



NAVEGACIÓN BASADA EN PRESTACIONES.
DISEÑO DE UNA CARTA DE
APROXIMACIÓN RNP PARA EL
AEROPUERTO DE LÉRIDA

Memoria del Trabajo Fin de Grado

en

Gestión Aeronáutica

Realizado por

Daniel Egea Cullell

y dirigido por

Mercedes Elizabeth Narciso Farias

Jordi Manzano Puigredon

Escuela de Ingeniería

Sabadell, Enero de 2021

La abajo firmante, **Mercedes E. Narciso**,
profesora de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el Trabajo al que corresponde la presente memoria
ha sido realizado bajo su dirección por

Daniel Egea Cullell

Y para que conste firma la presente.

Sabadell, Enero de 2021

MERCEDES
ELIZABETH
NARCISO
FARIAS

Firmado digitalmente
por MERCEDES
ELIZABETH NARCISO
FARIAS
Fecha: 2021.02.08
21:17:11 +01'00'

Firmado: **Mercedes E. Narciso**

El abajo firmante, **Jordi Manzano Puigredon**,
profesor de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el Trabajo al que corresponde la presente memoria
ha sido realizado bajo su supervisión por

Daniel Egea Cullell

Y para que conste firma la presente.

Sabadell, Enero de 2021

Firmado: **Jordi Manzano Puigredon**

HOJA DE RESUMEN – TRABAJO DE FIN DE GRADO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA

Título del Trabajo de Fin de Grado:

Navegació Basada en Prestacions. Disseny d'una carta d'aproximació RNP per a l'aeroport de Lleida.

Navegación Basada en Prestaciones. Diseño de una carta de aproximación RNP para el aeropuerto de Lérida.

Performance Based Navigation. Design of an RNP approach chart for Lleida airport.

Autor: Daniel Egea Cullell

Fecha: Enero de 2021

Tutores: Mercedes E. Narciso Farias y Jordi Manzano Puigredon

Titulación: Grado en Gestión Aeronáutica

Palabras clave

- Català: Navegació Basada en Prestacions, Aproximació instrumental, Required Navigation Performance (RNP), Carta d'aproximació RNP.
- Castellà: Navegación Basada en Prestaciones, Aproximación instrumental, Required Navigation Performance (RNP), Carta de aproximación RNP.
- Anglès: Performance Based Navigation, Instrumental approach, Required Navigation Performance, RNP approach chart.

Resumen del Trabajo de Fin de Grado

- Català: En el present treball es realitza una anàlisis del concepte de la **navegació basada en prestacions (PBN)**, amb l'objectiu de crear i implementar una aproximació instrumental de tipus RNP a l'aeroport de Lleida. Per a dissenyar aquesta aproximació es du a terme un estudi de l'estat de l'art de l'aeroport de Lleida i de la PBN a Espanya amb la finalitat de determinar les necessitats de l'aeroport, i dels recursos dels que es disposa (infraestructures, equips, lleis, etc). Finalment s'elabora una carta de l'aproximació dissenyada que s'utilitza per a realitzar una simulació amb l'aeronau Airbus A320 mitjançant el software Xplane 11.
- Castellà: En el presente trabajo se realiza un análisis del concepto de la **navegación basada en prestaciones (PBN)**, con el objetivo de crear e implementar una aproximación instrumental de tipo RNP en el aeropuerto de Lérida. Para de diseñar esta aproximación se lleva a cabo un estudio del estado del arte del aeropuerto de Lérida y de la PBN en España con la finalidad de determinar las necesidades de dicho aeropuerto, y de los recursos de los que se dispone (equipos, infraestructuras, leyes, etc). Finalmente, se elabora una carta de la aproximación diseñada que se utiliza para realizar una simulación de vuelo con la aeronave Airbus A320 mediante el software Xplane 11.
- Anglès: In the present work an analysis is performed about the concept of the **performance based navigation (PBN)** in order to create and implement an RNP instrumental approach in the airport of Lleida. To do the design of this approach is necessary to carry out the study of the state of the art of the airport of Lleida and of the PBN in Spain with the purpose of knowing the necessities of the airport, and the available resources disposed (infrastructures, systems, laws, etc). Finally, the design of the approach chart is elaborated with the objective of being simulated with an Airbus A320.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Origen y motivación	3
1.3 Contenido de la memoria.....	4
2. ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL TFG	5
2.1 Situación actual	5
2.2 Situación a desarrollar.....	6
2.3 Objetivos	6
2.4 Usuarios.....	6
2.5 Metodología del desarrollo	7
2.6 Recursos	9
2.7 Costo.....	10
2.8 Planificación	11
2.9 Riesgos.....	12
2.10 Viabilidad técnica y operacional del TFG	12
2.11 Viabilidad económica y legal del TFG	13
2.12 Conclusiones del capítulo.....	13
3. ESTUDIO DEL CONCEPTO PBN Y APROXIMACIONES RNP	14
3.1 Navegación Aérea	14
3.1.1 Navegación dentro del CNS.....	16
3.1.2 Infraestructuras de apoyo a la navegación aérea	17
3.2 Navegación Basada en Prestaciones (PBN).....	21
3.2.1 Concepto PBN.....	21
3.2.2 Requisitos del PBN	22
3.2.3 Componentes del PBN.....	23
3.3 Aproximaciones RNP	30
3.3.1 Fases de una aproximación RNP	30
3.3.2 Tipos de aproximación RNP	34
3.3.3 Ejemplo de una carta de aproximación RNP.....	40
3.4 Conclusiones del capítulo.....	41

4. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE	43
4.1 Estudio del estado del arte del aeropuerto de Lérida	43
4.1.1 El aeropuerto de Lérida.....	44
4.1.2 Aproximaciones actuales.....	47
4.1.3 Solución RNP para el aeropuerto de Lleida-Alguaire	50
4.2 Estudio del estado del arte del PBN en España.....	51
4.2.1 Marco estratégico del PBN en España en 2014	51
4.2.2 Situación actual de la PBN en ESPAÑA.....	55
4.3 Estudio del estado del arte del Airbus A320	59
4.3.1 Procedimientos y equipos del Airbus A320 en función de la especificación de navegación.....	59
4.4 Conclusiones del capítulo.....	64
5. DISEÑO DE LA CARTA DE APROXIMACIÓN RNP PARA EL AEROPUERTO DE LÉRIDA	65
5.1 Descripción parte 1 de las cartas de aproximación.....	69
5.2 Descripción parte 2 de las cartas de aproximación.....	71
5.3 Descripción parte 3 de las cartas de aproximación.....	74
5.4 Conclusiones del capítulo.....	79
6 INSTRUMENTOS Y MCDU DEL AIRBUS A320	80
6.1 Pantallas de presentación del Airbus A320.....	80
6.1.1 Primary Flight Display (PFD)	81
6.1.2 Navigation Display (ND)	84
6.2 Pantallas del Multipurpose Control Display Unit (MCDU)	86
6.3 Conclusiones del capítulo.....	92
7 SIMULACIÓN DE LA APROXIMACIÓN RNP DE LÉRIDA CON EL A320	93
7.1 Creación de Waypoints	93
7.2 Inserción de los puntos en el plan de vuelo (F-PLN)	95
7.3 Simulación del vuelo	98
7.4 Conclusiones del capítulo.....	105
8 CONCLUSIONES	106
8.1 Conclusiones sobre los objetivos	106
8.2 Conclusiones personales	107
8.3 Ampliaciones y mejoras del proyecto	108
8.4 Desviaciones de la planificación.....	108
GLOSARIO	112
REFERENCIAS	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Estimación del coste del software y del hardware.....	10
Tabla 2.2 Estimación del coste del trabajador.....	10
Tabla 2.3 Estimación del coste para la realización del TFG.....	11
Tabla 2.4 Planificación del TFG.....	11
Tabla 3.1 Infraestructuras que participan en función de las especiaciones de navegación.....	24
Tabla 8.1 Duración y planificación real del TFG.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Metodología de desarrollo del TFG	7
Figura 3.1 Conceptos sobre PBN y aproximaciones RNP	14
Figura 3.2 Navegación tradicional vs. RNAV.....	18
Figura 3.3 Componentes del concepto PBN.....	23
Figura 3.4 Concepto del Total System Error.....	25
Figura 3.5 Ventajas del RNAV y RNP respecto las rutas convencionales.....	26
Figura 3.6 Especificaciones de la navegación	27
Figura 3.7 Aplicaciones a la navegación	29
Figura 3.8 Separación sobre el terreno en función del tramo.....	31
Figura 3.9 Segmentos de una aproximación.....	33
Figura 3.10 Diferencia en los mínimos según la precisión de una aproximación.....	35
Figura 3.11 Aproximación RNP con guiado lateral RAIM.....	36
Figura 3.12 Aproximación Baro VNAV.....	37
Figura 3.13 Aproximación SBAS	37
Figura 3.14 Ángulos de descenso en función de la temperatura.....	38
Figura 3.15 Sendas de planeo según calaje de la presión barométrica.....	39
Figura 3.16 Indicación según el tipo de desviación.....	39
Figura 3.17 Altitudes mínimas para frustrar la aproximación en función de su tipo.....	40
Figura 3.18 Parte superior carta aproximación RNP aeropuerto de Miami.....	40
Figura 3.19 Parte inferior carta aproximación RNP aeropuerto Miami.....	40
Figura 4.1 Estado del arte: Aspectos a analizar.....	43
Figura 4.2 Ficha Aeropuerto de Lérida.....	45
Figura 4.3 STARs para la pista 31.....	48
Figura 4.4 IAF ILERDA aproximación VOR pista 13.....	49
Figura 4.5 Marco estratégico de referencia 2014-2020	52
Figura 4.6 STAR RNAV 1 RUXET del aeropuerto de Palma.....	56
Figura 4.7 Aproximación RNP Z LPV pista 29 Santander.....	58
Figura 5.1 Diseño de la carta de aproximación RNP: Aspectos a definir.....	65

Figura 5.2 Carta de aproximación RNP LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida	67
Figura 5.3 Carta de aproximación RNP LNAV/VNAV y LNAV pista 13 del aeropuerto de Lérida.....	68
Figura 5.4 Parte 1 de la carta RNP LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida.....	69
Figura 5.5 Parte 1 de la carta RNP LNAV/VNAV y LNAV pista 13 del aeropuerto de Lérida.....	69
Figura 5.6 Parte 2 de la carta RNP LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida. Vista de planta.....	72
Figura 5.7 Parte 2 de la carta RNP LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida. Vista de perfil.....	73
Figura 5.8 Parte 2 de la carta RNP Y pista 13 del aeropuerto de Lérida. Vista de perfil.....	74
Figura 5.9 Parte 3 de la carta RNP Z LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida.....	75
Figura 5.10 Parte 3 de la carta RNP Y LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida.....	75
Figura 5.11 Obstáculos de la senda pista 13 de Lérida.....	77
Figura 5.12 Obstáculos de la senda pista 31 de Lérida.....	77
Figura 6.1 Instrumentos y MCDU del A4320: Conceptos a definir.....	80
Figura 6.2 PFD Airbus A320.....	81
Figura 6.3 Cabecera PFD Airbus A320.....	82
Figura 6.4 Lado izquierdo del PFD Airbus A320.....	82
Figura 6.5 Parte central del PFD Airbus A320.....	83
Figura 6.6 Lado derecho del PFD Airbus A320.....	84
Figura 6.7 Navigation Display Airbus A320.....	84
Figura 6.8 Parte superior izquierda Airbus A320.....	85
Figura 6.9 Parte superior derecha ND.....	85
Figura 6.10 MCDU Airbus A320.....	86
Figura 6.11 Creación de un punto de ruta. Pantalla DATA del MCDU Airbus A320.....	87
Figura 6.12 Pantalla F-PLN del MCDU Airbus A320.....	88
Figura 6.13 Restricciones de altitud y velocidad en la pantalla F-PLN del MCDU Airbus A320.....	88
Figura 6.14 Nuevas condiciones punto REBUL. F-PLN del MCDU Airbus A320	89
Figura 6.15 Página APPR. Pantalla PERF del MCDU Airbus A320	89
Figura 6.16 Pantalla PROG para la aproximación del MCDU Airbus A320.....	91

Figura 7.1 Pasos a realizar para la aproximación RNP en la pista 13 de Lérida.....	93
Figura 7.2 Creación del punto PLL5 de la aproximación RNP en la MCDU del Airbus A320.....	95
Figura 7.3 Puntos de aproximación en MCDU y trayectoria en el ND Airbus A320.....	96
Figura 7.4 Punto DANI con la restricción de altitud y velocidad. F-PLN A320.....	97
Figura 7.5 Punto PLL5 con la restricción de altitud. F-PLN A320.....	97
Figura 7.6 Trayectoria de aproximación con espera en el punto DANI. ND A320.....	97
Figura 7.7 Pantalla PERF para la aproximación RNP en la MCDU del A320 de la simulación.....	99
Figura 7.8 PFD y ND del A320 en punto IAF DANI de la simulación.....	99
Figura 7.9 PFD y ND del A320 en punto PLL2 de la simulación.....	100
Figura 7.10 PFD y ND del A320 en punto FAF PLL5 de la simulación.....	101
Figura 7.11 Altitudes ideales según distancia a la pista. Carta RNP Lérida pista 13.....	102
Figura 7.12 Pantalla PROG en la MCDU en la milla 5 de la simulación.....	102
Figura 7.13 PFD del A320 en la milla 5 de la simulación.....	102
Figura 7.14 Pantalla PROG en la MCDU en la milla 4 de la simulación.....	103
Figura 7.15 PFD del A320 en la milla 4 de la simulación.....	103
Figura 7.16 Pantalla PROG en la MCDU en la milla 3 de la simulación.....	103
Figura 7.17 PFD del A320 en la milla 3 de la simulación.....	104
Figura 7.18 Pantalla PROG en la MCDU en la milla 2 de la simulación.....	104
Figura 7.19 PFD del A320 en la milla 2 de la simulación.....	105

1. INTRODUCCIÓN

La navegación aérea es el conjunto de técnicas y procedimientos que hacen posible que una aeronave llegue a su destino manteniendo la integridad de los tripulantes, pasajeros y personas en tierra. Esta navegación se establece por la necesidad básica de aportar seguridad a las operaciones aéreas [1].

El estudio y desarrollo de la navegación aérea no solo afecta positivamente a la seguridad en vuelo, sino que también suele aportar beneficios económicos y logísticos para empresas, aerolíneas e instituciones gubernamentales ya que también se busca que las operaciones sean fluidas y eficientes. Es por estos, y por otros motivos, por lo que a lo largo de los años se han ido estudiando cuales son las maneras más efectivas de organizar el espacio aéreo. Para ello existe el sistema de navegación aérea (ANS: *Air navigation system*) [2].

El ANS está formado por diferentes funciones, con unas labores específicas en cada aspecto principal, para que el conjunto de circulación aérea se desarrolle con altos estándares de seguridad, eficiencia y fluidez. Son un total de cinco partes formadas por:

- 1- Comunicación, navegación y vigilancia (CNS: *Communication, Navigation, Surveillance*)
- 2- Servicios meteorológicos (MET: *Meteorology*)
- 3- Gestión del tráfico aéreo (ATM: *Air Traffic Management*)
- 4- Búsqueda y rescate (SAR: *Search and Rescue*)
- 5- Servicio de información aeronáuticos (AIS: *Aeronautical Information Services*)

Aunque a lo largo del trabajo se definirán de forma detallada cada uno de estos puntos, se hará un enfoque más orientado al CNS, concretamente en el apartado de navegación, a fin de determinar cómo está avanzando este sector y que beneficios comporta al sistema de navegación aérea en general.

A lo largo de la historia de la aviación y de la industria aeronáutica en general, los dos principales métodos que se han usado para navegar son la navegación mediante reglas visuales (VFR: *Visual Flight Rules*) y la navegación mediante reglas instrumentales (IFR: *Instrumental Flight Rules*). La navegación VFR, como su nombre indica, es aquella que permite al piloto dirigir, **navegar**, y mantener la separación de seguridad con cualquier obstáculo o avión únicamente mediante la observación visual [3]. Aunque esta forma de navegar nunca vaya a desaparecer, ya que es la forma más básica e intuitiva a la hora de orientarse (sobre todo en bajas altitudes), queda muy limitada para ciertos tipos de operaciones como la aviación comercial, en la que se alcanzan altitudes de más de 30.000 pies, en las que observación visual pasa a no ser útil. Por esto y por otros motivos, surgió la navegación IFR, la cual consiste en la navegación mediante el uso de instrumentos [4].

Son muchos los instrumentos que tienen los aviones, pero cuando se habla de vuelo mediante uso de instrumentos (IFR), se hace referencia a aquellos que se usan exclusivamente para la navegación, ya que los instrumentos de control de la aeronave o de control de motor también se usan para vuelos VFR. Hay 3 tipos de instrumentos [5]:

- 1- Los instrumentos de control de la aeronave: formados por el anemómetro, altímetro, indicador de velocidad vertical, coordinador de giro y viraje, y el horizonte artificial.

- 2- Instrumentos de control del motor: formados por los indicadores de potencia o indicadores de estado de funcionamiento de motor como las revoluciones por minuto (RPM: *Revolutions per minute*) o la presión del aceite.
- 3- Los instrumentos de navegación: formados por la brújula, el indicador de rumbos, el buscador de dirección automático (ADF: *Automatic Direction Finder*), el equipo medidos de distancia (DME: *Distance Measuring Equipment*), el indicador de desviación de curso (CDI: *Course Deviation Indicator*), el indicador de sistema de aterrizaje instrumental (ILS: *Instrumental Landing System*), el piloto automático, la cabina de cristal y el sistema de gestión de vuelo (FMS: *Flight Management System*).

En referencia a lo que se ha descrito anteriormente, un piloto sería capaz de ir de un origen a un destino solamente usando los instrumentos que hay en cabina, sin tener la necesidad de hacer uso de la observación visual.

Esta forma de navegar es la que más se usa actualmente en la mayoría de operaciones aéreas debido a sus grandes y obvias ventajas como podría ser el simple hecho de poder volar a altitudes mayores de las que se podría en reglas VFR, o poder volar en días nublados en los que sería imposible mantener contacto visual con el terreno. Originalmente los aviones que volaban de manera instrumental lo hacían mediante **radioyudas**¹ como el alcance de radio omnidireccional (VOR: Very High Frequency Omnidirectional Range) o la baliza no direccional (NDB: *Non Directional Beacon*), saltando de estación en estación. Y aunque en la actualidad aún se pueda volar mediante este sistema, se están desarrollando nuevas formas como la navegación de área (RNAV: *Area Navigation*) o el rendimiento de navegación requerido (RNP: *Required Navigation Performance*) [6]. Estos permiten a una aeronave volar de un punto “A” a un punto “B” (definidos por coordenadas de latitud y longitud) sin tener que pasar obligatoriamente por encima de una estación gracias a radioayudas terrestres y/o a redes de satélites que dan señal GPS la aeronave con las ventajas que eso conlleva.

El problema surge cuando esta forma de navegar requiere que los equipos de navegación del avión deban cumplir unos requisitos mínimos de precisión, disponibilidad, integridad y continuidad para garantizar el buen funcionamiento. Para ello se creó el concepto de navegación basada en prestaciones (PBN: *Performance-Based Navigation*) el cual establece cuáles son esos requisitos mínimos y especifica el rendimiento de los sistemas RNAV y RNP para **armonizar**² este tipo de navegación [7].

Gracias al progreso de esta tecnología, se ha conseguido poder volar en todas las fases del vuelo mediante el sistema PBN consiguiendo así optimizar el espacio aéreo, mejorando las distancias de seguridad, y consiguiendo que las operaciones de aproximación y salida de la terminal sean mucho más precisas que las que se solían hacer anteriormente. Desafortunadamente, en España, a diferencia de países como Francia o Estados Unidos, aún no se ha podido aplicar la tecnología PBN en la fase de aproximación en casi ningún aeropuerto, por lo que aún se están usando los sistemas convencionales de aproximación como es el ILS o VOR.

¹ Estación o radioayuda: Antena terrestre física con aplicación a la navegación aérea.

² Armonizar: Compartir los mismos requisitos para la navegación PBN bajo una misma normativa.

En este trabajo de final de grado (TFG) se tratará de profundizar en el concepto PBN con la finalidad de diseñar una posible carta de aproximación RNP en el aeropuerto de Lérida para determinar qué ventajas podría comportar su implantación. Finalmente, y para comprobar su funcionalidad, se realizará la simulación de la aproximación que seguiría un avión comercial en el caso de que esta nueva carta existiera. Para ello se usará un software de simulación aérea llamado **Xplane 11**³ [8] junto con el avión más famoso de la familia Airbus, el Airbus A320/200 el cual cuenta con los dispositivos necesarios para realizar aproximaciones RNP.

1.1 Objetivos

Los objetivos de este TFG son:

- Profundizar en el concepto PBN en su totalidad para poder aplicarlo a un caso práctico como es el de realizar una carta de aproximación para el aeropuerto de Lérida.

Son muchos los conceptos legislativos, técnicos y operacionales que se deben tener en cuenta para poder llevar a cabo un proyecto de este tipo. Afortunadamente la propia Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) facilita al público varios manuales en los que se encuentran dictadas las diferentes normas y procedimientos que se deben seguir para llevar a cabo un proyecto como el que se quiere realizar en este TFG.

- Simular como sería la actuación de un avión A320 en el caso de que siguiera la carta de aproximación que se pretende diseñar.

Esto se plantea realizar mediante la creación de **puntos de ruta**⁴ (waypoints) mediante coordenadas de longitud y latitud en el MCDU (*Multipurpose Control Display Unit*) del avión para poder navegar sobre los puntos simulados que tendrá la nueva aproximación RNP. Se ha elegido el A320 ya que es uno de los aviones que más se usa en la actualidad para la aviación comercial, aparte de que se sabe que cuenta con la tecnología suficiente para realizar aproximaciones basada en prestaciones.

1.2 Origen y motivación

La profesión que siempre he querido ejercer es la de piloto comercial, es por ello que desde siempre he tenido interés en ver cómo funcionan las operaciones aéreas, desde el propio funcionamiento del avión hasta la gestión del tráfico aéreo. Actualmente y paralelamente al grado de gestión aeronáutica, estoy estudiando para obtener la licencia de piloto privado, la cual me abrirá paso a empezar el curso de piloto comercial. Este curso el cual estoy a punto de terminar y otras búsquedas por mi cuenta, me han dado los conocimientos suficientes para entender como es la navegación aérea actualmente y como se está desarrollando.

³ Xplane 11: Simulador de vuelo para aviación comercial y general.

⁴ Puntos de ruta: Coordenadas de longitud y latitud que determinan el curso que debe seguir el avión.

Teniendo en cuenta que el futuro de este tipo de navegación será mediante tecnología PBN, y que mi futuro va a ser el de piloto comercial, he considerado que entender el concepto de navegación por prestaciones a la perfección me ayudaría mucha a la hora de realizar el curso de piloto comercial y a comprender mejor cómo será el futuro de la aviación, y mi futuro como piloto.

Otro factor que ha motivado la realización de este TFG es por las posibles salidas laborales que se pueden tener como gestor aeronáutico. Actualmente, la presencia del Covid-19, ha provocado muchos problemas a la hora de encontrar trabajo en algunos sectores, sobre todo en el de piloto. Teniendo en cuenta que nadie asegura que pueda empezar a ejercer de piloto comercial al terminar el curso, considero que el estudio del PBN y el diseño de una carta de aproximación RNP me ayudará a ver y a plantear otras posibles salidas laborales que tengan que ver con la aviación, concretamente la gestión aeronáutica de la navegación.

1.3 Contenido de la memoria

En el capítulo 1 se lleva a cabo la introducción de este TFG en el que se definen los objetivos, el origen y motivación del mismo, y finalmente, como se organiza el contenido de la memoria.

En el Capítulo 2 se presenta el estudio de viabilidad de este TFG a fin de determinar si es factible el desarrollo del mismo ya que son muchas las variables que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el TFG.

En el capítulo 3 se lleva a cabo todo el estudio teórico necesario para poder realizar la parte práctica del proyecto. Se describe la evolución de la navegación aérea, el concepto de la Navegación Basada en Prestaciones, y los procesos y procedimientos de las aproximaciones RNP.

En el capítulo 4 se realiza el estudio del estado del arte de los tres factores que más afectan en el desarrollo del TFG. El primero de ellos es el estudio de la situación actual del aeropuerto de Lérida con el fin de encontrar las posibles carencias operacionales, y los recursos de los que se dispone (infraestructuras, radioayudas, reglamentación, etc). El segundo estudio es el de la PBN en el estado español con el objetivo de observar si es posible diseñar una aproximación en el aeropuerto de Lérida desde el punto de vista jurídico y operacional. Finalmente se comprueba el estado del Airbus A320 en relación a la PBN y al RNP con el fin de verificar si es posible llevar a cabo la simulación con esta misma aeronave.

En el capítulo 5 se diseña y se implementa la carta de aproximación RNP para la pista 13 de Lérida en el que se define cada apartado de esta misma carta para su mayor entendimiento.

En el capítulo 6 se lleva a cabo una descripción de los instrumentos y dispositivos necesarios del Airbus A320 para poder crear y seguir la aproximación del capítulo 7.

En el capítulo 7 se simula la aproximación RNP de la pista 13 de Lérida diseñada en el capítulo 5 con el Airbus A320 mediante un software de simulación de vuelo llamado Xplane 11.

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones obtenidas tras la realización del TFG en las que se pone en manifiesto los conceptos aprendidos, las modificaciones realizadas respecto la planificación inicial, y las conclusiones personales.

2. ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL TFG

En este capítulo se presenta un estudio de la viabilidad del TFG, así como la planificación y metodología que se seguirá a lo largo del desarrollo del trabajo. Como se ha indicado en el capítulo 1, en este TFG se pretende diseñar un nuevo proceso de aproximación RNP en el aeropuerto de Lérida.

2.1 Situación actual

Hay dos aspectos de la situación actual que se deben analizar para la realización del proyecto, el primer aspecto es la situación actual aeropuerto de Lérida, y el segundo es el de las aproximaciones RNP en el territorio español.

- **Situación actual en Lérida:** Actualmente el aeropuerto de Lérida constituye uno de los aeropuertos más grandes y principales del territorio catalán en el que vuelan aerolíneas como Iberia Regional o Jet2, y en el que también se realizan operaciones de entrenamiento para todo tipo de pilotos. Actualmente solo cuenta con una pista de aterrizaje de 2.500 metros (**dirección 310 y 130 grados magnéticos⁵**) en la que solo tiene aproximación ILS en una de las dos direcciones (31⁶), dificultando así el aterrizaje mediante instrumentos en caso de tener que aterrizar por la otra dirección (13). En un aeropuerto como el de Lérida es importante tener en cuenta los factores meteorológicos, y es que se trata de un aeropuerto en el que muy frecuentemente hay mala visibilidad por niebla debido a su ubicación geográfica.

En los momentos en los que se reduce tanto la visibilidad (como es en el caso de la niebla), solo es posible aterrizar mediante reglas IFR como sería en el caso de un ILS, es por este mismo motivo que muchas veces realizar una aproximación en este aeropuerto se trata de una tarea limitada. Aparte del problema que se acaba de describir, hay otro muy importante que dificulta la optimización del espacio aéreo a la hora de aproximarse al aeropuerto de Lérida.

Este aeropuerto solamente cuenta con un punto de inicio de aproximación (IAF: *Initial approach fix*) en la pista 13 llamado ILERDA el cual representa el VOR de Lérida, por lo que todas las aeronaves, vengan de la dirección que vengan, deberán pasar de manera obligatoria por encima del VOR del Lérida si quieren acabar aterrizando ahí. Este hecho provoca que, si un avión llega desde el noroeste del campo, deba dirigirse al IAF para luego dar la vuelta y aterrizar, provocando así una pérdida de tiempo y de combustible aparte de una congestión de tráfico aéreo innecesario.

⁵ Grados magnéticos: Las pistas están orientadas en función del norte magnético, es importante no confundirlo con el norte geográfico ya que no es lo mismo.

⁶ Dirección 31: El número de la pista representa la dirección que tiene respecto el norte magnético. Si una pista tiene dirección 31, significa que está orientada a 310 grados magnéticos respecto el plano de la tierra.

- **Situación actual de las aproximaciones RNP en España:** En la actualidad, solo hay ocho (de sesenta y tres) aeropuertos que cuenten con aproximaciones RNP. Estos están formados por el aeropuerto de A Coruña, Almería, Fuerteventura, Lanzarote, Palma de Mallorca, Santander, Valencia y Vigo. La idea es que a lo largo de los años todos los aeropuertos de la red española cuenten con aproximaciones RNP por las varias ventajas que conllevan respecto a los otros tipos de aproximaciones, las cuales se explicaran en este trabajo de manera detallada. Siendo más precisos, según la regulación UE2018/48, España debe contar con aproximaciones de precisión (mediante aproximaciones RNP) a partir el día 3 de diciembre del año 2020 para aquellas pistas donde no haya aproximaciones de precisión, y que todas las pistas (tengan o no aproximaciones de precisión), tengan RNP el día 5 de enero del año 2024 [9]. Desafortunadamente, una de las principales consecuencias del Covid-19, es que estas fechas se verán retrasadas por lo que de momento no se conocen las nuevas fechas con exactitud.

2.2 Situación a desarrollar

Teniendo en cuenta la situación actual en el aeropuerto de Lérida y en España indicadas en la sección 2.1, la situación a desarrollar consiste en resolver los problemas que existen actualmente en el aeródromo mediante la creación de un nuevo IAF y con la realización de una aproximación de precisión tipo RNP. Esto facilitará mucho las aproximaciones hacia la pista 13 sobre todo para esos días en las que haya muy mala visibilidad y en las que no se puedan hacer aproximaciones visuales. También ayudará a que todos los aviones provenientes del norte puedan comenzar el tramo de aproximación mucho antes sin que tengan que pasar obligatoriamente por el IAF de LERDA ahorrándose tiempo y combustible.

2.3 Objetivos

Los objetivos de este trabajo consisten en la profundización en el concepto de navegación basada en prestaciones para llegar a su máximo entendimiento, así como su aplicación práctica mediante la realización de una carta de aproximación RNP en el aeropuerto de Lérida y su posterior simulación para comprobar cómo se vería desde la cabina de un piloto de un A320.

2.4 Usuarios

Los posibles usuarios a los que iría dirigido la realización de este TFG son:

- **Aeropuerto y ENAIRE⁷:** La realización de este TFG le podría ser de gran interés tanto al aeropuerto de Lérida como a ENAIRE, ya que como se ha indicado en la sección 2.1, España está tratando de implantar aproximaciones de RNP en todas las pistas en los próximos años, por lo que este trabajo les podría interesar como idea de implantación.

⁷ Gestor de la navegación y el control aéreo en España.

- Pilotos: Tanto los pilotos como las compañías podrían hacer uso de la información que contiene este TFG para organizar futuras rutas al aeropuerto de Lérida (en caso de que se trate de una compañía aérea) o para llegar a entender mejor el concepto de aproximación RNP (para pilotos).
- Estudiantes: Otro tipo de usuarios podrían ser los estudiantes interesados en aprender sobre la navegación aérea en general y en particular sobre el ámbito de la navegación basada en prestaciones.

2.5 Metodología del desarrollo

Para poder llevar a cabo la realización de este TFG y determinar la viabilidad de alcanzar los objetivos planteados, será fundamental seguir una metodología de trabajo la cual está formada por distintos puntos, tal como se indica en la figura 2.1.

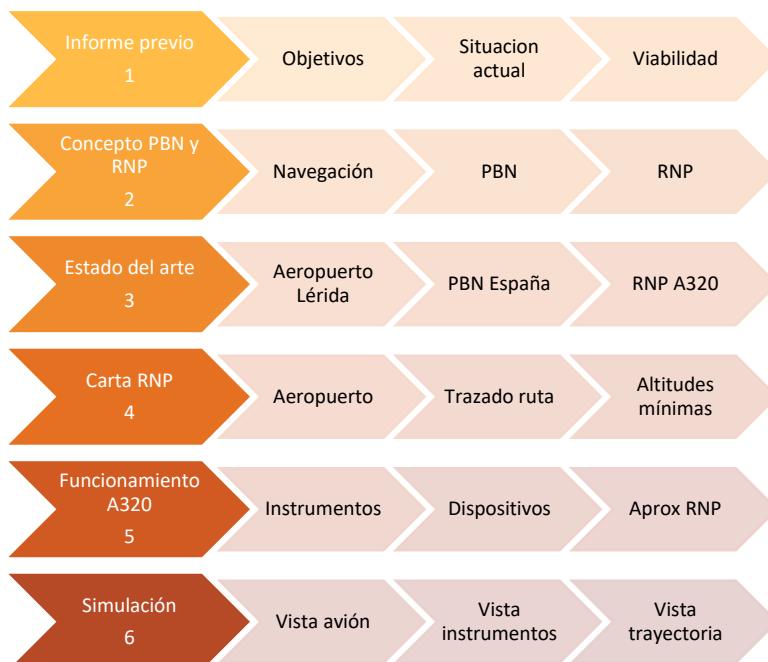


Figura 2.1. Metodología de desarrollo del TFG.

1. Preparación del informe previo.

El primer paso para el desarrollo del TFG es el de la realización del informe previo. Éste está formado por la definición de los objetivos que se quieren alcanzar, seguido de la definición de la situación actual (en el caso de este TFG será la situación actual del aeropuerto de Lérida y el del concepto PBN en España). Por último, se debe llevar a cabo un estudio de viabilidad del TFG el cual está formado por la viabilidad técnica, la viabilidad operacional, la viabilidad legal y la viabilidad económica.

2. Estudio del concepto PBN y aproximaciones RNP.

El segundo punto tratará la parte teórica que ayudará a entender la parte práctica. Se empezará describiendo de forma general el concepto de navegación aérea, seguido de la navegación basada en prestaciones. Finalmente, se hará mucho hincapié en el concepto RNP, más concretamente de las aproximaciones RNP y de todos los requisitos que estas llevan.

3. Estudio del estado del arte.

Una vez se haya entendido la parte más teórica del TFG, se hará un estudio del estado arte de tres términos que serán clave para la realización de la parte práctica de este trabajo. El primero será un estudio del estado del arte del aeropuerto de Lérida ya que es ahí donde se pretende publicar la nueva aproximación.

El segundo estudio será el de la situación actual en España y Europa en relación a la tecnología PBN y las aproximaciones RNP. Por último, se realizará un estudio del estado del arte de la situación actual del Airbus A320 en relación a la navegación por prestaciones para determinar que capacidades tiene y cuáles son sus límites.

4. Diseño de la carta RNP.

En esta cuarta parte se realizará la carta de aproximación RNP del aeropuerto de Lérida. Se empezará representando la información general del aeropuerto como podría ser su elevación o las distintas frecuencias de control. Seguidamente se trazaría la ruta que se espera diseñar con sus respectivas altitudes, rumbos y ángulos de descenso. Finalmente se diseñarán las diferentes **DA⁸** (*Decision Altitude*) y **MDA⁹** (*Minimum Descent Altitude*) que vendrán dados por el tipo de precisión de la aproximación y los obstáculos.

5. Funcionamiento del Airbus A320.

Para poder entender la simulación que se pretende realizar, se hará una explicación básica de cómo funciona un Airbus A320. Es importante remarcar que solo se describirán los instrumentos y dispositivos necesarios para entender que hace el avión durante la aproximación RNP ya que explicar todas las posibles funciones que hay dentro de la cabina de este avión sería demasiada información e innecesaria para el propósito de este trabajo.

⁸ Decision Altitude: Es la altitud especificada en la aproximación de precisión a la cual debe iniciarse una maniobra de aproximación frustrada si no se ha establecido la referencia visual requerida para continuar la aproximación.

⁹ Minimum Descent Altitude: Altitud especificada en una aproximación que no sea de precisión o en una aproximación de circuito, por debajo la cual no debe efectuarse el descenso sin referencia visual requerida.

6. Realizar la simulación.

Finalmente se llevará a cabo la simulación de la aproximación RNP en las que se analizarán tres puntos de vista. El primero será el punto de vista que tendrá el piloto del paisaje, en el que se simulará un escenario con mala visibilidad para demostrar las ventajas que tiene realizar una aproximación de este tipo. Seguidamente se hará un enfoque en los instrumentos del avión para entender la situación y la ubicación que tiene el avión en cada instante de tiempo. Por último, se analizará la trayectoria de la aproximación desde un mapa para comprobar si ha seguido la ruta programada.

2.6 Recursos

Son varios los recursos requeridos para la realización de este TFG.

Fuentes de información

Se van usar van a ser fuentes de información primaria y secundaria. Como fuente de información principal se van a usar las siguientes páginas web o documentos:

- Performance Based Navigation [7].
- Servicio de información aeronáutica AIP [10].
- Apuntes de navegación aérea [1,2].
- Performance Based Navigation: RNP and RNP AR Approaches [11].
- Agencia Europea de Seguridad Aérea [12].

Se podrá de contar con estos documentos (entre otros) con una gran cantidad de información, también se contará con la ayuda de un piloto comercial que facilitará información tanto del PBN como de la parte técnica de cómo realizar una aproximación RNP en la vida real. El es Jordi Manzano (tutor externo de este TFG y piloto comercial del A330 en Air Europa).

Software

Los recursos de Software principales que se van a utilizar son los siguientes:

- Microsoft Word: Herramienta que se utilizará para la redacción de la memoria del TFG.
- Xplane 11: Simulador de vuelo que servirá para representar la aproximación en el aeropuerto de Lérida en la parte práctica.
- Navigraph [13]: Software que facilita todas las cartas aeronáuticas de alrededor del mundo.

Hardware

Los recursos Hardware principales que se van a usar son los siguientes:

- Procesador: Intel Core i7 7700K.
- Memoria instalada (RAM): 16 GB DDR4 3000 G.Skill Ripjaws
- Tarjeta Gráfica: Nvidia Asus Dual GTX 1060 6GB GDDR5
- Placa Base: MSI Z270-A Pro

- Sistema Operativo: Windows 10 Pro 64 bits.
- 2 monitores de 24 pulgadas y 60 HZ.
- Periféricos (ratón, teclado y auriculares).
- Joystick Simulación Aérea ThrustMaster

2.7 Costo

Son diversos los costes que supondría realizar este TFG. Todos estos costes están representados en la Tabla 2.1, 2.2 y 2.3. Sin embargo, al tratarse de un trabajo académico y disponer de todos los recursos necesarios para su realización el coste total en realidad será 0.

Costes del equipo	
Hardware	
Procesador	339,00 euros
Memoria RAM	165,00 euros
Tarjeta Gráfica	335,00 euros
Placa Base	109,00 euros
Sistema Operativo	110,00 euros
Monitores	215,50 euros
Otros componentes ordenador	361,36 euros
Periféricos	170,00 euros
Joystick	75,00 euros
Software	
Microsoft Word	119,90 euros
Xplane 11	65,00 euros
Navigraph	50,00 euros
A320 Simulación en Xplane 11	89,00 euros
Total	2.208,8 euros

Tabla 2.1. Estimación del coste del software y del hardware.

Coste del Gestor Aeronáutico	
Puesto de trabajo	Gestor Aeronáutico
Horas de trabajo	375 horas
Coste/hora	25 euros
Total	9.375 euros

Tabla 2.2. Estimación del coste del trabajador.

Coste total	
Hardware	1.884,10 euros
Software	323,90 euros
Gestor Aeronáutico	9.375,00 euros
TOTAL	11.583,00 euros

Tabla 2.3. Estimación del coste para la realización del TFG.

2.8 Planificación

Para poder realizar el trabajo de forma correcta y estructurada es importante llevar a cabo una planificación previa en la que se especifique cuáles son los pasos que se deberían seguir cronológicamente durante los meses en los que se realice el TFG. Para ello se ha dividido el trabajo en seis grandes bloques los cuales están divididos, a su vez, según se muestra en la tabla 2.4.

Nombre de la tarea	Duración	Comienzo	Fin
TFG	375 horas	13/10/2020	22/01/2021
1. Preparación informe previo	35 horas	13/10/2020	14/11/2020
1.1 Definir objetivos del trabajo	11 horas	13/10/2020	24/10/2020
1.2 Situación actual	12 horas	24/10/2020	03/11/2020
1.3 Estudio viabilidad del TFG	12 horas	03/11/2020	14/11/2020
2. Estudio del concepto PBN y RNP	75 horas	14/11/2020	24/11/2020
2.1 Profundizar en Navegación Aérea	25 horas	14/11/2020	17/11/2020
2.2 Navegación basada en prestaciones	25 horas	17/11/2020	20/11/2020
2.3 RNP y aproximaciones	25 horas	20/11/2020	24/11/2020
3. Estudio del Estado del Arte	75 horas	24/11/2020	06/12/2020
3.1 Estado del arte del aeropuerto de Lérida	30 horas	24/11/2020	28/11/2020
3.2 Estado del arte del PBN en España	25 horas	28/11/2020	02/12/2020
3.3 Estado del arte del RNP A320	20 horas	02/12/2020	06/12/2020
4. Diseño de la carta RNP	75 horas	06/12/2020	18/12/2020
4.1 Información general del aeropuerto	20 horas	6/12/2020	10/12/2020
4.2 Dibujar la ruta RNP desde el IAF	35 horas	10/12/2020	14/12/2020
4.3 Calcular altitudes mínimas	20 horas	14/12/2020	18/12/2020
5. Funcionamiento A320	75 horas	18/12/2020	30/12/2020
5.1 Instrumentos Básicos	25 horas	18/12/2020	22/12/2020
5.2 Dispositivos básicos	20 horas	22/12/2020	24/12/2020
5.3 Dispositivos basados en aprox. RNP	30 horas	24/12/2020	30/12/2020
6. Simulación	75 horas	30/12/2020	12/01/2021
6.1 Vista desde el avión	25 horas	30/12/2020	03/01/2021
6.2 Vista de los instrumentos	25 horas	03/01/2021	07/01/2021
6.3 Vista de la trayectoria	25 horas	07/01/2021	12/01/2021
7. Redacción Memoria	40 horas	12/01/2021	22/01/2021

Tabla 2.4. Planificación del TFG.

2.9 Riesgos

Al tratarse de un TFG el cual que no depende de ningún factor externo, no hay demasiados riesgos a la hora de llevarlo a cabo, sin embargo, se podrán considerar los siguientes:

- El riesgo más importante al cual se enfrenta la realización de este trabajo es el de sintetizar la normativa que debe aplicarse en este tipo de operaciones aéreas. Existe mucha teoría para entender todo el concepto de la navegación en prestaciones, y sobre todo mucha reglamentación. La gran cantidad de leyes que hay que tener en cuenta (ya sea por el avión o por el aeropuerto) dificultan obtener el conocimiento total den relación a si la aproximación que se va a diseñar cumpliría con todos los parámetros legales.

La solución a este problema es el de simplificar la información, y solamente adoptar aquellas normas que sean realmente necesarias y significativas para el proyecto que se quiere llevar a cabo.

- El otro gran riesgo que puede suponer una dificultad para la realización del TFG es el de poder llevar a cabo la simulación correctamente. Al tratarse de una aproximación que no existe en la vida real, y, por lo tanto, tampoco en el simulador, existe el riesgo de que no se pueda seguir la aproximación exactamente como se ha diseñado previamente en la carta.

La solución a este problema es el de procurar, mediante todas las herramientas disponibles en el simulador, adaptar la simulación lo máximo posible a la realidad teniendo en cuenta los posibles pequeños errores de exactitud, los cuales no van a suponer un gran cambio respecto a lo que se haría en una aproximación real

2.10 Viabilidad técnica y operacional del TFG

Antes de poder empezar el TFG, es necesario comprobar si su realización es viable desde un punto de vista técnico, operacional, económico y legal.

Viabilidad técnica.

Desde el punto de vista técnico se puede presuponer que será viable, pues se cuenta con todos los recursos tanto físicos (hardware) como digitales (software y páginas web oficiales de diversas instituciones aeronáuticas) así como el asesoramiento directo de pilotos comerciales. Otro factor que reafirma esta viabilidad es el hecho de que este tipo de aproximaciones ya funcionan en muchos aeropuertos de alrededor del mundo con una fiabilidad probada.

Viabilidad operacional.

Como se ha visto en las secciones 2.5 y 2.7, la planificación y el correcto desarrollo juegan un papel muy importante para poder llevar a cabo este TFG con éxito, pues se trata de un trabajo que requiere de muchos conocimientos de operatividad y normativa, y en el que la parte práctica conlleva mucho trabajo debida a su extensión. Por todo ello, si se cumple con la planificación y se realiza un trabajo constante diariamente, se espera poder llevar a cabo el TFG desde un punto de vista operacional.

2.11 Viabilidad económica y legal del TFG

Viabilidad económica.

Tal y como se ha indicado en la sección 2.10, teniendo en cuenta que se cuenta con todos los recursos para la realización de este TFG y que no hay ninguna otra operación que suponga un coste adicional, se puede concluir que su realización es viable económicamente. Se trata de un trabajo en el que tanto la parte teórica como en la práctica tienen coste 0, y en el que no se depende de ningún otro factor el cual pueda implicar un gasto tan grande como para que impida llevar a cabo el TFG.

Viabilidad legal.

Finalmente, hay que analizar si la realización del TFG es legalmente viable. Para ello se ha analizado el contrato de **Copyright¹⁰** del software de simulación de vuelo. Éste indica que está permitido el uso del programa para investigación y fines académicos por lo que no existe ningún conflicto legal en la metodología a seguir a lo largo de este TFG.

2.12 Conclusiones del capítulo

Este TFG se plantea como un proyecto de gran ambición en el que se esperan tener unos resultados exitosos.

Son varios los factores a investigar para poder realizar la parte práctica lo más semejante posible a la realidad. Las diferentes normas, leyes y procedimientos que deben seguir tanto las aproximaciones RNP, como los equipos de navegación de las aeronaves, son muy precisas y están definidas por parámetros muy marcados. Afortunadamente, y como se definen en las secciones 2.6 y 2.10, se cuenta con todas aquellas herramientas para poder llevar a cabo la carta y la simulación de la forma más precisa posible.

Una vez se han determinado los objetivos, se ha entendido cual es la situación actual tanto del aeropuerto de Lérida como de la navegación basada en prestaciones en España, y se ha analizado los cuatro factores de viabilidad para realizar este TFG, se puede concluir que se puede llevar a cabo sin mayor dificultad que la de entender todos los conceptos teóricos y prácticos.

¹⁰ Copyright: Derecho exclusivo de un autor para explotar una obra literaria, científica o artística durante un tiempo.

3. ESTUDIO DEL CONCEPTO PBN Y APROXIMACIONES RNP

Para saber cómo realizar una carta de aproximación RNP es necesario tener los conocimientos suficientes sobre navegación basada en prestaciones y sobre las aproximaciones RNP. En este capítulo se presentará una introducción de cómo ha evolucionado la navegación aérea a lo largo de los años, así como una descripción de los aspectos más importantes que forman el término PBN. Finalmente se hará más hincapié en el concepto RNP y en cómo están distribuidas sus fases de aproximación. La figura 3.1 muestra un esquema de los conceptos sobre PBN y aproximaciones RNP necesarios para el desarrollo de este trabajo.



Figura 3.1. Conceptos sobre PBN y aproximaciones RNP.

3.1 Navegación Aérea

La navegación aérea es el conjunto de técnicas y procedimientos que hacen posible que una aeronave llegue a su destino manteniendo la integridad de los tripulantes, pasajeros y personas en tierra. Para ello, es necesario que el piloto sea consciente de su posición en todo momento, por lo que, a lo largo de los años, se han ido diseñando técnicas y procedimientos que dan soporte a la conciencia situacional de la persona que pilota la aeronave con la finalidad de no perderse [1].

El desarrollo de nuevas técnicas de navegación no tiene solamente el objetivo de ayudar al piloto a no desorientarse, sino que también busca **optimizar**¹¹ el espacio aéreo para dar más fluidez y agilizar todos los **tráficos**¹² ya que eso comporta una serie de beneficios para todo tipo de usuarios.

¹¹ Optimizar: Gestionar los tráficos con el objetivo de maximizar el número de operaciones aéreas en el menor tiempo posible.

¹² Tráficos: Aeronaves

Algunos ejemplos de estos usuarios podrían ser las aerolíneas (cuanto más rápido y corto sea al trayecto, menos costes supondrá para la empresa), los pasajeros (suelen preferir trayectos rápidos), o los propios controladores aéreos los cuales tienen que administrar mucha carga de trabajo debido a la gran cantidad de aviones que deben gestionar en su sector.

El sistema de navegación aérea (ANS) es el conjunto de funciones que hacen posible la navegación aérea, por lo que el desarrollo de una de estas funciones proporciona una mejora general en todo el sistema. Está formado por 5 departamentos cuyos objetivos son los de velar por la seguridad, fluidez y eficiencia de los vuelos. Estas áreas son [2]:

- **Comunicación, navegación y vigilancia (CNS):** En este sector se encuentran las infraestructuras, o los dispositivos tecnológicos, que se emplean para la navegación y circulación aérea. Esta infraestructura de navegación se presta directamente a la aeronave, suministrando señales que permiten su posicionamiento. Las infraestructuras que dan soporte a las comunicaciones y a la vigilancia son las que soportan servicios de información y control de tránsito aéreo (ATM).
- **Servicios meteorológicos (MET):** Se encarga de la provisión de los servicios meteorológicos de apoyo a la navegación aérea necesarios para contribuir a la seguridad, regularidad y eficiencia del tránsito aéreo a todos los usuarios implicados. Tener conocimiento de la previsión meteorológica es crucial para la gestión del tráfico aéreo ya que es uno de los principales motivos por los que se deben cancelar o modificar los vuelos.
- **Gestión del tráfico aéreo (ATM):** Se define como la gestión dinámica e integrada del tráfico y el espacio aéreo, incluidos los servicios de tráfico aéreo, la gestión del espacio aéreo y la gestión de flujo de tráfico aéreo, de manera segura, económica y eficiente, a través de la provisión de instalaciones y servicios integrales en colaboración con todas las partes e involucrando funciones aéreas y terrestres.
- **Servicio de Búsqueda y Salvamento Aéreo (SAR):** Tiene la misión de localizar las aeronaves siniestradas dentro del espacio aéreo de cada Estado responsable, y hacer llegar lo antes posible todos los auxilios que pudiera necesitar el personal accidentado. También debe cooperar con otros organismos civiles y militares en el caso de que fuera necesaria su colaboración.
- **Servicio Información Aeronáutica (AIS):** Es aquel organismo que proporciona el asesoramiento e información necesarios para la seguridad operacional, regularidad y eficiencia de la navegación aérea. Este apartado tiene gran relevancia y relación con el objetivo del TFG ya que las cartas aeronáuticas suelen estar publicadas dentro del AIS.

Uno de los objetivos de este trabajo es el de profundizar en la función del CNS, concretamente en la navegación, por lo que en los apartados de esta sección se describirán de forma detallada los conceptos sobre la navegación aérea y las infraestructuras que la hacen posible.

3.1.1 Navegación dentro del CNS

Tal y como se indica en la sección 3.1, la navegación dentro del CNS conforma todas aquellas infraestructuras que dan soporte a la aeronave para identificar su posición durante todas las fases del vuelo. Desafortunadamente no siempre han existido este tipo de infraestructuras, por lo que se deben analizar los principios de la navegación aérea para entender como se ha llegado a este punto [2].

En los orígenes de la aviación, los pilotos determinaban su posición respecto la tierra mediante la observación visual. Este tipo de navegación VFR consiste en determinar la posición del avión en el espacio, junto con la ayuda de un mapa, mediante la observación de referencias fijas (montañas, edificios, lagos, etc..) ayudando así a la conciencia situacional del piloto. Aunque este tipo de navegación se siga usando, y en principio se vaya a seguir usando, comporta una serie de inconvenientes muy grandes para según qué tipo de operaciones. Algunos de esos inconvenientes son los siguientes:

- **Poca precisión:** Navegando visualmente cuesta mantener siempre una trayectoria constante a lo largo de dos puntos debido a que las únicas referencias sobre la posición son las que el piloto pueda observar, y eso va a depender de la habilidad y de la situación en la que el piloto se encuentre en ese momento.
- **Gran dependencia de la meteorología:** Al tener como único recurso de posicionamiento la observación de referencias en el terreno, implica que el día que haya mala visibilidad, que sea de noche o que haya nubes bajas, el piloto no podrá volar de forma segura ya que perderá todas esas referencias.
- **Altitud limitada:** Al igual que en el punto anterior, el hecho de perder las referencias visuales, provoca que el piloto se desoriente. Cuando un piloto comercial vuela a altitudes de más de 35 mil pies ya no es posible tomar las mismas referencias que cuando se vuela a 2 mil por lo que la navegación visual no tiene ningún sentido.

Teniendo en cuenta estos, y otros muchos inconvenientes de la navegación visual, se crearon estas infraestructuras que forman parte de la navegación dentro del CNS. Gracias a estas infraestructuras que se describirán a continuación, la navegación aérea ha pasado a ser mucho más precisa e independiente, dando paso a la navegación basada en reglas instrumentales IFR. Tal y como se ha visto en la introducción de este TFG, la navegación IFR permite a un piloto desplazarse desde un origen hasta un destino sin tener en ningún momento la necesidad de tener referencias visuales, de esta manera, todos los inconvenientes que había anteriormente con la navegación VFR se pudieron resolver.

Son tres los tipos de infraestructuras que hoy en día forman los soportes a la navegación aérea. Estos están formados por las radioayudas terrestres, los sistemas satelitales y los sistemas de **aumentación**¹³, y aunque hoy en día se usen los 3 para intentar obtener la navegación más precisa posible, no siempre ha podido ser así.

¹³ Aumentación: Aumentar la señal de los satélites a fin de mejorar la precisión de estos.

En los orígenes de la navegación IFR solo existían las radioayudas terrestres, es por este motivo que en el siguiente apartado se describirán los diferentes tipos de infraestructuras y las ventajas que han aportado a la navegación aérea desde su aparición.

3.1.2 Infraestructuras de apoyo a la navegación aérea

Las infraestructuras que dan apoyo a la navegación aérea están formadas por las radioayudas terrestres, los sistemas satelitales y los sistemas de aumentación, los cuales se describen a continuación

3.1.2.1 Radioayudas terrestres

Las radioayudas terrestres son instalaciones que generan señales radioeléctricas que permiten que una aeronave pueda guiarse. Estas aeronaves deben tener un receptor de este tipo de señales teniendo en cuenta que la frecuencia de la señal vendrá dada por el tipo de radioayuda. Las principales radioayudas terrestres son las siguientes:

- **VOR:** Se trata de una radioyuda que es utilizada tanto para conocer la posición de una aeronave como para poder navegar de un punto a otro. Su banda de frecuencia es de entre 108.00 MHz y 117.95 MHz las cuales no sufren afectaciones durante fenómenos meteorológicos como la nieve, la lluvia o las tormentas. Esta antena emite 360 radiales en el que cada uno expresa los diferentes rumbos magnéticos, por lo que si por ejemplo te estás alejando por el radial 90 del VOR de Barcelona, se entiende que la aeronave está volando en una dirección de 90 grados magnéticos respecto el VOR que la aeronave tiene sintonizado, en este caso, el de Barcelona.

Existen 4 tipos diferentes de VOR en función del alcance que tengan. En primer lugar, está el TVOR con una cobertura de 25 millas náuticas, una distancia vertical de 12.000 y una clasificación de “terminal”. En segundo lugar, está el LVOR con una cobertura de 40 millas náuticas, una distancia vertical de 18.000 pies y una clasificación de “baja altitud”. El MVOR es el tercer tipo el cual tiene una cobertura de 75 millas náuticas, una distancia vertical de 30.000 pies y una clasificación de “media altitud”. Finalmente está el HVOR que cubre 100 millas náuticas y tiene una clasificación de “alta altitud” [14].

- **DME:** El equipo medidor de distancia es un sistema electrónico que permite establecer la distancia entre éste y una estación emisora (en este caso una aeronave). Mide la distancia en función de la velocidad al suelo (GS: *Ground Speed*) y su frecuencia está comprendida entre 962 y 1213 MHz de 200 canales [15]. Es importante remarcar que este tipo de sistemas suelen estar asociados a otras radioayudas como el VOR o el ILS.
- **NDB:** La baliza no direccional es un radiotransmisor usado como una ayuda para la navegación aérea. Opera en una frecuencia de entre 190 y 1750 kHz y como su nombre indica, esta radioayuda no muestra información direccional en contraste con el VOR u otras antenas terrestres, sino que es el ADF quien determina la dirección a la NDB respecto la aeronave.

- **ILS:** El sistema de aterrizaje instrumental es una radioayuda formada por una serie de antenas localizadoras las cuales emiten señales de entre 108.1 y 111.975 MHz.

La función principal de este sistema, es el de ayudar a las aeronaves a lo largo de su aproximación, es por eso que el ILS consta de dos subsistemas independientes. El primer subsistema sirve para proporcionar la guía lateral, mientras que el otro subsistema proporciona guía vertical. Actualmente el ILS es el sistema que más se usa en el mundo para la aproximación final en pista de una aeronave.

Durante los primeros años, la navegación aérea instrumental se veía muy limitada ya que las rutas aéreas consistían en volar de una radioayuda terrestre a otra. Esto suponía un problema en la optimización del espacio aéreo ya que obligaba a las aeronaves a pasar por encima de las estaciones imposibilitando muchas veces el volar de forma directa a un punto deseado.

Más tarde surgió el área de navegación RNAV, un método que permitió a las aeronaves elegir cualquier rumbo dentro de la cobertura de las ayudas en tierra, en vez de tener que volar directamente de una radioayuda a otra. Esto supuso un gran avance, pero antes de que apareciesen los satélites, este tipo de navegación resultó ser muy caro e inútil partiendo de la base de que las aeronaves navegaban mediante sistemas iniciales (INS: *Inertial Navigation System*¹⁴⁾ antes que mediante ayudas terrestres. En la figura 3.2 se puede observar la diferencia entre las rutas convencionales y las rutas RNAV.

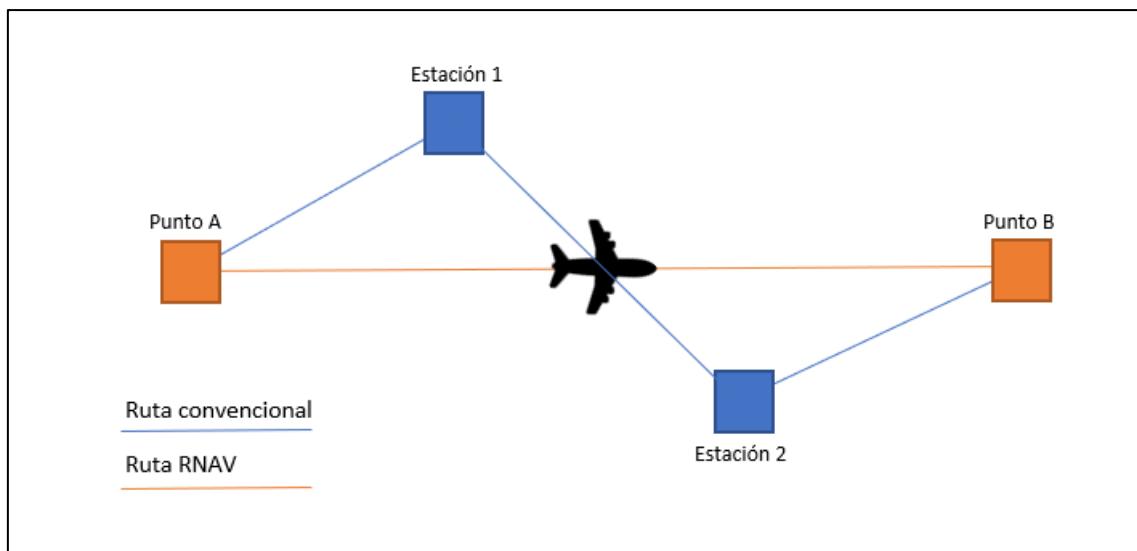


Figura 3.2. Navegación tradicional vs. RNAV.

¹⁴ Inertial Navigation System: Es el sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, sensores de movimiento y sensores de rotación giróscopos para calcular continuamente mediante estimación la posición, orientación y velocidad de una aeronave [16].

3.1.2.2 Sistemas satelitales

Más tarde apareció el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS: Global Navigation Satellite System) el cual está formado por una constelación de satélites que transmiten rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del mundo ya sea por tierra o por mar.

La red GNSS se compone de tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control, y el segmento de los usuarios [17]. El segmento espacial es aquel que está compuesto por los diferentes satélites artificiales que forman el sistema. El segmento de control corresponde al conjunto de estaciones presentes en la superficie, con el fin de realizar el seguimiento de los satélites GPS, cargar información de navegación actualizada y garantizar el funcionamiento adecuado de la constelación de satélites. El segmento usuario consiste en el equipo receptor del GPS que recibe las señales de los satélites y las procesa para calcular la posición tridimensional. Los sistemas satelitales más relevantes están formados por:

- **GPS:** Es el sistema de radionavegación basado en satélites que utiliza mediciones de distancia precisas de satélites GPS para determinar la posición y la hora en cualquier parte del mundo. El sistema es operado por el Departamento de Defensa de Estados [18]. Está formado por 24 satélites que se mueven en una órbita de 20.150 km de altitud.
- **GLONASS:** El GLONASS, a diferencia del GPS, es operado por el Ministerio de Defensa de la Federación Rusa. Su funcionamiento se basa en la determinación tridimensional de posición y velocidad basada en la medición del tiempo de tránsito y desviación Doppler de las señales de radio frecuencia transmitidas por los satélites GLONASS [19]. Está formado por 31 satélites y se mueve alrededor de una órbita situada a 19.100 km de altitud respecto la superficie terrestre.

Aunque los dos sistemas citados anteriormente sean los más reconocidos, ya hay varios países que están intentando desarrollar sistemas propios como es el caso de China, Japón o países que pertenecen la Unión Europea. Algunos de ellos son:

- **GALILEO:** Es la iniciativa de la Agencia Espacial Europea junto con la Unión Europa para desarrollar un sistema de radionavegación de última generación y de alcance mundial propio. El objetivo es brindar un servicio de ubicación 100 veces más preciso gracias a los 30 satélites que forman este sistema. La altitud donde se encuentran los satélites es aún más alta que los del sistema GPS, concretamente a 24.000 km divididos en tres órbitas circulares.
- **BeiDou:** El sistema de navegación por satélite que está creando China se compone de dos constelaciones de tres satélites separadas, los cuales están dando cobertura y servicios de navegación principalmente a usuarios chinos y a usuarios de regiones vecinas. Aunque la primera versión de este sistema funciona desde el año 2020, el país asiático pretende aumentar la precisión de su sistema con el envío de 35 satélites para finales del año 2020.
- **Quasi-Zenith:** Su nombre proviene del hecho de que la mayor parte del tiempo, al menos uno de los satélites del sistema se posicionará entorno al **cenit**¹⁵.

¹⁵ Cenit: Punto que se encuentra justo por el encima del observador. En el caso del Quasi-Zenith se refiere a que siempre habrá un satélite justo encima de Japón.

El sistema por Satélite Cusicenital, es el sistema de corrección de señales de navegación global por satélite en Japón y está formado por 3 satélites que forman una órbita elíptica.

Con la implantación de la tecnología GNSS, el método de navegación RNAV cobró mucha importancia debido a la gran precisión que se podía conseguir mediante el uso simultáneo de los sistemas inerciales, las radioayudas terrestres y el GNSS. Pero una de las características fundamentales para la navegación RNAV es que los sistemas deben seguir unos requisitos mínimos de precisión, integridad, y continuidad durante su ruta. Es por ello que, para garantizar el cumplimiento de estos 4 factores, se crearon los sistemas de aumentación.

3.1.2.3 Sistemas de aumentación

Las constelaciones de satélites GPS y GLONASS no se diseñaron para satisfacer los requisitos estrictos de precisión, integridad y continuidad de la navegación IFR. Por este mismo motivo, se diseñaron tres sistemas de aumentación para normalizar y superar las limitaciones inherentes a los GNSS:

- **Aumentación basada en la aeronave (ABAS: Aircraft Based Augmentation System):** Entre los sistemas que otorgan esta aumentación a los receptores GPS, se encuentran los sistemas de Receptor con Supervisión Autónoma de la Integridad (RAIM: *Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) y la función de Detección de Fallos y Exclusión (FDE: *Fault Detection and Exclusion*). El RAIM determina la integridad de la señal de los sistemas GNSS, mientras que el FDE, excluye el satélite defectuoso dentro de la constelación GNSS siempre y cuando existan satélites suficientes disponibles. Los sistemas ABAS proporcionan la integridad requerida para utilizar el GPS como medio único y principal para la navegación durante todas las fases de un vuelo [20].
- **Aumentación basada en Satélites (SBAS: Satellite Based Augmentation System):** Consiste en una red de estaciones de referencia desplegadas sobre un área de servicio para monitorizar las señales de distancia desde la constelación de los satélites. Las estaciones de referencia recopilan y procesan todos los datos GNSS y los envían a una estación principal a través de una red de comunicación terrestre.

En la estación maestra se generan los mensajes de aumento los cuales contienen una información que permite a los receptores (aeronaves) eliminar errores en la señal recibida. Cabe destacar que gracias al SBAS es posible aumentar la precisión y la integridad de las aproximaciones RNP, que son precisamente, uno de los objetivos de este TFG.

El término SBAS comprende todos los sistemas de aumentación basadas en satélites que están en desarrollo actualmente como puede ser el WAAS (*Wide Area Augmentation System*) en Estados Unidos, el EGNOS (*European Geostationary Overlay Service*) en Europa o el MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) en Japón [21].

- **Aumentación basada en Tierra (GBAS: *Ground Based Augmentation System*):** Este término comprende el sistema de aumentación basada en estaciones terrestres. A diferencia del SBAS, no dependen de satélites geoestacionarios ya que el GBAS no está diseñado para dar servicio a amplias regiones geográficas.

Una vez se han visto todos los sistemas que prestan servicios de posicionamiento a las aeronaves, toca entender porque el concepto de navegación basada en prestaciones (PBN) adquiere tanta relevancia a la hora de querer implantar la navegación RNAV y RNP en todas las fases de un vuelo. Para ello, en la sección 3.2, se profundizará en el concepto PBN, los requisitos y en todos los componentes que lo forman.

3.2 Navegación Basada en Prestaciones (PBN)

En este trabajo se ha dividido la navegación basada en prestaciones en tres aspectos: el concepto PBN, en los requisitos del PBN y en los componentes del PBN. En el primer apartado se hará una descripción general del concepto PBN en el que se explicará cómo fue su aparición y las diferentes ventajas que conlleva a la navegación aérea. El segundo apartado define cuales son los requisitos que hacen posible el PBN formados por la precisión, la integridad, la continuidad, la disponibilidad y la funcionalidad. Finalmente se hablará de los diferentes componentes que hacen posible la existencia del PBN de forma muy detallada junto con otros conceptos que serán necesarios para realizar la carta RNP.

3.2.1 Concepto PBN

El continuo desarrollo de la aviación en cuanto a número de operaciones, trajo como consecuencia la necesidad de maximizar el uso del espacio aéreo obligando así a que mejorara la eficiencia operacional. Esta mejora fue posible en gran parte gracias al desarrollo de nuevas técnicas de navegación aérea como el sistema global de navegación por satélite o el sistema RNAV. Pero también surgió la necesidad de determinar de manera clara y concisa una serie de requisitos para maniobras de navegación en rutas específicas o dentro de un espacio aéreo específico para obtener una **performance**¹⁶ apropiada a los requisitos de dicho espacio aéreo.

Inicialmente, para evaluar la performance de un sistema RNAV, se realizaban una serie de análisis y test en vuelo que median la capacidad para estimar la posición de la aeronave tanto en operaciones en tierra, como en operaciones sobre el océano. Mediante estas pruebas, se era capaz de encontrar las limitaciones de los **equipos**¹⁷ con el objetivo de determinar cuáles eran los requisitos mínimos y sus capacidades [7]. Desgraciadamente, los altos costos de los que se dependía para certificar los diferentes sistemas que daban apoyo a la navegación RNAV provocaron un retraso en su implantación.

¹⁶ Performance: Integridad, exactitud, continuidad y disponibilidad.

¹⁷ Equipos: Conjunto de sistemas necesarios para la realización de la navegación RNAV/RNP

Fue por este mismo motivo que la OACI definió un nuevo método alternativo (PBN) para establecer los requerimientos del equipamiento, en los que ya no se median las capacidades disponibles de cada equipo, sino que se definían los requisitos de performance las cuales se definen en el apartado 3.2.2.

Por lo tanto, ya no se tenían que realizar pruebas de verificación de equipos, sino que únicamente había que comprobar que estos equipos cumplieran con los requisitos mínimos que marca el manual de navegación basada en prestaciones para cada fase del vuelo. Como consecuencia de la aparición de este concepto, la navegación RNAV y RNP pasaron a formar parte de un tipo de navegación PBN.

El PBN ofrece varias ventajas con respecto a los métodos empleados en la elaboración de criterios para el espacio aéreo. Están formadas por las siguientes ventajas:

- Reduce la necesidad de mantener rutas y procedimientos en función de sensores específicos y los costos asociados. Eso significa que por ejemplo no será necesario modificar radioayudas terrestres en caso de querer crear una nueva ruta. Gracias a los sistemas actuales, es posible usar los diferentes mecanismos de navegación para diseñar una ruta deseada adaptándose a los sistemas que ya existen.
- También evita el hecho de tener que desarrollar las operaciones en función de sensores específicos cada vez que evolucionen los sistemas de navegación. En el caso de la navegación mediante satélites, cualquier desarrollo que pueda haber va a beneficiar a la navegación aérea ya que no obligará a ningún usuario a adquirir esa nueva tecnología. Se trata de una evolución y no de una sustitución.
- La gran precisión que genera esta forma de navegar también permite un uso más eficiente del espacio aéreo como por ejemplo la nueva forma de trazar rutas ocasionando paralelamente la disminución del ruido o de gasto de combustible.
- Clarifica la forma en la que se deben usar los sistemas RNAV y RNP ya que anteriormente se tenían que verificar los diferentes equipos de forma personalizada. De esta manera, ahora solo hay que comprobar que los equipos (sean del tipo que sean) cumplan con las performances de ese espacio.

3.2.2 Requisitos del PBN

Tal y como se indica en el apartado 3.1.1, para poder navegar en un espacio mediante tecnología PBN, es necesario cumplir con una serie de requisitos que velen por la seguridad y eficiencia del vuelo. Esos requisitos se describen a continuación:

- **Precisión:** Hace referencia a la precisión en la posición de la aeronave. Mediante los diferentes sistemas que existen actualmente, es posible calcular hasta qué punto es precisa la información de la posición actual de una aeronave. Por este mismo motivo, la navegación PBN obliga a que haya un cierto nivel de precisión en según qué tipo de operaciones ya que no cumplir con este requisito implicaría una falta de seguridad para todos.

- **Integridad:** Se trata del valor de fiabilidad que ofrezca ese sistema en concreto. Es importante que todos los sistemas que apoyen a la navegación PBN, ya sean satélites o radioayudas terrestres, ofrezcan una cierta fiabilidad durante todo el transcurso de vuelo.
- **Continuidad:** Es la capacidad del sistema de proveer un servicio ininterrumpido durante la operación. Durante la navegación, es imprescindible contar con una buena señal durante todo el vuelo ya que, si esto no se produjera, eso implicaría una falta de continuidad y por lo tanto un riesgo para el vuelo. Las especificaciones de navegación son las que dictan los niveles mínimos de disponibilidad y sus medios alternativos en caso de interrupción del servicio. Un ejemplo claro de continuidad, es el que se define en el subapartado 3.1.2.3 como concepto FDE. El FDE es capaz de eliminar la información de un satélite reemplazándola por otro siempre y cuando el primero no pueda ofrecer la continuidad necesaria.
- **Funcionalidad:** Es la característica avanzada de ciertos sistemas de navegación que facilitan o automatizan diversas operaciones de navegación. Es el caso de los modernos sistemas de gestión de vuelo FMS que son capaces de maniobras muy complejas completamente automatizadas.

3.2.3 Componentes del PBN

El PBN representa un cambio en la navegación, pasando de una navegación basada en sensores a una navegación basada en performance en las que engloba el RNAV y el RNP. Existen tres componentes principales en la aplicación del PBN. El primero de ellos es la infraestructura de la navegación, el segundo son las especificaciones de navegación y por último está la aplicación de la navegación. El conjunto de estos tres conceptos debe proporcionar la integridad, la exactitud, la continuidad y la disponibilidad mínima que marca el manual de navegación basada en prestaciones para velar por una navegación segura y eficiente [22].



Figura 3.3. Componentes del concepto PBN.

Para poder realizar las aplicaciones de navegación es necesario determinar previamente qué infraestructuras y qué especificaciones de navegación son necesarias, tal y como se indica en la figura 3.3.

3.2.3.1 Infraestructura de la navegación

Las infraestructuras de la navegación son todas aquellas radioayudas, tanto las terrestres como las satelitales. En este caso no se estudia a la radioayuda en sí, sino que se estudia la fiabilidad y la precisión que se pueda lograr en la aeronave con cualquiera de ellas. Estas infraestructuras deben cumplir con los requisitos mínimos de performance, los cuales van a variar en función de la fase de vuelo en la que se encuentre el avión en ese momento. En la tabla 3.1, se puede observar qué infraestructuras se usan en la navegación en función de las diferentes especificaciones de navegación las cuales se describen en el siguiente apartado.

Especificación Nav.	Infraestructura				
	GNSS	IRU ¹⁸	DME/DME	DME/DME/ IRU	VOR/DME
RNAV 10	X	X			
RNAV 5	X	X	X		X
RNAV 2 & 1	X		X	X	
RNP 4	X				
RNP 2	X		X	X	
RNP 1	X		X	X	
Advanced RNP¹⁹ (ARNP)	X		X	X	
RNP APCH APV Baro	X				
RNP APCH APV SBAS	X +SBAS				
RNP AR APCH	X				
RNP 0.3	X				

Tabla 3.1. Infraestructuras que participan en función de las especificaciones de navegación.

3.2.3.2 Especificaciones de la navegación

Las especificaciones de navegación son unos requisitos técnicos y operacionales que identifican la funcionalidad requerida tanto en el equipo de navegación de la aeronave como en el resto de aparatos de aviónica como pueden ser los diferentes sensores. Aporta a los diferentes estados referencias a la hora de desarrollar la documentación y certificación requerida para la aprobación operacional en cada una de las fases del vuelo. También se especificarán los requisitos formativos para las tripulaciones en el uso correcto de estos equipos.

¹⁸ IRU: Unidad Inercial de Referencia (*Inertial Reference Unit*)

¹⁹ Advanced RNP: La especificación de navegación avanzada RNP permite la implementación de rutas de mayor densidad donde no hay suficiente infraestructura de navegación terrestre para rutas convencionales. Engloba el RNAV 5, RNAV 1 Y 2, y RNP 1 y 2.

Antes de poder definir cuáles son las especificaciones de navegación para cada fase de vuelo, hay que tener en cuenta que estas están expresadas en función de un parámetro llamado Error Total del Sistema (TSE: *Total System Error*) y que existen algunas diferencias entre el RNAV y el RNP.

El TSE representa el error en la desviación lateral que sufre una aeronave por hacer uso de la navegación RNP o RNAV en millas náuticas. El error surge de la suma de 3 *sub-errores* (representados en la figura 3.4) los cuales están formados por el Error de Definición de Ruta (PDE: *Path Definition Error*), el Error Técnico de Vuelo (FTE: *Flight Technical Error*), y el Error de Sistema de Navegación (NSE: *Navigation System Error*) [23]. Gracias al TSE se puede identificar como varía la trayectoria deseada respecto a la trayectoria que realmente está siguiendo el avión, y de esta forma, detectar hasta qué punto es precisa la navegación RNP que se está llevando a cabo en ese momento.

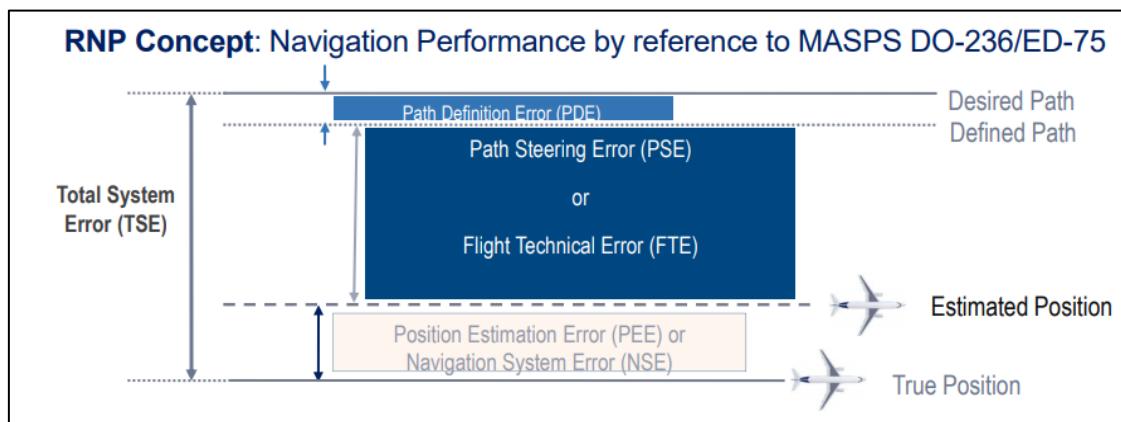


Figura 3.4. Concepto del Total System Error. Fuente [23].

Para entender las especificaciones de navegación en su totalidad además del conceto TSE es necesario conocer las diferencias entre RNAV y RNP:

- **RNAV:** Tiene la capacidad de volar una trayectoria definida por “waypoints” como puntos geográficos de latitud/longitud, sin tener la necesidad de pasar por radioayudas terrestres. La capacidad “RNAV X” representa la precisión lateral lineal del sistema de navegación (TSE) el cual debe alcanzar una precisión del 95% durante todo el vuelo definido en millas náuticas. La tecnología RNAV no cuenta con un sistema de ayudas monitorizadas y alerta el cual avise a la tripulación cuando no se cumplen los requisitos mínimos de performance.
- **RNP:** El RNP es muy parecido al RNAV con la peculiaridad de que esta navegación sí cuenta con el sistema de ayudas monitorizadas y alerta el cual avisará a la tripulación en caso de no cumplir los requisitos mínimos de performance. El RNP también debe obedecer unos parámetros de precisión, integridad i continuidad, los cuales suelen ser aún más exigentes que los de la navegación RNAV.

Tal y como se indica al final del apartado 3.1.2, gracias a la implantación de sistemas de navegación por satélite, la navegación RNAV y RNP obtuvieron mucha importancia. Pero el RNP no solo se basa en tener la capacidad de monitorización y alerta, también debe mantener los criterios y cumplir con unos niveles determinados de performance.

El PBN trata de hacer uso de las tecnologías más punteras, es por ello que siempre se suelen usar las radioayudas más precisas posibles.

Teniendo en cuenta esta información, la tendencia general es la de usar cada vez más los sistemas satelitales en vez de las radioayudas terrestres debido a sus múltiples beneficios. Esta modernización hizo posible las rutas RNP [7], las cuales aún tenían más ventajas como el hecho de poder reducir distancias entre obstáculos, implantar radios de giro además de posibilitar ascensos y descensos con ángulos constantes. Una buena forma de representar estas ventajas es mediante la figura 3.5.

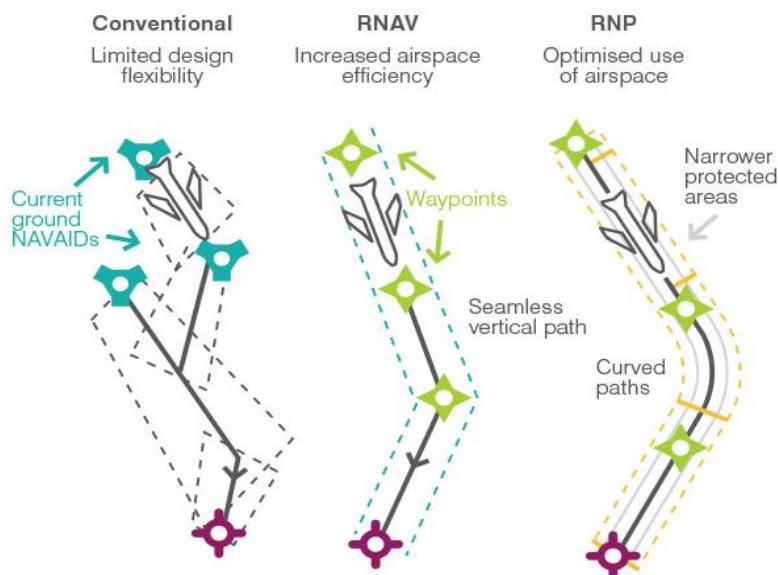


Figura 3.5. Ventajas del RNAV y RNP respecto las rutas convencionales. Fuente [24].

Una vez definidos los conceptos y las diferencias del RNAV/RNP y el concepto TSE, se puede proceder a presentar las especificaciones de navegación de cada uno de ellos teniendo en cuenta que el número que aparece al lado de RNAV y RNP definen el tipo de especificación de cada uno. Cuando en vez de aparecer un número, aparecen letras (por ejemplo, APCH), es porque hace referencia al tramo que se está volando, en este caso APCH significa Approach (Aproximación). En la figura 3.6 se pueden observar las especificaciones diferenciadas por RNAV y RNP (indicadas en la tabla 3.1), las cuales se definen a continuación:

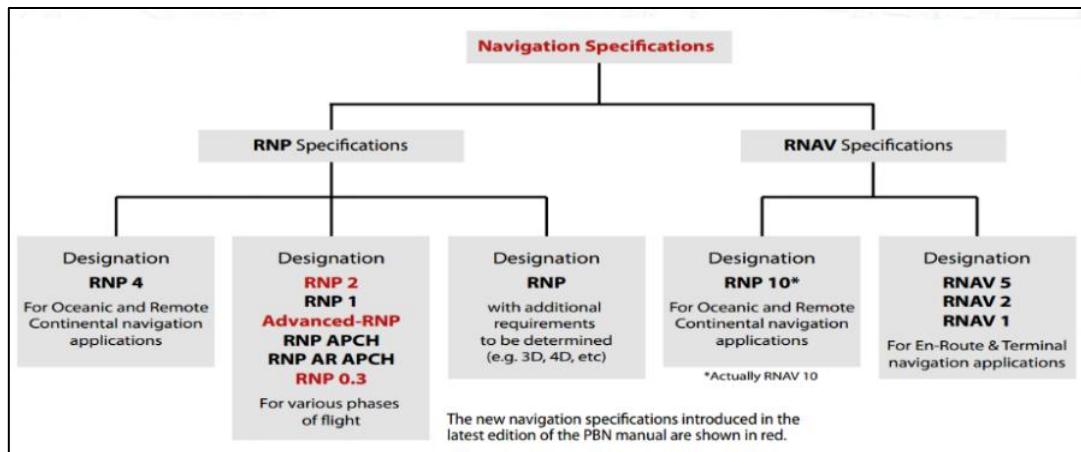


Figura 3.6. Especificaciones de la navegación. Fuente [2].

- **RNAV 10**

Los medios de cumplimiento aceptables para la navegación RNAV 10 (designado y autorizado a llamarse RNP 10) se proporcionan en el documento de EASA AMC 20-12, “Reconocimiento de la orden FAA 8400.12a para Operaciones RNP 10” [25].

Aunque el espacio aéreo RNAV 10 también se le conozca como RNP 10 por razones históricas, no hay ningún requisito de monitoreo y alerta de sistemas a bordo. La especificación RNAV10 puede admitir separaciones horizontales de 50 NM. Para que una aeronave opere en el espacio aéreo RNAV10 (RNP 10), debe estar equipado con un mínimo de dos sistemas de navegación de largo alcance independientes (LRNS: *Long Range Navigation System*). Cada LRNS debe en principio tener un sistema de gestión de vuelo (FMS) que utiliza información posicional de un sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) aprobado, o un sistema de referencia inercial aprobado (IRS) o una combinación de las dos. La mezcla de sensores (GNSS puro, IRS puro o IRS / GNSS mixto) determinan la operación i las contingencias del vuelo en caso de que falle el sistema.

- **RNAV 5**

La especificación RNAV 5 es la anteriormente conocida como RNP 5 en Oriente Medio o RNAV básica o B-RNAV en Europa, donde está aplicada principalmente a ruta, aunque aún queda algún remanente de maniobras de salidas instrumentales estandarizadas (SID: *Standard Instrumental Departure*) y rutas estandarizadas de llegada a la terminal (STAR: *Standard Terminal Arrival Route*) en algunos TMA²⁰ (*Terminal Manouvering Area*). La especificación B-RNAV es equivalente automáticamente a la RNAV 5 [26].

²⁰ TMA: Áreas controladas que se establecen generalmente sobre uno o varios aeropuertos.

- **RNAV 2 y 1**

Las especificaciones RNAV 1 y RNAV 2 son tratadas en la práctica por la OACI como una única especificación que agrupa a la ya antigua P-RNAV europea, principalmente empleada en procedimientos SID y STAR [27].

La RNAV 1, ya se está empleando ampliamente en Europa en procedimientos dentro de TMA, para salidas y llegadas primordialmente, y en un entorno radar, que es con la finalidad que se creó. No se espera que haya más implantaciones de la RNAV 2, per se, y que las existentes en Norteamérica vayan siendo sustituidas con el tiempo.

En un principio, los planes iniciales de Europa (Eurocontrol) han venido siendo que la RNAV 1 también vaya sustituyendo a la RNAV 5 en ruta, por cuestiones de un uso más eficiente del espacio aéreo, pero ahora mismo ya no es así, ya que actualmente se está considerando la aplicación de otras especificaciones más avanzadas tipo RNP.

- **RNP 4**

La especificación RNP 4 fue diseñada para ser volada en regiones desérticas y oceánicas, por lo cual esta especificación no requiere ninguna radio ayuda suplementaria basada en tierra. La especificación requiere un alto grado de precisión, que solo se puede conseguir con el uso de la navegación satelital. Por lo tanto, GNSS es obligatorio si se desea volar este tipo de rutas.

- **RNP 1 y 2**

La especificación RNP 1 se basa en el uso obligatorio de navegación por satélite GNSS. Algunos sistemas de navegación de área pueden conseguir los mismos grados de precisión con el uso de dos estaciones DME. Sin embargo, RNP 1 y 2 están diseñados para rutas donde casi no existen instalaciones terrestres, por lo que no se debe usar este tipo de radio ayudas. Fue concebida inicialmente para espacio aéreo terminal sin vigilancia ATS (Air Traffic System) o con vigilancia limitada, está destinada a convertirse con el tiempo también en un estándar para las SID y STAR en TMAs bien equipados con alta densidad de tráfico desplazando a la RNAV 1. De hecho, la Comisión Europea va a hacer que el uso de la RNP 1 sea obligatorio a partir del 2024 en las SID y STAR de los principales TMAs. Y sea la opción preferente para el resto de TMAs [27].

- **RNP APCH**

La especificación RNP APCH trata de aproximaciones que no son de precisión las cuales están apoyadas por GNSS y por procedimientos de aproximación con guía vertical (APV: Approach Procedure with Vertical Guidance) que se dividen en dos tipos de APV. La primera es la APV **Baro²¹** y la segunda es la APV SBAS (ambos se definirán detalladamente en el apartado 3.3.2) [25].

²¹ Baro: Basado en altitudes barométricas.

Las **mínimas**²² vienen determinadas en función del tipo aproximación de no precisión, y del procedimiento APV que tenga cada pista. Existen 3 tipos de altitudes mínimas según el tipo de aproximación:

- Aproximaciones de no precisión que solo cuentan con guiado lateral (LNAV: *Lateral Navigation*) o guiado mediante un localizador.
- Aproximaciones APV Baro que cuentan con guiado vertical y lateral (LNAV/VNAV).
- Aproximaciones APV SBAS las cuales cuentan con guiado vertical tipo LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*).

Todas estas aproximaciones se describen de forma detallada en la sección 3.3.

• RNP AR APPROACH

Los criterios RNP AR se han desarrollado para soportar operaciones RNP a mínimos RNP usando RNP menor o igual a 0.3 NM o giros de radio fijo (RF). El rendimiento vertical se define mediante un presupuesto de error vertical basado en Baro VNAV. Se pueden demostrar medios equivalentes de cumplimiento utilizando SBAS. RNP AR APCH se registra como RNAV (RNP). Se proporciona una línea mínima para cada valor de RNP disponible [26].

3.2.3.3 Aplicaciones a la navegación

Una vez ya se han definido los requisitos que deben tener las infraestructuras y las diferentes especificaciones en función del tramo que se está volando, habría que aplicar estos criterios a las diferentes fases de vuelo que sigue una aeronave. La figura 3.7 muestra las diferentes especificaciones que se pueden encontrar en función de la fase de vuelo.

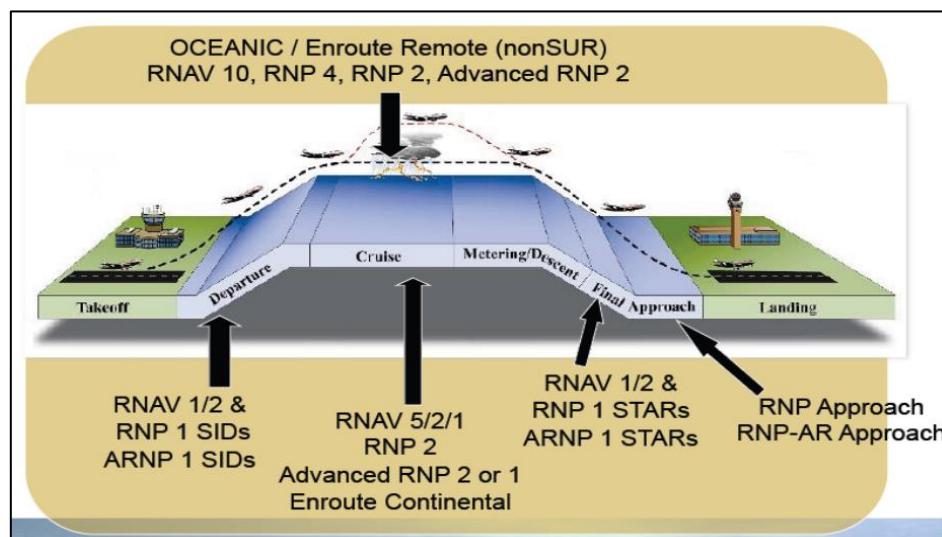


Figura 3.7. Aplicaciones a la navegación. Fuente [28].

²² Mínimas: Altitud más baja en la que el piloto debe decidir si seguir o frustrar la aproximación. En este TFG cuando se haga mención a la(s) mínima(s) se entenderá que se hace referencia a la(s) altitud(es) mínima(s).

- **Salidas (Departures).** Se pueden usar tanto RNAV 1 y 2, como SIDs tipo RNP 1 y ARNP 1.
- **En ruta Continental (Enroute Continental):** Se pueden usar RNAV 5/2/1, RNP 2 y ARNP tipo 2 y 1.
- **En ruta Oceánica (Enroute Oceanic):** Se pueden usar RNAV 10, RNP 4, RNP 2 i ARNP 2.
- **En descenso (Descent):** Se usa RNAV 1 y 2, y STARs tipo RNP 1 y ARNP 1.
- **Aproximación (Approach):** Se usan las especificaciones RNP Approach o el RNP-AR Approach.

Es importante destacar que las especificaciones de performance en las salidas y en las aproximaciones suelen ser más restrictivas debido a la gran necesidad de que estas sean precisas. En el caso de rutas oceánicas, la aeronave puede llegar a desplazarse hasta 10 millas náuticas laterales de su trayectoria deseada ya que se encuentra en una fase de vuelo con pocos tráficos y en los que hay mucha maniobrabilidad en caso de algún posible incidente.

3.3 Aproximaciones RNP

En esta sección se definirán todas las fases que contiene una aproximación y que tipo de aproximaciones RNP existen actualmente. El objetivo principal es el de entender los diferentes tramos que forman una aproximación tipo RNP, y el de reconocer qué diferencias hay entre los diferentes tipos de aproximación en función de los sistemas que tenga el avión, para poder realizar la carta lo más semejante a la realidad posible. Finalmente se verá un ejemplo real de una aproximación RNP que se está usando hoy en día.

3.3.1 Fases de una aproximación RNP

Una aproximación normalmente está dividida en cuatro tramos formados por [29]:

- Tramo de aproximación inicial (IAF: *Initial Approach Fix*)
- Tramo de aproximación intermedio (IF: *Intermediate Fix*)
- Tramo de aproximación final (FAF: *Final Approach Fix*)
- Tramo de aproximación frustrada (MAP: *Missed Approach Point*)

Estos cuatro tramos se describen en los apartados siguientes [30].

- **Tramo de aproximación inicial**

El tramo de aproximación inicial da inicio a la aproximación de una aeronave. Suele empezar en el mismo punto en el que termina la STAR correspondiente, y terminar donde empieza el tramo de aproximación intermedio.

Este tramo puede ser diseñado de diferentes maneras en función de las condiciones orográficas de cada aeropuerto y de la cantidad de aerovías que estén relacionadas con el mismo. El segmento de aproximación inicial puede realizarse mediante arcos DME, radiales de un VOR, **virajes de procedimiento**²³, vectores radar, waypoints del GPS o una combinación de todos estos.

Este *FIX* se encuentra en las cartas de aproximación con las letras (IAF), y aunque no hay especificada una distancia máxima para este segmento, normalmente nunca exceden de 50 MN, es importante tener en cuenta que garantizan un libramiento de obstáculos de por lo menos 1,000 pies AGL dentro de una cobertura de 4 MN a cada lado del centro de este, por lo que es muy importante ser muy precisos en mantenerse en el centro. La separación en los diferentes tramos se puede observar en la figura 3.8

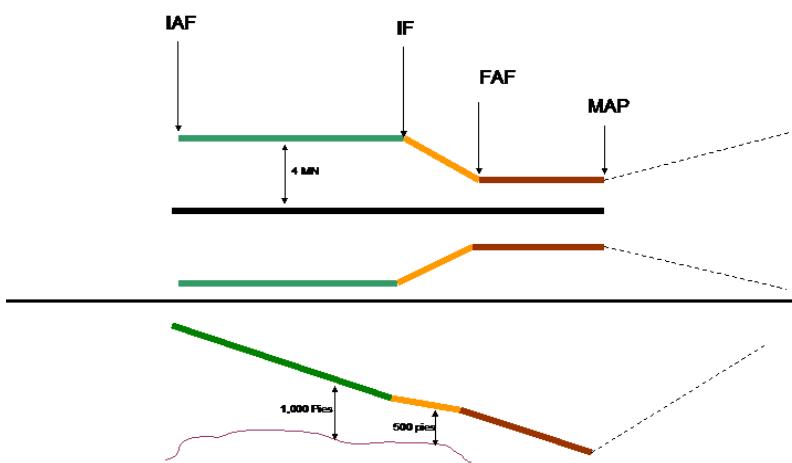


Figura 3.8. Separación sobre el terreno en función del tramo. Fuente [30].

El viraje final de este segmento hacia el tramo de aproximación intermedio no puede ser mayor a 120°, pero, cuando es mayor de 90° se debe de marcar una “radial guía”, la cual debe de estar situada a no menos de 2 MN del IF y marcará el momento en que se debe de iniciar el viraje hacia el IF. Cuando este segmento es un Arco DME, este no deberá de ser menor de 7 DME de radio y aplica la “radial guía” en caso de que el último viraje exceda de 90°.

Cuando se utiliza un viraje de procedimiento, ya sea de **gota**²⁴ o de 45° o bien un patrón de espera, éste formará parte del segmento inicial y terminará en el IF; sin embargo, en el momento en el que se intercepta el radial de entrada antes del FAF, ya se está volando en el tramo de aproximación intermedio.

²³ Virajes de procedimiento: es la forma en que las aeronaves hacen giros para corregir su rumbo según necesidades. En una aproximación, a veces es necesario SOBREVOLAR una ayuda de navegación, un fix, o un punto, continuar, y entonces girar para orientarse y aterrizar.

²⁴ Viraje de gota: Es el viraje que realiza una aeronave para entrar en una espera.

Es importante aclarar que cuando se vuela este tipo de procedimientos en los que el VOR o en su caso el NDB están localizados en el aeropuerto, el IAF técnicamente no existe; sin embargo, en la práctica se podría en un momento dado considerarlo que sí existe, ya que como se describe más adelante en esta sección, en el IF el libramiento de obstáculos se reduce a solo 500 pies, por lo que el hacerlo proporciona una mayor seguridad.

Cuando el IAF no forma parte de la aerovía, se designa un punto llamado Ruta Alimentadora (Feeder Route) y se refiere a la derrota de transición entre la aerovía y el IAF, eso es llamado por algunos como el quinto segmento de una aproximación.

Una de las condiciones que determinan este segmento es la velocidad, como se trata de canalizar a las aeronaves provenientes de las diferentes aerovías, es muy importante que estas mantengan ya una velocidad reducida e igual, para así poder mantenerlas a una distancia adecuada, es por eso que en esa parte de la aproximación se comience a disminuir la velocidad a la mínima de aproximación. Eso dependerá de la distancia del segmento y del descenso requerido.

- **Tramo de aproximación intermedio**

El tramo de aproximación intermedio empieza al final del tramo de aproximación inicial (IF), y termina en el FAF. Teniendo en cuenta que en el FAF ya se debe de tener el avión en configuración de aterrizaje, el IF se utilizará precisamente para preparar a la aeronave para esta configuración; esto quiere decir, que aquí es en donde se ajusta la velocidad de referencia (**Vref²⁵**), los **flaps** y los **slats²⁶**, el tren de aterrizaje, las listas de comprobación adecuadas, etc.

Este tramo normalmente debe de estar alineado con el curso final de la aproximación; no obstante, en ocasiones y debido a las condiciones ortográficas o de obstáculos hechos por el hombre de algún aeropuerto en específico, esto no siempre es posible, por lo que, si el rumbo de entrada al IF no es igual al tramo del FAF, este no podrá tener una diferencia mayor a 30°. Por otro lado, es de suma importancia que este tramo tenga un gradiente de descenso lo menos pronunciado posible, por lo que normalmente se diseñan con descensos de 150 pies por Milla Náutica, y nunca con más de 318 Ft/MN, a menos de que este segmento este ya unido a un ILS, por lo que en este caso se ajustará al ángulo de 3° del **Glide Slope²⁷**.

La distancia en esta parte de la aproximación varía entre 15 y 5 MN, la distancia óptima es de 10, y el ancho de protección en la zona primaria comienza con las 4 Millas Náuticas del tramo anterior y se va reduciendo al ancho de protección que corresponda al tipo de aproximación de que se trate en el FAF (tal y como se puede observar en la figura 3.8). Es importante mencionar que la protección del libramiento de obstáculos se reduce a 500 pies, por lo que ahora se requerirá de una mayor exactitud en las altitudes mínimas marcadas.

²⁵ Vref: Velocidad que debe mantener un avión en su aproximación final medida en nudos.

²⁶ Flaps y slats: Son dispositivos extensibles situados en el borde de ataque de las alas de algunos aviones. Su propósito es aumentar la sustentación durante operaciones a baja velocidad como despegue, ascenso inicial, aproximación y aterrizaje.

²⁷ Glide Slope: Se trata de la senda de planeo que sigue la aeronave en el tramo final de la aproximación.

- **Tramo de aproximación final**

El tramo de aproximación final comienza en el FAF (final del tramo intermedio), y termina en el Punto de Aproximación Frustrada (MAP). Está marcado en las cartas con la “cruz maltesa” (en los ejemplos del apartado 3.3.3 se muestran estas cruces).

Normalmente en los ILS hay una radiobaliza exterior que identifica el inicio de la senda de aproximación final la cual estará situada entre 4 y 7 MN del umbral de la pista. También existen otras dos radiobalizas (intermedia e interior) que informan al piloto de su proximidad en relación a la pista, pero al tratarse de aproximaciones ILS no forman parte del objetivo del TFG. Actualmente estas radiobalizas se están sustituyendo por DMEs.

La distancia de este sector es muy pequeña y además en forma de embudo, por lo que entre más se acerca la aeronave al MAP, más precisos deben ser los equipos y la aproximación.

Durante este segmento la aeronave debe de estar ya en configuración de aterrizaje, esto es, con el tren abajo, la velocidad ajustada a Vref, los flaps con los grados que marque el manual de operación del avión, las listas de comprobación terminadas, sin cambios en la velocidad indicada, sin cambios de rumbo, con un gradiente de descenso adecuado y sin cambios bruscos.

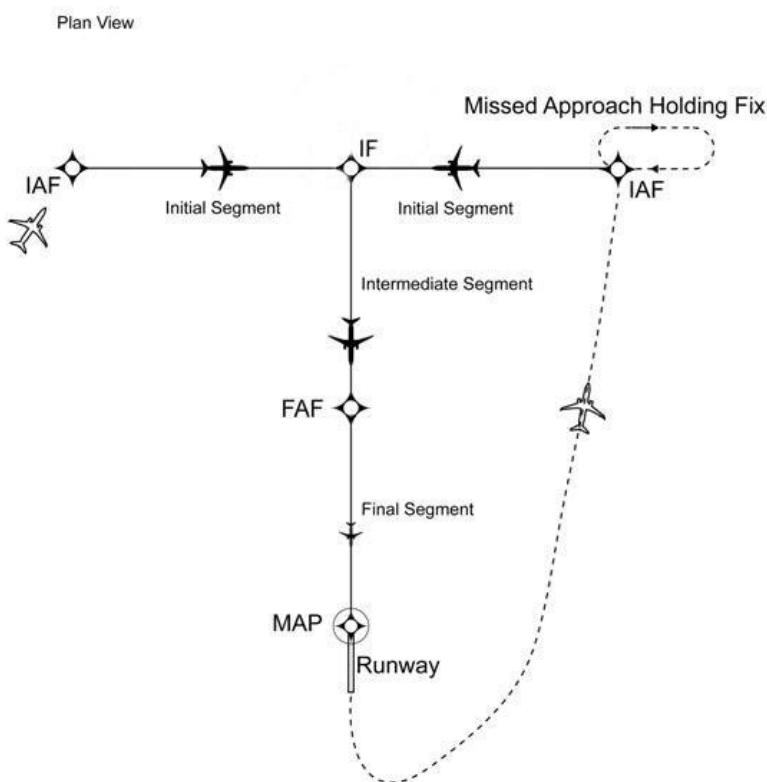


Figura 3.9. Segmentos de una aproximación. Fuente [31].

- **Tramo de aproximación frustrada**

El tramo de aproximación frustrada marca el final del tramo de aproximación final, y, por lo tanto, el inicio de la aproximación frustrada, la cual es la continuación del procedimiento de aproximación. Es aquí en donde se toma la decisión de continuar con el procedimiento o bien, si todo está en orden, continuar con el aterrizaje. Esto no quiere decir que no se pueda realizar una interrupción de la aproximación antes del MAP o aún después de este, todo dependerá de las circunstancias. Pero en términos de tramos, este último comienza en el MAP, identificado en las cartas con la letra “M” para las aproximaciones de No-precisión y en la DA (DH) para las de precisión y terminará en el patrón de espera designado para este procedimiento. Es de suma importancia que antes de dar inicio a una aproximación se entiendan claramente las instrucciones a seguir y que la tripulación por medio de una lectura previa (briefing), detalle todos los tramos de ésta, así no se tendrán dudas al momento de ejecutarla.

En la figura 3.9 se puede observar un ejemplo estándar de todos los tramos que se han descrito y que forman una aproximación.

3.3.2 Tipos de aproximación RNP

Las aproximaciones RNP son consideradas como aproximaciones instrumentales de no precisión (NPA: *Non Precision Approach*) las cuales cuentan con las siguientes características [32]:

- Están diseñadas para ser voladas con FMS.
- Pueden tener valores RNP diferentes dependiendo del tramo en que se vuela.
- Los valores RNP se almacenan en la base de datos de navegación del FMS.
- Los valores RNP cambian según vuela el avión los diferentes tramos.
- Debe de existir un modo de monitorizar y en su caso alertar (principal característica que diferencia el RNP del RNAV).
- Suelen seguir los mismos tramos de aproximación que se han definido en el apartado 3.3.1.

A parte de contar con las características citadas, también cuenta con una serie de ventajas:

- Operación muy segura (descenso continuo, no existen los **step down**²⁸).
- Guiado vertical que permite una aproximación estabilizada.
- Operaciones estandarizadas.
- Reducción de las salidas de pista debido a aproximaciones no estabilizadas.
- Reducción del riesgo de vuelo controlado contra el terreno.
- Carga de trabajo reducida para el piloto.
- Descenso continuo.
- Mejor criterio de evitación de obstáculos.
- Mejor protección de temperatura en diseño de procedimientos LNAV/VNAV.
- Acceso mejorado a aeropuertos.
- Independencia de infraestructura basada en radioayudas terrestres.
- Bajo coste de operación
- Reducción de valores de decisión mínimos.

²⁸ Step Down: Realizar aproximaciones sin ángulos de descenso continuos.

Existen dos tipos de aproximaciones RNP. El primer tipo cuenta con guiado lateral (LNAV), mientras que el segundo tipo cuenta con guiado vertical y lateral.

Normalmente el segundo tipo suele tener mínimos más bajos, aunque como se verá más adelante, no siempre es así ya que dependerá del MAP. Normalmente en las aproximaciones de no precisión la mínima viene dada por un valor tipo MDA (definido en la sección 2.5), mientras que en las de precisión el valor viene dado en función de una DA. La figura 3.10 demuestra visualmente estas diferencias.

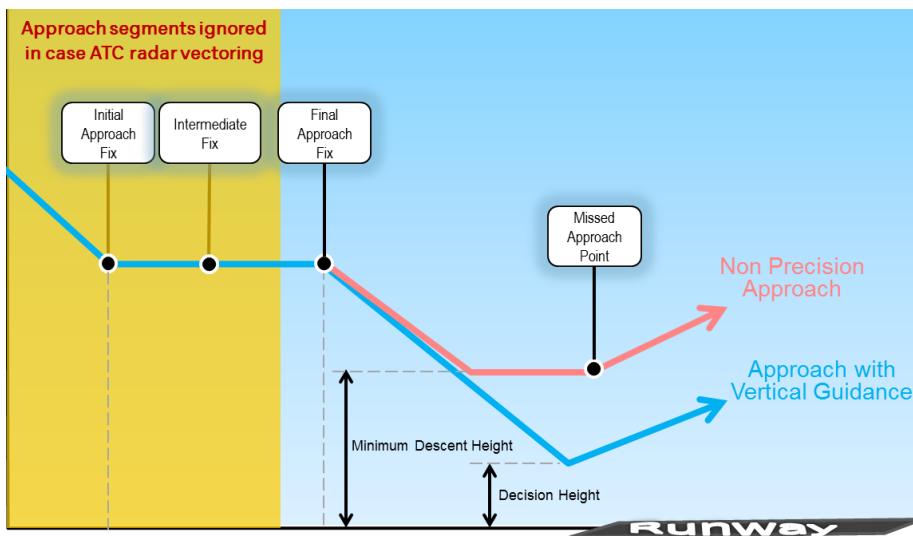


Figura 3.10. Diferencia en los mínimos según la precisión de una aproximación. Fuente [32].

- **Aproximaciones con guiado horizontal (2D)**

El concepto de aproximación de no precisión (NPA) en el marco de la PBN está caracterizado por:

- Una altitud mínima de descenso (MDA/MDH)
- Un punto de aproximación frustrada (MAP)
- La ausencia de un guiado en el plano vertical generado electrónicamente por elementos externos a la aeronave.

Para la guía horizontal (también llamada lateral) se pueden usar distintas radioayudas, tales como VOR, DME o GNSS. A diferencia de las aproximaciones de no precisión tradicionales (ANP), en el concepto PBN no se consideran los NDB para la guía horizontal.

Algunos equipos de aviación avanzada pueden mostrar electrónicamente en las pantallas del avión la senda vertical, pero esta información es solo una referencia para el piloto. Como esta referencia en el plano vertical no proviene de elementos externos, no se puede hablar de una aproximación de precisión. Por todo ello, las aproximaciones RNP de este tipo son consideradas como aproximaciones de 2 dimensiones, por lo que la aeronave no podrá descender por debajo de la MDA/MDH en caso de que el piloto no tenga apropiadas referencias visuales externas.

En este tipo de aproximaciones de no precisión RNP, se suele utilizar la RNP en las cartas y se utiliza la línea de mínimos LNAV o Localizer Performance **LP**²⁹, dependiendo de la integridad que se requiera. Para poder operar unos mínimos de LP se requiere un nivel de integridad superior al de LNAV. LP requiere un nivel que se consigue con sistemas SBAS, mientras que para LNAV se utiliza una comprobación rutinaria del receptor RAIM tal y como se muestra en la figura 3.11.

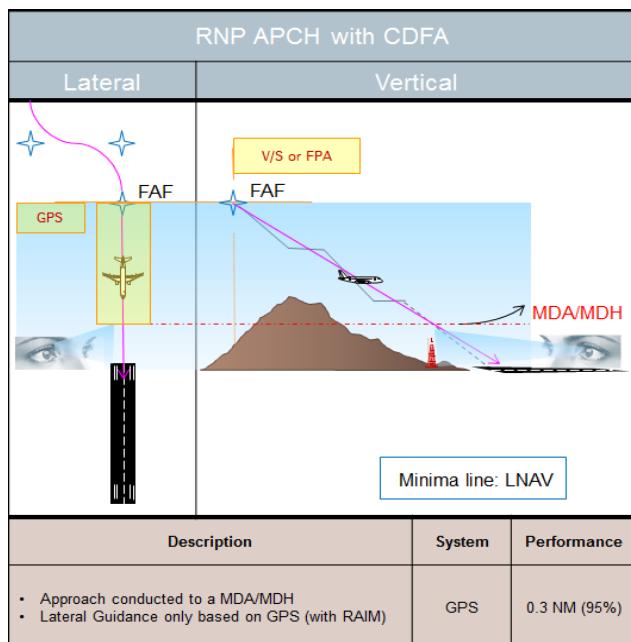


Figura 3.11. Aproximación RNP con guiado lateral RAIM. Fuente [32].

- **Aproximaciones con guía vertical (APV) y horizontal**

Las reglas PANS-OPS que definen como llevar a cabo los procedimientos de aproximación y salida de aeropuertos, dictadas por la OACI, definen en su volumen I una aproximación con guía vertical (APV), como una aproximación instrumental que utiliza guía en los planos horizontal y vertical, pero que no reúne los requerimientos establecidos para una aproximación de precisión. Por lo tanto, aunque haya aproximaciones RNP con los dos tipos de guiado, se seguirán considerando como aproximaciones de no precisión [33].

Las APV usan GNSS para el cálculo de posición horizontal y vertical. Por este motivo a estas aproximaciones se las suele denominar 3D (a diferencia de las del subapartado 3.3.2.1). El cálculo vertical se puede basar en uno de estos dos procesos:

- Un cálculo geométrico de la posición vertical de la senda por medio de información barométrica proveniente del sistema de datos del aire (Baro VNAV).
- Un cálculo geométrico de la posición vertical de la senda por medio de GNSS con aumento de integridad (SBAS).

²⁹ Localizer Performance: Se trata de aproximaciones de no precisión que usan sistemas de aumentación de área (WAAS, EGNOS, SDCM,...) para el guiado vertical. Se suelen usar en ubicaciones en las que el terreno o los obstáculos no permiten el uso de LPV.

En estos casos, el descenso mínimo va hasta la DA/DH. Dependiendo del nivel de integridad requerido por las autoridades que han diseñado la aproximación, estas pueden ser LNAV/VNAV si se usan sistemas barométricos para construir el plano vertical, o LPV si se usan los sistemas GNSS con aumento de integridad SBAS. Cada una de estas aproximaciones puede tener una altitud mínima de descenso diferente, aunque normalmente las altitudes mínimas de las aproximaciones que usan sistemas de aumentación son más bajas, casi igualando las de **CAT I**³⁰ de un ILS. En las figuras 3.12 y 3.13 se puede observar cómo las DA/DH son diferentes en función del tipo de APV.

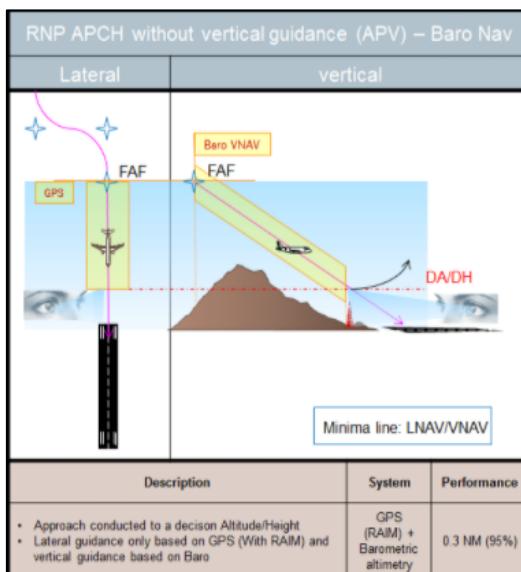


Figura 3.12. Aproximación Baro VNAV
Fuente [32].

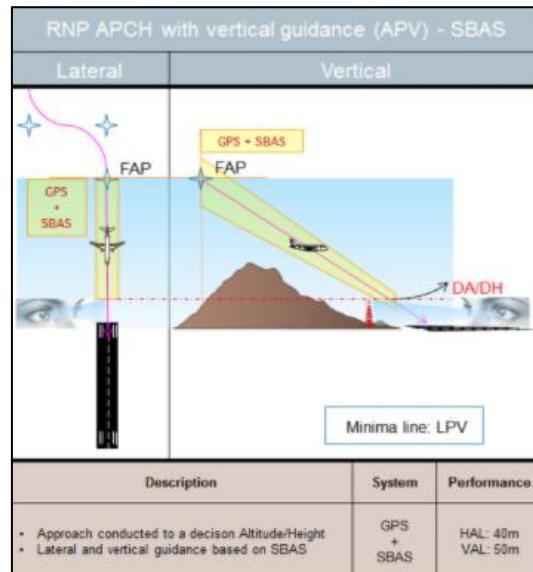


Figura 3.13. Aproximación SBAS
Fuente [32].

Para el posicionamiento vertical de la aeronave se emplean 2 métodos en la PBN [34]:

- Altimetría barométrica (Baro-VNAV)
- Altimetría Geométrica (GNSS)

La altimetría barométrica (Baro-VNAV) proporciona lecturas basadas en la presión atmosférica y se ve influenciada por la temperatura (más tarde se verá el porqué). La altimetría Geométrica (GNSS) es parte del cálculo de posicionamiento 3D que ofrece el sistema de satélites. La precisión del sistema GNSS es muy buena, pero la integridad de la señal debe ser garantizada por medios suplementarios de aumentación.

³⁰ CAT I: La categoría I en aproximaciones mediante ILS permiten aterrizajes con una visibilidad mínima de 2.400 pies o 1.800 pies en caso de que haya iluminación de la línea central y un mínimo de techo de nubes de 200 pies.

Las publicaciones de las cartas de aproximación muestran una senda de descenso en la aproximación, que claramente este bien por encima de las altitudes mínimas escalonadas y facilita el uso de la técnica de descenso continuo en configuración estabilizada. El ángulo de descenso constante es la técnica que se recomienda en este caso.

Los modernos equipos de aviónica son capaces de mostrar electrónicamente la senda de descenso en las pantallas produciendo una indicación similar a la de los clásicos ILS. La senda vertical que se visualiza en las pantallas debe ser la misma que la publicada en las cartas de aproximación. Dicha carta de aproximación debe mostrar claramente al piloto la altitud mínima de descenso (DA/DH) identificada en los recuadros LNAV/VNAV o bien LPV.

El piloto al mando es responsable de descender hasta la línea de mínimos apropiada. Si se utiliza un sistema que crea la representación vertical de la senda por medio de Baro-VNAV, entonces se debe tener en cuenta que la variación de la temperatura puede tener un efecto importante en el ángulo de descenso tal y como muestra la figura 3.14. La ISA representa la temperatura estándar a nivel del mar y el VPA es el ángulo de descenso.

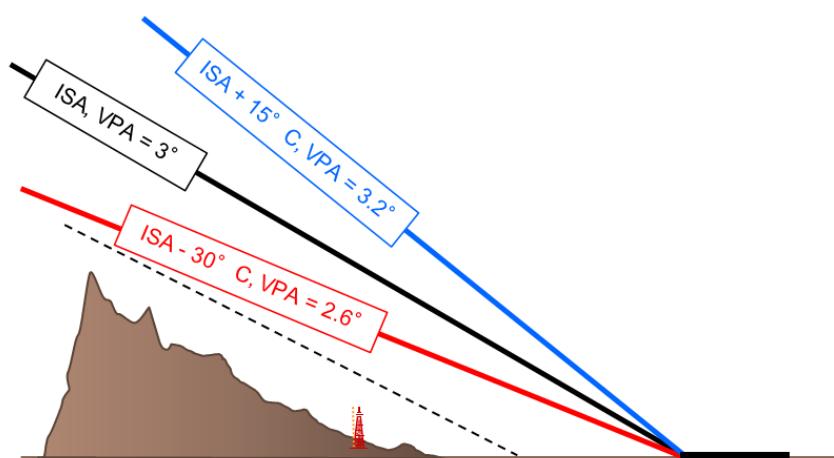


Figura 3.14. Ángulos de descenso en función de la temperatura. Fuente [32].

En las cartas de aproximación se muestran siempre las variaciones de temperatura que se aceptan como válidas. Cualquier valor por debajo de estos límites resulta peligroso. De la misma manera que la temperatura produce errores en la senda de aproximación, una incorrecta selección barométrica produciría error tal y como se puede observar en la figura 3.15. La presión barométrica se mide en hectopascales y su calaje determina la altitud de la aeronave respecto al mar.

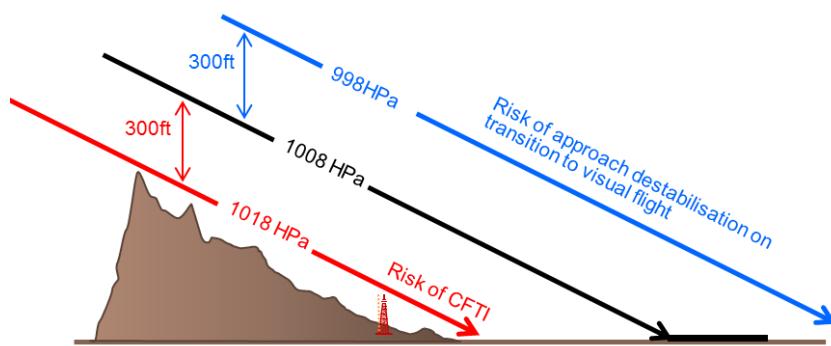


Figura 3.15. Sendas de planeo según calaje de la presión barométrica. Fuente [32].

Entre las dos aproximaciones con guiado vertical existen algunas diferencias importantes a la hora de monitorizar el descenso. En las aproximaciones LPV se trata de crear un sistema que se parezca al ILS, mientras que las aproximaciones LNAV/VNAV tiene un tipo de descenso con indicaciones de desviación constantes. La escala de desviación LNAV/VNAV que se puede monitorizar en el PFD es lo que se denomina “Desviación lineal”, mientras que la escala de una aproximación LPV es lo que se denomina una “Desviación angular” [35]. Una buena forma de representar esta información es mediante la figura 3.16. A la izquierda aparece la desviación angular de LPV ya la izquierda la desviación lineal LNAV/VNAV.

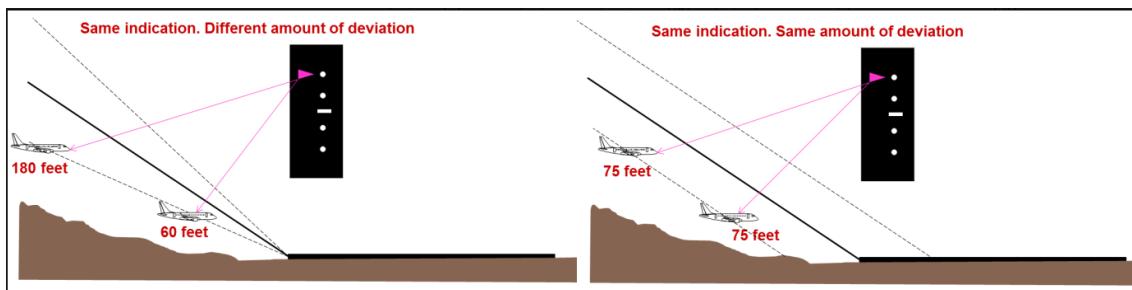


Figura 3.16. Indicación según el tipo de desviación. Fuente [32].

Tal y como se aprecia en la figura 3.16, si se mantuviera el mismo ángulo de descenso durante la aproximación, la indicación de desviación se mantendría en el caso de tratarse una aproximación LNAV/VNAV. A efectos prácticos no es útil, ya que cuando más cerca se está del umbral de la pista, más correcta debería ser la indicación de desviación.

Las aproximaciones con LPV sí que cumplen con ese requisito por lo que se parece mucho a una aproximación instrumental de precisión como es el ILS, ya que indican la desviación angular en función de la posición del avión respecto la senda de planeo ideal.

En la figura 3.17 se puede comprobar hasta qué punto son las mínimas de las aproximaciones RNP en comparación con las del ILS de diferentes categorías.

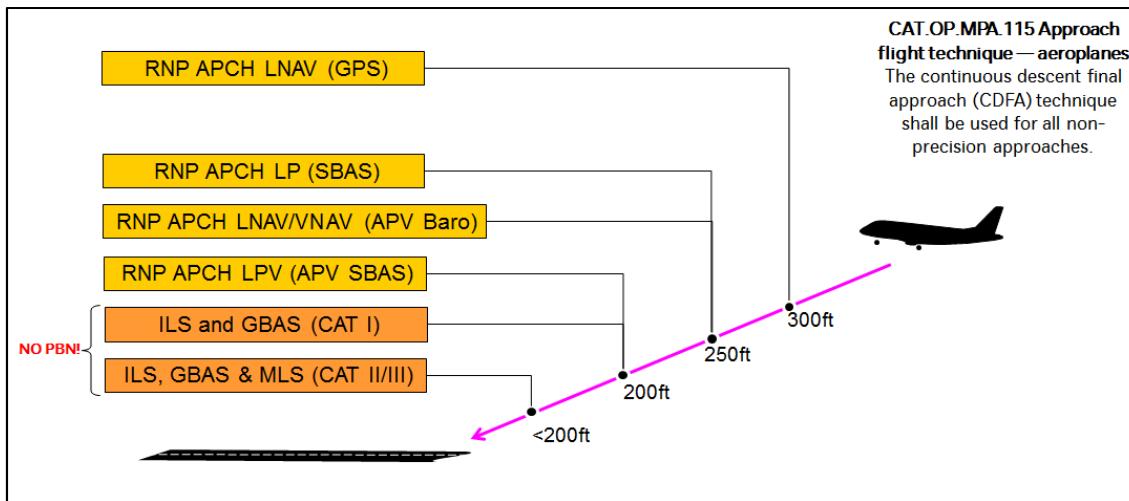


Figura 3.17. Altitudes mínimas para frustrar la aproximación por tipo. Fuente [31].

3.3.3 Ejemplo de una carta de aproximación RNP

En este apartado se mostrará un ejemplo de una carta de aproximación RNP que se está usando actualmente en Estados Unidos para comprobar las diferencias entre aproximaciones RNP descritas en el apartado 3.2. En el capítulo 5 se explicará cómo se debe interpretar una carta de aproximación de manera detallada y completa.

La carta de aproximación es la de la pista 09 del aeropuerto de Miami representada por la figura 3.18 y 3.19. (dividida en dos).

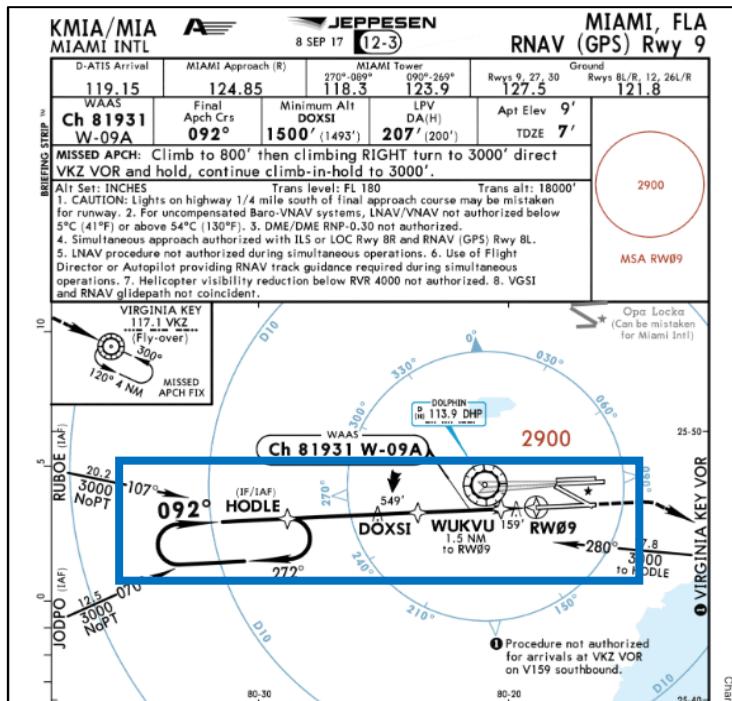


Figura 3.18. Parte superior carta aproximación RNP aeropuerto Miami. Fuente [13].

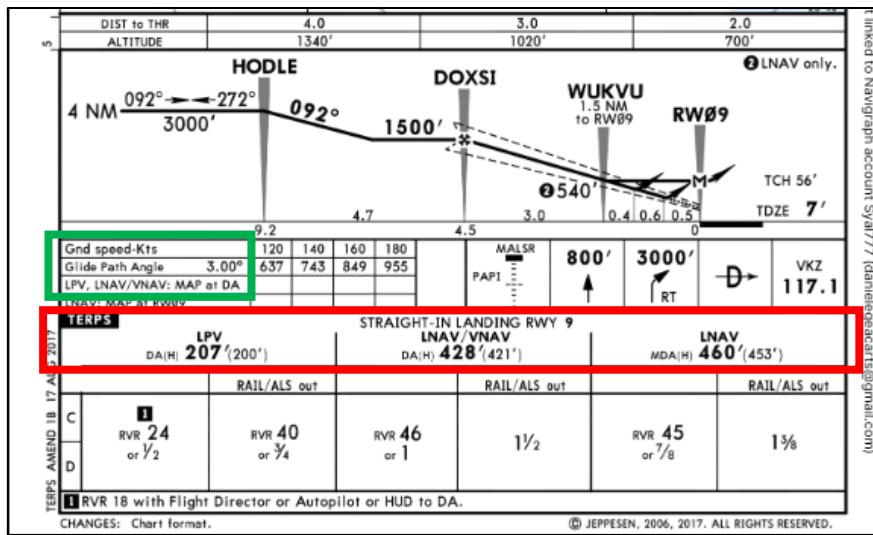


Figura 3.19. Parte inferior carta aproximación RNP aeropuerto Miami. Fuente [13].

Tal y como se puede observar en el recuadro de color azul, la aproximación cuenta con los diferentes tramos descritos en la sección 3.1. Están formados por un IAF y un IF representados por el nombre HODLE, un FAF representado con el nombre de DOXSI, y un MAP representado por una cruz a la derecha del punto WUKVU.

Otra característica importante es lo que remarca el recuadro verde, en el que se define cual es el ángulo de descenso a partir del FAF, en este caso 3 grados (suele ser el mejor ángulo para realizar aproximaciones).

El último detalle que se va a remarcar es la información que muestra el cuadro de color rojo. Tal y como se describe en el apartado 3.3.2, existen diferentes tipos de aproximaciones RNP en la que cada uno tendrá unos mínimos diferentes. Esta carta define 3 tipos de mínimos (cuadro rojo), según el tipo de aproximación RNP. En el caso de que haya guiado vertical (LPV) con el apoyo de sistemas de aumentación (en este caso es el WAAS), la mínima pasa a ser una DA de 207 pies sobre el nivel del mar. Si se hace la aproximación mediante un guiado vertical barométrico (LNAV/VNAV), la mínima ya es un poco más alta, concretamente 428 pies sobre el nivel del mar. Finalmente, si la aproximación se realiza sin guiado vertical (VNAV), la mínima pasa a tener una altitud de 460 pies a nivel del mar, cumpliendo con el criterio mostrado en la figura 3.17.

3.4 Conclusiones del capítulo

Mediante la realización de este capítulo ha sido posible comprender la principal base teórica de este TFG. Antes de llevar a cabo un estudio del estado del arte de todos los parámetros requeridos para el desarrollo de la parte práctica de este trabajo, ha sido necesario obtener los conocimientos suficientes sobre a navegación aérea, navegación basada en prestaciones, y aproximaciones RNP, ya que sin ellos no sería posible el diseño de una carta de aproximación y posterior simulación de una aproximación utilizando dicha carta con ciertas garantías de validez.

La evolución en la navegación aérea ha sido, y está siendo, uno de los factores claves en el desarrollo para muchos usuarios del transporte aéreo (aerolíneas, aeropuertos, instituciones gubernamentales, etc). Es por este motivo que, desde el primer sistema de navegación, la navegación visual, han ido apareciendo nuevos métodos y procedimientos que ayudan, entre otras cosas, a la orientación de los pilotos y al desarrollo de una navegación más segura y eficiente.

Gracias a este avance surgió la navegación basada en prestaciones, la cual está compuesta por una serie de especificaciones, infraestructuras y aplicaciones que han permitido la homogenización de la navegación aérea creando así un sistema más avanzado y con mayores beneficios que la navegación instrumental que había hasta el momento. El estudio de la navegación PBN es crucial para la realización de este TFG ya que requiere entender muchos de los conceptos necesarios para diseñar una aproximación RNP, como puede ser el RNAV, el RNP, o las limitaciones y normativas que se deben seguir a fin de cumplir con todos las restricciones operacionales de este tipo de navegación.

Finalmente, y con el concepto de la PBN definido, se ha llevado a cabo una descripción de los conceptos principales que forman las aproximaciones (como por ejemplo sus diferentes fases), así como los tipos de aproximaciones RNP que existen actualmente.

Una vez se han comprendido los conceptos teóricos definidos en este capítulo, ya es posible llevar a cabo los diferentes estudios del estado del arte que servirán, para más adelante, entender las necesidades y los recursos disponibles a fin de llevar a cabo el diseño de la aproximación RNP.

4. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

Para poder llevar a cabo la carta de aproximación no solo es necesario entender todos los conceptos teóricos sobre la navegación basada en prestaciones y en la navegación RNP. También es necesario entender el estado del arte actual del aeropuerto en el que se quiere realizar la carta con el objetivo de saber cuáles son las necesidades que este tiene y que procesos pueden beneficiar a la gestión del mismo.

El estado del arte del PBN en España es otro factor que debe analizarse con el objetivo de entender hasta qué punto es posible que este tipo de aproximaciones formen parte del día a día en las operaciones aéreas comerciales del país. También servirá para ver si el proyecto práctico que se quiere realizar en este TFG es factible desde un punto de vista técnico y operacional.

Finalmente, también habría que analizar el estado del arte de la aeronave Airbus A320 en relación a la tecnología PBN. Teniendo en cuenta que se quiere realizar una simulación con este avión, es necesario saber si este es capaz de llevar a cabo aproximaciones RNP mediante el análisis de los dispositivos de navegación que contiene a bordo y comprobando que cumple todos los requisitos de performance dictados en el manual PBN.

En la figura 4.1 se indican los aspectos a analizar en este estudio del estado del arte.



Figura 4.1. Estado del arte: Aspectos a analizar.

4.1 Estudio del estado del arte del aeropuerto de Lérida

En esta sección se hará un análisis completo del estado del arte del aeropuerto de Lérida comenzando por una descripción detallada del mismo. Seguidamente se analizarán las diferentes aproximaciones que posee actualmente el aeropuerto con la finalidad de determinar sus posibles carencias en cuanto a operabilidad y de esta forma tratar de formular alguna solución.

Como resultado del estudio del arte del aeropuerto se ha determinado que hay varias carencias, por lo que en el apartado 4.1.3 se describirá también la solución que se pretende implantar mediante la nueva aproximación teniendo en cuenta los beneficios que esta puede comportar al aeropuerto de Lérida. Es importante remarcar que en esta sección solamente se describirá la aproximación RNP, no será hasta el capítulo 5 en el que se diseñe la carta de aproximación como tal con todos sus parámetros y procedimientos.

4.1.1 El aeropuerto de Lérida

En este apartado se definen los términos generales del aeropuerto de Lérida como su ubicación o dimensiones, así como también se analizan las aproximaciones que existen actualmente con el objetivo de encontrar sus posibles carencias.

4.1.1.1 Descripción general del aeropuerto

El aeropuerto de Lérida fue diseñado y construido entre el año 2007 y 2010 por una empresa española llamada *Aertec*. Constituye el cuarto aeropuerto más grande de Catalunya con un área construida de 4.942 metros en los que se encuentran todos los tipos de servicios que se esperan encontrar en un aeropuerto [36]. El proyecto tuvo un presupuesto inicial de 42,5 millones de euros, pero finalmente su coste real fue de 90 millones de euros los cuales fueron subvencionados por la Generalitat de Catalunya.

El nombre del aeropuerto es Lleida-Alguaire debido a que esta infraestructura fue construida en este mismo municipio. Alguaire se encuentra en la comarca catalana del Segriá en el oeste de Cataluña, concretamente a 15 kilómetros de Lérida capital [37]. El hecho de que se encuentre en esta ubicación provoca que sus principales áreas de influencia sean la ciudad de Lérida y el Principado de Andorra.

Este aeropuerto gestionado por la administración de *Aeroports de Catalunya* fue diseñado con el objetivo de que su función principal fuera el de dar servicio a la aviación comercial. Originariamente daba servicio a aerolíneas como *Vueling*, *Ryanair* o *Airnostrum*, pero las estadísticas en cuanto a volumen de pasajeros y en cuanto a ingresos acabó provocando que estas aerolíneas dejaran de operar en este aeropuerto.

Durante los primeros años, y viendo los malos resultados obtenidos, el aeropuerto pasó a considerarse como una muy mala inversión para la industria aeronáutica, y más teniendo en cuenta que parte de esa inversión fue mediante fondos públicos. Es por ello que se tuvo que optar por un cambio de estrategia.

Este cambio de estrategia consistía en modificar los objetivos que tenía el aeropuerto en un principio, y sustituirlos por objetivos enfocados hacia otros sectores de la aviación como pueden ser las escuelas de formación de pilotos o las actividades industriales. Teniendo en cuenta el turismo y la población que tiene Lérida, era muy complicado mantener las líneas de vuelo regular por lo que ahora el aeropuerto realiza otro tipo de actividades. Más de 25 nuevas empresas se han instalado en el Lleida-Alguaire las cuales realizan labores de mantenimiento, reparación y desmantelamiento de aeronaves.

Otro ejemplo de empresa que ha invertido en este aeródromo es el de BAA Training (escuela de aviación lituana) la cual invirtió 500.000 euros en un simulador para la instrucción de pilotos. Gracias a la creciente actividad industrial, este año está prevista la construcción de dos nuevos hangares para empresas que se sumarán a lo que ya dispone el Real Aeroclub de Lleida [38]. Estas nuevas actividades de negocio, junto con otros eventos como ferias aeronáuticas o festivales, han provocado que haya un total de 29.842 operaciones (400% más que en 2018) en 2019 batiendo un nuevo récord y reafirmando así que Lleida-Alguaire es el aeropuerto industrial de Catalunya.

La figura 4.2 representa una ficha básica del aeropuerto de Lérida donde aparecen los tamaños y direcciones de las pistas, junto con otra información como su elevación, su posición, sus datos geográficos o el perfil que sigue la pista.

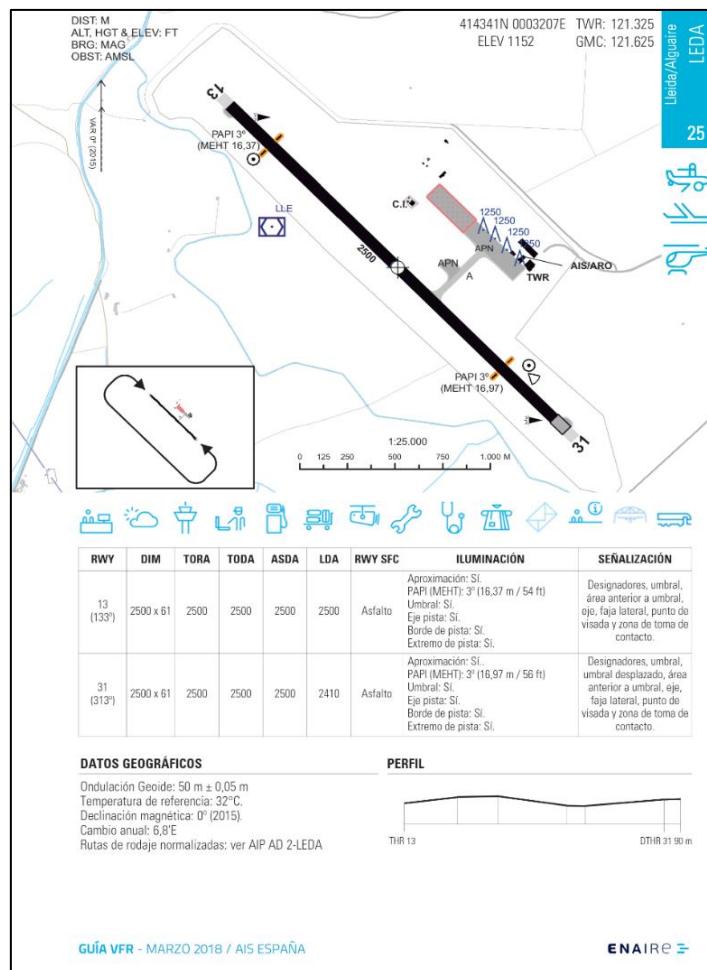


Figura 4.2 Ficha Aeropuerto Lérida. Fuente [39].

En referencia a la figura 4.2 es importante aclarar una serie de conceptos para entender la ficha del aeródromo en su totalidad [40]:

- **Runway (RWY):** Los valores de estas casillas representan el nombre de la pista junto con su orientación magnética. La pista 31 tiene una orientación de 313 grados respecto el norte magnético. El nombre de la otra pista (sentido) es la 13 con una orientación de 133 grados.
- **Dimensions (DIM):** En esta casilla aparecen las dimensiones de la pista. En el caso de Lleida-Alguaire la única pista que posee tiene unas dimensiones de 2.500 x 61 metros.
- **Take Off Distance Available (TODA):** Es la distancia de despegue útil que incluye el **umbral desplazado**³¹ y el **Clearway**³². En Lleida este valor es igual a la longitud de la pista (2.500 metros) ya que no dispone de Clearway.
- **Take Off Runway Available (TORA):** Es la distancia que comprende la longitud de la pista y el umbral desplazado si lo hubiese. En Lérida esta distancia también es de 2.500 metros en las dos pistas.
- **Accelerate Stop Distance Available (ASDA):** Es la distancia de aceleración-parada que sería utilizada en caso de un aborto de despegue. En este caso incluiría el umbral desplazado, así como la **stopway**.³³ En Lérida el valor del ASDA es de 2.500 metros ya que no posee stopway.
- **Landing Distance Available (LDA):** Es la distancia desde 50 pies sobre el umbral de pista hasta el final de esta. En Lérida este valor es 2.500 metros en la pista 13 y de 2.410 metros en la 31 ya que esta segunda pista contiene un umbral desplazado de 90 metros.
- **Runway Surface (RWY SFC):** En esta casilla aparece el material del que está compuesta la pista, la cual podría ser de asfalto, tierra o hierba. En el caso de Lérida es asfalto.
- **Iluminación:** En esta casilla aparece información relativa a la iluminación que tiene la pista. Cabe destacar que las luces **PAPI**³⁴ (*Precision Approach Path Indicator*) indican una senda de planeo de 3 grados en las dos pistas. Las otras iluminaciones como las del umbral, eje, borde o extremo de pista ayudan a que la **RVR**³⁵ (*Runway Visual Range*) sea menor.
- **Señalización:** En esta casilla se definen las diferentes señalizaciones (marcas en el suelo) que tiene cada pista.

³¹ Umbral desplazado: Umbral que no está situado en el extremo de la pista. Dicha distancia, sin embargo, se puede usar para aumentar la distancia en el despegue.

³² Clearway: Porción de mar o tierra, libre de obstáculos, en la cual el avión alcanza una velocidad en la que el ascenso es seguro.

³³ Stopway: Es una porción de terreno que se extiende después de la pista, apropiado como distancia de frenado en caso de un aborto de despegue.

³⁴ PAPI: Es un sistema de luces que se colocan a los costados de la pista de aterrizaje/despegue. Consiste en cajas de luces que ofrecen una indicación visual de la posición de un avión sobre la trayectoria de aproximación asociado a una pista de aterrizaje/despegue en particular.

³⁵ RVR: Término meteorológico que determina la distancia horizontal desde la que el piloto de una aeronave que se encuentre sobre el eje de una pista debe poder ver ésta. Se expresa en metros.

4.1.2 Aproximaciones actuales

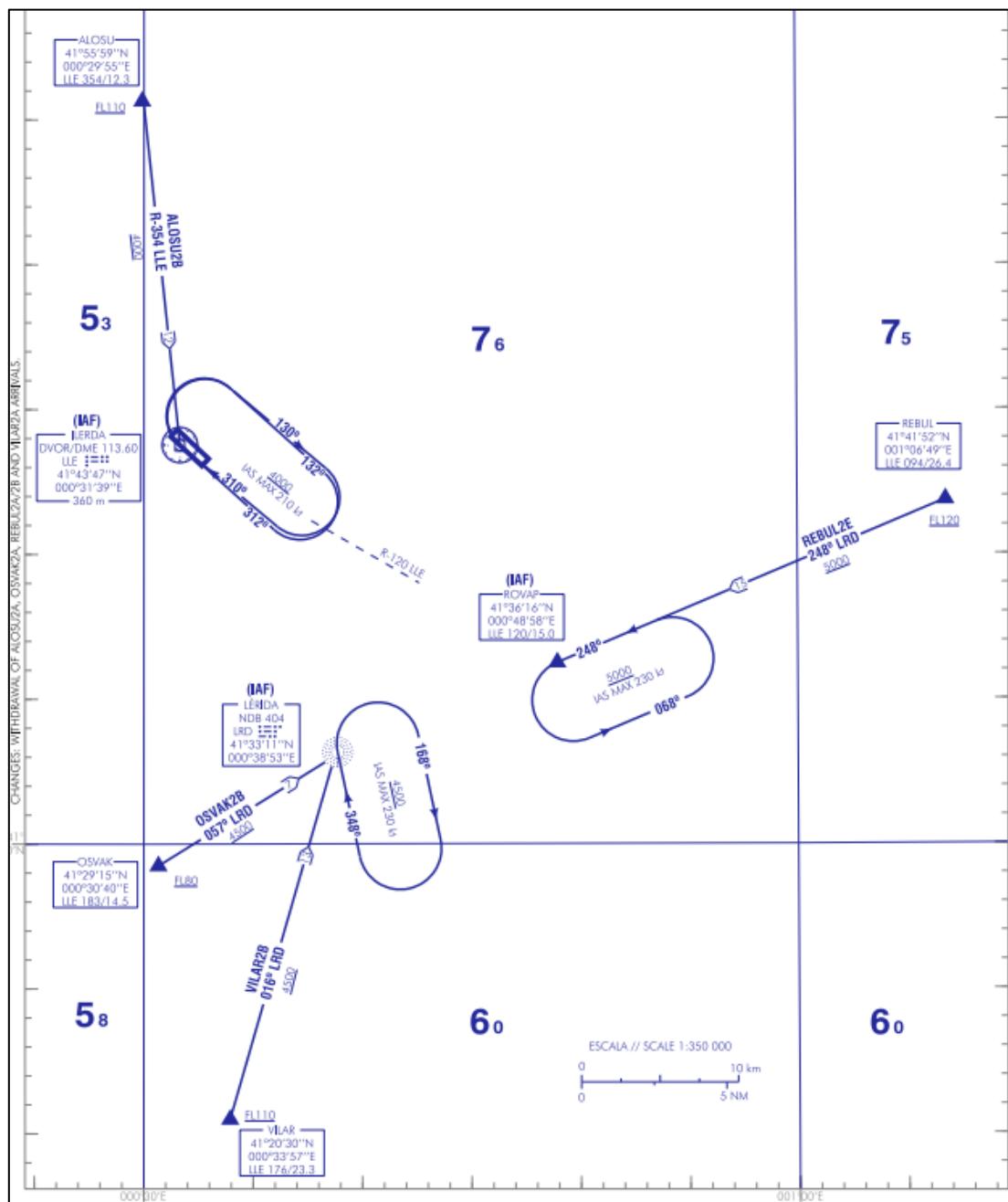
Una vez se han definido todos los aspectos generales, es importante realizar un análisis de las diferentes aproximaciones que hay actualmente en el aeropuerto Lleida-Alguaire para determinar sus puntos fuertes y sus carencias. Una vez se haya hecho esta observación, se procederá a presentar una solución al posible problema que pueda haber en este aeropuerto.

4.1.2.1 Aproximaciones pista 31

Teniendo en cuenta la información publicada en el servicio de información aeronáutico [10], actualmente la pista 31 de Lérida tiene 3 tipos de aproximaciones instrumentales (pista preferente).

- **ILS:** La primera aproximación que presenta es la ILS RWY 31. Se trata de la aproximación instrumental más precisa con la que cuenta el aeropuerto de Lérida al tratarse de una aproximación con sistema instrumental de aterrizaje. Los dos factores más destacables de esta aproximación son, en primer lugar, el hecho de contar con una senda de planeo final de 3 grados (empieza a 4,3 millas del umbral de la pista 31) y que el curso final de la aeronave es de 313 grados, lo cual coincide exactamente con el rumbo magnético de la pista. Es importante remarcar que al tratarse de una aproximación ILS, los mínimos son muy bajos (200 pies sobre el terreno) lo cual facilita aproximaciones con muy baja visibilidad.
- **LOC:** La segunda aproximación, menos precisa que la primera, es la LOC RWY 31. En este caso el ángulo de descenso final es de 3.04 grados y el curso coincide con el de la pista al tratarse de un localizador. La diferencia principal con el ILS, es que el LOC no da señal de senda de planeo por lo que pasa a denominarse como una aproximación de no precisión. Todo ello comporta que la altitud mínima sea de 448 pies en vez de los 200 del caso anterior. Es importante remarcar que cuanto más bajos sean los mínimos, más fácil y segura será la aproximación final.
- **VOR:** La tercera y última aproximación de la pista 31 recibe el nombre de VOR RWY 31. Es necesario destacar una serie de factores que la diferencian de las otras aproximaciones. La primera característica remarcable de esta aproximación es el curso final para llegar a la pista ya que a diferencia de las dos anteriores, el curso es 310 y no 313. El motivo por el cual el curso final y la orientación magnética de la pista no coinciden es porque el VOR de Lérida no está situado a la misma altura que la del umbral, sino que está situado en uno de los lados de la pista. Teniendo en cuenta esta información, si un avión siguiera el radial 313 del VOR para aterrizar acabaría aterrizando al lado de la pista, por este motivo, el curso final se ha corregido en 3 grados negativos haciendo así que la aeronave se dirija al umbral de la pista y no directamente sobre el VOR. Otra característica que es necesaria remarcar es que al tratarse de una aproximación VOR, y por lo tanto de no precisión, los mínimos son iguales que las de la LOC RW 31 donde el piloto debe decidir si seguir o no con su aproximación a 448 pies sobre el terreno.

Tal y como indica la figura 4.3, todas las aproximaciones de la pista 31 tienen los mismos 3 IAFs con una espera en cada una de ellos. El primer IAF es el de ILERDA el cual está situado justo encima del VOR de Lérida y conecta con la STAR ALOSU2B [10]. El segundo IAF es el de LERIDA, situado al sur del campo y conectado a la STAR VILAR 2B y OSVAK 2B. El último IAF es ROVAP el cual se encuentra al este del campo y está conectado a la STAR REBUL 2E.



4.1.2.2 Aproximaciones pista 13

En este caso solo habrá que analizar una sola aproximación. La aproximación recibe el nombre de VOR RWY 31 y tiene el mismo problema que la aproximación VOR de la pista 31. El hecho de que el VOR esté situado a uno de los lados de la pista, hace que el curso final de aproximación no coincida con la orientación magnética de la pista. De este modo el curso final es de 138 grados en vez de los 133 grados que tiene la pista.

Como cualquier aproximación VOR, se trata de una aproximación de NO precisión con una altitud de decisión de 365 pies sobre el terreno. De esta manera todas las aproximaciones que se quieran realizar por la pista 13 quedan limitadas ya que solo hay un tipo de aproximación instrumental y además es de no precisión.

Otro factor a analizar, es el hecho de que las 3 STARs parten del mismo IAF (a diferencia de la pista 31 en el que se encuentran 3 IAFs). Concretamente llevan al IAF de ILERDA, obligando así a que todas las aeronaves, provengan de donde provengan, deban pasar por encima del VOR para luego realizar un último tramo que les deje en final. En la figura 4.4 se puede observar el único IAF que tiene la aproximación instrumental VOR de la pista 1.3.

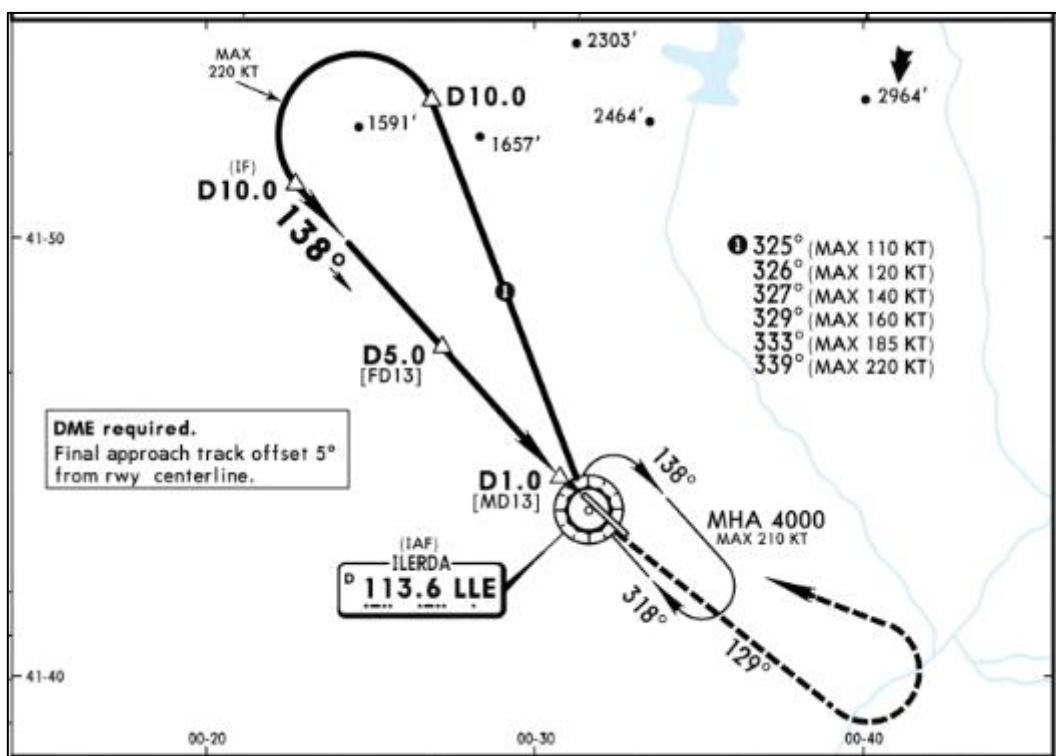


Figura 4.4. IAF ILERDA aproximación VOR pista 13. Fuente [13].

4.1.2.3 Formulación del problema

A partir del análisis de todas las aproximaciones se pueden obtener distintas conclusiones que reafirman que en este aeropuerto hay carencias de operabilidad y optimización del espacio aéreo sobre la pista 13 (objetivo del TFG). Los principales problemas son:

- **Pasar por el mismo IAF:** Uno de los principales inconvenientes que tiene este aeropuerto es el de obligar a todas las aeronaves a pasar por un IAF que queda muy lejos del tramo final de aproximación. Teniendo en cuenta que hay muchas aeronaves que provienen del norte o del oeste de Catalunya, sería mucho más práctico para una aeronave que quiere aterrizar por la pista 13 (de noroeste a sureste) contar con una STAR que dejara el avión en un IAF mucho más cerca del tramo final de aproximación. De esta manera hay un ahorro en tiempo y en combustible y es más fácil para un controlador gestionar los diferentes tráficos.
- **Pista 13 poco atendida:** Es cierto que todos los aeropuertos suelen tener pistas preferentes en función de la media del viento que haya en esa ubicación (en el caso de Lérida es la 31). Pero eso no quita que muchas otras veces se deba aterrizar por la pista no preferente, ya sea por viento, visibilidad, o por seguridad en alguna circunstancia dada. El problema principal en este aeropuerto es que la pista no preferente (pista 13) está muy desatendida en cuanto a aproximaciones ya que no es posible llevar a cabo una aproximación ILS por los obstáculos que se encuentran en el tramo intermedio de la aproximación (las aproximaciones ILS requieren de una distancia no menor a 15 millas). Normalmente en los aeropuertos importantes de alrededor del mundo, todas sus pistas (sean preferentes o no) cuentan con el mismo tipo de aproximaciones en los dos sentidos de la pista a fin de que no haya problema en caso de cambiar la configuración. Ese no es el caso de Lérida, en el que, si nunca se debe usar la configuración de pista no preferente, resulta que solo hay una aproximación y además es de no precisión. La forma de solventar esta carencia es mediante la creación de un tipo de aproximación de precisión, o que al menos asegure una serie de requisitos de seguridad para que en caso de tener que usar esa pista no sea un peligro o un inconveniente para el piloto al mando.
- **Mala visibilidad:** El último problema viene relacionado con la meteorología. Por motivos geográficos, Lérida, es uno de los territorios en el que más niebla hay de toda España durante todo el año. Este fenómeno provoca que muchos días las aproximaciones visuales no sean posibles, y que las instrumentales de no precisión ocasionen un riesgo debido a la mala visibilidad. Esto supone un problema ya que, si una aeronave quiere aterrizar por la pista 13 en un día con muy mala visibilidad, solo podrá contar con la ayuda de una aproximación VOR.

4.1.3 Solución RNP para el aeropuerto de Lleida-Alguaire

Los problemas y las carencias que posee el aeropuerto de Lérida, han traído como consecuencia que en el desarrollo de este TFG se haya planteado determinar una solución factible para que la operabilidad, la gestión y la seguridad del aeropuerto cumplan con unos requisitos mínimos. La solución que se presentará a continuación también puede ser útil para todos aquellos aeropuertos en los que la pista no preferente cuente con pocos recursos, aunque la tendencia en el sector aeronáutico es la de compensar las dos pistas y hacerlas igual de operativas a lo largo de los años.

Una vez realizado el estudio del estado del arte de Lérida, y habiendo visto las diferentes aplicaciones del PBN RNP, se ha considerado que la mejor forma de solucionar los problemas descritos anteriormente en el subapartado 4.1.2.3 es mediante una aproximación RNP con un nuevo IAF que no obligue a las aeronaves a sobrevolar el VOR de Lérida.

De este modo no solo se soluciona el problema del IAF, sino que también se solucionan los problemas de visibilidad y de pista desatendida. Tal y como se ha visto en el capítulo 3, las aproximaciones RNP aportan una serie de beneficios que velan por una navegación segura y precisa. De esta manera, los días en que haya muy mala visibilidad, las aproximaciones RNP (sobre todo con APV) serán un buen recurso para llevar a cabo aproximaciones de manera segura y eficiente. La aplicación de esta aproximación también ayudará a que la pista 13 deje de estar tan desatendida causando así que haya aproximaciones de alta precisión (aunque la RNP no lo sea técnicamente) en las dos orientaciones de la pista.

Aunque con la información que se tiene hasta el momento ya sería posible realizar una hipótesis de cómo se pretende diseñar la carta de aproximación, no será hasta el capítulo 5 en el que se describa de manera detallada como se va a realizar ya que aún es necesario analizar el estado del arte del PBN en España. Es importante entender qué recursos brinda la tecnología PBN en España para saber hasta qué punto será precisa la aproximación RNP que se quiere diseñar por lo que aún es temprano para obtener conclusiones.

4.2 Estudio del estado del arte del PBN en España

En esta sección se llevará a cabo un estudio sobre el estado del arte de la Navegación Basada en Prestaciones en España basado en el documento oficial que el Ministerio de Fomento facilita al usuario en su página web [41]. Este documento datado en 2014 determina los objetivos que pretendía alcanzar España con la implantación del PBN desde ese mismo año hasta el 2020, por ese mismo motivo, esta sección estará dividida en dos apartados. En el primer apartado se analizará cuáles eran estos objetivos con la finalidad de determinar el alcance que se esperaba en ese momento mediante la navegación PBN. En el segundo apartado se realizará un análisis de la situación actual para determinar si los objetivos planteados en el año 2014 se están consiguiendo.

4.2.1 Marco estratégico del PBN en España en 2014

La organización de Aviación Civil Internacional (administrador del Convenio sobre Aviación Civil Internacional) recomendó a todos sus Estados Contratantes (el cual incluye a España) la implantación en su espacio aéreo de la denominada Navegación Basada en Prestaciones por todos los beneficios que esta conlleva.

Según la OACI, el sector del transporte aéreo mundial tiene que hacer frente a retos decisivos para su futuro. En un contexto caracterizado por difíciles condiciones económicas, precios de combustible muy variables, pero con una tendencia al alza, una presión medioambiental siempre creciente y en la medida que la demanda por servicios de transporte aéreo aumentan (antes del Covid), los estados debían encontrar soluciones para incrementar de forma segura la capacidad del sistema espacio aéreo, la eficiencia del sistema y las infraestructuras, y mejorar el acceso a aeropuertos rodeados por una orografía complicada. Según se indica en [40], muchas de estas limitaciones son en gran medida debidas al uso de navegación aérea de tipo convencional y basadas en tierra (tal y como se define en el capítulo 2) las cuales limitan el diseño de rutas y procedimientos debido a su emplazamiento físico.

Aunque estas radioayudas procedentes de conceptos tecnológicos de mediados del siglo pasado siguen y seguirán prestando servicios esenciales en el transporte aéreo, resultan ser limitadas al no permitir la flexibilidad de las operaciones punto - a- punto que ofrece la PBN para resolver los retos del transporte aéreo. Por este motivo la OACI propuso implantar rutas de servicios de tránsito aéreo y procedimientos de aproximación de acuerdo con la Navegación Basada en Prestaciones, con objetivos temporales concretos que se debían alcanzar.

En consecuencia, España realizó un marco estratégico en referencia a la implantación del PBN con el objetivo de proporcionar la orientación necesaria a los proveedores de servicios de navegación aérea, gestores aeroportuarios, usuarios del espacio aéreo y compañías aéreas que estén operando en el espacio aéreo español, acerca de la evolución planificada de la navegación aérea y los modos de implantación. Este marco consistía de tres etapas.

- Corto plazo (2014)
- Medio plazo (2015-2019)
- Largo plazo (2020 y posteriores)

Cabe remarcar que dentro de cada etapa hay unas especificaciones en función de la fase del vuelo: fase de ruta, fase de área terminal (TMA) y fase de aproximación, cuyas previsiones se definirán a continuación de la figura 4.5 la cual representa el marco estratégico de España en relación a la PBN.

Espacio aéreo	Corto plazo (2014)	Medio plazo (2015 - 2019)	Largo plazo (2020 +) ⁹
En Ruta	RNAV 5	RNAV 5	RNAV 5 RNP avanzada FRT
TMA	RNAV 1	RNAV 1 RNP 1	RNAV 1 RNP 1 RF, esperas RNAV, VNAV básica
Aproximación	RNP APCH	RNP APCH RNP AR APCH	RNP APCH RNP AR APCH

Figura 4.5. Marco estratégico de referencia 2014-2020. Fuente [41].

4.2.1.1 Previsiones a corto plazo (2014)

La primera fase de la implantación PBN constituía una transición progresiva hacia el nuevo concepto de navegación establecido por la OACI. Su objetivo principal era la implantación de las operaciones PBN que mayores beneficios inmediatos podía ofrecer, como el despliegue de aproximaciones RNP APCH, así como la modernización de los procedimientos de área terminal, y en particular la introducción progresiva de nuevos procedimientos SIDs y STARs RNAV 1 soportados por GNSS.

- **Previsiones en fase de ruta**

La especificación de la navegación RNAV 5 es obligatoria en el área de la Conferencia Europea de Aviación Civil desde 1998 y se aplicaba en España para la fase de ruta. A este respecto, debían considerarse los posibles acuerdos regionales de navegación aplicables en el marco de OACI.

Se preveía durante esta fase la extensión de la RNAV5 por encima del nivel de vuelo FL95 (9500 pies).

- **Previsiones en fase de área terminal**

Se pretendía avanzar en la modernización de los procedimientos de llegadas y salidas (STARs/SIDs) en el área terminal, adoptándolos a la especificación RNAV 1 (P-RNAV en Europa), conforme a los compromisos internacionales vigentes. RNAV 1 debería ser por tanto la especificación de referencia para el área terminal, continuando así con su implantación progresiva, y en particular, y con más urgencia, en las áreas terminales de alta densidad de tráfico. Dichos nuevos procedimientos deberían en todo caso estar diseñados para hacer factible su uso por los receptores GNSS básicos de a bordo.

Los beneficios derivados de nuevos procedimientos RNAV 1 basados en GNSS deberían empezar a plasmarse en esta fase, permitiendo en algunos casos reestructuraciones parciales del espacio aéreo de dichas áreas terminales, eliminando así las restricciones operacionales que imponen las ayudas convencionales.

- **Previsiones en fase de aproximación**

Se implantarían progresivamente procedimientos de aproximación RNP APCH (a mínimos LNAV, LNAV/VNAV (APV Baro-VNAV), y LPV (APV SBAS)), en los extremos de pistas de vuelo por instrumentos, ya sea como aproximación principal o como apoyo para aproximaciones de precisión. En la medida de lo posible se daría prioridad en la implantación a aquellos escenarios en que mayores beneficios operacionales se obtengan, como cabeceras donde no haya procedimientos de aproximación de precisión disponibles, existencia de aproximaciones convencionales en circuito o no directas, apoyo para aproximaciones de precisión, etc. Asimismo, durante esta fase se estudiaría el posible despliegue futuro de operaciones RNP AR APCH en aquellos escenarios operacionales más exigentes (orografía compleja, impacto ambiental, etc.).

4.2.1.2 Previsiones a medio plazo (2015-2019)

En esta segunda fase se esperaba consolidar la fase inicial y reforzar las actuaciones PBN introducidas a corto plazo. Se procedería al despliegue masivo de aproximaciones RNP APCH y de operaciones RNAV 1 en el área terminal. Durante esta fase podría empezar a plantearse cierta racionalización de la infraestructura convencional, como consecuencia del despliegue generalizado de operaciones PBN, y la modernización del equipamiento a bordo de las flotas.

Asimismo, también se estudiaría y prepararía el terreno para una futura transición a la RNP avanzada para la fase de ruta en el largo plazo, así como para la implantación de funcionalidades RNP avanzadas.

- **Previsiones en fase de ruta**

Se extendería el uso de la RNAV 5 a todas las rutas ATS, y se estudiaría la oportunidad y conveniencia de una futura transición a una especificación más exigente en el largo plazo, del tipo RNP avanzado, cuya aplicación se estaba considerando en el ámbito europeo en dicho horizonte (2020+). En caso afirmativo, se procedería a preparar el terreno para su futura implantación.

- **Previsiones en fase de área terminal**

A medio plazo se pretendía realizar un despliegue masivo del RNAV 1 en las áreas terminales de alta densidad de tráfico, manteniendo un conjunto mínimo de procedimientos de salidas y llegadas convencionales. Gracias a esa esa modificación, también se pretendía rediseñar el espacio aéreo eliminando las restricciones operacionales que imponen las ayudas convencionales. También se pretendía optimizar los espacios aéreos en que se usara la navegación PBN a fin de conseguir los beneficios que la OACI proponía. Finalmente, se propuso estudiar la oportunidad de diseñar especificaciones más exigentes a largo plazo como por ejemplo las esperas RNAV o los virajes de radio constante al punto de referencia. De esta manera se podría optimizar el diseño del espacio aéreo en aquellos escenarios con operaciones más exigentes como el caso del aeropuerto de Madrid o el de Barcelona.

- **Previsiones en fase de aproximación**

En el caso de las aproximaciones se esperaba hacer un despliegue generalizado de aproximaciones RNP APCH (a mínimos LNAV, LNAV/VNAV (APV Baro-VNAV), y LPV (APV SBAS)) en todos los extremos pistas de vuelo por instrumentos de los aeródromos, incluyendo aquellos sin servicio de control ATC. Además, también se pretendía hacer un despliegue de nuevos procedimientos RNP APCH en aquellos aeródromos visuales en que se considerase pertinente, teniendo en cuenta las necesidades y posibilidades de los usuarios al respecto, y las posibles mejoras en la seguridad operacional, accesibilidad y operatividad del aeródromo en cuestión.

Se planteó la posibilidad de desplegar operaciones RNP AR APCH en aquellos escenarios operacionales más exigentes (orografía compleja, impacto ambiental, etc.), conforme a los beneficios globales esperados de su implantación.

4.2.1.3 Previsiones a largo plazo (2020 y posteriores)

Según el marco estratégico sobre la aplicación del PBN en España, el largo plazo vendría muy condicionado por la necesidad de acomodar las especificaciones que se requieran en el marco UE como consecuencia de la aplicación del futuro reglamento comunitario en la implantación de PBN.

Durante esta fase se esperaba consolidar la transición a especificaciones más exigentes en todas las fases de vuelo como sería la tecnología RNP avanzada, o RNP 1 con algunas funcionalidades de la RNP avanzada.

Otro objetivo que se pretendía alcanzar era el de solucionar las carencias en las prestaciones GNSS que había en ese momento gracias a las nuevas tecnologías de las que se esperaba disponer en 2020. Estas tecnologías se basaban en el despliegue total de la constelación GNSS (Galileo), asociada a su vez a la nueva versión v3 del sistema de aumentación GNSS europeo EGNOS, y a la modernización del sistema americano GPS. En definitiva, esta fase se describía como un proceso de racionalización más que como un proceso de implantación debido a la suposición de que en este año la PBN ya formaría parte de la normalidad en la navegación aérea.

En cuanto a fases de vuelo se suponía que:

Previsiones en ruta: Consolidación del RNAV 5 y RNP AVANZADA + **FRT³⁶** (Fixed Radius Transition).

Previsiones en área terminal: RNAV 1, RNP 1 + diversas funcionalidades de la especificación RNP avanzada.

Previsiones en aproximaciones instrumentales: RNP APCH y RNP AR APCH.

4.2.2 Situación actual de la PBN en ESPAÑA

Una vez analizadas todas las expectativas que España tenía sobre la implantación de la PBN en su espacio aéreo, es necesario comprobar cuales de ellas se han cumplido, cuáles de forma parcial y cuáles no.

Para poder realizar las comprobaciones se ha realizado un estudio de la situación actual en función de las tres etapas definidas en el apartado 4.2.1 (fase de ruta, fase de área terminal y fase de aproximación).

- **Situación actual en fase de ruta**

Los objetivos que se pretendían alcanzar en el tramo de ruta durante el 2020 eran los siguientes:

- Extensión del RNAV 5 a todas las rutas ATS donde sea necesario.
- Estudio de la oportunidad y convivencia de futura transición a RNP avanzada.

³⁶ FRT: Viraje de radio constante al punto de referencia en fase de ruta.

En este caso se puede considerar un éxito ya que actualmente todas las aerovías ya se consideran como RNAV 5 (exceptuando Canarias) tal y como indica el servicio de información aeronáutica [10]. Teniendo en cuenta que el segundo objetivo es un estudio y no una aplicación directa, es más complicado determinar si se ha logrado ese objetivo.

- Situación actual en fase de área terminal

El área de control terminal son aquellas áreas controladas que se establecen generalmente sobre uno o varios aeropuertos donde confluyen aerovías con rutas de aproximación y salida, y cuyo objetivo es controlar el tráfico IFR que entra o sale de los mismos [42].

Teniendo en cuenta la fecha en la que se está realizando este TFG (finales de 2020 y principios de 2021), los objetivos que se esperaban haber alcanzado en estas fechas sobre el área terminal eran los siguientes:

- Consolidación del RNAV 1 en las SIDs y STARs en aeropuertos de alta densidad de tráfico.
 - Rediseño del espacio aéreo (operaciones mixtas entre RNAV y convencional).
 - RNP1 + diversas funcionalidades del RNP Avanzado.
 - Esperas RNAV y RF.

Haciendo un balance de la situación actual en relación al conjunto de objetivos que España propuso en 2014, se puede considerar como un balance positivo en el que se han cumplido los objetivos de forma parcial.

En cuanto al objetivo de la consolidación del RNAV 1 en salidas y llegadas instrumentales a aeropuertos con una alta densidad de tráfico, se puede considerar que sí se ha conseguido ya que hay varios aeropuertos (Barcelona, Madrid y Palma de Mallorca entre otros) que ya cuentan con tecnología RNAV 1 en sus movimientos de TMA tal y como se muestra en el ejemplo de la figura 4.6. De esta manera se ha podido cumplir (en los aeropuertos en los que se ha implantado esta navegación) el rediseño del espacio aéreo en el que se mezclan salidas y llegadas instrumentales tradicionales, junto con salidas y llegadas instrumentales tipo RNAV.

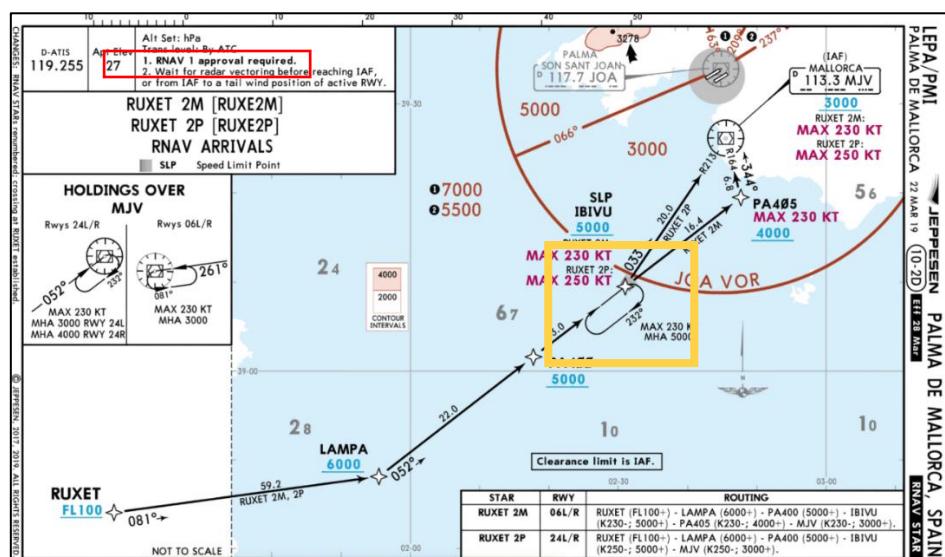


Figura 4.6. STAR RNAV 1 RUXET del aeropuerto de Palma. Fuente [13].

En relación a la aplicación de SIDs y STARs tipo RNP1, no se puede considerar que sea un éxito ya que actualmente no hay ningún aeropuerto español que cuente con esa tecnología.

El último objetivo desde el punto de vista del área terminal era el de conseguir que existieran esperas RNAV junto con virajes de radio fijo. En este caso, se puede considerar como un objetivo cumplido ya que los aeropuertos españoles que cuentan con SIDs y STARs tipo RNAV 1, también cuentan con esperas de éste mismo tipo. Un ejemplo de espera RNAV es el que indica la figura 4.6 marcada en amarillo.

- **Situación actual en fase de aproximación**

La etapa de aproximación es la etapa en la que menos resultados positivos se han conseguido en comparación con la etapa de ruta y la etapa del área terminal.

España propuso conseguir para 2020 las siguientes actuaciones:

- RNP 1 + diversas funcionalidades de la especificación RNP avanzada.
- Consolidación RNP APCH.
- Despliegue de operaciones RNP AR APCH.

De todas estas actuaciones, no hay ninguna que se haya podido realizar en su totalidad. Tal y como se indica en la sección 2.1, solo hay ocho aeropuertos que cuenten con aproximaciones RNP en el territorio español. Por lo tanto, no solo no se ha podido consolidar el RNP APCH, sino que tampoco se han podido desplegar operaciones de tipo RNP AR APCH.

Actualmente la mayoría de aeropuertos Españoles siguen sin contar con aproximaciones RNP, por lo que se espera que en los próximos años se pueda llevar a cabo la implantación de estos sistemas que permitan a las aeronaves realizar este tipo de aproximaciones, y de esta manera, cumplir con los objetivos que el Gobierno Español propuso hace 6 años.

El aspecto positivo que se ha podido extraer a partir del estudio del estado del arte es el de saber que es posible realizar aproximaciones RNP en España (gracias a los ejemplos ya existentes). De esta manera se puede determinar que existen los componentes y las infraestructuras tecnológicas suficientes como para saber que una aproximación RNP en Lérida es posible.

Un ejemplo que puede ser muy útil para realizar la parte práctica de este TFG, es el del aeropuerto de Santander, el cual usa el sistema de aumentación EGNOS para crear una aproximación RNP con un guiado vertical y lateral que permite a la aeronave llegar a unos mínimos casi tan bajos como los del ILS de la misma pista. En la figura 4.7 se puede observar la carta de aproximación RNP con LPV de la pista 29 del aeropuerto de Santander.

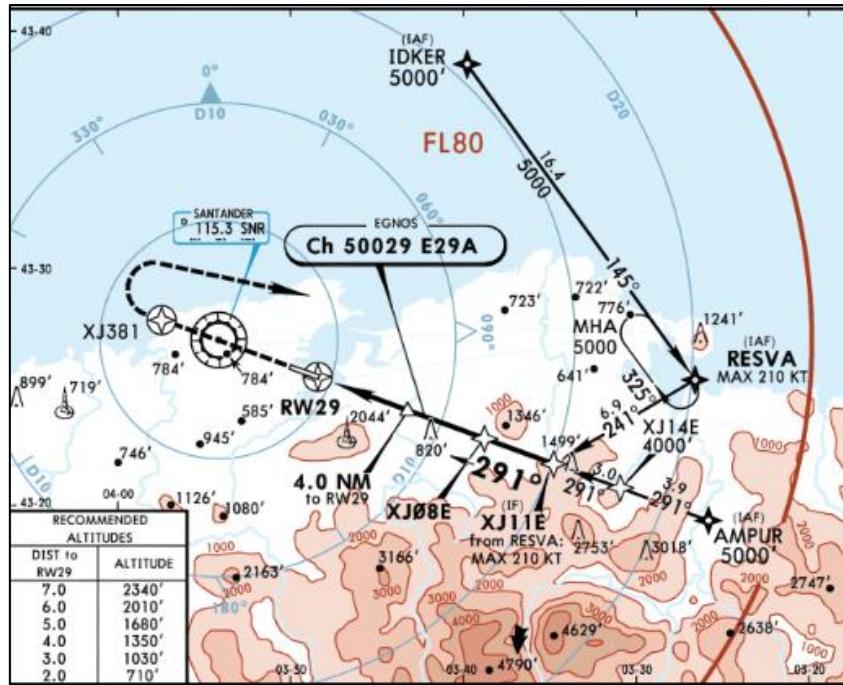


Figura 4.7. Aproximación RNP Z LPV pista 29 Santander. Fuente [13].

Teniendo en cuenta que en España ya es posible hacer uso del sistema de aumentación EGNOS para sus operaciones, se puede concluir que el aeropuerto de Lérida, al estar ubicado en el mismo país, también podrá aprovechar esta tecnología para realizar una aproximación RNP con LPV.

- **Situación actual en otros ámbitos**

Otra de las acciones que se pretendía realizar era la de mejorar las carencias en las prestaciones del sistema GNSS que había entonces mediante el desarrollo de los sistemas satelitales. Se esperaba que en 2020 ya se hubiese desplegado la constelación europea GNSS (Galileo), asociada a su vez a la nueva versión v3 del sistema de aumentación GNSS europea EGNOS y a la modernización del sistema americano GPS.

Muchas de las carencias que tenía el GNSS en 2014 ya no existen gracias al desarrollo de estos sistemas, pero la realidad es que actualmente no todos esos sistemas se encuentran en la fase que se esperaba.

La constelación satelital Galileo ha progresado mucho y actualmente cuenta con 30 satélites, pero no se puede considerar que está en su fase final ya que se espera que la Agencia Estatal Europea mande 4 satélites más a mediados del año 2021 [43].

En el caso de EGNOS, se espera que la versión v3, la cual proporciona aún más precisión, no estará disponible hasta el año 2025 según la Agencia Espacial Europea [44]. De este modo, el cálculo que se realizó en 2014 el cual consideraba que esta versión estaría disponible no fue del todo correcto.

4.3 Estudio del estado del arte del Airbus A320

Teniendo en cuenta que la simulación que se pretende realizar se lleva a cabo mediante la aeronave europea Airbus A320, es necesario determinar si los equipos que lleva a bordo cumplen con los requisitos PBN. Por este mismo motivo se describirán los diferentes equipos mínimos y necesarios con los que debe contar la aeronave para poder llevar a cabo una navegación PBN teniendo en cuenta las especificaciones de navegación de cada espacio aéreo.

Antes de comenzar con la descripción de cada especificación, es necesario remarcar que se tiene el conocimiento de que esta aeronave puede realizar la navegación PBN gracias al documento oficial de Airbus llamado *Flight Crew Operating Manual* en el cual define todos los procedimientos a seguir en función de cada especificación de navegación PBN [45].

4.3.1 Procedimientos y equipos del Airbus A320 en función de la especificación de navegación

Mediante el *Flight Crew Operating Manual*, se puede determinar que el Airbus A320 cuenta con todos los requisitos para poder volar mediante navegación PBN. Es necesario remarcar que, en función de la especificación de navegación, los equipos necesarios y las restricciones pueden variar. Por ese mismo motivo, en este apartado se redefinirán los conceptos generales de cada especificación, se expondrán los requerimientos de los diferentes equipos, y finalmente se realizará un análisis de breve de los diferentes procedimientos que deben seguir los pilotos en función de la especificación de navegación del espacio aéreo en el que están volando en ese momento. El orden de definición viene dado por el mismo orden que se ha aplicado en el subapartado 3.2.3.2:

- **RNAV 10**

La especificación RNAV 10, también conocida como RNP 10, es aquella en las que se espera que las aeronaves vuelen un tramo largo sin poder contar con radioayudas terrestres, por lo que su posicionamiento vendrá dado básicamente gracias a sistemas satelitales.

Los equipos necesarios mínimos para poder llevar a cabo una navegación PBN en espacio aéreo RNAV 10 son:

- Dos *Flight Management Guidance Computer*³⁷(*FMGC*).
- Dos MCDUs.
- Dos IRS.
- Dos *Navigation Displays*³⁸(*ND*).
- Un GPS si el tiempo de vuelo sin radioayudas es mayor a:

³⁷ FMGC: Ordenador de abordo el cual contiene una base de datos de navegación que proporciona autoajuste de radioayudas, cálculo de posición, comprobaciones de precisión de navegación y planificación de vuelos a través del MCDU.

³⁸ Navigation Display: Instrumento de vuelo en forma de pantalla que muestra a tiempo real múltiples sistemas como la ruta del aeronave o información del tiempo provista en el radar de abordo.

- 6.2 horas desde el momento de la alineación de los IRS.
- 5.7 horas desde el momento de la última actualización de la posición del FMS.

En cuanto el procedimiento:

- Antes de entrar en un espacio RNAV 10: El valor de ruta predeterminado de la FMS debe ser igual 2 millas náuticas (significa que la variación lateral durante la navegación no podrá ser mayor a 2 millas náuticas). En caso de que la tripulación quiera poner manualmente la precisión, el valor a introducir en el MCDU debe ser de 10 millas náuticas.
- Saliendo de un espacio RNAV 10: La tripulación debe volver a la precisión de navegación requerida predeterminada, o ingresar el valor apropiado en el MCDU.

• **RNAV 5 / BRNAV**

Las operaciones RNAV 5 corresponden a las antiguas operaciones BRNAV europeas. En el caso de volar un espacio aéreo de tipo RNAV 5, la cobertura de las radioayudas admite un valor RNP de 5 millas náuticas.

Los equipos necesarios mínimos para poder llevar a cabo una navegación PBN en un espacio aéreo RNAV 5 son:

- Una FMGC.
- Un MCDU.
- O un GPS, o un VOR/DME, o dos DMEs con el objetivo de actualizar la posición.
- Dos NDs.
- Un IRS.

En cuanto el procedimiento:

- Antes de entrar en un espacio RNAV 5: El valor de ruta predeterminado de la FMS debe ser igual a 2 millas náuticas. En caso de que la tripulación quiera poner manualmente la precisión, el valor a introducir en la MCDU debe ser de 5 millas náuticas.
- Saliendo de un espacio RNAV 5: La tripulación debe volver a la precisión de navegación requerida predeterminada, o ingresar el valor apropiado en la MCDU.

• **RNAV 1 RNAV 2 / P-RNAV – TERMINAL RNAV**

Las operaciones RNAV 1 y 2 corresponden a las antiguas operaciones P-RNAV - Terminal RNAV. En espacios aéreos RNAV 1 y 2 la cobertura de radio RNP debe ser de 1 o 2 millas náuticas (en función de si es RNAV 1 o RNAV 2). Sin embargo, en estos casos, el Servicio de Información Aeronáutica especificará los equipamientos GPS necesarios en función del aeropuerto ya que no en todos se precisan los mismos equipos.

Los equipos necesarios mínimos para poder llevar a cabo una navegación PBN en un espacio aéreo RNAV 1 y 2 son:

- Un FMGC.
- Un MCDU.
- O un GPS, o un VOR/DME, o dos DMEs que actualicen la posición.
- Dos IRS.
- Un ***Flight Director***³⁹ (**FD**) en modo navegación.
- Dos NDs.

En cuanto el procedimiento:

- Antes de entrar en un espacio RNAV 1 o 2: La base de datos de navegación FMS proporciona el procedimiento terminal (RNAV SID, RNAV STAR, RNAV TRANSITION, etc.) del plan de vuelo. La tripulación de vuelo debe verificar el procedimiento terminal de las cartas publicadas con la base de datos de navegación FMS en la página *F-PLN* (página de la FMS del Airbus donde aparecen las secuencias de puntos de ruta, derrotas, distancias y restricciones de altitud o velocidad). La tripulación de vuelo no debe modificar el procedimiento provisto por la base de datos de navegación, a menos que sea requerido por el controlador (vectorización de radar, inserción de waypoints de la base de datos de navegación, o directo a un punto). El valor predeterminado de la FMS en área terminal es de 1 milla náutica. Por lo tanto, la selección manual de la precisión de navegación requerida en la MCDU queda a discreción de la tripulación de vuelo. Si es necesario ingresar manualmente la precisión requerida, la tripulación de vuelo debe ingresar 1 o 2 millas náuticas según corresponda.
- Saliendo de un espacio RNAV 1 o 2: Cuando la aeronave abandona el espacio aéreo RNAV 1 o 2, la tripulación de vuelo debe volver a la precisión requerida por defecto o ingresar el valor apropiado en el MCDU.

• **RNP 4**

En este espacio aéreo, se espera que la aeronave vuele un tramo largo sin poder contar con la ayuda de radioayudas terrestres, al igual que el RNAV 10.

Los equipos necesarios mínimos para poder llevar a cabo una navegación PBN en un espacio aéreo RNP 4 son:

- Dos FMGCs.
- Dos MCDUs.
- Dos IRS.
- Un GPS.
- Dos NDs.

³⁹ Flight Director: Es una ayuda de guía que se superpone al indicador de actitud y muestra al piloto de una aeronave la actitud requerida para seguir una determinada trayectoria.

En cuanto el procedimiento:

- Antes de entrar en un espacio RNP 4: El valor en ruta predeterminado de FMS es de 2 millas náuticas. Por lo tanto, la selección manual de la precisión de navegación requerida en el MCDU queda a discreción de la tripulación de vuelo.
Si es necesario ingresar manualmente la precisión requerida, la tripulación de vuelo debe ingresar 4 millas náuticas.
 - Saliendo de un espacio RNP 4: Cuando la aeronave abandona el espacio aéreo RNP 4, la tripulación de vuelo debe volver a la precisión de navegación requerida por defecto o ingresar el valor apropiado en el MCDU.
-
- **RNP 1 / TERMINAL RNP 1 – BASIC RNP 1**

Las operaciones RNP 1 corresponden a las operaciones RNP 1 de área terminal. A diferencia de las RNAV 1 requieren un sistema de monitor y alerta. En espacios aéreos RNP 1, la actualización de la posición GPS o DME / DME permite garantizar el valor RNP de 1 milla náutica.

Los equipos necesarios mínimos para poder llevar a cabo una navegación PBN en un espacio aéreo RNP 1 son:

- Un FMGC.
- Un MCDU.
- Un GPS o 2 DMEs para actualizar la posición.
- Dos IRS.
- Un FD en modo navegación.

En cuanto el procedimiento:

- Antes de entrar en un espacio RNP 1: La base de datos de navegación FMS proporciona el procedimiento terminal (RNAV SID, RNAV STAR, RNAV TRANSITION, etc.) del plan de vuelo. La tripulación de vuelo debe verificar el procedimiento terminal de las cartas publicadas con la base de datos de navegación FMS en la página F-PLN. La tripulación de vuelo no debe modificar el procedimiento proporcionado por la base de datos de navegación, a menos que sea requerido por el controlador (vectorización de radar, inserción de waypoints de la base de datos de navegación, o directo a un punto).

El valor predeterminado de la FMS en el área terminal es de 1 milla náutica. Por lo tanto, la selección manual de la precisión de navegación requerida en el MCDU queda a discreción de la tripulación de vuelo. Si es necesario ingresar manualmente la precisión de navegación requerida, la tripulación de vuelo debe ingresar el valor de 1 milla náutica.

- Saliendo de un espacio RNP 1: Cuando la aeronave abandona el espacio aéreo RNP 1, la tripulación de vuelo debe volver a la precisión de navegación requerida por defecto o ingresar el valor apropiado en el MCDU.

- **RNP APCH / RNAV (GNSS)**

Las operaciones RNP APCH corresponden a las operaciones RNAV (GNSS) o RNAV (GPS). Para este tipo de operaciones, es necesario que el GPS admita un valor RNP de 0.3 millas náuticas.

Los equipos necesarios mínimos para poder llevar a cabo una navegación PBN en un espacio aéreo RNP APCH son:

- Un FMS.
- Un GPS.
- Un MCDU.
- Un FD.
- Un **Primary Flight Display⁴⁰ (PFD)**.
- Un ND.

En el caso de las aproximaciones RNP hay dos tipos de procedimiento en función del tipo de aproximación que se use en el Airbus 320 [46]. El primer tipo tiene el nombre de *Aproximaciones Modo FINAL APP*, mientras que el segundo tipo se llama *Aproximaciones Modo NAV/FPA⁴¹ (Navigation / Flight Path Angle)*.

Para realizar una aproximación modo *FINAL APP*, la aeronave gestionará el guiado vertical y lateral de manera completamente autónoma. Es por ello que este método será útil para aproximaciones con mínimos LNAV/VNAV. Para las aproximaciones tipo *NAV/FPA*, el guiado vertical se realizará mediante un sistema que tiene esta aeronave (FPA) el cual le permite realizar sendas de planeo a un ángulo determinado (elegido por el piloto). En este segundo caso, las aproximaciones *NAV/FPA* se emplearán en aproximaciones con mínimos LNAV ya que son aproximaciones sin guía vertical.

A pesar de que los procedimientos que deben seguir los pilotos son diferentes en función del tipo de aproximación que estén realizando (no se usan los mismos sistemas en las dos aproximaciones), hay una serie de pasos que sí que son iguales.

Teniendo en cuenta que el objetivo de este punto es determinar si es posible o no realizar aproximaciones RNP con la aeronave Airbus A320, no se entrará en detalles de cómo son los procedimientos que deben seguir los pilotos. En la referencia [47] se explican cuáles son los procedimientos para llevar a cabo aproximaciones RNP desde un Airbus A320 en todas sus variantes.

⁴⁰ Primary Flight Display: El PFD es un instrumento en forma de pantalla que muestra toda la información crítica para el vuelo, incluida la velocidad aerodinámica, altitud, rumbo, actitud, velocidad vertical y guíñada.

⁴¹ NAV/FPA: Modo de navegación que permite a una aeronave ascender o descender a ángulos de senda determinados por el piloto.

4.4 Conclusiones del capítulo

Llevar a cabo los estudios del estado del arte de los diferentes parámetros que afectan, o pueden afectar, a la hora de implementar una aproximación nueva en un aeropuerto es crucial por diversos motivos. El primer motivo es el de entender los recursos (infraestructuras, equipos, leyes, etc) de los que se dispone, ya que, si estos recursos no existieran o fueran limitados, no sería posible la creación de una nueva aproximación. Otro de los motivos por el que se realizan este tipo de estudios es para determinar cuáles son las necesidades actuales de aquel aeropuerto o de aquel usuario (aerolínea, aeropuerto, pasajero, etc) que vaya a beneficiarse de este avance. Por este, y por otros motivos, en este capítulo se ha llevado a cabo un estudio del estado del arte del aeropuerto de Lérida, de la PBN en el estado español, y de la aeronave Airbus A320. Estos 3 factores, aunque no son los únicos, son los más relevantes a la hora de querer realizar la parte práctica de este TFG.

En cuanto al estado del arte del aeropuerto de Lérida se puede destacar la falta de aproximaciones instrumentales para su pista no preferente (pista 13), y la ausencia de aproximaciones que provienen del norte de la ciudad. Aunque esta información resultará muy útil a fin de satisfacer las necesidades operacionales que presenta este aeropuerto, ha sido necesario comprobar si España cuenta con los recursos que hagan posible la implantación de una nueva aproximación que ayude a mitigar estas carencias navegacionales.

La conclusión general que se puede extraer una vez se ha realizado el estudio del estado del arte del PBN en el estado española, es el hecho de tener el conocimiento de que la navegación PBN ya es un hecho, y que las aproximaciones RNP en España ya son posibles teniendo en cuenta que algunos aeropuertos ya cuentan con ellas. Eso hace posible también, tener la certeza de que existe la tecnología suficiente como para llevar a cabo una aproximación RNP simulada en el aeropuerto de Lérida. Finalmente, solo quedaba comprobar si la aeronave Airbus A320 puede realizar este tipo de operaciones.

Como conclusión de la sección 4.3, se puede determinar que la aeronave Airbus A320 cuenta con los equipos y sistemas necesarios para volar espacios aéreos mediante navegación PBN siempre y cuando cuente con los requisitos mínimos en función de la especificación de ese espacio aéreo. Esta información resulta útil para reafirmar que es posible realizar la simulación con esta aeronave.

Una vez se ha realizado el estudio del estado del arte, se ha podido comprobar que llevar a cabo una aproximación RNP en Lérida no es solo útil, sino que también es posible. Por ese motivo, en el siguiente capítulo se procederá a diseñar la carta de aproximación que servirá, para posteriormente, llevar a cabo la aproximación mediante el simulador de vuelo.

5. DISEÑO DE LA CARTA DE APROXIMACIÓN RNP PARA EL AEROPUERTO DE LÉRIDA

En este capítulo se diseñará una carta de aproximación para la pista 13 del aeropuerto de Lérida. Una carta de aproximación proporciona a la tripulación de vuelo la información necesaria que les permita efectuar procedimientos aprobados de aproximación por instrumentos a la pista prevista de aterrizaje. Como es abundante la información que aparece en este tipo de cartas, en este capítulo se ha dividido esta información en tres bloques (ver figura 5.1). Es por ello que en cada uno de estos bloques se describirá la información que aparece en la carta, y los parámetros en los que se basa.



Figura 5.1. Diseño de la carta de aproximación RNP: Aspectos a definir.

Para poder llevar a cabo el diseño de una carta de aproximación ha sido necesario realizar un estudio sobre la navegación PBN y un estudio sobre los diferentes estados del arte que pueden afectar de una forma u otra a la hora de querer realizar la carta. También ha sido necesario determinar qué necesidades operacionales tiene el aeropuerto de Lérida con el fin de buscar una solución factible que permita solventarlas. Por último, también se han tenido que analizar cuáles eran los recursos de los que se disponía (infraestructuras, sistemas, etc..) para determinar hasta qué punto es posible realizar esta aproximación, y hasta qué punto puede ser precisa teniendo en cuenta las diferentes aproximaciones RNP que existen actualmente.

La conclusión de todo este estudio ha sido el de realizar una carta de aproximación RNP para la pista 13 con el objetivo de facilitar las operaciones a esas aeronaves que provengan desde el norte. De esta manera, se solventan los 3 inconvenientes indicados en la sección 4.1:

- **Mismo IAF:** Uno de los principales problemas con los que cuenta el aeropuerto de Lérida, es el hecho de que todos los aviones deben pasar por un único IAF situado justo encima de la pista. Esto tiene como consecuencia que las aeronaves, independientemente de donde provengan, deban pasar por ese punto provocando así una pérdida de tiempo y de combustible. Con la nueva aproximación que se ha diseñado ya no será necesario pasar por encima de este IAF, ya que se ha creado uno nuevo llamado DANI. Este IAF servirá para que las aeronaves que provengan del norte puedan empezar su aproximación mucho antes sin tener que pasar por el IAF ILERDA. Es importante remarcar que la aproximación se definirá de forma detallada en las siguientes secciones de este capítulo.

- **Pista poco atendida:** Otro de los inconvenientes que presenta este aeropuerto es el hecho de que la pista 13 está muy poco atendida. Tal y como se ha descrito en la sección 4.1, el aeropuerto de Lérida solo cuenta con una aproximación VOR en la pista 13, por lo que las aproximaciones instrumentales se ven muy limitadas teniendo en cuenta que una aproximación VOR es muy poco precisa en comparación con aproximaciones ILS o RNP. Gracias a la nueva aproximación RNP, la pista 13 ya contará con una aproximación mucho más precisa lo cual solventará el hecho de que esta misma pista esté poco atendida.
- **Mala visibilidad:** El último inconveniente que se presenta es la mala visibilidad que existe en este aeropuerto. El aeropuerto de Lérida cuenta con muchos días de mala visibilidad por niebla, dificultando así que las aeronaves que quieran aterrizar instrumentalmente (visualmente no se puede aterrizar cuando hay mala visibilidad) lo hagan de forma segura. Mediante la aproximación RNP, las aproximaciones serán mucho más precisas durante toda su trayectoria y además reducirán los mínimos para frustrar, lo cual es clave para aproximaciones con mala visibilidad.

Antes de presentar la carta de aproximación, es importante destacar que se han tenido que realizar dos cartas diferentes, una para una aproximación LPV, y otra para aproximaciones con LNAV/VNAV y LNAV. Se ha realizado de esta manera ya que, a diferencia de otros países, España publica dos cartas diferentes de la misma aproximación en función del tipo de aproximación RNP⁴².

Mediante la herramienta de edición y creación de imagen, Photoshop, se han podido realizar las dos cartas de aproximación para la pista 13 del aeropuerto de Lérida, las cuales se explicarán detalladamente y por partes en las secciones siguientes. La primera de ellas es la carta RNP para aproximaciones LPV la cual se puede observar en la figura 5.2. La segunda de ellas es la carta que servirá para aquellas aproximaciones BARO-VNAV y/o LNAV/VNAV la cual se ve representada en la figura 5.3.

Se han dividido las cartas en 3 partes diferentes con la finalidad de poder definir cada parte de forma detallada, y de esta forma entender la carta en su totalidad (ver figura 5.3). La parte 1 cuadriculada en verde representa la información general de la ficha. La parte 2, con borde rojo, muestra la trayectoria y las diferentes altitudes que seguirá la aeronave durante la aproximación. Finalmente está la parte 3 remarcada en color azul en la que se muestra información sobre mínimos y ángulos de descenso.

⁴² En el estado español las cartas de aproximación RNP están divididas en dos según su tipo. En el primer tipo aparecen las cartas de aproximación RNP que usan guiado vertical y lateral con sistemas de aumentación (LPV). En el segundo tipo de cartas RNP aparecen aquellas con guiado BARO-VNAV, y/o LNAV/VNAV. Se diferencian entre ellas ya que en función del tipo que se vaya a usar, la información que aparece en la carta es distinta.

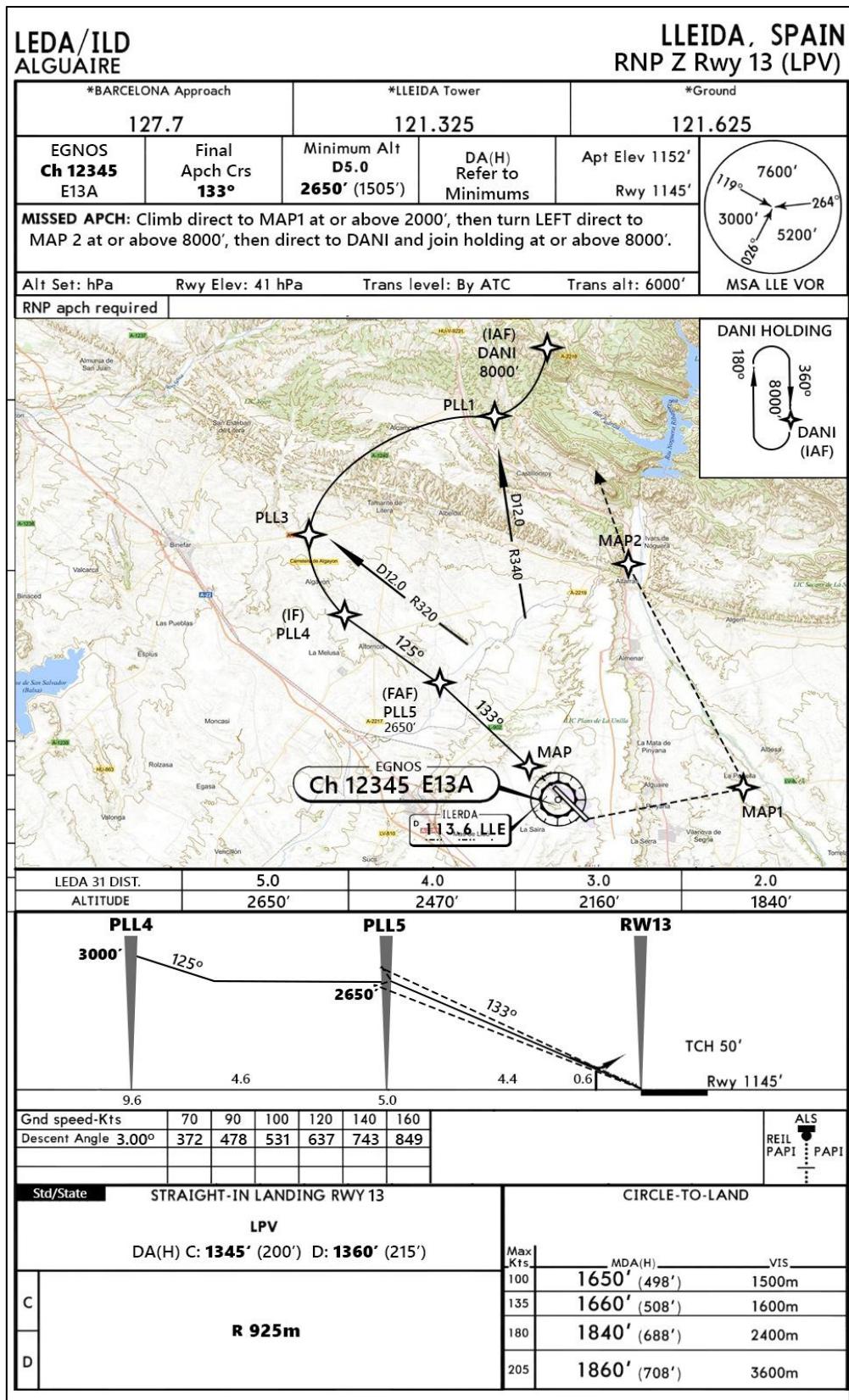


Figura 5.2. Carta de aproximación RNP LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida.

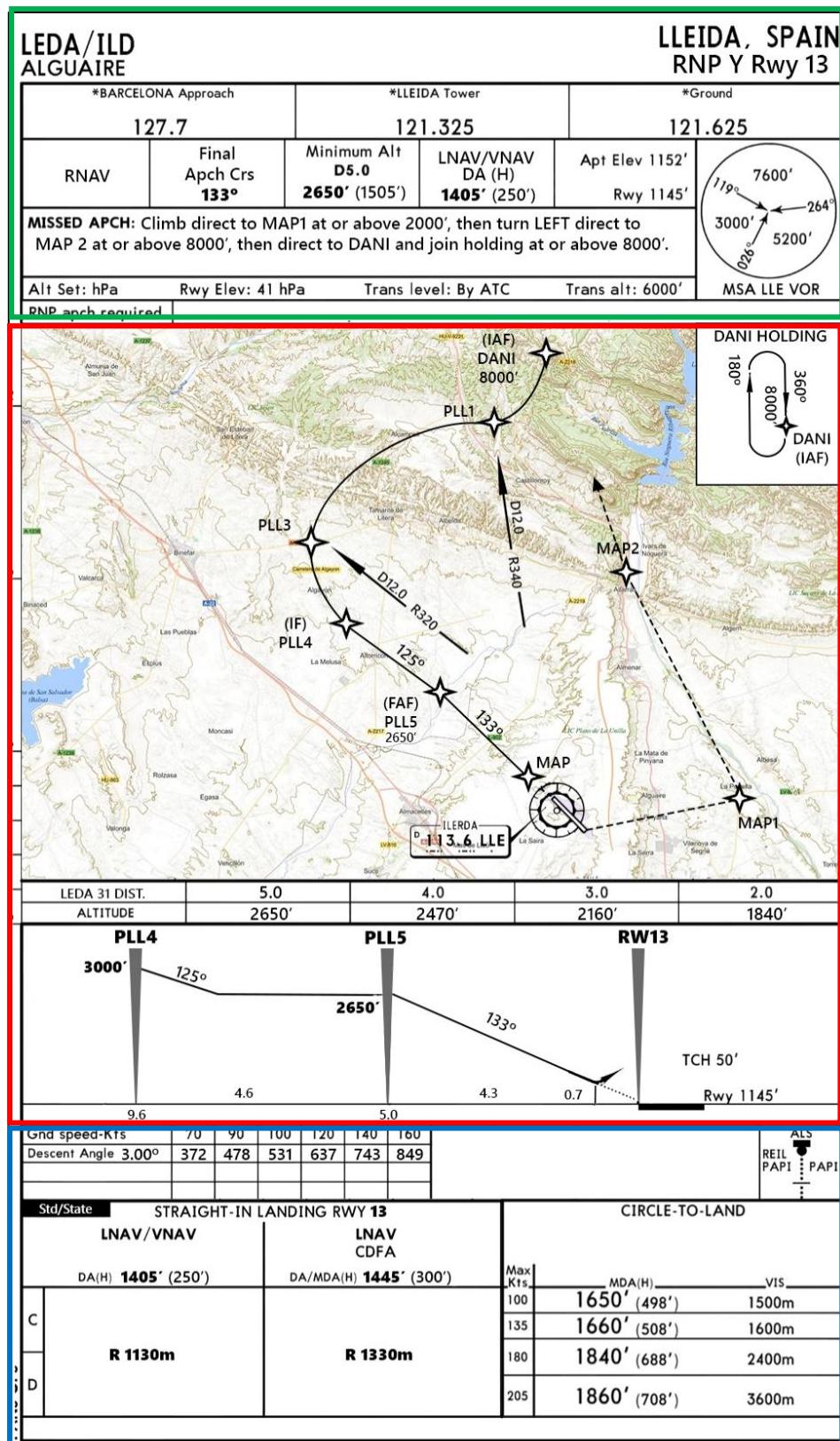


Figura 5.3. Carta de aproximación RNP LNAV/VNAV y LNAV pista 13 del aeropuerto de Lérida.

5.1 Descripción parte 1 de las cartas de aproximación

En esta sección se definirán los diferentes valores de cada casilla de la parte 1 de cada una de las cartas leyendo de izquierda a derecha y de arriba abajo (se coge como referencia la información de la figura 5.4). También se comentarán aquellas diferencias que haya entre las dos cartas ya que no todos los parámetros van a ser los mismos.

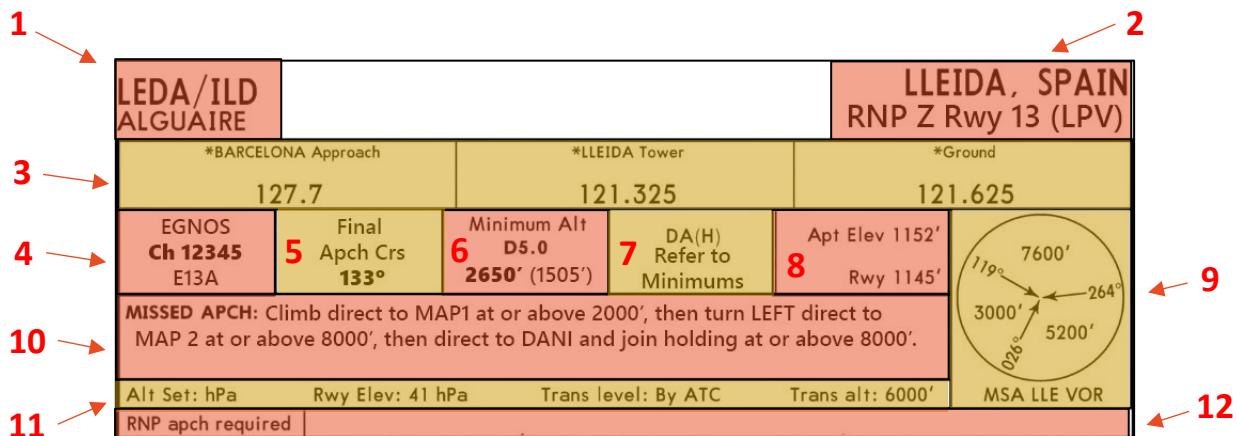


Figura 5.4. Parte 1 de la carta RNP LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida.

LEDA/ILD ALGUAIRE		LLEIDA, SPAIN RNP Y Rwy 13				
*BARCELONA Approach		*LLEIDA Tower		*Ground		
127.7		121.325		121.625		
RNAV	Final Apch Crs 133°	Minimum Alt D5.0 2650' (1505')	LNAV/VNAV DA (H) 1405' (250')	Apt Elev 1152' Rwy 1145'	MSA LLE VOR	
MISSED APCH: Climb direct to MAP1 at or above 2000', then turn LEFT direct to MAP 2 at or above 8000', then direct to DANI and join holding at or above 8000'.						
Alt Set: hPa	Rwy Elev: 41 hPa	Trans level: By ATC	Trans alt: 6000'			
RNP apch required						

Figura 5.5. Parte 1 de la carta RNP LNAV/VNAV y LNAV pista 13 del aeropuerto de Lérida.

- LEDA / ILD Alguaire:** Este parámetro representa el nombre del aeropuerto, y, por lo tanto, será igual en las dos cartas. LEDA es el código ICAO de Lérida.
- LLEIDA, SPAIN, RNP Z Rwy 13 (LPV):** En este apartado se indica la ubicación del aeropuerto y el nombre de la aproximación. En el caso de la figura 5.4, el nombre de la aproximación es RNP Z (LPV) ya que se trata de una aproximación con guiado lateral y vertical LPV. En esta aproximación se hace uso del sistema de aumentación EGNOS para conseguir la mayor precisión posible. En la carta de la figura 5.5, el nombre es RNP Y ya que en esta aproximación no se hace uso del sistema de aumentación, y, por lo tanto, no hay un guiado vertical tan preciso como en el primer caso. Los valores X e Y en los nombres de las cartas tienen la función de diferenciarlas entre ellas.



3. **Barcelona Approach, Lleida Tower y Ground:** Los valores que hay en estas casillas corresponden a las diferentes frecuencias de radio de los diferentes controladores que dan servicio durante la aproximación y el rodaje a parking de una aeronave. Como las frecuencias de control no dependen del tipo de aproximación, los valores serán iguales para las dos fichas.
4. **EGNOS Ch 12345 E13A:** Este valor sirve para determinar que se trata de una aproximación que cuenta con el sistema de aumentación EGNOS. Los valores del canal (Ch 12345) sirven para identificar la aproximación, mientras que los valores E13A sirven para identificar la pista. La letra **E** indica que el sistema de aumentación es EGNOS (si fuera **W** se trataría de una aproximación con sistema de aumentación WAAS), los valores **13** sirven para identificar la orientación de la pista, y finalmente está el valor **A**, que sirve para determinar la pista. Si por ejemplo hubiese tres pistas paralelas, una **A**, determinaría que es la pista izquierda, una **B**, determinaría que es la pista central, y si fuera una **C**, determinaría que es la pista de la derecha. En el caso de la figura 5.5, esta información se sustituye por RNAV ya que no se hace uso de ningún sistema de aumentación.
5. **Final Appch Crs 133º:** Este valor determina el curso magnético que debe seguir la aeronave en el último tramo con el objetivo de llegar a la pista. Es importante destacar, que al tratarse de una aproximación RNP, el curso coincide con la orientación magnética de la pista (133 grados) ya que no depende de ninguna radioayuda terrestre como es en el caso de la aproximación VOR. El valor del curso será igual para las dos fichas de aproximación.
6. **Minimum Alt D5.0 2650' (1505')**: El valor de esta casilla representa la altitud mínima a la que debe encontrarse la aeronave en ese punto con el fin de poder llevar a cabo una aproximación con ángulo de descenso constante. En el caso de la figura 5.4 y 5.5, cuando la aeronave se encuentre a 5 millas del umbral de la pista (D5.0), esta debe estar mínimo a 2.650 pies sobre el nivel del mar (1.505 pies sobre el terreno). Este valor se ha calculado con la finalidad de realizar una aproximación con un ángulo constante de 3 grados.
7. **DA (H) Refer to Minimums:** En esta casilla se encuentra la altitud a la que debe frustrar el piloto en caso de no llevar una aproximación estabilizada. En la figura 5.4 no aparece ningún valor ya que este se ubica en la tabla de los mínimos (parte 3 de la carta). En la figura 5.5 el valor es de 1.405 pies sobre el terreno cuando se trate de una aproximación con guía lateral y vertical Baro-Vnav. En cualquier caso, en la sección 5.3 se definen todos los mínimos de manera detallada.
8. **Apt Elev, Rwy:** Los valores que se encuentran en esta casilla representan la elevación del aeropuerto (1.152 pies) y la elevación de la pista (1.145 pies) sobre el nivel del mar. Al no depender de la aproximación, estos valores son iguales para las dos cartas.

- 9. Círculo altitudes mínimas:** En este recuadro se muestran las diferentes altitudes mínimas que deben mantener las aeronaves con el fin de mantener la separación con el terreno. El centro del círculo representa el VOR de Lérida por lo que las aeronaves que quieran sobrevolar el aeropuerto por el norte (entre rumbos 119º y 264º) deberán mantener una altitud de 7.600 pies sobre el nivel del mar. Para las aeronaves del oeste (rumbos 119º y 026º) la altitud mínima será de 3.000 pies sobre el nivel del mar. Finalmente, para aeronaves provenientes del este (rumbos 026º y 264º) la altitud será de 5.200 pies. Estos valores serán iguales en las dos cartas ya que no dependen de la aproximación, sino que dependen del terreno.
- 10. Missed Apch:** La información que aparece en este apartado muestra la descripción de cómo se debe llevar a cabo la aproximación frustrada. En la sección 5.2 se definirá de forma detallada.
- 11. Alt Set, Rwy Elev, Trans level, Trans alt:** En esta casilla aparecen diferentes informaciones. La primera de ellas (Alt Set: hPa) determina que la unidad de presión barométrica que haya en el campo se debe medir en hectopascales. La segunda información (Rwy Elev: 41 hPa) sirve para relacionar la elevación del aeródromo en función de la presión barométrica (cuando el aeropuerto está al nivel del mar, el valor de presión es de 0 hPa). En tercer lugar, está el **Trans level**⁴³ el cual lo dará el controlador en función de las condiciones meteorológicas de ese día en concreto. Por último, está la **Trans alt**⁴⁴, que en el caso de casi toda España es de 6.000 pies. Estos valores son iguales para las dos cartas ya que no tienen relación con el tipo de aproximación.
- 12. RNP apch required:** Esta información se usa para informar a los usuarios de que es necesario cumplir con los requisitos mínimos RNP para llevar a cabo la aproximación. Teniendo en cuenta que en las dos cartas se realizan aproximaciones RNP, esta información no va a variar.

5.2 Descripción parte 2 de las cartas de aproximación

En esta segunda sección del capítulo se realiza un análisis de la aproximación en sí. La parte 2 de la carta está dividida en dos bloques de información. En el primer bloque se muestran los puntos y trayectorias que debe seguir el avión desde una vista de planta (visto desde arriba), mientras que, en el segundo caso, la información que se proporciona es la de la senda de planeo final desde un punto de pista de perfil (vista desde el lado). Al igual que en la sección 5.1, se remarcarán aquellas diferencias que pueda haber entre las dos cartas (ya sea LPV, o LNAV/VNAV y VNAV).

⁴³ Transition level: El nivel de transición es el nivel de vuelo más bajo disponible para usarlo por encima de la altitud de transición [48].

⁴⁴ Transition altitude: La altitud de transición es la altitud a la cual, o por debajo de la cual, se controla la posición vertical de una aeronave por referencia a altitudes. Se trata de un valor fijo para cada aeródromo.

- **Vista de planta de la aproximación**

La vista de planta de la carta es muy útil para las tripulaciones ya que proporcionan una gran cantidad de información. El hecho de que la información sea tan visual, permite interpretar fácilmente cual es la trayectoria y la situación geográfica de la aproximación respecto al terreno. La vista de planta de la carta LPV diseñada en este TFG se puede observar en la figura 5.6.

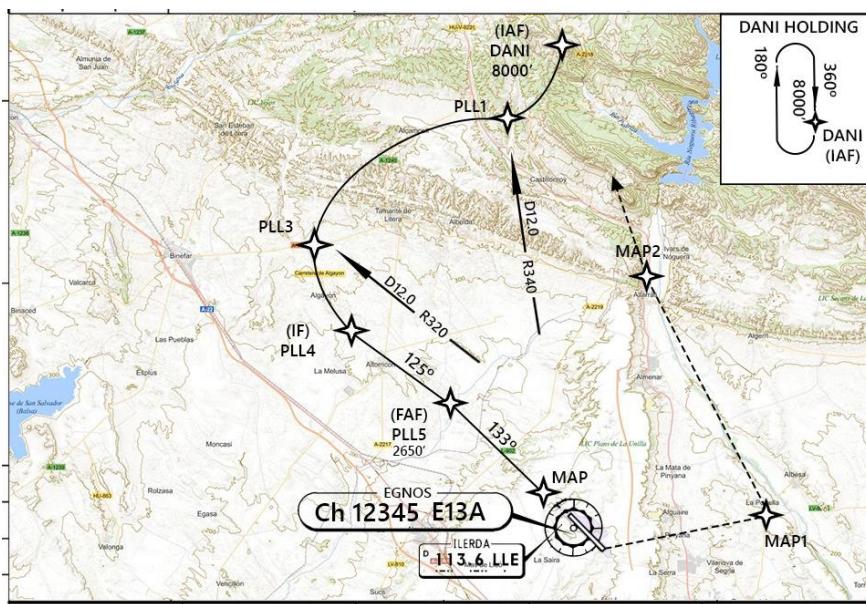


Figura 5.6. Parte 2 de la carta RNP Z LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida. Vista de planta.

Antes de comenzar con la explicación de la aproximación, es importante remarcar que la única diferencia que hay entre la carta RNP Z LPV y RNP Y desde el punto de vista de la planta, es que en la aproximación LPV aparece la información relacionada con el sistema de aumentación EGNOS (Ch12345 E13A), mientras que en la RNP Y, al no contar con este sistema, esta información no aparece.

Tal y como se indica en la introducción de este capítulo, con el objetivo de solucionar el problema de tener solo un IAF, se ha creado uno nuevo llamado DANI, el cual está situado en la milla 14 del radial 360 del VOR de Lérida (LLE). Este punto representa el inicio de la aproximación, y al igual que cualquier IAF, también cuenta con una espera a derechas en la que el rumbo de entrada es 180º. Es importante destacar que la altitud a la que se debe sobrevolar este punto es de 8.000 pies debido a la gran elevación de las montañas que hay en las inmediaciones.

El siguiente punto llamado de aproximación PLL1 está situado en la milla 12 del radial 340 del VOR de Lérida, el cual conecta con el punto PLL3 (milla 12 del radial 320 del VOR de Lérida) creando así un arco DME. Este arco permite a la aeronave descender de forma progresiva y segura ya que cumple con las distancias mínimas verticales y laterales con el terreno. Realizar un arco DME es posible ya que la navegación RNP permite este tipo de maniobras.

El punto llamado PLL4 representa el inicio del tramo intermedio (IF), situado en la milla 10 del radial 310 del VOR de Lérida y además supone el punto de salida del arco DME. Siguiendo una trayectoria de 125 grados se llega a alcanzar el punto PLL5, el cual representa el inicio del tramo final (FAF) en el que la altitud ideal es de 2.650 pies para poder realizar un descenso con un ángulo continuo de 3 grados (el ángulo de 3 grados de descenso es el más seguro para un piloto).

A continuación se encuentra el MAP de la carta de aproximación. Este punto representa el momento en el que el piloto debe decidir si seguir con la aproximación o no (mínima). En el caso de realizar una aproximación con LPV, este punto se encontrará a 0,6 millas del umbral de la pista. Si la aproximación no cuenta con LPV, este punto se encuentra a 0,7 millas del umbral ya que la altitud mínima de decisión será mayor en el segundo caso.

Los dos puntos restantes de la aproximación (MAP1 y MAP2) forman la trayectoria de la aproximación frustrada. Tal y como se define en la casilla *Missed Apch*, en caso de que el piloto frustre el aterrizaje, este deberá dirigirse directamente al punto MAP1 a 2.000 pies o más, y a continuación deberá volar directo a MAP2 a 8.000 pies o más a fin de dejar la separación mínima con el terreno. Una vez la aeronave haya alcanzado el punto MAP2, esta se dirigirá a la espera del punto DANI, a la espera de las indicaciones que le vaya a dar el controlador aéreo.

• Vista de perfil de la aproximación

En esta parte de la ficha se puede observar la aproximación desde un punto de vista de perfil. Esta vista en la carta sirve para determinar la altitud y el curso que debe seguir la aeronave a lo largo de los diferentes puntos, y también sirve para ver a qué distancia se encuentran estos mismos puntos respecto el umbral de la pista. De esta manera, el piloto sabe si va alto o bajo en función de la distancia que le quede para llegar al suelo. En el caso de esta carta RNP, la información mostrada va desde el punto PLL4 (IF) hasta el umbral de la pista 13 del aeropuerto de Lérida tal y como se puede observar en la figura 5.7 y 5.8.

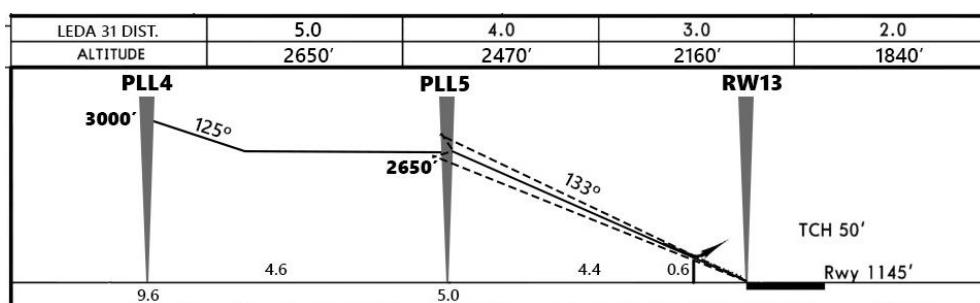


Figura 5.7. Parte 2 de la carta RNP Z LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida. Vista de perfil.

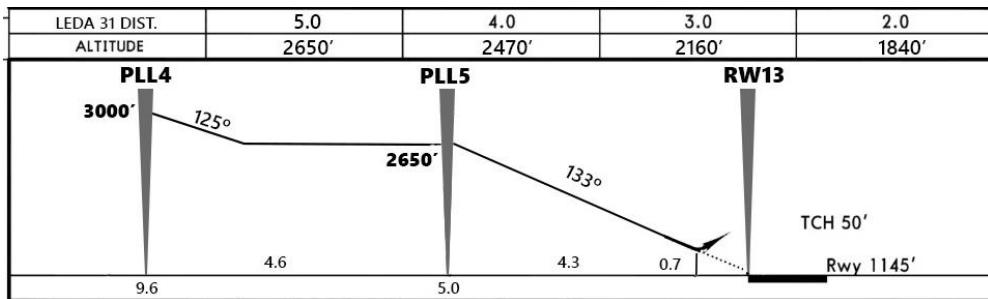


Figura 5.8. Parte 2 de la carta RNP Y pista 13 del aeropuerto de Lérida. Vista de perfil.

La tabla que aparece en la parte superior de las figuras 5.7 y 5.8 son iguales en los dos casos, y sirven para informar al piloto cuál es la altitud ideal en función de la distancia a la que se encuentren respecto al umbral de la pista. Por ejemplo, la altitud ideal cuando la aeronave está a 3 millas náuticas del umbral es de 2.160 pies sobre el nivel del mar. Gracias a esta tabla, el piloto sabrá que variación vertical existe entre la senda ideal, y la senda que se está llevando a cabo en ese momento.

En el caso de la aproximación RNP de Lérida, la vista de perfil empieza en el tramo intermedio, concretamente en el punto PLL4 en el que la altitud debe ser aproximadamente de 3.000 pies sobre el nivel del mar. Siguiendo un rumbo de 125º (tal y como se ha visto desde la vista de planta), la aeronave llegará al punto PLL5 (FAF) a 2.650 pies sobre el nivel del mar. En este punto empieza el tramo de aproximación final en el que el piloto deberá mantener un rumbo de 133 grados, y un descenso de 3 grados, a fin de llegar alineado al umbral a 50 pies sobre el terreno.

Tal y como se puede observar en las figuras 5.7 y 5.8, las distancias que existen entre los diferentes puntos hasta el umbral son iguales, 9,6 millas desde PLL4, y 5 millas desde PLL5. La diferencia principal que existe entre las dos aproximaciones es el MAP, representado con una flecha negra que asciende hacia arriba. En la figura 5.7, al tratarse de una aproximación LPV, los mínimos son más bajos y por lo tanto el MAP está más cerca del umbral de la pista, concretamente a 0,6 millas. En cambio, en la figura 5.8, al tratarse de una aproximación menos precisa, el MAP está situado a 0,7 millas respecto al umbral. La última diferencia que se puede observar entre las dos fichas, es que en la figura 5.7, la senda final (desde PLL5 hasta la pista) está bordeada con una línea discontinua que informa de que existe un guiado vertical y lateral de precisión. En la figura 5.8 esta línea discontinua no aparece ya que se trata de una aproximación donde el guiado vertical (si es que se usa la LNAV/VNAV) se lleva a cabo mediante altitudes barométricas.

5.3 Descripción parte 3 de las cartas de aproximación

La parte 3 de la ficha de aproximación engloba toda aquella información relacionada con altitudes y visibilidades mínimas para frustrar el aterrizaje las cuales están representadas en las figuras 5.9 y 5.10. En esta sección se definirá como se han calculado estas altitudes mínimas, y se verá qué diferencias hay en función del tipo de aproximación RNP que se esté llevando a cabo. Se han coloreado y numerado los recuadros de las figuras 5.9 y 5.10 para entender mejor lo que se describirá a lo largo de esta sección.

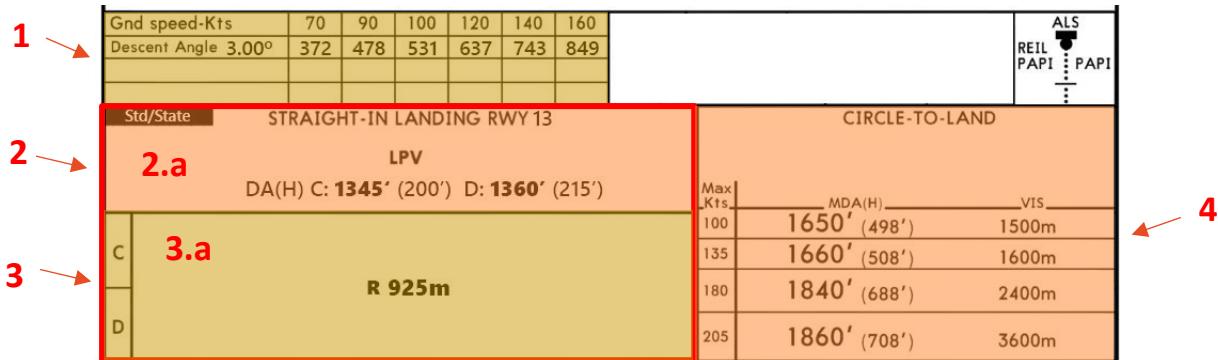


Figura 5.9. Parte 3 de la carta RNP Z LPV pista 13 del aeropuerto de Lérida.

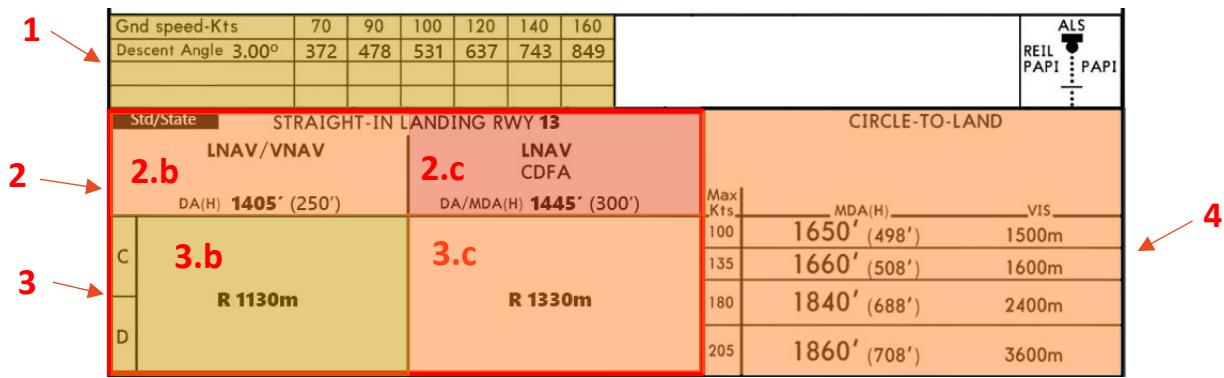


Figura 5.10. Parte 3 de la carta RNP Y pista 13 del aeropuerto de Lérida.

1. Tabla ángulo y velocidades de descenso: La tabla que aparece arriba izquierda de las figuras 5.9 y 5.10 (marcado de color amarillo y con el número 1) indica cual es la velocidad vertical que debe seguir el avión en función de la velocidad lineal que lleve a fin de mantener un descenso de 3 grados de descenso. Si por ejemplo la aeronave vuela a 100 nudos de velocidad, esta deberá descender a 531 pies por minuto para poder seguir la senda ideal.

Para poder entender las demás casillas es necesario definir una serie de conceptos:

- **MDA (H):** La **altitud** mínima de descenso (MDA) o la **altura**⁴⁵ mínima de descenso (MDH) es una altitud o altura especificada en una aproximación que no es de precisión o una aproximación circular (circle tol and) por debajo de la cual no se debe realizar el descenso sin la referencia visual requerida.
- **DA (H):** La altitud de decisión (DA) o altura de decisión (DH) es una altitud o altura especificada en la aproximación de precisión o aproximación con guía vertical en la que se debe iniciar una aproximación frustrada si no se ha establecido la referencia visual requerida para continuar la aproximación.

⁴⁵ Altitud y altura: La diferencia entre altitud y altura consiste en que en el primer caso se mide la distancia respecto el nivel del mar, mientras que en la altura se mide la distancia respecto al aeropuerto.

- **Straight-in landing:** Son aquellas aproximaciones en las que el aterrizaje se realiza en una pista alineada dentro de los 30º del rumbo de aproximación final.
- **Circle to land:** Una maniobra circle-to-land consiste en realizar una aproximación mixta, instrumental a una pista, pero aterrizando en visual en otra. El tramo comprendido entre el final de la aproximación instrumental y la pista donde se va a aterrizar se completa en visual. Las causas pueden ser varias, entre las cuales puede ser por viento en cola, orografía que no permita disponer de aproximaciones instrumentales a las dos cabeceras de una misma pista, etc. La parte final de la aproximación se realiza ejecutando un circuito de aeródromo en condiciones visuales. A este circuito se le llama 'circle to land o circling'. Siempre se considera una aproximación de NO PRECISIÓN.
- **R:** En aviación, el alcance visual en la pista (R, o también conocido como RVR) es la distancia sobre la cual un piloto de una aeronave puede ver en la línea central de la pista, las marcas de la superficie de la pista que delimitan la pista o identifican su línea central. El RVR se expresa normalmente en pies o metros. Se utiliza para determinar las condiciones de aterrizaje y despegue de los pilotos de aeronaves, así como el tipo de ayudas visuales operativas utilizadas en el aeropuerto.
- **Categorías A, B, C, D y E:** Estos valores sirven para diferenciar las aeronaves que van a aterrizar en el aeródromo en función de su velocidad de aproximación, ya que este factor (la velocidad) es determinante a la hora de determinar los mínimos de una aproximación. Si la aeronave es de clase A, significa que su velocidad de aproximación final (también conocida como **Vref**) será menor a 90 nudos (aviación general). Si es de clase B, la Vref se encuentra entre los 91 y 120 nudos. La categoría C es para aeronaves con una Vref de entre 121 y 140 nudos. La categoría D sirve para aquellos aviones que mantienen una velocidad de aproximación final de entre 141 y 165 nudos. Finalmente está la categoría E, la cual engloba esas aeronaves con una Vref de más de 166 nudos [49].

Una vez definidos estos parámetros, ya se pueden definir las siguientes casillas en las que se han usado diferentes criterios para su realización.

2. TRAIGHT-IN LANDING R13: En esta casilla aparecen las diferentes altitudes mínimas junto a los alcances visuales en función de la categoría de la aeronave. Para calcular la DA(H), se han tenido en cuenta dos parámetros:

- **Altitud mínima estandarizada:** El primer parámetro que se ha tenido en cuenta es la información que ofrece la figura 3.17 de este mismo TFG en el que se indican cuáles son las altitudes de decisión en función de la aproximación que se esté llevando a cabo. Estas altitudes estandarizadas solo son aplicables cuando no existen obstáculos en la aproximación, es por este motivo por el cual se ha tenido en cuenta el segundo parámetro.
- **Obstáculos en aproximación:** Los obstáculos que pueda haber durante la aproximación son cruciales a fin de determinar la altitud mínima de decisión, es por ello que se ha realizado un pequeño estudio de los obstáculos que hay durante la fase de aproximación.

Los datos de los obstáculos se han conseguido gracias al Servicio de Información Aeronáutica [10] en el que aparece toda la información en relación a los aeropuertos españoles. En las figuras 5.11 y 5.12 aparecen los diferentes obstáculos que afectan a la aproximación por la pista 13, y los obstáculos que afectan a la trayectoria de ascenso en caso de frustrar el aterrizaje:

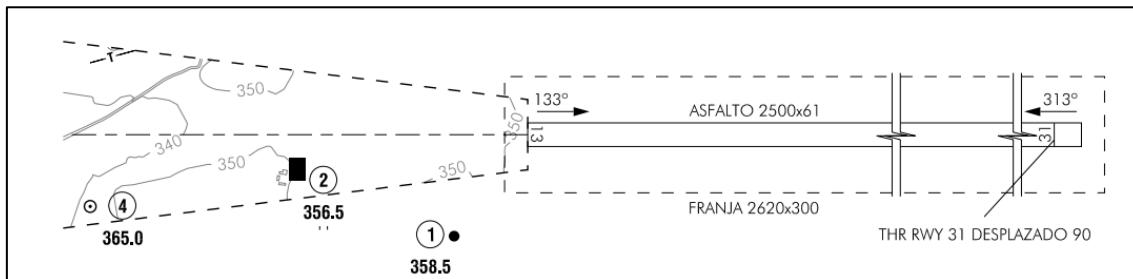


Figura 5.11. Obstáculos de la senda pista 13 de Lérida. Fuente [10].

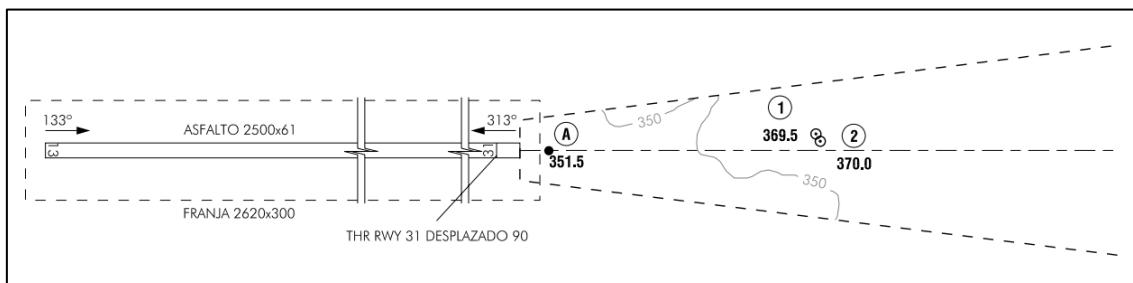


Figura 5.12. Obstáculos de la senda pista 31 de Lérida. Fuente [10].

Los puntos que aparecen numerados en las figuras 5.11 y 5.12 representan la altura en metros de los diferentes obstáculos que pueden afectar durante el descenso en la pista 13 (figura 5.11) y al supuesto ascenso que se realizaría en caso de frustrar el aterrizaje (5.12) vistos desde arriba. Una vez analizada la altura y la distancia que tienen los obstáculos respecto a la pista, se ha considerado que no afectarán de forma negativa a la DA(H) ya que no perjudican el ángulo de descenso o ascenso, por lo que los valores insertados en las casillas corresponden a los mismos valores que aparecen en la figura 3.17. Las altitudes de decisión quedan tal y como se ilustra en la figura 5.9 y 5.10:

2.a. DA (H) Aproximación RNP LPV Rwy 13: En la figura 5.9., la mínima es de 1.345' (200') para aeronaves tipo C (Airbus A320), y 1.360' (215') para aeronaves tipo D. El primer valor representa la altitud respecto al nivel del mar, mientras que el valor entre paréntesis representa la altitud respecto al terreno. Para el caso de las aeronaves tipo C se ha seguido el criterio de la figura 3.17, mientras que en los mínimos de las aeronaves tipo D se les ha añadido 15 pies a las altitudes del tipo C debido a que su velocidad de aterrizaje es mayor y por lo tanto su tiempo de reacción requiere de más distancia.

2.b. DA (H) Aproximación RNP LNAV/VNAV RWY 13: En la figura 5.10., la mínima es de 1.405' (250'). El valor es mayor que en el de la aproximación RNP LPV ya que el guiado vertical no es tan preciso, y, por lo tanto, se les ha añadido 50 pies a los mínimos en esta aproximación siguiendo también el criterio oficial de la figura 3.17.

2.c. DA (H) Aproximación RNP LNAV RWY 13: En la figura 5.10., la altitud mínima es de 1.445' (300') en el que también se ha seguido el mismo criterio que en las aproximaciones anteriores. Este último caso es el menos preciso de los 3, por lo que la mínima resulta ser la más elevada.

3. Alcance visual de la pista R: En cuanto al alcance visual de pista (R), su cálculo se ha realizado mediante una proporción con el valor de DA(H) de la aproximación VOR de esta misma pista (el valor de R en la aproximación VOR de la pista 13 es 1.500m y su DA(H) es 1.510'). Por lo tanto, los resultados de R para los tres tipos de aproximación quedan de la siguiente forma:

3.a. R de la aproximación RNP LPV RWY 13: En relación a la figura 5.9., realizando la proporción respecto la R de la aproximación VOR de la pista 13, el resultado de R es de 925 metros.

3.b. R de la aproximación RNP LNAV/VNAV RWY 13: Como se ilustra en la figura 5.10., realizando la proporción respecto la R de la aproximación VOR de la pista 13, el resultado de R para la aproximación LNAV/VNAV es de 1.130 metros. Es importante destacar que cuando mayor es la DA(H), más lejos está el avión del umbral y por lo tanto el valor de R será mayor.

3.c R de la aproximación RNP LNAV RWY 13: En la figura 5.10., realizando la proporción respecto la R de la aproximación VOR de la pista 13, el resultado de R para la aproximación VNAV es de 1.330 metros.

4. CIRCLE-TO-LAND: En esta casilla aparecen las diferentes altitudes mínimas que pueden mantener las aeronaves en el caso de realizar una aproximación de tipo circle-to-land. Los valores también vendrán determinados por la velocidad que mantengan las aeronaves por lo que existen diferentes MDA(H). Al tratarse de una aproximación en el que el último tramo es visual, la MDA (H) será igual en todas las cartas (sea VOR, RNP o ILS) ya que en este punto de la aproximación ya no se usa navegación instrumental. Por este mismo motivo, el valor de las MDA(H) y de las visibilidades (VIS) son iguales en la carta RNP Z y RNP Y. Esta casilla se ha copiado de la aproximación VOR de la pista 13 donde los valores quedan de la siguiente manera:

- Con un máximo de 100 nudos la MDA(H) es de 1650' y la visibilidad debe ser 1500 metros.
- Con un máximo de 135 nudos de velocidad la MDA (H) es de 1.660' y la visibilidad debe ser de 1.600m.
- Con un máximo de 180 nudos de velocidad la MDA (H) es de 1.840' y la visibilidad debe ser de 2.400m.
- Con un máximo de 205 nudos de velocidad la MDA (H) es de 1.840' y la visibilidad debe ser de 1600m.

5.4 Conclusiones del capítulo

Diseñar una carta de aproximación RNP ha supuesto un gran trabajo teniendo en cuenta toda la información que debe aparecer, y teniendo en cuenta que esta misma información se basa en una serie de leyes y normas muy extensas.

Gracias a este capítulo, no solo se ha podido mostrar toda aquella información que aparece en una carta, sino que también se ha podido comprender qué diferencias hay entre los distintos tipos de aproximaciones RNP, así como los factores que se deben tener en cuenta a la hora de asignar un valor numérico a un parámetro en concreto (por ejemplo, la altitud de decisión DA(H), o la distancia y altitud que debe seguir la aeronave en todo momento). Otro de los factores que también se han tenido en consideración ha sido el hecho de satisfacer las necesidades descritas en el capítulo 4, teniendo en cuenta los recursos de los que se disponía para implementar una aproximación de este tipo.

Con la determinación y la definición de todos los términos de la carta de aproximación RNP para el aeropuerto de Lérida se ha conseguido parte del segundo objetivo de este TFG. A fin de completarlo en su totalidad es necesario realizar la simulación, por lo que en el siguiente capítulo se definirán aquellos dispositivos e instrumentos del A320 que servirán para poder llevar a cabo la simulación de la aproximación RNP y entender cuál es la situación del avión en todo momento.

6 INSTRUMENTOS Y MCDU DEL AIRBUS A320

El objetivo principal de este capítulo es el de definir aquellos instrumentos y dispositivos que posee el Airbus A320 necesarios para entender la simulación de la aproximación RNP que se presenta en el capítulo 7. Aunque son muchos los factores que se deben tener en cuenta para poder llevar a cabo una aproximación RNP con una aeronave comercial como es el caso del A320, en este capítulo solo se definirán aquellos instrumentos y dispositivos necesarios para poder crear la ruta de la simulación, y para poder realizar un seguimiento de la misma. Todas las imágenes que aparecen en este capítulo se han obtenido mediante el simulador de vuelo XPlane 11 [8], software que también se usa para la simulación en el próximo capítulo.

Este capítulo esta divido en dos secciones principales, en la primera de ellas se especifican los dos instrumentos principales que servirán para poder hacer el seguimiento de la simulación formados por el *Primary Flight Display* y el *Navigation Display*. En la segunda sección se describen las diferentes pantallas que posee el ordenador de gestión de vuelo del avión (MCDU), las cuales servirán para crear la aproximación mediante *waypoints*, y para hacer el seguimiento de la simulación. Gracias a estos instrumentos se podrá ir comprobando si la aeronave respeta las altitudes y las velocidades descritas en la carta de aproximación del capítulo 5.

En la figura 6.1., se indican los diferentes aspectos que se definen en este capítulo.

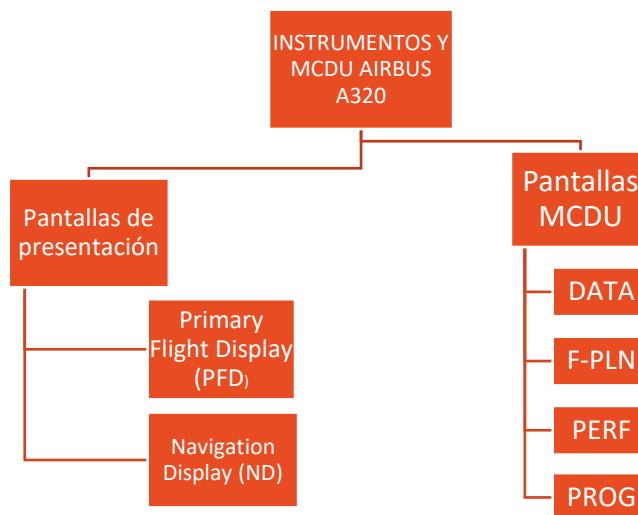


Figura 6.1. Instrumentos y MCDU del A320: Aspectos a definir

6.1 Pantallas de presentación del Airbus A320

Los dos instrumentos en forma de pantalla que posee el Airbus A320 que proporcionan todo tipo de información relacionada con el vuelo (altura, velocidad, rumbo, etc..) son el *Primary Flight Display (PFD)* y el *Navigation Display (ND)*. Gracias a estos dos instrumentos, será posible determinar la situación de la aeronave durante la simulación desde todos los puntos de vista posibles.

Es importante remarcar que existen otros instrumentos en forma de pantalla que dan otra información al piloto como por ejemplo el **ECAM**⁴⁶ (*Electronic Centralized Aircraft*), los cuales no se van a definir ya que no tienen ninguna relación en cuanto a la navegación que está llevando a cabo la aeronave.

6.1.1 Primary Flight Display (PFD)

Una pantalla de vuelo principal o PFD, que se encuentra en una aeronave equipada con un sistema electrónico de instrumentos de vuelo, es la referencia principal del piloto para obtener información de vuelo. La unidad combina la información que se muestra tradicionalmente en varios instrumentos electromecánicos en una sola pantalla electrónica, lo que reduce la carga de trabajo del piloto y mejora la conciencia situacional.

Para definir cada parte del PFD de un Airbus A320, se tomará como referencia la figura 6.2 la cual está dividida en 4 partes distintas.

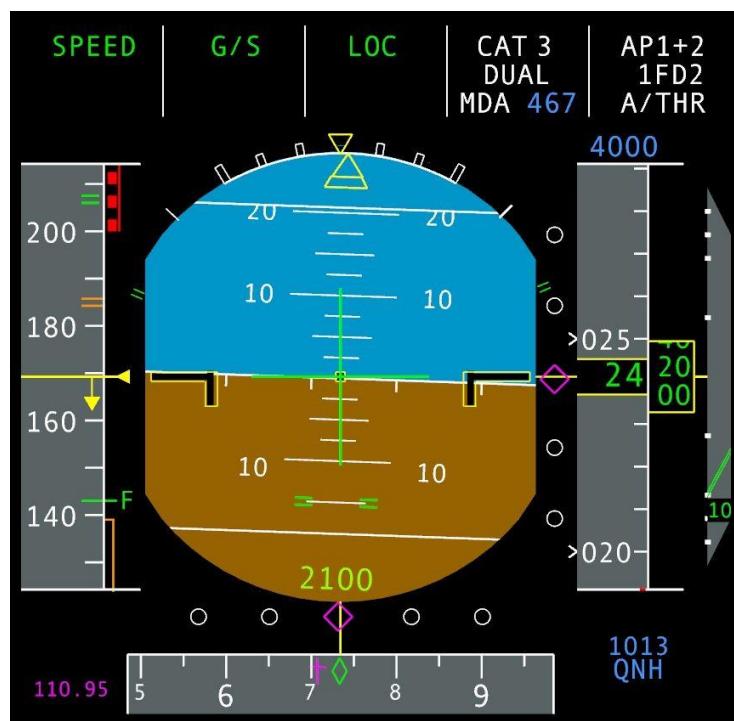


Figura 6.2. PFD Airbus A320. Fuente [50]

- **Cabecera del PFD:** La mayoría de las indicaciones la cabecera de del PFD (ver figura 6.3) son de color verde para un modo activado, azul para un modo armado o “preparado”, blanco para una indicación de estado y ámbar para una indicación de aviso.

⁴⁶ ECAM: Pantalla del Airbus A320 que informa del estado de los motores, del combustible restante en la aeronave, posición de flaps, etc...

Normalmente, la primera línea indica modos activados / capturados, y la segunda línea indica modos armados y mensajes especiales de tercera línea. Las indicaciones que aparecen están relacionadas con el estado de la aeronave durante una fase del vuelo. Por ejemplo, en el caso de la figura 6.3, las indicaciones de color verde indican que la aeronave sigue la velocidad gestionada por el piloto automático (SPEED), que la aeronave está siguiendo la senda de planeo (G/S) y que ha interceptado el localizador (LOC). Las indicaciones en blanco indican otra información como la MDA o los pilotos automáticos que están activados en ese momento (1 y 2 en el caso de la figura 6.3).



Figura 6.3. Cabecera PFD Airbus A320. Fuente [50]

- **Lado izquierdo del PFD:** El lado izquierdo del PFD indica toda aquella información relacionada con la velocidad indicada a la que está volando la aeronave. Esta zona del instrumento no solo indica la velocidad, sino que también proporciona otra información como la velocidad máxima a la que se pueden extender los flaps (dos barritas naranjas en la figura 6.4), información sobre si el avión está aumentando o reduciendo la velocidad (flecha amarilla de la figura 6.4) o información sobre la **velocidad a no exceder**⁴⁷ (franja roja de la figura 6.4).

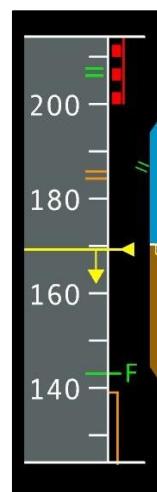


Figura 6.4. Lado izquierdo del PFD Airbus A320. Fuente [50]

⁴⁷ Velocidad a no exceder: Velocidad en la que la integridad de la aeronave se puede ver afectada (la estructura no soporta esa velocidad).

- **Centro del PFD:** En el centro de este instrumento aparece el horizonte artificial. El horizonte artificial sirve para determinar la actitud de la aeronave, eso significa que este instrumento indica hasta qué punto la aeronave está alabeando o cabeceando. En la parte central también aparece un indicador muy importante llamado *Flight Director (FD)*. El FD aparece como dos líneas de color verde, una vertical y otra horizontal, (en la figura 6.5 se puede apreciar) que indican la desviación vertical y lateral que tiene la aeronave respecto la ruta deseada. Finalmente, otra herramienta que proporciona esta zona del PFD, es la desviación lateral y vertical respecto la senda de planeo final representada con unos rombos de color morado (en la figura 6.5 se pueden apreciar estos rombos) en el caso de tratarse de una aproximación ILS. Cuando en lugar de una aproximación ILS se trate de otro tipo de aproximación instrumental, los indicadores de desviación no serán rombos, sino que serán rectángulos de color verde.

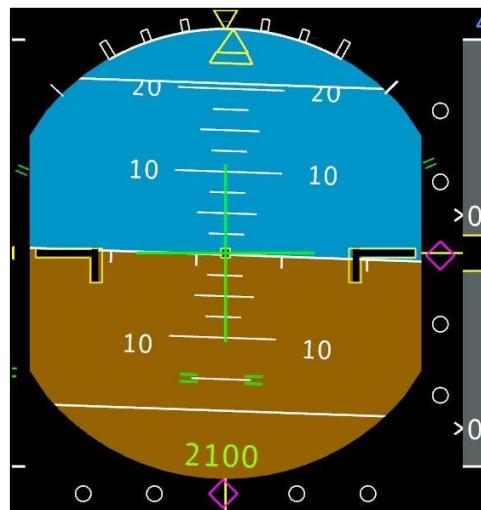


Figura 6.5. Parte central del PFD Airbus A320. Fuente [50]

- **Lado derecho del PFD:** El lado derecho del PFD es aquel que suministra información relativa a la altitud de la aeronave. Esta zona proporciona dos informaciones principalmente, la primera de ellas es la altitud respecto al nivel del mar, y la segunda informa de la velocidad vertical de la aeronave. Gracias a esta herramienta será fácil determinar si el avión está nivelado, ascendiendo, o descendiendo. En caso de que ascienda o descienda también será posible saber en qué régimen lo hace. En la figura 6.6 se puede observar como la aeronave se encuentra a 2.410 y está descendiendo a un régimen de 1.000 pies por minuto.

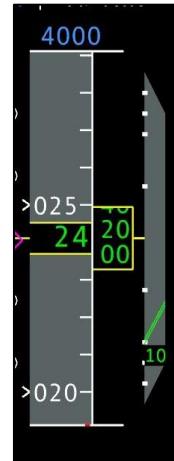


Figura 6.6. Lado derecho del PFD Airbus A320. Fuente [50]

6.1.2 Navigation Display (ND)

El otro instrumento que es necesario definir con el objetivo de entender la simulación a la perfección de la aproximación RNP es el Navigation Display (ND). El ND proporciona varias informaciones relativas a la situación de la aeronave a lo largo de su ruta como podría ser el rumbo, los puntos de ruta, o la distancia en millas hasta llegar al siguiente punto de dicha ruta. Con el fin de entender toda la información que proporciona el ND del Airbus A320 al piloto, se hará una descripción desglosada (al igual que en el PFD) de las diferentes partes que tiene. Se usará como referencia el ejemplo de la figura 6.7.



Figura 6.7. Navigation Display Airbus A320.

- Parte central del ND:** En la parte central del ND aparece la trayectoria de la ruta que va seguir la aeronave (pintada con una línea de color verde) junto con los puntos que forman esa ruta. En esta parte del ND también se puede ver una indicación que informa del momento en el que se va a alcanzar una altitud deseada (en la figura 6.7 aparece como una flecha pequeña de color azul). Otra característica importante que tiene el ND de Airbus, es la posibilidad de hacer o deshacer zoom con el fin de conseguir el campo de visión deseado. Si se observa los círculos blancos discontinuos de la figura 6.7, se puede observar cómo cada círculo indica una distancia (10, 20, 30 y 40 millas, aunque solo salga indicado el círculo de 20 y 30 millas). Si el piloto quisiera ver más allá de esta distancia, tendría la opción de hacerlo mediante otro dispositivo el cual le permitiría ver más puntos de la ruta (deshacer zoom), pero con un menor nivel de detalle en cuanto a distancia.
- Parte superior izquierda ND:** En la parte superior izquierda del *Navigation Display* del Airbus A320 aparecen tres informaciones. La primera de ellas es la velocidad respecto al suelo (GS: *Ground Speed*), la segunda es la velocidad verdadera relativa la masa de aire en la que se está volando (TAS: *True Air Speed*), y la última información que aparece es la velocidad y la dirección del viento que está incidiendo en el avión. En el caso de la figura 6.8, la aeronave vuela a una velocidad respecto al suelo de 353 nudos, una velocidad respecto la masa de aire de 353 nudos, y le incide un viento de 1 nudo que proviene de 325 grados magnéticos.

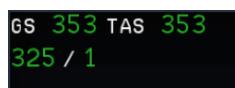


Figura 6.8. Parte superior izquierda ND Airbus A320.

- Parte superior derecha ND:** La información que aparece en esta parte del *Navigation Display* es aquella relacionada con el siguiente punto de la ruta. La primera línea indica el nombre del punto, y el rumbo al que hay que volar para llegar al él. La segunda línea informa de la distancia en millas que queda para llegar a ese punto, mientras que la tercera línea indica la hora a la que se estima llegar. Siguiendo el ejemplo de la figura 6.9, el siguiente punto al que llegaría la aeronave es *LARPA*, el cual está a 21 millas si se vuela a una trayectoria de 147 grados magnéticos. La hora esperada de llegada a dicho punto sería las 10:30.



Figura 6.9. Parte superior derecha ND Airbus A320.

Una vez se han analizado los dos instrumentos que servirán para hacer el seguimiento del vuelo durante la simulación, solamente queda definir aquellas pantallas del MCDU del Airbus que servirán para diseñar y gestionar la aproximación (mediante waypoints).

6.2 Pantallas del Multipurpose Control Display Unit (MCDU)

Tal y como se ha indicado al principio de este capítulo, gracias a la MCDU (ordenador gestor de vuelo del avión), no solo será posible diseñar los diferentes puntos de la aproximación, sino que también será posible realizar un seguimiento de la misma a fin de ver hasta qué punto cumple con los parámetros de la carta diseñada en el capítulo 5. Es importante destacar que el MCDU de Airbus tiene muchísimas funcionalidades, por lo que en esta sección solo se hablará de aquellas que son estrictamente necesarias para la simulación que se pretende realizar en el capítulo 7. Las pantallas que se describirán en esta sección son las pantallas *DATA*, *F-PLAN*, *PERF* y *PROG*, las cuales están marcadas de color rojo en la figura 6.10.



Figura 6.10. MCDU Airbus A320.

PANTALLA DATA: Tal y como se indica al principio de esta sección, cada pantalla de la MCDU tiene muchas funcionalidades, en este caso, la página DATA, solo se usará para crear los puntos de ruta (waypoints). Para ello se insertará el nombre del punto y la ubicación donde se quiere situar el punto (el punto se puede definir en función de coordenadas geográficas, en función de distancias sobre radioayudas terrestres, etc...). Aunque en el capítulo 7 se explicará cómo se ha insertado cada punto de la ruta, en la figura 6.11 se realiza una demostración de cómo crear el primer punto de la carta RNP de Lérida llamado DANI.



Figura 6.11. Creación de un punto de ruta. Pantalla DATA del MCDU Airbus A320.

Este punto está situado en el radial 360 de la milla 14 del VOR de Lérida. Es por ello que en el apartado PLACE (lugar) se inserta LLE (identificador del VOR de Lérida), en el apartado BRG (radial) se le inserta 360º, y en el apartado DIST (distancia) se le aplica 14 millas.

Una vez descrita la forma de crear nuevos puntos de ruta en la pantalla DATA, se debe proceder con la descripción de la pantalla F-PLN.

Pantalla F-PLN: En la pantalla F-PLN (Flight Plan) se insertan todos los puntos de la ruta que se pretende realizar durante el vuelo. Es necesario clarificar que el origen y el destino del vuelo se inserta desde la pantalla INIT, la cual no se va a definir ya que tiene poca relevancia en cuanto a la simulación. En cada línea de la pantalla F-PLN aparece el nombre del punto, la hora estimada de llegada a ese punto, la distancia respecto al punto anterior, la velocidad a la que se espera volar y la altitud a la que se llegará. Mediante la observación de la figura 6.12 es más sencillo entender la pantalla F-PLN.



Figura 6.12. Pantalla F-PLN del MCDU Airbus A320.

Si se toma como ejemplo el punto REBUL (cuadriculado de color rojo en la figura 6.12), se puede observar que se llegará a este punto a las 11:22 a una velocidad de 250 nudos y a una altitud de 14.400 pies. El punto REBUL se encuentra a 34 millas náuticas de su anterior punto (AFRIC). Cabe destacar que donde aparece T/C (*top of climb*) y T/D (*top of descent*) son aquellos puntos en el que se alcanzará la altitud máxima del vuelo y en la que se empieza el descenso respectivamente.

Otra información necesaria a destacar es que en esta misma pantalla se puede forzar a que la aeronave vuele a una velocidad y/o altitud en concreto, en un punto en concreto, lo cual resultará muy útil en la simulación del capítulo 7. En la figura 6.13 se puede observar cómo se inserta una altitud y una velocidad concreta (240 nudos y 15.000 pies) al punto REBUL (mismo punto definido en la figura 6.12).



Figura 6.13. Restricciones de altitud y velocidad en la pantalla F-PLN del MCDU Airbus A320.

Gracias a esta herramienta, se ha conseguido que la aeronave vuele a 240 nudos de velocidad y a una altitud de 15.000 pies (figura 6.14), en vez de a los 250 nudos y 14.400 pies que había de serie en el *Flight Plan* original (figura 6.12). Comparando la figura 6.12 y 6.14 se puede apreciar la diferencia. Cuando se le aplica una restricción de algún tipo a algún punto, este aparece con una estrellita de color morado tal y como se muestra en la figura 6.14.



Figura 6.14. Nuevas condiciones punto REBUL. F-PLN del MCDU Airbus A320.

PANTALLA PERF: En la página *PERF* (Performance) aparece toda aquella información relacionada con los parámetros de rendimiento para la fase actual del vuelo (en la pantalla *Perf* hay tantas páginas como fases tiene el vuelo), y se secuencian automáticamente después de la fase de despegue. Teniendo en cuenta que en el caso de este TFG solo interesa el rendimiento de la aeronave en la fase de aproximación, en esta parte solo se definirá la página APPR (aproximación) de la pantalla *PERF*. En la figura 6.15 aparece esta página.

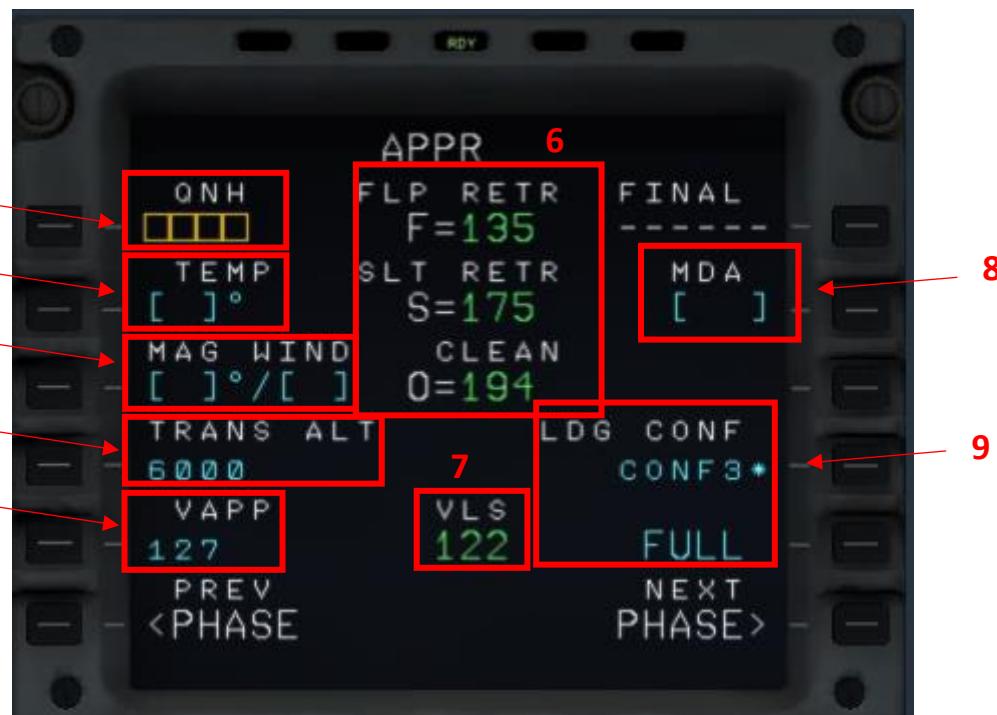


Figura 6.15. Página APPR. Pantalla *PERF* del MCDU Airbus A320.

En esta página se deben insertar diferentes valores que le harán saber a la aeronave cual es la situación actual del aeropuerto en el que se pretende aterrizar. La información de esta página se define de la siguiente manera:

1. **QNH:** El piloto deberá insertar el valor de **QNH**⁴⁸ del aeropuerto en el que se quiere aterrizar. Esto será necesario ya que el instrumento que mide la altitud por debajo de la altitud de transición, coge como referencia la presión atmosférica del aeropuerto de destino.
2. **TEMP:** En esta casilla el piloto deberá insertar la temperatura actual que haya en el aeropuerto de destino.
3. **MAG WIND:** En ese apartado se debe introducir la dirección y la intensidad del viento que haya en el aeropuerto de llegada.
4. **TRANS ALT:** La información que aparece en este apartado es la altitud de transición la cuál variará en función del aeropuerto.
5. **VAPP:** Este valor representa la velocidad de aproximación la cual dependerá de la configuración de flaps con la que se aterrize, y de cómo esté distribuido el peso en la aeronave. Lo calcula el MCDU automáticamente.
6. **FLP RETR, SLT RETR, CLEAN:** Son las diferentes velocidades durante la aproximación en función del estado de los flaps y los slats. Este parámetro lo calcula la aeronave automáticamente al igual que el VAPP.
7. **VLS:** Este valor representa la velocidad a la que se pretende tocar la pista. Lo calcula la MCDU automáticamente.
8. **MDA:** En esta casilla el piloto insertará la altitud mínima MDA o DA (en función del tipo de aproximación). Gracias a este dato, el avión avisa al piloto en el momento en el que la propia aeronave ha llegado a esa altitud y de esa forma el piloto podrá decidir si continuar o no con la aproximación.
9. **LDG CONF:** El piloto decide con qué configuración de flaps desea aterrizar. En el Airbus 320 se puede escoger entre la configuración de flaps al máximo, o de flaps 3 (3 puntos de flap).

En la simulación que se presentará en el capítulo 7 solo se modificarán aquellos valores de la pantalla *PERF* que tengan relación con la aproximación en Lérida.

⁴⁸ QNH: Presión atmosférica equivalente al nivel del mar.

PANTALLA PROG: La última pantalla que queda por definir en esta sección es la de *PROG* (*progress*). Esta pantalla resultará muy útil para evaluar el cumplimiento de la aproximación respecto a la carta diseñada en el capítulo 5 ya que proporciona información sobre distancia y rumbo sobre la cabecera de pista. En la figura 6.16 se puede observar el ejemplo de la pantalla *PROG* para una aproximación a la pista 25 derecha del aeropuerto de Barcelona (LEBL 25R).



Figura 6.16. Pantalla PROG para la aproximación del MCDU Airbus A320.

Con el fin de entender la pantalla *PROG*, se ha marcado en azul, rojo, y verde, los valores que serán realmente útiles durante la simulación de la aproximación RNP que se quiere llevar a cabo. El cuadro azul marca la desviación vertical que mantiene la aeronave respecto la senda de planeo ideal. En el caso de la figura 6.16, la aeronave está 430 pies más arriba de lo que marcaría la norma. El cuadro rojo muestra el rumbo que debería seguir la aeronave para dirigirse directamente a la pista 25R de Barcelona, y la distancia a la que se encuentra el avión sobre la cabecera de esta misma pista. En el ejemplo de la figura 6.16, la pista se encuentra a 4,1 millas y a una dirección de 246 grados magnéticos respecto el avión. Finalmente está el recuadro verde, el cual muestra el cumplimiento de performance de la aeronave durante esa fase de vuelo en concreto. Tal y como se ha descrito en capítulos anteriores, durante una aproximación RNP, el valor requerido de performance que debe seguir la aeronave es de máximo 0,3 millas náuticas, es por este motivo, que donde pone REQUIRED, el valor es de 0,3. El valor de ACCUR (*accuracy*), marca la precisión que tiene el sistema de navegación de la aeronave. En el caso de la figura 6.16, la precisión (ACCUR) es alta (HIGH) ya que el performance estimado (ESTIMATED) tiene un valor de 0,08 millas náuticas.

Teniendo en cuenta que la precisión 0,08 es mucho más elevada que la mínima que se requiere (cuando menor es el valor de la pantalla de performance, mayor precisión tiene el sistema de navegación del avión ya que ese valor mide el error), es lógico que en ACCUR aparezca el valor *High*. Cuando la performance estimada sea mayor a la requerida (peor precisión de la que se requiere), se entiende que la aeronave no podrá realizar la navegación de aquella fase de vuelo correctamente por falta de precisión.

6.3 Conclusiones del capítulo

Aunque los instrumentos y los equipos de una aeronave con las características del Airbus A320 son muy completos y muy extensos, mediante la realización de este capítulo se ha podido comprender cuales de estos sistemas son los necesarios a la hora de simular la aproximación.

En cuanto a pantallas de presentación, solamente se ha explicado en que consiste el *Primary Flight Display* y el *Navigation Display* ya que son las dos únicas pantallas que muestran la información relativa al objeto del estudio como pueden ser los rumbos, las altitudes, los puntos de la aproximación, o las velocidades que sigue la aeronave durante el proceso de aterrizaje.

Hay otras pantallas de presentación que también son realmente útiles y que proporcionan otra información como la cantidad de combustible restante, el estado de los motores, o el estado de otros sistemas como el **APU**⁴⁹ o el sistema hidráulico. Pero estas, al no estar estrechamente relacionadas con lo que se pretende estudiar en este TFG, no ha sido necesario entrar en detalles en cuanto a su descripción.

La MCDU es un ejemplo aún mejor de la gran cantidad de tareas y posibilidades que ofrece la aviación moderna. Este ordenador gestor de vuelo es capaz de crear puntos, crear rutas, modificar estas rutas, realizar seguimientos del vuelo, y un largo etcétera. Al igual que con las pantallas de presentación, solo se han definido aquellas funciones que son necesarias para llevar a cabo la simulación del siguiente capítulo, ya que tratar de definir todas las funciones está fuera del alcance de este trabajo.

Una vez se han realizado todas las descripciones de las pantallas e instrumentos que serán útiles para la realización de la simulación, solamente queda llevarla a cabo para observar hasta qué punto la simulación se adapta a la carta de aproximación.

⁴⁹ APU: La unidad de potencia auxiliar (Auxiliar Power Unit) es un dispositivo que proporciona energía a la aeronave mediante un motor.

7 SIMULACIÓN DE LA APROXIMACIÓN RNP DE LÉRIDA CON EL A320

Con la finalidad de completar la parte práctica, segundo objetivo de este TFG, es necesario realizar la simulación del Airbus A320 en la aproximación RNP de la pista 13 para el aeropuerto de Lérida que se ha diseñado en el capítulo 5. Mediante esta simulación se podrán ver los beneficios de la nueva aproximación, y el nivel de cumplimiento de la aeronave respecto al diseño de la carta con el objetivo de determinar si es posible aplicar esta aproximación en la realidad. Para poder realizar la simulación se ha usado un software llamado Xplane 11 [8] (simulador de vuelo), el cual ha hecho posible llevar a cabo la aproximación de la carta RNP LPV diseñada.

El capítulo está dividido en 3 secciones principales. En la primera sección se crearán los puntos de ruta que forman la aproximación en su conjunto, los cuales estarán constituidos por los mismos puntos que la carta de aproximación RNP de la pista 13 de Lérida. Una vez se hayan creado estos *waypoints* en la MCDU, en la segunda parte del capítulo se insertarán estos puntos en la página F-PLN del MCDU con el fin de que la aeronave realice la aproximación a través de estos. En esta segunda parte también se modificarán los puntos del plan de vuelo a fin de que respeten las diferentes restricciones de altura y velocidad publicadas en la carta, y se añadirá la espera para ver como quedaría en caso de querer realizarla. La última parte consistirá en el vuelo en sí, en donde se realizarán capturas de pantalla en los puntos más importantes para determinar el nivel cumplimiento de la trayectoria de aproximación. Cabe destacar que además de las imágenes que se muestran en este capítulo respecto a la aproximación, también se facilita un link en el que se podrá observar la aproximación en formato vídeo, ya que, de esta forma, es más sencillo entender que hace la aeronave en todo momento [51].



Figura 7.1. Pasos a realizar para la aproximación RNP en la pista 13 de Lérida.

7.1 Creación de Waypoints

Para que la aeronave siga los puntos deseados durante la aproximación, es necesario crear estos mismos puntos mediante la MCDU. Tal y como se ha definido en la sección 6.2 de este mismo TFG, en la pantalla *DATA* de la MCDU, se pueden crear diferentes waypoints en función de unos parámetros (estos parámetros pueden ser coordenadas geográficas, distancias a radioayudas, distancias a cabeceras de pista, etc..).

Antes de comenzar con la definición de cada punto que se creará en el MCDU, es importante remarcar que estos puntos serán los mismos que los que se han definido en la sección 5.2 del TFG. Los puntos de la aproximación (sin contar los puntos de la aproximación frustrada) están formados por 6 puntos distintos:

Punto 1: El primer punto se llama DANI, es el IAF de la aproximación y está situado a 14 millas del radial 360 del VOR de Lérida (LLE). La altitud a la que se debe llegar a este punto es de 8.000 pies con la finalidad de mantener la distancia mínima con el terreno. Al igual que en cualquier IAF, debe haber una espera, en el caso del punto DANI, la espera es a derechas y el rumbo de entrada es 180º. En la figura 6.11 del capítulo anterior se muestra cómo crear este mismo punto en la MCDU del Airbus A320.

Punto 2: El segundo punto de la aproximación tiene el nombre PLL1 (Punto Lleida 1), el cual está situado en la milla 12 del radial 340 del VOR de Lérida. Este punto es el origen del arco DME (de radio 12 millas respecto el VOR) que conectará más adelante con el punto PLL3.

Punto 3: El tercer punto es peculiar ya que no aparece en la carta. Con la MCDU es posible crear waypoints, pero no arcos DME. Es por este motivo por el cual se ha creado un punto adicional llamado PLL2 (Punto Lleida 2), que servirá para simular el arco que va de PLL1 a PLL3. Este punto es auxiliar, ya que en la vida real no sería necesario crear un punto adicional para realizar un arco DME, pero al tratarse de una simulación, se ha tenido que añadir este punto a fin de realizar una aproximación más precisa (en la sección 7.2 se entenderá mejor la creación de este punto). El punto PLL2 está situado en la milla 12 del radial 330 del VOR de Lérida.

Punto 4: El cuarto punto tiene el nombre de PLL3 (Punto Lleida 3), y sirve como punto de salida del arco DME. Está situado en la milla 12 del radial 320 del VOR de Lérida.

Punto 5: El quinto punto llamado PLL4 (Punto Lleida 4) tiene la función de IF, por lo que da origen al tramo de aproximación intermedio. Este punto se encuentra en la milla 10 del radial 310 del VOR de Lérida (hay que tener en cuenta que se necesitan dos millas para entrar en un arco DME, y dos millas para salir, por este motivo DANI está en la milla 14, y PLL4 en la milla 10).

Punto 6: El último punto como tal (sin contar los puntos de aproximación frustrada) es el punto PLL5 (Punto Lleida 5), el cual da comienzo al tramo de aproximación final (es el FAF de la aproximación). Este punto está situado a 313º grados y 5 millas de la cabecera de pista 13 con el objetivo de que el rumbo de acercamiento respecto la pista sea de 133º (coincide con la orientación magnética de la pista). En este punto la aeronave debe volar a 2.650 pies si quiere realizar una senda de planeo de 3 grados de descenso. En la figura 7.2 se puede observar cómo se ha creado el punto PLL5 de la aproximación.



Figura 7.2. Creación del punto PLL5 de la aproximación RNP en la MCDU del Airbus A320.

En la figura 7.2 se puede observar como el PLACE es 13 (ya que se trata de la pista 13 de Lérida), el BRG es 313º (ya que el punto está situado a 313º de la cabecera de la pista) y la DIST es de 5 millas náuticas.

Una vez se han creado todos los puntos de la aproximación, es necesario insertarlos en la página F-PLAN para que la aeronave siga esos puntos.

7.2 Inserción de los puntos en el plan de vuelo (F-PLN)

Gracias al proceso realizado en la sección anterior, la base de datos de la MCDU del avión ya contiene los nuevos puntos creados con el objetivo de poder llevar a cabo la aproximación. El siguiente paso es el de insertar estos puntos en la pantalla F-PLAN para ver como quedaría la trayectoria durante el vuelo.

Esta sección consta de 3 partes distintas. En la primera se insertarán todos los puntos a la pantalla F-PLAN, en la segunda se insertarán aquellas restricciones de altitud y velocidad para que la aproximación sea lo más semejante a la realidad posible. Finalmente, en la tercera parte, se le insertará una espera a derechas en el punto DANI para ver como quedaría en el Navigation Display.

Es importante remarcar que en la simulación solo se le dará importancia a la fase de aproximación, por lo que en las figuras de esta sección solo aparecerán aquellos puntos del F-PLAN que tengan relación con la aproximación.

- **Inserción de puntos en el F-PLN**

Ahora que ya se dispone de los waypoints en la base de datos, solo falta colocarlos en la pantalla F-PLN para que la aeronave siga la trayectoria de estos puntos. El resultado de la inserción de waypoints se puede observar en la figura 7.3.

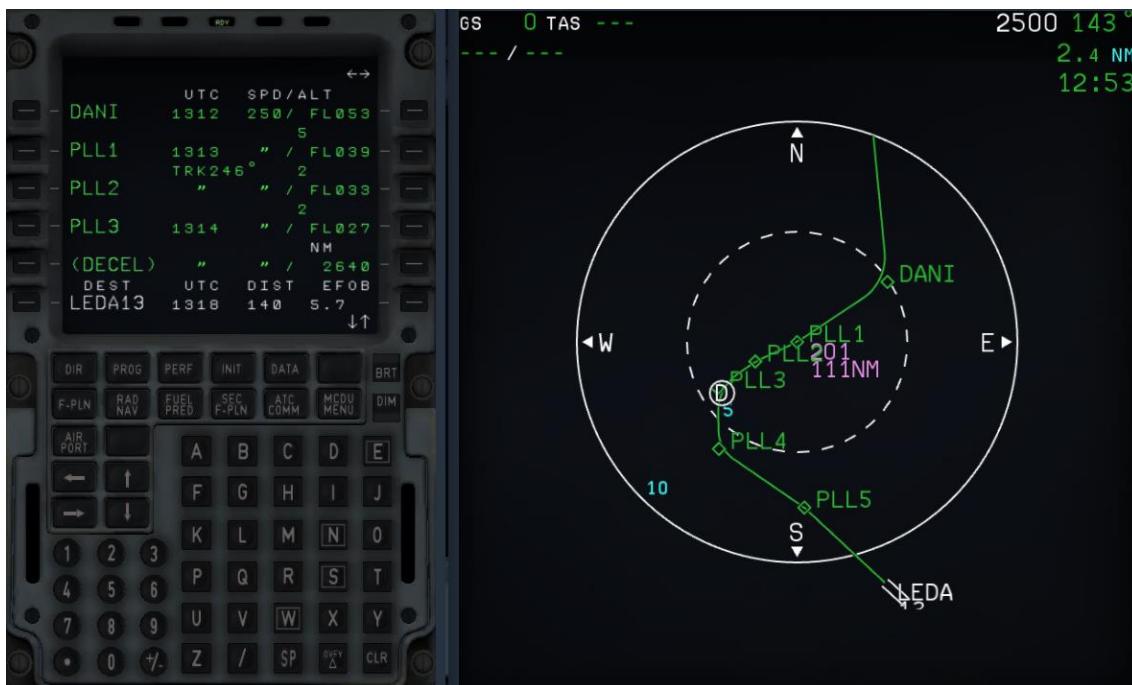


Figura 7.3. Puntos de aproximación en MCDU y trayectoria en el ND Airbus A320.

En la figura 7.3 no solo se pueden observar los diferentes puntos de la trayectoria en la pantalla F-PLN, sino que también se puede ver como quedaría la trayectoria en el Navigation Display. Si se compara la trayectoria que seguiría el avión en el Navigation Display, con la trayectoria diseñada en la carta de aproximación, se puede observar cómo hay un gran nivel de semejanza, por lo que por el momento se puede considerar como una aproximación fiel a la carta en cuanto a rumbos.

- **Inserción de restricciones en el F-PLN**

Tal y como se observa en la figura 7.3, las altitudes y velocidades que hay en los puntos de la ruta han sido calculadas de forma automática, de manera que no tiene en cuenta en ningún momento las restricciones dictadas en la carta de aproximación. Afortunadamente, y como se ha descrito en el capítulo 6, la pantalla F-PLN de la MCDU del Airbus permite crear estas restricciones.

Las dos únicas restricciones que aparecen en la carta del capítulo 5, son que en el punto DANI hay que estar a 8.000 pies sobre el terreno y a una velocidad máxima de 210 nudos, y que en el punto PLL5 la altitud debe ser de 2.650 pies para seguir la senda de 3 grados. En las figuras 7.4 y 7.5 se puede apreciar como quedaría ahora (una vez aplicadas las restricciones) la pantalla de F-PLN para los puntos DANI y PLL5.



Figura 7.4. Punto DANI con la restricción de altitud y velocidad. F-PLN A320.

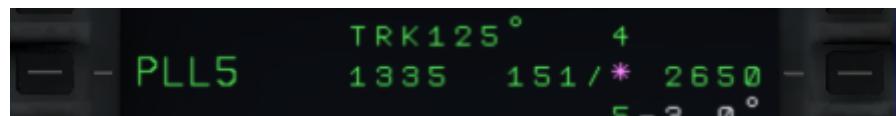


Figura 7.5. Punto PLL5 con la restricción de altitud. F-PLN A320.

- Inserción de la espera del punto DANI**

Una vez añadidos los puntos de ruta y las restricciones de altitud y velocidad, solo queda comprobar como quedaría la trayectoria de la aproximación si se le insertara la espera a derechas que hay publicada en la carta sobre el punto DANI. La inserción de esta espera se puede hacer también gracias a la pantalla F-PLAN. En la figura 7.6 se puede observar cómo quedaría la espera según el Navigation Display.



Figura 7.6. Trayectoria de aproximación con espera en el punto DANI. ND A320.

Es importante remarcar que durante la aproximación no se llevará a cabo la espera descrita ya que carece de importancia para el estudio de este TFG y supone un aumento en la duración de la aproximación.

7.3 Simulación del vuelo

La tercera sección de este capítulo consiste en el análisis de las diferentes altitudes, velocidades y rumbos que mantiene la aeronave en las distintas fases críticas de la aproximación.

Esta sección está dividida en aquellas etapas que tengan una cierta trascendencia e importancia con la aproximación. En la primera de ellas se insertará la información relacionada con el aeródromo y la aproximación en la página PERF, a fin de proporcionarle a la aeronave todos los datos necesarios. En la segunda etapa se analizará si la aeronave cumple con las restricciones de altitud y velocidad al empezar la aproximación (punto DANI). En la tercera etapa se revisa que la aeronave sigue la trayectoria deseada del “arco” DME con un ángulo de descenso no muy pronunciado ya que si así fuera, supondría un mal diseño de la aproximación. En la cuarta etapa se comprobará que la aeronave llega al FAF a la altitud requerida (2.650 pies) para llevar a cabo una senda de planeo final de 3 grados. Y finalmente, se analizará la desviación vertical que mantiene el avión durante su aproximación final desde la milla 5, a la milla 2 mediante la pantalla PROG.

Es importante remarcar, tal y como se ha indicado en la introducción de este capítulo, que en la siguiente referencia se puede observar la aproximación en formato vídeo para tener una perspectiva más visual [51].

Etapa 1. Inserción de datos del campo en la pantalla PERF del Airbus A320.

Los datos que se incorporan en esta pantalla sirven para proporcionarle a la aeronave toda aquella información relacionada con el aeródromo. Esta información es crucial ya que, gracias a ello, la aeronave podrá realizar una serie de cálculos de performance que ayudaran a una mejor aproximación. Por este mismo motivo, el primer paso antes de empezar con la aproximación en sí, es llenar todos los datos de la página PERF.

En el caso práctico de este TFG, los valores relacionados con la meteorología (QNH, temperatura y viento) se adquirieron del informe meteorológico del aeropuerto que había en ese momento. La otra información a insertar fue la de la altitud de transición (en el caso de Lérida, 6.000 pies) y la altitud de los mínimos, los cuales se sacaron de la carta de la de aproximación del capítulo 5 (concretamente los mínimos de la carta RNP LPV). Cabe destacar que en la pantalla PERF aparece el valor del mínimo como MDA, y no como DA, debido a que la base de datos de la MCDU no reconoce esta aproximación como una de precisión (no existe la aproximación como tal en la base de datos de la MCDU). Con todo ello, la pantalla de PERF de la página APPR queda tal y como se observa en la figura 7.7



Figura 7.7. Pantalla PERF para la aproximación RNP en la MCDU del A320 de la simulación.

Etapa 2. Inicio de la aproximación, punto DANI.

Una vez se han insertado los datos de la aproximación del campo y se conocen las diferentes velocidades que llevará el avión durante la aproximación, la siguiente etapa que hay que destacar es la del inicio de la aproximación en sí. El inicio de la aproximación empieza en el IAF llamado DANI, en el cual hay una restricción de velocidad y una de altitud a fin de cumplir una serie de requisitos de seguridad. Teniendo en cuenta que en la sección anterior ya se han gestionado las restricciones desde la pantalla F-PLN, no tendría que haber ningún problema para que la aeronave cumpla con los parámetros.



Figura 7.8. PFD y ND del A320 en punto IAF DANI de la simulación.

Tal y como se observa en la figura 7.8, cuando la aeronave llega al IAF DANI, esta se encuentra a una velocidad muy poco inferior a 210 nudos (lo cual es bueno ya que 210 nudos es el máximo), y a una altitud de 8.000 pies exactos. Por lo tanto, se puede concluir que, de momento, el avión respeta los parámetros establecidos en la carta de aproximación.

Etapa 3. Seguimiento del descenso durante el “arco” DME.

Teniendo en cuenta que no es posible crear un arco DME desde la MCDU del Airbus A320, se ha diseñado un punto complementario (PLL2) a fin de simular este arco de 12 millas de radio sobre el VOR de Lérida. En este pequeño apartado no solo se mirará que cumpla con la trayectoria deseada, sino que también se comprobará que el régimen de descenso sea el adecuado. El régimen de descenso es muy importante en aviación comercial tanto para la seguridad de la aproximación, como para la comodidad de los pasajeros. En la figura 7.9 se puede observar la actitud de la aeronave cuando esta se encuentra sobre el punto PLL2.



Figura 7.9. PFD y ND del A320 en punto PLL2 de la simulación.

Mediante la observación de la figura 7.9, se pueden extraer tres conclusiones positivas sobre la aproximación RNP que se está llevando a cabo. La primera de ellas es el hecho de que la aeronave sigue descendiendo a una velocidad de 210 nudos, eso es importante ya que el control de la velocidad es uno de los parámetros más importantes a la hora de realizar una aproximación. La segunda característica es el valor de régimen de descenso que está siguiendo la aeronave. El valor de este régimen de descenso en este tramo de la aproximación es de 1.600 pies por minuto, lo cual supone un descenso suave y controlado, y, por lo tanto, positivo para los resultados de la prueba de aproximación. El último parámetro a destacar no está tan relacionado con la aproximación en sí, sino en cómo se ha diseñado en la MCDU. Tal y como se observa en el cuadrado rojo de la derecha del todo de la figura 7.9, la aeronave sigue estando a 12 millas del VOR de Lérida, lo cual supone que cumple con la distancia del arco DME que va desde PLL1 hasta PLL3.

Etapa 4. Inicio del tramo de aproximación final. Punto PLL5.

Cuando la aeronave ya ha pasado por el punto DANI, ha realizado el arco DME (desde PLL1 hasta PLL3) y ha finalizado el tramo de aproximación intermedio (desde PLL4 hasta PLL5), esta no solo debe estar configurada para el aterrizaje (teniendo en cuenta que acaba de llegar al FAF), sino que también debe cumplir con la restricción de altitud para realizar el descenso progresivo de 3 grados de inclinación.

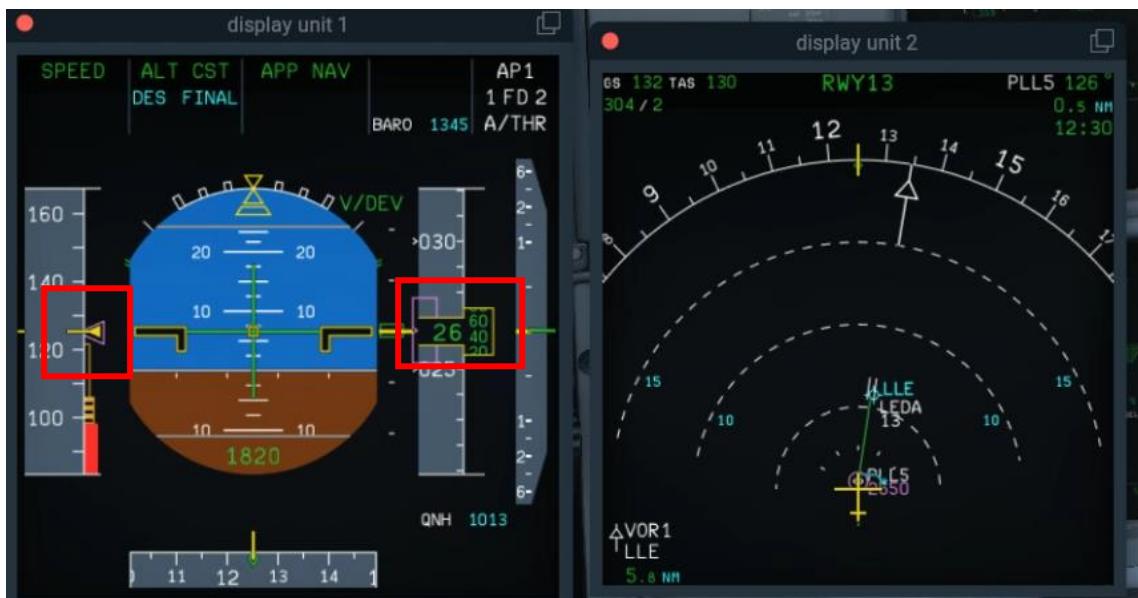


Figura 7.10. PFD y ND del A320 en punto FAF PLL5 de la simulación.

Tal y como se puede observar en la figura 7.10, cuando la aeronave llega al punto PLL5 (FAF), esta se encuentra a una altitud de 2.650 pies y a una velocidad de 126 nudos. El hecho de que cumpla con la altitud dictada en la carta no solo implica que la aeronave realizará el descenso tal y como se pretendía, sino que también implica que la aproximación está funcionando tal y como se había diseñado en todos sus parámetros. En cuanto a la velocidad, es importante destacar que la aeronave va a la misma velocidad que la que aparece en la figura 7.7 de la pantalla de PERF (VAPP 126), dando a entender que la aproximación se está llevando a cabo de manera correcta y sin errores.

Etapa 5. Análisis de la desviación vertical durante el tramo final de aproximación.

El último parámetro que hay que analizar para poder determinar la aproximación como un éxito, es la desviación vertical que sufre la aeronave respecto la senda de planeo ideal. Es importante analizar este valor ya que una de los beneficios principales que aportan las aproximaciones RNP es su precisión y fiabilidad, y si estos no se cumplen, la aproximación carece de sentido. En la figura 7.11 se pueden observar las diferentes altitudes ideales en función de la distancia en millas de la cabecera.

LEDA 31 DIST.	5.0	4.0	3.0	2.0
ALTITUDE	2650'	2470'	2160'	1840'

Figura 7.11. Altitudes ideales según distancia a la pista. Carta RNP Lérida pista 13.

Ahora que se conocen cuáles son las altitudes ideales en función de la distancia que hay respecto el umbral de la pista, lo siguiente es comparar estas altitudes con los valores de la simulación con la finalidad de determinar la precisión de la aeronave en esta aproximación.

- **Cuando la aeronave se encuentra a 5 millas de la pista:** La altitud ideal cuando la aeronave está a 5 millas es de 2.650 pies. En el caso de la simulación, esto se cumple perfectamente tal y como se muestra en las figuras 7.12 y 7.13.

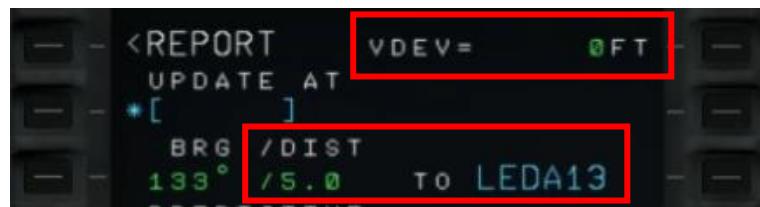


Figura 7.12 Pantalla PROG en la MCDU en la milla 5 de la simulación.



Figura 7.13 PFD del A320 en la milla 5 de la simulación.

- **Cuando la aeronave se encuentra a 4 millas de la pista:** La altitud ideal cuando la aeronave está a 4 millas es de 2.470 pies. En el caso de la simulación también se cumple exactamente tal y como se puede observar en las figuras 7.14 y 7.15 donde la desviación vertical es de 0 pies (VDEV = 0 FT).



Figura 7.14. Pantalla PROG en la MCDU en la milla 4 de la simulación.



Figura 7.15. PFD del A320 en la milla 4 de la simulación.

- Cuando la aeronave se encuentra a 3 millas de la pista:** La altitud ideal cuando la aeronave está a 3 millas es de 2.160 pies. En el caso de la simulación también se cumple exactamente tal y como se puede observar en las figuras 7.16 y 7.17 donde la desviación vertical es de 0 pies (VDEV = 0FT).

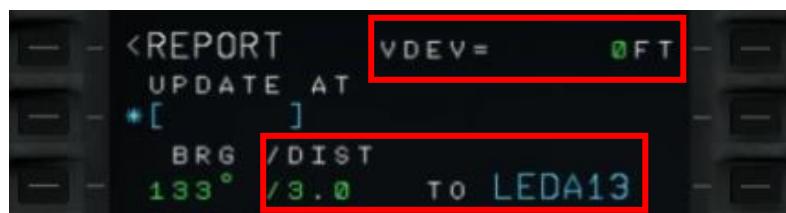


Figura 7.16. Pantalla PROG en la MCDU en la milla 3 de la simulación.



Figura 7.17. PFD del A320 en la milla 3 de la simulación.

- Cuando la aeronave se encuentra a 2 millas de la pista:** La altitud ideal cuando la aeronave está a 2 millas es de 1.840 pies. En el caso de la simulación también se cumple con este parámetro tal y como se puede observar en las figuras 7.18 y 7.19.



Figura 7.18 Pantalla PROG en la MCDU en la milla 2 de la simulación.



Figura 7.19. PFD del A320 en la milla 2 de la simulación.

7.4 Conclusiones del capítulo

Una vez analizadas todas las fases de la aproximación teniendo en cuenta la velocidad, el rumbo, y la altitud de la aeronave durante su trayectoria, se puede concluir que la aproximación RNP en la pista 13 de Lérida ha sido un éxito. Son muchos los parámetros que afectan a una buena aproximación, pero haciendo un vistazo general de los más importantes, se ha podido comprobar como la aeronave cumple con todas las restricciones en sus diferentes puntos respetando siempre regímenes de descenso y distancias de seguridad con el terreno u otros obstáculos. El único inconveniente que tiene la simulación respecto la carta de aproximación diseñada en el capítulo 5, es el hecho de no poder realizar un arco DME de manera correcta y profesional. Aun así, mediante el punto PLL2, se ha podido obtener una estimación de cómo quedaría este arco DME si se pudiera llevar a cabo en la realidad.

8 CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas mediante el desarrollo de este TFG. Con estas conclusiones se pretende llevar a cabo una reflexión sobre todos aquellos aspectos relacionados con la realización del trabajo, así como de los nuevos conceptos aprendidos.

Se ha dividido este capítulo en cuatro secciones que facilitaran la comprensión de todos los aspectos estudiados a lo largo del trabajo: conclusiones sobre los objetivos, conclusiones personales, posibles ampliaciones y mejoras del proyecto, y conclusiones en referencia a las desviaciones ocurridas respecto a la planificación realizada para el desarrollo de este trabajo en el capítulo 2.

8.1 Conclusiones sobre los objetivos

Mediante la realización de este TFG se pretendía alcanzar dos objetivos principales. El primero de ellos era profundizar en el concepto de la navegación PBN y de las aproximaciones RNP con la finalidad de usar esos conocimientos en la parte práctica del proyecto. El segundo objetivo consistía en diseñar una aproximación RNP en el aeropuerto de Lérida mediante una carta aeronáutica, para más adelante llevar cabo una simulación con un software con el fin de observar si la aproximación era viable y/o efectiva.

En cuanto al primer objetivo, se considera que se ha conseguido teniendo en cuenta la gran amplitud que tiene este concepto (PBN) dentro de la navegación aérea. La propia OACI diseñó un manual de más 300 páginas en los que se define toda la normativa, todos los procedimientos y todos los requisitos de este nuevo método de navegación. Considerando que aprender toda la información que aparece en este manual es algo difícil tanto por su extensión, como por el nivel técnico que se requiere, se ha optado por hacer hincapié en aquellos aspectos más generales que han hecho posible el entendimiento del concepto en sí.

Las aproximaciones RNP también formaban parte del estudio ya que estas son una de las ramas de la navegación PBN, y al igual que en el primer caso, también se ha preferido entender el concepto desde un punto de vista más general.

Son muchos los parámetros que juegan un papel importante dentro de las aproximaciones RNP como pueden ser el tipo de avión, la normativa concreta de un país, las infraestructuras de las que se dispone, las necesidades que se deben satisfacer, o la situación geográfica que haya en ese aeropuerto en concreto. Por todo ello, la conclusión general que se puede extraer del primer objetivo del trabajo, es que se ha podido comprender en qué se basa la navegación PBN y las aproximaciones RNP desde un punto de vista general, pero lo suficientemente técnico como para poder llevar a cabo el segundo objetivo con unas garantías de cumplimiento normativa y operacional, que es precisamente, lo que se buscaba en este primer apartado.

Tal y como se ha descrito al principio de esta sección, el segundo objetivo trataba de poder llevar a cabo el diseño de una aproximación RNP mediante una carta aeronáutica, para más adelante, realizar una simulación en el software de simulación de vuelo Xplane 11 [8], y de esta manera, comprobar si la carta podría aplicarse en una situación real. Teniendo en consideración todas las limitaciones que supone hacer posible este segundo objetivo, ya sea por tiempo, por exceso de información, por capacidad legal y tecnológica, etc, se puede concluir en que se ha cumplido el objetivo. En primer lugar, ha sido posible diseñar la carta de aproximación RNP teniendo en cuenta muchos parámetros como son el cumplimiento de las diferentes normativas, las necesidades del aeropuerto (mediante un estudio del estado del arte del mismo), y los recursos de los que dispone ese aeropuerto. En segundo lugar, también ha sido posible llevar a cabo la simulación la cual ha respetado en todo momento las diferentes restricciones (tanto de altitud como de velocidad) que había descritas en la carta. El único inconveniente que se le puede sacar a la simulación respecto a la carta de aproximación, es el hecho de no haber podido volar el arco DME que va del punto PLL1 al punto PLL3 de manera correcta y como se haría en la vida real. Desafortunadamente la MCDU del Airbus A320 no permite crear arcos DME cuando estos no se encuentran en su base de datos, por lo que este es el único obstáculo que hace que no se pueda realizar la comparación entre carta y simulador en su totalidad.

Mediante la realización de este TFG no solo ha sido posible cumplir los dos objetivos principales, sino que también ha sido posible cumplir aquellos objetivos secundarios como son conocer el estado actual del PBN en España, el estado actual del A320 en relación a la PBN u otros objetivos como el hecho de ampliar el conocimiento que se tiene sobre la navegación aérea en general.

8.2 Conclusiones personales

A nivel personal, la realización de este TFG me ha aportado una serie de conocimientos que considero muy útiles no solo para el grado que estoy estudiando, sino para el día a día. Actualmente estoy estudiando para obtener la licencia de piloto, por lo que observar cómo está avanzando la navegación aérea me resulta muy útil para comprender como evoluciona el transporte, y para mi formación como piloto. Es cierto que algunos de los conceptos teóricos plasmados en este TFG ya los había estudiado o aprendido anteriormente, pero el hecho de profundizar tanto en según qué aspectos ha hecho que aprenda más de lo que otra persona que también estudie gestión aeronáutica o bien que se esté formando como piloto podría aprender. Llevar a cabo este proyecto no solo me ha sido útil como estudiante de piloto, sino que también lo ha sido como estudiante de gestión aeronáutica.

Aunque la gestión aeronáutica engloba muchas ramas de conocimiento, como puede ser la logística, la economía o la tecnología, la navegación aérea también forma parte de una de ellas, lo que hace que considere la navegación aérea como una buena salida profesional en el futuro teniendo en cuenta esta tendencia al alza que suele mantener la industria aeronáutica.

8.3 Ampliaciones y mejoras del proyecto

Aunque los objetivos principales del trabajo de final de grado se hayan cumplido, siempre es posible llevar a cabo una profundización en el desarrollo del trabajo o una ampliación de la solución del problema que se trata resolver. Desde el punto de vista personal, se podría mejorar en cuanto a la obtención de más conocimiento con el fin de tener más experiencia en el sector que se está estudiando, pero desde el punto de vista del proyecto son más las ampliaciones o mejoras que se pueden realizar.

A lo largo del TFG se ha optado por diseñar e implementar una aproximación RNP no existente para solventar una serie de carencias que ocurrían en el aeropuerto de Lérida. Teniendo en cuenta que esta es la base del proyecto, la forma de desarrollar y ampliar este mismo proyecto podría ser mediante un estudio más exhaustivo de los factores que hay considerar para el diseño de la aproximación. Si bien es verdad que se han tenido en cuenta muchos parámetros, existe la posibilidad de que no se hayan implementado de la mejor forma posible, o que directamente haya otros que no se hayan tenido presentes (hay otros factores como los parámetros urbanísticos u otros conceptos que no se han tenido en cuenta).

Un ejemplo práctico en relación a este TFG ha sido el de crear un arco DME desde el norte del aeropuerto con el fin de que a la aeronave tenga suficiente tiempo para descender de forma segura y constante (ver sección 5.2). La cuestión aquí sería determinar si realmente el método propuesto en este trabajo, es el más óptimo, y en caso de que no lo sea, establecer otro que sea aún mejor. Otro ejemplo práctico aplicable a este proyecto para poder ampliarlo, es aprovechar la información aprendida con el objetivo de crear otra aproximación RNP, pero en este caso, para la pista contraria del aeropuerto, la pista 31. Estas ampliaciones o mejoras se pueden aplicar a todos los aspectos que han intervenido en la decisión de crear una aproximación desde el norte de Lérida haciendo así que quede un proyecto más completo.

La conclusión de esta sección es que muchas veces, y concretamente en este proyecto, es posible mejorar o ampliar el trabajo desarrollado siempre y cuando comporte beneficios.

8.4 Desviaciones de la planificación

Durante el desarrollo del TFG han ido surgiendo contratiempos que han ocasionado cambios en la planificación del tiempo, sobre todo en cuanto a fechas de inicio y fin de los diferentes capítulos. Afortunadamente, la estructura del contenido no ha cambiado de manera significativa a pesar de que haya habido dificultades en la búsqueda de información. El hecho de contar con muchas herramientas útiles como el propio internet, o el software de simulación aéreo, y el hecho de contar también con unos tutores que se han implicado mucho en su trabajo, ha hecho posible que la planificación no sufra grandes cambios. Aún y así, ha habido puntos que se han reestructurado ya que a medida que se ha avanzado en el proyecto, se ha considerado que había capítulos que se podían distribuir mejor de otra manera.

En la tabla 8.1 se puede comprobar qué tareas han sufrido cambios en cuanto a fechas respecto a la planificación inicial (coloreadas en rojo), y qué tareas han sufrido cambios en cuanto a su estructura (coloreadas en amarillo).

Nombre de la tarea	Duración	Comienzo	Fin
TFG	291 horas	13/10/2020	26/01/2021
1. Preparación informe previo	27 horas	13/10/2020	23/10/2020
1.1 Definir objetivos del trabajo	5 horas	13/10/2020	16/10/2020
1.2 Situación actual	7 horas	16/10/2020	19/10/2020
1.3 Estudio viabilidad del TFG	15 horas	19/10/2020	23/10/2020
2. Estudio del concepto PBN y RNP	49 horas	24/10/2020	24/11/2020
2.1 Profundizar en Navegación Aérea	10 horas	24/10/2020	30/10/2020
2.2 Navegación basada en prestaciones	22 horas	01/11/2020	15/11/2020
2.3 RNP y aproximaciones	17 horas	15/11/2020	24/11/2020
3. Estudio del Estado del Arte	39 horas	24/11/2020	06/12/2020
3.1 Estado del arte del aeropuerto de Lérida	10 horas	24/11/2020	27/11/2020
3.2 Estado del arte del PBN en España	20 horas	27/11/2020	04/12/2020
3.3 Estado del arte del RNP A320	9 horas	04/12/2020	06/12/2020
4. Diseño de la carta RNP	75 horas	06/12/2020	26/12/2020
4.1 Parte 1 de la carta	10 horas	06/12/2020	08/12/2020
4.2 Parte 2 de la carta	45 horas	08/12/2020	22/12/2020
4.3 Parte 3 de la carta	20 horas	22/12/2020	26/12/2020
5. Funcionamiento A320	25 horas	26/12/2020	31/12/2020
5.1 Pantallas de presentación	10 horas	26/12/2020	28/12/2020
5.2 Pantallas de la MCDU	15 horas	29/12/2020	31/12/2020
6. Simulación	16 horas	01/01/2021	11/01/2021
6.1 Creación de waypoints	3 horas	01/12/2020	03/01/2021
6.2 Inserción de los puntos en el plan de vuelo	3 horas	03/01/2021	07/01/2021
6.3 Simulación de vuelo	10 horas	07/01/2021	11/01/2021
7. Redacción Memoria	60 horas	11/01/2021	26/01/2021

Tabla 8.1. Duración y planificación real del TFG.

Con el fin de entender mejor en qué se basan estos cambios respecto a la planificación inicial (tabla 2.4 del capítulo 2) se realizará una descripción por cada tarea en el que se comentará que tiempos han variado, y que parte del contenido de cada tarea se ha modificado en caso de que eso haya ocurrido. Es importante tener en cuenta que el número de la tarea no corresponde al número del capítulo, ya que, por ejemplo, la tarea 1 corresponde al capítulo 2 del TFG y así sucesivamente.

- **Tarea 1:** En el segundo capítulo no ha habido cambios en cuanto a estructura del capítulo, pero sí que lo ha habido en cuanto a tiempo. La definición de los objetivos y la situación actual del problema han sufrido una disminución de tiempo ya que se tenía una idea clara de qué era lo que se pretendía mediante la realización de este TFG. El tiempo de desarrollo del estudio de viabilidad ha aumentado ya que la información necesaria para llevar a cabo este punto no ha sido fácil de encontrar.

- **Tarea 2:** En este caso también hubo una disminución en las horas de realización gracias a las diferentes fuentes de información que se han obtenido, ya sea mediante páginas web, o mediante documentos y ayudas facilitadas por el tutor en cuestión. La tarea más extensa en desarrollar ha sido la 2.2 (sección 3.2 en el TFG) por su gran amplitud, haciendo así que casi se hayan precisado las mismas horas que se habían previsto al principio del proyecto. Lo que sí ha aumentado de forma considerable, en comparación a lo planificado, es el número de días empleados para realizar el capítulo 3 completo. En un principio se había previsto hacerlo en 10 días, pero debido a diferentes imprevistos ajenos al desarrollo de este trabajo, la cifra ha pasado a ser de 30 días.
- **Tarea 3:** El estudio del estado del arte no ha sufrido cambios ni en cuanto a contenido, ni en cuanto duración en días. Lo que sí ha cambiado es el total de horas para su realización. El estado del arte del PBN en España ha sido la sección que más horas ha requerido ya que esta precisaba de una búsqueda de información más exhaustiva que la de las otras secciones de este capítulo.
- **Tarea 4:** Esta tarea ha supuesto un cambio tanto en estructura del contenido como en tiempo requerido. En un principio se había dividido el capítulo 5 en 3 secciones diferentes, pero teniendo en cuenta la información que se quería mostrar en este TFG, se optó por cambiar estas secciones por otras muy parecidas, pero que explican mejor los resultados de la creación de la carta. En cuanto a tiempo, la parte dos de la carta ha sido la que ha precisado de más tiempo en comparación con la parte 1 o 3 que no requerían de tanta investigación.
- **Tarea 5:** Al igual que en la tarea 4, la tarea 5 también ha variado en estructura y en tiempo. En un principio se quiso dividir en tres capítulos distintos en los que se iban a definir todos los dispositivos e instrumentos que posee el A320, incluso aquellos que no estuvieran estrictamente relacionados con la navegación. Al llegar a este punto, se tomó en consideración que distribuir el contenido de esa manera no era lo mejor teniendo en cuenta que hubiese supuesto un exceso de información. Es por ese motivo que al final solo se definieron los instrumentos y dispositivos que están estrictamente relacionadas con la creación y el seguimiento de la aeronave en la aproximación, lo cual trajo como consecuencia que el tiempo empleado en esta tarea fuera mucho menor del previsto.
- **Tarea 6:** En un principio, el capítulo 7 (tarea 6) constaba de 3 secciones en las que se analizaba la aproximación desde tres puntos de vista distintos ya que se consideró que de esta forma sería más fácil entender la simulación. Una vez llegados a este punto, se realizó una reestructuración del capítulo ya que se vio que con tan solo un punto de vista era más sencillo hacer el seguimiento de la situación de la aeronave. Otro factor que no se tuvo en cuenta a la hora de realizar la planificación inicial, fue la de explicar cómo crear e introducir los datos dentro de la MCDU, por lo que se crearon dos secciones nuevas (7.2 y 7.3) que permitieran exponer esa información. La duración de esta tarea se vio muy reducida ya que llegados a ese punto ya se tenía el conocimiento necesario para llevar a cabo el capítulo.

- **Tarea 7:** La redacción de la memoria es la única tarea que ha requerido más tiempo del planificado pasando de ser 40 horas, a 60. El hecho de exponer tanta información, y tratar de que sea entendible a cualquier nivel, ha ocasionado que se deban hacer muchas correcciones con el fin de que la redacción este cuidada, y que la información que aparezca sea veraz.

La conclusión general que se extrae de esta sección es la homogeneidad del trabajo en comparación a la planificación inicial, exceptuando las tareas 5 y 6 que sí que han cambiado bastante por las razones expuestas. Finalmente, y como se ha indicado anteriormente, las horas necesarias para completar el trabajo de final de grado se han visto reducidas gracias al acceso a la información, al conocimiento previo del tema que se estudia, y a la ayuda de los tutores de este TFG.



GLOSARIO

- **ABAS** Aircraft Based Augmentation System
- **ADF** Automatic Direction Finder
- **AIS** Aeronautical Information Services
- **ANS** Air Navigation System
- **APU** Auxiliar Power Unit
- **APV** Approach Procedure with Vertical Guidance
- **ARNP** Advanced Required Navigation Performance
- **ASDA** Accelerate Stop Distance Available
- **ATFM** Air Traffic Management
- **ATS** Air Traffic Services
- **CDI** Course Deviation Indicator
- **CNS** Communication Navigation Surveillance
- **DA** Decision Altitude
- **DANI** Nombre del IAF en honor al autor de este TFG
- **DME** Distance Measuring Equipment
- **EGNOS** European Geostationary Overlay Service
- **FAF** Final approach Fix
- **FDE** Fault Detection and Exclusion
- **FMGC** Flight Management Guidance Computer
- **FMS** Flight Management System
- **FRT** Fixed Radius Transition
- **FTE** Flight Technical Error
- **GBAS** Ground Based Augmentation System
- **GD** Ground Speed
- **GNSS** Global Navigation Satellite System
- **GS** Ground Speed
- **IAF** Initial Approach Fix
- **IF** Intermediate Fix
- **IFR** Instrumental Flight Rules
- **ILS** Instrumental Landing System
- **INS** Inertial Navigation System
- **IRU** Inertial Reference Unit
- **LDA** Landing Distance Available
- **LNAV** Lateral Navigation
- **LP** Localizer Performance
- **LPV** Localizer Performance with Vertical Guidance
- **LRNS** Long Range Navigation System
- **MAP** Missed Approach Point



- **MCDU** Multipurpose Control Display Unit
- **MDA** Minimum Descent Altitude
- **MET** Meteorology
- **MSAS** Multi-functional Satellite Augmentation System
- **NAV / FPA** Navigation / Flight Path Angle
- **ND** Navigation Display
- **NDB** Non-Directional Beacon
- **NPA** Non Precision Approach
- **NSE** Navigation System Error
- **OACI** Organización de Aviación Civil Internacional
- **PAPI** Precision Approach Path Indicator
- **PBN** Performance Based Navigation
- **PDE** Path Definition Error
- **PFD** Primary Flight Display
- **RAIM** Receiver Autonomous Integrity Monitoring
- **RF** Radio Fijo
- **RNAV** Random Area Navigation (también llamada Area Navigation)
- **RNP** Required Navigation Performance
- **RPM** Revolutions per minute
- **RVR** Runway Visual Range
- **SAR** Search and Rescue
- **SBAS** Satellite Based Augmentation System
- **SID** Standard Instrumental Departure
- **STAR** Standard Terminal Arrival Route
- **TAS** True Air Speed
- **TFG** Trabajo de final de grado
- **TMA** Terminal Manouvering Area
- **TODA** Take Off Distance Available
- **TORA** Take Off Runway Available
- **TSE** Total System Error
- **VFR** Visual Flight Rules
- **VNAV** Vertical Navigation
- **VOR** Very High Frequency Omnidirectional Range
- **WAAS** Wide Area Augmentation System

REFERENCIAS

- [1] Apuntes de técnicas de navegación y control del tráfico aéreo. Fundamentos de la navegación aérea, 2019. Enrique Reguilón. Consultado el día 27/10/2020.
- [2] Apuntes técnicas de navegación y control del tráfico aéreo. El sistema de navegación aérea, 2019, Enrique Reguilón. Consultado el día 27/10/2020.
- [3] Reglas de vuelo visual. IFIS. Consultado el día 27/10/2020.
<http://www.ais.aviacioncivil.gob.ec/ifis3/aip/ENR%201.2>
- [4] Reglas de vuelo instrumental. IFIS. Consultado el día 28/10/2020.
<http://www.ais.aviacioncivil.gob.ec/ifis3/aip/ENR%201.3>
- [5] Instrumentos de vuelo. Aeroplans Blaus. Consultado el día 28/10/2020.
<https://www.aeroplans-blaus.com/es/5-instrumentos-de-vuelo>
- [6] Area Navigation (RNAV)- Skybrary. Consultado el día 28/10/2020.
[https://www.skybrary.aero/index.php/Area_Navigation_\(RNAV\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Area_Navigation_(RNAV))
- [7] Performance-based Navigation Manual. ICAO Doc 9613. Consultado el día 28/10/2020.
<https://www.icao.int/SAM/Documents/2009/SAMIG3/PBN%20Manual%20-%20Doc%209613%20Final%205%2010%2008%20with%20bookmarks1.pdf>
- [8] Xplane 11. Simulador de vuelo. Derechos de copyright. Consultado el día 28/10/2020.
<https://www.x-plane.com/kb/x-plane-11-copyright/>
- [9] Apuntes de Operaciones Aeroportuarias 3. European Perfomance Based Operation Implementing Rule. Jordi Manzano. Consultado el día 07/11/2020.
- [10] Servicio de información aeronáutica AIP. Consultado el día 08/11/2020.
<https://ais.enaire.es/aip/>
- [11] Performance Based Navigation: RNP and RNP AR approaches. PDF. Matthias MAEDER. Consultado el día 08/11/2020.
https://safetyfirst.airbus.com/app/themes/mh_newsdesk/documents/archives/performance-based-navigation-rnp-and-rnp-ar-approaches.pdf
- [12] European Union Aviation Safety Agency. Consultado el día 08/11/2020.
<https://www.easa.europa.eu/>
- [13] Navigraph. FMS Data and Charts for Flight Simulation. Consultado el día 08/11/2020.
<https://navigraph.com/home>
- [14] Todo lo que debes saber sobre el VOR. Transponder1200. Consultado el día 18/11/2020.
<https://www.transponder1200.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-el-vor/>
- [15] El sistema DME. El vuelo de la Gran Avutarda. Consultado el día 20/11/2020.
<https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/02/el-sistema-dme.html>
- [16] Sistema de navegación inercial. Xataka Ciencia. Consultado el día 20/11/2020.
<https://www.xatakaciencia.com/sabias-que/que-es-un-sistema-de-navegacion-inalcial>

- [17] **Sistema global de navegación por satélite.** Wikipedia. Consultado el día 20/11/20.
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_global_de_navegaci%C3%B3n_por_sat%C3%A9lite
- [18] **Sistema Navstar GPS.** Apuntes para E.S Marina Civil. Universidad de Oviedo. Consultado el día 20/11/2020.
http://profesores.sanvalero.net/~arnadillo/Documentos/Apuntes/Radiofrecuencia/Varios/Sistema_GPS.pdf
- [19] **Qué es el sistema de posicionamiento GLONASS.** AristaSur. Consultado el día 20/11/2020. <https://www.aristasur.com/contenido/que-es-el-sistema-de-posicionamiento-glonass#:~:text=Un%20Sistema%20Global%20de%20Navegaci%C3%B3n,en%20tierra%2C%20mar%20o%20aire>.
- [20] **Clarificando los conceptos ABAS SBAS Y GBAS. El vuelo de la Gran Avutarda.** Consultado el día 20/11/2020. <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2018/03/clarificando-los-conceptos-abas-sbas-y.html>
- [21] **Sistema global de navegación por satélite.** Wikipedia. Consultado el día 20/11/2020.
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_global_de_navegaci%C3%B3n_por_sat%C3%A9lite
- [22] **PBN & Airspace Concepts. ICAO PBN Seminar Introduction to PBN.** Consultado el día 23/11/2020.
<https://www.icao.int/safety/pbn/Seminar%20Material/Montreal,%20Canada%2013-15%20June%202007/C.1.pdf>
- [23] **Nav. specifications. ICAO Uniting Aviation.** Consultado el día 23/11/2020.
https://www.icao.int/publications/journalsreports/2019/7401_en.pdf
- [24] **Chapter 6 Performance-based navigation.** Consultado el día 24/11/2020.
<https://www.casa.gov.au/book-page/chapter-6-performance-based-navigation>
- [25] **8400.12A- Required Navigation Performance 10 (RNP-10) Operational Approval**
Consultado el día 25/11/2020.
https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/11889
- [26] **Las aplicaciones de la PBN. Hispaviación.** Consultado el día 25/11/2020.
<http://www.hispaviacion.es/las-aplicaciones-de-la-pbn/>
- [27] **Subpart B – Performance-based navigation operations.** SKYbrary. Consultado el día 25/11/2020. <https://skybrary.aero/bookshelf/books/2117.pdf>
- [28] **Concepto Operacional PBN e Implementación en México.** ICAO. Consultado el día 24/11/2020. <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2013/CANSOPBN/PBN-P08.pdf>
- [29] **Instrumental Approach Procedure (IAP).** SKYbrary. Consultado el día 25/11/2020.
[https://www.skybrary.aero/index.php/Instrument_Approach_Procedure_\(IAP\)#:~:text=A%20series%20of%20predetermined%20manoeuvres,not%20completed%2C%20to%20a%20position](https://www.skybrary.aero/index.php/Instrument_Approach_Procedure_(IAP)#:~:text=A%20series%20of%20predetermined%20manoeuvres,not%20completed%2C%20to%20a%20position)

[30] Section 4. Arrival procedures. FAA. Consultado el día 25/11/2020.

https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap5_section_4.html#:~:text=Section%204.,Arrival%20Procedures&text=A%20STAR%20is%20an%20ATC,route%20and%20instrument%20approach%20procedures.

[31] Fases de una aproximación por instrumentos. AeroWiki. Consultado el día 25/11/2020.

<http://aerowiki-info.blogspot.com/2014/04/fases-de-una-aproximacion-por.html>

[32] Aproximaciones RNP (RNP APCH) y sus variantes. El vuelo de la Gran Avutarda.

Consultado el día 25/11/2020.

<https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/03/aproximaciones-rnp-rnp-apch-y-sus.html>

[33] PANS OPS. Volúmen 1. OACI. Consultado el día 25/11/2020.

http://www.chcheli.com/sites/default/files/icao_doc_8168_vol_1.pdf

[34] Aproximaciones RNP BARO.VNAV (LNAV/VNAV). ICAO. Consultado el día 25/11/2020.

[https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/PBNSIP/Mod-8%20Aproximaciones%20RNP%20Baro-Vnav%20\(LNAV-VNAV\).pdf](https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/PBNSIP/Mod-8%20Aproximaciones%20RNP%20Baro-Vnav%20(LNAV-VNAV).pdf)

[35] Advisory Circular for Air Operators. COSCAP. Consultado el día 26/11/2020.

[http://coscapsa.org/ACs/AC\(SA\)-001.pdf](http://coscapsa.org/ACs/AC(SA)-001.pdf)

[36] Aeropuerto de Lleida-Alguaire. WikiArquitectura. Consultado el día 30/11/2020.

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/aeropuerto-lleida-alguaire/>

[37] Alguaire. Wikipedia. Consultado el día 30/11/2020.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Alguaire>

[38] El aeropuerto de Lleida cambia de estrategia para alzar el vuelo. La Vanguardia.

Consultado el día 30/11/2020.

<https://www.lavanguardia.com/local/lleida/20200210/473297499324/aeropuerto-lleida-alguaire-poligono-industrial-aeronautica-diez-anos.html>

[39] Ficha del aeropuerto de Lérida. Enaire. Consultado el día 30/11/2020.

<https://www.aterriiza.org/lleidaalguaire-leda/>

[40] Distancias declaradas de pista. Take Off Briefing. Consultado el día 30/11/2020.

<https://www.takeoffbriefing.com/distancias-declaradas-de-pista-pista-compensada-toda-tora-asda-stopway-clearway/>

[41] Política y Marco Estratégico de Referencia para la Implantación en España de la “Navegación Basada en las Prestaciones (PBN). Gobierno de España. Consultado el día 03/12/2020. <https://www.mitma.gob.es/aviacion-civil/estrategia-de-navegacion-aerea/politica-y-marco-estrategico-pbn>

[42] ¿Cómo se divide y organiza el espacio aéreo? ControladoresAéreos.org. Consultado el día 04/12/2020. <http://www.controladoresaereos.org/2016/05/25/como-se-divide-y-organiza-el-espacio-aereo-firctrmaatzcta-video/>

[43] The European Space Agency. ESA. Consultado el día 05/12/2020. <https://www.esa.int/>

[44] EGNOS Future and Evolutions. ESA. Consultado el día 05/12/2020.

[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Future_and_Evolutions#:~:text=The%20European%20Commission%20\(EC\)%20intends,users%20until%20at%20least%202030.&text=A%20technical%20assessment%20of%20the,the%20European%20GNSS%20Evolution%20Programme.](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Future_and_Evolutions#:~:text=The%20European%20Commission%20(EC)%20intends,users%20until%20at%20least%202030.&text=A%20technical%20assessment%20of%20the,the%20European%20GNSS%20Evolution%20Programme.)

[45] Procedures FCOM RNP. Airbus A319/320/321-. Consultado el dia 13/12/2020.

https://www.icao.int/WACAF/Documents/Meetings/2014/OPS-Approval/15%20October%202014/09%20-%20Aircraft%20Documents/PDF_N_FCOM_20140923_PRO_SPO.pdf

[46] Manual de operaciones parte B. Air Europa A330. Consultado el día 14/12/2020.

[47] A320 Normal Procedures. The airline pilots. Consultado el día 14/12/2020.
<https://www.theairlinepilots.com/forumarchive/a320/a320-normal-procedures.pdf>

[48] La altimetría nuestra de cada día. Esteban Mendoza. Consultado el día 19/12/2020.

<http://www.apha.com.ar/admin/docs/8633-La%20altimetria%20nuestra%20de%20cada%20dia.pdf>

[49] Aircraft Approach Category. Wikipedia. Consultado el día 20/12/2020.

https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_approach_category#:~:text=The%20categories%20are%20as%20follows,Between%20121%20and%20140%20knots.

[50] Primary Flight Display Symbols. A320 Displays and Panels. Consultado el día 23/12/2020.
http://www.a320dp.com/A320_DP/flight-instruments/sys-8.3.35.html

[51] Video de la aproximación RNP de Lérida para la pista 13.

https://www.youtube.com/watch?v=c3FSCkymuGw&feature=youtu.be&ab_channel=SYAL