

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño de la aproximación LPV para el Aeropuerto de Sevilla y comparativa frente al actual ILS

Autor: Alejandro Rafael Sánchez Toledo

Tutor: Rafael Millán Muñoz

**Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales
y del Transporte**
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería Aeroespacial

Diseño de la aproximación LPV para el Aeropuerto de Sevilla y comparativa frente al actual ILS

Autor:

Alejandro Rafael Sánchez Toledo

Tutor:

Rafael Millán Muñoz

Profesor asociado

Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Grado: Diseño de la aproximación LPV para el Aeropuerto de Sevilla y comparativa
frente al actual ILS

Autor: Alejandro Rafael Sánchez Toledo

Tutor: Rafael Millán Muñoz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Este Trabajo de Fin de Grado marca el final de una etapa que ha sido, sin duda, un reto constante, pero también una fuente inagotable de aprendizaje y crecimiento personal. Llegar hasta aquí no habría sido posible sin todas las personas que, de una forma u otra, han estado a mi lado durante estos años de formación.

A mi familia, no hay palabras suficientes para expresar mi gratitud. Su apoyo incondicional, su paciencia en los momentos de mayor estrés, que no han sido pocos, y su confianza en mí han sido la base sobre la que he construido cada paso de esta etapa. Gracias por comprender mis ausencias, por animarme cuando las fuerzas flaqueaban y por celebrar conmigo cada pequeño avance.

También quiero agradecer a todos aquellos profesores que, a lo largo de estos años, han contribuido a mi formación, no solo transmitiendo conocimientos, sino también fomentando la curiosidad, el pensamiento crítico y la pasión por la aeronáutica. Cada asignatura, por difícil que haya sido, ha dejado una huella en mi forma de afrontar los desafíos, resolver problemas y en general, de ver la vida.

Alejandro R. Sánchez Toledo
Sevilla, 2025

Resumen

En este trabajo se analizarán dos de los sistemas de ayuda a la navegación aérea más empleados hoy en día: el ILS y el LPV. Primero se describe el ILS como un sistema de navegación primario utilizado por los pilotos en vuelos IFR, el cual permite el guiado de precisión horizontal y vertical durante las fases de aproximación y aterrizaje, y los componentes necesarios para su funcionamiento. Posteriormente, se explica el LPV, que es un sistema de navegación basado en GNSS que mejora la eficiencia en el flujo de aeronaves y reduce los riesgos en vuelos controlados. Finalmente, se presentan las ventajas y mejoras de cada sistema, comparando ambos y destacando las mejoras que puede suponer la implantación del LPV, el impacto en futuras ampliaciones del aeropuerto y los costes operativos asociados. Todo ello aplicado al Aeropuerto de Sevilla, que es el punto de estudio en cuestión.

Abstract

This study analyzes two of the most widely used air navigation aid systems today: ILS and LPV. First, the ILS is described as a primary navigation system used by pilots in IFR flights, which provides horizontal and vertical precision guidance during the approach and landing phases, along with the necessary components for its operation. Subsequently, the LPV system is explained as a GNSS-based navigation system that enhances aircraft flow efficiency and reduces risks in controlled flights. Finally, the advantages and improvements of each system are shown, comparing both and highlighting the benefits that the implementation of LPV may offer, its impact on future airport expansions, and the associated operational costs. All these aspects are applied to Seville Airport, which serves as the case study for this analysis.

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
Índice de Figuras	17
Glosario	19
1 Introducción y objetivo	23
2 Sistema ILS	25
2.1 <i>Procedimiento de aproximación ILS</i>	25
2.1.1 Aproximación Inicial	25
2.1.2 Aproximación Intermedia	25
2.1.3 Aproximación Final	26
2.2 <i>Categorías ILS</i>	26
2.3 <i>Equipamiento de tierra</i>	27
2.3.1 Localizador (LOC)	27
2.3.2 Senda de Planeo (GS)	29
2.4 <i>Instalación a bordo de las aeronaves</i>	31
2.5 <i>Instalación en LEZL</i>	34
2.5.1 Segmentos de las aproximaciones ILS Z en LEZL	40
3 Concepto LPV: PBN	45
3.1 <i>PBN: Definición</i>	47
3.2 <i>RNAV Y RNP</i>	51
3.2.1 RNAV	52
3.2.2 RNP	55
3.3 <i>INFRAESTRUCTURA PBN</i>	58
3.3.1 GNSS	58
3.3.2 Sistemas de Aumentación de GNSS	59
3.4 <i>Aproximaciones LPV: Operación y Diseño</i>	67
3.4.1 Áreas de protección y franqueamiento de obstáculos	67
3.4.2 Mínimos aplicables	68
3.4.3 Sensores y Equipos Requeridos	69
4 Procedimiento LPV en el Aeropuerto de Sevilla	71
4.1 <i>Identificación de necesidades operativas</i>	71
4.1.1 Motivación para el cambio	71
4.1.2 Infraestructura actual	71
4.1.3 Impacto de la cobertura de EGNOS	72

4.1.4	Adaptación tecnológica y normativa	72
4.2	<i>Diseño y descripción general del procedimiento</i>	73
4.2.1	Áreas de protección	73
4.2.2	Segmentos y requisitos	80
4.2.3	Categorías de Aeronave en la aproximación LPV a LEZL	81
4.3	<i>Certificaciones y requisitos</i>	82
4.3.1	Certificaciones y requisitos de Aeronaves y Operadores	82
4.3.2	Certificaciones y requisitos de Procedimientos	83
4.4	<i>Carta Aeronáutica: AIP.</i>	84
4.4.1	Aproximación Inicial	84
4.4.2	Aproximación intermedia	85
4.4.3	Aproximación final	86
4.4.4	Aproximación frustrada	87
4.4.5	Perfil de la aproximación	88
4.4.6	Simbolos cartográficos	90
5	Ventajas y mejoras de LPV frente a ILS	93
5.1	<i>Simultaneidad y continuidad operativa</i>	93
5.2	<i>Integridad</i>	94
5.3	<i>Impacto en futuras ampliaciones del aeropuerto</i>	95
5.4	<i>Costes operativos</i>	96
5.5	<i>Transición y futuro del ILS</i>	97
6	Conclusiones	99
7	Anexo I: Cartas Aeronáuticas	101
8	Bibliografía	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de los puntos y segmentos en las aproximaciones instrumentales.	26
Figura 2.2: Señal LOC ILS. [4]	28
Figura 2.3: Volumen servicio LOC.	28
Figura 2.4: Señal Senda de Planeo ILS.	29
Figura 2.5: Cobertura GS.	30
Figura 2.6: Sistema de luces de aproximación.	31
Figura 2.7: Marker Beacons en ILS.	31
Figura 2.8: Diagrama de bloques del receptor de ILS.	32
Figura 2.9: Ejemplo de una aeronave desviada hacia la izquierda en la aproximación ILS.	33
Figura 2.10: Ejemplo de la alerta GS (iluminado en rojo) porque la aeronave está fuera del haz.	34
Figura 2.11: Plano de aeródromo Sevilla en 2001, donde vemos la instalación ILS únicamente para la pista 27 (antenas LOC en cabecera 09 y GS al lado de la 27).	35
Figura 2.12: Antenas LOC en LEZL.	36
Figura 2.13: Antenas tipo LogDipolar (LOC) [izquierda] y reflectora (GS) [derecha].	37
Figura 2.14: Antenas GS en LEZL.	38
Figura 2.15: Antena Imagen de GS para un caso con 2 (+2) antenas.	39
Figura 2.16: Esquema de la señal ILS para conseguir la menor distancia respecto al suelo de la Senda de Planeo. [9]	40
Figura 2.17: Segmento de aproximación Inicial en LEZL. RW 09 (izquierda) y RW 27(derecha).	41
Figura 2.18: Arco descrito en la trayectoria antes de llegar al IAF.	41
Figura 2.19: Segmento de aproximación Intermedia en LEZL. RW 09 (izquierda) y RW 27(derecha).	42
Figura 2.20: Segmento de aproximación Final en LEZL. RW 09 (izquierda) y RW 27 (derecha).	42
Figura 2.21: Plano vertical en ambas aproximaciones a RW09.	43
Figura 3.1: Esquema de los sistemas de navegación según sus capacidades.	45
Figura 3.2: Navegación por Área RNAV.	46
Figura 3.3: RNP.	47
Figura 3.4: Límite de Alerta (AL).	48
Figura 3.5: Alerta de integridad por $PL > AL$ (derecha) y diagrama del abandono de la trayectoria (izquierda).	49
Figura 3.6: Requisito de funcionalidad PBN.	50
Figura 3.7: Requisito angular de PBN.	51
Figura 3.8: Especificaciones de RNP y RNAV.	52
Figura 3.9: Conceptos Fly-by y Fly-over.	53
Figura 3.10: Leg Types en procedimientos RNAV. TF (arriba izquierda), DF (arriba derecha), Course to Fix (abajo izquierda) y RF (abajo derecha).	54
Figura 3.11: Distancias (NM) de separación de las distintas categorías RNAV y RNP.	57
Figura 3.12: Ubicación del receptor empleando 4 satélites.	58
Figura 3.13: Ejemplo de cálculo de la posición con dispersión causada por un satélite fallido,	

posible gracias al sistema RAIM.	60
Figura 3.14: Funcionamiento GBAS.	61
Figura 3.15: Cobertura mundial de SBAS.	63
Figura 3.16: Cobertura EGNOS y estaciones RIMS.	64
Figura 3.17: Componente horizontal del error del sistema.	65
Figura 3.18: Requerimientos de Rendimiento en términos de Precisión. [6]	66
Figura 4.1: Área de las OAS con la ampliación de área secundaria para el segmento intermedio.	74
Figura 4.2: Esquema con la ubicación de los puntos y planos que delimitan las OAS (arriba) y representación gráfica de la altitud de referencia respecto al GS (RDH, abajo).	75
Figura 4.3: Puntos de OAS para RWY09 (arriba) y RWY27 (abajo).	77
Figura 4.4: OAS para las RWY09 (arriba) y RWY27 (abajo).	78
Figura 4.5: Impacto de los obstáculos de aeródromo sobre las OAS para las aproximaciones por RWY27 (abajo) y RWY09 (arriba, con el obstáculo que penetra marcado en amarillo).	79
Figura 4.6: Obstáculos que penetran las OAS para la aproximación por RWY09.	80
Figura 4.7: Segmento de Aproximación Inicial LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)	85
Figura 4.8: Segmento de Aproximación Intermedia LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)	86
Figura 4.9: Segmento de Aproximación Final LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)	87
Figura 4.10: Segmento de Aproximación Frustrada LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)	88
Figura 4.11: Obstáculos más elevados en los alrededores. Torre de comunicaciones en valencina (arriba) y desnivel cercano al municipio de Carmona (abajo).	89
Figura 4.12: Perfil de las aproximaciones LPV a las pistas 09 y 27 de LEZL	90
Figura 4.13: Símbolos para la topografía e hidrografía.	90
Figura 4.14: Notificación y funcionalidad “de paso/sobrevuelo”	91
Figura 5.1: Separaciones por estela turbulenta en España. [34]	93
Figura 5.2: Tabla de codificación de un FAS Data Block de Austrocontrol.	95
Figura 5.3: Posibilidades de ampliación del Aeropuerto de Sevilla.	96
Figura 7.1: Carta AIP RNP APCH (LPV ONLY) RW27.	101
Figura 7.2: Carta AIP RNP APCH (LPV ONLY) RW09.	102

GLOSARIO

AAIM: "Aircraft Autonomous Integrity Monitoring". Monitorización Autónoma de Integridad en Aeronaves.

AESA: Agencia Estatal de Seguridad Aérea.

AIS: "Aeronautical Information Service". Servicio de Información Aeronáutica.

AGL: Above Ground Level. Altura sobre el suelo.

AL: "Alert Limit". Límite de Alerta.

AM: Modulación en Amplitud.

ATC: "Air Traffic Control". Control de Tráfico Aéreo.

CF: "Course to Fix".

CFIT: "Controlled Flight into Terrain". Vuelo Controlado hacia un Obstáculo.

CPF: "Central Processing Facility". Centro de Procesamiento Central.

CRC: "Cyclic Redundancy Check". Comprobación de Redundancia Cíclica.

CDFA: "Continuous Descent Final Approach". Descenso Continuo en la Aproximación Final.

DA: "Decision Altitude". Altitud de Decisión.

DDM: "Difference in Depth of Modulation". Diferencia en la Profundidad de Modulación.

DF: "Direct to Fix".

DFMC: "Dual-Frequency Multi-Constellation". Multiconstelación de Doble Frecuencia.

DME: "Distance Measuring Equipment". Equipo de Medición de Distancia.

DP: "Instrument Departure Procedure". Procedimiento de despegue por instrumentos.

EFIS: "Electronic Flight Instrument System". Sistema Electrónico de Instrumentación de Vuelo.

EGPWS: "Enhanced Ground Proximity Warning System". Sistema de Alerta de Proximidad al Suelo Mejorado.

FAS DB: "Final Approach Segment Data Block". Bloque de Datos del Segmento de Aproximación Final.

FAP: "Final Approach Point". Punto de Aproximación Final.

FD: "Fault Detection". Detección de Fallos.

FDE: "Fault Detection and Exclusion". Detección y Exclusión de Fallos.

FMS: "Flight Management System". Sistema de Gestión de Vuelo.

FTE: "Flight Technical Error". Error Técnico de Vuelo.

GBAS: "Ground Based Augmentation System". Sistema de Aumentación (GNSS) Basado en Tierra.

GLS: "GBAS Landing System". Sistema de Aterrizaje GBAS.

GNSS: "Global Navigation Satellite Systems". Sistema Global de Navegación por Satélite.

GRS: "Ground Reference Station". Estación de Referencia Terrestre.

GS: "Glide Slope". Senda de Planeo.

HAL: "Horizontal Alarm Limits". Límites Horizontales de Alerta.

HPL: "Horizontal Protection Level". Nivel de Protección Horizontal.

IAF: "Initial Approach Fix". Punto de Aproximación Inicial.

ICAO: "International Civil Aviation Organization". Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

IF: "Intermediate Fix". Punto de Aproximación Intermedia.

IFR: "Instrumental Flight Rules". Reglas de Vuelo Instrumentales.

INS: "Inertial Navigation System". Sistema de Navegación Inercial.

IRU: "Inertial Reference Unit". Unidad de Referencia Inercial.

ISO: "International Organization for Standardization". Organización Internacional de Estandarización.

LEZL: "Seville Airport ICAO code". Código ICAO del Aeropuerto de Sevilla.

LOC: Localizador.

LOI: "Lost of Integrity". Pérdida de Integridad.

LNAV: "Lateral Navigation". Navegación con guiado lateral.

LP: "Localizer Performance". Aproximación con guiado lateral basada en GNSS pero sin guía vertical.

LPV: "Localizer Performance with Vertical Guidance".

LTP: "Landing Threshold Point". Punto de Umbral de Aterrizaje.

MAPt: "Missed Approach Point". Punto de Aproximación Frustrada.

MDA: "Minimum Decision Altitude". Altitud Mínima de Decisión.

MI: "Misleading Information". Información Incorrecta.

MOC: "Minimum Obstacle Clearance". Margen de franqueamiento de obstáculos.

NAVAID: "Navigation Aid". Ayuda a la navegación.

NDB: "Non Directional Beacons". Radiofaros No Direccionales.

NOTAM: "Notice to Airmen". Aviso a los aeronáuticos.

NSE: "Navitagonal System Error". Error del Sistema de Navegación.

OAS: "Obstacle Assessment Surfaces". Áreas de Franqueamiento de Obstáculos.

OBPMA: "On-Board Performance Monitoring and Alerting". Sistema de Monitoreo y Alerta de a bordo.

PDE: "Path Definition Error". Error en la Definición de Ruta.

RAIM: "Receiver Autonomous Integrity Monitor". Vigilancia Autónoma de la Integridad en el Receptor.

RF: "Radius to Fix".

RNAV: "Area Navigation". Navegación de Área.

RNP: "Required Navigation Performance". Requisitos de Rendimiento de Navegación.

RNP AR: "Required Navigation Performance - Authorization Required".

RNP AR DP: "RNP Authorization Required Departure Procedures".

SAPT: "Service Availability Prediction Tool". Herramienta de Predicción de Disponibilidad del Sistema.

SBAS: "Satellite Based Augmentation System". Sistema de Aumentación (GNSS) Basado en Satélites.

SIS: "Signal In Space". Señal en el Espacio.

TCH: "Threshold Crossing Height". Altitud de cruce del umbral (de pista).

TSE: "Total System Error". Error Total del Sistema.

TF: "Track to Fix".

UNE: Una Norma Española.

VA: "Heading to Altitude". Rumbo hacia una altitud determinada.

VAL: "Vertical Alert Limit". Límite Vertical de Alerta.

VPL: "Vertical Protection Level". Nivel de Protección Vertical.

VD: "Heading to DME". Rumbo a una estación DME concreta.

VDB: "VHF Data Broadcast". Difusión de Datos en VHF.

VHF: "Very High Frequency". Ondas de radio con frecuencia entre 30 y 300 MHz.

VOR: "Very High Frequency Omnidirectional Station". Radiofaro Omnidireccional de Muy Alta Frecuencia.

WP: "WayPoint". Punto de recorrido.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

“Look again at that dot. That's here. That's home. That's us”.

-Carl Sagan-

El Aeropuerto de Sevilla gestionó en 2023 un total de 64.774 vuelos (55.445 de ellos, comerciales), lo que supone un repunte del 7,3% en comparación con 2022. En este contexto, la seguridad y eficiencia de las operaciones aéreas son fundamentales para garantizar la seguridad de pasajeros, tripulación y personas en tierra. Por esta razón, existen ayudas a la navegación que permiten operar en condiciones de baja visibilidad o en situaciones de emergencia.

En concreto, el Sistema de Aterrizaje por Instrumentos (ILS) es el único método de aproximación de precisión que se puede emplear actualmente en este aeropuerto. Esta es una herramienta fundamental para la navegación aérea y muchos aeropuertos en todo el mundo cuentan con ella. Sin embargo, en los últimos años, se ha desarrollado una nueva tecnología de ayuda a la navegación: las Aproximaciones con Requisitos de Rendimiento de Navegación (RNP APCH) con mínimos de Rendimiento de Localizador con Guía Vertical (LPV).

El LPV utiliza la tecnología de navegación satelital, y ofrece prestaciones similares al ILS. Ambos permiten que los aviones aterricen con precisión y seguridad en condiciones de baja visibilidad, lo que reduce el impacto del clima y otros factores ambientales. El ILS ha sido utilizado durante años y es la ayuda a la navegación más robusta y empleada, pero con el crecimiento del tráfico aéreo y la necesidad de mantener y mejorar las infraestructuras, el surgimiento de nuevas herramientas más económicas como el LPV puede resultar muy útil en ciertos casos.

En base a ello, ENAIRE cuenta con un Plan de Transición PBN en España [1], aprobado por CIDETMA (Comisión Interministerial para la Defensa y el Transporte en Materia de Navegación Aérea) cuyo objetivo es establecer una estrategia integral para la transición del espacio aéreo español hacia un modelo basado en la Navegación Basada en Prestaciones (PBN) en cumplimiento con el Reglamento (UE) 2018/1048. Así, para el caso del Aeropuerto de Sevilla (LEZL), queda definida la fecha específica de implementación completa de procedimientos RNP APCH para 2026 en ambas cabeceras de pista.

Con toda esta información, se diseñarán las cartas de aproximación para el Aeropuerto de Sevilla para las dos aproximaciones de la pista de aterrizaje. Además, se analizará la situación actual, viendo los sistemas existentes y comparándolos con estas mejoras a implementar, viendo en qué puntos la tecnología GNSS puede mejorarla.

2 SISTEMA ILS

“The first step is to establish that something is possible; then probability will occur”.

-Elon Musk-

2.1 Procedimiento de aproximación ILS

Nota: La información de esta sección se ha construido conforme al Documento 8168 de la OACI.

2.1.1 Aproximación Inicial

Tras el segmento de llegada, en el que se transiciona de la fase en ruta hasta la fase de aproximación, comienza el segmento de aproximación inicial. Este comprende desde el Punto de Aproximación Inicial (IAP) hasta el Punto Intermedio (IF).

Dadas las limitaciones de alcance del sistema ILS, el segmento de aproximación inicial debe estar definido por una ruta con Navegación de Área (RNAV) o RNP, que deberá terminar en un IF alineado con el Localizador, es decir, dentro del volumen de servicio de la señal de ILS. Esta distancia no debe exceder los 46 km (25 NM) respecto a la posición de la antena Localizador (LOC).

2.1.2 Aproximación Intermedia

En el IF comienza el segmento de aproximación intermedia. En él los pilotos realizan la configuración final ajustando tanto la velocidad como el resto de los parámetros (como el tren de aterrizaje) de cara a conseguir estar completamente estabilizados para la aproximación final. Para facilitar el trabajo al piloto, este segmento suele ser de altitud constante. Este segmento terminará en el Punto de Aproximación Final (FAP).

El segmento de aproximación intermedia tiene como longitud óptima 9km (5 NM), o 3.7km (2 NM) para aeronaves de categoría H (aquellas de menor tamaño según la categorización OACI [DOC 8168 Vol I [2]]). En ambos casos, se debe cumplir un mínimo de 150m de altitud sobre los obstáculos presentes.

2.1.3 Aproximación Final

El segmento de precisión, que comienza en el FAP, debe por normativa ser inferior a 10 NM. La ubicación exacta del FAP se determina trazando la pendiente de 3° idealmente (puede llegar a 5° en casos con obstáculos cercanos) desde la cabecera de pista, y determinando la intersección de esta con el segmento de aproximación intermedia [Figura 2.1].

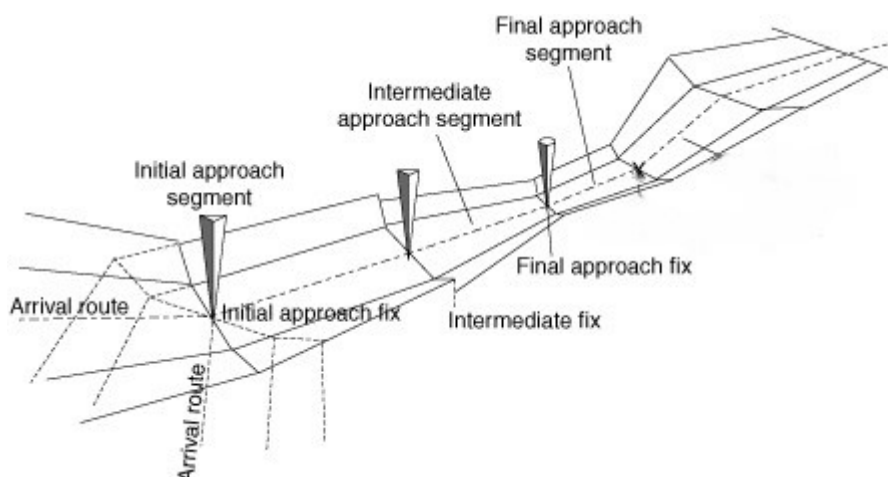


Figura 2.1: Esquema de los puntos y segmentos en las aproximaciones instrumentales.

2.2 Categorías ILS

Las aproximaciones mediante ILS se dividen en diferentes categorías según su precisión y los mínimos alcanzables, estas son:

- Categoría I (CAT I). Conlleva una altitud de decisión de 200 pies (60 m), es decir, el piloto debe elegir si va a realizar o no el aterrizaje, basado en toda la información disponible, a una altitud mínima de 60m y no por debajo de esta. Por otro lado, requiere un Alcance Visual en Pista (RVR) a 2600 pies (800 m), esto es, la necesidad por parte del piloto de poder ver claramente la pista desde al menos 800m de distancia. También se puede establecer el mínimo de 2600ft (800m) de visibilidad general. Esta categoría está diseñada para operaciones en condiciones de visibilidad adecuada, pues el piloto debe tener contacto visual con el entorno de la pista 200 pies por encima de la elevación de la zona de toma.
- Categoría II (CAT II). La altitud de decisión se sitúa entre 100 y 200 pies (30 a 60 metros), y la visibilidad de pista entre 1200 y 1400 pies (400 a 800 metros). Esta categoría intermedia, más restrictiva que la primera, permite aproximaciones con menores altitudes de decisión y requisitos de visibilidad inferiores respecto a CAT I.

- Categoría III (CAT III). Esta se divide a su vez en dos:
 - CAT III A. Su altitud de decisión va de 0 a 100 pies y la visibilidad de pista llega como máximo a 700 pies.
 - CAT III B. Solo se da cuando la altitud de decisión es de 0, es decir, no existe procedimiento de frustrada por mínimos de visibilidad (solo se daría en caso de fallo de algún sistema). Las aproximaciones en esta subcategoría están diseñadas para ser realizadas por el autopilot en condiciones de muy baja visibilidad, así que permiten aterrizaje automatizado.

2.3 Equipamiento de tierra

El sistema ILS es actualmente una de las ayudas a la navegación primarias utilizadas por los pilotos en Reglas de Vuelo Instrumentales (IFR). Este permite a la aeronave guiado de precisión tanto horizontal como vertical durante las fases de aproximación y aterrizaje.

Para ello son necesarios dos componentes clave, el Localizador y la Senda de Planeo. Hay que tener en cuenta que, si el Localizador no está operativo, no se pueden realizar ni aterrizajes de precisión (mediante el ILS) ni de no precisión, mientras que, si falla el transmisor de Senda de Planeo, aún se podría realizar una aproximación de no precisión. [3]

2.3.1 Localizador (LOC)

Consiste en un conjunto de antenas de tipo dipolo con varios reflectores, colocados a 1000 pies de la cabecera contraria de la pista por la que se realiza la aproximación, alineados con esta. Este transmite una señal en el rango de frecuencias de 108.10 a 111.95 MHz de Muy Alta Frecuencia (VHF), proyectando dos haces con distinta modulación en frecuencia.

Tomando de referencia el punto de vista del avión que se aproxima, encontramos en el haz izquierdo una modulación de 90 Hz, mientras que el derecho será modulado a 150 Hz. De esta forma, en el lado izquierdo respecto al centro de la pista se recibirá más señal modulada a 90 Hz que a 150 Hz y viceversa con el lado derecho [Figura 2.2]. Esta diferencia en la intensidad de una modulación recibida se denomina Diferencia en Profundidad de Modulación (DDM) y su uso se verá en el análisis de funcionamiento del receptor de LOC, desarrollado en el apartado 2.4 de este TFG.

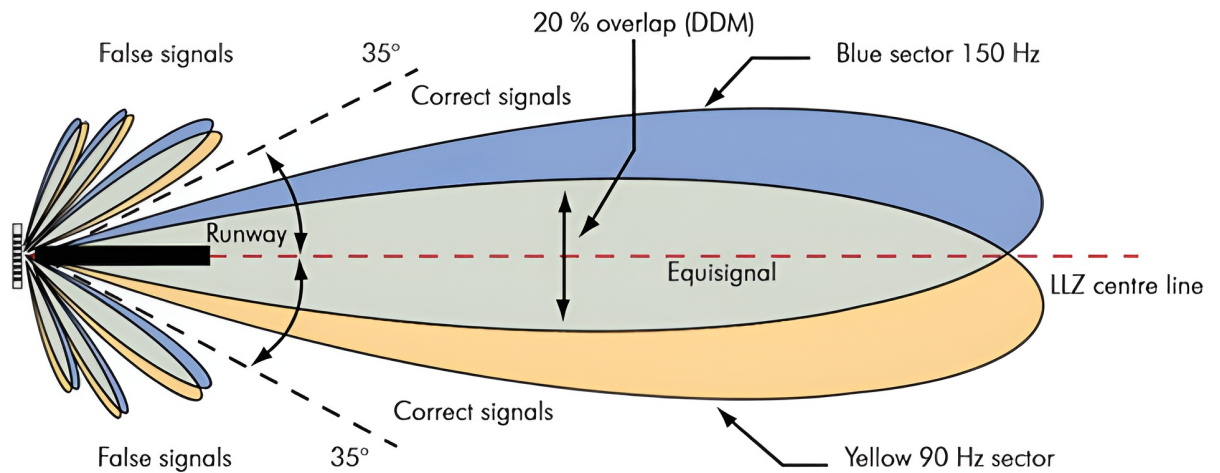


Figura 2.2: Señal LOC ILS. [4]

La señal del localizador, emitida con una potencia de 100W, debe poder sintonizarse desde las aeronaves a una distancia de 25NM, con apertura de 10° desde la línea central de pista, también a 17NM (y 4500 pies AGL) con una apertura entre 10 y 35°, y a 10NM con 35° de apertura desde la línea central de la pista [Figura 2.3].

Entre los dos haces (a 90 y a 150Hz), hay un 20% de superposición para que desde la aeronave se pueda saber que está correctamente colocada alineada con la pista. Para ello, el factor DDM actúa como protección, de forma que si hay una ligera desviación (hasta este 20% comentado), el sistema no elimina automáticamente la señal menos intensa marcando que haya desvío, sino que permite que dentro de este rango se dé la señal de que la aeronave se encuentra bien situada. [4]

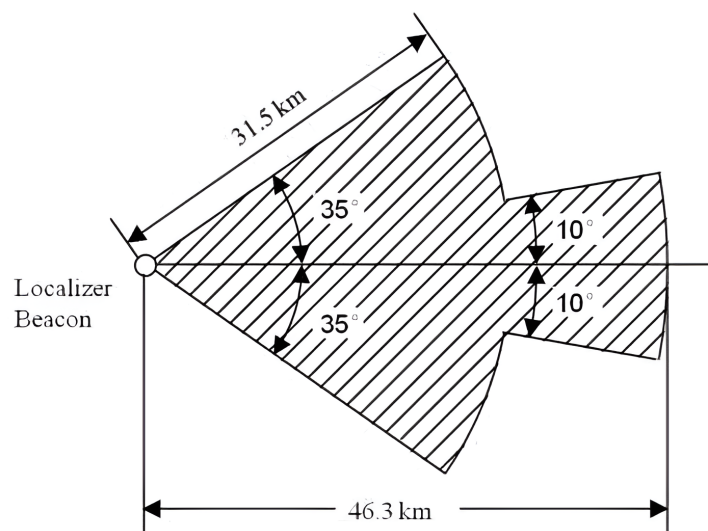


Figura 2.3: Volumen servicio LOC.

2.3.2 Senda de Planeo (GS)

La antena transmisora de la senda se coloca a unos 225-380 metros de la cabecera de pista (hacia el centro de esta), a unos 120-210 metros desviada respecto a la línea central. Su objetivo es guiar a las aeronaves por una Senda de Planeo predefinida, que suele ser de unos $2.5\text{-}3^\circ$ respecto al horizonte.

El principio de funcionamiento es muy parecido al del localizador, con dos señales superpuestas variando su modulación para indicar a la aeronave si se encuentra por encima o por debajo de la senda ideal [Figura 2.4] aunque el rango de amplitud de la señal es mucho más focalizada que en el caso del localizador, siendo aquí 1.5° la desviación máxima típica entre el límite superior y el inferior. Esto quiere decir, al igual que se comentaba anteriormente con el 20% de desviación, que existe un rango de 1.5° en el que la aeronave recibe ambas señales con suficiente intensidad para entender que se encuentra correctamente posicionado (intersección entre la zona de 90 y 150Hz en [Figura 2.4]). [5]

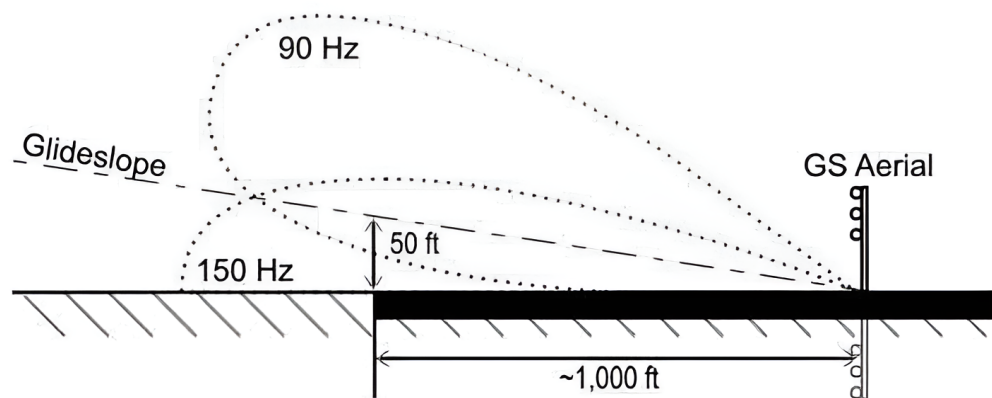


Figura 2.4: Señal Senda de Planeo ILS.

El transmisor de GS debe proporcionar señales hasta 10NM de distancia, con 8° de amplitud a cada lado de la senda ideal alineada con el eje de la pista. [Figura 2.5].

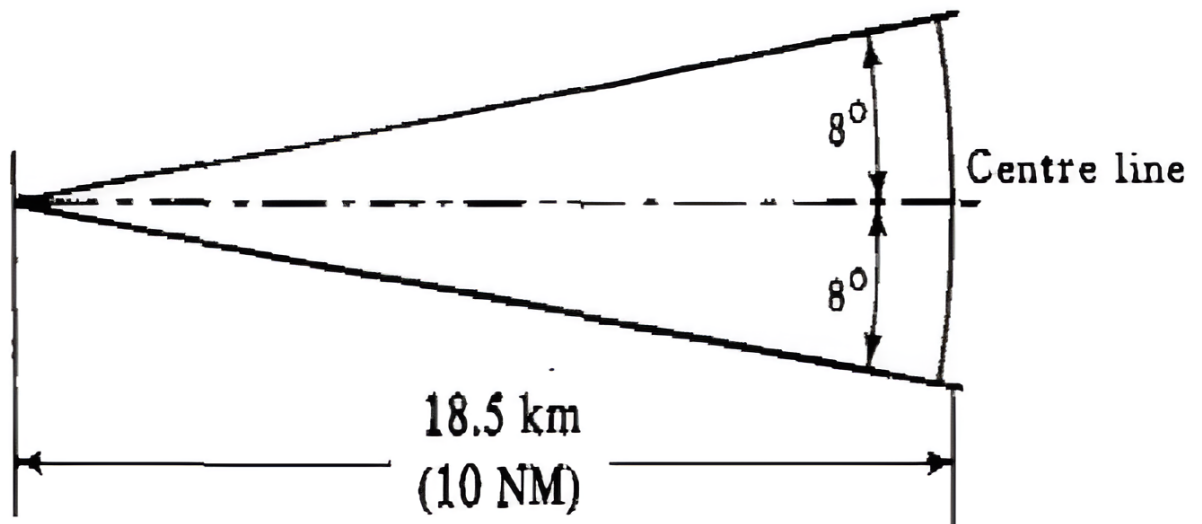


Figura 2.5: Cobertura GS.

Además de estos dos elementos que forman parte del sistema ILS, en este tipo de aproximación también se utilizan dos elementos auxiliares que facilitan la aproximación:

- **Sistema de Luces de Aproximación.** A pesar de que una aproximación ILS se inicia empleando radioayudas, el ALS [Figura 2.6] sirve como apoyo visual una vez el piloto está muy próximo a la pista, para terminar la aproximación en Reglas de Vuelo Visuales (VFR). Aunque no es necesario disponer de él en todas las situaciones de aterrizaje mediante ILS, este ayuda a los pilotos a identificar el entorno en condiciones de visibilidad reducida (que no nula).

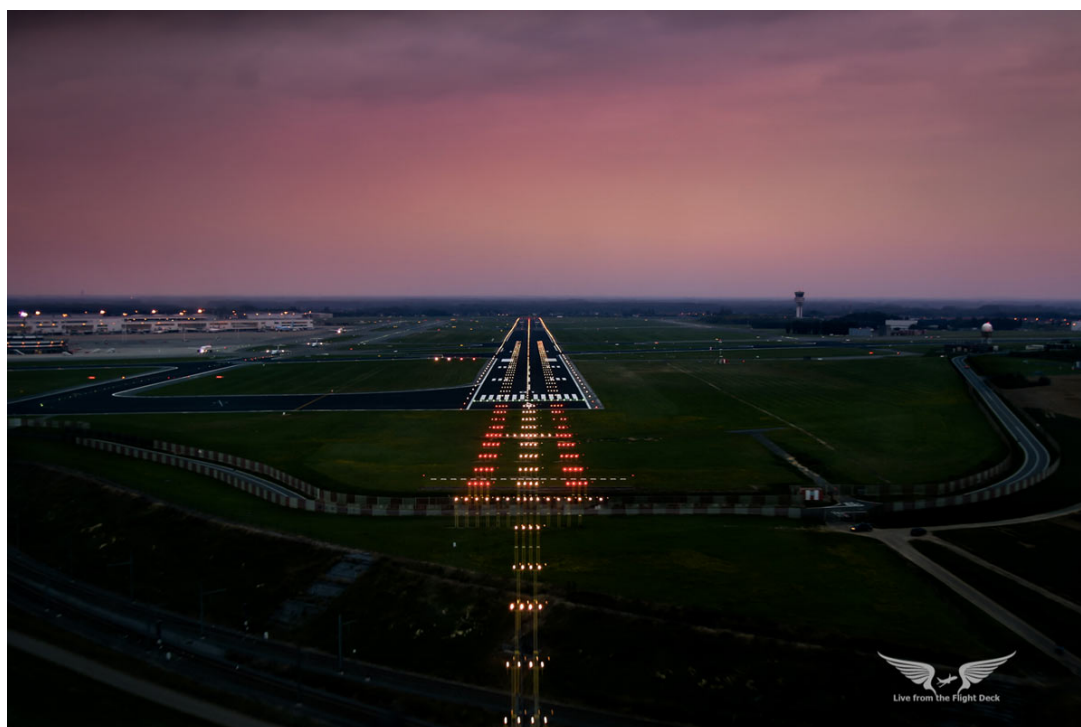


Figura 2.6: Sistema de luces de aproximación.

- **Radiobalizas.** Como el sistema ILS se desarrolló antes de que el Equipo de Medición de Distancia (DME) estuviese ampliamente implantado, algunas aproximaciones más antiguas de ILS llevan también radiobalizas, donde cada una señala un punto de la aproximación. Estas pueden indicar el punto de FAP (azul), el punto de altitud de decisión en CAT I (ámbar) y la altitud de decisión en CAT II (blanco) [Figura 2.7].

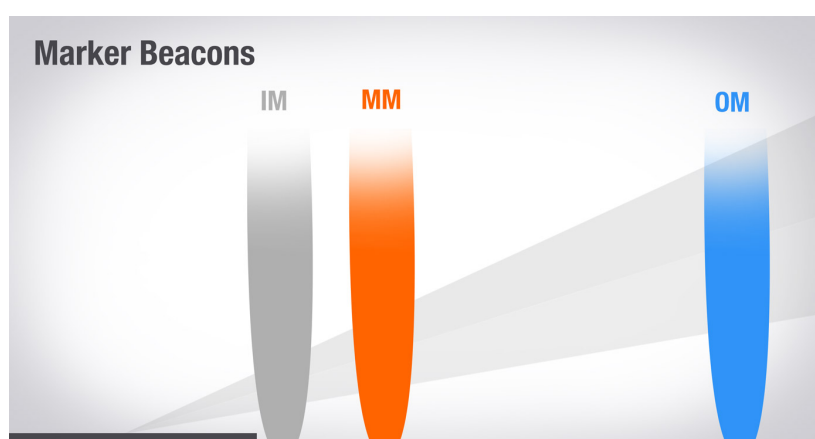


Figura 2.7: Marker Beacons en ILS.

2.4 Instalación a bordo de las aeronaves

Cualquier aeronave que busque aterrizar en condiciones de IFR con ILS necesitará a bordo dos receptores de AM, uno para la señal del Localizador (orientación en azimuth) y otro para la señal de la emisora de Senda de Planeo (orientación en elevación) y ambos deberán llevar un controlador automático de ganancia para compensar cambios en la intensidad de la señal recibida.

La señal se recibe en el receptor del LOC, que suele ser el mismo utilizado para las señales de VOR (radioayuda empleada para indicar la dirección de 0 a 360° respecto al punto desde donde emite), se procesa y filtra para identificar la intensidad de cada una de las frecuencias (90 y 150 Hz). Esto unido al rectificador, permite enviar la señal limpia al microamperímetro para que este pueda desviar la aguja en el Indicador de Desviación de Curso (CDI) [Figura 2.8].

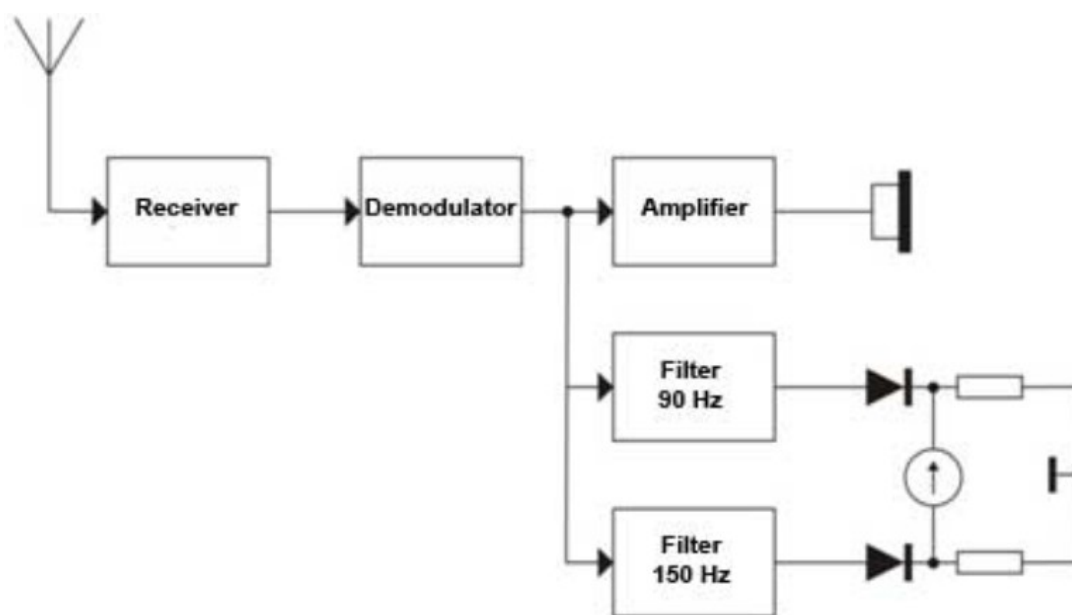


Figura 2.8: Diagrama de bloques del receptor de ILS.

De esta forma, la señal ya filtrada nos dará un valor de DDM que se representará en el CDI. En este instrumento disponemos de dos agujas, una vertical para señalar la señal del LOC (desviada a la derecha en la figura) y otra horizontal, que nos servirá para leer la señal del GS (desviada hacia abajo). Además, la escala nos indica los grados de desviación, que pueden ser hasta 10° en la horizontal, y 2.5° en la vertical [6]. Por encima del CDI encontramos las letras OMI, las cuales nos marcan la distancia a pista utilizando las radiobalizas. En Figura 2.9, podemos observar que la luz azul está encendida, indicando que la aeronave está sobrevolando el punto. También podemos observar la desviación que se muestra en el CDI, con la barra desplazada hacia la derecha y hacia abajo, de lo cual interpretamos que la aeronave se encuentra a la izquierda de la trayectoria de vuelo prevista y por debajo de la senda correcta. Para alinearse con la pista, el piloto debe realizar una corrección a la derecha interceptando así el curso deseado y a su vez iniciar un suave descenso hasta recuperar el perfil vertical correcto.

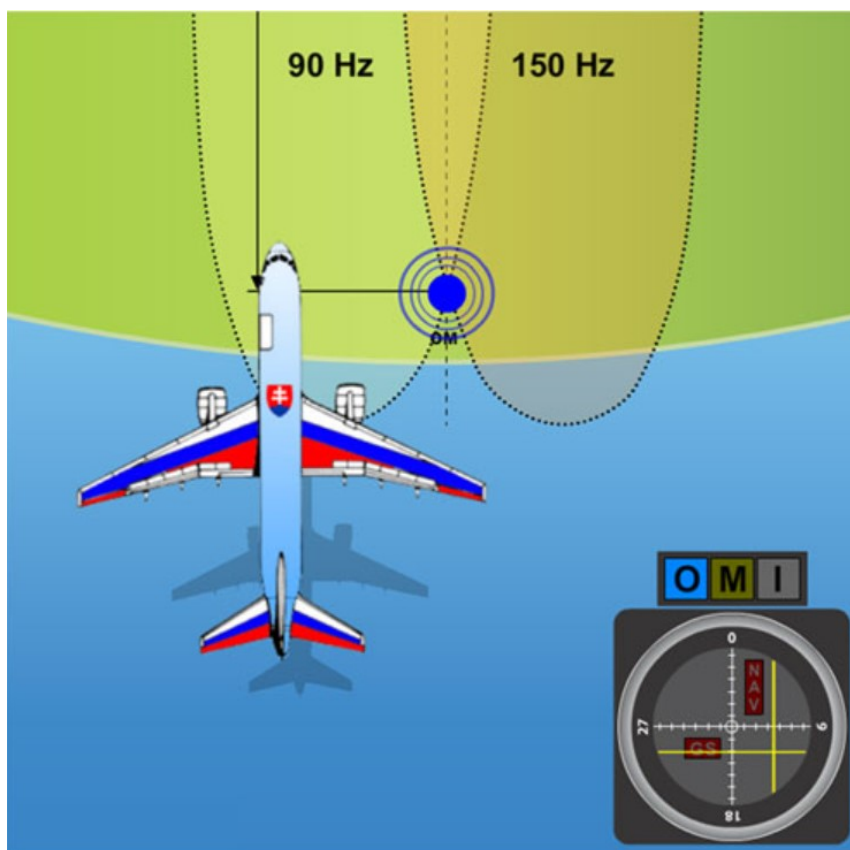


Figura 2.9: Ejemplo de una aeronave desviada hacia la izquierda en la aproximación ILS.

Además, tanto el receptor del LOC como el de GS cuentan con un indicador si la señal es demasiado débil, es decir, que el avión esté fuera de los haces [Figura 2.10]. Actualmente estos sistemas se presentan digitalmente (EFIS) en muchas ocasiones.

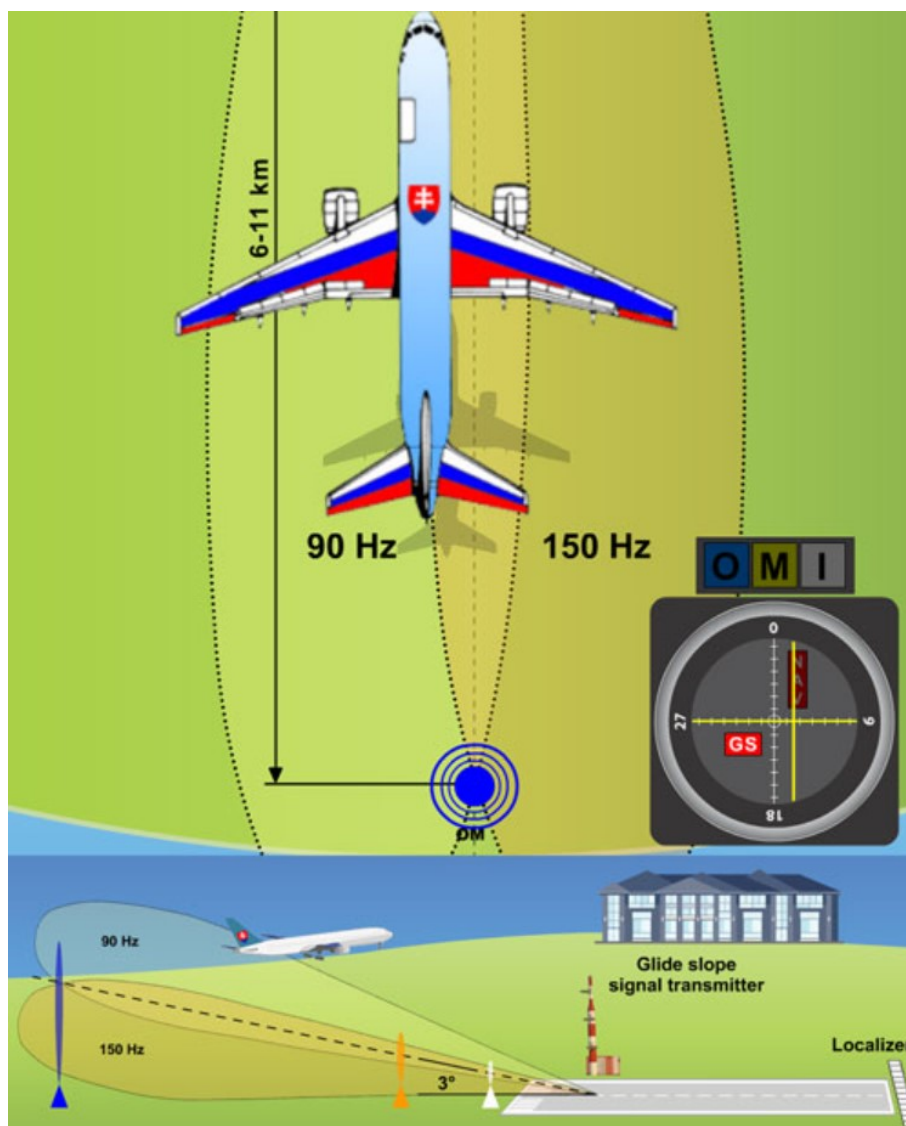


Figura 2.10: Ejemplo de la alerta GS (iluminado en rojo) porque la aeronave está fuera del haz.

Respecto a la cantidad de sistemas de a bordo necesario, cabe especificar que para aproximaciones ILS CAT III Subcategorías A y B, es necesario duplicar los sistemas, es decir, doble transmisor y receptor tanto para LOC como para GS, de forma que se provea la redundancia y la integridad necesarias para este tipo de aproximación. [7]

2.5 Instalación en LEZL

El aeropuerto de Sevilla (indicativo OACI LEZL) consta de una única pista operativa con dos sentidos de operación con denominación 09-27, teniendo la 09 una orientación magnética de 94°.

Desde ambas cabeceras se dispone de sistema ILS, aunque esto no siempre fue así. Si acudimos al Plan Director del aeropuerto de Sevilla, aprobado el 23/07/2001, vemos cómo originalmente sólo se



Figura 2.12: Antenas LOC en LEZL.

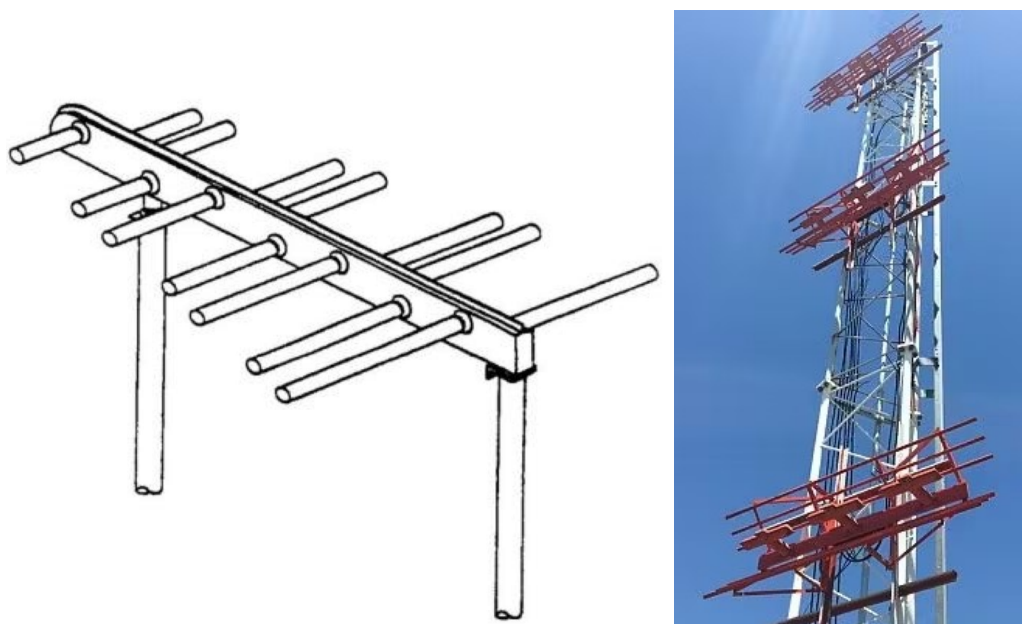


Figura 2.13: Antenas tipo LogDipolar (LOC) [izquierda] y reflectora (GS) [derecha].

Por otro lado, encontramos las antenas de la Senda de Planeo [Figura 2.13 derecha], organizadas como tres conjuntos de antenas con reflectores situados sobre un mástil. Tenemos de nuevo dos conjuntos, uno para cada aproximación, en este caso sí están situadas al lado de la cabecera para la que actúan [Figura 2.14]. En este caso, la antena para la RW09 se encuentra a 295m del umbral 09 y a 122m a la derecha del eje de la pista en el sentido de la aproximación. Por su parte, la antena para la Rw27 está a 409m del umbral 27 y a 119m a la izquierda del eje de la pista en el sentido de aproximación [4]



Figura 2.14: Antenas GS en LEZL.

Dada la naturaleza de las antenas de GS, la radiación emitida por estas se reflejará en superficies reflectivas que haya a su paso, creando una “imagen” de ella misma en su mismo plano, que para el suelo se situaría de forma vertical y bajo este. Así, las señales de la antena real y reflejada se combinan de forma vectorial en el espacio, siendo la información de la Senda de Planeo que recibe la aeronave la suma de las 3 señales emitidas por la antena real y las 3 de su imagen [Figura 2.15]

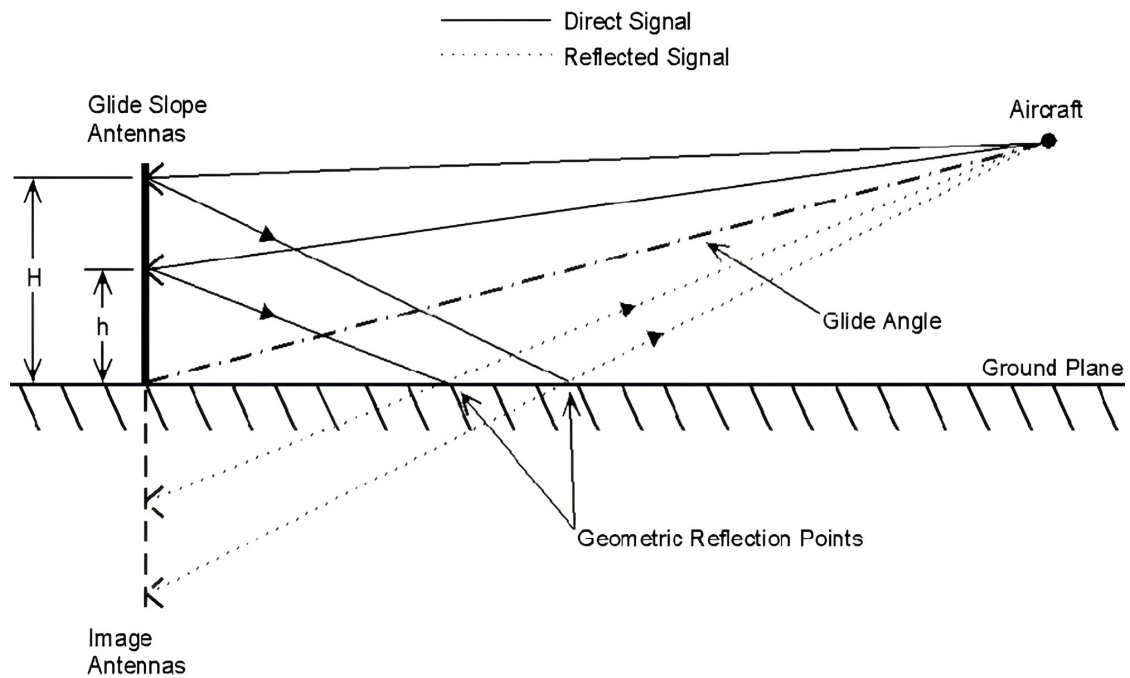


Figura 2.15: Antena Imagen de GS para un caso con 2 (+2) antenas.

A pesar de que en la Figura 2.15 aparezca un único punto de reflexión (uno por cada antena), la señal se refleja por toda el área del suelo, repartida en zonas concéntricas llamadas zonas de Fresnel [8]. Estas son un conjunto de elipsoides que definen la región entre antena y aeronave que debe estar libre de obstáculos. La presencia de un elemento reflectivo de la señal causa una diferencia de fase en la señal recibida entre la señal directa y la reflejada, que puede llegar a ser tal que la segunda anule a la primera, dando lugar a una pérdida de información por parte de la aeronave. Para ello se calcula la zona de Fresnel en función del ángulo de descenso y de la posición y distancia de la aeronave, optimizando los puntos clave de la aproximación para evitar en ellos cualquier error en la señal.

Con estos datos se posiciona en la ubicación ideal, que para el caso de LEZL, será en el lado de la pista opuesto a la terminal, evitando así cruces de otras aeronaves que puedan causar interferencias, y aprovechando que no hay mar ni ríos muy cercanos que pudiesen suponer superficies reflectivas adicionales al suelo.

Las tres antenas se colocan así tal que, en conjunto con el efecto del suelo, la trayectoria de la Senda de Planeo queda representada mediante una hipérbola, ya que la forma de la señal generada por las antenas describe un frente de ondas en el que la Diferencia de Profundidad de Modulación (DDM) es constante. Y dado que las señales superior y reflejada tienen diferente ángulo de radiación, la superficie donde ambas señales presentan igual intensidad genera esta forma hiperbólica. En esta situación, se establece su punto más bajo de 4.5 a 7 metros (15 a 23 pies) [Figura 2.16]. Esta hipérbola será el camino ideal (por conseguir $DDM=0$) y más suave que puede seguir la aeronave, terminando a la altitud más baja posible, para que el momento de contacto con la pista sea poco brusco.

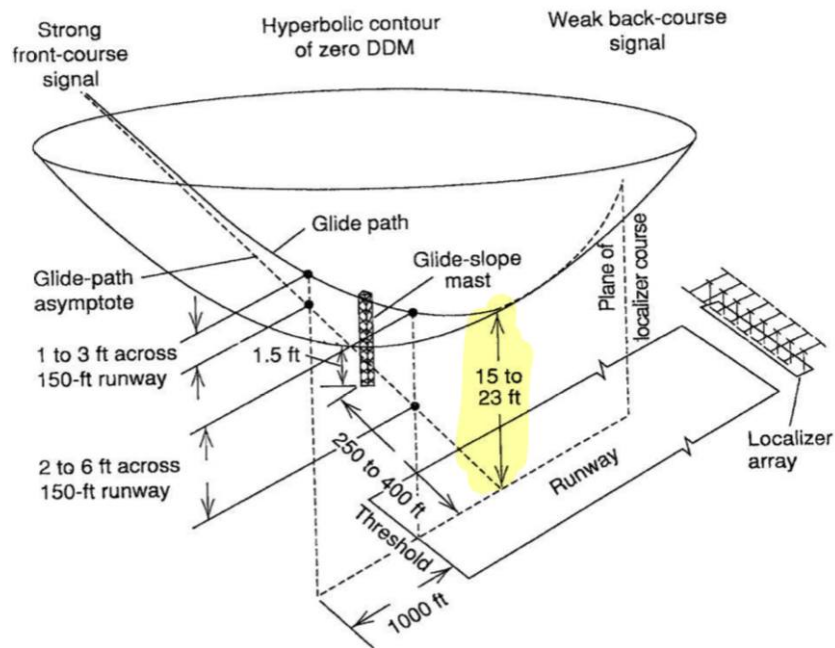


Figura 2.16: Esquema de la señal ILS para conseguir la menor distancia respecto al suelo de la Senda de Planeo. [9]

2.5.1 Segmentos de las aproximaciones ILS Z en LEZL

El tramo de aproximación inicial, que va como se ha indicado anteriormente desde el IAF hasta el IF, está en el caso de la RW27, definido por los puntos ROTEX y el IF a 9.5 NM del DME, lo que supone una distancia de 3.5NM. Por su parte, la aproximación a la RW09 sitúa el IAF en TENDU y tiene un segmento de aproximación inicial de 1.9NM. [Figura 2.17].

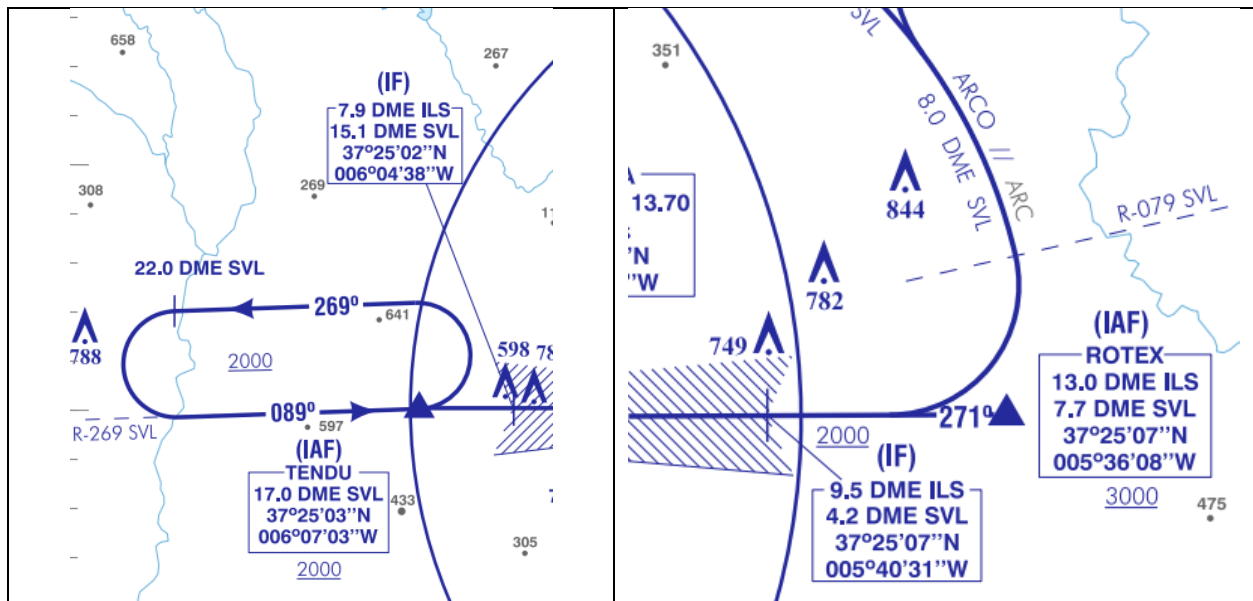


Figura 2.17: Segmento de aproximación Inicial en LEZL. RW 09 (izquierda) y RW 27(derecha).

Para el caso de la aproximación intermedia, del IF al FAP, contamos en LEZL con una distancia de 2.1 NM para la aproximación por la RW09 y 5.3 NM para la RW27. Estas distancias deben ser suficientes para que la aeronave se establezca en el curso del Localizador antes de interceptar la Senda de Planeo, y en la RW09 son menores porque el circuito de espera concluye en el punto TENDU [Figura 2.19], alineado con la pista, mientras que para la aproximación por la 27 el IAF tiene lugar tras realizar un arco de 13 NM. [Figura 2.18]

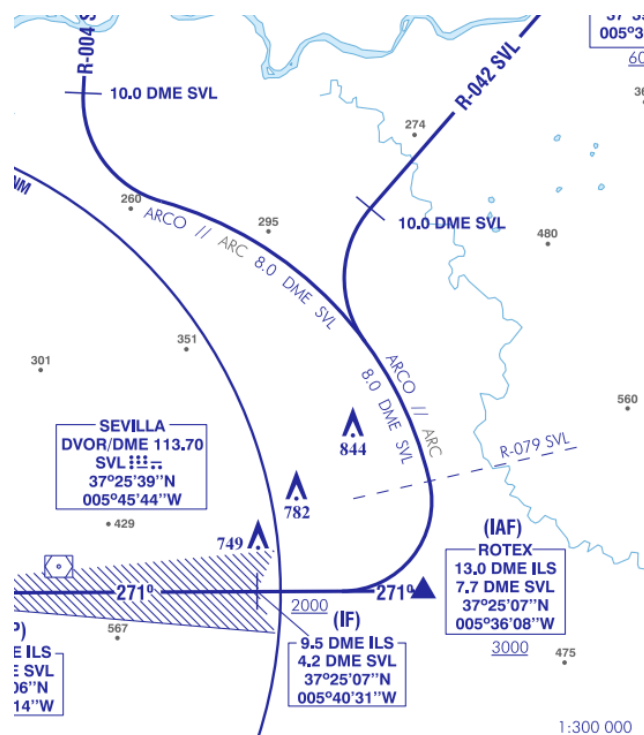


Figura 2.18: Arco descrito en la trayectoria antes de llegar al IAF.

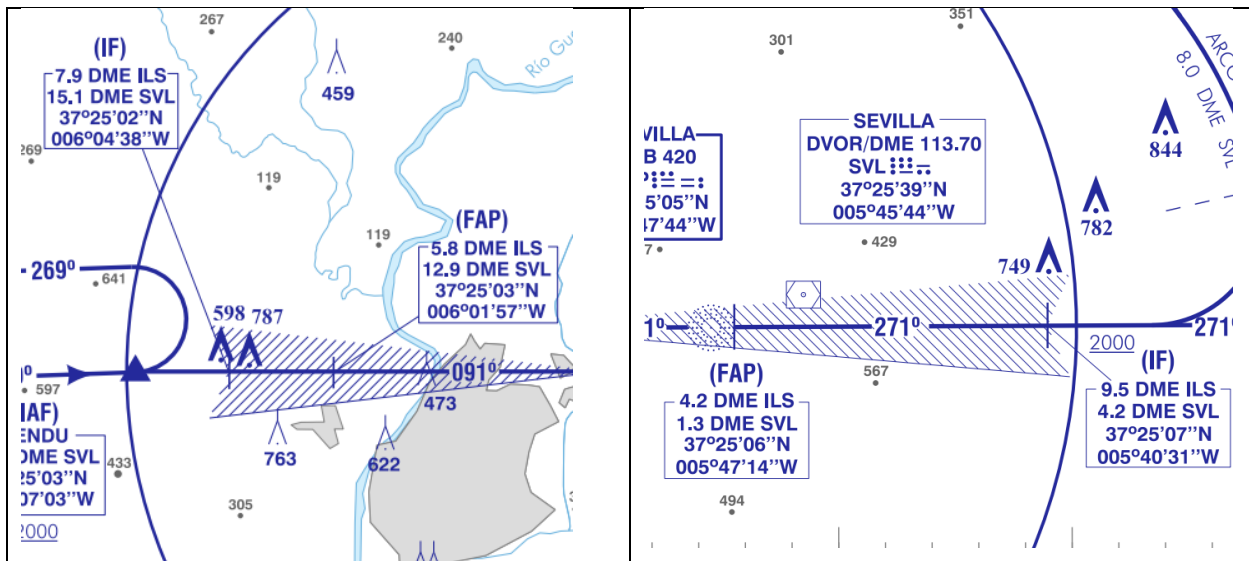


Figura 2.19: Segmento de aproximación Intermedia en LEZL. RW 09 (izquierda) y RW 27(derecha).

En el caso de la aproximación final, que comienza en el FAP y termina en la cabecera de pista, para la RW09 tiene una distancia de 5.8 NM, y en la RW27 será de 4.2 NM. [Figura 2.20]

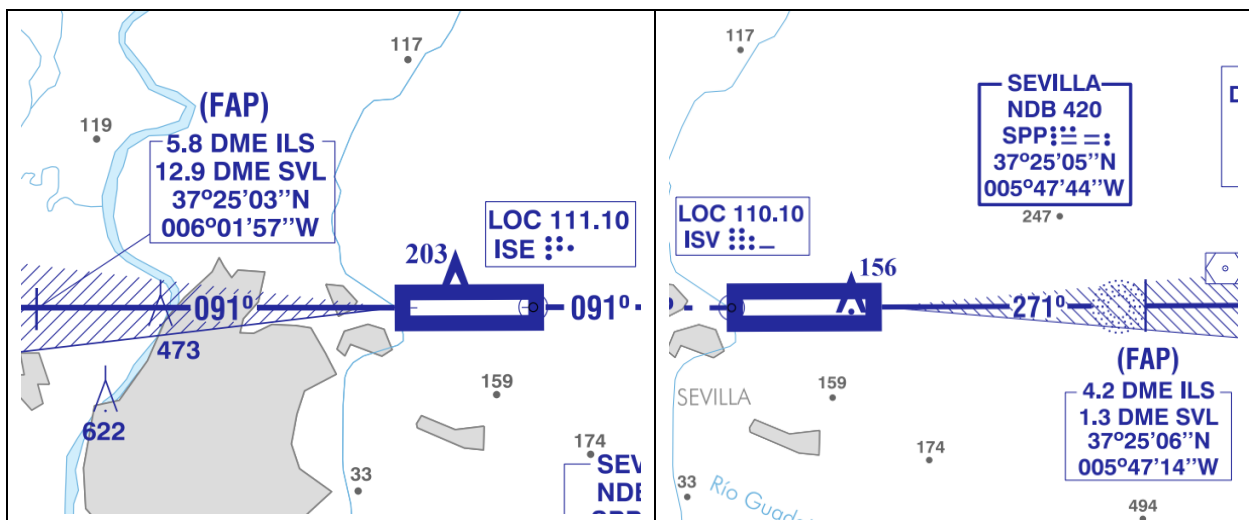


Figura 2.20: Segmento de aproximación Final en LEZL. RW 09 (izquierda) y RW 27 (derecha).

Además de estas dos aproximaciones, LEZL cuenta con otras 4 aproximaciones, diseñadas para poder adaptarse a diferentes condiciones operativas. Gracias a ellas, los operadores pueden elegir el procedimiento más adecuado en función de la aeronave, la meteorología o el equipamiento disponible, según las diferencias en el perfil de vuelo, en los mínimos meteorológicos, el trazado del procedimiento o los criterios de franqueamiento de obstáculos. Para todas ellas, las distancias se pueden encontrar en Tabla 1.

APROXIMACIÓN ILS	SEGMENTO	SEGMENTO	SEGMENTO FINAL
------------------	----------	----------	----------------

	INICIAL	INTERMEDIO	
ILS Y RWY 09	1.9NM	1.3NM	5.8NM
ILS Y RWY 27	N/A	N/A	4.2NM
ILS X RWY 27	N/A	N/A	4.2NM
ILS W RWY 27	3.5NM	5.3NM	4.2NM

Tabla 1: Distancias para las aproximaciones ILS en LEZL.

Es conveniente mencionar que encontramos en todas estas aproximaciones una Senda de Planeo de 3° [Figura 2.21]. Esta permite, habiendo definido previamente las Áreas de Franqueamiento de Obstáculos (OAS) del entorno del aeropuerto, evitar todos los obstáculos existentes sin llegar a ser una pendiente demasiado agresiva.

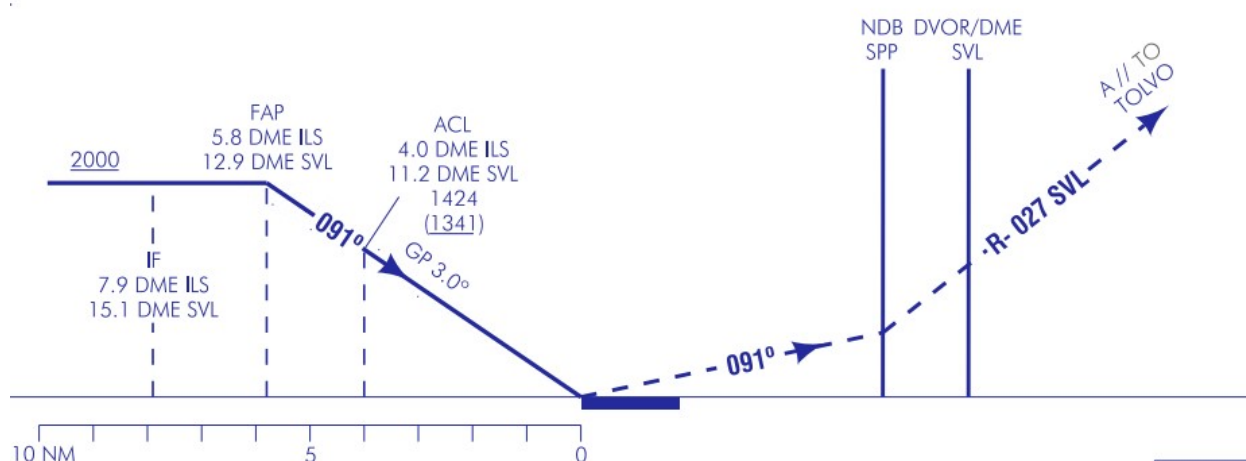


Figura 2.21: Plano vertical en ambas aproximaciones a RW09.

Respecto a la categoría de las aproximaciones ILS en el aeropuerto de Sevilla, estas están limitadas a CAT I en todas las situaciones y cabeceras. Esto implica, según la OACI, una altitud de decisión no inferior a 60m(200ft) y cumplir una mínima de RVR mínima de 550m (o en su defecto, visibilidad no inferior a 800m). [10]

3 CONCEPTO LPV: PBN

“Aviation is proof that given the will, we have the capacity to achieve the impossible”.

-Eddie Rickenbacker-

Para desarrollar un método de aproximación que emplea LPV, es conveniente primero situar esta tecnología dentro del marco que la contiene. Así, tal y como vemos en Figura 3.1, las aproximaciones LPV quedan dentro de lo que denominamos Advanced RNP, formando parte de la PBN, mientras que el sistema ILS es una forma de navegar que no se basa en las prestaciones.

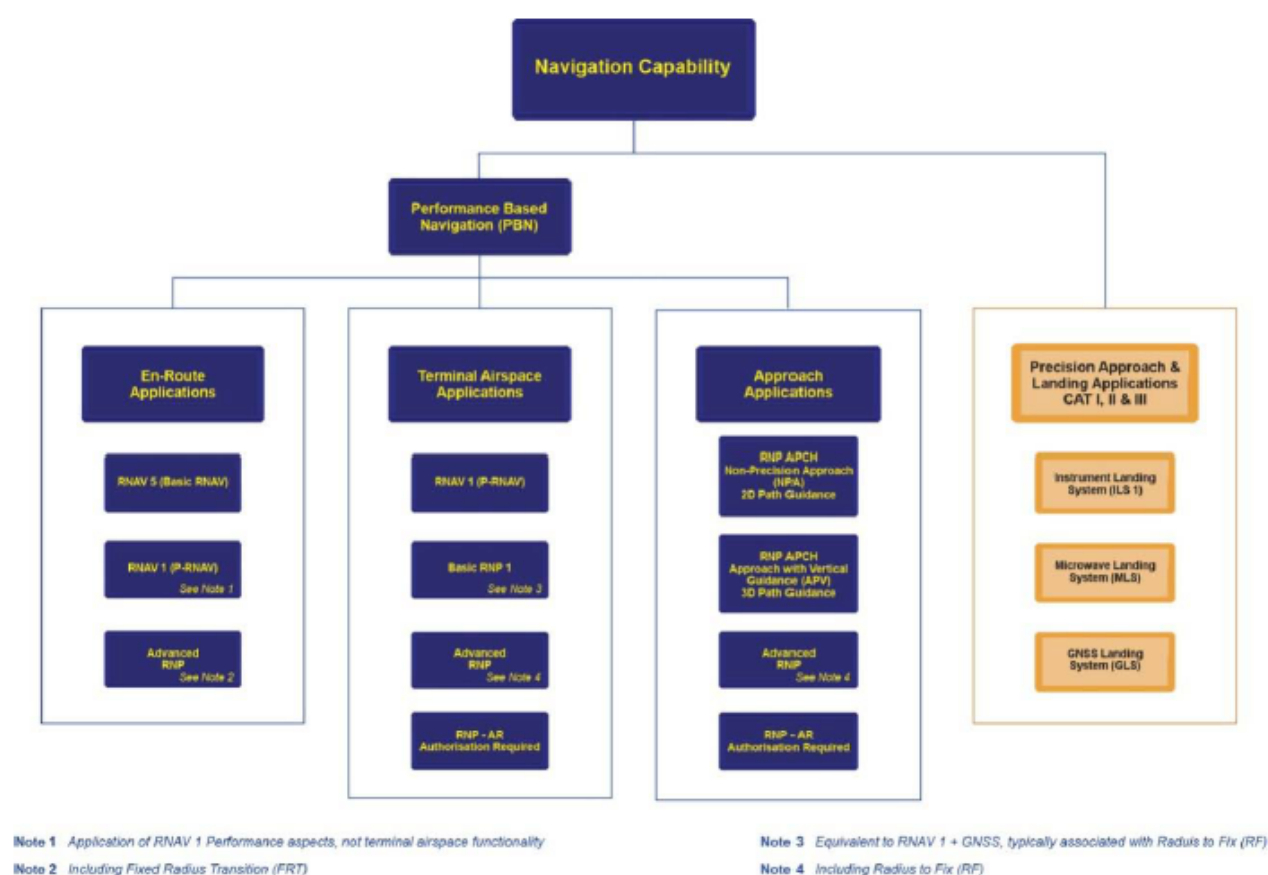


Figura 3.1: Esquema de los sistemas de navegación según sus capacidades.

El aumento en la cantidad de vuelos, especialmente en los últimos años, ha hecho necesarias

nuevas formas de navegación para que permitan mejorar la eficiencia y capacidad del espacio aéreo, mediante la reducción de las separaciones mínimas entre aeronaves. A su vez, el uso de rutas más directas y la optimización de trayectorias permiten reducir el consumo de combustible, lo que a su vez repercute en una disminución de las emisiones contaminantes y el ruido.

El primer avance desde la navegación IFR convencional fue la implementación de Sistemas de Navegación por Área (RNAV), que permitieron navegar con precisión por rutas con mayor complejidad sin tener que sobrevolar cada ayuda terrestre [Figura 3.2]

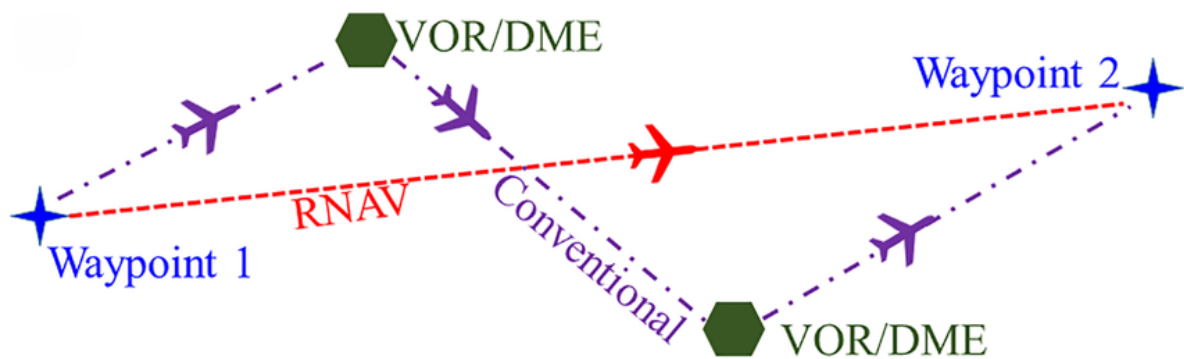


Figura 3.2: Navegación por Área RNAV.

A medida que estos sistemas fueron desarrollándose, se introdujeron a bordo para lograr cierta supervisión del rendimiento del sistema, medido este según las especificaciones de navegación definidas en el apartado 3.1 de este TFG, junto con la emisión de alertas en caso de que su funcionamiento no sea el esperado. Esto lo proporcionan los sistemas de Rendimiento de Navegación Requerido (RNP) [Figura 3.3].

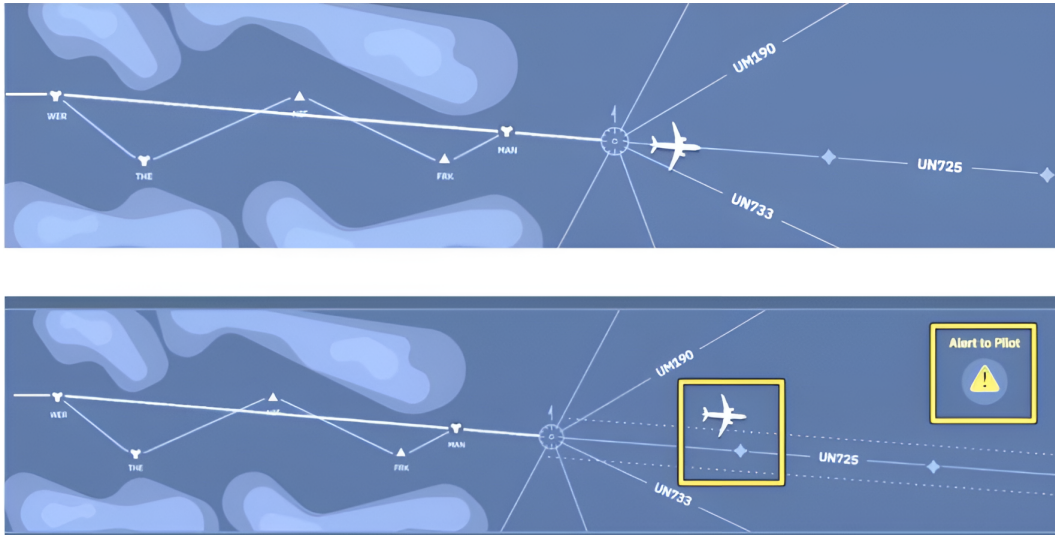


Figura 3.3: RNP.

Con el auge de estos sistemas, cada país mejoró estas tecnologías de navegación por área en una dirección y con unos criterios específicos, por lo que surgieron problemas de compatibilidad en las rutas internacionales. Para solucionarlo, la OACI unificó estas medidas dentro del concepto PBN. [11]

3.1 PBN: Definición

La Navegación Basada en Prestaciones (PBN) es un concepto introducido por la OACI, definido como la navegación de área basada en unos requisitos de rendimiento para las aeronaves que operan en rutas ATS, procedimientos de aproximación instrumentales o en espacios aéreos designados. [11]

Estos requisitos se enumeran en las especificaciones de navegación como precisión, integridad, continuidad y funcionalidad, fundamentales para operar en el espacio aéreo y que deben tenerse en cuenta en la planificación de este [11]:

- **Precisión.** Se refiere al error en la posición de la aeronave respecto a la real, determinado por la falta de exactitud del sistema. En este error influyen en gran medida la precisión de los cálculos empleados para calcular la posición. Se expresa como percentil en la distribución de errores, y suele ser del 95%. Los requisitos necesarios según la fase de vuelo en la que se encuentre los especifica la OACI en el capítulo III-1-1 del Doc 8168 [2]
- **Integridad.** Es el grado de confianza que se puede dar al sistema, es decir, la capacidad de este para proporcionar al piloto de alertas válidas y oportunas cuando existe un error. Representa por tanto el grado de fiabilidad que ofrece el sistema, describiendo la probabilidad de que se produzca un fallo importante en los datos o funcionamiento del sistema de navegación de la aeronave. Por tanto, una alta integridad es sinónimo de baja probabilidad de fallo en el sistema. Como todo sistema siempre tendrá cierto error, por pequeño que este sea, se permite una tolerancia al error para cada especificación de PBN (ya sea RNAV o RNP) que delimita el alcance máximo de este error, el Límite de Alerta (AL). Este se define tanto para el plano vertical como para el horizontal [Figura 3.4]. En las especificaciones RNAV, aunque no se

exige monitorización continua, la navegación debe mantenerse dentro de los márgenes de precisión establecidos según la fase de vuelo [3.2.1]. En cambio, en las especificaciones RNP se requiere, además, que la aeronave supervise activamente su rendimiento y genere una alerta si se supera el AL [3.2.2]. Esta supervisión no solo depende de la distancia al AL, sino también del Tiempo en Alertar (TTA), que es el tiempo máximo permitido entre que se viola el AL y se notifica al piloto mediante una alerta de pérdida de rendimiento.

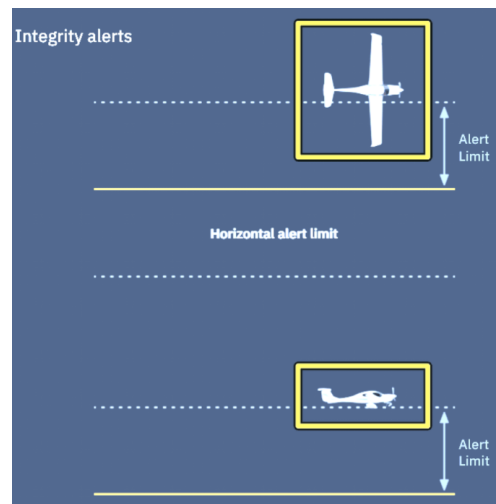


Figura 3.4: Límite de Alerta (AL).

Para estimar la probabilidad de que el error de posición supere el Límite de Alerta, se define un factor llamado Nivel de Protección (PL), calculado en tiempo real por el receptor de a bordo. Su valor es variable, dependiendo de la geometría del avión, del posicionamiento del satélite y de las correcciones de SBAS, y siempre que exceda el AL requerido sin tener margen para realizar acciones correctivas, la tripulación debe interrumpir la operación que tenga en curso. [Figura 3.5].

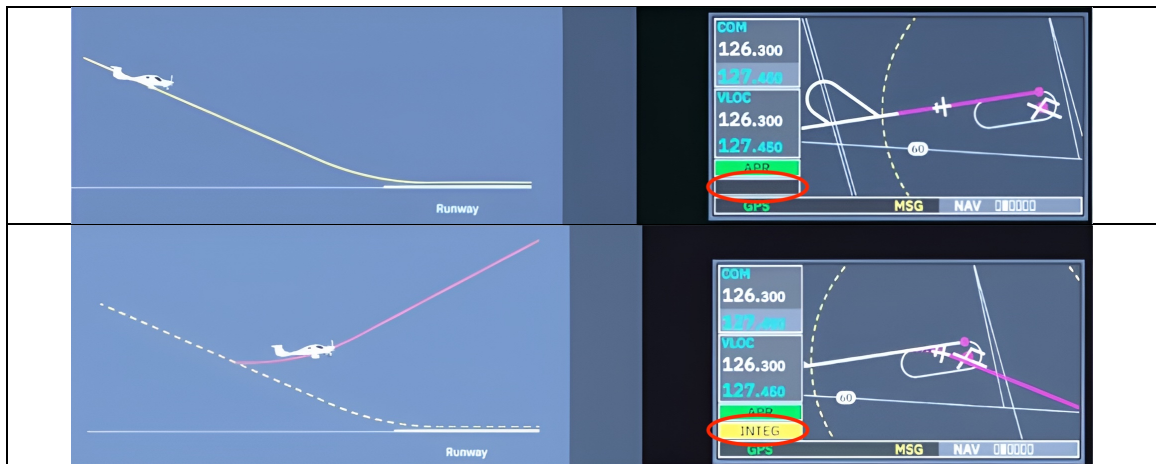


Figura 3.5: Alerta de integridad por $PL > AL$ (derecha) y diagrama del abandono de la trayectoria (izquierda).

- Continuidad.** Capacidad del sistema para proveer un servicio ininterrumpido durante toda la operación. Por lo tanto, en caso de no poder dar servicio continuo o de sufrir una interrupción, es necesario un medio alternativo. Son las propias especificaciones de navegación las que determinan los niveles mínimos de disponibilidad y las alternativas en caso de interrupción del servicio. Así, gracias a la continuidad, se puede garantizar que una vez comience una operación, la precisión del sistema no se degradará hasta el punto en que esta tenga que suspenderse.
- Funcionalidad.** Se refiere a aquellas capacidades avanzadas que debe cumplir el sistema de navegación que facilitan o automatizan diversas operaciones de navegación, como por ejemplo poder seguir rutas de radio de giro fijo o ejecutar circuitos de espera [Figura 3.6].

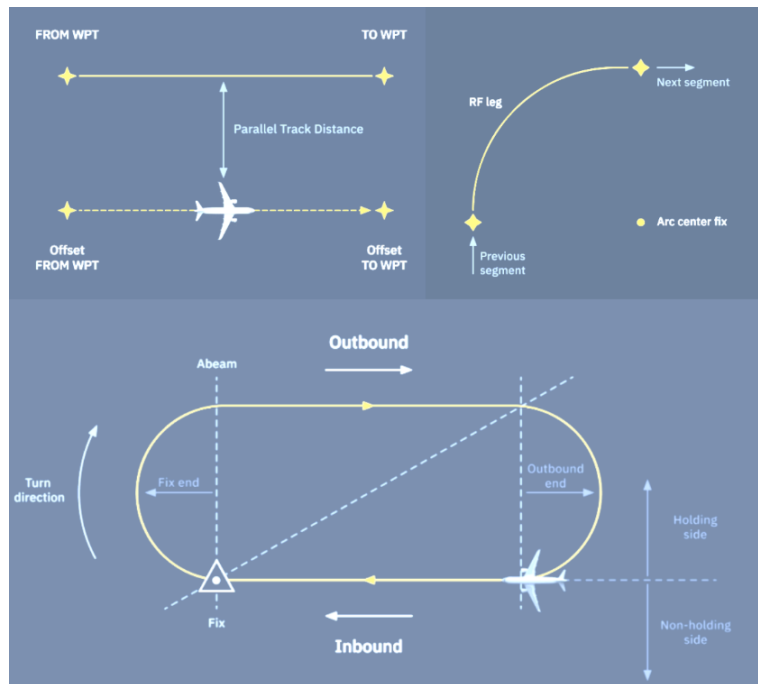


Figura 3.6: Requisito de funcionalidad PBN.

Al aplicar estos requisitos de rendimiento a los sistemas RNAV y RNP, debemos considerar que estos emplean datos de infraestructura externa (GNSS, DME, VOR...) en los cálculos de navegación, que afectarán a los requisitos enumerados antes según un factor de disponibilidad.

La **disponibilidad** comprende la habilidad del sistema para ser totalmente funcional cuando se requiere para una operación, así como durante su ejecución. Esto es, el porcentaje de tiempo anual en que todos los sistemas se encuentran accesibles para su uso. Así, cuando no haya disponibilidad de uno o varios servicios, se limita a la capacidad de poder usar las señales de esos sistemas concretos. Para asegurarse de tener suficiente disponibilidad en las fases críticas, los pilotos emplean los equipos Sistema de Gestión de Vuelo (FMS). Estos interrogan a sus receptores GNSS/SBAS, que proporcionan en tiempo real la información sobre la integridad, el número de satélites disponibles, el Nivel de Protección (PL) y las correcciones aplicadas. A partir de estos datos, el FMS evalúa si se cumplen los requisitos de precisión e integridad necesarios para la operación prevista, y en caso contrario indica la imposibilidad de continuar la operación.

Disponer de un número limitado de especificaciones de navegación por parte de la OACI simplifica las certificaciones y los costes para los operadores aéreos, a la vez que facilita la adopción global de estas normas. El conjunto de todas las especificaciones de navegación internacional, junto a los designadores, equipos requeridos y aplicabilidad se encuentra en las partes B y C del manual PBN de la OACI [11].

Como última parte del concepto de PBN, cabe destacar que el alcance que busca cubrir se debe considerar en términos de rendimiento entendido como la combinación de precisión, integridad, continuidad y funcionalidad, tal como se ha detallado anteriormente. Este rendimiento debe

considerarse en las tres dimensiones espaciales: lateral, longitudinal y vertical. En fases de crucero, el área de interés de PBN se centra en requisitos de navegación lateral lineal, junto con las restricciones de tiempo que lo acompañan. Por su parte, el guiado angular se introduce para las fases de aproximación. [11]

La diferencia entre ambas reside en que la primera de ellas, el rendimiento lineal, contempla un área autorizada del espacio aéreo entre dos líneas paralelas equidistantes de la trayectoria de vuelo deseada. Sin embargo, con los requisitos angulares, el ancho del área autorizada se reduce proporcionalmente a la distancia restante hasta el objetivo [Figura 3.7]

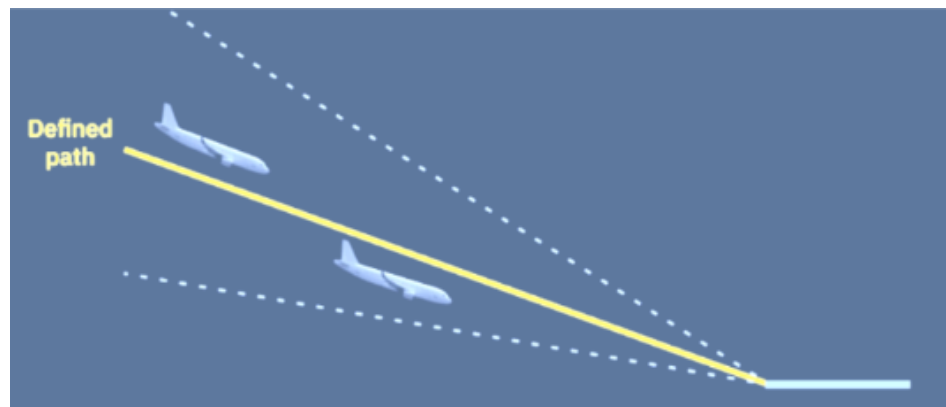


Figura 3.7: Requisito angular de PBN.

3.2 RNAV Y RNP

Las dos categorías en que se divide el PBN se clasifican según los métodos de navegación empleados y sus especificaciones: Navegación de Área (RNAV) y Requisitos de Rendimiento de Navegación (RNP).

Tanto RNAV como RNP requieren cumplir los requisitos de precisión, continuidad y disponibilidad, pero a diferencia del RNAV, el RNP añade la exigencia de integridad mediante monitorización a bordo y capacidad de alerta, que podría conseguirse mediante el uso del sistema RAIM (Receptor Autónomo de Monitoreo de Integridad). En ambos casos, la designación numérica que acompaña la categoría se refiere a la precisión de navegación lateral en NM que se debe alcanzar al menos el 95% del tiempo de vuelo por parte de las aeronaves en ese espacio aéreo. [Figura 3.8Figura 3.8] [11]

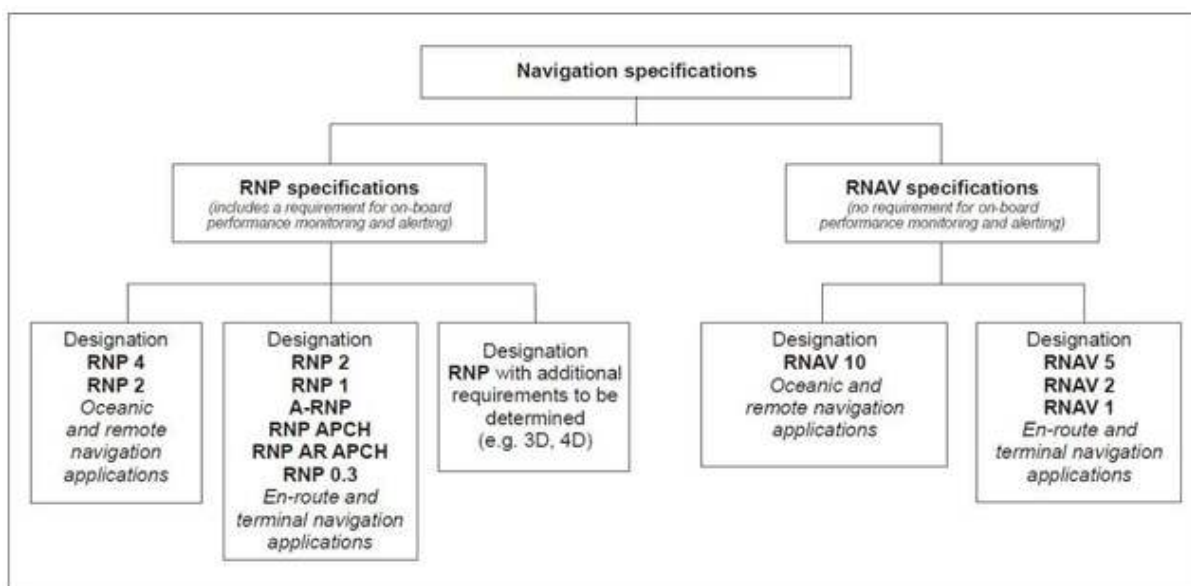


Figura 3.8: Especificaciones de RNP y RNAV.

3.2.1 RNAV

Con el método RNAV, las operaciones pueden seguir cualquier ruta dentro del área de cobertura de las ayudas de navegación tierra-aire o aire-aire, o dentro de los límites de los sistemas de ayuda integrados en la aeronave. En el futuro, el diseño del espacio aéreo y la estructura de navegación dependerán cada vez más del uso de procedimientos basados en RNAV, reduciendo progresivamente la necesidad de infraestructuras tradicionales en tierra, como VOR y NDB, en favor de sistemas GNSS y navegación autónoma a bordo.

Hoy en día, las rutas y procedimientos finales, incluyendo los Procedimientos de Despegue (DPs) y las llegadas estándar (STARs), ya están diseñados con los sistemas RNAV en mente por tener numerosas ventajas.

Principalmente, estas ventajas son los ahorros de tiempo y combustible, la mayor libertad en las rutas, no necesitando seguir direcciones fijas, o altitudes tan marcadas por radioayudas, que dan mucha más libertad al Control de Tráfico Aéreo (ATC), y en general la mayor eficiencia del uso del espacio aéreo, algo crucial con el creciente uso de este. [12]

3.2.1.1 Procedimientos RNAV

Las operaciones RNAV requieren una alta concentración y capacidad de reconocer el entorno por parte del piloto para mantener el procedimiento. Hace que estos deban tener altos conocimientos del sistema de navegación de la aeronave para asegurarse de que el procedimiento RNAV se ejecute de forma correcta, además de conocer los distintos Puntos de Recorrido (WP) y tipos de “Leg Types”

empleados.

Por un lado, tenemos los dos tipos de WP usados, los “fly-by”, donde la aeronave se acerca a ellos, pero no tiene obligación de volar justo por encima de ellos, y los “fly-over”, que sí obligan a pasar por encima [Figura 3.9].

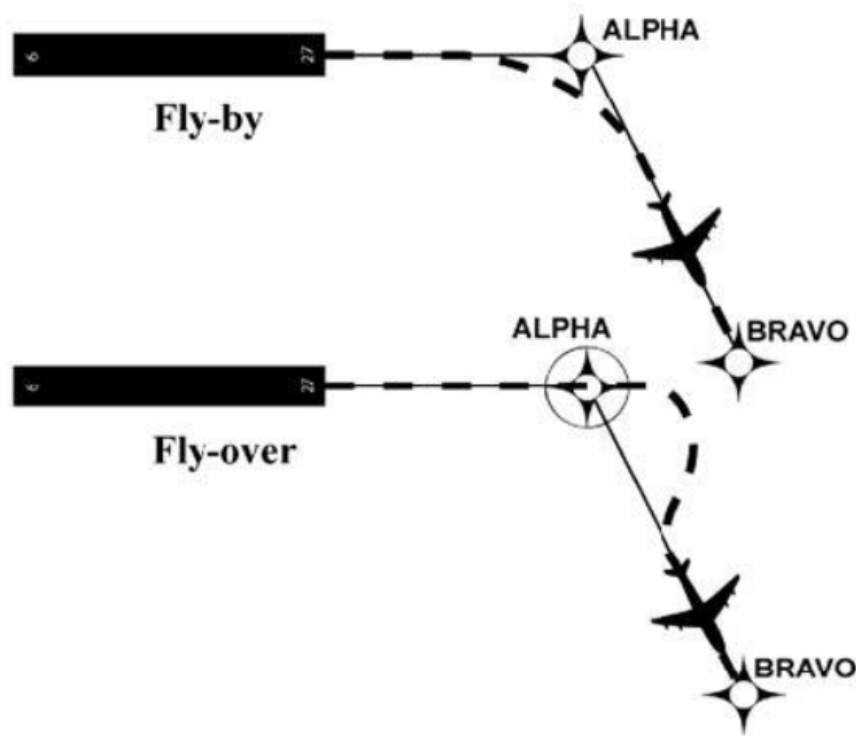


Figura 3.9: Conceptos Fly-by y Fly-over.

En RNAV, los “Leg Types” describen el tipo de camino seguido entre WP. Se identifican por un código de dos letras que describen tanto el camino, como el punto donde terminan. Estos no se suelen incluir en las cartas de procedimientos, pero sí los podemos encontrar en las bases de datos de navegación, y son:

- Track to Fix (TF). Se utiliza cuando se dirige una aeronave hacia un WP pero se le pone de objetivo alcanzar un WP distinto. EJ: “Dirección Alpha y seguidamente derrota Bravo”. [Figura 3.10]
- Direct to Fix (DF). Es el camino descrito cuando se dirige a la aeronave directamente desde el área donde se encuentre hasta el WP buscado. EJ: “Virar a derecha directamente hacia Bravo”. [Figura 3.10]
- Course to Fix (CF). Se emplea al dirigir la aeronave hacia un WP con un rumbo determinado. EJ: “Derrota 150 hacia Alpha”. [Figura 3.10]

- Radius to Fix (RF). Implica definir un curso circular entre dos WP alrededor de un punto central definido. [Figura 3.10]

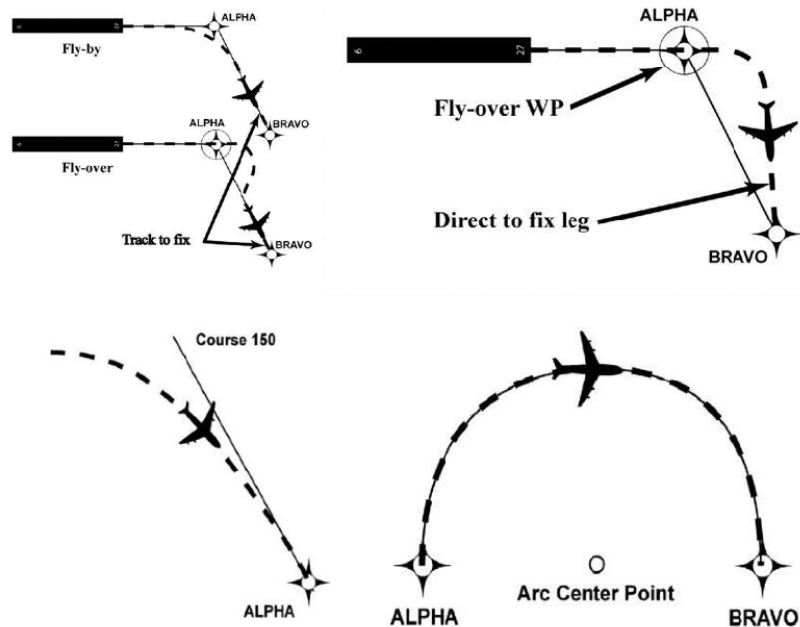


Figura 3.10: Leg Types en procedimientos RNAV. TF (arriba izquierda), DF (arriba derecha), Course to Fix (abajo izquierda) y RF (abajo derecha).

- Si hablamos del rumbo, podemos encontrar Heading to Altitude (VA), que sería dar una indicación de rumbo con la que seguir un ascenso/descenso (por ejemplo, “subir rumbo 350 hacia 1500), Heading to DME range (VD), que consiste en marcar un rumbo a seguir hasta alcanzar una distancia respecto a un DME (por ejemplo, “rumbo 265 hasta 9 DME”) o Heading to Manual Termination (por ejemplo, vectorial, VM), que sería simplemente volar con cierto rumbo hasta que manualmente el piloto decida o tenga que cambiarlo o “volar con rumbo 090”.

Para emplear los métodos RNAV, las aeronaves integran el FMS (Flight Management System), que integra numerosos sensores, receptores y ordenadores, junto a la base de datos de navegación, recibiendo entradas de múltiples fuentes, como pueden ser GPS, DME, VOR, LOC y la IRU, pudiendo el sistema identificar fuentes defectuosas para aislarlas y separarlas de los cálculos.

Por defecto, si hay disponibilidad de todas las fuentes, el FMS se apoyará principalmente en la fuente GNSS y en un doble sistema de DME (es decir, combinar la información de dos estaciones DME a la vez) para actualizaciones de posición.

Dentro de las especificaciones propias de navegación RNAV (Nav Specs), encontramos 3 tipos

distintos según la precisión lateral en NM:

- RNAV 1. Se emplea para DPs y STARs y suele mostrarse en las cartas. Las aeronaves que vuelan dentro de esta categoría deben mantener el error total del sistema inferior a 1NM durante al menos el 95% del tiempo de vuelo.
- RNAV 2. Se suele emplear para operaciones en ruta, e implica un error inferior a 2NM.
- RNAV 10. Es la utilizada en operaciones transoceánicas. El error lateral debe ser inferior a 10NM.

3.2.2 RNP

La especificación RNP es una ampliación de lo que se ofrece con RNAV, incluyendo requerimientos adicionales de rendimiento a bordo tanto en monitorización como en alerta, además de servir como un nivel de rendimiento que se exige alcanzar en ciertos espacios aéreos.

Un componente crítico del RNP es la habilidad del sistema de navegación de la aeronave para monitorizar el rendimiento que logra, y poder identificar y mostrar al piloto si el requisito operacional del espacio aéreo en que se encuentra se está cumpliendo durante todo el tiempo de operación. Con todo esto se consigue una menor dependencia en la intervención de los servicios de control de tráfico aéreo manteniendo la seguridad general de la operación.

La capacidad RNP de una aeronave variará en función del equipamiento y de la infraestructura de navegación presente en el área, por ejemplo, una aeronave puede ser elegible para RNP 1, pero no poder volar en este nivel por la falta de cobertura de NAVAID, o por un fallo en la aviónica.

Cabe destacar que las categorías de ambas especificaciones (RNAV y RNP) son independientes, es decir, tener elegibilidad para volar en RNP 1 no conlleva poder hacerlo en RNAV 1 o RNP 2 por defecto, y debe ser el Manual de Vuelo del Avión (AFM) el que incluya la especificación concreta de las capacidades de navegación habilitadas para la aeronave, en función del equipamiento instalado y certificado. [12]

3.2.2.1 RNP NavSpecs

Existen dentro de la especificación RNP diferentes categorías con distintos valores de precisión lateral, entre las que encontramos [Figura 3.11]:

- RNP Approach (RNP APCH): Dentro de esta se diferencian varios niveles de criterios mínimos según el equipamiento de a bordo de la aeronave, como pueden ser navegación lateral (LNAV), navegación lateral con guiado vertical (LNAV/VNAV), LPV (Localizer Performance with Vertical Guidance) y LP (Localizer Performance). Los requisitos de cada nivel se analizarán junto a las ayudas basadas en satélites.
- RNP Authorization Required Approach (RNP AR APCH): Este tipo de aproximaciones incorporan requisitos de navegación más exigentes que las aproximaciones RNP APCH estándar. Están diseñadas para entornos complejos, como áreas montañosas, espacios aéreos congestionados o accesos restringidos, donde se requiere mayor precisión y

flexibilidad. A diferencia de las aproximaciones RNP normales, las RNP AR APCH exigen mayor control de monitorización y alerta del rendimiento (OBPMA) y el uso obligatorio de virajes RF (Radius to Fix), consiguiendo transiciones precisas en trayectorias curvas, en lugar de emplear los segmentos rectos habituales (TF, DF o CF). La autorización para operar este tipo de procedimientos debe ser concedida por la autoridad aeronáutica competente de cada Estado, que en España corresponde a la AESA, de acuerdo con el Reglamento (UE) 965/2012 y los requisitos adicionales especificados en el AMC1 SPA.RNP.AR.100. Para obtener esta autorización, los operadores deben demostrar la capacitación específica de sus tripulaciones, la adecuación de sus aeronaves y el cumplimiento de procedimientos operacionales exigentes. Las precisiones laterales exigidas consiguen niveles de precisión que varían de 1 NM en las fases terminal y de aproximación frustrada hasta 0.3 NM, aunque en aproximaciones más críticas puede reducirse a 0.15 NM o incluso 0.1 NM en el segmento.

Asimismo, basados en los mismos principios de exigencia, existen procedimientos de salida específicos denominados “RNP Authorization Required Departure Procedures” (RNP AR DP). Estos procedimientos trasladan los requisitos operativos de las aproximaciones RNP AR APCH a las fases de salida, aplicándose en entornos donde la navegación precisa desde el despegue resulta crítica. Las RNP AR DP utilizan los mismos criterios de rendimiento, incluyendo la necesidad de monitorización continua y trayectorias curvas controladas mediante virajes RF, adaptados a la fase de ascenso inicial. Se emplean principalmente en aeropuertos rodeados de obstáculos, áreas de alta densidad de tráfico o en casos de limitaciones ambientales severas, donde las salidas convencionales no ofrecen suficiente seguridad operacional. [13]

- RNP Avanzado (A-RNP). En este nivel se incluyen varias funciones de obligado cumplimiento por parte de la aviónica de a bordo, que permitirán calcular y realizar giros RF de forma autónoma y mantener trayectorias paralelas predefinidas respecto a rutas cercanas, lo cual puede facilitar las operaciones en espacios aéreos con alta densidad de tráfico. Además, se exige un mayor nivel de continuidad operativa, como el uso de sistemas de navegación redundantes para ciertas operaciones oceánicas y en zonas remotas de espacio aéreo continental. En esta categoría se permiten valores de navegación variables de 1.0 a 0.3 NM, lo que implica que la anchura del corredor de protección alrededor de la trayectoria se ajusta dinámicamente en función de la fase de vuelo o de la cercanía a obstáculos. Operativamente, esto se traduce en que, cuanto más baja es la precisión requerida (por ejemplo, 0.3 NM), más estricta debe ser la supervisión de la trayectoria por parte de la aeronave y mayor debe ser la precisión en el guiado, requiriendo en muchos casos el uso obligatorio de sistemas automáticos como el autopilot o el flight director para mantener el margen de tolerancia. Esto permite optimizar el uso del espacio aéreo, permitiendo rutas más ajustadas, y mejorar la capacidad de separación entre aeronaves en entornos congestionados o críticos.

- RNP 1. Requiere un valor de precisión lateral de 1NM en las fases de llegada y despegue en el entorno del aeropuerto, y en la fase de aproximación inicial e intermedia cuando se usa junto a procedimientos tradicionales (por ejemplo, combinando ILS con PBN). La capacidad de giros RF es opcional, así que puede ser que la aeronave esté certificada para operaciones RNP 1 pero que no aparezcan en la lista de características de la aviónica de a bordo. [14]
- RNP 2, 4, 10. Estas aplican, respectivamente, a operaciones domésticas y oceánicas elegibles (RNP 2) y a ciertas operaciones oceánicas y remotas (RNP 4 y RNP 10), teniendo cada una el valor de precisión que marca su nombre, en NM. En el caso de RNP 10, tener la aprobación para volar en este nivel también permite volar con RNAV 10, además de que cualquier aeronave certificada para RNP 2 (o RNP 4), podrá volar en RNP/RNAV 10.
- RNP 0.3. Esta categoría, en la que se vuela con valores de precisión mayores a 0.3NM, es válida únicamente en operaciones autorizadas, que nunca incluyen las fases oceánicas, remota o de aproximación final. Actualmente, este nivel pertenece únicamente a helicópteros y similares aeronaves de ala rotatoria. Es importante remarcar que este valor de RNP 0.3 no se debe confundir con el que se puede encontrar en las cartas de aproximación de RNP 0.30, 0.15 o inferiores, que siempre se escribirán con dos valores decimales. Mientras que RNP 0.3 define un requisito de mantener un error máximo de 0.3 NM lateral el 95% del tiempo en cualquier fase de vuelo donde se exija, el valor 0.30, 0.15 y similares en una carta instrumental implica una exigencia específica para ese procedimiento concreto y en esa fase (por ejemplo, en la aproximación final). [14]

Use and Scope of Navigation Specification by Flight Phase

PBN Manual includes airworthiness, operational and training guidance



NAVIGATION SPECIFICATION	FLIGHT PHASE							
	En Route Oceanic / Remote	En Route Continental	ARR	APPROACH				DEP
				Initial	Intermed	Final	Missed*	
RNAV 10 (RNP 10)	10							
RNAV 5		5	5*					
RNAV 2		2	2					2
RNAV 1		1	1	1	1		1	1
RNP 4	4							
RNP 2	2	2						
RNP 1*			1	1	1		1	1
A-RNP	2*	2 or 1	1	1	1	0.3	1	1
RNP APCH				1	1	0.3	1	
RNP AR APCH				1 - 0.1	1 - 0.1	0.3 - 0.1	1 - 0.1	
RNP 0.3		0.3	0.3	0.3	0.3		0.3	0.3

Figura 3.11: Distancias (NM) de separación de las distintas categorías RNAV y RNP.

3.3 INFRAESTRUCTURA PBN

Uno de los componentes de la parte física que hace posible el uso de PBN es la Infraestructura de Ayuda a la Navegación (NAVAID). Esta se refiere tanto a las ayudas que existen en tierra (VOR, DME) como a las ayudas basadas en satélites (GNSS), que pueden ser tanto NAVSTAR GPS, GLONASS o Galileo, según la región en la que nos encontremos, y todos ellos se emplean para los cálculos de navegación. Nótese que los Radiofaros No Direccionales (NDB) no se incluye en la navegación basada en rendimiento.

3.3.1 GNSS

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es una constelación de satélites que proporcionan señales desde el espacio, transmitiendo los datos de su posición y tiempo al receptor de GNSS. Estos receptores, empleando la señal de tres satélites, determinan su propia ubicación. Para evitar la diferencia entre los relojes de los satélites y del receptor, se emplea un cuarto satélite [Figura 3.12], midiendo así pseudo-distancias.

Hoy en día, los sistemas GNSS proporcionan cobertura global, aunque cada región ha creado sus propias constelaciones para evitar perder la cobertura ante un bloqueo de otro país. Así, mientras el más conocido es el NAVSTAR-GPS estadounidense, en Europa contamos con Galileo. [15]

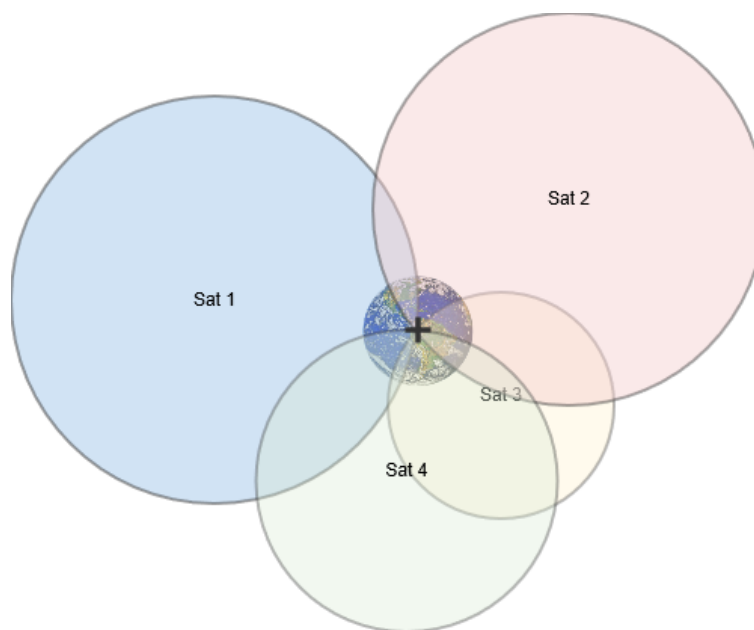


Figura 3.12: Ubicación del receptor empleando 4 satélites.

En aeronavegación, el sistema GNSS puede emplearse como medio de navegación primario durante vuelos IFR en rutas con Servicio de Tráfico Aéreo (ATS), áreas de control terminal y aproximaciones de no precisión, siempre y cuando el receptor GNSS instalado en la aeronave esté debidamente certificado según los estándares aplicables (para Europa: ETSO-C145c, ETSO-C146c o ETSO-C196b) de acuerdo con los requisitos técnicos establecidos por la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) en el documento CS-ETSO [16] [11] y cuente con capacidades de aumentación adecuadas (RAIM **Error! Reference source not found.** o SBAS 3.3.2.3) que garanticen el cumplimiento de los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad establecidos, en el marco de la normativa europea vigente (Reglamento (UE) 965/2012, Anexo SPA, apartado SPA.PBN [17]).

Los pilotos, por su parte, deben contar con licencia IFR en vigor y haber recibido la formación específica recogida en el Manual de Operaciones del operador, conforme a los procedimientos aprobados por la autoridad, para operar utilizando GNSS como sistema de navegación primario. Asimismo, está prohibido actualizar manualmente las coordenadas de los procedimientos por instrumentos, siendo obligatorio emplear bases de datos de navegación certificadas y actualizadas conforme a los ciclos establecidos en el Anexo 15 de la OACI. [18]

3.3.2 Sistemas de Aumentación de GNSS

Estos son métodos para garantizar que se cumplen las prestaciones de rendimiento en todas las fases del vuelo, gracias al uso de información adicional a la que proporciona el GNSS. Los receptores de GNSS pueden calcular su posición con una exactitud de varios metros utilizando únicamente los satélites GNSS, sin embargo, esta señal puede ser mejorada con el apoyo de los sistemas de aumentación de GNSS, que según el origen de la señal se clasifican como:

3.3.2.1 ABAS (Airplane-based Augmentation System)

Es un sistema de a bordo que se instauró en la década de los 90 para poder adoptar el GNSS en vuelos IFR y no únicamente como instrumento auxiliar en vuelos VFR. Este sirve para aumentar y/o integrar la información GNSS con información disponible de forma local, principalmente mediante el uso de RAIM (“Receiver Autonomous Integrity Monitoring”, Vigilancia Autónoma de la Integridad en el Receptor), para mejorar la actuación de las principales constelaciones de satélites.

Dentro del funcionamiento del sistema RAIM, distinguimos una capacidad básica de Detección de Fallos (FD) y una ampliada de Detección y Exclusión de Fallos (FDE)., La primera permite al receptor detectar si existen inconsistencias en las señales GNSS mediante el análisis de redundancia entre satélites. Para ello, es necesario disponer de al menos cinco señales válidas en operaciones

tridimensionales, lo que permite identificar la posible existencia de un fallo en alguna de las señales recibidas [19]. La capacidad FDE amplía esta funcionalidad, mediante el uso de 6 o más satélites, permitiendo detectar, identificar y aislar el satélite defectuoso y excluirlo del cálculo de posición. [Figura 3.13]

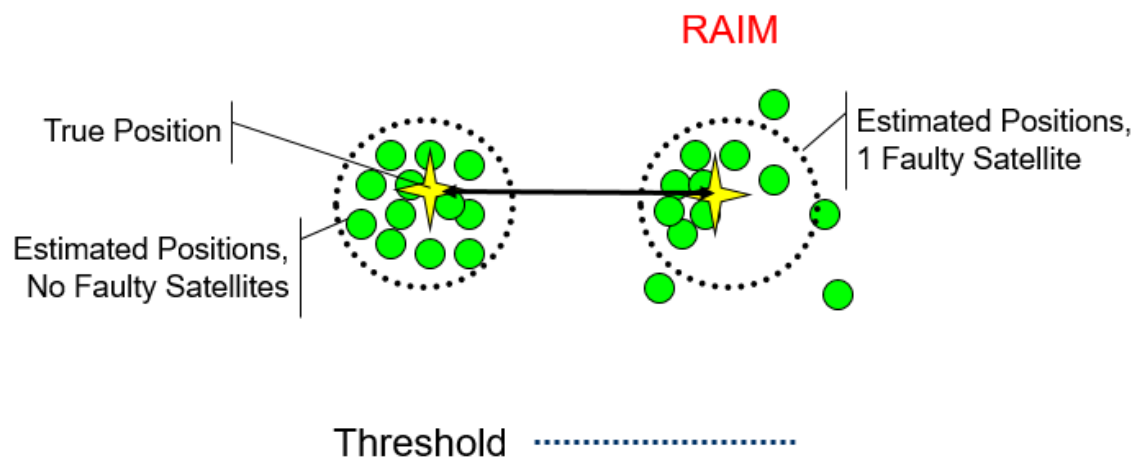


Figura 3.13: Ejemplo de cálculo de la posición con dispersión causada por un satélite fallido, posible gracias al sistema RAIM.

Además de su funcionamiento en tiempo real, algunos sistemas de gestión de vuelo (FMS) o herramientas de planificación de operaciones incorporan una función de predicción RAIM asociada al receptor GNSS, que permite anticipar la disponibilidad de integridad para una determinada operación prevista. Esta función estima, a partir de los datos de efemérides y almanaques de satélites, si durante una ventana temporal futura existirá suficiente cobertura satelital y una geometría adecuada para mantener la integridad requerida. La predicción RAIM suele calcularse para intervalos de 30 minutos, actualizándose en bloques cada 15 minutos, y gracias a esta información es posible identificar posibles periodos de no disponibilidad de forma anticipada y planificar medidas operativas alternativas si fuera necesario. Para ello, existen herramientas específicas como la Herramienta de Predicción de Disponibilidad del Sistema (SAPT) de Eurocontrol, entre otras, que permiten al operador consultar la disponibilidad esperada en función del aeropuerto, fecha, altitud y tipo de operación. Además, en algunos casos, los resultados del RAIM predictivo pueden difundirse mediante NOTAMs cuando se anticipan interrupciones en la cobertura.

Sumado al procesamiento de señales GNSS, algunos sistemas emplean técnicas de Monitorización Autónoma de la Integridad de la Aeronave (AAIM), que combinan información de navegación GNSS con datos de sensores adicionales a bordo, principalmente el altímetro barométrico [20]. A diferencia del RAIM clásico, que se basa exclusivamente en señales satelitales para verificar la integridad de la posición, el AAIM utiliza la comparación entre la altitud calculada por GNSS y la medida por el altímetro barométrico para mejorar la monitorización de la integridad. Esta integración de datos permite reducir la dependencia de un elevado número de satélites con buena geometría,

aumentando la disponibilidad de la función de integridad, especialmente en situaciones donde la cobertura GNSS es limitada o desfavorable. [21] [22]

3.3.2.2 GBAS (Ground-based Augmentation System)

Este servicio sirve para incrementar el nivel de servicio del GNSS durante las fases de aproximación, aterrizaje y despegue, además de las operaciones en superficie. Es una evolución del sistema DGPS (Differential GNSS) introducido en los años 90, que originalmente proporcionaba correcciones diferenciales para mejorar la precisión GNSS en aplicaciones civiles, pero que en el caso del GBAS ha sido adaptado con mejoras significativas en integridad, precisión y tiempo de alerta para cumplir con los requisitos de navegación aeronáutica. Este se suele instalar cerca del aeródromo y consta de dos o más receptores de GNSS, antenas de GNSS, una unidad central de procesamiento, una antena VHF y periféricos de soporte.

La emisión de la estación de tierra produce un mensaje de corrección cada medio segundo. En este mensaje se incluyen las correcciones, parámetros de integración, las características de la estación de tierra y una senda de guiado de aproximación para todas las aproximaciones instaladas [Figura 3.14].

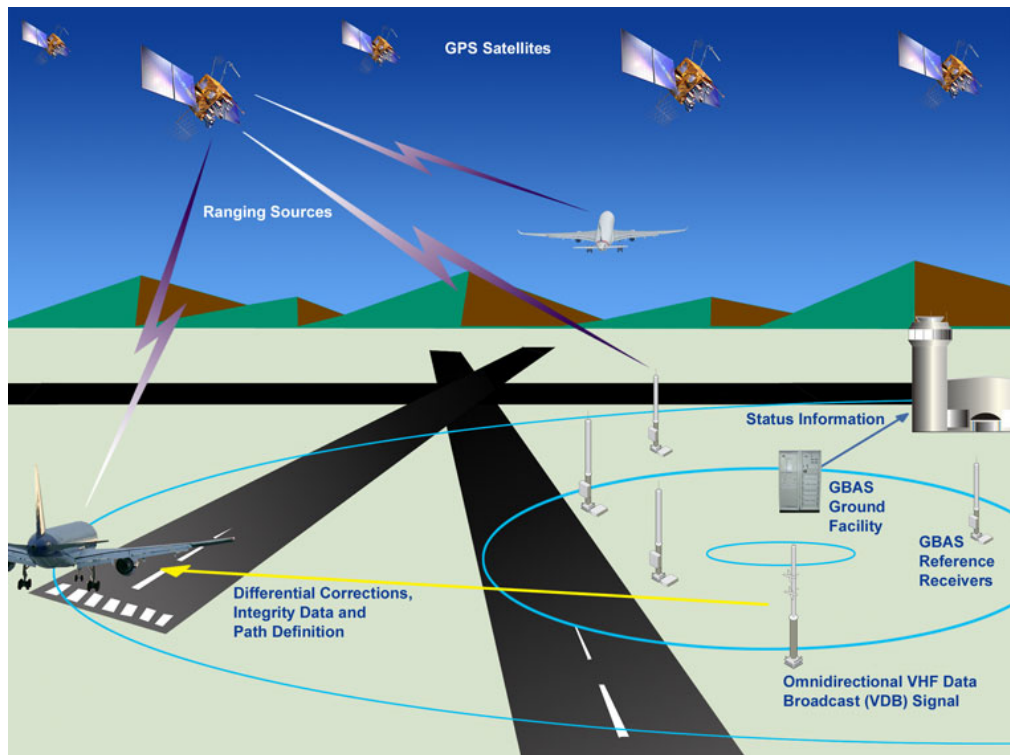


Figura 3.14: Funcionamiento GBAS.

Los receptores de GBAS, colocados con precisión de centímetros, reciben la señal de un satélite

concreto. Después miden el tiempo de transmisión entre el satélite y su antena para determinar la distancia recorrida por la señal (pseudodistancia). A continuación, la estación de tierra compara la distancia calculada con la supuesta distancia real según la señal de posición del satélite y determina el error entre ambas. Todo este intercambio de información entre antenas, receptor y estación se realiza en VHF.

Si la estación de tierra encuentra alguna discrepancia en la señal de un satélite, deja de emitir correcciones de señal para ese satélite, consiguiendo así que la aeronave deje de utilizar la información de ese satélite [23].

Este sistema presenta numerosas ventajas, entre ellas la capacidad para proveer de una señal mejorada para un aeropuerto entero con una sola estación de tierra, sin importar futuras ampliaciones en el número de pistas. Sin embargo, su área de cobertura está limitada a unas 23 NM, motivo que impulsó el despliegue en Estados Unidos del Sistema de aumentación de Área Ampliada (WAAS) cuya arquitectura y principios de funcionamiento sirvieron de base para la posterior definición de los sistemas SBAS (definido en el apartado 3.3.2.3 de este TFG) en las distintas regiones (como EGNOS en Europa). Además, las versiones actuales de GBAS permiten aproximaciones de precisión hasta CAT II/III y permite que con una sola frecuencia de VHF se pueda dar servicio hasta 48 a aeronaves individuales, lo cual lo convierte en una solución eficiente en entornos aeroportuarios con alta densidad de tráfico.

3.3.2.3 SBAS (Satellite-based Augmentation System)

Este sistema consigue mejorar las prestaciones del GNSS gracias a aumentar el alcance del GBAS a una zona más amplia (regional), proporcionando en ella una mejor integridad e información de corrección. Con SBAS, la infraestructura de tierra consiste en unas estaciones distribuidas geográficamente (GRSs), con sensores que reciben datos de los satélites de GNSS y una Unidad de Procesamiento Central (CPF) que calcula la integridad, las correcciones y los datos de distancia formando la señal SBAS Signal-In-Space (SIS).

Adicionalmente, se utilizan satélites en órbita geosíncrona (GEO) que transmiten la información SIS a los receptores, para que estos utilicen tanto la señal de los satélites GEO como la de la constelación GNSS para determinar su posición y la información del tiempo [23].

Las distintas regiones, al igual que han ido creando sus propias constelaciones GNSS, han creado sus redes SBAS, que cubren las regiones mostradas en la Figura 3.15.

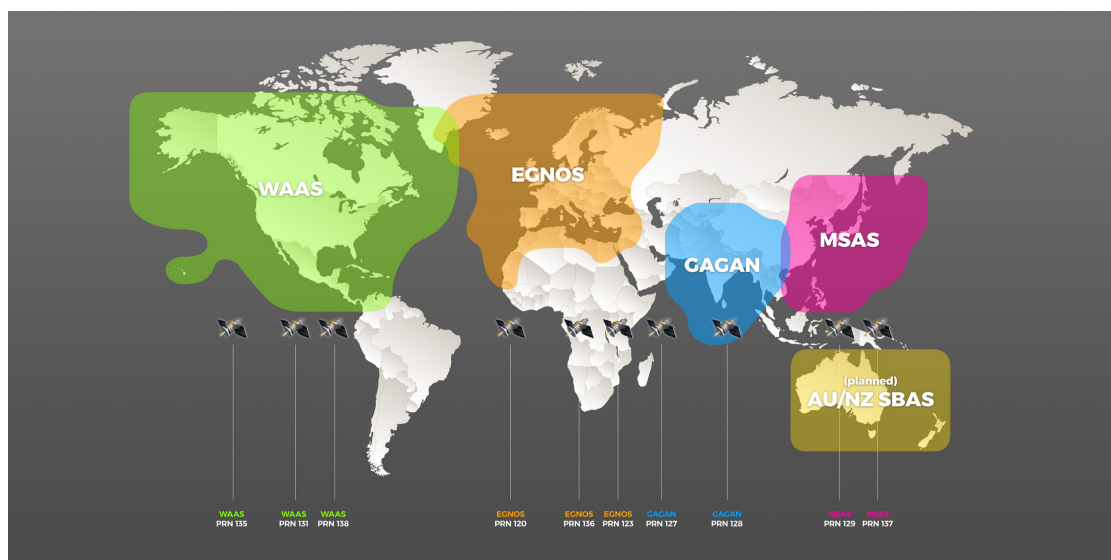


Figura 3.15: Cobertura mundial de SBAS.

Para conseguir mejorar la precisión, el sistema SBAS requiere una densa red de GRSs y cálculos complejos, que consiguen unos 2-3m de precisión en horizontal y 3-4.5m en el vertical. Con estos valores se conseguirían realizar aproximaciones LPV, que ofrecen mínimos comparables con los del ILS en CAT I (7m) pero calculados de forma geométrica a partir de la señal GNSS, en lugar de necesitar un altímetro barométrico.

En Europa disponemos del sistema EGNOS, desarrollado por la Agencia Espacial Europea, la Comisión Europea y EUROCONTROL. Las operaciones comenzaron en octubre de 2009 y actualmente contamos con una red mostrada en la [Figura 3.16] [19].

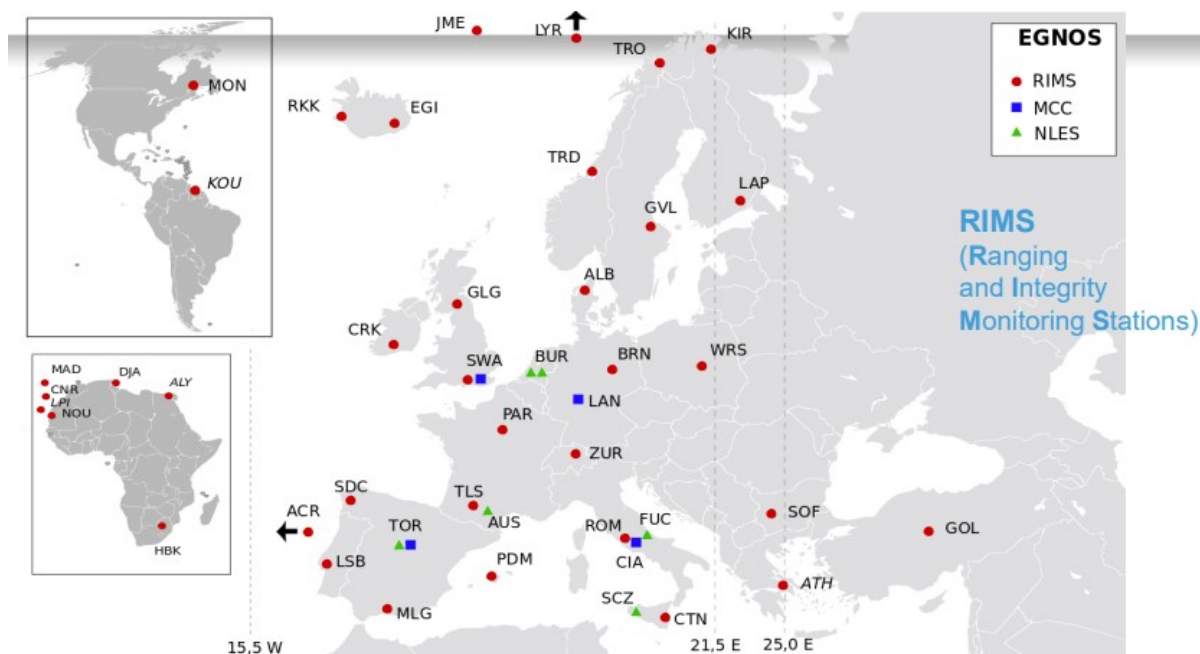


Figura 3.16: Cobertura EGNOS y estaciones RIMS.

3.3.2.4 Aplicabilidad a los niveles de RNP

Dentro de una Aproximación RNP (RNP APCH) distinguimos diferentes niveles cuyo uso dependía tanto de la certificación que hubiesen obtenido el piloto y la aeronave, como de las ayudas satelitales. Cualquier sistema GNSS (GPS, GALILEO, ...) con o sin SBAS (por ejemplo, WAAS) puede proveer información lateral con suficiente nivel de precisión para volar con mínimos LNAV.

Además, si al vuelo con LNAV se le incorpora guiado vertical, dispondremos de capacidad para volar en LNAV/VNAV, ya sea empleando referencias en altitud barométricas o mediante SBAS vertical. Por su parte, a los pilotos se les requiere usar SBAS para poder volar con mínimos tanto LPV como LP, aunque no se exigen los giros RF para poder cumplir los requisitos de una RNP APCH. [12]

Cabe destacar que los sistemas GLS (GBAS Landing System), aunque pueden servir de apoyo en aproximaciones similares en precisión a RNP APCH, no están considerado dentro de los procedimientos RNP AR por la OACI debido a su falta de flexibilidad para trayectorias complejas.

Todas estas RNP APCH tienen precisión lateral de 1 NM en los segmentos de terminal y de aproximación frustrada, y disminuye hasta RNP 0.3 (o 40 m si se cuenta con SBAS) durante la aproximación final.

Para el caso de las RNP AR APCH, la navegación vertical se puede basar tanto en VNAV barométrico como en SBAS, siempre que se cumplan los requisitos de integridad exigidos. Sin embargo, el uso de GBAS no se contempla en este tipo de operaciones, pues los procedimientos RNP

AR están diseñados para funcionar con sistemas que permitan cierta flexibilidad en el diseño de trayectorias complejas y a su vez una monitorización integrada continua, lo cual no puede lograrse con los sistemas basados únicamente en GBAS (apartados 6.3.3.3.2.2 y 6.3.3.3.2.3 del Doc 9613 de OACI [11] y [6]).

3.3.2.5 Error del Sistema

De la precisión depende el Error Total del Sistema (TSE) [Figura 3.17], compuesto por un valor vertical y otro horizontal, que se ve afectado por tres variables:

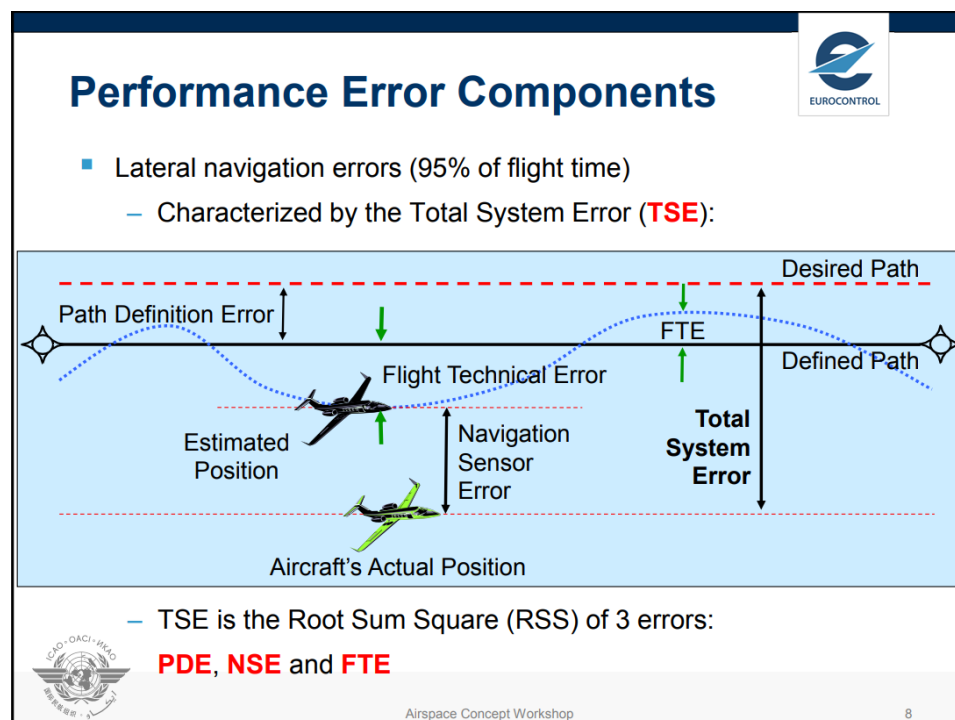


Figura 3.17: Componente horizontal del error del sistema.

- Error del Sistema de Navegación (NSE). Es la diferencia entre la posición estimada por el sistema de navegación y la real. Su límite debe ser tal que se cumplan los requerimientos de precisión del párrafo 3.7.2.4 del Anexo 10 Vol I del Convenio de Chicago [6] [Figura 3.18]. Además, se considera que estos requerimientos NSE se cumplen sin necesidad de demostración siempre y cuando el equipo empleado en la aeronave cumpla unos determinados requerimientos de diseño, que, a nivel europeo, implicarían cumplir con el párrafo 6.2 de [24], que especifica, para el caso de GNSS SBAS, la necesidad de cumplir con la norma ETSO-C146c Clase Delta clase operacional 4.

Typical operation	Accuracy horizontal 95% (Notes 1 and 3)	Accuracy vertical 95% (Notes 1 and 3)	Integrity (Note 2)	Time-to-alert (Note 3)	Continuity (Note 4)	Availability (Note 5)
En-route	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach (NPA), Departure	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-I) (Note 8)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-II) (Note 8)	16.0 m (52 ft)	8.0 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision approach (Note 7)	16.0 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft) (Note 6)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999

NOTES—

1. The 95th percentile values for GNSS position errors are those required for the intended operation at the lowest height above threshold (HAT), if applicable. Detailed requirements are specified in Appendix B and guidance material is given in Attachment D, 3.2.
2. The definition of the integrity requirement includes an alert limit against which the requirement can be assessed. For Category I precision approach, a vertical alert limit (VAL) greater than 10 m for a specific system design may only be used if a system-specific safety analysis has been completed. Further guidance on the alert limits is provided in Attachment D, 3.3.6 to 3.3.10. These alert limits are:

Figura 3.18: Requerimientos de Rendimiento en términos de Precisión. [6]

- **Error Técnico de Vuelo (FTE).** Es la precisión con la que se controla una aeronave medida según la posición estimada por el sistema de navegación de la aeronave respecto a la deseada. Este se considera equivalente al de las aproximaciones ILS si las desviaciones angulares se muestran a los pilotos en sus pantallas, y el sistema cumple los criterios de diseño del monitor de calidad de señal según el párrafo 8.5 del Anexo 10 de OACI [6]. El objetivo de este monitor es detectar anomalías en las señales de satélite para evitar que los receptores usen Información Incorrecta (MI). Esta MI se entiende como aquel error diferencial no detectado por la aeronave que supera un valor máximo de tolerancia. Además de este criterio, también se exige que el equipamiento cumpla ciertos requisitos de diseño, que en Europa serían los mismos que para el caso de NSE. [24]
- **Error de Definición de Ruta (PDE).** Es la diferencia entre el camino definido y el deseado en un lugar y tiempo determinados. En este caso no existen requerimientos de rendimiento para medir este error. El PDE depende de la calidad de las rutas incluidas en el Data Block estandarizado proveniente del Proveedor de Servicios de Navegación Aérea correspondiente, que para Europa debe cumplir, junto al operador aéreo, lo descrito en el párrafo 10.4 de [24].
En este, además de especificar la necesidad del operador de cumplir con los requerimientos de EU-OPS 1.873 (o la aplicable en casos no europeos), se especifica que los operadores en Europa no deben utilizar una base de datos de navegación para aproximaciones LPV a menos que el proveedor de esta presente su Carta de Aceptación

(LoA) Tipo 2 o equivalente, que no es más que un certificado emitido por la EASA de acuerdo con la OPINION Nr. 01/2005 de “The Acceptance of Navigation Database Suppliers” del 14 de enero de 2005 [24]. De forma similar, en otras regiones como EE. UU., existe una LoA similar según AC 20-153 de la FAA. Además de todo esto, se exige al operador seguir monitorizando tanto el proceso como los productos según los requisitos de calidad del sistema específico y según las regulaciones operacionales aplicables en su región.

3.4 Aproximaciones LPV: Operación y Diseño

Las aproximaciones LPV (Localizer Performance with Vertical Guidance) son una evolución dentro del concepto de PBN. Forman parte de los procedimientos RNP APCH, e integran datos del sistema GNSS con correcciones proporcionadas por SBAS, proporcionando guía lateral angular y vertical precisas, lo que las lleva un paso más adelante que las aproximaciones LNAV/VNAV. Estas aproximaciones consiguen precisiones similares a las del ILS en Categoría I, pero a diferencia de este, lo hacen sin requerir infraestructuras terrestres complejas.

Siguiendo las especificaciones del manual PBN de la OACI [11], sabemos que para diseñar una aproximación LPV, se debe contar con un sistema SBAS de refuerzo que esté aprobado por el certificador correspondiente, de forma que pueda garantizar la calidad del servicio GNSS en toda la región operacional, asegurando que la integridad, continuidad y disponibilidad cumplan los estándares establecidos por la organización.

3.4.1 Áreas de protección y franqueamiento de obstáculos

Las áreas de protección y el franqueamiento de obstáculos en las aproximaciones LPV están diseñados bajo los criterios definidos por el PANS-OPS (OACI Doc 8168 [2]) para garantizar la seguridad operacional durante cada segmento del procedimiento. Este diseño asegura que las aeronaves puedan seguir trayectorias precisas, minimizando el riesgo de colisiones con el terreno o estructuras cercanas:

- Área primaria: Representa la base del diseño de la aproximación y coincide con la trayectoria nominal del procedimiento, permitiendo un 100% de franqueamiento de obstáculos.

Su ancho dependerá del segmento de la aproximación, la altitud y la especificación de navegación, siendo para el caso de la aproximación LPV más estrecha debido a la precisión de la guía GNSS/SBAS.

- Áreas secundarias: Se extienden lateralmente desde los bordes del área primaria y proporcionan una transición hacia el espacio no protegido, en ellas se consideran posibles errores de trayectoria, como el Flight Technical Error (FTE) y la dispersión del avión debido a factores operacionales. Además, el margen de franqueamiento disminuye a medida que se aleja de la trayectoria nominal.

- **Áreas de Franqueamiento de Obstáculos (OAS):** Son un método empleado para determinar las alturas mínimas operativas, basado en los obstáculos presentes en el área, así como en la topografía del terreno.
- **Margen de franqueamiento de obstáculos (MOC):** Define la separación vertical mínima entre la trayectoria de vuelo y los obstáculos en el área primaria. Para el caso de aproximaciones con guía vertical (como LPV), la MOC es más estricta debido a la precisión de la trayectoria angular. En cualquier caso, esta altitud se verá reflejada en las propias OAS.
- **Guía vertical angular:** La trayectoria de descenso está protegida en base a un TCH (Altitud de Cruce de Umbral de pista) y un ángulo de Senda de Planeo, ambos incluidos en el FAS DB (Bloque de Datos del Segmento de Aproximación Final, recibido como parte de la señal GNSS/SBAS).

3.4.2 Mínimos aplicables

Los mínimos aplicables en una aproximación LPV están diseñados para reflejar las capacidades de la aeronave, los sensores utilizados y las condiciones del aeropuerto. Estos se determinan principalmente por las características del terreno, los obstáculos cercanos y la precisión del sistema SBAS, y son:

- **Altitud Mínima de Decisión (MDA):** Es la altitud mínima en el segmento de aproximación final en la que el piloto decide si continua el aterrizaje o si se dirige a la frustrada. Para el caso de LPV, se sitúa entre 200 y 250 pies según la separación mínima requerida entre la Senda de Planeo y los obstáculos más cercanos, considerando las tolerancias de navegación.
- **Rango Visual de Pista (RVR):** Se refiere a la distancia mínima en la que debe existir visibilidad para que el piloto pueda continuar la aproximación y el aterrizaje. Los valores típicos requeridos oscilan entre 550 y 800 metros, ajustándose a las condiciones de iluminación de pista y obstáculos circundantes.
- **Descenso Continuo en la Aproximación Final (CDFA):** En las aproximaciones LPV, es obligatorio el uso de CDFA. Con él se consigue una trayectoria estabilizada que minimiza riesgos operativos, reduce la carga de trabajo del piloto y optimiza el consumo de combustible. Además, con su empleo se disminuye el riesgo de Vuelo Controlado hacia un Obstáculo (CFIT) y se mejora la estabilidad de la trayectoria de vuelo, facilitando la toma de Decisiones en Altitud (DA), que es el punto definido durante la aproximación donde el piloto debe decidir si continúa el aterrizaje o ejecuta una frustrada, en función de si dispone o no de referencias visuales suficientes.

3.4.3 Sensores y Equipos Requeridos

Para conseguir los requisitos de rendimiento necesarios por PBN y conseguir mínimos de operación similares a los de ILS CAT I, las aproximaciones LPV requieren ciertos equipos y sensores que deben cumplir estándares estrictos establecidos por la OACI, como son:

- **Sistemas de Navegación Basados en GNSS con SBAS.** Para conseguir datos de la posición, velocidad y tiempo con suficiente precisión, los equipos deben cumplir con el estándar RTCA DO-229D [11], además de ser obligatorio que incorporen cálculos con correcciones en tiempo real para compensar errores ionosféricos, geométricos y de reloj. El SBAS permite en las aproximaciones LPV una precisión horizontal y vertical de hasta $\pm 1\text{m}$. Estos sistemas, deben estar certificados bajo el CS-ACNS de EASA [25], cumpliendo así los estándares de integridad, continuidad y precisión especificados anteriormente.

Además, será necesario contar con el sistema RAIM y de Pérdida de Integridad (LOI) que servirá para alertar al piloto si la precisión de la señal cae por debajo de los niveles requeridos para la aproximación LPV. Con todo ello, cabe destacar que los receptores deben ser compatibles con múltiples constelaciones GNSS (Galileo, NAVSTAR-GPS, etc) para poder aumentar la redundancia y mejorar la disponibilidad.

- **Ordenadores de a bordo y Bases de datos:** Será necesario contar con el Sistema de Gestión de Vuelo (FMS) con capacidad de administrar, procesar y ejecutar las trayectorias LPV almacenadas en el FAS DB, que a su vez incluirá los códigos CRC para evitar corrupción en la información crítica.
- **Indicadores de Desviación:** Al igual que para aproximaciones ILS. Las aproximaciones LPV requieren tanto Indicador de Desviación de Curso (CDI) como Indicador de Desviación Vertical (VDI), crucial para mantener el descenso estabilizado en la trayectoria angular. Además, serán necesarios EFIS (Sistema Electrónico de Instrumentación de Vuelo) o PFD (Pantalla Principal de Vuelo) como pantallas de vuelo electrónicas para mostrar gráficamente las trayectorias de aproximación y las desviaciones en tiempo real, lo cual facilita la toma de decisiones para el piloto.
- **Sistemas de Alerta y Protección:** Por último, será necesario contar con un Sistema de Alerta de Proximidad al Suelo Mejorado (EGPWS) para proporcionar alertas anticipadas y poder evitar CFIT, así como para integrar los datos del terreno y la trayectoria de aproximación y poder calcular los riesgos de colisión.

A pesar de ser una gran variedad de equipos, el equipamiento requerido para las aproximaciones LPV es menos dependiente de infraestructura terrestre y más versátil, lo que facilita su implementación en aeropuertos con recursos limitados. En el caso del Aeropuerto de Sevilla, el uso de GNSS y SBAS garantizará precisión y seguridad operativa, asegurando que las aeronaves puedan realizar aproximaciones con mínimos bajos aún si falla el sistema ILS existente.

4 PROCEDIMIENTO LPV EN EL AEROPUERTO DE SEVILLA

“I have not failed. I’ve just found 10,000 ways that won’t work.”

-Thomas Edison-

Nota: La información de esta sección se ha construido conforme a los documentos 8168 y 9613 de la OACI

Siguiendo los estándares de la OACI y las recomendaciones al diseñar un nuevo procedimiento instrumental de los manuales [11] y [2] podemos establecer el procedimiento LPV para LEZL de la forma que sigue.

4.1 Identificación de necesidades operativas

Este apartado sintetiza las principales necesidades basadas en los elementos fundamentales del plan de transición PBN para España [1] para garantizar el cumplimiento normativo, la seguridad y la eficiencia del espacio aéreo, abordando las especificidades del entorno operativo de Sevilla y considerando posibles limitaciones tecnológicas, como la cobertura del sistema EGNOS.

4.1.1 Motivación para el cambio

La transición hacia aproximaciones LPV en la mayor parte de aeropuertos de España se debe a la necesidad de mejorar la seguridad, capacidad y eficiencia operacionales, permitiendo estos aumentar la accesibilidad en condiciones meteorológicas adversas aún en ausencia del sistema ILS, además de reducir los retrasos y mejorando la fluidez del sistema ATM.

4.1.2 Infraestructura actual

La red actual de ayudas a la navegación incluye los sistemas NDB, VOR y DME, que se están desmantelando progresivamente. Específicamente en Sevilla, la implementación de este nuevo procedimiento implica la sustitución de todos los sistemas NDB por puntos de referencia RNAV.

Por otro lado, será necesario reevaluar la cobertura del actual DME, que no va a ser eliminado por completo y existirá en paralelo a la navegación PBN. Así, según [1], si se produjesen interrupciones en el sistema GNSS, los sistemas de navegación bajarían a navegación inercial con actualizaciones de radio (DME) o llegar a solicitar instrucciones vectoriales si la navegación se hace imposible.

Para que todo esto sea posible, desde CIDETMA se insta a la coordinación entre ENAIRE y todos los operadores locales para asegurar un correcto desmantelamiento de las ayudas convencionales sin comprometer las operaciones.

4.1.3 Impacto de la cobertura de EGNOS

Siguiendo las recomendaciones de ENAIRE, es conveniente revisar las limitaciones en el alcance del sistema EGNOS para todos los aeropuertos de España. Si bien esta recomendación tiene especial importancia en los aeropuertos del archipiélago canario, es necesario también revisar el caso de Sevilla, que, a pesar de no encontrarse en un área crítica de cobertura, es positivo monitorizar la calidad del servicio en especial durante periodos de alta actividad ionosférica que pueden degradar el rendimiento del sistema.

En este contexto, es necesario contar con procedimientos alternativos (ILS o VOR/DME) e implementar mecanismos de validación periódica de las prestaciones de EGNOS para garantizar la fiabilidad.

En el marco de la mejora de EGNOS, la Unión Europea ha planeado la implementación de EGNOS V3, que introducirá capacidades de multi-constelación y multi-frecuencia, aumentando la robustez y reduciendo el impacto de eventos ionosféricos. Este avance, previsto para estar operativo entre 2025 y 2027, mejorará significativamente la precisión y disponibilidad en aproximaciones RNP. Además, se está trabajando en la ampliación de la cobertura hacia zonas más periféricas, como las Islas Canarias, lo que podría beneficiar también a otras regiones como Andalucía, garantizando una mayor fiabilidad de las operaciones.

4.1.4 Adaptación tecnológica y normativa

La implementación de aproximaciones LPV responde al Reglamento (UE) 2018/1048, que establece requisitos para la navegación basada en prestaciones. Además, requiere que los operadores aéreos adapten sus flotas, incluyendo:

- Equipamiento de las aeronaves con receptores GNSS compatibles con LPV. En este caso, la gran parte de aeronaves que operan ya tienen compatibilidad con este sistema, si bien será necesario que los operadores de aviación general que quieran operar en IFR actualicen sus equipos.
- Entrenamiento específico para las tripulaciones y controladores aéreos sobre las nuevas

capacidades operativas. Al igual que en el caso anterior, la gran mayoría de operaciones que se realizan, y en especial las de aviación comercial, no sufrirán ningún contratiempo con este requisito que ya cumplen la mayor parte de pilotos.

- Coordinación con AESA para asegurar la certificación y aprobación operacional.

4.2 Diseño y descripción general del procedimiento

Considerando las características operativas y topográficas del entorno y siguiendo los criterios establecidos en los documentos OACI Doc 8168 (PANS-OPS) y Doc 9613 (Manual PBN) podemos diseñar el procedimiento LPV para el Aeropuerto de Sevilla. Según dichos manuales, al terminar este procedimiento conseguiremos una precisión equivalente a un ILS de Categoría I.

4.2.1 Áreas de protección

El diseño de las Áreas de Protección de Obstáculos (OAS) para una aproximación LPV en LEZL tiene como objetivo garantizar la seguridad de las operaciones en las fases de aproximación final y aproximación frustrada, delimitando áreas libres de obstáculos. Sus dimensiones se diseñan tomando como referencia las características específicas de la pista, la altitud del umbral y los obstáculos circundantes. En LEZL, las áreas de protección para LPV están definidas de la siguiente manera:

- Superficie primaria. Comienza en el FAP y se extiende hacia el umbral de pista. Su anchura es constante en el FAP, con 300 metros (984 pies), reduciéndose progresivamente a 75 metros (246 pies) en el umbral.
- Superficies secundarias. Se extienden a ambos lados de la superficie primaria, con una inclinación descendente hacia el exterior. Estas superficies proporcionan protección adicional contra desvíos laterales que exceden los límites de la precisión RNP 0.3. Su cálculo se realiza especialmente en aeropuertos con orografías complicadas, pues permiten en un rango mucho más amplio ubicar aquellos obstáculos que suponen un problema para la aproximación. [Figura 4.1]
- Superficie de aproximación frustrada. Diseñada para un gradiente de ascenso mínimo de 2.5%, protege el recorrido desde el Punto de Aproximación Frustrada (MAPt) hasta la altitud de seguridad.

Por su parte, para diseñar las OAS es requisito un análisis exhaustivo de los obstáculos en el entorno del aeropuerto, para ello se deben identificar elementos como edificios y torres cercanas a las trayectorias de aproximación y frustrada, para posteriormente confirmar que no penetran las superficies OAS definidas.

En el segmento inicial, si bien no se emplean superficies OAS con la misma definición geométrica estricta que en el tramo final, sí se aplican requisitos mínimos de separación vertical frente

a obstáculos (por ejemplo, al menos 300 m de margen vertical), siguiendo las recomendaciones del Doc 8168 [2] para RNP 1.

En el segmento intermedio, el objetivo es alinear la aeronave con la senda de planeo, por lo que se diseñan superficies que permitan cierta maniobra y estabilización lateral. La Figura 4.1 nos muestra este tramo (desde la izquierda de la imagen hasta el FAF), incluyendo la ampliación de las superficies secundarias para mayor protección.

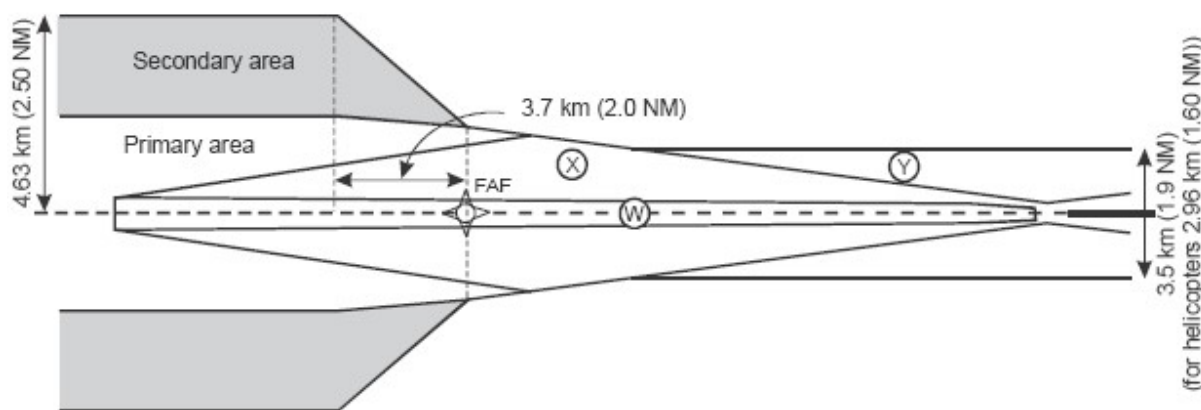


Figura 4.1: Área de las OAS desde el segmento intermedio hasta la pista, incluyendo el área secundaria definida para la aproximación intermedia.

Es en el segmento final donde se aplican las OAS completas, compuestas por planos inclinados denominados en los manuales como W, X, Y, Z, con geometría definida por ecuaciones lineales del tipo $z = Ax + By + C$, y cuya configuración varía en función del ángulo de descenso, la categoría de aeronave y otros parámetros. Estas superficies delimitan claramente el volumen de espacio aéreo que debe estar libre de obstáculos para garantizar un descenso seguro y estabilizado hasta el umbral.

En el caso del segmento frustrado, también se definen superficies de protección, especialmente adaptadas a un gradiente de ascenso mínimo del 2.5 %, con el fin de garantizar la maniobra de escape en condiciones seguras, evitando colisiones tras una frustración de la toma.

Otro aspecto a considerar son las altitudes de decisión (DA/H), que en una aproximación LPV deben estar entre 200 y 250 ft, para asegurar que la aeronave mantenga una separación vertical adecuada respecto a los obstáculos.

Todo este cálculo se realiza mediante el software PANS- OPS [26], que según la categoría de la aeronave nos permite extraer los planos que forman las OAS. Para ello tomamos como referencia el documento de la OACI: PANS-OPS Flight Procedure Design Training for CAAs [27]. En este

documento encontramos, en la página 28, la plantilla con la ubicación de los puntos que forman las superficies, tal y como se muestra en [Figura 4.2].

Con esta referencia, acudimos a una herramienta de cálculo que nos aplique las reglas PANS OPS (Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations) para obtener las superficies, en este caso emplearemos [28]. En él introducimos los 3° de pendiente de descenso, la altitud de referencia (RDH, Figura 4.2) y los datos de la categoría de la aeronave, que para el caso de LEZL, elegiremos CAT D, pues aunque no son comunes, es el tamaño más grande que aterriza en este aeropuerto y que por tanto nos dará el resultado más restrictivo.

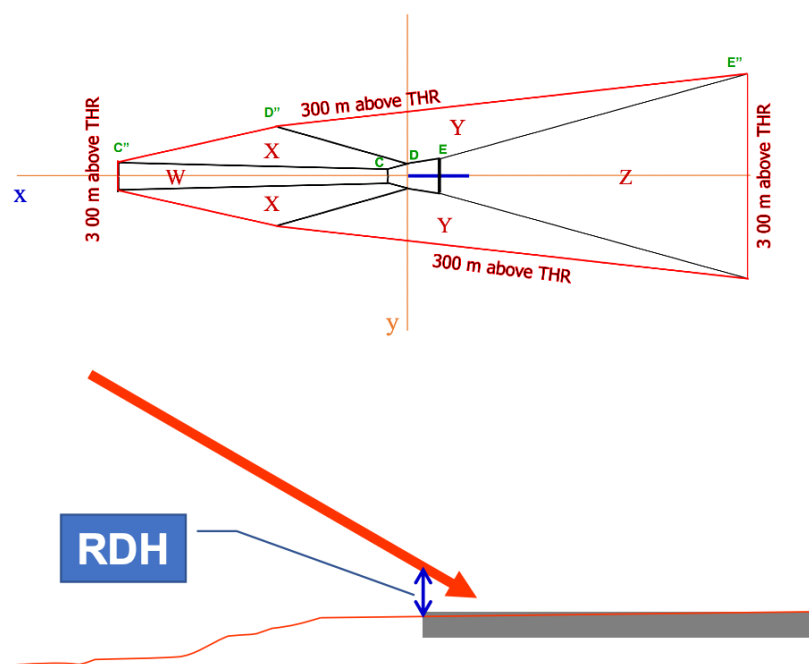


Figura 4.2: Esquema con la ubicación de los puntos y planos que delimitan las OAS (arriba) y representación gráfica de la altitud de referencia respecto al GS (RDH, abajo).

De esta forma obtenemos la siguiente tabla, con los valores de los puntos, en metros, que nos servirá para ambas cabeceras, quedando situado el eje de referencia en la cabecera de pista Tabla 2.

PUNTO	X (m)	Y (m)	Z (m)
C	1011.82	149.33	0
D	439.08	236.20	0
E	-1625.08	471.53	0
C''	10842.40	263.47	300
D''	6163.42	973.15	300
E''	-7231.92	1760.00	140.17

Tabla 2: Puntos de las Áreas de Franqueamiento de Obstáculos (OAS) referidos al origen (0,0,0).

El siguiente paso es representar dichos puntos en Google Earth, para ello, tomamos en primer

lugar el valor de las cabeceras de pista, 37°25'4.38"N, 5°54'42.62"W para la RWY09 y 37°25'4.83"N, 5°52'27.58"W para RWY27. Con todos estos datos, podemos situar los puntos en el mapa [Figura 4.3]. Para ello, pasando los puntos al sistema de coordenadas geográficas (con latitud y longitud en grados decimales) obtenemos en la Tabla 3 todos los puntos para situar en Google Earth.

Cabecera	Punto	Latitud	Longitud	Altitud
RWY09	C	37.417865	-5.911784	25.00
RWY09	D	37.417173	-5.913004	25.00
RWY09	E	37.415573	-5.916417	25.00
RWY09	C"	37.424294	-5.931598	325.00
RWY09	D"	37.421087	-5.924958	325.00
RWY09	E"	37.408950	-5.898011	165.17
RWY27	C	37.417915	-5.897737	34.00
RWY27	D	37.418606	-5.898957	34.00
RWY27	E	37.420206	-5.902370	34.00
RWY27	C"	37.424344	-5.917552	334.00
RWY27	D"	37.421137	-5.910911	334.00
RWY27	E"	37.408999	-5.883964	199.17

Tabla 3: Coordenadas de los puntos de las OAS.



Figura 4.3: Puntos de OAS para RWY09 (arriba) y RWY27 (abajo).

Por último, formando los planos entre los puntos, conseguimos crear las Áreas de Franqueamiento de Obstáculos para ambas aproximaciones [Figura 4.4].



Figura 4.4: OAS para las RWY09 (arriba) y RWY27 (abajo).

Por último, queda analizar los obstáculos del aeródromo para ver si alguno supone un problema respecto a las OAS. Para ello, tomando los datos del AIP España [29], los llevamos también a Google Earth [Figura 4.5] y encontramos que para la RWY27 no hay obstáculos que supongan un problema. Sin embargo, en la aproximación por la cabecera 09, sí encontramos dos sistemas de alumbrado que cruzan mínimamente con estas superficies. [Figura 4.6] Figura 4.5: Impacto de los obstáculos de aeródromo sobre las OAS para las aproximaciones por RWY27 (abajo) y RWY09 (arriba, con el obstáculo que penetra marcado en amarillo).

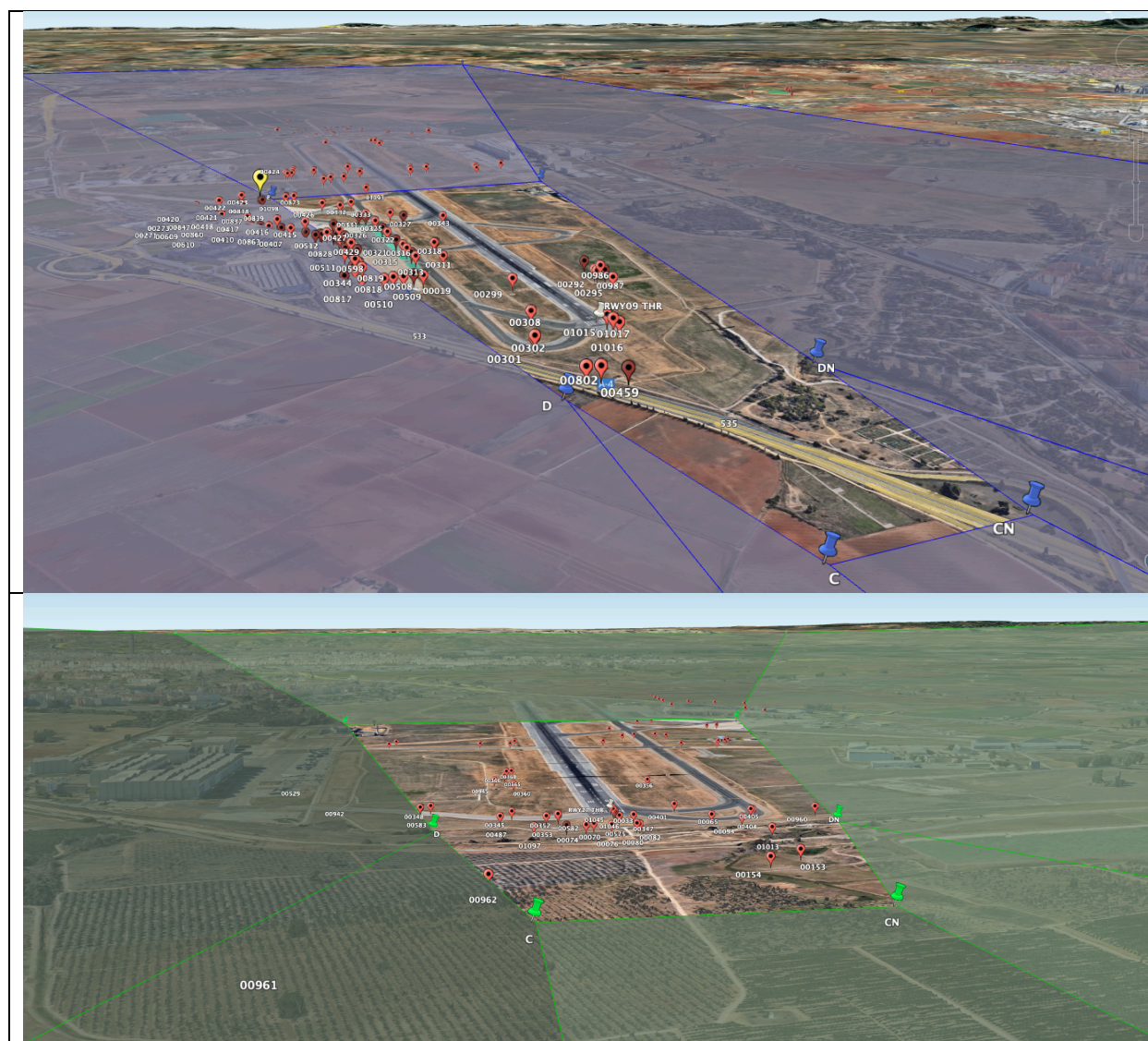


Figura 4.5: Impacto de los obstáculos de aeródromo sobre las OAS para las aproximaciones por RWY27 (abajo) y RWY09 (arriba, con el obstáculo que penetra marcado en amarillo).

A efectos prácticos, la solución más sensata dado que el cruce es en una zona muy cercana al final de las OAS, casi sin impacto (igual que sucede con todos los obstáculos menores de señalización que se encuentran a los bordes de la pista), sería desplazar el obstáculo 424 5m hacia el norte y e ignorar la segunda farola, que se encuentra a pocos centímetros del borde de las OAS, y no supone impacto real sobre las operaciones. Cabe destacar, que esta solución será necesaria para implantar la aproximación LPV, pues este obstáculo no afecta a las OAS del actual ILS, lo cual pone de manifiesto que las superficies generadas para ambos tipos de aproximación no son idénticas.



Figura 4.6: Obstáculos que penetran las OAS para la aproximación por RWY09.

4.2.2 Segmentos y requisitos

4.2.2.1 Segmento de aproximación inicial

Este conecta el punto de aproximación inicial (IAF) con el segmento intermedio. De acuerdo con [2], en este segmento la aeronave debe contar con espacio y tiempo suficientes para estabilizarse tanto en altitud como en rumbo, usualmente 5NM o más, pero siempre acorde a la configuración específica del área.

Los obstáculos deben ser flanqueados por al menos 1000 ft (300m), como requisito lateral se debe cumplir RNP 1.

4.2.2.2 Segmento de aproximación intermedia

En este segmento se alinea la trayectoria con la Senda de Planeo, dando tiempo al piloto para ajustar todos los parámetros de cara al aterrizaje. El requisito lateral sigue siendo RNP 1, y no aplica el vertical, pues la altitud es constante durante todo el tramo.

4.2.2.3 Segmento de aproximación final

El requisito lateral para este segmento en aproximación LPV baja a RNP 0.3, a la vez que se impone el guiado vertical. Aunque este guiado vertical no tiene valores normativos de precisión

estrictamente definidos como ocurre con el lateral, su precisión práctica viene determinada por la exactitud del sistema GNSS con aumentación SBAS. Además del requisito de navegación, este segmento impone otras condiciones relevantes para el diseño, como una senda de planeo estabilizada, una altitud de cruce mínima (TCH), márgenes de franqueamiento de obstáculos verticales en las OAS, y la necesidad de garantizar un ángulo de descenso constante. Todos estos elementos serán utilizados en el apartado 4.4.3 para definir las dimensiones de las superficies de protección correspondientes.

4.2.2.4 Segmento de aproximación frustrada

Este se diseña para proporcionar un ascenso controlado y seguro en caso de que el aterrizaje no pueda completarse. El comienzo del segmento se produce en el MAPt y se extiende hasta el circuito de espera (salvo indicación contraria del controlador de área pertinente).

El gradiente de ascenso mínimo recomendado al diseñar la frustrada es de 2.5% independientemente de la categoría de la aeronave, y siempre se debe contar con el respaldo del estudio de las OAS para evitar obstáculos y áreas de alto riesgo.

4.2.3 Categorías de Aeronave en la aproximación LPV a LEZL

Las categorías de aeronave según tamaño y velocidad de aproximación (como se define en [2]) tienen un impacto significativo en el diseño y la operación de una aproximación LPV. En el Aeropuerto de Sevilla, estas categorías influyen en varios aspectos clave del procedimiento.

4.2.3.1 Espaciado y Dimensionado de las Áreas de Protección

Las aeronaves que operan en este aeropuerto generalmente pertenecen a las categorías B, C y D, incluyendo a la gran mayoría de aviones comerciales medianos, puesto que el Aeropuerto de Sevilla aún no realiza rutas transoceánicas, incluyendo al A320 (y sus variaciones) y al B787. Así, para la categoría C, la más común, la velocidad de aproximación se establece entre los 121 y los 140 nudos, además de requerir mayor amplitud en la superficie primaria de las OAS que en aeropuertos con predominancia de aeronaves categoría A/B e igualmente necesitar mayor extensión en las superficies secundarias. Todo esto queda contemplado en las superficies OAS diseñadas en el anterior apartado 4.2.1.

4.2.3.2 Gradientes de descenso, velocidades de maniobra y aeronaves de gran tamaño

Dado que operan aeronaves de categorías C y D, será necesario un gradiente de Senda de Planeo en el segmento final de 3°, que si bien según OACI podría llegar a 3.5° en casos de aeronaves de gran envergadura, no es necesario en LEZL. Esto se debe a que aquellas aeronaves de categoría F que deseen operar en el aeropuerto, necesitan realizar una solicitud previa por parte de la Compañía Aérea o del Agente de Handling, y recibir la autorización explícita por parte del Centro de Operaciones del Aeropuerto. [30]

Con dicho ángulo de planeo de 3° se obtiene una pendiente vertical equivalente del 5.24%.

Además, es necesaria que la TCH (Altitud de cruce del umbral de pista) sea de al menos 50 ft (15.24 m) sobre el terreno.

Para estos casos, además de contar con puestos de estacionamiento independientes, necesitarán un guiado por parte de los controladores excepcional, y deben poder cumplir con la pendiente de descenso de 3° bajo las condiciones habituales climáticas de la zona y dada la longitud de 3364m de pista.

También para las aeronaves de categoría C, se sitúa en 210 nudos la velocidad de maniobra recomendada en los segmentos inicial e intermedio, y en 180 para el caso de la aproximación final. Con todo ello, aunque los procedimientos están diseñados principalmente para aeronaves medianas y grandes, las categorías A y B pueden utilizar el procedimiento con las mismas especificaciones de guía lateral y vertical.

4.3 Certificaciones y requisitos

La implementación de una aproximación LPV requiere cumplir con una serie de certificaciones que abarcan tanto los requisitos del equipamiento de aeronaves como los del espacio aéreo y procedimientos asociados. Estas certificaciones están reguladas por normativas internacionales y europeas, destacándose las siguientes.

4.3.1 Certificaciones y requisitos de Aeronaves y Operadores

La especificación CS-ACNS, desarrollada por la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), integra criterios propios de certificación en materia de comunicaciones, navegación y vigilancia. Si bien en parte de sus requisitos encontramos inspiración de normativas previas como el AMC 20 y documentos de la FAA como el AC 20-138D, su desarrollo responde a un enfoque diferente, adaptado a las necesidades operativas y regulatorias de Europa. Dentro de ella, se incluyen dos especificaciones de certificación aplicables a nuestro caso, que son [25]:

- CS ACNS.C.PBN.501: Afecta a la capacidad de navegación basada en PBN.
- CS ACNS.D.ADSB.010: Relativo a los sistemas ADS-B para asegurar el cumplimiento de las prestaciones fundamentales de integridad y continuidad.

Además de ellos, los operadores deberán contar con una autorización específica de navegación PBN, de acuerdo con el Reglamento (UE) No 965/2020 [1]

Por su parte, las aeronaves deberán estar equipadas con los sistemas GNSS compatibles con SBAS que permitan la operación, definidos en Sensores y Equipos Requeridos 3.4.3.

De forma adicional a los sistemas anteriormente mencionados (HSI, CDI), cabe destacar la necesidad que el sistema de presentación en cabina debe mostrar de forma explícita el tipo de

aproximación SBAS activa (por ejemplo, LPV), permitiendo así al piloto verificar que se está ejecutando el procedimiento correcto. Esta información debe además incluir un aviso claro en caso de pérdida de la capacidad necesaria para continuar con la aproximación bajo ese tipo de mínimos. Por otro lado, debe existir un selector para elegir entre las distintas modalidades instaladas en la base de datos del sistema RNP aquella correspondiente a la RNP APCH con mínimos LPV, así como un indicador de pérdida de navegabilidad, tanto vertical como horizontal.

Durante los tres segmentos, será necesario que los sistemas de navegación cuenten con capacidades de monitorización y alerta de rendimiento (OBPMA) para notificar si en cualquier instante se incumple la precisión requerida. La monitorización y alerta se aplican tanto a la navegación lateral como a la longitudinal, asegurando que la aeronave permanece dentro de los límites establecidos en la especificación RNP correspondiente. [11]

El sistema OBPMA debe ser capaz de evaluar el Error Total del Sistema (TSE), que combina el Error del Sistema de Navegación (NSE), el Error de Seguimiento de la Trayectoria (FTE) y el Error de Definición de la Trayectoria (PDE). Para garantizar la integridad de la posición, el sistema debe contar con una capacidad de monitoreo de niveles de protección y generar alertas en caso de que los valores excedan los límites admisibles. En este sentido, las alertas visuales y auditivas en cabina permitirán al piloto reaccionar ante desviaciones no controladas de la ruta planificada.

Por último, cabe destacar que todos los puntos de la trayectoria deben estar codificados en la base de datos de navegación conforme al estándar ARINC 424, garantizando la correcta interpretación y ejecución de las trayectorias. Este estándar define distintos terminadores de ruta (Path Terminators), como pueden ser los vistos anteriormente (Track to Fix, Radius to Fix, Course to Fix...) que permiten una transición precisa entre segmentos de la ruta, asegurando que el sistema de navegación interprete y ejecute las maniobras de forma predecible y repetitiva [2].

4.3.2 Certificaciones y requisitos de Procedimientos

De acuerdo con el Reglamento (UE) 2018/1048, todas las cabeceras de pista con procedimientos instrumentales deben implementar procedimientos LPV antes del 6 de junio de 2030, si bien en España el plan de transición de CIDETMA ha impuesto una fecha más cercana para la implementación en el Aeropuerto de Sevilla. Para conseguirlo, el requisito es que cumplan los criterios de diseño establecidos en [2], que se han cumplido durante el desarrollo de todo el procedimiento, además de la posterior validación de mínimos LPV por parte de ENAIRE.

Por su parte la publicación de procedimientos en el AIP, conforme a las normativas de la OACI, debe contener todos los datos como coordenadas WGS-84, ángulos de planeo y mínimos de aproximación, que se verán en el apartado dedicado.

De forma operativa, también es necesaria una serie de simulaciones y posteriores vuelos de prueba para garantizar que los procedimientos cumplen los niveles de seguridad estipulados y verificar la viabilidad de toda la operación.

Sobre la disponibilidad de SBAS, el cumplimiento de los niveles de servicio necesarios para una

RNP APCH se puede comprobar mediante SBAS NOTAMs (si el aeropuerto los implementa) o con servicios de predicción. Será ENAIRE la encargada de especificar la forma de verificar si hay disponibilidad SBAS. Para predecir la disponibilidad de LPV, se deben tener en cuenta las últimas constelaciones GNSS, servicio que proveerán ENAIRE mediante un receptor de capacidad LPV, en caso de que esta información no se incluya en el NOTAM.

Por su parte, la base de datos de navegación para cumplir esta aproximación se debe obtener de un proveedor que cumpla con el documento ED 76() de RTCA DO 200()/EUROCAE, un estándar industrial para procesamiento de datos aeronáuticos.

4.4 Carta Aeronáutica: AIP.

Con todos los datos necesarios para el diseño, definidos en el apartado 4.2 de este TFG, se procede conforme al Doc. 8697 de OACI [31] a la construcción de la carta correspondiente a la RNP APCH con mínimos LPV para ambas pistas. En esta sección se mostrarán vistas parciales correspondientes a cada tramo de la aproximación, para ver las cartas completas, acudir al Anexo [\[Capítulo 7\]](#).

En la parte superior de esta encontramos el aviso del uso de sistema EGNOS, junto al canal que se utiliza en la zona correspondiente a este aeropuerto, que coincide para llegadas por ambas pistas. Junto a él, el aviso de desviación magnética y el año respecto al que se calcula.

4.4.1 Aproximación Inicial

Dada la orografía en la zona oeste de la ciudad, donde encontramos una antena de comunicaciones civil que alcanza una altitud de 203m (Obstáculo 598 Figura 7.2), encontramos la obligación de situar el IAF a 2000 pies, de forma que cumpla el requisito de diseño de superar los obstáculos por al menos 300m.

Estas características, unidas a la obligación de OACI de no realizar cambios de rumbo superiores a 90° en este segmento, nos llevan a situar TENDU ya alineado con la pista, a 2000 pies, y dado que al oeste de este punto no hay obstáculos significativos, ni núcleos de población que puedan verse afectados, se puede situar también el propio circuito de espera con TENDU como punto de espera.

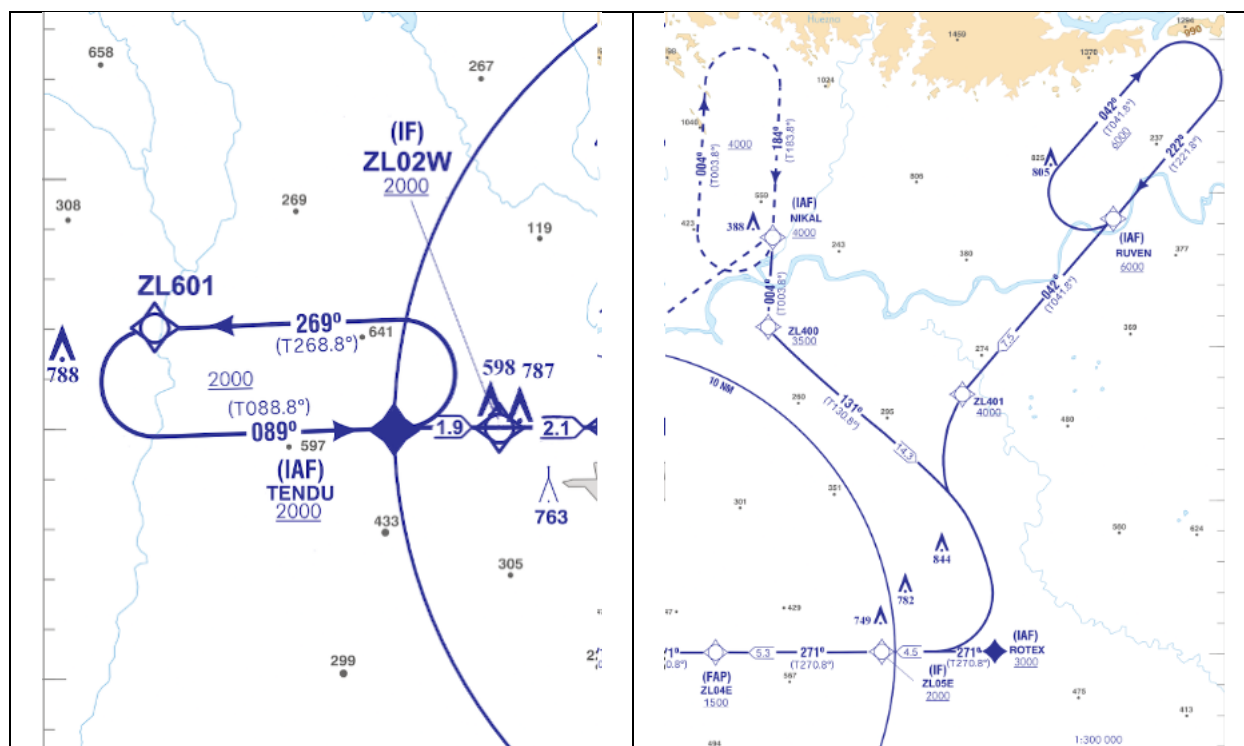


Figura 4.7: Segmento de Aproximación Inicial LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)

Por su parte, el terreno en la zona Este de la pista nos permite para la aproximación por la cabecera 27 establecer un segmento inicial con mucho más recorrido, aunque las elevaciones en la región cercana a la localidad de Carmona, que alcanzan los 229m de altitud, nos llevan a colocar el IAF, ROTEX, a 3000 pies, superando holgadamente los 300 m mínimos de altitud sobre los obstáculos. En este caso, dado que en los siguientes segmentos no hay obstáculos que puedan afectar, se puede comenzar el descenso desde este IAF llegando al segmento intermedio a 2000 pies.

Para el circuito de espera, dada las urbes que se encuentran en el entorno de ROTEX, nos conviene situarlo en RUVEN a 6000 pies, mucho más alejado, pero a altitud suficiente para mantener aeronaves en espera un largo periodo en caso de haber tráfico en el aeropuerto.

4.4.2 Aproximación intermedia

La premisa fundamental para este segmento es que debe ser sin virajes, pues es aquí donde el piloto realiza los ajustes finales para preparar el avión para el segmento de aproximación final. Con ello, para la RWY09, dado que venimos de 2000 pies de altitud, podemos mantener este valor hasta alcanzar el punto en que necesitemos comenzar el descenso, que vendrá marcado por la pendiente de 3° que por criterio de diseño de OACI es el valor ideal.

Además, dado que la altitud y el rumbo se mantienen constantes en este tramo, no será necesario recorrer mucha distancia, situando así el IF en ZL02W, y otorgando una longitud de 2.1 NM al segmento intermedio.

En el caso de la aproximación a la 27, comenzamos en el IF ZL05E a 2000 pies, y como vimos en el segmento anterior, no tenemos obstáculos hasta llegar a la pista, así que podemos descender hasta los 1500 durante este segmento, haciéndolo más largo que el de la cabecera contraria, y dejando un segmento final algo más corto pero desde un nivel de vuelo inferior.

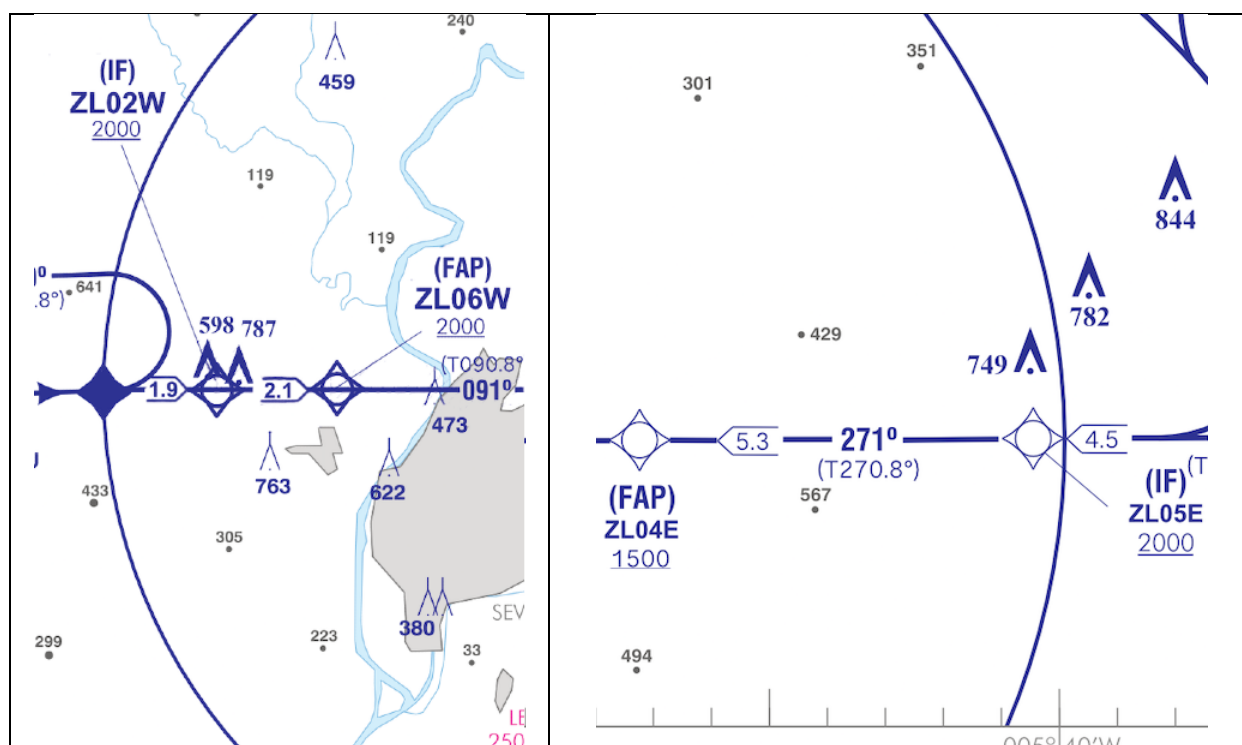


Figura 4.8: Segmento de Aproximación Intermedia LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)

4.4.3 Aproximación final

En este tramo hay que considerar las OAS, que como su construcción es única, sirven las ya existentes para la aproximación ILS. Además, dado que la Senda de Planeo de 3° cumple con los requisitos de mínimos, tan solo proyectando esta pendiente desde la cabecera 09 obtenemos el FAP en ZL06W a 2000 pies, que consigue de esta forma superar los 140m del puente del Alamillo (Obstáculo 473 Figura 7.2) sin incumplir los mínimos. Por otro lado, la aproximación a la cabecera 27 parte de los 1500 pies del FAP en ZL04E, y consigue también los 3° de Senda de Planeo ideales según la normativa.

Durante este segmento, como se mencionó anteriormente y de acuerdo con el Doc. 9613 [11], será necesaria una precisión RNP 0.3 durante los 5.8 y 4.2 NM respectivamente de longitud del tramo.

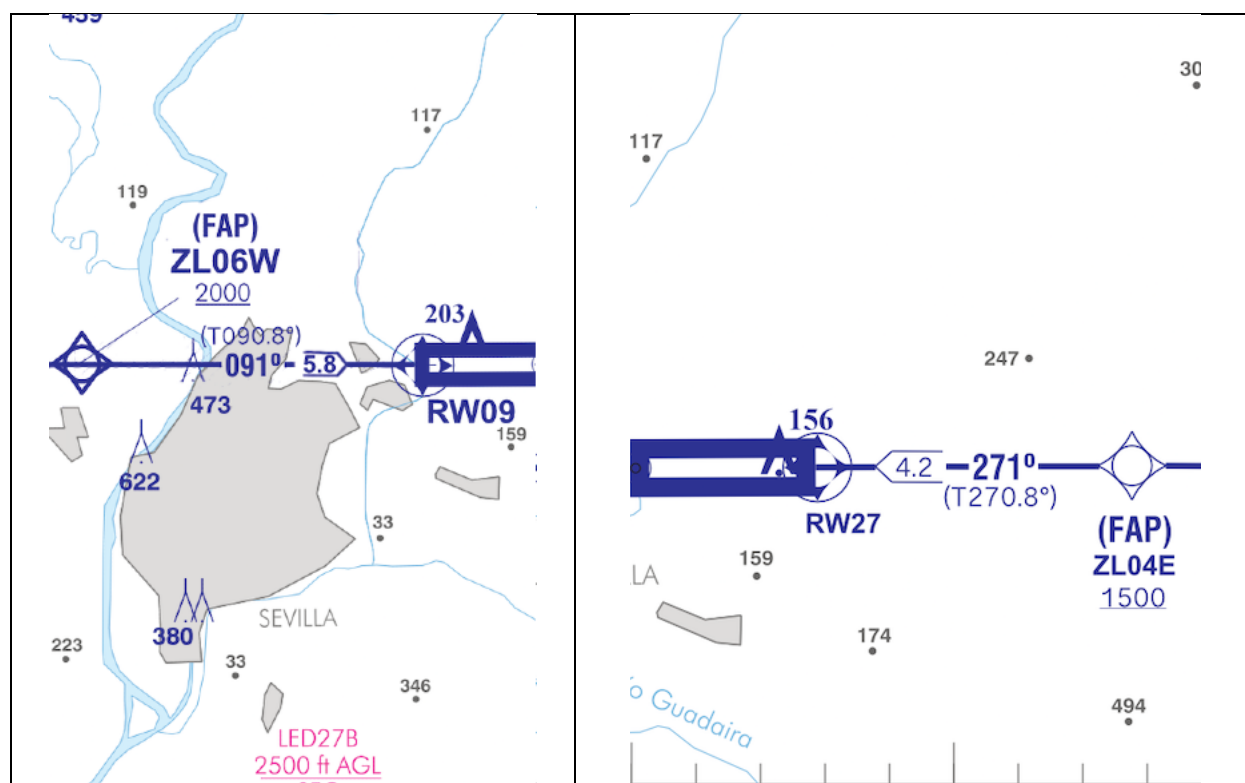


Figura 4.9: Segmento de Aproximación Final LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)

4.4.4 Aproximación frustrada

Para la aproximación frustrada, siguiendo los pasos indicados por la OACI, situamos para la aproximación a la RWY09, el punto ZL600 justo antes de realizar el viraje hacia el circuito de espera, y de la misma forma para la otra aproximación, situamos ZL402 antes de un viraje, justo al llegar al Obstáculo 473 [Figura 7.1] de 140m, En este segundo caso, cabe resaltar que el viraje es superior a 90°, que permitirá evitar los obstáculos que encontramos en la fase de aproximación inicial de la 09 en la zona oeste del aeropuerto.

Además, podemos identificar para la aproximación por la cabecera 27, varios Leg Types analizados en 3.2.1.1, como pueden ser el TF que dirige a la aeronave hacia ZL402 pero con objetivo de terminar dirigiéndose a NIKAL. También lo encontramos para la frustrada de la 09 un CF, que marcaría el camino con derrota 27 hacia TOLVO.

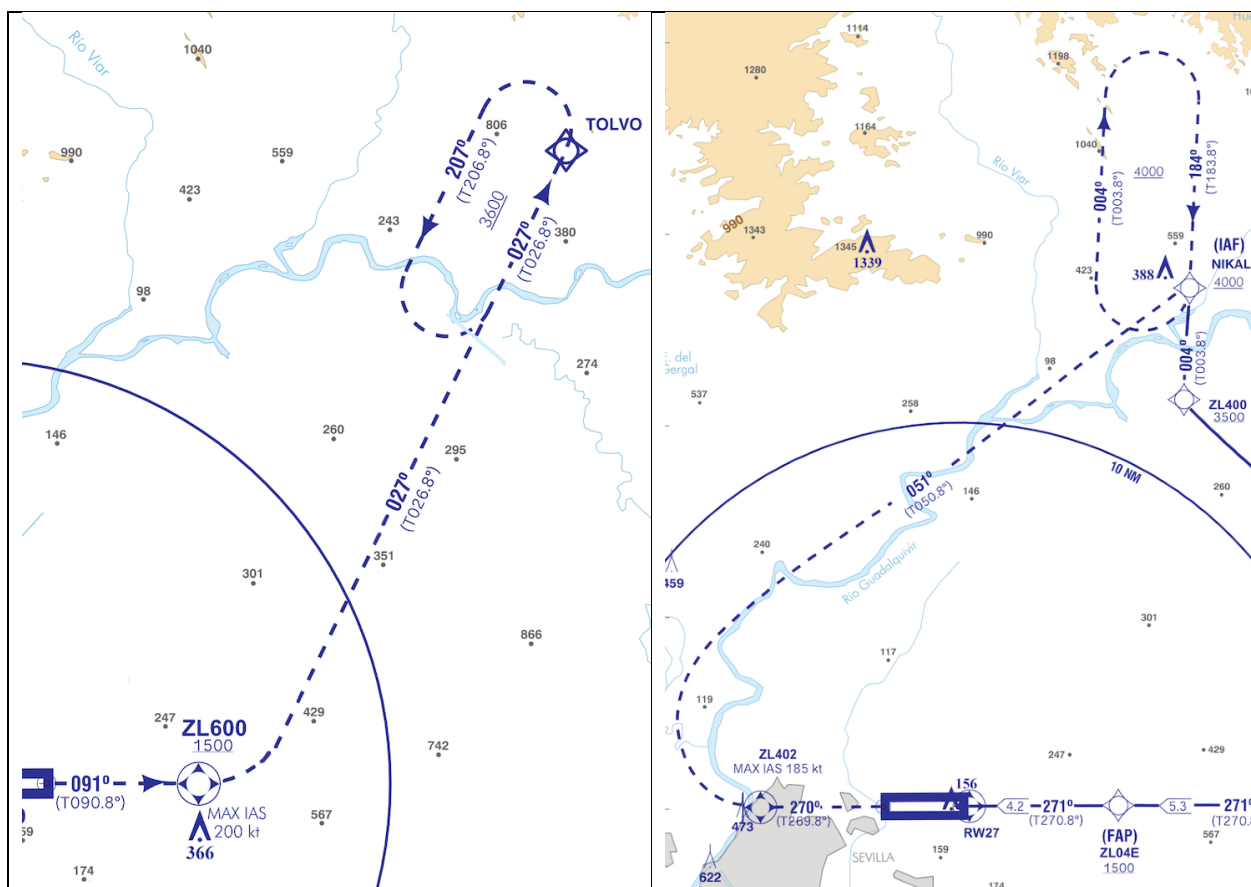


Figura 4.10: Segmento de Aproximación Frustrada LPV en LEZL para las cabeceras 09 (izquierda) y 27 (derecha)

4.4.5 Perfil de la aproximación

Tal como indica el Doc. 8697, Capítulo 7 - Especificaciones generales, Sección 7.3.2, Anexo 4, referencia 3.5.1 [31], es necesario que la carta muestre tanto la planta como el perfil de la pista, incluyendo los ángulos de trayectoria y, en caso de haberlos, los obstáculos destacados. Así, para nuestras aproximaciones, tenemos el resultado mostrado en la Figura 4.12. Aquí podemos ver que la Senda de Planeo para ambas se sitúa en 3°, pudiendo cumplir la medida deseada según OACI [11] por no existir obstáculos que obliguen a modificar este valor. Además, en el perfil podemos diferenciar los WP más importantes tanto de la aproximación como de la frustrada, prestando especial atención a ZL600, ubicado como se verá posteriormente en un giro de 90° hacia el circuito de espera.

Las altitudes mostradas en la carta AIP simulada, como las correspondientes a los puntos ZL04E o ZL05E, han sido estimadas conforme a los criterios establecidos en el Doc 8168 de OACI [2], en particular los relativos al diseño de las superficies OAS y a la pendiente de descenso nominal (3°). Para su definición se partió del análisis detallado de los obstáculos publicados en el AIP, recogido previamente en el apartado 4.2.1. Además, se realizó una verificación complementaria del relieve y de

posibles elementos significativos fuera del entorno OAS convencional, mediante el uso de herramientas cartográficas como Google Earth, identificando puntos elevados como torres de comunicación en la zona de Valencina o desniveles suaves al suroeste de Carmona.[Figura 4.11]

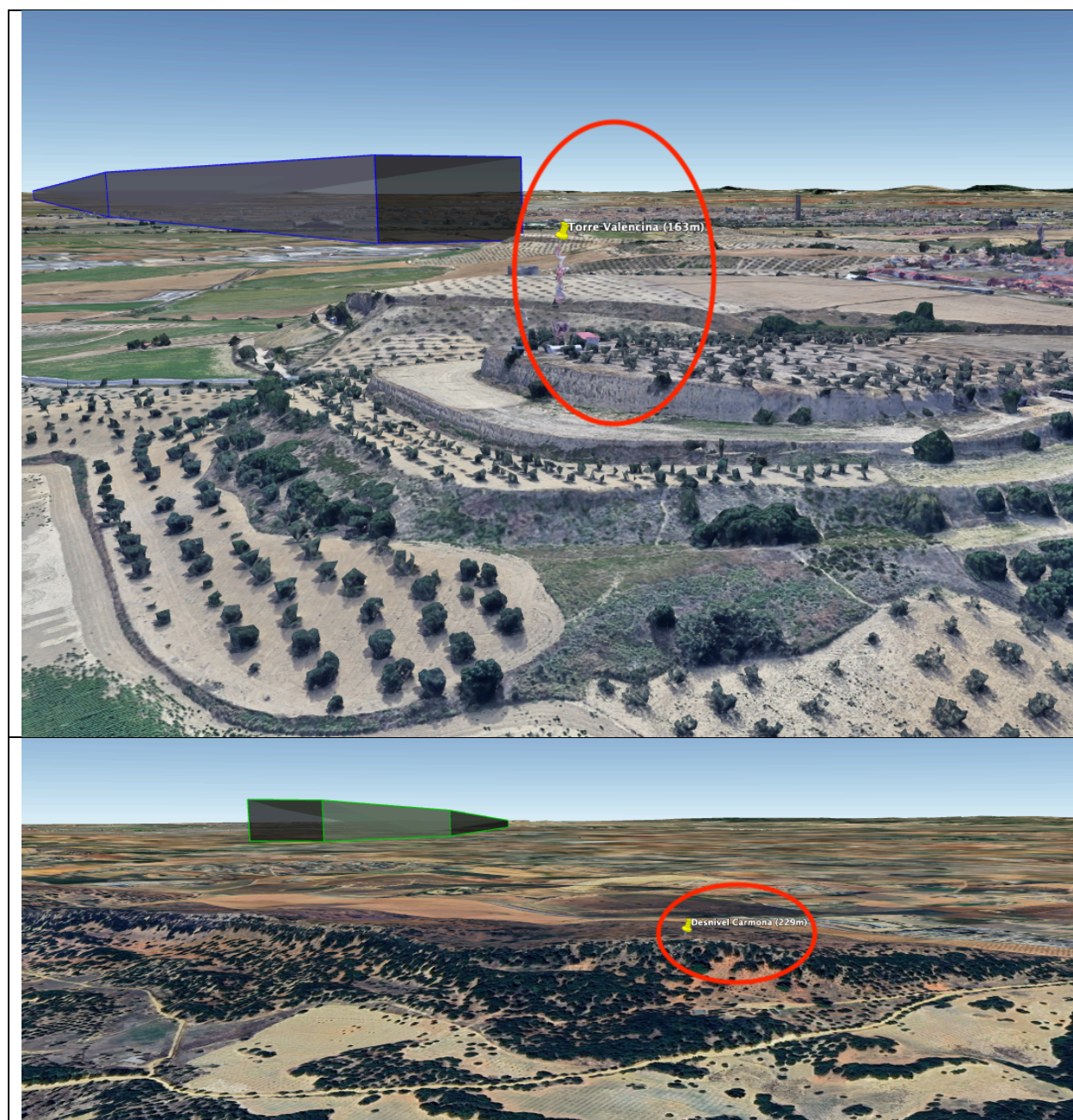
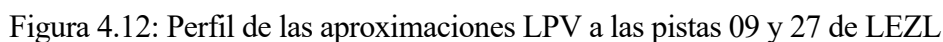


Figura 4.11: Obstáculos más elevados en los alrededores. Torre de comunicaciones en valencina (arriba) y desnivel cercano al municipio de Carmona (abajo).

Aunque este análisis adicional fue de carácter aproximado, se realizó con el objetivo de reforzar la fiabilidad del diseño y asegurar que las altitudes superan los mínimos exigidos. Asimismo, estas altitudes fueron verificadas con la altitud de cruce del umbral (TCH, asumida acorde al estándar de 50 ft) y los requerimientos geométricos del perfil vertical, tal como se representa en la Figura 4.12, y se enmarcan dentro de los principios de diseño de procedimientos LPV definidos en el Doc 9613 de OACI [11].



Para ambas cartas completas aplica también la simbología propia especificada en el Apéndice 2 – Símbolos cartográficos OACI [32] en la que podemos encontrar la forma de representación de la topografía e hidrografía del terreno [Figura 4.13].

Figura 4.13: Símbolos para la topografía e hidrografía.

Además, al definir la trayectoria se han empleado los símbolos cartográficos de la Figura 4.14, en nuestro caso los aplicables a la aproximación LPV, que serían los puntos de notificación VFR e intersección y los WP. Esta simbología, tal y como se puede comprobar en [29], queda unificada con la del resto de cartas del territorio español, cumpliendo el requisito establecido en [31].

	Facultativa de paso	Obligatoria de paso	Facultativa sobrevuelo	Obligatoria sobrevuelo
Punto de notificación VFR				
Intersección INT				
VORTAC				
TACAN				
VOR				
VOR/DME				
NDB				
Punto de recorrido WPT				

Figura 4.14: Notificación y funcionalidad “de paso/sobrevuelo”

5 VENTAJAS Y MEJORAS DE LPV FRENTE A ILS

“When everything seems to be going against you, remember that the airplane takes off against the wind, not with it.”

-Henry Ford-

5.1 Simultaneidad y continuidad operativa

Un factor a tener en cuenta al comparar ambos tipos de aproximación es la disponibilidad y continuidad del servicio que se provee. El LPV mejora la disponibilidad del servicio respecto al ILS, cuya antena del localizador requiere zonas de protección a su alrededor, lo cual restringe la operación simultánea de varias aeronaves, ya que cualquier entrada en la zona de protección podría interrumpir la señal y afectar a la continuidad. [2]

El impacto de esta menor disponibilidad se entiende desde el punto de vista operativo. Durante aproximaciones con ILS, el mantenimiento de la zona crítica libre obliga a espaciar las aeronaves hasta que la precedente ha abandonado completamente la pista y la zona de protección del localizador. Esta necesidad técnica impone, en muchos casos, una espera adicional incluso cuando las condiciones meteorológicas permitirían reducir las separaciones por estela turbulenta. Estas separaciones, que se definen en términos de tiempo [Figura 5.1], comienzan a medirse una vez que la aeronave precedente ha tocado tierra. Sin embargo, si esa aeronave libera la pista por una salida lejana, la zona crítica del ILS puede seguir ocupada durante un intervalo adicional, obligando a demorar la autorización de aterrizaje de la siguiente aeronave. Esta limitación impuesta por la protección del sistema de guiado puede ser, en ciertos escenarios, más restrictiva que los propios márgenes requeridos por separación por estela. [33]

Grupo de estela turbulenta de la aeronave que precede	Grupo de estela turbulenta de la aeronave que sigue	Separación mínima por estela turbulenta en función del tiempo
A	B	100 segundos.
	C	120 segundos.
	D	140 segundos.
	E	160 segundos.
	F	160 segundos.
	G	180 segundos.
B	D	100 segundos.
	E	120 segundos.
	F	120 segundos.
	G	140 segundos.
C	D	80 segundos.
	E	100 segundos.
	F	100 segundos.
	G	120 segundos.
D	G	120 segundos.
E	G	100 segundos.

Figura 5.1: Separaciones por estela turbulenta en España. [34]

Recientemente, desde Eurocontrol [35], se ha estado analizando esta casuística, especialmente desde la llegada del A380, aunque se extrapola también a las aeronaves de menor tamaño, y aún está pendiente de una posible variación esta distancia de seguridad causada por las limitaciones del ILS, pues se han reportado ciertos casos de aeropuertos donde han tenido que ralentizar o al menos añadir comunicaciones extras con las aeronaves que preceden cuando se dan momentos de tráfico denso.

Por su parte, las RNP APCH con mínimos LPV no llevan este problema arraigado, pues la disponibilidad depende únicamente de los satélites y del sistema de aumentación, que no se verá colapsado aun en las mayores situaciones de tráfico que pueda tener el aeropuerto ni está sujeto a interrupciones por mantenimiento o interferencias locales.

5.2 Integridad

Como ya vimos anteriormente, la integridad es uno de los factores clave que deben asegurarse en cualquier operación. En el caso de las aproximaciones con ILS, la integridad se verifica mediante tres factores:

- Correcta alineación de las antenas transmisoras. Estando las del localizador en la cabecera contraria de la pista, esto asegurará que la aeronave se encuentra alineada con la pista.
- Comprobaciones de vuelo. Incluye todas las verificaciones que deben realizar los pilotos antes de comenzar la aproximación.
- Monitores de integridad de la señal transmitida. Serán las comprobaciones internas que el propio sistema de la aeronave debe realizar.

Por su parte las RNP APCH con mínimos LPV proporcionan guía angular en el plano lateral y vertical, similar a un ILS, pero llevan la información de la aproximación final codificada en un Data Block dentro de la base de datos de navegación interna de la aeronave (FAS DB) [Figura 5.2]. Así, llevando la trayectoria final de aproximación codificada y protegida mediante algoritmos CRC (Cyclic Redundancy Check) garantizan la integridad de la señal. [36] De esta forma se reduce el riesgo de fallos en la señal y se evitan errores de guiado provocados por interferencias en radiofrecuencia o distorsiones, que podrían afectar dada la cercanía del aeropuerto con núcleos urbanos. [25]

SBAS FAS Data Block Coding Table Graz RNAV (GNSS) RWY 35	
Input Data	
Parameters	Values
Operation Type	0
SBAS Provider	1
Airport Identifier	LOWG
Runway	35
Runway Direction	2
Approach Performance Designator	0
Route Indicator	
Reference Path Data Selector	0
Reference Path Identifier	E35A
LTP/FTP Latitude	465840.0300N
LTP/FTP Longitude	0152635.8100E
LTP/FTP Ellipsoidal Height (metres)	378.5
FPAP Latitude	470014.1460N
Delta FPAP Latitude (seconds)	94.1160
FPAP Longitude	0152609.9025E
Delta FPAP Longitude (seconds)	-25.9075
Threshold Crossing Height	53.0
TCH Units Selector	0
Glidepath Angle (degrees)	3.10
Course Width (metres)	107.00
Length Offset (metres)	224
HAL (metres)	40.0
VAL (metres)	50.0
Output Data	
Data Block	10 07 17 0F 0C A3 00 00 01 35 33 05 3C 22 29 14 44 A6 A0 06 C9 22 48 DF 02 99 35 FF 12 02 36 01 6C 1C C8 FA AE 38 5C AF
Calculated CRC Value	AE385CAF
Parameters	Values
ICAO Code	LO
LTP/FTP Orthometric Height (metres)	331.5
FPAP Orthometric Height (metres)	331.5

Figura 5.2: Tabla de codificación de un FAS Data Block de Austrocontrol.

5.3 Impacto en futuras ampliaciones del aeropuerto

No se debe dejar de lado cuando se valoran las ventajas de la implantación de una nueva tecnología, la visión a futuro del Aeropuerto de Sevilla, y el impacto que puede llegar a tener la implantación de aproximaciones con mínimos LPV. Para ello, revisando el Plan Director del Aeropuerto de Sevilla, encontramos el análisis del "Máximo Desarrollo Posible" de este.

Aunque esta pueda parecer una visión algo desfasada, pues se aprobó en marzo del año 2000, los condicionantes del entorno apenas han variado respecto a lo proyectado, y las predicciones de

futuras obras en el entorno del aeropuerto, como la ubicación prevista del Parque Aeronáutico, se han cumplido con exactitud [37].

De esta forma, la alternativa 3 [Figura 5.3] sería la futura ampliación a dos pistas del aeropuerto. En este caso, contar con el sistema LPV en la actual pista sería muy conveniente para evitar inversiones en nuevas radioayudas, pues no haría falta realizar ninguna instalación, ya que se basa en SBAS y este no necesita receptores en el aeropuerto. Sin embargo, de seguir únicamente con ILS, serían necesarias las respectivas antenas en cabecera de pista para el localizador, así como las antenas para la Senda de Planeo en el lateral de la nueva pista.

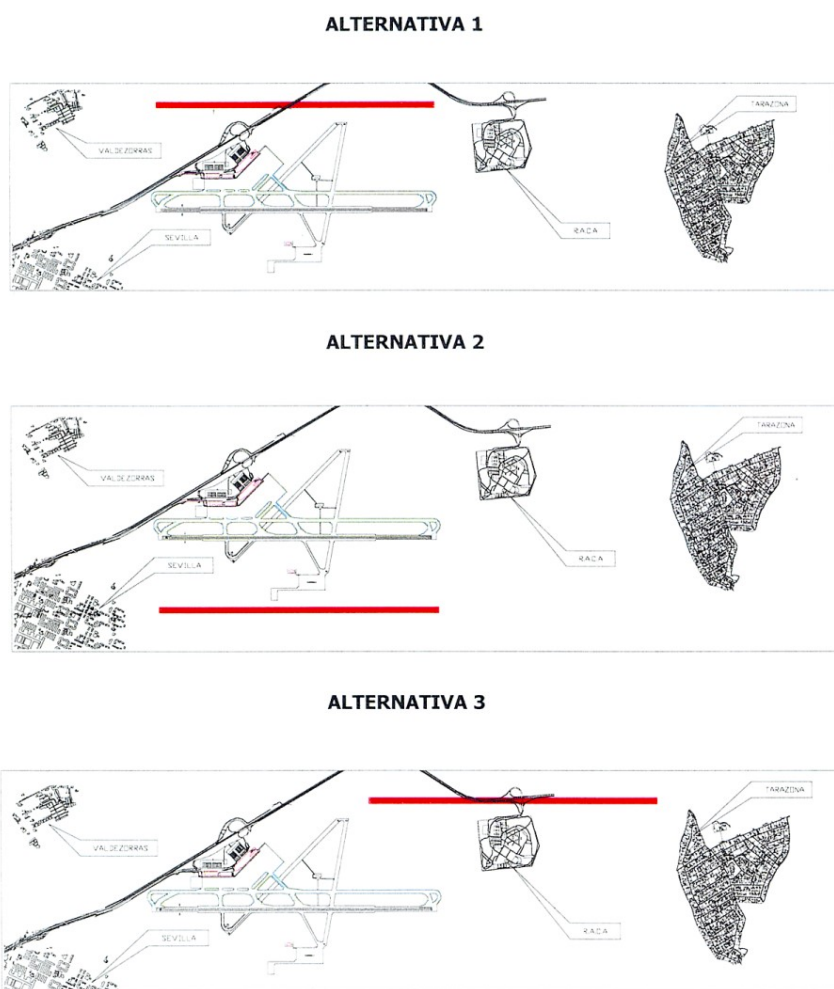


Figura 5.3: Posibilidades de ampliación del Aeropuerto de Sevilla.

5.4 Costes operativos

En verano del 2000, la OACI calculó los costes aproximados de las distintas operativas de un aeropuerto. Para el caso del ILS, el coste de mantenimiento anual quedaba en 17100\$, a los que debemos sumar los 50000\$ por cada inspección [38]. Ajustando este valor con la inflación desde entonces, y utilizando como referencia más reciente el artículo realizado en la Universidad Federal de

Tecnología Owerri en 2018 [39], podemos estimar en 85000€ la cantidad anual necesaria para mantener el actual sistema ILS, sin contar gastos de certificación e inspección periódicas.

Si bien parte de esta cantidad sirve para las luces de pista, necesarias también para realizar la RNP APCH, pues esta actúa con las mismas condiciones de visibilidad que el ILS en CAT I, es un coste que no sería necesario asumir por parte del aeropuerto si solo emplease LPV, pues en Europa, el sistema SBAS es financiado por la UE, lo cual reduce aún más la carga económica para el aeropuerto.

5.5 Transición y futuro del ILS

En alineación con la estrategia europea de optimización de infraestructuras de navegación aérea, el Plan de Transición PBN de España establece siguiendo además las recomendaciones de la OACI y EUROCONTROL, según la Regulación Europea No 2018/1048, la retirada de los sistemas ILS, basándose principalmente en todas las ventajas que se han expuesto a lo largo de este proyecto.

Así, se espera que en 2030 tan solo sea necesaria una red mínima de navegación terrestre, especialmente reservada para situaciones de emergencia, que consistirá en mantener ciertos VOR/DME en puntos estratégicos para la fase de ruta, ILS de CAT II/III, que no aplica para el aeropuerto de Sevilla, y optimizar la red DME para que permita operaciones RNAV 1 y RNAV 5. [1]

Para ello, además del aumento presupuestario que se está destinando a implementar más sistemas GBAS, promovido tanto por la Comisión Europea como por EASA, también se está impulsando la adopción del uso de GNSS con múltiples constelaciones en doble frecuencia, en progreso respecto al posicionamiento actual basado en la única frecuencia GPS L1. Este sistema, llamado DMFC GNSS, busca ser implementado durante los 3 años siguientes a la redacción de este trabajo [40], de forma que esté listo para la fecha límite de implementación de aproximaciones LPV en el año 2030.

6 CONCLUSIONES

Con este estudio se ha permitido comparar el sistema de aterrizaje instrumental ILS con las aproximaciones LPV, evaluando sus diferencias en términos operativos, técnicos y económicos en el contexto del Aeropuerto de Sevilla. A lo largo del análisis, se ha comprobado que el LPV representa una alternativa viable al ILS CAT I, ofreciendo una precisión similar sin necesidad de una alta inversión en infraestructura terrestre.

En términos de seguridad y redundancia, el LPV ofrece ventajas importantes al no depender de una única infraestructura terrestre, sino de un sistema de satélites con múltiples fuentes de señal y mecanismos de aumentación que, como se ha visto, garantizan la integridad y disponibilidad del servicio. Sin embargo, su implementación no es perfecta, ya que requiere que las aeronaves estén debidamente equipadas con receptores compatibles y que el personal operativo se adapte a los nuevos procedimientos. Además, la posible degradación de la señal GNSS en condiciones adversas, como la actividad ionosférica elevada, debe ser tomada en cuenta cuando se opere con estos procedimientos.

A pesar de ello, la modernización del espacio aéreo impulsada por la EASA buscando la transición hacia una navegación PBN completa hacen que la implantación de las aproximaciones LPV sean clave para llegar hacia ese futuro común. La adopción en el Aeropuerto de Sevilla supondrá un avance significativo en términos de eficiencia, coste y accesibilidad, siempre que se acompañe de un proceso de implementación coordinado con las normas vigentes estudiadas y las necesidades operativas del sector.

7 ANEXO I: CARTAS AERONÁUTICAS

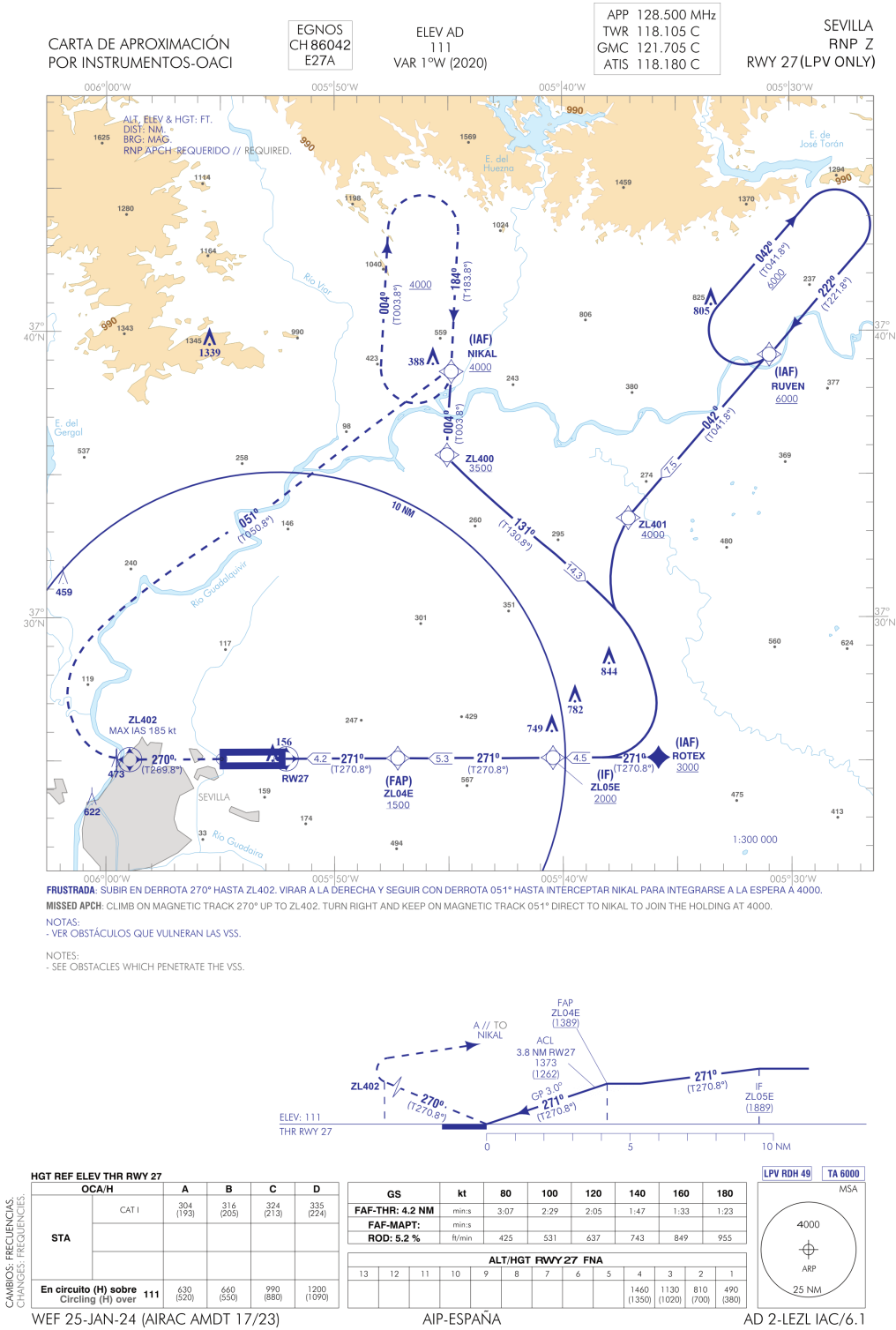


Figura 7.1: Carta AIP RNP APCH (LPV ONLY) RW27.

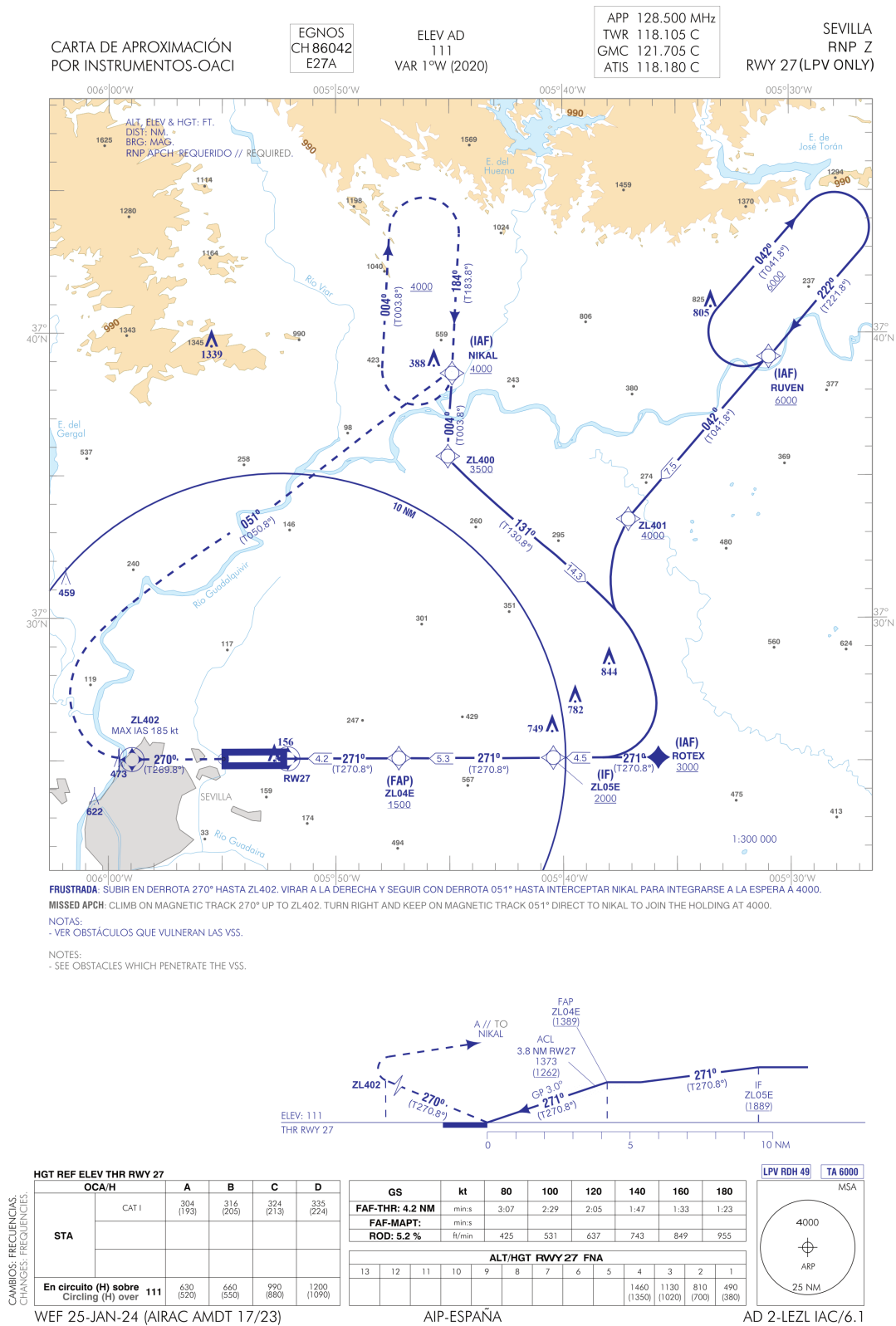


Figura 7.2: Carta AIP RNP APCH (LPV ONLY) RW09.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ENAIRE - CIDETMA, «Plan de Transición PBN en España,» 27 11 2023. [En línea]. Available: https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/pbn_transition_plan_spain_v4.1.pdf. [Último acceso: 12 2024].
- [2] ICAO - OACI, Doc 8168 - Volume I: Flight Procedures, 2018.
- [3] Pilot Mall, "ILS Approach: Instrument Landing Systems Explained," [Online]. Available: <https://www.pilotmall.com/blogs/news/ils-approach-instrument-landing-systems-explained>. [Accessed 01 03 2024].
- [4] R. Holm, ILS Fundamentals: The Instrument Landing System in theory, 2017.
- [5] M. M. A. Eltahier, «Review of Instrument Landing System,» *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 12, nº 2, p. 8, 2017.
- [6] ICAO - OACI, Annex 10: Aeronautical Telecommunications, 2001.
- [7] Federal Aviation Administration (FAA), "Order 8400.13F," 2022.
- [8] Federal Aviation Administration (FAA), "Siting Criteria for Instrument Landing Systems - ORDER 6750.16E," 2014.
- [9] E. Harris, "ATM Communications Navigation and Surveillance".
- [10] ICAO - OACI, Annex 6 - Operation of Aircraft - Part II - International General Aviation - Aeroplanes, 2022.
- [11] ICAO - OACI, Doc 9613 - Performance-based Navigation (PBN) Manual, 2008.
- [12] Federal Aviation Administration (FAA), "Section 2. Performance-Based Navigation (PBN) and Area Navigation (RNAV)," [Online]. Available: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap1_section_2.html. [Accessed 04 2024].
- [13] ICAO - OACI, DOC 9905 - Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual, 2009.
- [14] Federal Aviation Administration (FAA), "AC 90-101A - Approval Guidance for Required Navigation Performance (RNP) Procedures with Authorization Required (AR) Including Change 1," 2011. [Online]. Available: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_90-101A_CHG_1.pdf. [Accessed 10 2024].

- [15] EUSPA - European Union Agency for the Space Programme, «What is GNSS,» [En línea]. Available: <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/galileo/what-gnss>.
- [16] EASA, "CS-ETSO European Technical Standard Orders," 08 2022. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-etso-european-technical-standard-orders#cs-etso-european-technical-standard-orders>. [Accessed 04 2025].
- [17] EASA, "Easy Access Rules for Air Operations (Regulation (EU) No 965/2012)," 2025.
- [18] ICAO - OACI, Annex 15 - Aeronautical Information Services, 2018.
- [19] ICAO - OACI, «GNSS & GNSS Augmentation Systems,» 04 2019. [En línea]. Available: <https://www.icao.int/WACAF/African-FPP/Documents/2021/PBN%20ADW/00%20-%20GNSS%20and%20Augmentations%20apr21.pdf>. [Último acceso: 10 2024].
- [20] Federal Aviation Administration (FAA), "AC 20-138D - Airworthiness Approval of Positioning and Navigation Systems," Federal Aviation Administration, 2014.
- [21] EUROCAE, "ED-72E ("Minimum Operational Performance Standards for GPS Airborne Systems")".
- [22] ICAO - OACI, «GUIA PARA LA IMPLEMENTACION DE SISTEMAS DE AUMENTACION BASADOS EN TIERRA,» 05 2013. [En línea]. Available: <https://www.icao.int/sam/edocuments/guiagbas.pdf>. [Último acceso: 10 2024].
- [23] everythingRF, "What is GNSS Augmentation?," 13 04 2022. [Online]. Available: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-gnss-augmentation>. [Accessed 03 2024].
- [24] EASA, Annex II - AMC 20-28, 2012.
- [25] EASA, «Easy Access Rules for Airborne Communications, Navigation and Surveillance (CS-ACNS) (Issue 4),» EASA eRules, 2020.
- [26] PANS-OPS OAS SOFTWARE DEVELOPMENT V4.5, 11 2021. [En línea]. Available: https://www.enri.go.jp/cnspub/fks442/script45.pl?appcat=4&gsv=3.0&locthd=3459&rdh=15&mappv=2.5&catstd=1&std=0&std=0&hei_x=0&hei_y=0&fcath=2. [Último acceso: 12 2024].
- [27] OACI - ICAO, "PANS-OPS Flight Procedure Design Training for CAAs," 08 2021. [Online]. Available: https://www.icao.int/WACAF/African-FPP/Documents/2021/PANS-OPS%20FPDTC/13-pcca4_Precision%20approach_aug21.pdf. [Accessed 05 2025].

- [28] «PANS-OPS OAS SOFTWARE DEVELOPMENT VER 4.5,» [En línea]. Available: https://www.enri.go.jp/cnspub/fks442/script45.pl?appcat=4&gsv=3.0&locthd=3459&rdh=15&mappv=2.5&catstd=1&std=0&std=0&hei_x=0&hei_y=0&fcath=2.
- [29] ENAIRE, «AIP España,» 2025. [En línea]. Available: <https://aip.enaire.es/AIP/>.
- [30] ENAIRE, «AD 2 LEZL,» AIP España, Sevilla, 2024.
- [31] ICAO - OACI, «DOC 8697 MANUAL DE CARTAS AERONÁUTICAS,» ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, 2016.
- [32] ICAO - OACI, «Apéndice 2 — Símbolos cartográficos OACI,» ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, 2016.
- [33] ICAO - OACI, "DOC 040 - EUROPEAN GUIDANCE MATERIAL ON MANAGEMENT OF ILS CRITICAL AND SENSITIVE AREAS," 2020. [Online]. Available: <https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EUR%20Documents/EUR%20Documents/040%20-%20European%20Guidance%20Material%20on%20Management%20of%20ILS%20Critical%20and%20Sensitive%20Areas.pdf>. [Accessed 2025].
- [34] BOE - MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, RELACIONES CON LAS CORTES Y MEMORIA DEMOCRÁTICA, «Real Decreto 426/2021, de 15 de junio, por el que se modifican el Reglamento de Circulación Aérea,» 06 2021. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2021/06/16/pdfs/BOE-A-2021-10028.pdf>. [Último acceso: 05 2025].
- [35] EUROCONTROL, "ILS Signal Protections," 2023. [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/ils-signal-protections>. [Accessed 2025].
- [36] EGSA - European Global Navigation Satellite Systems Agency, "RNP APCH down to LPV minima," [Online]. Available: https://egnos.gsc-europa.eu/sites/default/files/training_material/LPV%20Training_package.pdf.
- [37] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, «Plan Director del aeropuerto de Sevilla. Máximo desarrollo posible,» Dirección General de Aviación Civil, 2001.
- [38] ICAO - OACI, "ALLPIRG/4-WP/28 Appendix," 2001.
- [39] Federal University of Technology Owerri, "Aircraft Visibility Improvement," *Futo Journal Series (FUTOJNLS)*, vol. 4, no. 1, 2018.
- [40] ICAO - OACI, "Dual-Frequency Multi-Constellation GNSS CONOPS," 2018.