo está relacionado con la forma de la zona sur de la isla, en la que el viento asciende por la ladera de la montaña y desciende hacia el aeropuerto, provocando rachas. Si el aire es muy húmedo se condensa creando nubes en la parte sudeste con gran desarrollo vertical. Esta situación conduce a precipitaciones que descargan grandes cantidades de agua, sin embargo, las nubes se encuentran en una zona localizada, por lo que, aunque rocen en aeropuerto, no suelen afectar a la aproximación a la cabecera 18.

2.4.4 Vientos del Sudoeste

Las borrascas que inicialmente provocaban vientos del sur, ahora se desplazan hacia el norte pasando por el sudoeste de la isla. Esta situación es puntual (horas de duración) pero puede ser problemática para las operaciones aeronáuticas. El viento resulta impredecible. Por una parte, sigue llegando a la cabecera 36 por el sur. Pero ahora tiene una componente del oeste que cruza por encima de Cumbre Nueva y, si es muy fuerte, de Cumbre Vieja, provocando simultáneamente vientos racheados y cruzados en la otra cabecera de la pista. Por lo tanto, puede llegar a imposibilitar el uso de ambas cabeceras, aunque de forma breve. Con las nubes, el efecto es similar a lo expuesto en el apartado anterior, limitando aún más la visibilidad con la aparición de determinados frentes.

2.4.5 Vientos del Oeste

Esta situación se produce cuando las borrascas se sitúan al norte de las islas. La orografía provoca dos efectos sobre el viento que crean situaciones peligrosas para las aeronaves. En el plano, horizontal, el viento se aprieta entre Cumbre Vieja y las Cumbres de la Caldera de Taburiente aumentando su velocidad. En el plano vertical, asciende a más de 1400 metros de altitud y se aprieta sobre Cumbre Nueva con el flujo laminar que no se ve afectado por el relieve. El resultado es una gran aceleración del viento que desciende de manera descontrolada hacia el aeropuerto, situado a sotavento, provocando serios fenómenos de cizalladura, turbulencias y rachas en la aproximación final. Esto se conoce como Efecto Foehn. La situación es común en periodos invernales e interrumpe el funcionamiento normal del aeropuerto durante días.

Fundamentalmente, se forman nubes orográficas sobre el lado oeste de Cumbre Nueva, es decir, a barlovento. Además, como consecuencia de la ondulación del flujo de aire a sotavento, se pueden formar nubes rotoras y altocúmulos lenticulares sobre el aeropuerto que no afectan a las operaciones del mismo.

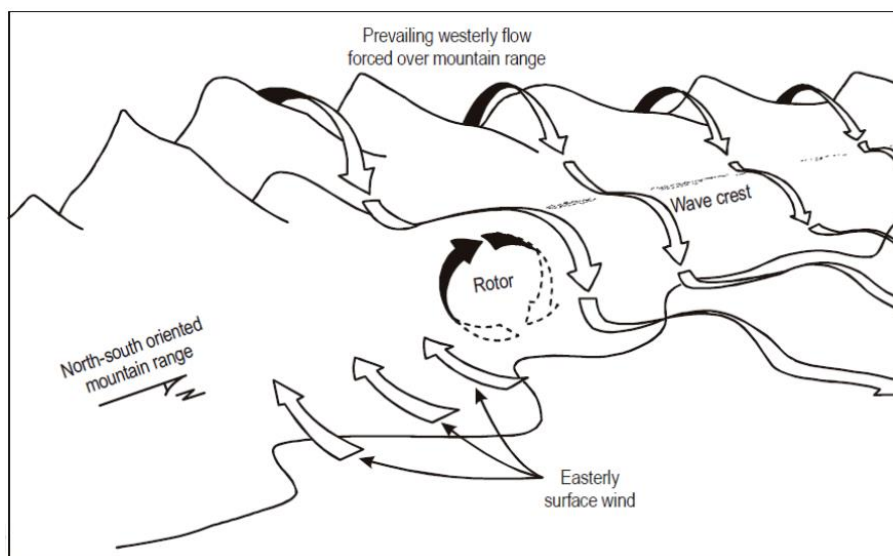


Ilustración 6. Situación en La Palma con vientos del oeste.

2.4.6 Vientos del Noroeste

El propio relieve del norte de la isla, con la Caldera de Taburiente, actúa como un escudo para el aeropuerto, en el que se registran vientos flojos. La visibilidad es buena y la nubosidad escasa.

3. PBN

La navegación basada en prestaciones se fundamenta en el concepto de navegación de área o RNAV. Esta permite la navegación entre puntos de referencia definidos por su latitud y longitud, lo que supuso un gran avance en la aviación.

Antes del desarrollo de los sistemas RNAV la navegación se realizaba a partir de rutas que iban pasando por radioayudas basadas en tierra, de forma que los pilotos sincronizaban constantemente la frecuencia correspondiente en cada tramo. La principal desventaja es evidente, las rutas son en general más largas debido a la cobertura limitada y difícil emplazamiento de estas instalaciones, lo que se traduce en mayor costo y menor eficiencia en las operaciones.

La RNAV emplea distintos sistemas de radionavegación, como son los DME, VOR (“*VHF Omnidirectional Range*”) o GNSS (“*Global Navigation Satellite System*”), para definir y almacenar rutas en las bases de datos de los sistemas de navegación de las aeronaves. Sin embargo, aunque la flexibilidad de la RNAV es mayor, inicialmente se desarrolló como una navegación basada en sensores, es decir, los requerimientos del sistema RNAV se debían actualizar con la evolución de los sistemas de navegación.

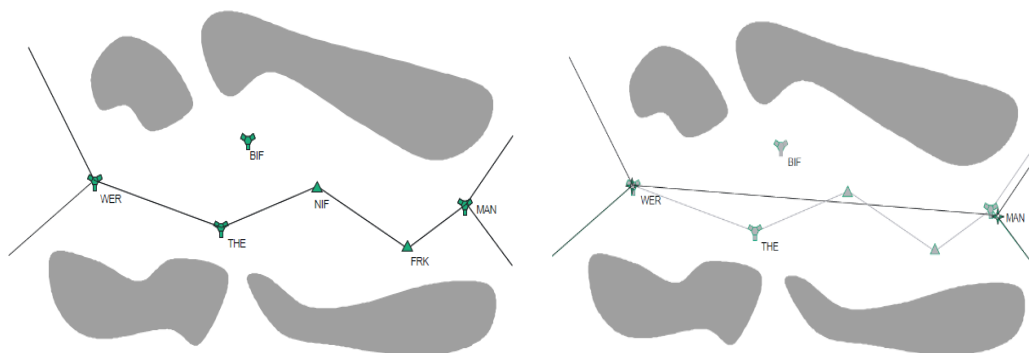


Ilustración 7. Navegación convencional a la izquierda, navegación basada en prestaciones a la derecha.

Como su propio nombre indica, en la PBN (“*Performance Based Navigation*”) los requerimientos de navegación se definen en función de las prestaciones de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad que se necesitan para realizar operaciones en un espacio aéreo determinado:

- **Precisión:** se puede definir como la diferencia entre la posición estimada y la posición real, y se expresa de forma estadística como un

determinado percentil en la distribución de errores, normalmente el 95%, tanto para el error horizontal como el vertical.

- **Integridad:** exactitud de la información que proporciona un sistema. Incluye también la capacidad del sistema de alertar en caso de mal funcionamiento.
- **Disponibilidad:** probabilidad de que el usuario pueda utilizar el sistema en un instante de tiempo determinado y suele expresarse en un porcentaje respecto al tiempo total.
- **Continuidad:** en navegación aérea se mide como la probabilidad de que se mantenga la capacidad operativa del sistema de manera continua durante un periodo de tiempo.

La PBN se basa en tres conceptos:

- **Infraestructura de ayudas para la navegación aérea:** ayudas utilizadas para determinar la posición.
- **Especificación de navegación:** describe los requisitos del sistema de navegación y de la tripulación que lo opera, así como los sensores que se pueden utilizar para lograr los requisitos del espacio aéreo.
- **Aplicación de navegación:** se trata de la aplicación de una especificación de navegación y de la infraestructura de ayudas para la navegación en un espacio aéreo o procedimiento.

Algunas de las ventajas de la PBN respecto a la navegación convencional se muestran a continuación:

- **Mejora de capacidad y eficiencia de los espacios aéreos.** Ante la creciente demanda y el aumento de tráfico previsto en los próximos años, con PBN se mejoran la capacidad y la eficiencia de los espacios aéreos debido a la gran libertad en el diseño de los procedimientos y rutas. Estos se pueden situar en lugares estratégicos, para evitar conflictos y reducir la separación lateral con otras rutas.
- **Mejora de la seguridad.** El hecho de que se establezcan los requisitos de navegación en cada fase de vuelo aumenta la precisión, no solo porque de esta forma la trayectoria de las aeronaves queda delimitada, sino porque los sistemas de navegación que las vuelan permiten reducir la carga de trabajo de los pilotos y aumentar su conciencia situacional. Además, el requisito de integridad confiere un punto de seguridad extra a la operación, ya que los pilotos son capaces de ver el estado del sistema y lo pueden desactivar en caso de que este falle.
- **Mejora de la eficiencia de las operaciones.** La PBN permite crear *waypoints* en cualquier punto del espacio, es decir, se pueden optimizar las rutas para reducir el tiempo total de vuelo. Con esto se reduce el impacto medioambiental, al consumir menos combustible y con procedimientos de atenuación de ruidos.

- Reducción de costes de mantenimiento. Los GNSS y los puntos definidos por coordenadas permiten eliminar progresivamente las instalaciones más anticuadas, en desuso, siempre que se asegure la suficiente cobertura del espacio aéreo.
- Accesibilidad en aeropuertos en los que, por motivos económicos o de otra índole, no es posible la instalación de un sistema de aterrizaje instrumental (ILS).

3.1 ESPECIFICACIONES RNAV Y RNP

Existen dos especificaciones de navegación basada en prestaciones: RNP (*“Required Navigation Performance”*) y RNAV. La diferencia entre estas es que la primera incorpora un requisito de integridad, es decir, que el sistema debe vigilar y alertar del rendimiento y de posibles fallos del mismo. Esto permite reducir la variabilidad del funcionamiento del sistema y asegurar que las operaciones son más fiables, por lo que el espaciado entre rutas puede ser menor. Además, ambas se dividen en diferentes especificaciones según la fase del vuelo: RNP X y RNAV X, donde X indica la precisión de navegación lateral en millas náuticas, que se espera que se logre más del 95% del tiempo de vuelo.

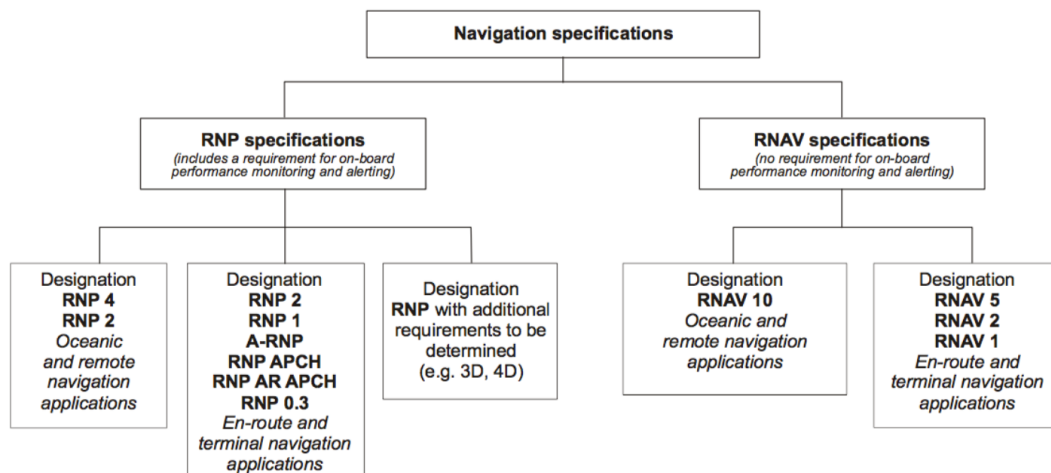


Ilustración 8. Especificaciones RNP y RNAV.

Las especificaciones RNP APCH y RNP AR APCH (APCH de *“Approach”*), tal como lo indica el nombre, se utilizan en todas las fases de aproximación por instrumentos, es decir, inicial, intermedia, final y frustrada, en las que se necesita de una precisión inferior a 0,3 NM. RNP AR APCH además requiere de una autorización específica de la aeronave y el operador. La característica principal de estas es el uso de GNSS como sistema de navegación principal.

Según el guiado vertical, las RNP APCH se pueden clasificar en aproximaciones que no son de precisión (NPA) y aproximaciones con guiado vertical (APV):

- NPA: estos procedimientos no tienen guiado vertical, tan solo lateral. Si el guiado se basa en un GNSS básico el procedimiento recibe el nombre de LNAV, pero si utiliza sistemas de aumentación la precisión es equivalente a la de un localizador, por lo que recibe el nombre de LP (*“Localizer Performance”*).
- APV: son procedimientos que no son de precisión, pero que proporcionan un guiado vertical. Si el sistema que proporciona ambos guiados es SBAS, el procedimiento se denomina LPV (*“Localizer Performance with Vertical guidance”*). Si el guiado lateral utiliza GNSS básico y el vertical es barométrico recibe el nombre de APV-BARO o LNAV/VNAV. Este tipo de aproximaciones permite realizar descensos continuos, con un régimen de motor constante, por lo que supone un aumento en la eficiencia de las operaciones. Además, al proporcionar una guía vertical, se reduce la probabilidad de accidentes de tipo CFIT (*“Controlled Flight Into Terrain”*).

3.2 GNSS BÁSICO

Un sistema global de navegación por satélite o GNSS es una constelación de satélites que permite, a partir de los datos de posición y tiempo de estos, determinar la posición de un receptor GNSS. Por ser sistemas globales, el sistema debe proporcionar al usuario la posición en cualquier punto del planeta y en cualquier momento. El funcionamiento consiste en la medición del tiempo que tarda la señal de los satélites en llegar al receptor para calcular la distancia. Con tres satélites es posible determinar la posición, sin embargo, existe una diferencia entre los relojes de los satélites y el reloj del receptor, por lo que es necesario un cuarto satélite, pasando a medir pseudodistancias.

Los GNSS tienen su origen en la guerra fría, cuando los Estados Unidos y la antigua Unión Soviética desarrollaron el GPS y el GLONASS, respectivamente. Estos eran inicialmente de uso militar y posteriormente se adaptaron para uso civil, aunque con la señal degradada de forma intencionada. La disponibilidad selectiva provocaba errores de posición de decenas de metros, lo que limitaba enormemente su uso. Finalmente, el Departamento de Defensa de Estados Unidos eliminó la disponibilidad selectiva del GPS en el año 2000, propiciado por el desarrollo de constelaciones pensadas para uso civil. Este es el caso de la europea Galileo, que en un futuro será más avanzada que el GPS.

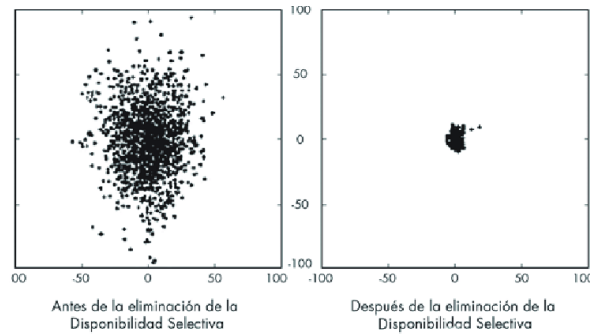


Ilustración 9. Medición de una posición durante 12 horas, datos cada 30 segundos.

Los sistemas GNSS por sí solos no están certificados para utilizarse como único método de navegación aérea en operaciones IFR (*“Instrumental Flight Rules”*), en primer lugar, porque no cumplen con los requisitos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad, puesto que no fueron diseñados con ese propósito. Y, en segundo lugar, porque los estados propietarios de las constelaciones de origen militar tienen la potestad de reactivar la disponibilidad selectiva

Para el uso aeronáutico como único sistema de navegación en operaciones IFR se debe cumplir con el estándar TSO C-129, que estipula que el receptor debe tener el sistema RAIM (*“Receiver Autonomous Integrity Monitoring”*). Se trata de una forma de ABAS (*“Aircraft-Based Augmentation System”*) en la que el receptor analiza las señales redundantes de navegación GNSS para determinar su integridad, y advierte a los pilotos en caso de mal funcionamiento. Los sistemas GNSS básicos con RAIM pueden ser utilizados en operaciones IFR, en las fases en ruta, en salidas y llegada, y en aproximaciones de no-precisión.

En general, según indica el Anexo 10 de la OACI, la combinación de elementos GNSS y un receptor de usuario deberá cumplir con los requisitos de señal que se definen en la siguiente tabla:

Operaciones ordinarias	Exactitud horizontal 95% (Notas 1 y 3)	Exactitud horizontal 95% (Notas 1 y 3)	Integridad (Nota 2)	Tiempo hasta alerta (Nota 3)	Continuidad (Nota 4)	Disponibilidad (Nota 5)
En ruta	3,7 km (2,0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ a $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0,99 a 0,99999
En ruta, terminal	0,74 km (0,4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ a $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0,99 a 0,99999
Aproximación inicial, aproximación intermedia, aproximación que no es de precisión (NPA), salida	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ a $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0,99 a 0,99999
Operaciones de aproximación con guía vertical (APV-I)	16,0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ en cualquier aproximación	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ por 15 s	0,99 a 0,99999
Operaciones de aproximación con guía vertical (APV-II)	16,0 m (52 ft)	8,0 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ en cualquier aproximación	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ por 15 s	0,99 a 0,99999
Aproximación de precisión de Categoría I (Nota 7)	16,0 m (52 ft)	6,0 m a 4,0 m (20 ft a 13 ft) (Nota 6)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ en cualquier aproximación	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ por 15 s	0,99 a 0,99999

Tabla 2. Requerimientos de performance de OACI.

3.3 SISTEMAS DE AUMENTACIÓN DE GNSS

El uso de la disponibilidad selectiva, entre otras cosas, provocó el desarrollo de técnicas de aumentación de GNSS, cuyo objetivo es mejorar el rendimiento de los GNSS. Se apoyan en instalaciones y equipos adicionales para mejorar la precisión, integridad, continuidad y disponibilidad del sistema. Según la infraestructura que utilicen, los sistemas de aumentación pueden ser: basados en la aeronave (ABAS), basados en satélites (SBAS) y basados en estaciones terrestres (GBAS).

- Los ABAS utilizan el RAIM y el sistema de Detección y Exclusión de Fallos (FDE) instalados en la aeronave para proporcionar la integridad requerida para las operaciones aéreas con el GNSS como único medio de navegación. Estos se pueden usar en vuelo en ruta, salidas y llegadas, y aproximaciones de no-precisión.
- Los SBAS se basan en estaciones terrestres y las posiciones conocidas de satélites geoestacionarios para proporcionar a la aeronave correcciones diferenciales de las efemérides y del reloj de los satélites GNSS. Estos sistemas, además, deben transmitir el estado de

funcionalidad de los satélites y la exactitud de las medidas de pseudodistancia para poder utilizarse en aproximaciones de precisión de Categoría I. Los sistemas SBAS que se encuentran en funcionamiento actualmente son: el americano WAAS, el europeo EGNOS, el japonés MSAS, el indio GAGAN y el ruso SDCM.

- Los GBAS se basan únicamente en estaciones terrestres. Así como los SBAS son sistemas de área extensa, los GBAS son sistemas locales que se suelen emplear en los aeropuertos para realizar aproximaciones de precisión. Las estaciones terrestres, cuya posición es perfectamente conocida, reciben los datos de efemérides y reloj de los satélites GNSS y calculan correcciones, que se envían a la aeronave por medio de VHF.

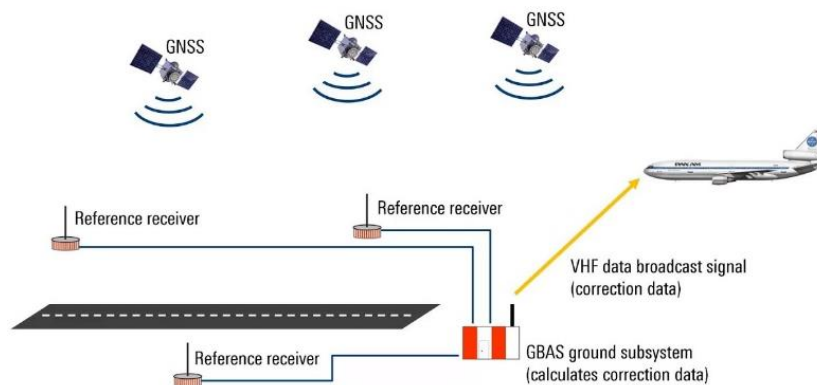


Ilustración 10. Esquema de GBAS.

3.4 EGNOS

EGNOS (*“European Geostationary Navigation Overlay Service”*) es el sistema SBAS europeo creado, no solo para mejorar la seguridad de la navegación aérea y marítima, sino para mejorar las prestaciones de los sistemas GNSS para cualquier usuario que lo necesite.

El sistema cuenta con 39 RIMS (*“Ranging Integrity Monitoring Stations”*), distribuidas por toda Europa, que captan la señal del GPS y la transmiten a los MCC (*“Mission Control Centres”*) a través de la EWAN (*“EGNOS Wide Area Network”*). En estas instalaciones se procesan los datos recibidos de las efemérides y reloj de los satélites, GPS y en un futuro Galileo, y se generan las correcciones y mensajes de integridad. Hay tres tipos de correcciones:

- Rápidas: se trata de los errores de sincronización de los relojes.
- A largo plazo: se refiere a las correcciones de la posición de los satélites.
- Ionosféricas: analizando la degradación de la señal que llega a las RIMS, se puede modelizar la ionosfera en tiempo real.

Los mensajes generados se envían a los satélites geoestacionarios a través de las 6 NLES (“*Navigation Land Earth Stations*”), completando el llamado segmento de tierra.

Tres satélites geoestacionarios forman el segmento del espacio de EGNOS, con al menos dos de ellos operativos en todo momento, de forma que es un sistema redundante. Reciben los mensajes de correcciones y de integridad y los retransmiten mediante difusión en la banda L1 (1575.42 MHz).

Finalmente, los receptores de EGNOS, que conforman el segmento de usuario, permiten obtener la señal los satélites geoestacionarios.

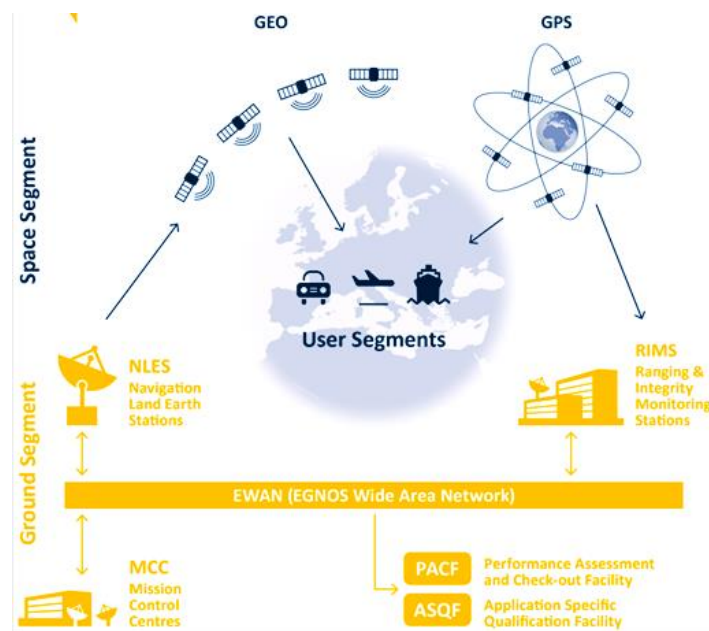


Ilustración 11. Esquema de funcionamiento de EGNOS.

EGNOS proporciona tres servicios: *Open Service*, *EGNOS Data Access Service* y *Safety of Life* (SoL), siendo este último el que se utiliza en aviación. El objetivo principal del SoL es apoyar las operaciones aéreas, por lo tanto, fue diseñado siguiendo las SARPs (“*Standards And Recommended Practices*”) de la OACI para sistemas SBAS.

Se establecen tres niveles dentro del servicio SoL:

- El nivel NPA da soporte a las especificaciones PBN para las fases de vuelo en ruta, salidas y llegadas, y a las especificaciones RNP APCH de operaciones de aproximación de no-precisión.
- El nivel APV-I da soporte a las operaciones APV-I con mínimos de LPV superiores a 250 ft.
- Finalmente, el nivel LPV-200 da soporte a aproximaciones de precisión de Categoría 1 con un límite de alerta vertical de 35 m y mínimos de 200 ft.

4. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTOS DE APROXIMACIONES PARA EL AEROPUERTO DE LA PALMA

En este apartado se van a diseñar procedimientos de aproximación con guiado vertical con el objetivo de lograr una mayor seguridad y eficiencia en las operaciones. Es decir, se pretende: reducir los mínimos de los procedimientos actuales, lo cual permite una mayor utilización a lo largo del año; reducir el consumo de combustible, ya sea con mediante descensos continuos o reduciendo la longitud total del procedimiento; y reducir la probabilidad de accidentes, por ejemplo de tipo CFIT, mediante la utilización de guiado vertical en el descenso final a pista.

4.1 APROXIMACIÓN APV-SBAS

El primer procedimiento que se pretende diseñar es una aproximación APV-I basada en SBAS, o LPV. Este tipo de aproximaciones, dadas las condiciones de la isla de La Palma y la infraestructura presente, resultan a priori la mejor opción.

Como en todas las aproximaciones, se tienen cuatro fases: inicial, intermedia, final y frustrada. El SBAS, en este caso EGNOS, se usa en lo que se denomina tramo APV, que comprende la aproximación final y las fases inicial e intermedia de la frustrada, ya que su propósito es guiar la aeronave en el descenso final hasta la pista. Por lo tanto, en las fases inicial e intermedia podrá usarse todo tipo de sensor, pasando a SBAS 3,7 km antes del FAF (*Final Approach Fix*).

4.1.1 Generalidades

La aproximación inicial tiene como objetivo descender la aeronave y alinearse con la pista. Esta empieza en el IAF (*Initial Approach Fix*), y viene precedida de una STAR, por lo que la longitud mínima de este tramo será de 11,1 km. La pendiente óptima de descenso es de 4% y la máxima de 8%. El ángulo de intercepción entre los tramos inicial e intermedio no será superior a 90°.

En la aproximación intermedia se pretende que la aeronave pierda velocidad y se configure para el descenso final a la pista, por lo que lo óptimo es que sea un tramo horizontal. Empieza en el IF (*Intermediate Fix*) y debería alinearse con la aproximación final. La longitud óptima es de 19 km.

Las áreas de protección de estos tramos consisten en un área primaria, con un MOC (*“Minimum Obstacle Clearance”*) de 300 m en aproximación inicial y de 150 m en aproximación intermedia, y una secundaria en la que el MOC disminuye linealmente a 0 desde el borde del área primaria hasta el borde del área secundaria. La anchura es la misma para las áreas primaria y secundaria, y viene determinada por la Tabla 3.

El SOC (*“Start Of Climb”*) es el punto de referencia para hacer los cálculos de franqueamiento de obstáculos en aproximación frustrada. La pendiente será del 2,5%.

Las velocidades máximas de viraje dentro de un radio de 10 NM del aeropuerto serán las que se indican en la Tabla 4.

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

Tabla 3. XTT, ATT y semianchura del área para RNP APCH (aviones) en las fases de vuelo de aproximación inicial/intermedia/final/frustrada (m).

El tramo APV comienza en el FAP (*“Final Approach Point”*), a la altitud mínima que se especifica para el tramo intermedio, y se alinea con el eje de la pista. La longitud óptima es de 9,3 km y el ángulo de descenso óptimo de 3°. El franqueamiento de obstáculos se basa en el cálculo de las superficies de evaluación de obstáculos u OAS, y en los obstáculos que las penetran.

Categoría	IAS Máxima viraje (kt)
A	130
B	
C	160
D	185

Tabla 4. Velocidades de viraje máximas dentro de un radio de 10 NM del aeropuerto de La Palma.

4.1.2 Tramo APV: VPA 3°

Las OAS para una aproximación APV-I consisten en las superficies planas W, W', X, Y y Z definidas por ecuaciones de la forma $z = Ax + By + C$, donde A , B y C son constantes y z es la altura del plano en un punto $x - y$.

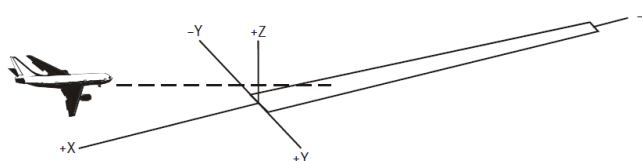


Ilustración 12. Sistema de coordenadas OAS.

Las constantes de los planos se van a obtener utilizando el software de PANS-OPS teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Pendiente de ascenso de aproximación frustrada de 2,5%.
- Ángulo de trayectoria de planeo VPA de 3°.
- Categorías de aeronave A, B, C y D, con las dimensiones máximas estándar para cada categoría.
- Altura por encima del umbral (RDH) de 15 m.
- Distancia GARP-LTP de 2415 m, suma de la distancia desde el umbral de la pista 36 hasta el final de la misma más 305 m.
- Anchura del rumbo en el umbral por defecto de 210 m.

El programa también calcula los puntos de intersección de los planos, hasta una altura de 300 m por encima del umbral. El sistema de referencia empleado en estos cálculos está centrado en el umbral, con el eje +X positivo en el sentido opuesto de la pista (Ilustración 12).

- C: $[W' - X] - [z = 0]$
- C^{'''}: $[W' - X - W]$
- C^{''}: $[W - X] - [z = 300]$
- D: $[X - Y] - [z = 0]$
- D^{''}: $[X - Y] - [z = 300]$
- E: $[Y - Z] - [z = 0]$
- E^{''}: $[Y - Z] - [z = 300]$

NAVIGATION AID DATA

Approach Category: APVI

GP/WPA (*): 3

RDH: 15 m

LOC THR Dist⁽¹⁾: 2415 m

Course width at THR: 210 m

AIRCRAFT DATA

M/App CG (%): 2,5

CAT: C

STD:

Wing Semi Span: 32,5 m

GP Wheel / Antenna height: 7 m

OAS constants

	A	B	C		A	B	C
W	0,028500	0,000000	-9,01	Y	0,022845	0,200381	-60,16
W'	0,039290	0,000000	-39,75	Z	-0,025000	0,000000	-40,63
X	0,026567	0,175154	-55,49				

OAS Template coordinates -m (metres)

	THR Elevation		Upper coordinates			
	X	Y	X	Y	Z	
C	1011	163	C''	10842	385	300
D	439	250	C ^{'''}	2849	296	72
E	-1625	485	D ^{''}	6163	1094	300
			E ^{''}	-7348	1852	143

Y surface template contours are parallel to line D-E.

OAS height calculator

X: m Y: m Z: 0m

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

Ilustración 13. Captura del software de PANS-OPS para el cálculo de las OAS.

Categorías A y B	Constantes OAS		
	A	B	C
W	0,028500	0,000000	-8,01
W'	0,039290	0,000000	-38,75
X	0,026567	0,175154	-54,05
Y	0,022845	0,200381	-58,52
Z	-0,025000	0,000000	-40,63

Tabla 5. Constantes OAS de categorías A y B para un VPA de 3°.

Categorías C y D	Constantes OAS		
	A	B	C
W	0,028500	0,000000	-9,01
W'	0,039290	0,000000	-39,75
X	0,026567	0,175154	-55,49
Y	0,022845	0,200381	-60,16
Z	-0,025000	0,000000	-40,63

Tabla 6. Constantes OAS de categorías C y D para un VPA de 3°.

Categoría A y B	Coordenadas OAS						
	C	D	E	C''	C''''	D''	E''
X	986	439	-1625	10807	2849	6163	-7382
Y	158	241	477	382	294	1086	1852
Z	0	0	0	300	73	300	143

Tabla 7. Coordenadas OAS de categorías A y B para un VPA de 3°.

Categoría C y D	Coordenadas OAS						
	C	D	E	C''	C''''	D''	E''
X	1011	439	-1625	10842	2849	6163	-7348
Y	163	250	485	385	296	1094	1852
Z	0	0	0	300	72	300	143

Tabla 8. Coordenadas OAS de categorías C y D para un VPA de 3°.

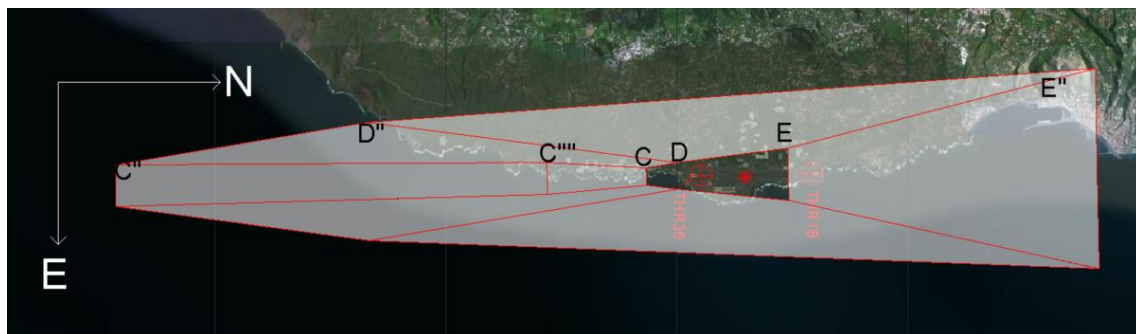


Ilustración 14. OAS de categoría D para un VPA de 3°.

Los planos W y X se extienden hasta 150 m de altura por debajo del FAP por lo que, en primer lugar, hay que calcular los parámetros de este punto. El FAP se determina a partir de la altitud del tramo intermedio. Como prueba inicial se ha escogido una altitud de 2000 ft.

$$x_{FAP} = \frac{h_{INT} - h_{THR} - RDH}{\tan VPA} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Por lo tanto, el FAP estaría situado a 10741 m del umbral.

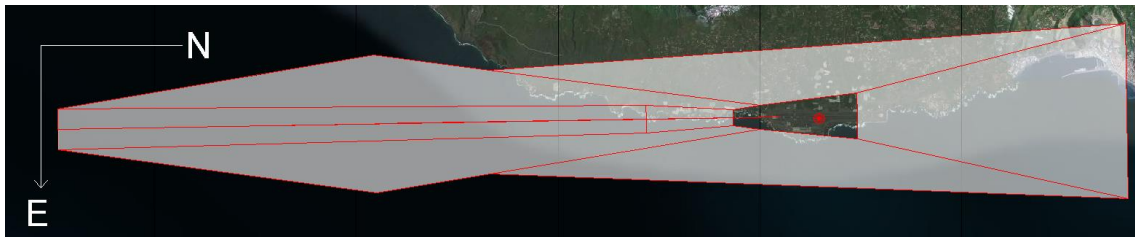


Ilustración 15. OAS de categoría D extendidas hasta el FAP.

Evaluación de obstáculos

La información detallada de los obstáculos se puede encontrar en el “*Item 10: OBSTÁCULOS DE AERÓDROMO*” del AIP para el aeropuerto de La Palma. En él aparece un fichero descargable en formato *.csv* con las coordenadas LLA (Latitud, Longitud y Altitud) de cada obstáculo registrado. La evaluación de obstáculos a partir de las OAS consiste en determinar, de los obstáculos que se encuentran dentro del perímetro de las superficies, aquellos que las penetran. El obstáculo más alto determinará la OCA/H (“*Obstacle Clearance Altitude/Height*”).

Sin embargo, las coordenadas de los puntos de las OAS están definidas en un sistema de coordenadas diferente a los obstáculos, centrado en el umbral de la pista 36. Para solucionar este problema se han transformado las coordenadas geodésicas al sistema de coordenadas de las OAS.

En primer lugar, el “*Navigation Toolbox*” del programa MATLAB incorpora la función *lla2ned*, con la que se obtienen las coordenadas de cada obstáculo en un sistema NED (“*North East Down*”) centrado en el umbral, con el eje *x* apuntando hacia el norte geodésico, el eje *y* hacia el este geodésico, y el eje *z* apuntando hacia abajo.

A continuación, se ha obtenido la matriz de rotación para pasar del sistema de coordenadas de las OAS al sistema NED y viceversa. El ángulo de rotación ψ es de $0,99^\circ$ ($360^\circ - 359,01^\circ$, que es la orientación geográfica).

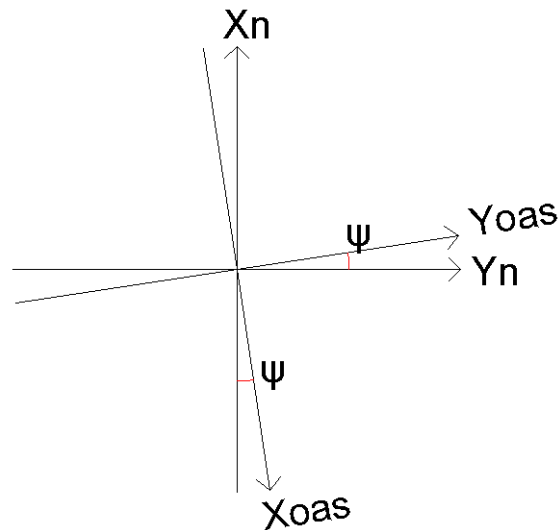


Ilustración 16. Rotación de ejes.

$$R_{OAS}^{NED} = \begin{bmatrix} -\cos \psi & \sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

$$R_{NED}^{OAS} = (R_{OAS}^{NED})^T \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^{OAS} = R_{NED}^{OAS} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^{NED} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Las coordenadas transformadas se sustituyen en las ecuaciones de los planos de forma que, si el resultado es negativo, el obstáculo penetra en la superficie.

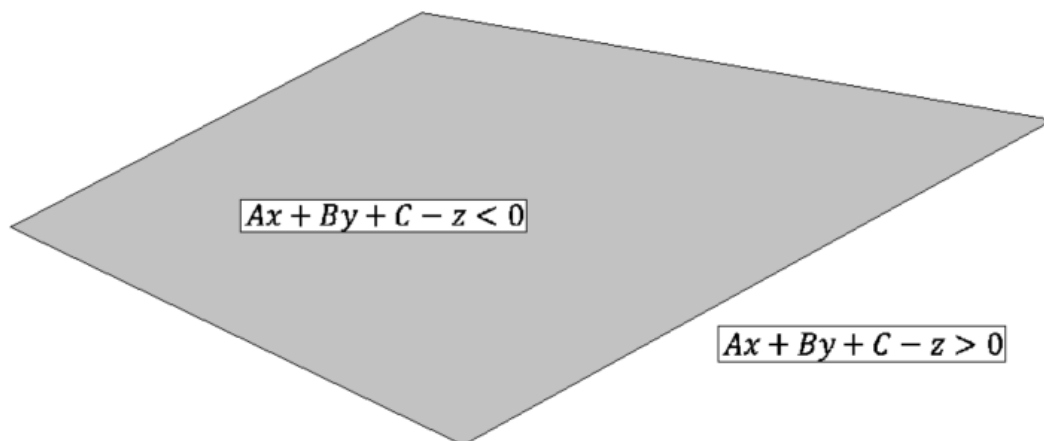


Ilustración 17. Ecuación de un plano a cada lado del mismo.

Tras comprobar todos los obstáculos, los más altos que entran en las OAS se muestran a continuación, ordenados por elevación:

N.º de obstáculo	Elevación (m)
1218	322,276
346	321,842
1219	315,652
1438	314,065
1432	302,608

Tabla 9. Obstáculo que penetran en las OAS.



Ilustración 18. Posición de los obstáculos más elevados, N.º 1218 y 1219 en aproximación frustrada y 346 en aproximación. La flecha amarilla indica la vista de la Ilustración 19.



Ilustración 19. Situación de los obstáculos más elevados.

El siguiente paso es determinar si el obstáculo más alto se encuentra en aproximación o en aproximación frustrada. La forma de realizar esta división se la siguiente: se consideran obstáculos de aproximación entre la coordenada x del FAP y la coordenada x del punto E. Si el obstáculo se encuentra en aproximación frustrada se debe reducir la altura del mismo a la altura del obstáculo en aproximación equivalente mediante la siguiente expresión:

$$h_a = \frac{h_{ma} \cot Z + (X_E + x)}{[\cot Z + \cot \theta]} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

donde h_a = altura del obstáculo en aproximación equivalente

h_{ma} = altura del obstáculo en aproximación frustrada

θ = VPA

Z = ángulo de la superficie de aproximación frustrada

X = distancia al obstáculo desde el umbral

$$X_E = 900 + \left(\frac{38}{\tan \theta} \right)$$

A simple vista, se observa que los obstáculos 1218 y 1219 se encuentran en aproximación frustrada. Aplicando la expresión anterior y comparando la elevación, se llega a que, tanto para las categorías A y B como para C y D, el obstáculo determinante es el N.º 346.

N.º de obstáculo	Elevación (m)
346	321,842
1438	314,065
1432	302,608
1218 (frustrada)	151,683
1219 (frustrada)	146,869

Tabla 10. Obstáculos después de calcular la altura en aproximación equivalente.

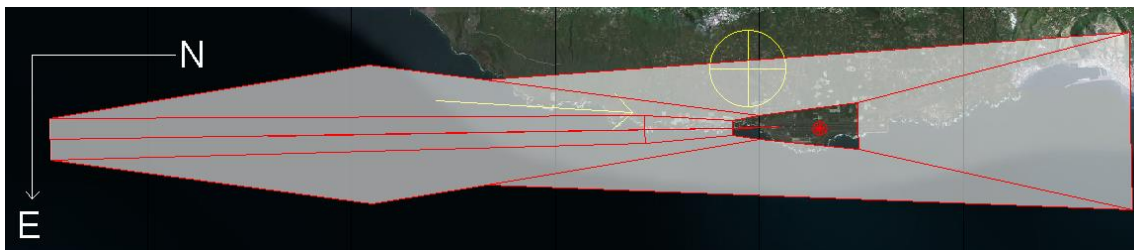


Ilustración 20. Posición del obstáculo determinante, N.º 346. La flecha amarilla indica la vista de la Ilustración 21.

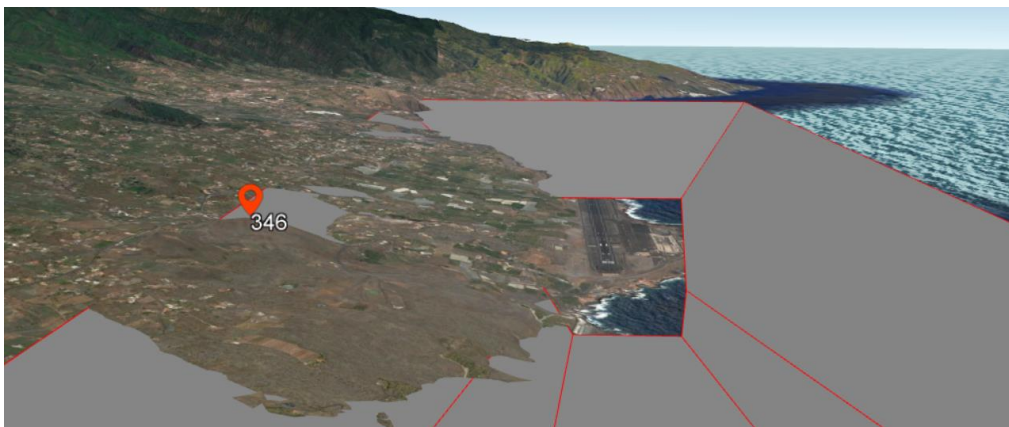


Ilustración 21. Posición del obstáculo determinante.

La OCA/H se obtiene de sumar el “Margen de pérdida de altura/error de altímetro” a la altura del obstáculo más alto. Los valores utilizados dependen de si la aeronave utiliza radioaltímetro o baroaltímetro. Debido a que el aeropuerto está rodeado de montañas, la opción elegida es el uso de baroaltímetro, para estar del lado de la seguridad.

Categoría de aeronaves (V_{20})	Margen utilizando radioaltímetro		Margen utilizando baroaltímetro	
	Metros	Pies	Metros	Pies
A – 169 km/h (90 kt)	13	42	40	130
B – 223 km/h (120 kt)	18	59	43	142
C – 260 km/h (140 kt)	22	71	46	150
D – 306 km/h (165 kt)	26	85	49	161

Tabla 11. Márgen de pérdida de altura/error de altímetro.

Categoría	OCA/H (m)	OCA/H (ft)
A	361,842 (330,142)	1186 (1082)
B	364,842 (333,142)	1198 (1094)
C	367,842 (336,142)	1206 (1102)
D	370,842 (339,142)	1217 (1113)

Tabla 12. OCA/H para una aproximación SBAS con VPA de 3°.

4.1.3 Tramo APV: VPA 3,5°

A continuación se va a estudiar la posibilidad de reducir la OCA/H aumentando el ángulo de la trayectoria de planeo hasta el límite de 3,5°, con el resto de parámetros constantes. Esto puede permitir que los obstáculos determinantes no interfieran con las OAS.

Categorías A y B	Constantes OAS		
	A	B	C
W	0,033100	0,000000	-6,45
W'	0,045847	0,000000	-38,76
X	0,031363	0,205964	-58,12
Y	0,028186	0,227922	-61,86
Z	-0,025000	0,000000	-38,03

Tabla 13. Constantes OAS de categorías A y B para un VPA de 3,5°.

Categorías C y D	Constantes OAS		
	A	B	C
W	0,033100	0,000000	-7,45
W'	0,045847	0,000000	-39,76
X	0,031363	0,205964	-59,64
Y	0,028186	0,227922	-63,54
Z	-0,025000	0,000000	-38,03

Tabla 14. Constantes OAS de categorías C y D para un VPA de 3,5°.

Categoría A y B	Coordenadas OAS						
	C	D	E	C''	C'''	D''	E''
X	845	376	-1521	9258	2534	5281	-7488
Y	153	224	459	328	272	934	1852
Z	0	0	0	300	77	300	149

Tabla 15. Coordenadas OAS de categorías A y B para un VPA de 3,5°.

Categoría C y D	Coordenadas OAS						
	C	D	E	C''	C'''	D''	E''
X	867	376	-1521	9288	2534	5281	-7456
Y	157	232	466	331	274	941	1852
Z	0	0	0	300	76	300	148

Tabla 16. Coordenadas OAS de categorías C y D para un VPA de 3,5°.

Las dimensiones de las superficies en planta son más reducidas que para el caso anterior y, por lo tanto, las pendientes de estas superficies son más inclinadas, pudiendo dejar fuera algunos de los obstáculos que penetraban con el ángulo de trayectoria de 3°.

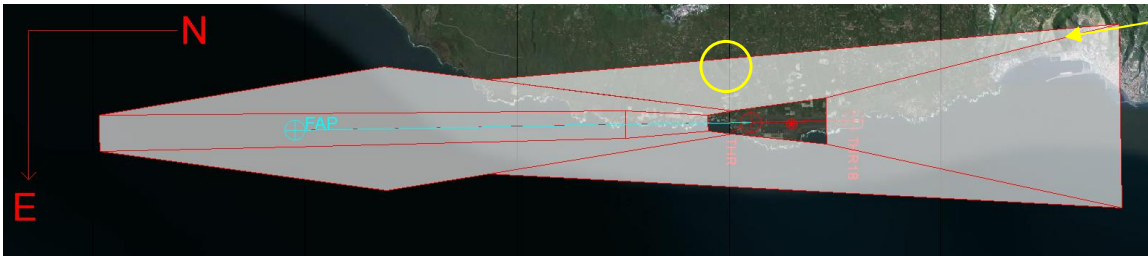


Ilustración 22. OAS de categoría D extendidas hasta el FAP.

Sin embargo, los obstáculos más elevados siguen siendo los mismos para todas las categorías, el N.º 1218, que se encuentra en aproximación frustrada, y el N.º 346, en aproximación.

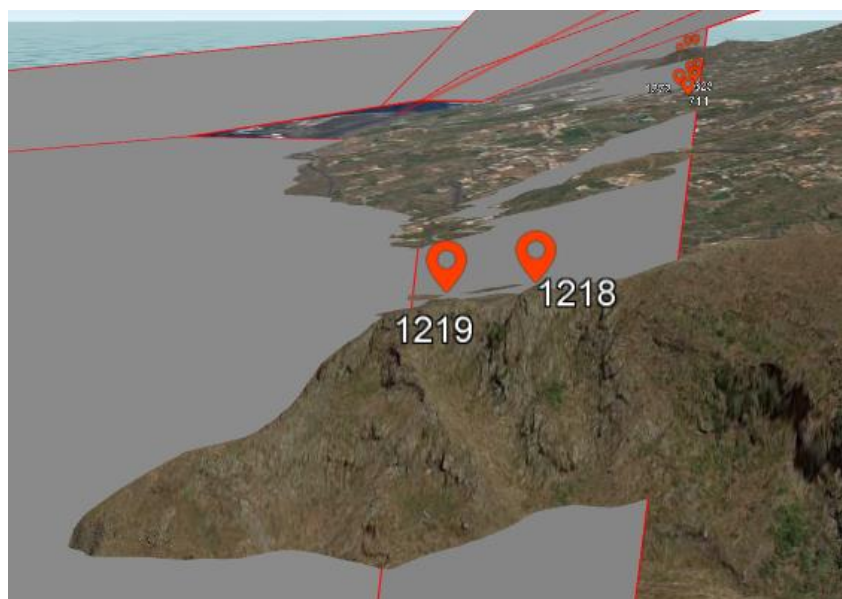


Ilustración 23. Posición de los obstáculos más elevados. Los cuatro primeros de la Tabla 17 coinciden con el caso de VPA de 3,5°.

N.º de obstáculo	Elevación (m)
1218	322,276
346	321,842
1219	315,652
1438	314,065
623	264,965

Tabla 17. Obstáculo que penetran en las OAS.

Una vez obtenidas las alturas de los obstáculos N.º 1218, 1219 y 623 en aproximación equivalente, ordenados por elevación quedan como sigue:

N.º de obstáculo	Elevación (m)
346	321,842
1438	314,065
623 (frustrada)	185,107
1218 (frustrada)	149,926
1219 (frustrada)	145,112

Tabla 18. Obstáculos después de calcular la altura en aproximación equivalente.

Utilizando baroaltímetro, la OCA/H para cada categoría coincide con el caso anterior.

Categoría	OCA/H (m)	OCA/H (ft)
A	361,842 (330,142)	1186 (1082)
B	364,842 (333,142)	1198 (1094)
C	367,842 (336,142)	1206 (1102)
D	370,842 (339,142)	1217 (1113)

Tabla 19. OCA/H para una aproximación SBAS con VPA de 3,5°.

A priori, el VPA de 3°, que es el óptimo, parece la mejor opción para una aproximación APV-I en La Palma. Pero en ocasiones, puede resultar ventajoso utilizar un VPA de 3,5°, ya que el punto en el que se alcanza la OCA/H se sitúa aproximadamente 900 m más cerca del umbral de la pista 36. Es decir, en condiciones de visibilidad baja, la aeronave puede acercarse más al aeropuerto antes de ejecutar una aproximación frustrada. Por lo tanto, finalmente se escoge el ángulo de 3,5° para la aproximación final.

VPA (°)	Distancia de OCA/H al umbral (m)
3	6185,006
3,5	5299,682

Tabla 20. Coordenada x de la OCA para categoría D.

Por otra parte, la opción de aumentar la pendiente de aproximación frustrada para reducir la OCA/H no es lógica, ya que el obstáculo determinante se encuentra en aproximación. Para demostrarlo, se han obtenido las OAS para una pendiente de frustrada del 5%, obteniendo el mismo resultado (Tabla 17).

4.1.4 Aproximación intermedia

Este tramo de la aproximación se va a realizar a la altitud constante de 2000 ft, ya que el objetivo es que la aeronave pierda velocidad y no es conveniente que tenga pendiente. Además, el tramo se encuentra en su totalidad por encima del agua, por lo que no hay ningún obstáculo que pueda afectar en el diseño. En cuanto a la longitud, no debe ser mayor de 28 km.

Enlace con la aproximación final

La anchura del área de la aproximación intermedia es de 9260 m, dividida en área primaria y área secundaria, de igual tamaño. La adaptación se produce desde 3,7 km antes del FAF, disminuyéndose el área primaria uniformemente hasta la anchura de la superficie X en el FAF y el área secundaria a 0 en ese mismo punto.

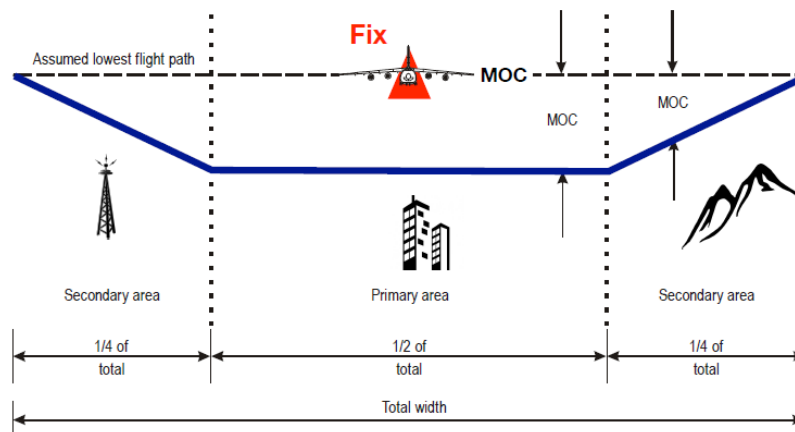


Ilustración 24. Esquema de las áreas primaria y secundaria.

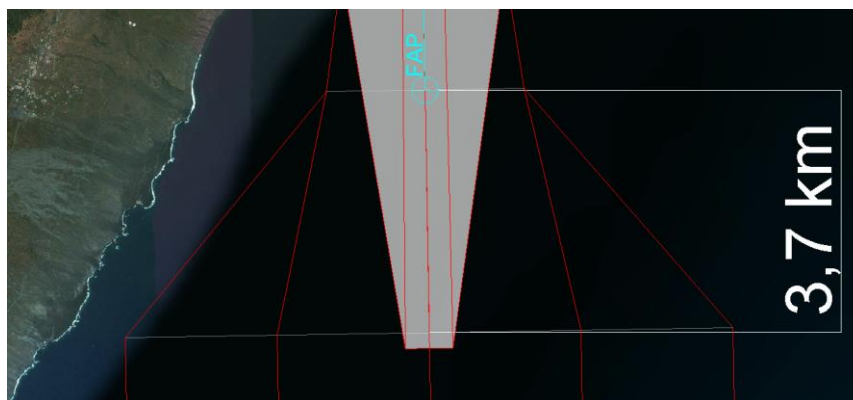


Ilustración 25. Enlace entre la aproximación final y aproximación intermedia.

El IF se va a situar a 19 km del FAF, distancia óptima para la aproximación intermedia, y alineado con la pista.

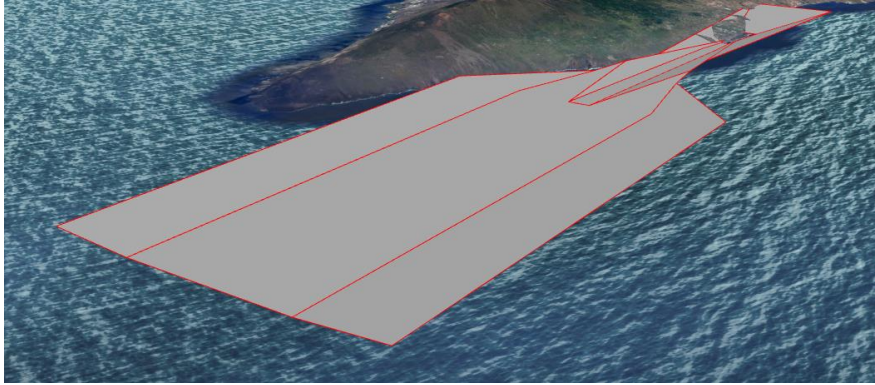


Ilustración 26. Aproximación intermedia en 3D, con una longitud de 19 km.

4.1.5 Aproximación inicial

La aproximación inicial comienza en el IAF ARACO a una altitud de 4500 ft, después de diversas STAR que terminan en ese punto. El IAF tiene además un circuito de espera asociado. Si se traza una línea que une el IAF con el IF, el cambio de derrota es superior al límite de 90° , de aproximadamente 104° . Es decir, para realizar el segmento inicial de la aproximación se debe incorporar un viraje entre esos dos puntos. De todas las configuraciones posibles, se ha decidido que se van a hacer dos virajes de paso con un cambio de derrota de 70° (Ilustración 25). La derrota inicial a partir del IAF es $219,01^\circ$, la derrota con la que llega la aeronave al IF es $289,01^\circ$. Intersecando estas líneas se establece el viraje en las siguientes coordenadas:

Punto de viraje	
Latitud	N28° 18' 25,66"
Longitud	W17° 34' 03,84"

Tabla 21. Coordenadas LLA del punto de viraje.



Ilustración 27. Posición del viraje del tramo inicial.

4.1.6 Protección de virajes de paso

En el cálculo de las áreas de protección de virajes hay que determinar en primer lugar los parámetros que afectan a su diseño. Siguiendo el Documento 8168 Volumen II, para un viraje en la aproximación inicial se tienen los siguientes valores:

Categoría	IAS (km/h)	Altitud	Viento	Ángulo de inclinación lateral	c (segundos)
A	280	4500 ft	56 km/h	25°	*11
B	335				
C	445				
D	465				
*Tiempo para establecer la inclinación lateral + tiempo de reacción del piloto					

Tabla 22. Parámetros para el cálculo del viraje de paso.

El primer paso es calcular la velocidad verdadera TAS. Para ello se emplea la siguiente expresión, que incluye corrección de compresibilidad:

$$TAS = 102,06\sqrt{T} \sqrt{\sqrt{1 + 0,00067515 \frac{IAS^2}{P} \left(1 + \frac{IAS^2}{6003025}\right)} - 1} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

donde TAS y IAS en km/h, T es la temperatura en K a ISA+15 y P es la presión en hPa.

Categoría	TAS (km/h)
A	307,045
B	367,184
C	487,193
D	508,970

Tabla 23. Velocidades verdaderas.

A continuación, se calculan el régimen de viraje (R) y el radio de viraje (r). Las áreas de protección de las categorías A, B y C entran en las áreas de categoría D, por lo tanto, al tratarse de un procedimiento sobre el agua, alejado de cualquier obstáculo, solo se van a calcular los valores para esta categoría.

$$R = \frac{6355 \tan \alpha}{\pi TAS} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

$$r = \frac{TAS}{20\pi R} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

donde R en °/s, r en km, E_θ en km, TAS en km/h y α es el ángulo de inclinación latera.

$$R = 1,854 \text{ °/s}$$

$$r = 4,371 \text{ km}$$

El método empleado es el método de espiral de viento, que se usa para virajes de más de 30° en un IAF o IF. La espiral de viento tiene en cuenta el efecto del viento en cada punto del viraje:

$$E_\theta = \frac{\theta}{R} \frac{w}{3600} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

donde w es la velocidad del viento en km/h y θ es el ángulo de viraje.

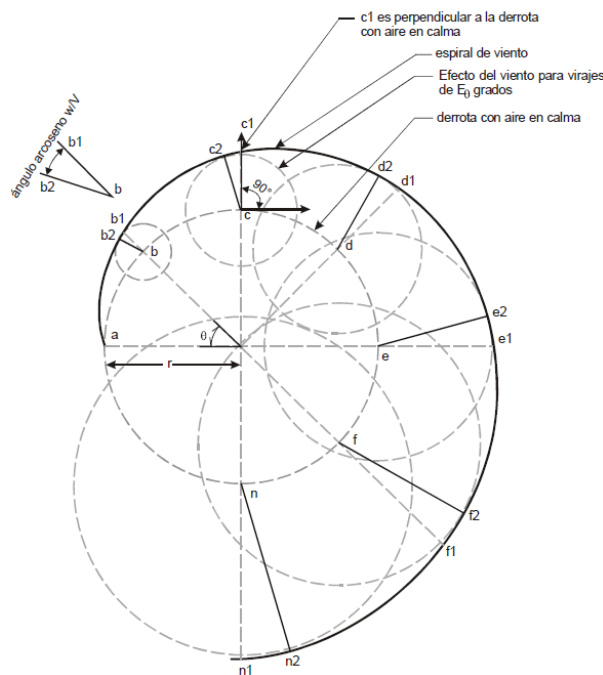


Ilustración 28. Procedimiento para construir la espiral de viento.

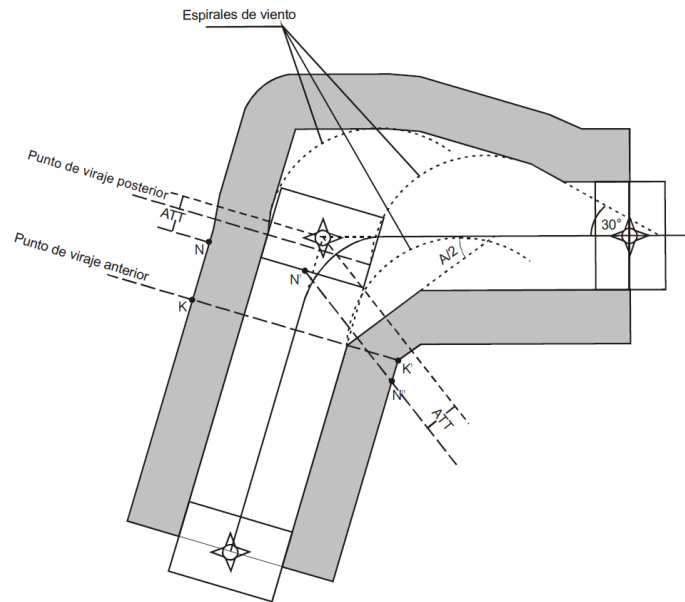


Ilustración 29. Procedimiento para construir un viraje de paso.

Los puntos de viraje anterior y posterior se determinan del siguiente modo:

- Punto de viraje anterior: $r \tan \frac{A}{2} + ATT$
- Punto de viraje posterior: $Min[r \tan \frac{A}{2}, r] - ATT - \frac{(TAS + w) c}{3600}$, donde A es el cambio del ángulo de derrota (si el valor es negativo, el punto está más allá del punto de recorrido).

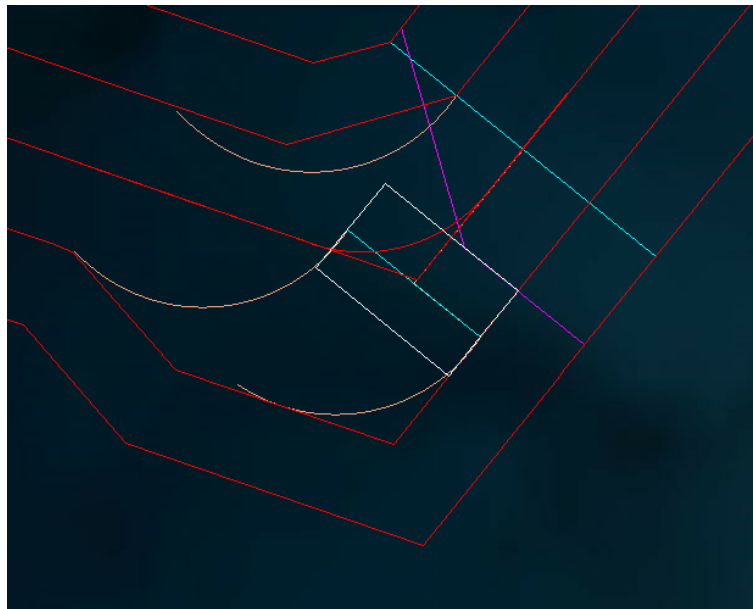


Ilustración 30. Construcción del viraje de paso para categoría D.

El viraje se construye del mismo modo en el punto intermedio y en el IF. La aproximación final resultante tiene una longitud de aproximadamente 37 km. Teniendo en cuenta que la aeronave debe descender desde los 4500 ft del IAF

hasta 2000 ft, la pendiente resultante es del 2% y, por tanto, cumple con la limitación de pendiente para esta fase de la aproximación.

En cuanto al franqueamiento de obstáculos, el MOC es de 300 m, y el cambio de MOC entre este tramo y la aproximación intermedia se produce en la *línea NN'N'* del viraje en el IF. Esta línea se define como el primer punto de referencia de descenso.



Ilustración 31. Aproximación inicial, 2D, AutoCAD.

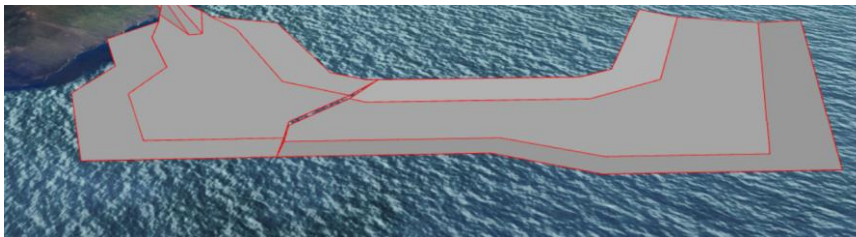


Ilustración 32. Aproximación inicial, 3D, Google Earth.

4.1.7 Aproximación frustrada

El SOC viene determinado por la altura y distancia en la que el plano GP' alcanza una altitud $OCA/H - HL$ ("Height Loss"). Al restar el valor de HL, el SOC es el mismo para todas las categorías. El plano GP' es paralelo a la trayectoria de planeo, pero su origen es punto de inicio de la superficie Z de las OAS, X_E .

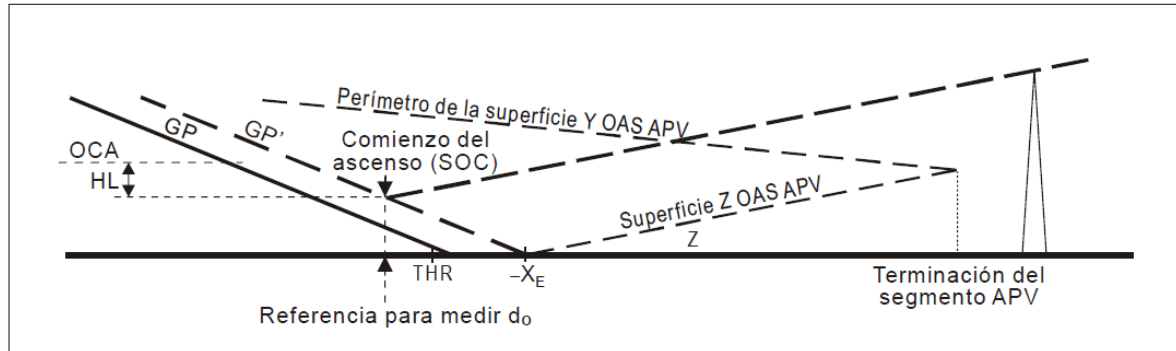


Ilustración 33. Franqueamiento de obstáculos en aproximación frustrada en línea recta.

$$xSOC = X_E + \frac{OCH - HL}{\tan VPA}, \text{ con } X_E < 0 \quad [\text{Ecuación 10}]$$

El SOC se sitúa 3222,8 m antes del umbral. Trazando una superficie de pendiente 2,5% a partir de este punto se observa que el área montañosa del noreste de la isla de La Palma penetra en más de 300 m (Ilustración 32), y que los picos en esa zona alcanzan elevaciones de 2000 m. La solución más conveniente para una aeronave que realice cualquier aproximación en este aeropuerto sería un viraje “lo antes posible”, sin embargo, no se puede aplicar debido a las capacidades que tiene el receptor SBAS en la actualidad. En su lugar, se debe determinar un punto de viraje TP. Las posibles opciones para designar este punto pasan por realizar un viraje después del tramo APV, entre el umbral y la terminación del tramo APV o antes del umbral. Esta última es la que más se acerca al viraje “lo antes posible”, por lo que es la que se va a elegir para el procedimiento de aproximación frustrada.



Ilustración 34. Aproximación frustrada en línea recta.

4.1.8 Aproximación frustrada con viraje

Ante la necesidad de realizar un viraje se define el MATF como el punto de referencia que marca el viraje en el tramo de aproximación frustrada.

El punto final de la aproximación frustrada será el IAF NASOL, con su circuito de espera asociado, por lo tanto, el viraje es de más de 15°. Primero, se determinan los parámetros del viraje, tal como se hizo en el viraje del tramo

inicial. Las velocidades escogidas son las máximas para aproximación intermedia.

Categoría	IAS (km/h)	TAS (km/h)	Altitud	Viento	Ángulo de inclinación lateral	c (segundos)
A	185	192,839	Elevación A/D + 300 m	56 km/h	15°	*6
B	240	250,150				
C	295	307,448				
D	345	359,521				
*Tiempo para establecer la inclinación lateral + tiempo de reacción del piloto						

Tabla 24. Parámetros para calcular un viraje en aproximación frustrada.

De nuevo, se realiza primero el diseño del viraje para categoría D, entendiendo que las áreas de las categorías inferiores entran dentro de esta.

$$R = 1,508 \text{ } ^\circ/\text{s}$$

$$r = 3,795 \text{ km}$$

Se escoge un TP posterior de forma que la aeronave evite los obstáculos que se encuentran en línea recta. El TP, o MATF, se sitúa a una distancia de 0,6 km más c a la velocidad máxima del procedimiento más el viento. El TP anterior coincide con el SOC.

$$\text{TP} = 0,44 \text{ km del SOC}$$

$$\text{TP posterior} = 0,44 + 0,6 + 0,693 = 1,733 \text{ km del SOC}$$

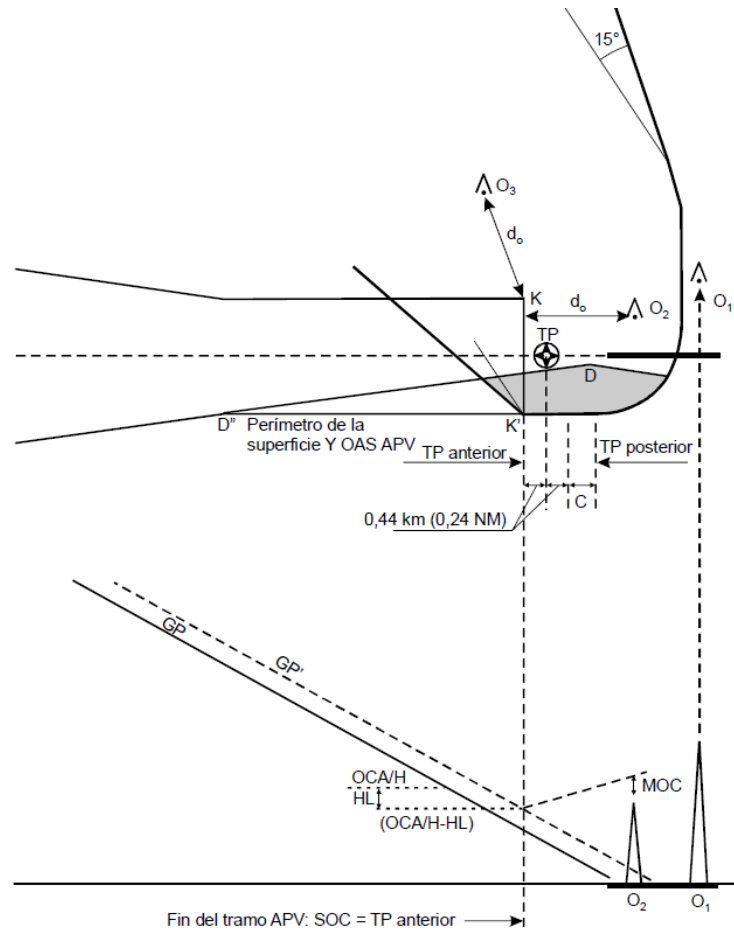


Ilustración 35. Procedimiento para calcular un viraje en aproximación frustrada.

Se trata de un viraje de sobrevuelo seguido de un tramo DF (“Direct to Fix”), y su área de protección se construye de la siguiente forma:

- En el borde interior, desde el TP anterior se traza una línea que forma 15° con la derrota posterior al viraje hasta la intersección con la anchura del área de aproximación frustrada final ($1/2 A/W = 3704$ m).
- El borde exterior sigue el perímetro de la superficie Y OAS SBAS desde el TP anterior hasta el TP posterior. A continuación, se traza una espiral de viento con los parámetros definidos anteriormente. Se traza una línea que forma 15° con la derrota posterior al viraje y que es tangente a la espiral de viento. Esta línea se extiende hasta la intersección con la anchura del área de aproximación frustrada final.

No se consideran áreas secundarias.

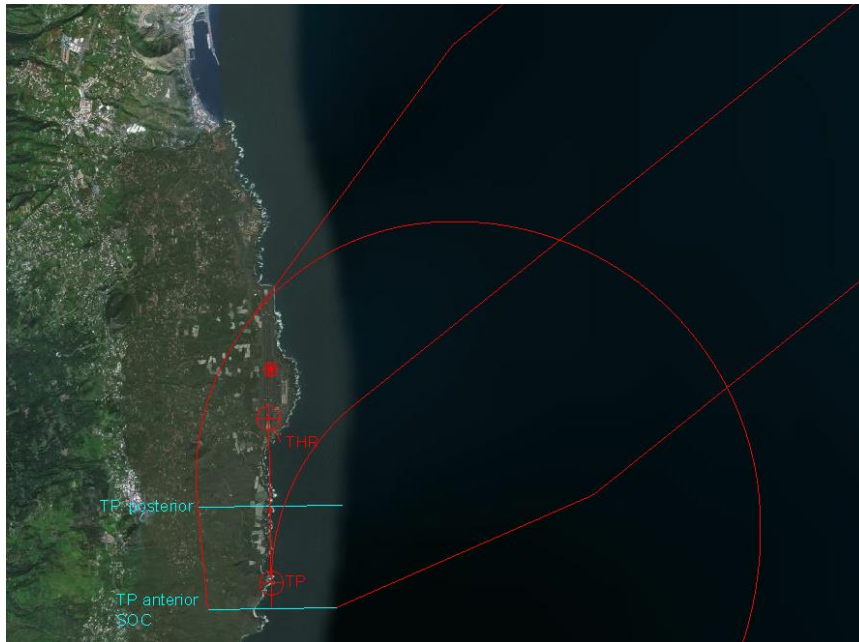


Ilustración 36. Viraje de sobrevuelo en aproximación frustrada para categoría D.

El tramo final de la aproximación frustrada se ensancha con un ángulo de 15° hasta $1/2 A/W = 4630$ m, debido a que el IAF se encuentra a más de 28 km del aeropuerto.

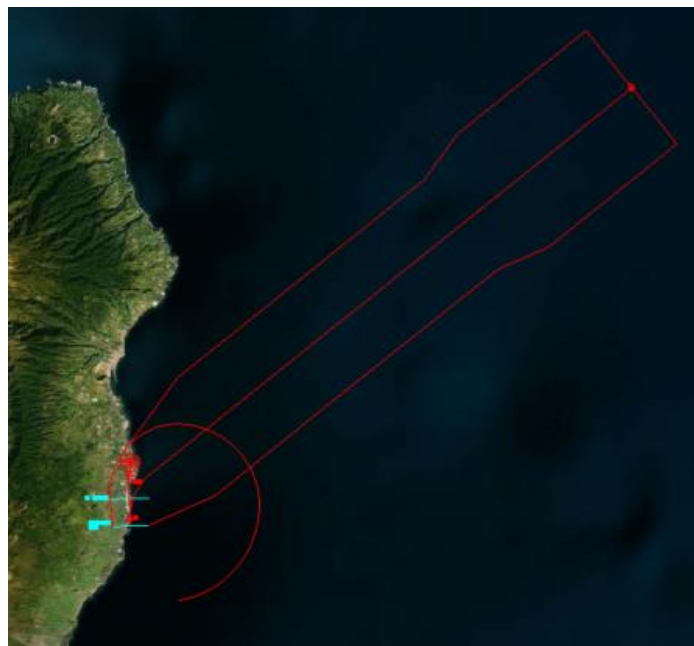


Ilustración 37. Aproximación frustrada, hasta el IAF NASOL.

El MOC será de 50 m, por ser un viraje de más de 15° . Para comprobar que se cumple, se ha dibujado una superficie que empieza en el SOC y se extiende más allá del punto de viraje posterior. Esta superficie se encuentra 50 m por debajo del procedimiento, y se observa que ningún obstáculo la penetra. Lo mismo ocurre con el resto de las categorías.



Ilustración 38. Superficie con pendiente igual a la pendiente de frustrada, situada 50 m por debajo del procedimiento.

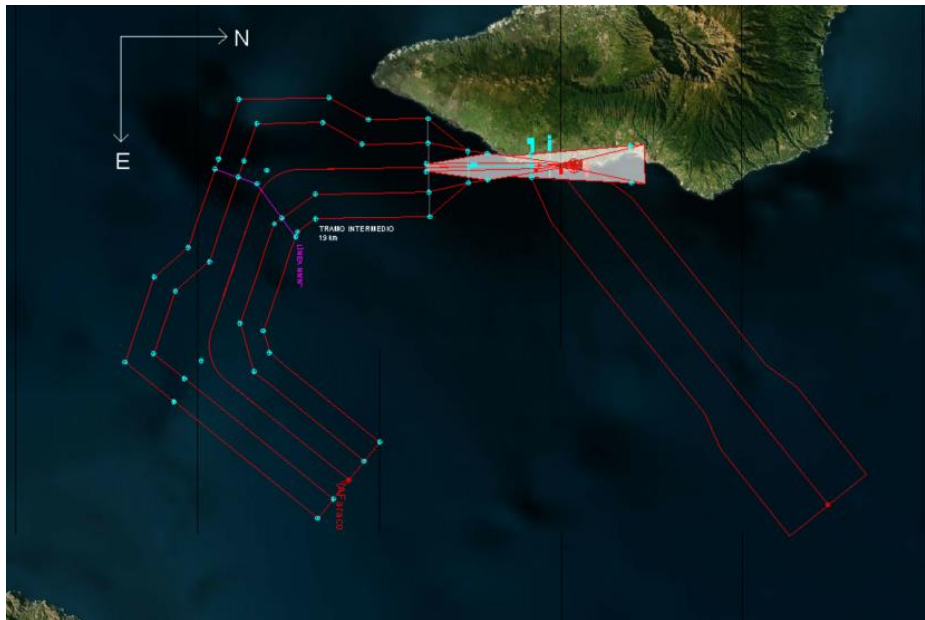


Ilustración 39. Procedimiento APV-SBAS completo en 2D.

4.1.9 Protección para el tramo visual

Todos los procedimientos por instrumentos deben estar protegidos de los obstáculos del tramo visual de la aproximación. Para evaluar esta protección, se traza la VSS (“*Visual Segment Surface*”), que para procedimientos APV-I se determina de la siguiente forma:

- 60 m antes del umbral, con una anchura de base igual a la superficie de aproximación interna definida en el Anexo 14 de OACI, se extiende paralela a la pista con una pendiente de $1,12^\circ$ menos que el ángulo del procedimiento promulgado hasta alcanzar una altura igual a la OCH.

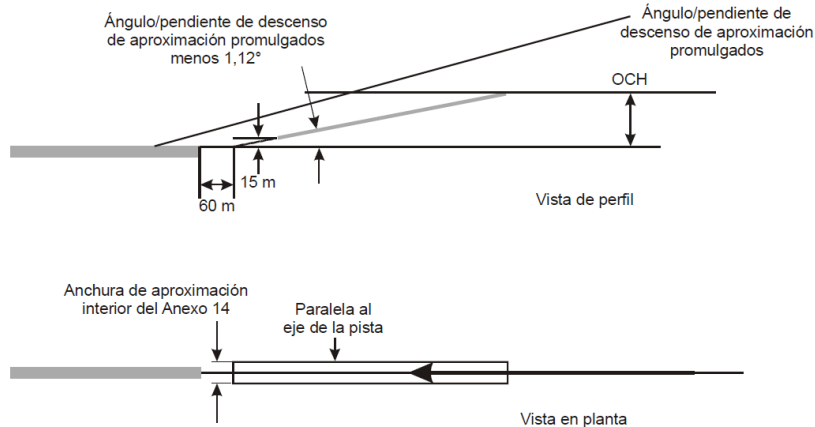


Ilustración 40. VSS para una aproximación APV.

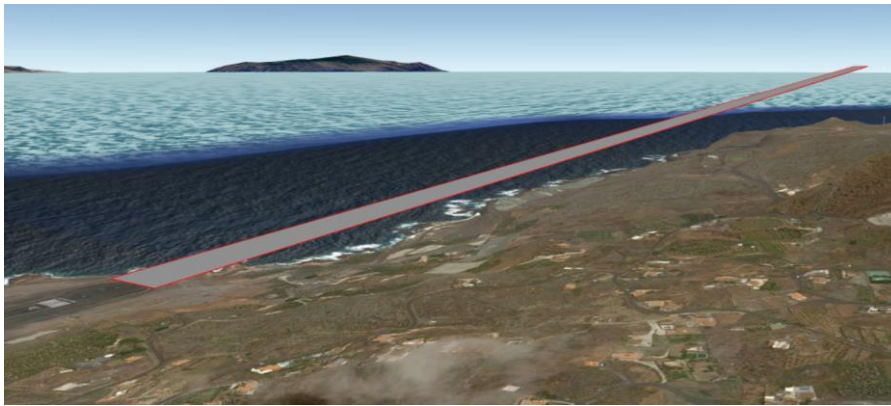


Ilustración 41. VSS para la aproximación APV-SBAS en La Palma.

4.2 SEÑAL DE EGNOS EN LA PALMA

La validación de los procedimientos PBN consiste en un proceso de tres etapas que detalla la OACI: toma de datos a largo plazo, en el terreno y pruebas de vuelo. A continuación, se va a verificar el cumplimiento de los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad durante seis meses (desde noviembre de 2021 hasta abril de 2022) en La Palma, centrándose en los requisitos para una aproximación APV-I. Los datos se obtienen de los informes mensuales de la ESSP (*European Satellite Service Provider*).

4.2.1 Disponibilidad SIS

La disponibilidad SIS se refiere al porcentaje de tiempo en el que hay al menos un satélite geoestacionario que difunde mensajes de EGNOS. Durante los últimos seis meses, este criterio se ha cumplido el 100% del tiempo.

SIS Availability (%)	2021-11	2021-12	2022-01	2022-02	2022-03	2022-04
PRN 123	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%
PRN136	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%	99,98%
PRN123 o PRN136	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
PRN123 y PRN136	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%	99,98%

Tabla 25. Disponibilidad SIS en La Palma.

4.2.2 Disponibilidad APV-I

Se define como el porcentaje de épocas en las que el nivel de protección se encuentra por debajo del límite de alerta. La disponibilidad debería ser mayor del 99%, pero esto no se cumple en los últimos seis meses, con valores del 90%. Retrocediendo aún más en el tiempo, se han comprobado los informes de los años 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 completos, y se comprueba que los valores de disponibilidad son superiores al 99% en todos los informes, llegando incluso a sobrepasar el 99,9% en muchos de los meses. Por tanto, aunque en los últimos seis meses no se cumpla el requisito de disponibilidad para APV-I es posible que esta aumente en los próximos meses y vuelva a los valores habituales previos a 2022.

	2021-11	2021-12	2022-01	2022-02	2022-03	2022-04
% épocas PL<AL	≥ 99%	≥ 99%	≥ 98%	≥ 90%	≥ 90%	≥ 95%

Tabla 26. Valores de disponibilidad APV-I en los últimos 6 meses en La Palma.

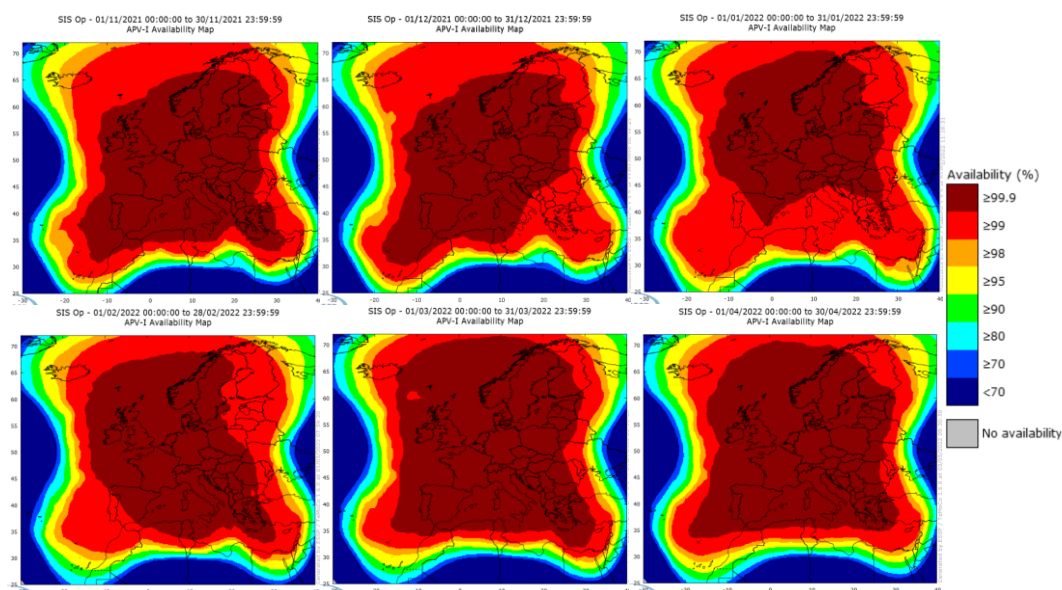


Ilustración 42. Disponibilidad APV-I en los últimos 6 meses en La Palma.

4.2.3 Continuidad APV-I

El riesgo de continuidad se define como la probabilidad de que ocurra un evento de continuidad en los próximos 15 segundos. Un evento de continuidad ocurre cuando, con el sistema disponible, en los siguientes 15 segundos deja de estarlo. El requerimiento de riesgo de continuidad de la OACI es de 8×10^{-6} por 15 segundos. Este no se cumple con el sistema EGNOS en ninguna zona de Europa, con mínimos de 10^{-4} o 5×10^{-4} por 15 segundos. En algunas regiones, como es el caso de La Palma, el riesgo de continuidad es superior a 10^{-3} por 15 segundos. Sin embargo, estos valores se consideran suficientes para empezar el uso de EGNOS en aviación civil, según las SARPs de OACI, debiendo aplicar medidas para mitigar el riesgo por parte de las autoridades locales de navegación aérea.

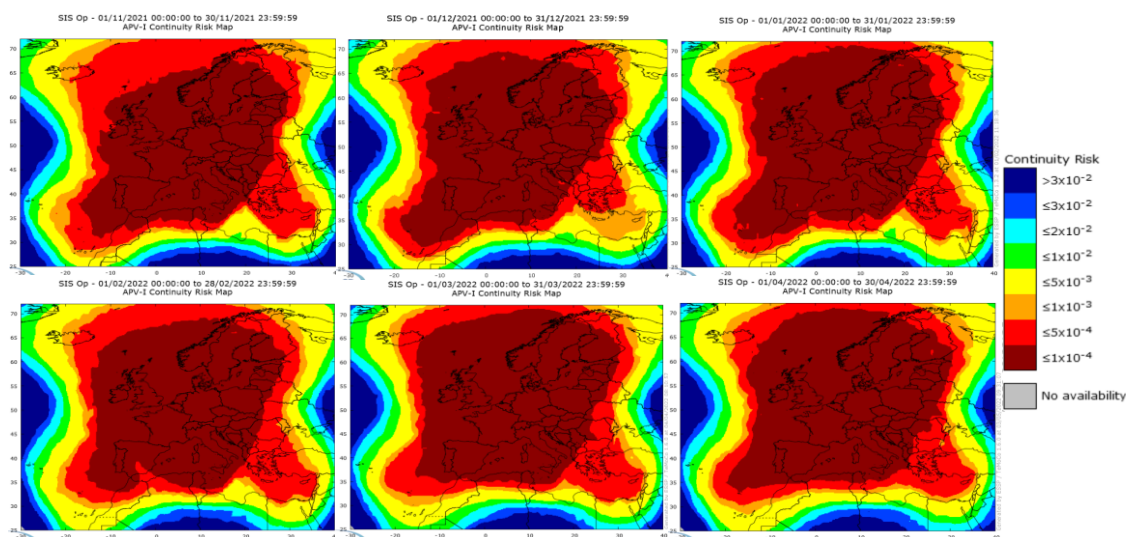


Ilustración 43. Continuidad APV-I en los últimos 6 meses en La Palma.

4.2.4 Integridad APV-I

El índice de seguridad, HSI y VSI para los casos horizontal y vertical respectivamente, se define como la relación entre el error del sistema de navegación (NSE) y el nivel de protección (PL) para cada segundo. Este debe ser siempre inferior a 1, lo cual se cumple con creces en los últimos seis meses. A su vez, el PL en EGNOS se considera que siempre es menor que el límite de alerta con una probabilidad de 1.2×10^{-7} . Por lo tanto, se cumplen los requerimientos de integridad OACI para APV-I.

4.2.5 Precisión APV-I

Analizando los valores de los errores de navegación horizontal y vertical en el percentil 95 (HNSE 95% y VNSE 95%) en la RIMS situada de La Palma, se observa que estos son siempre inferiores a los 16 y 20 m, respectivamente, que marca OACI, por lo que se cumple el requisito de precisión.

Accuracy	2021-11	2021-12	2022-01	2022-02	2022-03	2022-04
HNSE 95% (m)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,2	1,9
VNSE 95% (m)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,9	1,9

Tabla 27. Precisión APV-I en los últimos 6 meses en La Palma.

4.3 APROXIMACIÓN APV-BARO

Las aproximaciones con navegación vertical barométrica, LNAV/VNAV utilizan una guía lateral basada en GNSS básico, por lo que su diseño se basa en las aproximaciones LNAV. La anchura de las áreas de protección de una aproximación final LNAV son más grandes que en el caso de SBAS. Esto puede dificultar el diseño en áreas montañosas, pero puede resultar una buena opción en aeropuertos en los que no se cumplan los requisitos establecidos por OACI para las aproximaciones APV-SBAS.

4.3.1 Generalidades

El diseño de la aproximación inicial e intermedia se realiza de manera idéntica al explicado en APV-SBAS, salvo por la unión del tramo intermedio y final, ya que la geometría de las OAS es diferente.

Aunque la aproximación se base en procedimientos LNAV, no se identifican el FAF y MAPt. Estos únicamente se usan para definir las anchuras de las áreas laterales.

En aproximación final, el VPA efectivo varía en función de la temperatura y altitud del aeropuerto, y no debe sobrepasar los límites inferior y superior de 2,5° y 3,5°. El VPA óptimo es de 3°. El tramo APV abarca la aproximación final y las primeras fases de la aproximación frustrada y debe alinearse con el eje de la pista. La distancia entre el FAP y el umbral no debería ser mayor de 19 km.

Las velocidades máximas de viraje dentro de un radio de 10 NM del aeropuerto serán las que se indican en la Tabla 4.

4.3.2 Protección para el tramo visual

La VSS para los procedimientos de aproximación por instrumentos que no tienen guía lateral equivalente a un localizador, como es el caso, abarca una zona más grande, y se construye como sigue: 60 m antes del umbral y con una anchura de base igual a la franja de la pista, se extiende alineada con la pista hasta la altura de la OCH con un ángulo de pendiente de 1,12° menos que el

ángulo del procedimiento, y se ensancha con una divergencia del 15% a cada lado.

La anchura de la franja en el aeropuerto de La Palma es de 150 m. Considerando una aproximación alineada, para un VPA de 3° , algunos de los terrenos elevados cerca de la Playa del Pozo, al sur del aeropuerto, entran en la VSS. Es decir, con un ángulo de la trayectoria de 3° , los mínimos quedan restringidos a la OCA/H de aproximación visual (en circuito).

Para un VPA de $3,5^\circ$ la VSS está libre de obstáculos y, por tanto, la OCA/H se determinará a partir de los obstáculos que penetren las OAS.



Ilustración 44. VSS para la aproximación APV-BARO con VPA de 3° en La Palma.

4.3.3 Área de Aproximación visual (en circuito)

El área de aproximación visual (en circuito) protege las aeronaves en la última fase del vuelo después de una aproximación por instrumentos. Para su construcción, se traza una circunferencia en cada umbral de la pista y se unen mediante rectas tangentes. El radio de las circunferencias se calcula conforme a la Ecuación 8 y va a depender de la categoría de la aeronave. Los parámetros que han de tenerse en cuenta para su cálculo son:

- Elevación del aeródromo + 300 m.
- Temperatura ISA +15 °C.
- Viento de 46 km/h.
- Inclinación de 20° , o la que genere un régimen de viraje de $3^\circ/s$, lo que suponga menos inclinación lateral.
- Tramo recto de valor constante.
- IAS máxima de viraje especificada en la carta del procedimiento NDB en La Palma (Tabla 4), en lugar de la IAS para maniobras visuales.

Cat.	IAS (km/h)	TAS (km/h)	TAS+Viento (km/h)	R (°/s)	r (km)	Tramo recto (km)	RADIO (km)
A	185	192,823	238,823	3,000	1,267	0,56	3093,994
B	240,786	250,949	296,949	2,479	1,906	0,74	4552,258
C	296,352	308,831	354,831	2,075	2,722	0,93	6373,289
D	342,657	357,053	403,053	1,827	3,512	1,11	8133,315

Tabla 28. Parámetros que definen la geometría del área de maniobra visual.

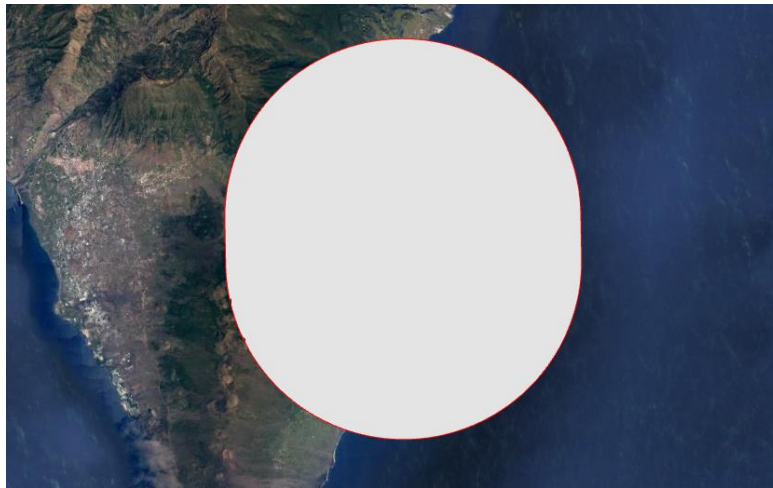


Ilustración 45. Maniobra visual para categoría D.

La OCA/H en aproximaciones visuales (en circuito) se calcula añadiendo un MOC por encima del obstáculo de mayor elevación que esté en el área de calculada para cada categoría de aeronave.

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

Tabla 29. MOC para aproximación visual (en circuito)

Categoría	Elevación Obst. (m)	OCA/H (m)	OCA/H (ft)
A	704	794 (762)	2605 (2501)
B	1011	1101 (1169)	3612 (3508)
C	1389	1509 (1477)	4951 (4847)
D	1709	1829 (1797)	6001 (5897)

Tabla 30. OCA/H de aproximación visual en La Palma.

Reducción de la OCA/H

Según el Documento 8168, se puede ignorar un sector del área de maniobras en circuito si existe un obstáculo prominente, como es una montaña, siempre que se encuentre fuera de las superficies de aproximación definidas en el anexo 14. Estas superficies, para pistas de número de clave 4, empiezan a 60 m del umbral, tienen una longitud del borde interior de 300 m y divergen un 15% a cada lado. La OCA/H final para la maniobra visual (en circuito) se muestra en la Tabla 31.

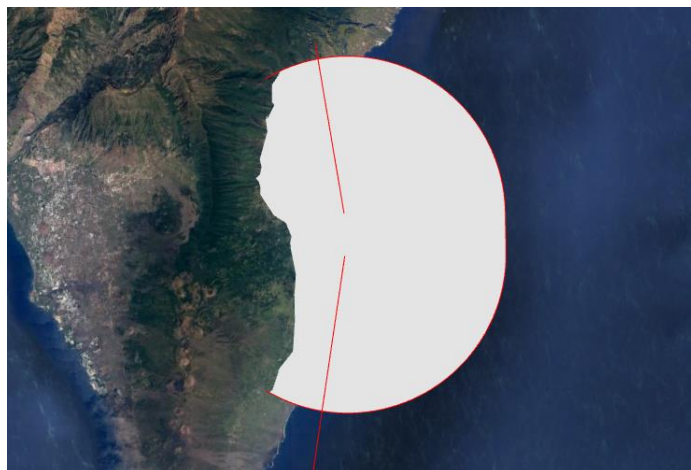


Ilustración 46. Límite de la zona en la que se ignoran los obstáculos en el cálculo de la OCA/H.

Categoría	Elevación Obst. (m)	OCA/H (m)	OCA/H (ft)
A	185	275 (243)	902 (798)
B	185	275 (243)	902 (798)
C	290	410 (378)	1345 (1241)
D	587	707 (675)	2319 (2215)

Tabla 31. OCA/H de maniobra visual, una vez aplicada la reducción.

4.3.4 Tramo APV: VPA 3°

El VPA promulgado inicial será de 3°, el óptimo, pero hay que comprobar que este no sobrepase los límites cuando varía la temperatura. Según la Tabla 33, para un aeródromo a nivel del mar con un VPA promulgado de 3° las temperaturas deben estar entre -30°C y 50°C.

A partir de los datos e informes de AEMET de las temperaturas a lo largo del día durante varios años, se observa que la temperatura apenas llega al intervalo de 35-39 °C incluso en los meses más calurosos, y que las mínimas están en torno a los 10°C. Con esta información y sabiendo que la temperatura de referencia del aeropuerto de La Palma es de 27°C, se puede afirmar que el VPA efectivo va a estar dentro de los límites en este aeropuerto.

Hora	Temperatura °C									
UTC	0/4	5/9	10/14	15/19	20/24	25/29	30/34	35/39	>40	N. OBS
0	-	-	-	26,1	71,8	2,2	-	-	-	322
1	-	-	-	26,3	71,5	2,2	-	-	-	319
2	-	-	-	28,0	68,6	3,4	-	-	-	322
3	-	-	-	29,5	67,4	2,5	0,6	-	-	322
4	-	-	-	29,2	68,0	2,5	0,3	-	-	322
5	-	-	-	28,2	70,2	1,4	0,2	-	-	503
6	-	-	1,2	47,6	49,9	1,1	0,1	-	-	9151
7	-	-	1,8	48,8	48,0	1,2	0,1	-	-	10766
8	-	-	1,0	41,7	52,8	4,2	0,3	-	-	10753
9	-	-	0,2	31,1	55,2	13,2	0,3	-	-	10775
10	-	-	0,1	19,6	57,5	22,4	0,3	-	-	10718
11	-	-	0,1	13,2	57,5	28,8	0,5	-	-	10704
12	-	-	0,1	10,6	56,7	32,1	0,5	-	-	10734
13	-	-	0,1	9,5	57,7	32,2	0,5	0,1	-	10710
14	-	-	0,1	10,2	57,7	31,4	0,5	-	-	10723
15	-	-	-	11,8	58,9	28,7	0,5	-	-	10736
16	-	-	0,1	15,4	59,9	24,2	0,4	-	-	10744
17	-	-	0,1	20,9	62,0	16,8	0,3	-	-	10757
18	-	-	0,1	28,1	62,2	9,4	0,2	-	-	10759
19	-	-	0,2	35,5	59,2	4,9	0,1	-	-	10760
20	-	-	0,4	45,2	51,4	3,0	-	-	-	8337
21	-	-	0,8	60,6	37,1	1,4	-	-	-	3298
22	-	-	0,7	35,0	61,5	2,6	0,2	-	-	611
23	-	-	0,3	28,8	68,8	1,9	0,3	-	-	368

Tabla 32. Porcentaje de veces en el que la temperatura se encuentra en un rango determinado para cada hora del día. Periodo de observación: 2002-2016. Fuente: AEMET.

Temp (C°)	VPA promulgado 2,8°			VPA promulgado 3,0°			VPA promulgado 3,2°		
	Elevación del aeródromo			Elevación del aeródromo			Elevación del aeródromo		
	MSL	3 000 ft	6 000 ft	MSL	3 000 ft	6 000 ft	MSL	3 000 ft	6 000 ft
50	3,14	3,21	3,28	3,37	3,44	3,51	3,59	3,67	3,75
40	3,05	3,11	3,18	3,26	3,33	3,40	3,48	3,55	3,63
30	2,95	3,01	3,07	3,16	3,22	3,29	3,37	3,44	3,51
20	2,85	2,91	2,97	3,05	3,12	3,18	3,26	3,32	3,40
10	2,75	2,81	2,87	2,95	3,01	3,07	3,14	3,21	3,28
0	2,65	2,71	2,77	2,84	2,90	2,96	3,03	3,10	3,16
-10	2,55	2,61	2,66	2,74	2,79	2,85	2,92	2,98	3,04
-20	2,46	2,51	2,56	2,63	2,69	2,74	2,81	2,87	2,93
-30	2,36	2,41	2,46	2,53	2,58	2,63	2,70	2,75	2,81
-40	2,26	2,31	2,36	2,42	2,47	2,53	2,58	2,64	2,70
-50	2,16	2,21	2,26	2,32	2,36	2,42	2,47	2,52	2,58

Tabla 33. Comparación del VPA efectivo y del promulgado según la elevación y temperatura. Naranja: prohibido. Amarillo: no normalizado. Verde: óptimo.

4.3.5 OAS APV-BARO

Las OAS están formadas por una superficie de aproximación final (FAS), un plano horizontal y una superficie de aproximación frustrada (superficie Z). Los límites laterales exteriores e interiores de estas coinciden con los bordes de las áreas secundaria y primaria LNAV.

Superficie de aproximación final (FAS)

Esta superficie tiene una anchura de 3518 m, según la Tabla 3. El origen se sitúa a nivel del umbral, y a 444 m más la distancia en la que la trayectoria vertical alcanza una altura H_i , que depende de la altitud, antes del mismo. El valor de H_i también determina la altura del borde exterior de las áreas secundarias respecto al área primaria. Este valor es:

- $H_0 = 75$ m por debajo de 5000 ft
- $H_{5000} = 105$ m por debajo de 10000 ft
- $H_{10000} = 120$ m por encima de 10000 ft

En este caso, el aeropuerto se encuentra a nivel del mar, y el IAF a 4500 ft, por lo que siempre se tendrá el valor de $H_0 = 75$ m. El FAS se extiende hasta la altitud de la OCS horizontal del tramo intermedio, que va a depender del FAP. La altitud del FAP va a ser de 3400 ft, misma altitud de tramo intermedio que la publicada en el procedimiento instrumental NDB para la pista 36. Con un VPA de 3° y una altura sobre el umbral (RDH) de 15 m, la posición del FAP será (Ecuación 1):

$$x_{FAP} = 18883,3 \text{ m}$$

$$h_{FAP} = 1004,6 \text{ m}$$

A continuación, se muestran las expresiones que se emplean para calcular los parámetros del FAS:

- Ángulo:

$$\tan \alpha_{FAS} = (\text{altura a FAP} - \Delta h - H_0) * \tan VPA / (\text{altura a FAP} - H_0) \quad [\text{Ecuación 11}]$$

donde Δh es una corrección por temperatura.

- Corrección por temperatura

$$\Delta h = \left(-\frac{\Delta T_{STD}}{L_o} \right) \ln \left[1 + \frac{L_o h_{FAP}}{T_o + L_o h_{THR}} \right] \quad [\text{Ecuación 12}]$$

donde ΔT_{STD} es la desviación de la temperatura respecto de la ISA, L_o es el gradiente vertical de la temperatura de referencia (-0,0065°/m), h_{FAP} es la altura del FAP sobre el umbral, T_o es la temperatura de referencia a nivel del mar (288,15 K) y h_{THR} es la elevación del umbral.

- Origen:

$$X_{FAS} = \left[\frac{H_0 - RDH}{\tan VPA} \right] + ATT \quad [\text{Ecuación 13}]$$

- Altura a una distancia x :

$$h_{FAS} = (x - x_{FAS}) * \tan \alpha_{FAS} \quad [\text{Ecuación 14}]$$

siendo el máximo $h_{FAP} - 150$, altura de la OCS (“Obstacle Clearance Surface”) del tramo intermedio ya que este se encuentra sobre el agua.

α_{FAS} (°)	3,136
Δh (m)	-42,350
X_{FAS} (m)	1588,868

Tabla 34. Valores que definen el FAS con VPA de 3°.

Plano horizontal

Se trata de una superficie a nivel del umbral, entre el FAS y el origen de la superficie Z. Los bordes externos de las áreas secundarias se elevan H_0 por encima del umbral en el origen del FAS y se reduce a 30 m por encima del umbral a una distancia ATT (“*Along Track Tolerance*”) del mismo, manteniéndose hasta el comienzo de la superficie Z. En ese mismo punto (ATT antes del umbral), la anchura de las áreas aumenta según una divergencia de 15° . Esto se mantendrá en la superficie Z hasta que se alcance la anchura de aproximación frustrada.

Superficie Z

La superficie de aproximación frustrada se eleva con una pendiente del 2,5% a partir de -900 m, -1100 m o -1400 m, según sea categoría A y B, C o D, respecto del umbral. Los bordes externos de las áreas secundarias están 30 m por encima de la superficie Z.

El tramo APV termina en el MAHF (“*Missed Approach Holding Fix*”), en el MATF anterior para un viraje a una altitud dada, o en el MAPt (“*Missed Approach Point*”) anterior si se especifica un viraje en el MAPt, lo que se encuentre primero.

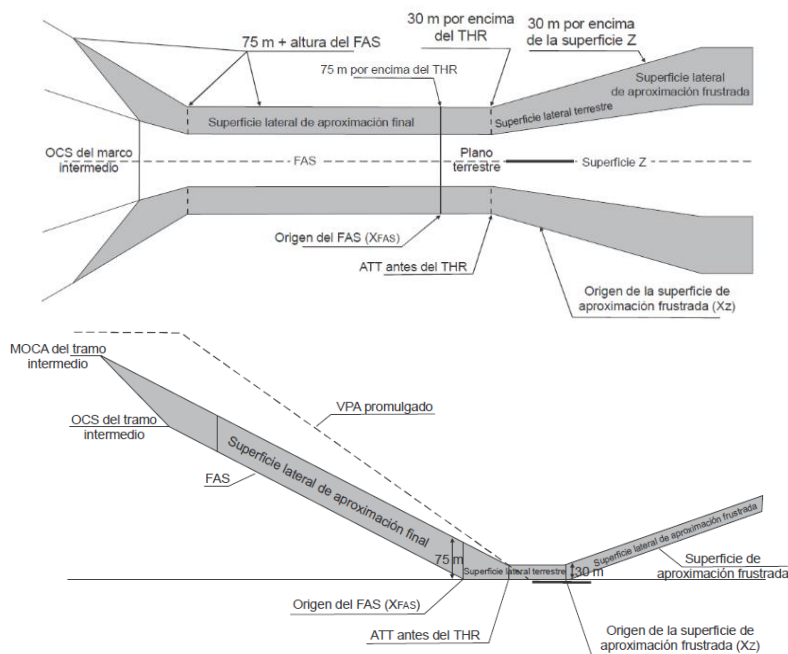


Ilustración 47. Geometría de las OAS APV-BARO.

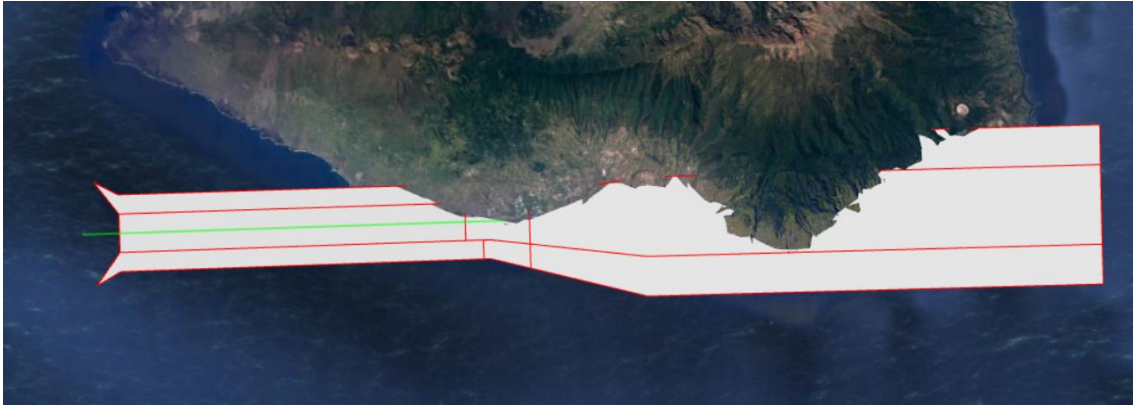


Ilustración 48. OAS APV-BARO en La Palma.

Evaluación de obstáculos

Gran parte de la isla entra en las OAS, sobre todo en la superficie Z. Sin embargo, a la hora de calcular los mínimos, parte de estos obstáculos no se tienen en cuenta, ya que estos quedan restringidos a la OCA/H de maniobra visual (en circuito) en la que se ha empleado un método de reducción de mínimos.

Categoría	OCA/H (m)	OCA/H (ft)
A	275 (243)	902 (2501)
B	275 (243)	902 (3508)
C	410 (378)	1345 (1241)
D	707 (675)	2319 (2215)

Tabla 35. OCA/H de APV-BARO para VPA de 3°, restringida a OCA/H de maniobra visual.

4.3.6 Tramo APV: VPA 3,5°

Un aumento del VPA promulgado hasta el valor de 3,5° implica que la VSS no es una limitación a la hora de calcular los mínimos y, por tanto, cabe la posibilidad de reducirlos. Sin embargo, incrementar el ángulo de la trayectoria conlleva que el procedimiento no sea normalizado, debido a que el efecto de las altas temperaturas produce que el VPA sobrepase los límites gran parte del año y pase a considerarse como ángulo pronunciado. Es decir, se debe realizar un estudio aeronáutico y se precisa de una aprobación especial para el uso del procedimiento. Según lo dispuesto en el Documento 8168 Volumen II, dicho estudio debe considerar, entre otros, el efecto de la cizalladura del viento. Esto puede suponer un problema en La Palma, especialmente en el caso de viento sinóptico del oeste. Aún así, se va a plantear la aproximación APV-BARO para un ángulo de 3,5°.

Con una altitud de tramo intermedio de 3400 ft se tienen los siguientes valores de posición del FAP respecto del umbral:

$$xFAP = 16180,3\text{m}$$

$$hFAP = 1004,6 \text{ m}$$

Los valores que determinan la geometría del FAS son:

α_{FAS} (°)	3,659
Δh (m)	-42,350
X_{FAS} (m)	1424,991

Tabla 36. Valores que definen el FAS con VPA de 3,5°.

El plano horizontal y la superficie Z se mantienen invariantes respecto al caso anterior.

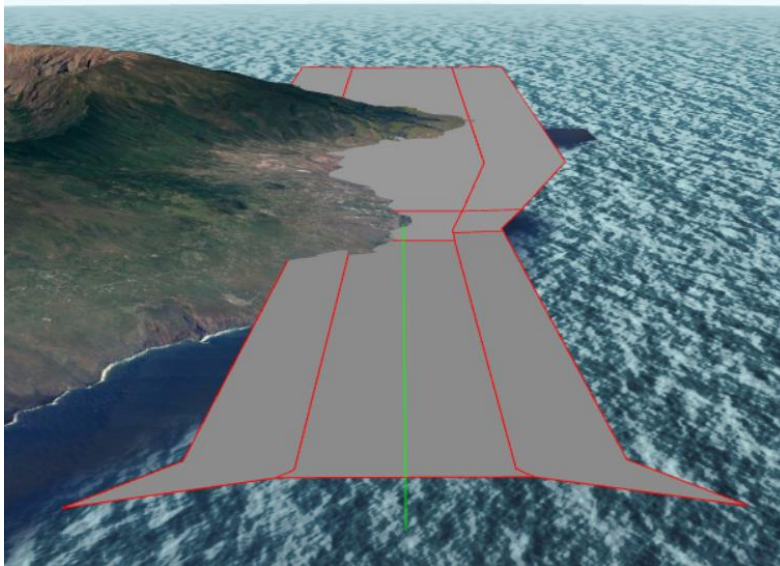


Ilustración 49. OAS APV-BARO en La Palma. VPA de 3,5°.

Evaluación de obstáculos

De forma idéntica a la aproximación LPV, los obstáculos se pueden clasificar en obstáculos de aproximación y obstáculos de aproximación frustrada, según si se encuentran antes o después del inicio de la superficie Z, respectivamente. Para estos últimos, se debe determinar la altura del obstáculo en aproximación equivalente.

$$h_a = \frac{(h_{ma} \text{ ó } h'_{ma}) \cot Z + (X - X_Z)}{[\cot Z + \cot \theta]} \quad \text{[Ecuación 15]}$$

donde h_a = altura del obstáculo en aproximación equivalente

h_{ma} = altura del obstáculo en aproximación frustrada

h'_{ma} = nivel de penetración más la altura del borde interior de la superficie lateral a la distancia a lo largo de la derrota del obstáculo que penetra (si el obstáculo se encuentra en la superficie lateral).

θ = VPA

Z = ángulo de la superficie de aproximación frustrada

X = distancia al obstáculo desde el umbral

X_z = coordenada x de la superficie Z .

Gran parte de la isla penetra las superficies, especialmente la superficie Z . El obstáculo más alto registrado en el AIP que penetra es el N.º 1199 con una elevación de 1019,128 m. Este obstáculo se encuentra en aproximación frustrada, a una distancia de 13093 m del umbral en la coordenada x , por lo que hay que calcular la altura en aproximación equivalente. El valor obtenido de elevación es de 525,116 m para categoría D ($X_z = -1400$ m).

Sin embargo, la montaña penetra la superficie llegando a una elevación de aproximadamente 1376 m, que se traduce en una elevación de alrededor de 780 m después de calcular la altura en aproximación equivalente. Si se añade además el margen de pérdida de altura de categoría D de 49 m, la OCA estaría a unos 829 m (2720 ft). Es decir, que los mínimos son bastante más elevados que los publicados en el procedimiento NDB, superiores a los mínimos de circuito visual para CAT D, y bastante más elevados en el caso de CAT A, B y C. Además, hay que tener en cuenta un ajuste de VPA pronunciado. Según el Documento 8168, para ángulos superiores a $3,2^\circ$, en ocasiones se incrementa un 5% el margen de pérdida de altura/error de altímetro por cada $0,1^\circ$ de aumento del ángulo de la trayectoria. Por lo tanto, para un VPA de $3,5^\circ$ se tendrá un 15%.

Teniendo en cuenta las posibles limitaciones por ángulo de trayectoria pronunciado y que, a priori, no se obtienen ventajas operacionales respecto al caso anterior, se descarta la posibilidad de aumentar el VPA.



Ilustración 50. Superficie Z en línea recta con VPA de $3,5^\circ$.



Ilustración 51. Obstáculos que penetran la superficie Z.

Como posible solución se podrían plantear varias opciones: el aumento de la pendiente de aproximación frustrada, desplazar la aproximación respecto a la orientación de la pista, o ambas.

La primera opción no resulta viable, ya que los obstáculos son tan importantes que no es posible evitarlos con un aumento de la pendiente de frustrada.

En cuanto a la segunda opción, los obstáculos que penetrarían la superficie Z tendrían una elevación mayor que el caso de una aproximación alineada.



Ilustración 52. OAS APV-BARO en La Palma. VPA de 3,5° y procedimiento desplazado 15°.

4.3.7 Aproximación intermedia

A continuación, se va a realizar el diseño de la aproximación intermedia para un VPA de 3° , a una altitud de 3400 ft.

El tramo intermedio se va a alinear con la pista 36, y se compone de un tramo recto antes del FAP y un tramo de viraje, en el caso de un viraje de paso en el IF. El tramo recto no tendrá una longitud inferior a 3,7 km.

En el IF, al igual que la APV-SBAS, se va a realizar un viraje de 70° . Así pues, la longitud total del tramo intermedio será de 13,345 km. La anchura de las áreas primaria y secundaria se obtiene a partir de la Tabla 3, y la unión de estas con el FAS se realiza con un ángulo de 30° y pasando por la anchura del FAP. La OCS se sitúa 150 m por debajo de la trayectoria.

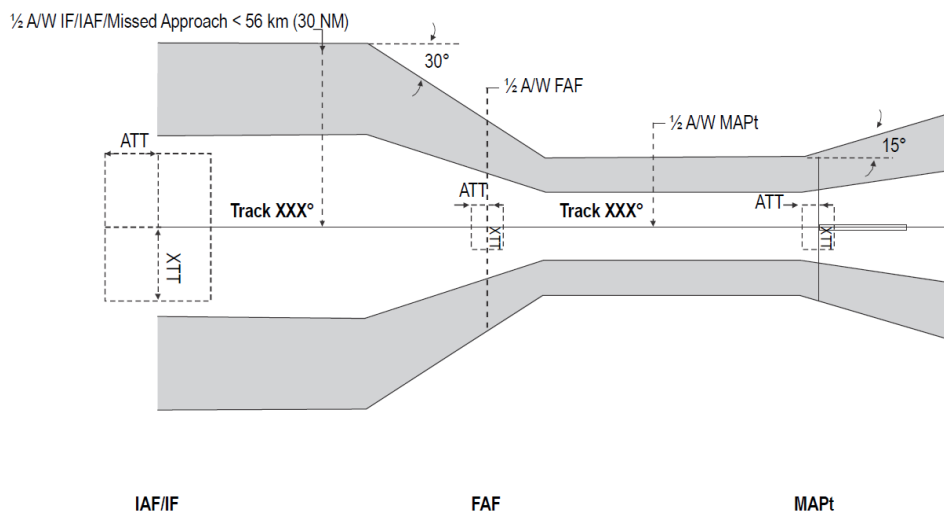


Ilustración 53. Enlace de áreas de diferente anchura en APV-BARO.

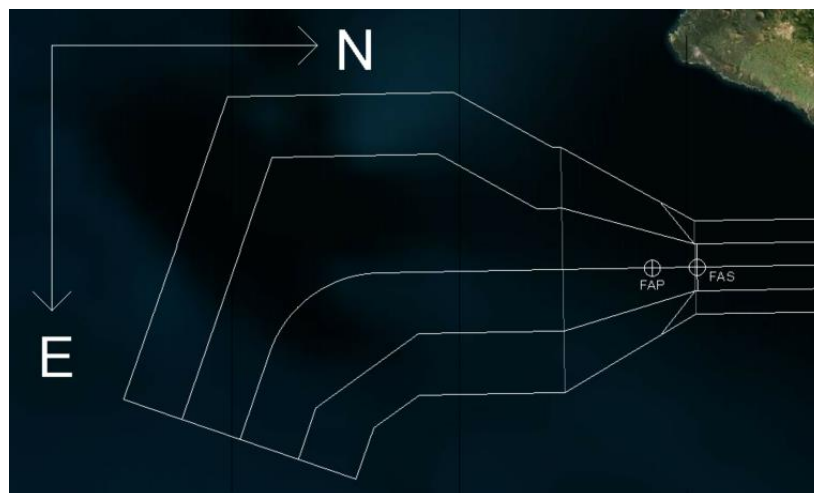


Ilustración 54. Aproximación intermedia con viraje en el IF.

4.3.8 Aproximación inicial

El tramo inicial de la aproximación contiene un viraje de paso con un cambio de derrota de 70° , siendo la derrota inicial 219. La aeronave ha de descender 1100 ft, desde el IAF hasta el IF, y tiene 38,3 km para hacerlo. El MOC es de 300, produciéndose la unión entre el tramo inicial y el intermedio en la línea NN'N" del segundo viraje.

Punto de viraje	
Latitud	N28° 16' 43,18"
Longitud	W17° 35' 37,98"

Tabla 37. Punto de viraje en aproximación inicial.



Ilustración 55. Aproximación inicial e intermedia, vista 2D.

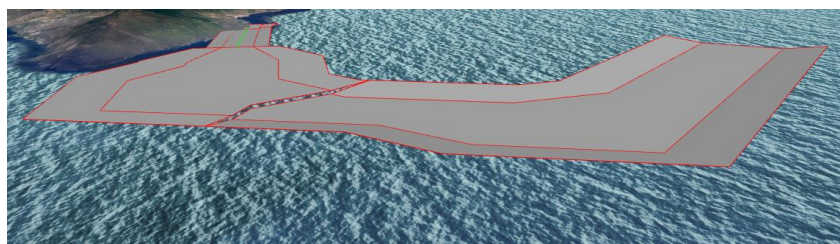


Ilustración 56. Aproximación inicial e intermedia, vista 3D.

4.3.9 Aproximación frustrada

En una aproximación APV-BARO no se considera el punto de aproximación frustrada, o MAPt, excepto para definir la geometría de las áreas de protección. En este caso, se utiliza para definir un viraje, aunque posteriormente se nombrará como MATF. Este tramo de la aproximación

tiene tres tramos: inicial, intermedio y final. En el primero de los tramos, la aeronave se estabiliza horizontalmente hasta el SOC. Esta distancia se llama distancia de transición. A continuación, en el segundo tramo empieza el ascenso con una pendiente del 2,5%, manteniendo siempre 30 m de MOC. El último tramo de la aproximación frustrada empieza en el punto en el que se puede mantener un MOC de 50 m.

<i>Categoría de aeronaves</i>	<i>Distancia de transición (X)</i>
Categoría A	máx {0,0875D + 2 591; 0,3954D + 1 604}
Categoría B	máx {0,0681D + 3 352; 0,3246D + 1 653}
Categoría C	máx {0,0567D + 3 794; 0,2328D + 1 945}
Categoría D	máx {0,0495D + 4 153; 0,2055D + 2 073}

Siendo D = distancia desde el FAF nominal hasta el MAPt nominal (m). Los valores de la tabla están en unidades del SI (metros).

Tabla 38. Cálculo de la distancia de transición.

Se va a situar el MAPt en el punto en el que se alcanza la OCA/H de categoría A, a 4350 m del umbral. A partir de este punto se realizará un viraje seguido de un tramo DF. El cálculo de la distancia de transición se realiza según la Tabla 38 para cada categoría de aeronave.

$$x_{MAPt} = \frac{OCH - RDH}{\tan VPA} \quad [\text{Ecuación 16}]$$

$$D = x_{FAF} - x_{MAPt} \quad [\text{Ecuación 17}]$$

<i>Categoría</i>	<i>Distancia de transición (X) (m)</i>	<i>xSOC (m)</i>
A	3862,622	487,877
B	4341,685	8,814
C	4618,011	-267,512
D	4872,375	-521,876

Tabla 39. Distancia de transición y SOC para cada categoría.

El punto de viraje anterior se sitúa ATT antes del MAPt (ATT para MAPt, Tabla 3). El punto de viraje posterior se sitúa tras pasar el SOC, a una distancia equivalente a volar el tiempo de reacción del piloto más el retardo al establecer el ángulo de inclinación lateral a la velocidad de aproximación intermedia. Los parámetros para calcular un viraje en aproximación frustrada se muestran en la Tabla 24.

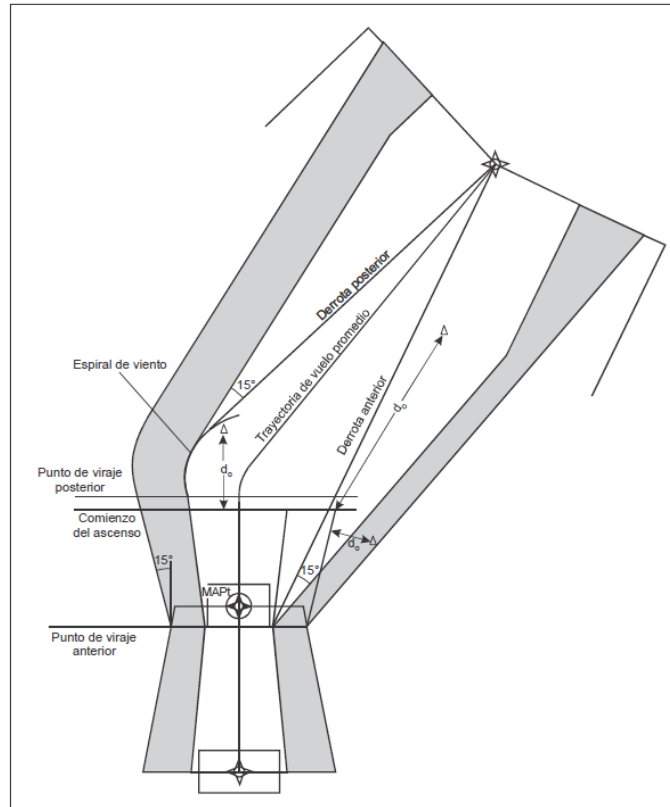


Ilustración 57. Viraje de aproximación frustrada en el MAPt seguido de un tramo DF.

Siguiendo el procedimiento para construir un viraje en el MAPt seguido de un tramo DF, se obtiene que, para Categoría D, no se cumple con el MOC de aproximación frustrada intermedia de 30 m. Sin embargo, el área en la que penetran los obstáculos se encuentra a la izquierda de la pista, en la zona que se ha ignorado en el cálculo de la OCA/H de maniobra visual (en circuito). Por lo tanto, no es necesario adelantar el MAPt.

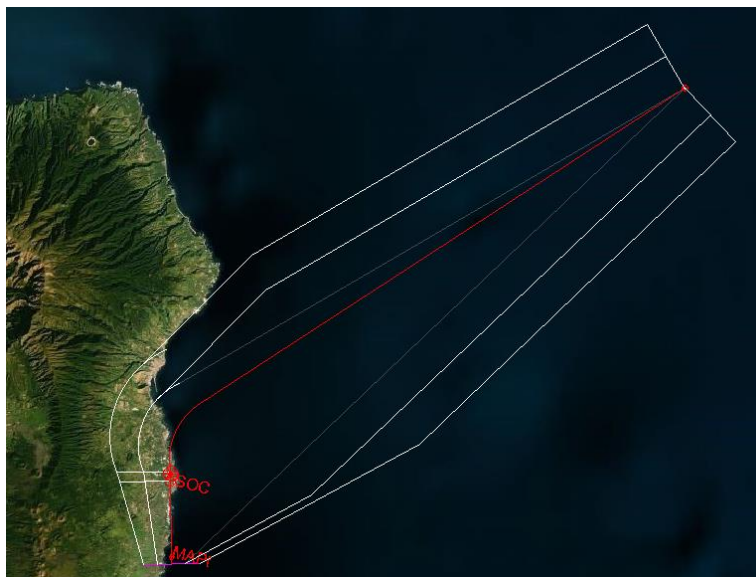


Ilustración 58. Aproximación frustrada para APV-BARO con VPA de 3° en La Palma

4.4 SOLUCIÓN ALTERNATIVA: APROXIMACIÓN LNAV

A continuación, se plantea el diseño de una aproximación de no-precisión LNAV, desplazada 15° respecto a la orientación de la pista 36 con el objetivo de evitar en aproximación final. En este tipo de aproximaciones no se proporciona guiado vertical, y el guiado lateral se realiza mediante GNSS básico.

4.4.1 Protección para el tramo visual

La VSS para una aproximación de no-precisión y no alineada se construye como sigue: 60 m antes del umbral y con una anchura de base igual a la franja de la pista (150 m), se extiende alineada con la pista hasta la altura de la OCH con un ángulo de pendiente de $1,12^\circ$ menos que el ángulo del procedimiento, y se ensancha con una divergencia del 15% a cada lado. En el lado en el que se encuentra el tramo final, el ensanchamiento se aumenta con el ángulo de desplazamiento del procedimiento, en este caso 15° .

El ángulo del tramo final será de $3,5^\circ$, de esta forma la VSS queda libre de obstáculos.



Ilustración 59. VSS para una aproximación desplazada 15° .

4.4.2 Aproximación final

El diseño del procedimiento LNAV es muy similar al APV-BARO en el guiado lateral. La altitud del tramo intermedio será la misma, de 3400 ft, y el GP será de $3,5^\circ$. Como se ha comentado, la derrota de este tramo difiere 15° de la orientación de la pista, por lo que, según el Documento 8168, se considera aproximación directa. La intersección del tramo desplazado con el eje de la pista se producirá a la distancia mínima de 1400 m.

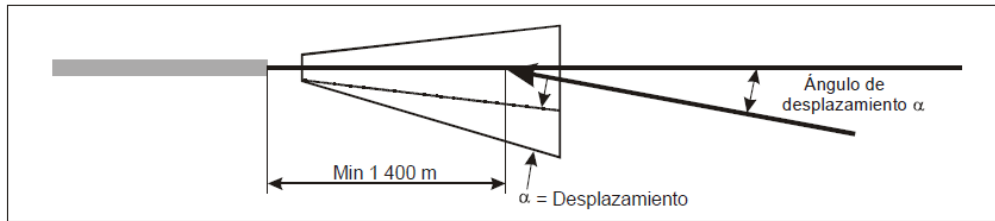


Ilustración 60. Distancia mínima a la que el eje del procedimiento cruza la prolongación del eje de pista.

El cálculo del FAP y las áreas se ha hecho a partir de un umbral ficticio situado a 1400 m de la intersección con el eje de la pista, en la dirección de la derrota de la aproximación final. De esta forma, el FAP está situado a 16180,4 m del umbral (Ecuación 1), a una altitud de 1036,3 m (3400 ft, 1004,6 m sobre el umbral).

La semianchura del área de protección es de 1759 m (Tabla 3), dividiéndose en área primaria y área secundaria. El MOC en este tramo es de 75 m en el área primaria. La adaptación de la semianchura del tramo final con el intermedio se realiza con un ángulo de 30° pasando por una semianchura en el FAF se 2685 m.



Ilustración 61. Aproximación final, procedimiento LNAV desplazado 15°.

4.4.3 Aproximación intermedia

La aproximación intermedia es el tramo comprendido entre el IF y el FAF. La longitud del tramo intermedio será la suma de un tramo recto de estabilización de 3,7 km más la parte correspondiente de un viraje de 70° en el IF, un total de 13,3 km.

En cuanto a la semianchura del área de protección, es de 4630 m y el MOC es de 150 m en el área primaria, reduciéndose a 0 hasta el borde del área secundaria.

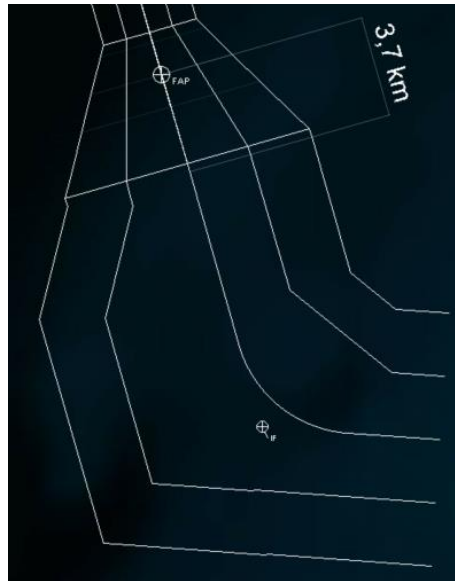


Ilustración 62. Aproximación intermedia, procedimiento LNAV desplazado 15°.

4.4.4 Aproximación inicial

La aproximación inicial tiene un viraje intermedio, de tal forma que el cambio de derrota entre este segmento y el tramo intermedio no supere 90°. Este viraje, al igual que los procedimientos anteriores, será de 70°. El MOC es de 300 m en el área primaria.

Punto de viraje	
Latitud	N28° 20' 56,27"
Longitud	W17° 29' 41,00"

Tabla 40. Punto de viraje en aproximación inicial.

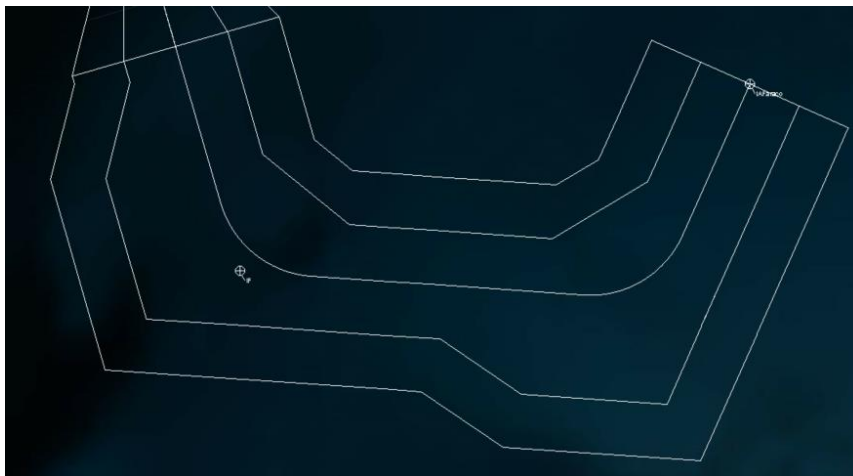


Ilustración 63. Aproximación inicial, procedimiento LNAV desplazado 15°.

Evaluación de obstáculos

Los obstáculos que se tienen en cuenta para el cálculo de la OCA/H son los de aproximación final. De este modo, el obstáculo más elevado es el N.º 343, con 383,263 m de elevación. Este será el obstáculo determinante. La OCA/H se obtiene de añadir el MOC de 75 m a la altitud/altura del obstáculo N.º 343.

OCH (m – ft)	426,563 – 1399,469
OCA (m – ft)	458,263 – 1503,469

Tabla 41. OCA/H para procedimiento LNAV.



Ilustración 64. Obstáculo determinante para el procedimiento LNAV, vista cenital.

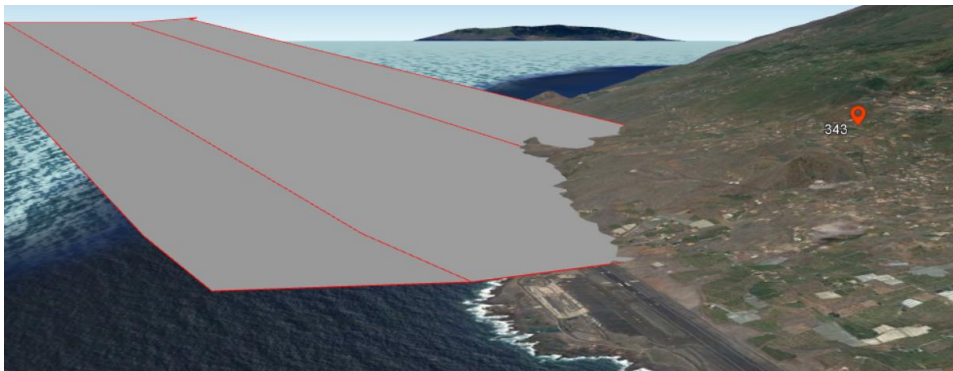


Ilustración 65. Obstáculo determinante para el procedimiento LNAV.

4.4.5 Aproximación frustrada

El tramo de aproximación frustrada en una aproximación de no-precisión empieza en el punto de aproximación frustrada, o MAPt, y se divide en los tramos inicial, intermedio y final. El cálculo de la distancia de transición y el SOC es análogo a la aproximación frustrada de APV-BARO. La pendiente es del 2,5%.

La ubicación óptima del MAPt para una aproximación no alineada será la intersección de la derrota final con la prolongación del eje de pista. Sin embargo, debido a la proximidad de las montañas, se alejará hasta situarse en el punto en el que se alcanza la OCA/H, a partir del cual se realizará un viraje seguido de un tramo DF. Este punto se encuentra a 6729 m del umbral ficticio.

Categoría	Distancia de transición (X) (m)	xSOC (m)
A	3417,994	3311,001
B	3995,638	2733,358
C	4329,892	2399,103
D	4620,842	2108,153

Tabla 42. Distancia de transición y SOC para cada categoría, aproximación LNAV.

El punto de viraje anterior se sitúa ATT antes del MAPt (ATT para MAPt, Tabla 3). El punto de viraje posterior se sitúa tras pasar el SOC, a una distancia equivalente a volar el tiempo de reacción del piloto más el retardo al establecer el ángulo de inclinación lateral a la velocidad de aproximación intermedia.

El MOC de aproximación frustrada de 30 m no se cumple en categoría D. El obstáculo N.º 1406, con 759,186 m de elevación, se encuentra en el borde exterior del área secundaria, a 1408,761 m de la línea perpendicular a la derrota final que pasa por el SOC, y sobrepasa la superficie en 265,7 m. Por lo tanto, se debe subir la OCA y el MAPt.



Ilustración 66. En rojo, zona afectada por obstáculos en el viraje de aproximación frustrada.



Ilustración 67. Obstáculos que superan la superficie de aproximación frustrada en el viraje.

Subiendo la OCA 150 m, el nuevo MAPt se sitúa a 9181,481 m del umbral ficticio. Esta posición permite cumplir con el MOC de aproximación frustrada intermedia en Categoría D, por lo que también se cumple en las categorías de menor velocidad, o de menor tamaño. La fase final de la aproximación frustrada empieza en el punto en el que se puede cumplir un MOC de 50 m, y sigue por encima del agua directo al IAF NASOL.

Por otra parte, se ha probado con una pendiente de aproximación frustrada del 5%. Con esta pendiente, para cumplir con el MOC se debe subir la OCA 400 ft (121,9 m), es decir, un resultado similar al anterior. Teniendo en cuenta que no todas las aeronaves van a poder lograr esta pendiente de ascenso, no se va a considerar la reducción de OCA/H por aumento de la pendiente de frustrada.

OCH (m – ft)	576,563 – 1891,589
OCA (m – ft)	608,263 – 1995,589

Tabla 43. OCA/H final para el procedimiento LNAV, con una pendiente de frustrada del 2,5%.



Ilustración 68. Aproximación frustrada para el procedimiento LNAV.

4.5 CIRCUITOS DE ESPERA ASOCIADOS

Se establecen dos circuitos de espera para los tres procedimientos, situados en ARACO y NASOL. Estos circuitos ya se encuentran presentes en los procedimientos actuales del aeropuerto de La Palma, por lo que no es necesario repetir el cálculo.

La derrota de acercamiento del circuito situado en ARACO es 307° (302.3° geográfica) mientras que en NASOL es 236° (232.2° geográfica). Ambos se establecen a una altitud mínima de 4500 ft, con dirección de viraje a derechas y tiempo de alejamiento de 1 minuto.

4.6 RESULTADOS

A continuación, se muestran en una tabla los valores de OCA/H obtenidos, en pies, y redondeados a la unidad, tal como se mostrarán en el cajetín de mínimos:

OCA/H	A	B	C	D
LPV	1186 (1082)	1198 (1094)	1206 (1102)	1217 (1113)
LNAV/VNAV*	902 (798)		1345 (1241)	2319 (2215)
LNAV	1996 (1892)			
*Restringidos a mínimos de circuito				

Tabla 44. Resultados para los distintos procedimientos diseñados.

Se observa que para las categorías de aeronaves C y D la LPV tiene los mínimos más reducidos, mientras que para categorías A y B es el procedimiento LNAV/VNAV el que tiene una menor OCA/H.

5. CONCLUSIONES

A lo largo del documento se ha tratado de entender el entorno del aeropuerto de La Palma, haciendo hincapié en las distintas situaciones meteorológicas que se pueden encontrar. Todo ello para aplicar de la mejor manera posible las recomendaciones del Documento 8168 de OACI. A menudo, ha resultado una tarea difícil, debido a la gran variedad de posibilidades y procedimientos que detalla este documento.

La orografía de la isla de La Palma dificulta el diseño de cualquier procedimiento de aproximación en este aeropuerto. Por ello, se precisa de información precisa del modelo del terreno e información contrastada de la localización exacta de cada obstáculo, para obtener resultados que garanticen la seguridad en el uso de los procedimientos. En este proyecto se han utilizado principalmente los datos que proporciona el Ítem 10 del AIP en el aeropuerto de La Palma, con una resolución horizontal y vertical de 0,001 m. Sin embargo, en determinadas ocasiones, como el cálculo de la OCA/H de maniobra visual en circuito, se ha empleado el modelo 3D del terreno de Google Earth. Quizá este no ofrezca la misma precisión que otras bases de datos, pero se ha considerado suficiente para el desarrollo del proyecto.

Después del desarrollo de las aproximaciones, se observa que gran parte de los procedimientos se encuentra sobre el agua, y que se tienen muchas similitudes entre los tres diseños, excepto en el tramo de aproximación final, que determina la OCA/H. Comparando los resultados obtenidos entre APV-SBAS y APV-BARO, la primera tiene unos mínimos más reducidos para las aeronaves de mayor velocidad, que son en general de mayor tamaño, de categorías C y D. En cambio, la APV-BARO tiene una OCA/H menor para las aeronaves de menor tamaño. El procedimiento LPV, además, tiene una precisión mayor, de localizador. Sabiendo que la mayor parte de las operaciones instrumentales en este aeropuerto se llevan a cabo con aeronaves de tamaño medio para vuelos regionales, se concluye que el procedimiento APV-SBAS cubre mejor las necesidades del aeropuerto de La Palma. Sin embargo, se deberían publicar ambos procedimientos, para satisfacer las necesidades de aquellas aeronaves que no dispongan de receptor de SBAS, o para los casos en los que la degradación de la señal EGNOS no permita la realización del procedimiento LPV.

En cuanto al procedimiento LNAV, que es de no-precisión, al contrario que los anteriores, no provee de guiado vertical ni está alineado con el eje de la pista, lo que supone una carga de trabajo extra para los pilotos y un aumento de la probabilidad de accidentes, por ejemplo, de tipo CFIT. Sin embargo, al

igual que el procedimiento LNAV/VNAV, puede servir para aquellas aeronaves que no dispongan de un receptor de EGNOS.

Por otra parte, hay que tener en cuenta la degradación de la señal de EGNOS durante los primeros meses de 2022, probablemente debido, entre otros, al conflicto entre Ucrania y Rusia. Esto ha provocado que los valores de disponibilidad en La Palma disminuyan por debajo de los requerimientos de OACI para APV-I. Sin embargo, en todos los informes mensuales publicados desde el año 2017 hasta principios de este año muestran que los valores de disponibilidad superan los requerimientos para este tipo de procedimientos. La EASA (*“European Union Aviation Safety Agency”*) es consciente del problema y ha emitido un SIB que incluye recomendaciones de medidas de mitigación, entre ellas, la monitorización y comunicación temprana a las autoridades competentes y usuarios de la degradación de la señal. También la emisión de NOTAM (*“Notice To Airmen”*) y la planificación por parte de los pilotos de procedimientos convencionales alternativos.

6. ANEXO: FUNCIONES DE MATLAB

En esta sección se presentan algunas de las funciones creadas en el programa MATLAB para el cálculo y diseño de los procedimientos descritos anteriormente.

6.1 APV-SBAS

Las funciones que se presentan a continuación se ejecutan en el script principal de la aproximación APV-SBAS. Previamente, se deben definir los siguientes parámetros:

- VPA: ángulo de la trayectoria.
- CAT: categoría de la aeronave en formato *char*.
- RWY: orientación geográfica de la pista.

6.1.1 *Constantes_OAS*

Esta función contiene los datos de las superficies y puntos de las OAS de APV-I en función de la categoría de aeronave y el ángulo de la trayectoria. Se suponen constantes el resto de los parámetros.

INPUT	
CAT	Categoría de aeronave
VPA	Ángulo de la trayectoria
OUTPUT	
Surfaces	Constantes de las OAS en formato <i>struct</i>
Points	Coordenadas OAS en formato <i>struct</i>

Tabla 45. Función "*Constantes_OAS*".

Los Outputs se guardan en el script principal con la función *save* para la evaluación de obstáculos.

6.1.2 *Rotacion_OAS*

Las coordenadas OAS se transforman al sistema NED utilizando esta función. Devuelve además la matriz de rotación, que servirá para la evaluación de obstáculos. Esta se guarda en el script principal mediante la función *save* de MATLAB.

INPUT	
Points	Coordenadas OAS en formato <i>struct</i>
RWY	Orientación de la pista

OUTPUT	
RotMatrix	Matriz de rotación para pasar del sistema de OAS a NED
PointsRight	Matriz de Coordenadas OAS de la parte derecha a la prolongación del eje de pista en el sistema NED
PointsLeft	Matriz de Coordenadas OAS de la parte izquierda a la prolongación del eje de pista en el sistema NED

Tabla 46. Función "Rotacion_OAS".

6.1.3 Coord_OAS

Función para pasar los Outputs de la función anterior a un sistema LLA.

INPUT	
PointsRight	Matriz de Coordenadas OAS de la parte derecha a la prolongación del eje de pista en el sistema NED
PointsLeft	Matriz de Coordenadas OAS de la parte izquierda a la prolongación del eje de pista en el sistema NED
OUTPUT	
PointsRightLLA	Matriz de Coordenadas OAS de la parte derecha a la prolongación del eje de pista en el sistema LLA
PointsLeftLLA	Matriz de Coordenadas OAS de la parte izquierda a la prolongación del eje de pista en el sistema LLA

Tabla 47. Función "Coord_OAS".

6.1.4 Superficies

Utiliza las coordenadas LLA de los puntos de las OAS para generar los archivos en formato *kml* de las OAS. En total se obtienen 7 archivos. Se utiliza la función *kmlwritepolygon* de MATLAB para generar los archivos.

INPUT	
PointsRightLLA	Matriz de Coordenadas OAS de la parte derecha a la prolongación del eje de pista en el sistema NED
PointsLeftLLA	Matriz de Coordenadas OAS de la parte izquierda a la prolongación del eje de pista en el sistema NED
OUTPUT	
File_W	Archivo <i>kml</i> de la superficie W
File_W'	Archivo <i>kml</i> de la superficie W'
File_Xl	Archivo <i>kml</i> de la superficie X de la parte izquierda
File_Xr	Archivo <i>kml</i> de la superficie X de la parte derecha
File_Yl	Archivo <i>kml</i> de la superficie Y de la parte izquierda
File_Yr	Archivo <i>kml</i> de la superficie Y de la parte derecha
File_Z	Archivo <i>kml</i> de la superficie Z

Tabla 48. Función "Superficies".

Adicionalmente, las funciones *Superficies_INT* y *Superficies_INI* generan los archivos *kml* de las fases de aproximación intermedia y aproximación inicial. Estas no contienen Inputs, y los valores para generar dichas superficies se han introducido manualmente, a partir de las coordenadas LLA obtenidas de AutoCAD.

6.1.5 OpenKml

Abre los archivos en formato *kml*. Esta función se utiliza en todos los procedimientos.

INPUT	
File_Kml	Archivos <i>kml</i>

Tabla 49. Función "OpenKml".

6.2 OBSTÁCULOS DE APV-SBAS

El script *Obstáculos_SBAS* se utiliza para comprobar los obstáculos que penetran las OAS. El script carga un fichero en formato *xlsx* con las coordenadas LLA de los obstáculos. También carga los archivos guardados previamente con la matriz de rotación, los puntos y las superficies OAS. Se definen los siguientes parámetros:

- RWY: orientación geográfica de la pista.
- THR: *struct* con las coordenadas LLA del umbral 36.
- Filas: número de filas del fichero de obstáculos.
- Columnas: número de columnas del fichero de obstáculos.

6.2.1 Extract_data

Función para extraer los datos del archivo de Excel.

INPUT	
File	Archivo de obstáculos en formato <i>xlsx</i>
NROWS	Número de filas del archivo
NCOLS	Número de columnas del archivo
OUTPUT	
A	Matriz con las coordenadas de los obstáculos en LLA

Tabla 50. Función "Extract_data".

6.2.2 Kmlfiles

Función para representar los obstáculos en Google Earth.

INPUT	
A	Matriz de los obstáculos
Obst	Obstáculos que se desean representar

Tabla 51. Función "Kmlfiles".

6.2.3 Rotacion_OBST

Esta función realiza transforma las coordenadas LLA de los obstáculos al sistema de las OAS, utilizando el umbral como origen.

INPUT	
RotMatrix	Matriz de rotación para pasar del sistema de OAS a NED.
A	Matriz de los obstáculos
THR	Coordenadas LLA del umbral
OUTPUT	
OBSTxyz	Matriz con las coordenadas de los obstáculos en el sistema de OAS

Tabla 52. Función "Rotacion_OBST".

6.2.4 Comparacion

Sustituye las coordenadas de los obstáculos en las ecuaciones de los planos y de las rectas formadas por la unión de los puntos de OAS. Evalúa el signo resultante y determina los obstáculos que penetran en las superficies.

INPUT	
OBSTxyz	Matriz con las coordenadas de los obstáculos en el sistema de OAS
Surfaces	Constantes de las OAS en formato <i>struct</i>
Points	Coordenadas OAS en formato <i>struct</i>
OUTPUT	
Cut	Vector con el N.º de los obstáculos que penetran en las superficies

Tabla 53. Función "Comparacion".

6.2.5 Ordenar_elevacion

Ordena los obstáculos que entran en las OAS por elevación y los almacena en un vector. El Output se introduce en la función *kmlfiles* para su representación.

INPUT	
Cut	Vector con el N.º de los obstáculos que penetran en las superficies
A	Matriz de los obstáculos
OUTPUT	
Orden	Matriz de obstáculos ordenados por elevación

Tabla 54. Función "Ordenar_elevacion".

6.3 MANIOBRA VISUAL (EN CIRCUITO)

En el script *circuito* se representan las áreas de maniobra visual (en circuito) según la categoría de aeronave. Se introducen los siguientes parámetros:

- CAT: categoría de aeronave en formato *char*.
- Rest: "FALSE" para considerar todos los obstáculos que entran en el área de protección; "TRUE" para ignorar los obstáculos aplicando el método de reducción de OCA/H de maniobra visual.
- THR1: coordenadas LLA del umbral 36.
- THR2: coordenadas LLA del umbral 18.

Se hace uso de las funciones *Ordenar_elevacion* y *Kmlfiles* para la representación de los obstáculos.

6.3.1 CircuitoVisual

Función para generar y graficas las áreas de protección en función de la categoría de aeronave. Dentro de la función se definen los radios calculados según las velocidades máximas de viraje en el aeropuerto de La Palma. Se utiliza la función *OpenKml* para representar las áreas en Google Earth.

INPUT	
CAT	Categoría de aeronave
THR1	Coordenadas del umbral 36
THR2	Coordenadas del umbral 18
OUTPUT	
Radio	Radio de las circunferencias

LAT1	Vector de latitudes de los puntos que forman la circunferencia alrededor del umbral 36
LON1	Vector de longitudes de los puntos que forman la circunferencia alrededor del umbral 36
LAT2	Vector de latitudes de los puntos que forman la circunferencia alrededor del umbral 18
LON2	Vector de longitudes de los puntos que forman la circunferencia alrededor del umbral 18

Tabla 55. Función "CircuitoVisual".

6.3.2 Rotacion_CIRC

Función similar a *Rotación_OBST*, esta vez para los puntos que definen las circunferencias.

6.3.3 Comparacion_CIRC y Comparacion_CIRC_restriccion

Función similar a *comparacion*. Según el parámetro *Rest*, se utiliza *Comparacion_CIRC* o *Comparacion_CIRC_restriccion*. En este caso, las coordenadas de los obstáculos se sustituyen en las ecuaciones de las circunferencias, que se obtienen a partir de las coordenadas de los umbrales en el sistema de coordenadas de OAS.

6.4 APV-BARO

En este script se realizan los cálculos del procedimiento APV-BARO. Se introducen los siguientes parámetros:

- CAT: categoría de aeronave en formato *char*.
- THR: coordenadas LLA del umbral 36, o del umbral ficticio, según si hay un desplazamiento del procedimiento respecto al eje de la pista.
- RWY: orientación geográfica del procedimiento.
- Z: altitud del tramo intermedio de la aproximación.
- RDH: altura de la trayectoria sobre el umbral.
- Hi: valor que depende de la altitud.
- TempAD: temperatura de referencia del aeródromo.
- AltAD: elevación del aeródromo.
- VPA: ángulo de la trayectoria en aproximación final.

6.4.1 *Calculo_FAP*

Función para calcular la posición del FAP.

INPUT	
RDH	Altura de la trayectoria sobre el umbral
VPA	Ángulo de la trayectoria en aproximación final
THR	Coordenadas del umbral
Z	Altitud del tramo intermedio
RWY	Orientación geográfica del procedimiento
OUTPUT	
xFAP	Distancia del FAP respecto del umbral
hFAP	Altura del FAP respecto del umbral
FAP	Coordenadas del FAP en LLA

Tabla 56. Función "Calculo_FAP".

6.4.2 *Calculo_FAS*

Función para calcular los parámetros del FAS.

INPUT	
RDH	Altura de la trayectoria sobre el umbral
VPA	Ángulo de la trayectoria en aproximación final
THR	Coordenadas del umbral
Hi	Valor que depende de la altitud
RWY	Orientación geográfica del procedimiento
xFAP	Distancia del FAP respecto del umbral
hFAP	Altura del FAP respecto del umbral
AltAD	Elevación del aeródromo
TempAD	Temperatura de referencia del aeródromo
OUTPUT	
αFAS	Ángulo del FAS
xFASinicial	Distancia respecto al umbral del inicio del FAS
xFASfinal	Distancia respecto al umbral del fin del FAS
xFASinicialSEC	Distancia respecto al umbral del inicio de las superficies secundarias del FAS
xFASfinalSEC	Distancia respecto al umbral del fin de las superficies secundarias del FAS
hFAS	Altura final del FAS

Tabla 57. Función "Calculo_FAS".

6.4.3 *Vertical_path_final*

Representa la trayectoria de aproximación final en Google Earth.

INPUT	
RDH	Altura de la trayectoria sobre el umbral
VPA	Ángulo de la trayectoria en aproximación final
THR	Coordenadas del umbral
RWY	Orientación geográfica del procedimiento
xFAP	Distancia del FAP respecto del umbral
hFAP	Altura del FAP respecto del umbral

Tabla 58. Función "Vertical_path_final".

6.4.4 *Areas_final*

Representa el FAS según los parámetros calculados.

INPUT	
THR	Coordenadas del umbral
RWY	Orientación geográfica del procedimiento
xFAP	Distancia del FAP respecto del umbral
FAP	Coordenadas del FAP en LLA
α FAS	Ángulo del FAS
xFASinicial	Distancia respecto al umbral del inicio del FAS
xFASfinal	Distancia respecto al umbral del fin del FAS
xFASinicialSEC	Distancia respecto al umbral del inicio de las superficies secundarias del FAS
xFASfinalSEC	Distancia respecto al umbral del fin de las superficies secundarias del FAS
hFAS	Altura final del FAS

Tabla 59. Función "Areas_final".

6.4.5 *Areas_ground*

Calcula y representa el plano de tierra.

INPUT	
THR	Coordenadas del umbral
RWY	Orientación geográfica del procedimiento
CAT	Categoría de aeronave
xFASinicial	Distancia respecto al umbral del inicio del FAS
xFASinicialSEC	Distancia respecto al umbral del inicio de las superficies secundarias del FAS

Tabla 60. Función "Areas_ground".

Las superficies de aproximación inicial e intermedia, las VSS de los procedimientos, y las superficies de LNAV se generan manualmente a partir de los dibujos realizados en AutoCAD.

PARTE II: PRESUPUESTO

El desarrollo de este proyecto ha supuesto una serie de costes, no solo de horas de trabajo, sino por el uso de software comercial, equipo y servicios durante el tiempo de realización del trabajo.

1. HORAS DE TRABAJO

La asignación del trabajo se hizo en el mes de febrero. Desde entonces, el reparto del tiempo de trabajo no ha sido uniforme, debido a la carga de trabajo de las asignaturas del segundo cuatrimestre en los primeros meses del proyecto, siendo mayo el mes en el que se ha desarrollado gran parte del mismo. Aun así, se puede estimar que durante los meses de febrero y marzo el tiempo por semana medio dedicado al proyecto fue de 5 horas, y durante abril, mayo y junio de 32 horas semanales. Teniendo en cuenta que un mes tiene 4 semanas, se obtienen aproximadamente 424 horas de trabajo.

- Febrero – Marzo: $5 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} \times 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} \times 2 \text{ meses} = 40 \text{ horas}$
- Abril – Mayo – Junio: $32 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} \times 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} \times 3 \text{ meses} = 384 \text{ horas}$

Actividad	% de las horas totales
Cálculos	25
Programación	30
Dibujo	30
Redacción	15

Tabla 61. Porcentaje de tiempo dedicado a las actividades.

El calendario laboral en Valencia para 2022 incluye 14 días festivos, de los cuales 8 son estatales, 4 autonómicos y 2 locales. Además, según el Artículo 38 del Estatuto de los Trabajadores, el periodo de vacaciones anuales retribuidas no puede ser inferior a 30 días. Es decir, en total se tienen 6 semanas no laborables durante el año. Sabiendo que un año tiene 52 semanas y estableciendo una jornada laboral de 8 horas (40 horas semanales), se obtiene un total de 1840 horas de trabajo. Consultando diversas fuentes, se establece el salario bruto anual de un ingeniero recién ingresado en 20500 €. Por lo tanto, el coste es de 11,14 €/hora.

$$\frac{20500 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{(52 - 6) \frac{\text{semana}}{\text{año}} \times 40 \frac{\text{hora}}{\text{semana}}} = 11,14 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

El coste total de las horas de trabajo se obtiene de multiplicar el coste por hora por el número total de horas.

$$\text{Coste horas de trabajo} = 11,14 \frac{\text{€}}{\text{hora}} \times 424 \text{ horas} = 4723,91 \text{ €}$$

2. SOFTWARE

En el proyecto se han utilizado diferentes programas para la realización de cálculos, así como para la representación de los resultados. Algunos de estos funcionan bajo licencia y otros son de libre uso:

- **MATLAB:** es un software de programación, cálculo y análisis de datos diseñado por la empresa MathWorks. Además del software básico, cuenta con diferentes librerías o *Toolbox*, algunas de las cuales se han utilizado en el desarrollo del trabajo, por ejemplo, el *Navigation Toolbox*. La licencia anual estándar para uso individual tiene un coste de 800 € anuales. Teniendo en cuenta las 1840 horas de trabajo anuales, el coste horario es el siguiente:

$$\text{Coste horario} = \frac{800 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{1840 \frac{\text{hora}}{\text{año}}} = 0,43 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

- **Mathematica:** es un programa de computación de la empresa Wolfram. Hay diversos tipos de paquetes. El paquete básico de uso profesional y personal tiene un coste de 1880 € anuales.

$$\text{Coste horario} = \frac{1880 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{1840 \frac{\text{hora}}{\text{año}}} = 1,02 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

- **AutoCAD:** es un programa para el diseño y dibujo en 2D y 3D. Incluye herramientas de mapas y cartografía. Dentro de las opciones de suscripción, la óptima tiene un precio de 6674 € cada tres años.

$$\text{Coste horario} = \frac{6674 \frac{\text{€}}{3 \text{ años}}}{5520 \frac{\text{hora}}{3 \text{ años}}} = 1,21 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

- **Microsoft Office 365:** conjunto de aplicaciones para la creación de documentos tales como presentaciones, informes y trabajos.

- Word: para la redacción del trabajo.
- Excel: permite crear hojas de cálculo.
- PowerPoint: para presentaciones.
- Teams: para realizar reuniones telemáticas.

La licencia básica personal es de 69 €.

$$\text{Coste horario} = \frac{69 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{1840 \frac{\text{hora}}{\text{año}}} = 0,04 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

- Google Earth: programa basado en imágenes satelitales que permite visualizar cartografía. Este software se ha utilizado juntamente con las librerías de funciones de MATLAB para representar los procedimientos diseñados. Se trata de software libre por lo que el coste es nulo.

Se va a considerar que cada uno de los programas se ha utilizado en las 424 horas de realización del proyecto. Así pues, el coste total de software es:

Software	Horas	Coste horario (€/h)	Coste (€)
MATLAB	424	0,43	184,35
Mathematica	424	1,02	433,22
AutoCAD	424	1,21	512,64
Office	424	0,04	15,90
Google Earth	424	0	0
Total			1146,11

Tabla 62. Coste de software.

3. HARDWARE

En la realización del proyecto se ha utilizado un ordenador portátil de la marca Lenovo, en concreto el modelo Yoga 530-14IKB. Este dispositivo tenía un coste de 799,90 € en el momento de su compra y ha sido utilizado durante los tres años previos a la realización de este trabajo. Es decir, su valor actual ha disminuido considerablemente. Para el calcular el coste actual se va a considerar una vida útil de 5 años y un valor residual de 160 €, un 20% del valor inicial.

Junto con el portátil se ha utilizado el monitor HP 2011x que, aunque no se tienen los datos del valor de compra, se va a suponer de 200 € con una vida útil de 15 años. El monitor tiene aproximadamente 9 años de antigüedad. El valor residual se supone de 50 €, un 25% del valor inicial.

	Valor de compra (€)	Valor residual (€)	Vida útil	Años de uso
Lenovo Yoga 530	799,90	160	5	3
HP 2011x	200,00	50	15	9

Tabla 63. Hardware utilizado.

A continuación, se realiza el cálculo de la amortización anual y el coste horario del uso del equipo:

- Lenovo Yoga 530:

$$\text{Amortización anual} = \frac{\text{Valor de compra} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil}} = 127,98 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{127,98 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{1840 \frac{\text{hora}}{\text{año}}} = 0,07 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

- HP 2011x:

$$\text{Amortización anual} = \frac{200 - 50}{15} = 10 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{10 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{1840 \frac{\text{hora}}{\text{año}}} = 0,01 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

	Horas	Coste horario (€/h)	Coste de hardware (€)
Lenovo Yoga 530	424	0,07	29,49
HP 2011x	424	0,01	2,30
Total			31,80

Tabla 64. Coste de hardware.

4. COSTES INDIRECTOS

En este apartado se consideran otros gastos, por ejemplo, el consumo de luz y de conexión a internet.

En primer lugar, aunque el impacto sobre el coste total es mínimo, se va a calcular de manera aproximada el gasto de luz del hardware utilizado. Los valores que se van a considerar en el cálculo del consumo de luz son los siguientes:

Dispositivo	Potencia (W)	% de horas totales
Lenovo Yoga 530	65	100
HP 2011x	150	100

Tabla 65. Potencia de los dispositivos y porcentaje del tiempo de uso.

El consumo se obtiene de multiplicar la potencia, en kilovatios, por las horas de uso. El precio de la luz medio del día 29 de mayo de 2022 es de 0,21668 €/kWh.

	kWh	€/kWh	Coste €
PC	27,56	0,21668	5,97
MONITOR	63,60		13,78
			19,75

Tabla 66. Coste de luz.

El cálculo de los costes indirectos depende de factores como el precio de la luz, la potencia de los dispositivos, el uso de iluminación, el acondicionamiento de la zona de trabajo o la tarifa contratada de conexión a internet. Es decir, es un cálculo complejo, por lo que se va a estimar en un 5% de la suma de coste de horas de trabajo, coste de software y coste de hardware.

$$\text{Costes indirectos} = 295,09 \text{ €}$$

5. COSTE TOTAL

El coste total del trabajo se obtiene de sumar todos los anteriores.

Coste horas	4723,91
Software	1146,11
Hardware	31,80
Costes indirectos	295,09
Total	6196,90

Tabla 67. Coste total.

PARTE III: PLIEGO DE CONDICIONES

En esta parte se describen los distintos aspectos que se deben tener en cuenta para poder utilizar los tres procedimientos diseñados con seguridad.

5.1 ESPECIFICACIONES DE AERONAVE Y TRIPULACIÓN

Las aeronaves que se dispongan a realizar estos procedimientos deben estar equipadas con receptores que permitan realizar operaciones PBN (*“Performance Based Navigation”*), es decir, que cumplan con las prestaciones mínimas requeridas en cada fase de la aproximación.

En el caso del uso de EGNOS (*“European Geostationary Navigation Overlay Service”*), tal como indica el *“Service Definition Document”* (SSD) del SoL, se debe cumplir con los estándares DO-229 publicados por la RTCA (*“Radio Technical Commission for Aeronautics”*), también conocidos como SBAS *“Minimum Operational Performance Standards”* (MOPS). En ellos, se definen distintas clases de receptores según las operaciones que se realicen. Para realizar aproximaciones LPV el receptor debe ser de clase 3 o 4. En el caso de LNAV/VNAV o LNAV el receptor será como mínimo de clase 2, o incluso de clase 1 si solo se realizan aproximaciones LNAV.

Además, los sistemas de la aeronave deben estar certificados siguiendo ciertos estándares. La agencia europea de seguridad aérea, EASA, recomienda el uso de equipamiento certificado por ETSOs (*“European Technical Standard Orders”*), que cumplen con dichos estándares.

En cuanto a la tripulación, los pilotos deben haber sido entrenados para realizar procedimientos de RNP APCH.

5.2 COMPATIBILIDAD CON PROCEDIMIENTOS EXISTENTES

El procedimiento NDB publicado actualmente tiene ciertas similitudes en el recorrido con las aproximaciones diseñadas. En él, el IF se sitúa a una altitud de 4500 ft, mientras que en LNAV y LNAV/VNAV se encuentra a 3400 ft, y en el LPV a 2000 ft. Con esto se consigue mitigar cualquier conflicto de aeronaves utilizando procedimientos diferentes.

En cuanto a los circuitos de espera, estos son los mismos que los descritos en las cartas de llegadas. Es decir, todas las aeronaves, tengan receptores de GNSS o no, van a realizar los mismos procedimientos de espera, reduciendo el riesgo de conflictos y facilitando el trabajo a los controladores.

Se ha de tener en cuenta la compatibilidad con los procedimientos de los aeropuertos cercanos. En el caso de La Palma, hay que analizar las rutas de salidas y llegadas por instrumentos de los aeropuertos de La Gomera, Tenerife Norte y Tenerife Sur. En estos procedimientos se observa que las aproximaciones diseñadas no interfieren de ninguna manera, ya que están definidas a una altitud inferior.

5.3 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Se debe verificar que, en cada una de las fases de las aproximaciones, se cumple con los criterios de diseño establecidos en el Documento 8168 de OACI. Entre ellos el MOC (*“Minimum Obstacle Clearance”*) y las distancias y pendientes máximas y mínimas en cada tramo del procedimiento. Todos ellos se han tenido en cuenta a la hora de realizar el proyecto. Además, el hecho de que gran parte de los procedimientos se sitúe sobre el agua reduce la posibilidad de colisionar contra algún obstáculo en las primeras fases de la aproximación. No ocurre lo mismo en la aproximación final y frustrada, donde se ha de tener presente la proximidad y dimensiones de las montañas.

5.4 OTRAS CONSIDERACIONES

La reciente erupción volcánica en Cumbre Vieja implica que se debe verificar la posición de los obstáculos, no por la lava, que en este caso ha afectado a la parte oeste de la isla, sino por la actividad sísmica derivada de la erupción. Por lo tanto, para la validación y utilización de estos procedimientos se debe realizar un nuevo estudio de obstáculos.

Por otra parte, podría resultar ventajosa una mejora del sistema de iluminación del aeropuerto. Actualmente, el sistema de La Palma es básico, con lo que se obtienen, según EUR-OPS 1, unos mínimos de RVR (*“Runway Visual Range”*) de 1500 m para categorías A y B, y 2000 m para categorías C y D. Instalando un sistema de iluminación completo se reducen estos valores a 1200, 1400, 1400 y 1800 metros para Cat. A, B, C y D, respectivamente.

PARTE IV: CARTAS

LA PALMA AD

REQUISITOS DE LA BASE DE DATOS AERONÁUTICA
AERONAUTICAL DATABASE REQUIREMENTS

PROCEDIMIENTOS DE APROXIMACIÓN POR INSTRUMENTOS // INSTRUMENT APPROACH PROCEDURES

RNP ZRWY 36

COORDENADAS WAYPOINTS // WAYPOINTS COORDINATES

WPT	COORD
ARACO (IAF)	28°25'57.1"N 017°27'08.4"W
LP01	28°18'25.7"N 017°34'03.9"W
LP02 (IF)	28°21'47.0"N 017°45'01.9"W
LP03 (FAP)	28°32'03.8"N 017°45'13.8"W
LP04 (MATF)	28°35'17.9"N 017°45'17.5"W
NASOL (IAF)	28°50'26.0"N 017°25'38.0"W
Aproximación final APV SBAS - Ángulo de descenso (Pendiente) // APV SBAS final approach - Descent angle (Slope)	
3.50° (6.12 %)	

DESCRIPCIÓN TABULAR DEL PROCEDIMIENTO
PROCEDURE TABULAR DESCRIPTION

Número de serie Serial number	Descriptor de trayectoria Path Terminator	Identificador de punto de recorrido Waypoint identifier	Sobrevuelo Fly-over	Curso/Derrota Course/Track °M (°T)	Variación magnética Magnetic variation	Distancia Distance (NM)	Dirección de viraje Turn direction	Altitud Altitude (ft)	Velocidad Speed (kt)	VPA/TCH (°/ft)	Especificación de navegación Navigation specification
ARACO (IAF)											
001	IF	ARACO	-	-	+5	-	-	+4500	-	-	RNP APCH
002	TF	LP01	-	224 (219.0)	+5	9.7	R	+2000	-	-	RNP APCH
003	TF	LP02	-	294 (289.0)	+5	10.2	R	+2000	-	-	RNP APCH
004	TF	LP03	-	004 (359.0)	+5	10.3	-	+2000	-	-	RNP APCH
006	TF	LP04	Y	004 (359.0)	+5	3.2	R	-	-	3.5/49	RNP APCH
007	DF	NASOL	-	-	+4.24	22.9	-	+4500	-	-	RNP APCH

CIRCUITOS DE ESPERA // HOLDING PATTERN

Descriptor de trayectoria Path terminator	Identificador de punto de recorrido Waypoint identifier	Sobrevuelo Fly-over	Curso/Derrota Course/Track °M (°T)	Variación magnética Magnetic variation	Distancia/ Tiempo de alejamiento Distance/ Outbound time	Dirección de viraje Turn direction	Altitud MNM MNM altitude (ft)	Altitud MAX MAX altitude (ft)	Velocidad Speed (kt)	Especificación de navegación Navigation specification
HM	ARACO	-	307 (302.3)	+5	1 MIN	R	4500	-	-	RNAV1
HM	NASOL	-	236 (232.2)	+4.24	1 MIN	R	4500	-	-	RNAV1

SBAS FAS DATA BLOCK		
FAS DATA BLOCK		
1	OPERATION MODE	00
2	SERVICE PROVIDER IDENTIFIER	01*
3	AIRPORT IDENTIFIER	GCLA
4	RUNWAY	RW36
5	APPROACH PERFORMANCE DESIGNATOR	0**
6	ROUTE INDICATOR	Z
7	REFERENCE PATH DATA SELECTOR (RPDS)	00
8	REFERENCE PATH IDENTIFIER	E36A***
9	LANDING THRESHOLD POINT (LTP) - LATITUDE	283702.5392N
10	LANDING THRESHOLD POINT (LTP) - LONGITUDE	0174519.5696W
11	LTP HEIGHT ABOVE ELLIPSOID (HAE)	+43.10 m
12	FLIGHT PATH ALIGNMENT POINT (FPAP) - LATITUDE	411731.9895N
13	FLIGHT PATH ALIGNMENT POINT (FPAP) - LONGITUDE	0020611.8115E
14	THRESHOLD CROSSING HEIGHT (TCH)	00015.0
15	TCH UNIT SELECTOR	1
16	GLIDE PATH ANGLE	03.50
17	COURSE WIDTH AT THRESHOLD	210.00
18	LENGTH OFFSET	0000
19	HORIZONTAL ALERT LIMIT (HAL)	40.0
20	VERTICAL ALERT LIMIT (VAL)	50.0
NON - FAS DATA BLOCK		
22	ICAO CODE	GC
<p>NOTAS // NOTES:</p> <p>*: Este valor "01" identifica a EGNOS como proveedor de servicio. // This value "01" identifies EGNOS as service provider.</p> <p>** : LPV.</p> <p>***: "E" se refiere a EGNOS. // "E" refers to EGNOS.</p>		

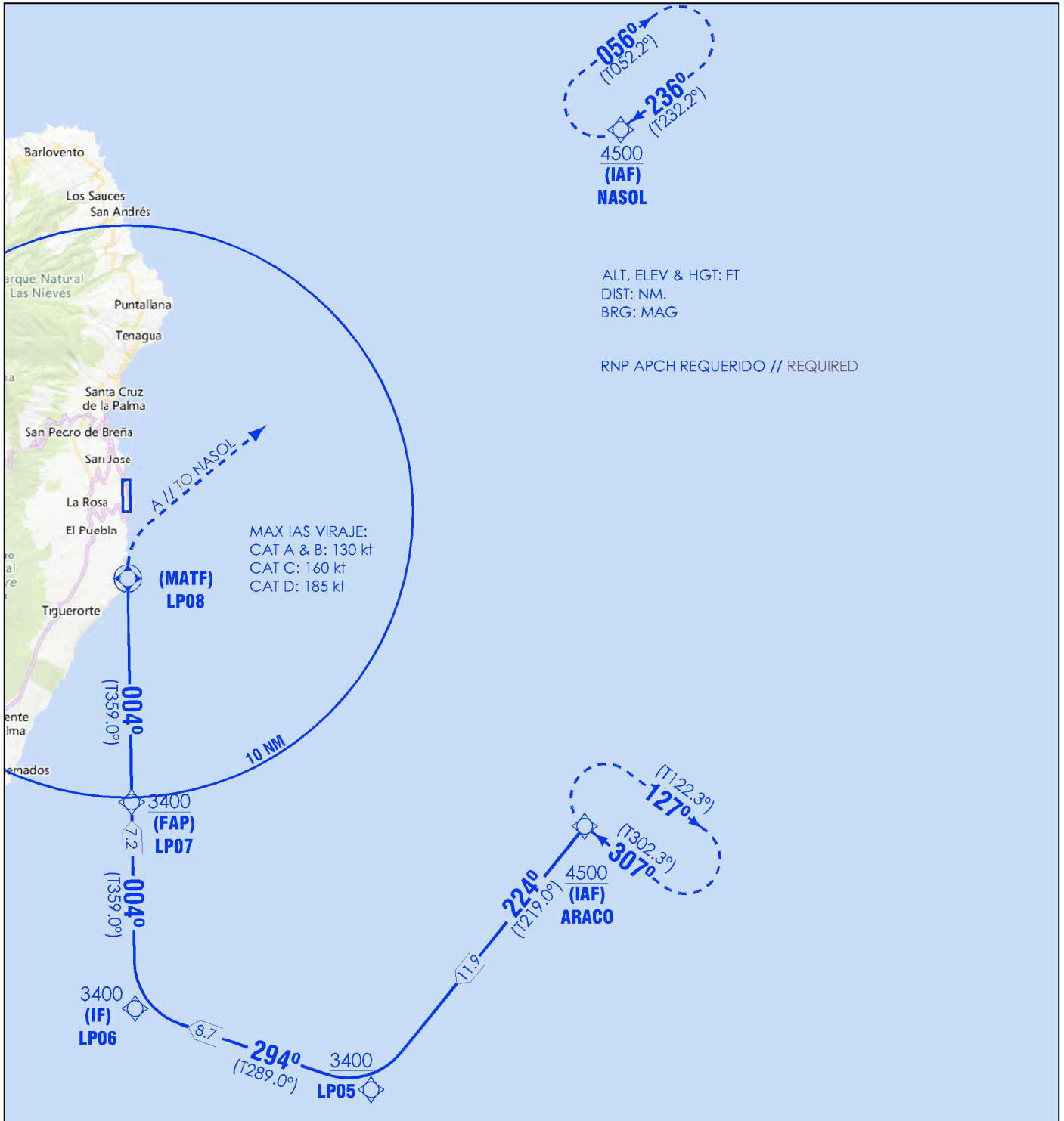
CARTA DE APROXIMACIÓN
POR INSTRUMENTOS-OACI

ELEV AD
108
VAR 5°W (2020)

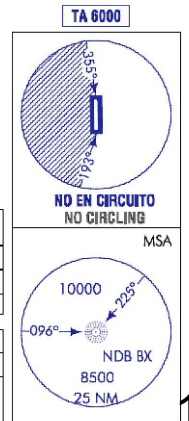
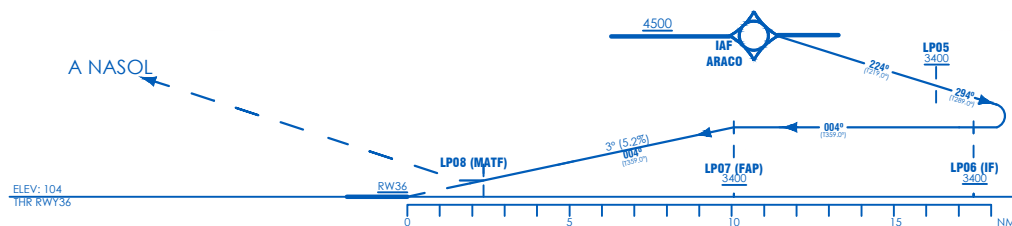
APP 126.100
TWR 118.900
GMC 121.800

RDH 49

LA PALMA
RNP A
RWY 36



FRUSTRADA: VIRAR A LA DERECHA PARA ASCENDER HASTA ALCANZAR 4500. DIRECTO A NASOL PARA INTEGRARSE A LA ESPERA A 4500.
MISSED APCH: TURN RIGHT UP TO REACH 4500. DIRECT TO NASOL TO JOIN THE HOLDING AT 4500.



OCA/H		A	B	C	D
STA	LNAV/VNAV	2.5%	RESTRINGIDA A OCA/H DE CIRCUITO POR ANGULO POR VIOLACION DE VSS. RESTRICTED TO OCA/H BY CIRCUIT DUE TO VSS INFRINGEMENT.		
En circuito(H) sobre Circling (H) over		902 (798)	1345 (1241)	2319 (2215)	

GS	kt	80	100	120	140	160	180
FAP-THR: 10.2 NM	min:s	7:39	6:08	5:06	4:23	3:50	3:24
FAP-MAPT:	min:s						
ROD: 5.2%	ft/min	424	530	636	742	848	954

ALT/HGT RWY 19 FNA											
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	
			3300 (3200)	2980 (2880)	2670 (2570)	2350 (2250)	2030 (1930)	1710 (1610)	1390 (1290)	1070 (970)	760 (660)
										440 (340)	

LA PALMA AD

REQUISITOS DE LA BASE DE DATOS AERONÁUTICA
AERONAUTICAL DATABASE REQUIREMENTS

PROCEDIMIENTOS DE APROXIMACIÓN POR INSTRUMENTOS // INSTRUMENT APPROACH PROCEDURES

RNP RWY 36

COORDENADAS WAYPOINTS // WAYPOINTS COORDINATES	
WPT	COORD
ARACO (IAF)	28°25'57.1"N 017°27'08.4"W
LP05	28°16'43.2"N 017°35'38.0"W
LP06 (IF)	28°19'34.9"N 017°44'59.4"W
LP07 (FAP)	28°26'49.6"N 017°45'07.7"W
LP08 (MATF)	28°34'41.3"N 017°45'16.8"W
NASOL (IAF)	28°50'26.0"N 017°25'38.0"W
Aproximación Final de No precisión - Pendiente (Ángulo de descenso) // Non-precision final approach - Slope (Descent angle)	
5.24 % (3.00°)	

DESCRIPCIÓN TABULAR DEL PROCEDIMIENTO PROCEDURE TABULAR DESCRIPTION											
Número de serie Serial number	Descriptor de trayectoria Path Terminator	Identificador de punto de recorrido Waypoint identifier	Sobrevuelo Fly-over	Curso/Derota Course/Track °M(°T)	Variación magnética Magnetic variation	Distancia Distance (NM)	Dirección de viraje Turn direction	Altitud Altitude (ft)	Velocidad Speed (kt)	VPA/TCH (°/ft)	Especificación de navegación Navigation specification
ARACO (IAF)											
001	IF	ARACO	-	-	+5	-	-	+4500	-	-	RNP APCH
002	TF	LP05	-	224 (219.0)	+5	11.9	R	+3400	-	-	RNP APCH
003	TF	LP06	-	294 (289.0)	+5	8.7	R	+3400	-	-	RNP APCH
004	TF	LP07	-	004 (359.0)	+5	7.2	-	+3400	-	-	RNP APCH
006	TF	LP08	Y	004 (359.0)	+5	7.8	R	-	-	3.0/49	RNP APCH
007	DF	NASOL	-	-	+4.24	23.4	-	+4500	-	-	RNP APCH

CIRCUITOS DE ESPERA // HOLDING PATTERN										
Descriptor de trayectoria Path terminator	Identificador de punto de recorrido Waypoint identifier	Sobrevuelo Fly-over	Curso/Derota Course/Track °M(°T)	Variación magnética Magnetic variation	Distancia/ Tiempo de alejamiento Distance/ Outbound time	Dirección de viraje Turn direction	Altitud MNM MNM altitude (ft)	Altitud MAX MAX altitude (ft)	Velocidad Speed (kt)	Especificación de navegación Navigation specification
HM	ARACO	-	307 (302.3)	+5	1 MIN	R	4500	-	-	RNAV1
HM	NASOL	-	236 (232.2)	+4.24	1 MIN	R	4500	-	-	RNAV1

CARTA DE APROXIMACIÓN
POR INSTRUMENTOS-OACI

ELEV AD
108
VAR 5°W (2020)

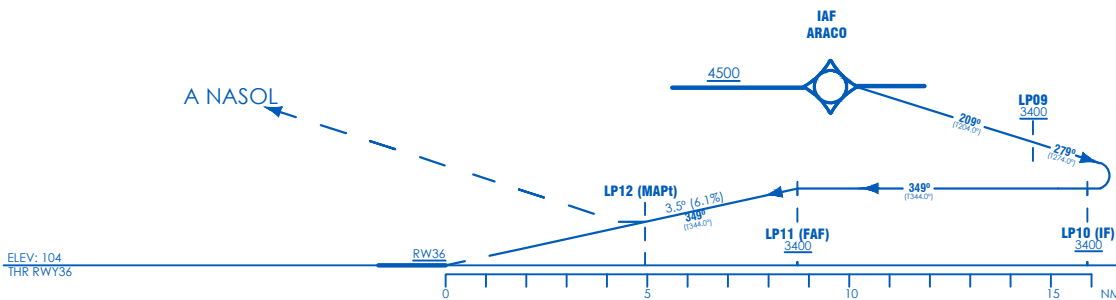
APP 126.100
TWR 118.900
GMC 121.800

RDH 49

LA PALMA
RNP B
RWY 36



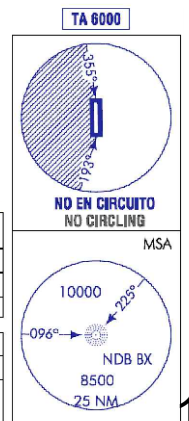
FRUSTRADA: VIRAR A LA DERECHA PARA ASCENDER HASTA ALCANZAR 4500. DIRECTO A NASOL PARA INTEGRARSE A LA ESPERA A 4500.
MISSED APCH: TURN RIGHT UP TO REACH 4500. DIRECT TO NASOL TO JOIN THE HOLDING AT 4500.



OCA/H		A	B	C	D
STA	LNAV	1996 (1892)			
En circuito(H) sobre Circling (H) over		902 (798)	1345 (1241)	2319 (2215)	

GS	kt	80	100	120	140	160	180
FAP-THR: 8.7 NM	min:s	6:34	5:15	4:23	3:45	3:17	2:55
FAF-MAPT:	min:s						
ROD: 6.1%	ft/min	495	618	742	866	989	1113

ALT/HGT RWY 19 FNA												
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
					3090 (2990)	2720 (2620)	2350 (2250)	1980 (1880)	1610 (1510)	1230 (1130)	860 (760)	490 (390)



LA PALMA AD

REQUISITOS DE LA BASE DE DATOS AERONÁUTICA
AERONAUTICAL DATABASE REQUIREMENTS

PROCEDIMIENTOS DE APROXIMACIÓN POR INSTRUMENTOS // INSTRUMENT APPROACH PROCEDURES

RNP RWY 36

COORDENADAS WAYPOINTS // WAYPOINTS COORDINATES	
WPT	COORD
ARACO (IAF)	28°25'57.1"N 017°27'08.4"W
LP09	28°20'56.3"N 017°29'41.0"W
LP010 (IF)	28°21'37.8"N 017°40'34.1"W
LP011 (FAF)	28°28'35.7"N 017°42'49.2"W
LP012 (MATp)	28°32'14.2"N 017°43'59.9"W
NASOL (IAF)	28°50'26.0"N 017°25'38.0"W
Aproximación Final de No precisión - Pendiente (Ángulo de descenso) // Non-precision final approach - Slope (Descent angle)	
6.12 % (3.50°)	

DESCRIPCIÓN TABULAR DEL PROCEDIMIENTO PROCEDURE TABULAR DESCRIPTION											
Número de serie Serial number	Descriptor de trayectoria Path Terminator	Identificador de punto de recorrido Waypoint identifier	Sobrevuelo Fly-over	Curso/Derota Course/Track °M(°T)	Variación magnética Magnetic variation	Distancia Distance (NM)	Dirección de viraje Turn direction	Altitud Altitude (ft)	Velocidad Speed (kt)	VPA/TCH (°/ft)	Especificación de navegación Navigation specification
ARACO (IAF)											
001	IF	ARACO	-	-	+5	-	-	+4500	-	-	RNP APCH
002	TF	LP09	-	224 (219.0)	+5	5.5	R	+3400	-	-	RNP APCH
003	TF	LP10	-	294 (289.0)	+5	9.6	R	+3400	-	-	RNP APCH
004	TF	LP11	-	004 (359.0)	+5	7.2	-	+3400	-	-	RNP APCH
006	TF	LP12	Y	004 (359.0)	+5	3.8	R	-	-	3.5/49	RNP APCH
007	DF	NASOL	-	-	+4.24	24.3	-	+4500	-	-	RNP APCH

CIRCUITOS DE ESPERA // HOLDING PATTERN										
Descriptor de trayectoria Path terminator	Identificador de punto de recorrido Waypoint identifier	Sobrevuelo Fly-over	Curso/Derota Course/Track °M(°T)	Variación magnética Magnetic variation	Distancia/ Tiempo de alejamiento Distance/ Outbound time	Dirección de viraje Turn direction	Altitud MNM MNM altitude (ft)	Altitud MAX MAX altitude (ft)	Velocidad Speed (kt)	Especificación de navegación Navigation specification
HM	ARACO	-	307 (302.3)	+5	1 MIN	R	4500	-	-	RNAV1
HM	NASOL	-	236 (232.2)	+4.24	1 MIN	R	4500	-	-	RNAV1

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Operación de aeronaves: Volumen II, Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos,” Doc 8168, 6ª edición, OACI, 2014.
- [2] “Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP (A-RNP),” Eurocontrol, 2013.
- [3] “Airspace Concept Handbook for the Implementation of Performance Based Navigation (PBN),” Eurocontrol, 4ª edición, 2021.
- [4] “Guidance Material for the Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV),” Eurocontrol, 3ª edición, 2003.
- [5] “Anexo 10, Telecomunicaciones aeronáuticas,” Volumen 1, OACI, 6ª edición, 2006.
- [6] “GNSS Performance Validation Summary,” ECC Report No. 345, Eurocontrol Experimental Centre, Eurocontrol, 2000.
- [7] “Real Decreto Legislativo 2/2015,” BOE-A-2015-11430, Ministerio de Empleo y Seguridad Social, 2015.
- [8] “Manual de diseño de aeródromos,” Parte 1: Pistas, 3ª edición, OACI, 2006.
- [9] “Manual de navegación basada en la performance (PBN),” Doc 9613, 3ª edición, OACI, 2008.
- [10] “Anexo 14, Aeródromos,” Volumen 1: Diseño y operaciones de aeródromos, 7ª edición, OACI, 2016.
- [11] “Meteorología del Aeropuerto de La Palma,” Fernando Bullón Miró, Oficina Meteorológica del Aeropuerto de La Palma, Agencia Estatal de Meteorología, 2003.
- [12] “Climatología aeronáutica, La Palma,” Ministerio para la Transición Ecológica, Agencia Estatal de Meteorología, 2018.
- [13] “Cizalladura y turbulencia,” Agencia Estatal de Meteorología, 2014.
- [14] “EGNOS Open Service (OS), Service Definition Document,” European Satellite Services Provider, 2017.
- [15] “EGNOS Safety of Life (SoL), Service Definition Document,” European Satellite Services Provider, 2021.
- [16] “SBAS NPA, APV and Precision Approach CAT I,” ENAV, 2015.

- [17] “PBN Approach implementation monitoring by Eurocontrol,” Aline Troadec, Eurocontrol, 2014.
- [18] “Guidance Material, Aircraft and operator approval for RNP 4 operations,” Eurocontrol, 2013.
- [19] “ICAO Abbreviations and Codes,” Doc 8400, 8ª edición, OACI, 2010.
- [20] “Tráfico de pasajeros, operaciones y carga en los aeropuertos españoles,” Informe anual, Aena, 2019.
- [21] “Historia, Aeropuerto de La Palma,” Aena. Disponible en:
<https://www.aena.es/es/la-palma/conocenos/historia.html>
- [22] “Moving towards wide-scale SBAS CAT-I deployment,” European Satellite Services Provider, 2018. Disponible en: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/news-events/news/moving-towards-wide-scale-sbas-cat-i-deployment
- [23] “Section 2. Performance-Based Navigation (PBN) and Area Navigation (RNAV),” Federal Aviation Administration. Disponible en:
https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap1_section_2.html
- [24] “Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero,” Instituto Nacional de Estadística. Disponible en:
<https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2910>
- [25] “Global Navigation Satellite System Outage Leading to Navigation/Surveillance Degradation,” Safety Information Bulletin No. 2022-02, EASA, 2022.
- [26] “Datos de aeródromo,” GCLA, AIP España, ENAIRE. Disponible en:
<https://aip.enaire.es/AIP/#GCLA>
- [27] “Ítem 10: Obstáculos de aeródromo,” GCLA, AIP España, ENAIRE. Disponible en: <https://aip.enaire.es/AIP/#GCLA>