



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: Impacto de la Inteligencia Artificial en el control del tráfico aéreo: optimización, eficiencia y seguridad en la navegación aérea

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas Aeroespaciales

AUTOR: Felip Julià Cid

DIRECTOR: José Antonio Castán Ponz

DATA: 8 de febrero del 2024

Resumen

La gestión del tráfico aéreo se trata de una labor sumamente compleja, agravada por la creciente demanda de tráfico. Al analizar la evolución histórica, se evidencia que esta tendencia se mantendrá en los próximos años.

Esta saturación creciente del espacio aéreo no solo supone riesgos para la seguridad en la navegación aérea, sino que también impide mantener un nivel de eficiencia óptimo. Esta problemática se refleja claramente en el aumento de los minutos de demora en los vuelos debido a la incapacidad de gestionar simultáneamente todo el tráfico aéreo. Dado que la cantidad de demora está vinculada al crecimiento constante de la demanda de tráfico aéreo, resulta crucial buscar nuevas herramientas y soluciones para enfrentar este desafío.

Por este motivo, el objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis del impacto que la Inteligencia Artificial (IA) podría tener aprovechando todo su potencial. Se comienza explicando cómo trabajan actualmente los expertos en la gestión del tráfico aéreo para luego proponer un escenario innovador con la aplicación de la IA.

Específicamente, se lleva a cabo un estudio sobre cómo la IA podría mejorar la volatilidad presente en las previsiones de demanda de tráfico. Se exploran opciones para reducir esta volatilidad, buscando obtener previsiones más precisas. Este enfoque no solo contribuiría a disminuir los minutos de demora, sino que también mejoraría la eficiencia y seguridad en la gestión del espacio aéreo.

Para realizar el estudio, se han empleado datos extraídos de NEST, un programa de Eurocontrol. También se han aprovechado los conocimientos e ideas obtenidas en mi estancia de prácticas curriculares a ENAIRE. Al analizar a fondo esta información, se ha podido profundizar en el problema actual de las previsiones de tráfico y destacar los principales factores que lo generan. El estudio se ha centrado principalmente en el Área de Control (CTA) de Barcelona, con el objetivo de obtener resultados más afinados que puedan luego extrapolarse a otros volúmenes del espacio aéreo.

Los resultados obtenidos son propuestas de implementación de la IA en el control de tráfico aéreo, como solución al desafío de la volatilidad. En este sentido, el trabajo futuro podría centrarse en la creación de algoritmos inteligentes en base a lo explicado durante este trabajo.

Title: Impact of Artificial Intelligence on Air Traffic Control: Optimization, Efficiency and Safety in Air Navigation

Author: Felip Julià Cid

Director: José Antonio Castán Ponz

Date: February 8th, 2024

Overview

Air traffic management is an extremely complex task, exacerbated by the growing demand for air traffic. Analyzing historical trends indicates that this pattern will persist in the coming years.

The escalating saturation of airspace not only poses risks to air navigation safety but also hinders the maintenance of an optimal efficiency level. This issue is clearly reflected in the increasing flight delay minutes due to the inability to simultaneously handle all air traffic. Given that the quantity of delay minutes is linked to the constant growth in demand for air traffic, it is crucial to explore new tools and solutions to address this challenge.

Therefore, the primary objective of this work is to conduct an analysis of the positive impact that Artificial Intelligence (AI) could have, leveraging its full potential. The exploration begins by explaining the current working methods of air traffic management experts, followed by proposing an innovative scenario with the application of AI.

Specifically, a study is conducted on how AI could mitigate the existing volatility in traffic demand forecasts. Various options are explored to reduce this volatility, aiming to achieve more accurate predictions. This approach not only contributes to reducing delay minutes but also enhances efficiency and safety in airspace management.

To conduct this study, data from NEST, a Eurocontrol program, has been utilized. Additionally, insights and ideas obtained during my internship at ENAIRE have been leveraged. In-depth analysis of this information has allowed a deeper understanding of the current traffic forecast problem and highlighted the key factors contributing to it. The study has specifically focused on the Control Area (CTA) of Barcelona, with the aim of obtaining more refined results that can later be extrapolated to other airspace volumes.

The results obtained propose the implementation of AI in air traffic control as a solution to the challenge of volatility. In this regard, future work could focus on creating intelligent algorithms in the areas explained during the study.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ESTRUCTURA Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS... 3	
1.1 Estructura del trabajo.....	3
1.2. Metodología de análisis seguida.....	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO..... 5	
2.1 Organizaciones clave en la Navegación Aérea: Eurocontrol, EASA, OACI, CE y el papel de ENAIRE en España.....	5
2.2. Evolución del tráfico aéreo en España.....	7
2.3. Implementación de la Inteligencia Artificial (IA).....	10
2.3.1. Concepto.....	10
2.3.2. Prestaciones y aplicaciones.....	10
2.3.3. Posibles beneficios en el sector de ATM.....	14
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL ESCENARIO ACTUAL: Gestión del tráfico y del espacio aéreo..... 15	
3.1 Organización de los Servicios de Navegación Aérea (ANS).....	15
3.1.1. Gestión del tráfico aéreo (ATM).....	15
3.1.2. Comunicaciones aeronáuticas, navegación aérea y vigilancia (CNS).....	21
3.1.3. Servicio de meteorología (MET).....	24
3.1.4. Servicio de información aeronáutica (AIS).....	25
3.1.5. Búsqueda y Salvamento Aéreo (SAR).....	25
3.2. Organización del espacio aéreo.....	26
3.2.1 Estructura del espacio aéreo nacional.....	26
3.2.2. Operatividad en el espacio aéreo nacional.....	31
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL ESCENARIO PROPUESTO: Aplicación de la Inteligencia Artificial (IA)..... 37	
4.1 Principal desafío en el ATC.....	37
4.1.1. Contexto del desafío.....	37
4.1.2. Consecuencias derivadas.....	39
4.2. Oportunidades de mejora a través de la IA.....	41
4.2.1. Previsiones meteorológicas.....	41
4.2.2. Impacto del viento en la velocidad de vuelo.....	43
4.2.3. Patrón de rutas desviadas o recortadas.....	48
4.2.4 Coordinación entre aerolíneas y Servicios de tráfico aéreo (ATS)...	51

CAPÍTULO 5. DESAFÍOS Y LIMITACIONES.....	53
5.1 Desafíos actuales.....	53
5.2. Limitaciones existentes.....	55
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	57
REFERENCIAS.....	59

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

EASA	Agencia europea de seguridad aérea (European Agency Safety Aviation)
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
CE	Comisión Europea
UE	Unión Europea
ACC	Centro de control de área (Area Control Center)
ATC	Control de tráfico aéreo (Air Traffic Control)
REDAN	Red de Datos de Navegación Aérea
IA	Inteligencia Artificial
RNA	Red Neuronal Artificial
NLP	Procesamiento del lenguaje natural (Natural Language Processing)
GPS	Sistema de posicionamiento global (Global Positioning System)
ATM	Gestión del tráfico aéreo (Air Traffic Management)
ANS	Servicios de navegación aérea (Air Navigation Services)
CNS	Comunicaciones, navegación y vigilancia (Communications, Navigation, and Surveillance)
MET	Servicio de Meteorología
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AIS	Servicio de información aeronáutica (Aeronautical Information Service)
SAR	Búsqueda y salvamento aéreo (Search and Rescue)
ATS	Servicios de tráfico aéreo (Air Traffic Services)
ASM	Gestión del espacio aéreo (Airspace Management)
ATFCM	Gestión del flujo y la capacidad de tráfico aéreo (Air Traffic Flow and Capacity Management)
TWR	Control de torre (Tower)
APP	Control de aproximación (Approach Control)
LOA	Carta de autorización (Letter of Authorization)
FIS	Información de vuelo (Flight Information Service)
VHF	Frecuencia muy alta (Very High Frequency)
HF	Frecuencia alta (High Frequency)

ATIS	Servicio automático de información de terminal (Automatic Terminal Information Service)
FUA	Uso flexible del espacio aéreo (Flexible Use of Airspace)
CPDLC	Comunicaciones por enlace de datos controlador-piloto (Controller-Pilot Data Link Communications)
ACARS	Sistema de notificación y direccionamiento de comunicaciones de aeronaves (Aircraft Communications Addressing and Reporting System)
VOR	Rango omnidireccional VHF (VHF Omnidirectional Range)
NDB	Baliza no direccional (Non-Directional Beacon)
DME	Equipo medidor de distancia (Distance Measuring Equipment)
HSI	Indicador de situación horizontal (Horizontal Situation Indicator)
GLONASS	Sistema global de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System)
SBAS	Sistema de aumentación basado en satélites (Satellite-Based Augmentation System)
ADS-B	Sistema de vigilancia dependiente automática (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast)
IAIP	Paquete de información aeronáutica integrada (Integrated Aeronautical Information Package)
AIC	Circulares de información aeronáutica (Aeronautical Information Circular)
NOTAM	Aviso a navegantes (Notice to Airmen)
PIB	Boletín de información previa al vuelo (Pre-Flight Information Bulletin)
FIR	Región de información de vuelo (Flight Information Region)
UIR	Región de información superior (Upper Information Region)
CTA	Área de control (Terminal Control Area)
TMA	Área de control terminal (Terminal Maneuvering Area)
ATZ	Zona de tráfico del aeródromo (Aerodrome Traffic Zone)
CTR	Zona de control (Control Zone)
OCA	Área de control oceánica (Obstacle Clearance Altitude)
FIZ	Zona de información de vuelo (Flight Information Zone)
IFR	Reglas de vuelo instrumental (Instrument Flight Rules)
VFR	Reglas de vuelo visual (Visual Flight Rules)
AWY	Aerovías (Airway)

FL	Nivel de vuelo (Flight Level)
NM	Millas náuticas (Nautical Miles)
AIP	Publicación de información aeronáutica (Aeronautical Information Publication)
SFC	Superficie (Surface)
UNL	Ilimitado (Unlimited)
Km	Kilómetro
NEST	Herramienta estratégica de red (Network Strategic Tool)
AIRAC	Regulación y control de la información aeronáutica (Aeronautical Information Regulation And Control)
NMIR	Informe interactivo del gestor de red (Network Manager Interactive Reporting)
CHMI	Interfaz de colaboración hombre-máquina (Collaboration Human Machine Interface)
NASA	Administración nacional de aeronáutica y del espacio (National Aeronautics and Space Administration)
DRF	Tejido de datos y razonamiento (Data & Reasoning Fabric)
GO1	Girom Okabi 1
GO2	Girom Okabi 2
GO3	Girom Okabi 3
GOI	Girom Okabi Integrado
LVS	Levante Sur
LVU	Levante Alto
BKW	Bloque Whisky
BKE	Bloque Eco
CCC	Central Compuesto
CCL	Central Bajo

LISTA FIGURAS

Fig. 2.1 Entidades coordinadoras y reguladoras del tráfico aéreo.....	6
Fig. 2.2 Direcciones regionales y sus respectivos ACC.....	6
Fig. 2.3 Ubicación distintos tipos de servicio de ENAIRE.....	7
Fig. 2.4 Evolución histórica del tráfico aéreo en España.....	8
Fig. 2.6 Evolución anual del tráfico aéreo gestionado por ENAIRE.....	9
Fig. 2.7 Estructura general de una red neuronal.....	11
Fig. 2.8 Principales prestaciones y aplicaciones de la IA.....	13
Fig. 3.1 Estructura jerárquica de los Servicios de Navegación Aérea (ANS)....	15
Fig. 3.2 Separación entre aviones en el aeropuerto de Barcelona.....	17
Fig. 3.3 Organización del Control de Tráfico Aéreo (ATC).....	19
Fig. 3.4 Horizonte temporal de la gestión del tráfico aéreo.....	21
Fig. 3.5 Arquitectura de los sistemas de comunicación.....	22
Fig. 3.6 Arquitectura de los sistemas de navegación.....	23
Fig. 3.7 Arquitectura de los sistemas de vigilancia.....	24
Fig. 3.8 Estructura del espacio aéreo.....	26
Fig. 3.9 Divisiones FIR/UIR de Europa.....	27
Fig. 3.10 TMA de España.....	28
Fig. 3.11 OCAs en el Atlántico Norte.....	29
Fig. 3.12 Aerovías nivel inferior península.....	30
Fig. 3.13 Sectores del espacio aéreo español.....	31
Fig. 3.14 Sectores del CTA de Barcelona.....	32
Fig. 3.15 Sectorizaciones 23/08/2023 en Ruta Oeste.....	33
Fig. 3.16 Demanda 23/08/2023 en Ruta Oeste.....	34
Fig. 3.17 Tráfico en evolución 23/08/2023 por los Gos.....	35
Fig. 3.18 Tráfico en sobrevuelo 23/08/2023 por los Gos.....	35
Fig. 3.19 Sectores del TMA de Barcelona.....	36
Fig. 4.1 Gráfica de ocupación por minuto en la CHMI.....	37
Fig. 4.2 Ocupación por minuto GO2 el 10/06/2023.....	38
Fig. 4.3 Demanda horaria GO2 el 10/06/2023.....	39
Fig. 4.4 Motivo de las regulaciones canceladas durante 2023.....	40
Fig. 4.5 Demora generada en el CTA de Barcelona durante 2023.....	40

Fig. 4.6 Regulaciones en el CTA de Barcelona por meteorología.....	42
Fig. 4.7 Regulaciones en el CTA de Barcelona por meteorología.....	42
Fig. 4.8 Corrientes “Jet stream”.....	43
Fig. 4.9 Vuelos con ruta KLAX-LEBL.....	44
Fig. 4.10 Vuelos con ruta LEBL-KLAX.....	45
Fig. 4.11 Previsión “jet stream” del 19/03/2023.....	46
Fig. 4.12 Vuelos con ruta EGGP-LEMG.....	46
Fig. 4.13 Vuelos con ruta LEMG-EGGP.....	47
Fig. 4.14 Vuelos no previstos que atravesaran el sector CCL.....	49
Fig. 4.15 Vuelos recortados que evitaron el sector LVU.....	49
Fig. 4.16 Vuelos recortados que evitaron el sector LVS.....	50
Fig. 5.1 Escenario futuro del proyecto DRF.....	54

INTRODUCCIÓN

Nos encontramos en un mundo donde el transporte aéreo está creciendo constantemente. Se trata de algo esencial en la vida de millones de personas alrededor del mundo y que, sin ello, transformaría su vida cotidiana.

Aunque muchas veces no nos paremos a pensarlo, el trabajo detrás de cada operación aérea es enorme, necesita pasar por muchos procesos, con la ayuda de gente cualificada y tecnología puntera. Por eso, un ligero aumento en el tráfico aéreo respecto al año anterior puede parecer insignificante, pero en realidad representa un incremento considerable en la carga laboral para aquellos que hacen posible el vuelo.

Gestionar todos estos vuelos en el espacio aéreo es una tarea fundamental. La parte del control de tráfico aéreo, comienza cuando la aeronave está lista para despegar y enciende sus motores, y finaliza al completar el aterrizaje.

Es un trabajo muy complejo, donde los controladores aéreos realizan un papel esencial. La parte más ardua es que hay que cumplir con la demanda de tráfico prevista, independientemente de su magnitud. Con el mismo espacio aéreo, deben conseguir controlar un número mayor de operaciones conforme pasan los años. El desafío consiste en garantizar eficiencia y seguridad en un espacio más congestionado, es decir, conseguir un flujo rápido y seguro de aviones de manera optimizada.

Para enfrentarse a este reto se requiere cada vez de más ayuda tecnológica, ya que cumplir con una demanda tan alta se convierte en una tarea muy difícil. Una de las ramas tecnológicas que cada vez coge más fuerza y se está empezando a implementar, es el uso de la Inteligencia Artificial, la cual apunta a convertirse en indispensable.

Es, en el siguiente paso de este desafío, donde empieza este trabajo. Su principal objetivo va a ser analizar como la IA podría influir en un futuro cercano, tanto para ayudar a que sea posible digerir el incremento de tráfico año tras año como para mejorar las herramientas, eficiencia y seguridad aérea actual. También se verá en que proyectos se está trabajando actualmente para intentar introducir la IA en el control del tráfico aéreo.

En cuanto a la motivación para realizar este trabajo, nace de haber estado haciendo prácticas en el Centro de Control Aéreo de Barcelona, a ENAIRE, realizando un análisis post operacional de los últimos años. Ver desde dentro la complejidad de gestionar el tráfico aéreo me ha llevado a ver que, muy probablemente, en las siguientes décadas la IA desempeñe un papel imprescindible en este sector.

CAPÍTULO 1. ESTRUCTURA Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

1.1 Estructura del trabajo

La estructura que sigue el trabajo es la siguiente:

- El capítulo 2 es dividido en tres puntos, donde se explica, en términos generales, las organizaciones más importantes en la navegación aérea, la evolución del tráfico aéreo en España, y en que consiste la Inteligencia Artificial y sus aplicaciones más importantes.
- El capítulo 3 está organizado en dos grandes apartados; en el primero se explican todos los servicios que hacen posible la navegación aérea y como estos trabajan, y en el segundo como se organiza el espacio aéreo, tanto por su estructura como por su operabilidad.
- El capítulo 4, puede ser considerado el más relevante del trabajo. Se habla del principal desafío que tienen en la Gestión del Tráfico Aéreo (ATM) y se ofrecen propuestas para solucionarlo mediante la aplicación de la Inteligencia Artificial, tratando de mejorar, a su vez, la eficiencia y seguridad aérea.
- En el capítulo 5 se detallan los proyectos más destacados en los que actualmente se está trabajando, donde se emplea la Inteligencia Artificial para obtener mejoras en el control de tráfico aéreo. También se explican cuáles son las limitaciones existentes. Por último, en el capítulo 6 se pueden encontrar las conclusiones extraídas del trabajo y su continuación de cara a futuro.

1.2. Metodología de análisis seguida

Mi estancia en ENAIRE me ha servido para aprender mucho en el ámbito del control de tráfico aéreo, lo que me ha permitido desarrollar y explicar conceptos con más detalle durante el trabajo. Además, se me ha dado la oportunidad de utilizar datos con los que trabajaba, provenientes de Eurocontrol. Con ellos intento demostrar la situación en la que se encuentran los controladores aéreos actualmente y también justificar la razón por la que he hecho este trabajo.

Estos datos contienen muchísima información sobre el tráfico de los últimos años y sobre cómo fueron gestionados. Se trata, por un lado, de los AIRAC (un procedimiento estándar asociado de publicación de información aeronáutica), que a partir de NEST se puede exportar todo tipo de información a Excel, y, por otro lado, información adicional extraída de NMIR.

Con esta información, durante las prácticas de empresa he estado realizando un análisis post-operacional a través del programa Power BI de Microsoft. Esto me ha permitido ver cómo hay situaciones y puntos en la gestión del tráfico aéreo poco eficientes, los cuales podrían ser transformados o mejorados a partir de una tecnología tan potente como es la Inteligencia Artificial. Así que, con esta herramienta visual creada, otras adaptaciones hechas y la explotación de NEST, se ha realizado este trabajo.

Considero importante recalcar que cualquier afirmación no justificada durante el trabajo es debido a conocimientos obtenidos durante mi periodo de prácticas a ENAIRE.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Organizaciones clave en la Navegación Aérea: Eurocontrol, EASA, OACI, CE y el papel de ENAIRE en España

El espacio aéreo es una red compleja que conecta múltiples países y regiones con el propósito de gestionar de forma eficiente el tráfico aéreo a nivel mundial. En el contexto europeo, Eurocontrol emerge como un actor fundamental; se encarga de coordinar y gestionar el tráfico aéreo, facilitando la cooperación entre los Estados miembro y estableciendo estándares y metodologías uniformes para garantizar un sistema fluido y seguro.

Por otro lado, EASA (Agencia Europea de Seguridad Aérea) desempeña un rol diferenciado. Se enfoca en promover los niveles más elevados de seguridad y de protección del medio ambiente en la aviación civil en Europa. [4] Es responsable del establecimiento de normas legalmente vinculantes para la certificación de aeronavegabilidad, las operaciones de vuelo, la expedición de licencias a las tripulaciones, la gestión del tránsito aéreo, entre otros aspectos fundamentales.

También aparece el papel de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), cuya misión es fomentar un sistema de aviación civil global que opere de manera continua y homogénea, con la máxima eficiencia y en condiciones óptimas de seguridad, protección y sostenibilidad [4].

Y, por último, también interviene la Comisión Europea (CE), que supervisa y propone nuevas políticas buscando estandarización de prácticas entre los países miembros de la UE.

Aparte, a nivel nacional, cada país cuenta en la mayoría de los casos con un organismo gubernamental con la finalidad de proveer los servicios de navegación aérea. Este se encarga de supervisar y gestionar el movimiento seguro y eficiente de las aeronaves en el espacio aéreo y en los aeropuertos. Su objetivo es prevenir colisiones y garantizar un flujo ordenado de vuelos. Los controladores de tráfico aéreo son los responsables de dar las instrucciones correctas a los pilotos para dirigir las aeronaves y coordinar despegues y aterrizajes.

En el caso de España, la entidad responsable de estos servicios es ENAIRE. Está afiliada al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, y destaca como una referencia internacional en el ámbito de la navegación aérea. Posee personalidad jurídica independiente del Estado y opera en consonancia con la política general de transportes del Gobierno. ENAIRE gestiona aproximadamente 2,2 millones de kilómetros cuadrados, que constituyen el espacio aéreo español, a través de la prestación de servicios de navegación [3].

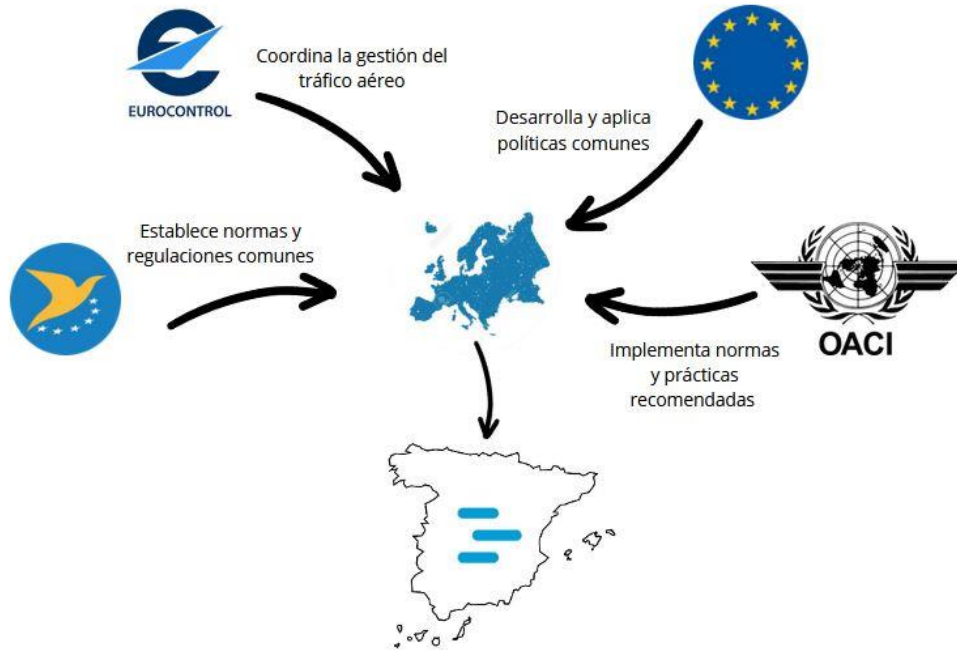


Fig. 2.1 Entidades coordinadoras y reguladoras del tráfico aéreo

Está formada por cinco direcciones regionales y sus respectivos Centros de Control Aéreos (ACC) desde donde presta el servicio de Control de Tráfico Aéreo (ATC). Están situados en Madrid, Barcelona, Sevilla, Palma de Mallorca y Gran Canaria.



Fig. 2.2 Direcciones regionales y sus respectivos ACC [3]

Para cumplir con sus servicios, poseen una gran cantidad de equipos especializados, que incluyen: 239 radio ayudas que prestan apoyo al guiado en todo momento, 58 sistemas de vigilancia, 136 centros de comunicaciones, 121 nodos REDAN para comunicaciones de voz, 140 posiciones en torres de control y 178 posiciones en centros de control [3].

Estos equipos son una parte crucial de la infraestructura operativa de ENAIRE, permitiendo el funcionamiento eficaz y seguro de sus servicios de navegación aérea en el espacio aéreo español.



Fig. 2.3 Ubicación distintos tipos de servicio de ENAIRE [3]

2.2. Evolución del tráfico aéreo en España

El dilema principal en el tráfico aéreo es el constante aumento de la demanda aérea. En el caso de España, ENAIRE se enfrenta al desafío de proporcionar todos sus servicios con igualdad de condiciones, ya que, con el espacio aéreo cada vez más saturado, se producen diversas implicaciones.

En las últimas tres décadas, el tráfico se ha triplicado. Este crecimiento no ha seguido un patrón lineal ni tampoco continuo debido a diferentes hitos históricos que se han ido atravesando, entre ellos, crisis económicas o incluso una pandemia. A pesar de estos hitos, en términos generales, se ha producido un incremento gigantesco.

Durante el período entre 1990 y 1996, el tráfico aéreo experimentó un crecimiento significativo del 38,6% [3]. Fue en 1997 cuando este crecimiento se vio interrumpido, con una disminución del 5,1% derivada de la crisis asiática.

Esta crisis generó una inestabilidad financiera a nivel global, impactando directamente en el tráfico aéreo español.

Una vez superada, el tráfico aéreo continuó en ascenso constante, casi duplicándose para el año 2007. Sin embargo, la crisis financiera de 2008 ejerció una fuerte influencia en el tráfico aéreo español, con una disminución del 11,4% en tan solo dos años. El tráfico se estancó hasta 2013, a partir de donde se inició un notable crecimiento que se extendió hasta 2019. Durante estos seis años, el tráfico aumentó un 32,9%, lo que representa un promedio anual del 5,5%.

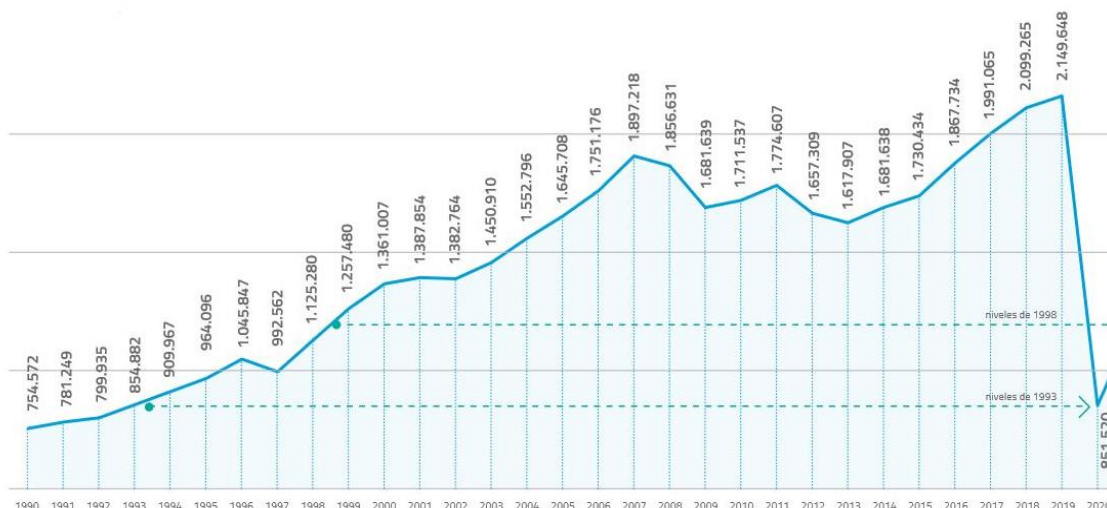


Fig. 2.4 Evolución histórica del tráfico aéreo en España [3]

Y en ese momento llegó la pandemia del COVID-19. Esta crisis sanitaria provocó una caída abrupta en el tráfico aéreo, llevándolo a niveles comparables a los registrados en 1993 en tan solo unos pocos meses. Esta rápida disminución en la actividad aérea fue una consecuencia directa de las restricciones de viaje, cierres de fronteras y las medidas de confinamiento implementadas para contener la propagación del virus.



Fig. 2.5 Evolución mensual del tráfico aéreo en 2020 respecto 2019 [6]

No fue hasta lo largo del 2020 y 2021 cuando se observaron varios repuntes en la actividad aérea, correlacionados con las restricciones sanitarias y el estado de la pandemia en esos momentos. Sin embargo, costó mucho tiempo acercarse a los niveles de tráfico aéreo registrados en 2019.

En el año 2022 se empezó a vislumbrar un retorno a la normalidad, ya que se logró gestionar aproximadamente el 92,2% de los vuelos en comparación con el año previo a la pandemia, es decir, respecto a 2019. Este indicio apuntaba hacia una recuperación significativa en la industria de la aviación, aunque aún quedaban desafíos por delante.

Finalmente, el año 2023, en términos de vuelos gestionados, se puede considerar como la continuación del 2019, ya que ha habido un aumento del 2% en vuelos gestionados.

En resumen, en las últimas décadas ha habido diferentes declives en el tráfico aéreo, pero generalmente estos han sido situacionales y seguidos por una recuperación, manteniendo una tendencia de crecimiento a largo plazo.

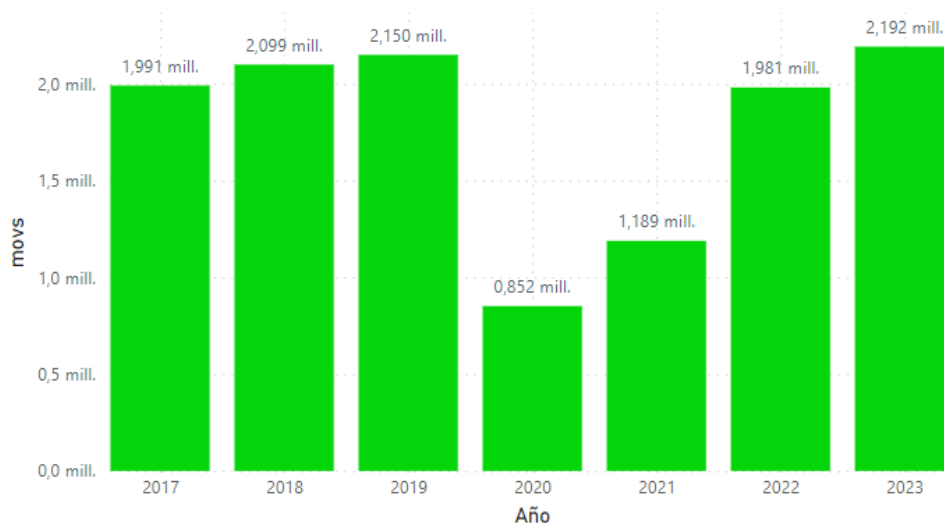


Fig. 2.6 Evolución anual del tráfico aéreo gestionado por ENAIRE [48]

Como dato relevante, ENAIRE ha gestionado el verano de 2023 el mayor número de vuelos de la historia de la aviación en España, con un promedio de casi 7200 operaciones diarias.

Con estos datos y la evolución histórica, se anticipa un aumento constante en el tráfico aéreo durante los próximos años. Esto significa un espacio aéreo más congestionado, es decir, una mayor dificultad para llevar a cabo los servicios de navegación aérea con la misma eficiencia y seguridad. Va a ser necesario recurrir a ayuda tecnológica adicional y una opción cada vez coje más auge a nivel mundial es la Inteligencia Artificial (IA).

2.3. Implementación de la Inteligencia Artificial (IA)

2.3.1. Concepto

La Inteligencia Artificial (IA) es un concepto en constante evolución que se adapta a medida que se producen avances en esta tecnología. En términos simples, se refiere a la creación de máquinas y modelos con la capacidad de pensar y actuar de manera similar a los humanos, siendo capaces de tomar decisiones en tiempo real [7].

Es capaz de construir sistemas inteligentes que pueden aprender y razonar por sí mismos, permitiéndoles analizar información instantáneamente y llegar a conclusiones. Esto, posibilita a las empresas aprovechar grandes volúmenes de datos para obtener información valiosa y detectar patrones que podrían ser difíciles de identificar para las personas.

La IA es fundamental para el aprendizaje informático y representa el futuro de la toma de decisiones complejas. Estas máquinas son altamente eficientes para calcular múltiples combinaciones y llegar a la mejor decisión posible. Es por eso, que la IA está cada vez más presente en distintas áreas, desempeñando un papel esencial en la optimización de procesos y la generación de soluciones innovadoras.

2.3.2. Prestaciones y aplicaciones

La Inteligencia Artificial (IA) ofrece una serie de capacidades y funcionalidades que son aplicables en una amplia variedad de contextos y sectores. Entre las prestaciones que la IA proporciona para cumplir con diversas aplicaciones, destacan las siguientes [7].

➤ Aprendizaje Automático (Machine Learning)

Se centra en el desarrollo de algoritmos y técnicas que permiten a las máquinas aprender y mejorar automáticamente a partir de datos, sin una programación explícita. Consigue detectar tendencias, anomalías, oportunidades y predecir situaciones futuras, usando árboles de decisión.

Se distinguen tres tipos de algoritmos [10]:

- Aprendizaje supervisado: cuentan con un historial de aprendizaje basado en un conjunto de etiquetas vinculadas a datos específicos, lo que les habilita para tomar decisiones o realizar predicciones.
- Aprendizaje no supervisado: estos algoritmos no cuentan con un conocimiento previo. Se enfrentan al caos de datos con el fin de identificar patrones que posibiliten crear una estructura organizada.

- Aprendizaje mediante esfuerzo: su propósito es que un algoritmo adquiera conocimiento a partir de la experiencia directa y pueda tomar decisiones óptimas frente a diversas situaciones mediante un proceso de ensayo y error, en el que se premian las decisiones acertadas.

Un claro ejemplo de su aplicación es en el ámbito de la salud. Permite detectar y predecir patrones y anomalías que podrían pasar inadvertidas por los médicos, consiguiendo un diagnóstico precozmente de diferentes enfermedades. Se estima que mejora los resultados en hasta un 40%.

➤ Redes Neuronales Artificiales (RNA), Deep Learning

Tienen una estrecha relación con el *machine learning*, pero les diferencia el tipo de algoritmos que usan cada uno. Una red neuronal artificial (RNA) estudia modelos matemáticos y algoritmos inspirados en la estructura y el funcionamiento del cerebro humano para el procesamiento de información.

Las RNA se basan en la interconexión de unidades artificiales mediante conexiones ponderadas. Cada unidad recibe señales de otras unidades o del entorno, generando una salida singular [11].

En una red neuronal simple, las neuronas deben alcanzar un estado de activación, generando una salida individual. Los pesos definidos en las conexiones, regulan la influencia de la señal de entrada en la unidad de procesamiento, afectando su activación. Así, se requiere una función que actualice estos pesos para el adecuado funcionamiento de la red.

Las redes neuronales se organizan en una arquitectura de capas, donde la primera capa es la que recibe los datos de la fuente externa y la última capa es la salida que proporciona valores basados en el aprendizaje. El resto de capas que conforman la red denominan capas ocultas. Con esto se pretende obtener patrones de los datos de entrada que podrán ser usados en predicciones o realizar evaluaciones de una forma parecida al cerebro humano.

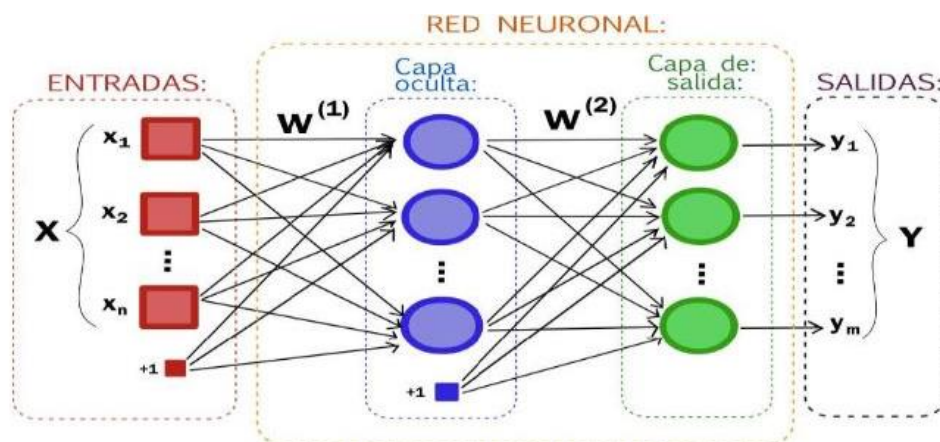


Fig. 2.7 Estructura general de una red neuronal [11]

Muchas empresas están usando deep learning para mejorar el servicio al cliente, especialmente a través de chatbots. Estos programas de IA se encuentran en diversos servicios y plataformas, como por ejemplo, los menús de llamadas de atención al cliente.

➤ **Visión por Computadora (Computer Vision)**

Se centra en permitir a las máquinas interpretar y analizar visualmente el mundo a través de imágenes, videos u otros datos visuales.

Funciona de manera muy similar a la visión humana, sin embargo, los humanos tienen una ventaja inicial al contar con toda una vida de contexto para entrenar cómo distinguir los objetos, a qué distancia están, si se están moviendo, etc.

Para entrenar a la visión artificial en un período de tiempo reducido, se utilizan cámaras, datos y algoritmos en lugar de retinas, nervios ópticos y una corteza visual. Por ejemplo, si se entrena un sistema para inspeccionar productos, es necesario incorporarle una gran cantidad de imágenes para que aprenda las diferencias y pueda reconocer cada producto. De esta manera, la visión artificial puede analizar miles de productos por minuto, identificando defectos o patrones que podrían pasar desapercibidos para los humanos.

Este método también está desempeñando un papel clave en el sector industrial. Cada vez más la industria se apoya en soluciones de visión artificial y servicios cognitivos de IA para un mantenimiento predictivo. Es capaz de anticiparse a los fallos en máquinas monitorizando la información de sensores de proceso e imágenes en tiempo real o de realizar una inspección automática de la calidad de los productos con visión artificial. Se estima que aproximadamente el 10% de las empresas del sector industrial ya han adoptado esta tecnología [12].

➤ **Procesamiento del Lenguaje Natural (Natural Language Processing, NLP)**

Se ocupa de la interacción entre las computadoras y el lenguaje humano, permitiendo a las máquinas entender, interpretar y generar lenguaje humano de manera inteligente.

NLP fusiona la lingüística informática con técnicas estadísticas, de *machine learning* y de *deep learning*. Esta combinación posibilita a los ordenadores interpretar y procesar el lenguaje humano en forma de texto o voz, logrando "comprender" su significado completo, incluyendo la intención y el tono del hablante o escritor [13].

Estas tecnologías impulsan programas que pueden traducir entre idiomas, responder a comandos hablados y resumir grandes cantidades de texto de manera rápida, incluso en tiempo real. Este avance se refleja en aplicaciones como sistemas GPS con comandos de voz, asistentes digitales, software para transcripción de voz a texto, entre otras.

➤ Robótica

Incorpora la IA en la construcción y el control de robots. Esto posibilita que las máquinas aprendan y tomen decisiones por sí mismas en tiempo real, aprovechando algoritmos y técnicas que les capacitan para procesar información proveniente de sensores conectados a su entorno. De este modo, los robots logran comprender su entorno para moverse y actuar con precisión.

Esta disciplina ha evolucionado según las necesidades emergentes, pero en términos generales, sus ventajas se enfocan especialmente en la automatización de tareas que tienen un valor limitado, aquellas que podrían ser peligrosas para las personas, o que requieren una precisión extrema de manera repetitiva y a una velocidad elevada.

Además de incrementar la eficiencia en la industria, la robótica se aplica en otros ámbitos como el sector de la salud para realizar operaciones precisas a distancia o trabajos en laboratorios [14].

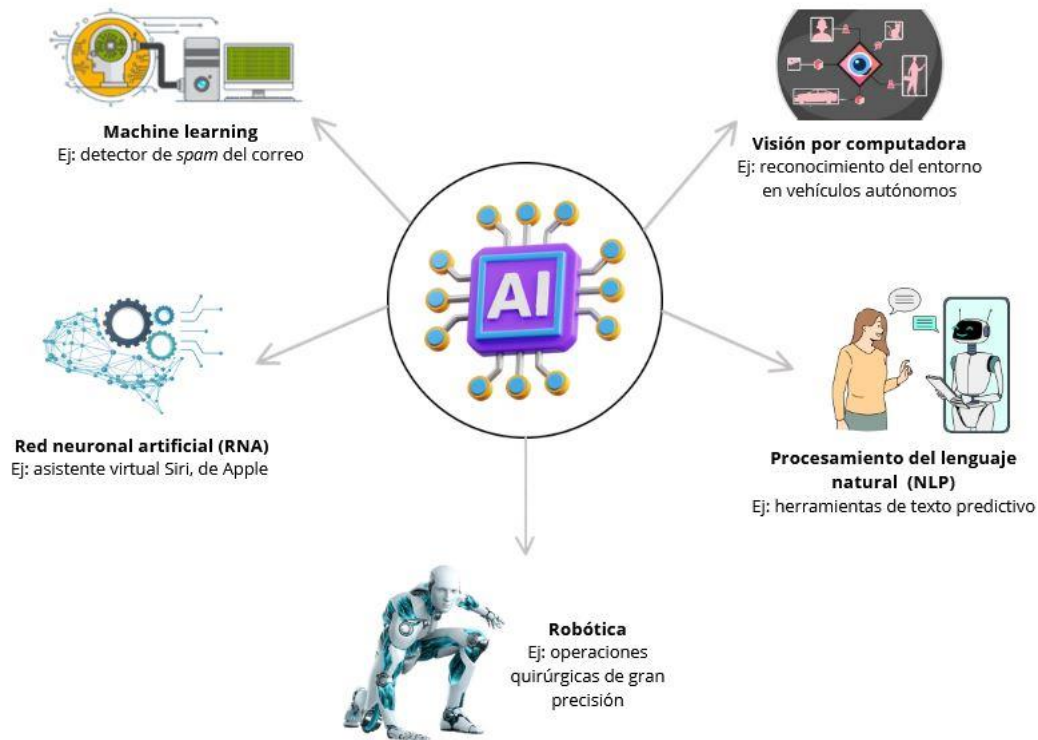


Fig. 2.8 Principales prestaciones y aplicaciones de la IA

2.3.3. Posibles beneficios en el sector de ATM

Donde es de especial interés realizar un análisis, es en la evolución de la IA en el ámbito de la aviación. Se están planteando diferentes métodos e ideas para aprovechar todas sus ventajas.

Históricamente, la automatización de cualquier proceso conllevaba el inconveniente de que las características propias de los seres humanos difieren de las capacidades de las máquinas. Estas carecen de consciencia y de habilidades cognitivas. Por eso, surge la idea de la IA, para poder dotar a las máquinas con estos rasgos humanos, en medida de lo posible.

Según un estudio realizado, se pueden sacar grandes beneficios de la IA en el control y la gestión del tráfico aéreo. Entre estos destacan, conseguir una mayor seguridad, eficiencia y reducción de costos [9].

- El beneficio más significativo se vería reflejado en la **seguridad**. Las tecnologías basadas en IA pueden mejorar la conciencia situacional y reducir el riesgo de colisiones en el aire, así como detectar y alertar a los controladores de tráfico aéreo sobre diferentes posibles peligros. Actualmente, ya se están usando herramientas para predecir las trayectorias de los aviones e informar al controlador en qué momento se cruzarán dos aviones, para así tomar las decisiones correspondientes de forma anticipada.
- En cuanto a la **eficiencia**, el hecho de permitir la automatización y el análisis predictivo, hace que los sistemas sean capaces de reducir los retrasos y optimizar las rutas de las aeronaves. De esta forma se podría disminuir el consumo de combustible y, por lo tanto, las emisiones de carbono. Por otro lado, se podría optimizar la programación de vuelos, permitiendo a los controladores de tráfico aéreo gestionar mejor el flujo de tráfico. Al tener en cuenta múltiples factores, como el tipo de aeronave, las condiciones climáticas, la densidad del tráfico aéreo, etc., sería posible tomar mejores decisiones.
- También podría ser viable reducir los **costos operativos**, automatizando tareas rutinarias, como actualizaciones de planes de vuelo y seguimiento de aeronaves. De esta forma se lograría reducir la carga de trabajo de los controladores de tránsito aéreo mejorando, así, su eficiencia.

De modo introductorio se han explicado varios beneficios que se podrían alcanzar teniendo en cuenta las prestaciones de la IA. Va a ser en los siguientes apartados donde se va a realizar un estudio detallado sobre cómo se gestiona el tráfico aéreo actualmente, con el propósito de identificar posibles vulnerabilidades o patrones distintivos. Este enfoque facilitará la búsqueda de soluciones hipotéticas o mejoras adicionales, con la Inteligencia Artificial.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL ESCENARIO ACTUAL: Gestión del tráfico y del espacio aéreo

3.1 Organización de los Servicios de Navegación Aérea (ANS)

En este primer apartado, el análisis se va a centrar en explicar los principios básicos y el funcionamiento de los actuales servicios de navegación aérea (ANS). Todos ellos actúan en un entorno dinámico y de alta complejidad, asegurando seguridad y eficiencia en el espacio aéreo.

Está compuesto por la Gestión del Tráfico Aéreo (ATM), por los sistemas de Comunicaciones aeronáuticas, Navegación aérea y Vigilancia (CNS), servicio de Meteorología (MET), servicio de Información Aeronáutica (AIS) y, por último, Búsqueda y Salvamento Aéreo (SAR) [8].



Fig. 3.1 Estructura jerárquica de los Servicios de Navegación Aérea (ANS)

3.1.1. Gestión del tráfico aéreo (ATM)

Formado por los Servicios de Tráfico Aéreo (ATS), la Gestión del espacio aéreo (ASM) y la Gestión del flujo y la capacidad de tráfico aéreo (ATFCM), se centra específicamente en el control y dirección del tráfico aéreo, utilizando tecnologías y procedimientos para garantizar una evolución fluida, segura y ordenada. Maneja una gran cantidad de datos provenientes de diversos participantes (aeropuertos, aerolíneas, proveedores de servicios de navegación aérea, entidades reguladoras, etc.).

➤ **Servicios de Tráfico Aéreo (ATS)**

Está destinado a gestionar y facilitar el movimiento seguro y eficiente de aeronaves en el espacio aéreo y en los aeropuertos. Organizado en tres secciones diferentes.

• **Control de tráfico aéreo (ATC)**

Es prestado por controladores aéreos, quienes, en función de las condiciones del tráfico y del entorno, aplican por iniciativa propia, separaciones entre los aviones y emiten autorizaciones de control, con el objetivo de organizar y agilizar el tráfico.

La inmensa mayoría de vuelos y sobrevuelos en el espacio aéreo español son supervisados a lo largo de todo su trayecto. Los pilotos de estas aeronaves mantienen una comunicación continua con el servicio de control. Para llevar a cabo esta compleja tarea se diferencian tres fases [17].

- **Control de torre o aeródromo (TWR):** se encarga de la gestión de las aeronaves que se encuentran en tierra, en el área de maniobras de un aeropuerto, o volando en sus inmediaciones. Se proporciona el servicio desde los fanales de las torres de control que se encuentran en cada aeropuerto. En general, la responsabilidad de un controlador de torre se trata de las aeronaves con las que tiene un contacto visual directo. El espacio en el que opera es el llamado ATZ (Aerodrome Traffic Zone) [15]. A grandes rasgos, las principales responsabilidades abordadas por el controlador de torre incluyen [16]:
 - Autorizar la puesta en marcha de las aeronaves, incluyendo información precisa sobre las condiciones del campo de vuelo, así como si hay meteorología adversa, trabajos que afecten a la pista, bandadas de aves, etc. También debe autorizar el momento de despegue o en caso contrario, de aterrizaje.
 - Guiar a las aeronaves desde las puertas de embarque hasta la cabecera de la pista de despegue, a través de las distintas rodaduras del aeropuerto, garantizando una separación adecuada con otros vehículos u obstáculos. Por supuesto, también guía aquellas aeronaves que acaban de aterrizar, hasta sus respectivos estacionamientos.
- **Control de aproximación (APP):** El servicio de control de aproximación se encarga de gestionar los vuelos durante las fases de llegada o salida del aeropuerto, es decir, el ascenso inicial tras el despegue, o descenso final previo al aterrizaje. Esta tarea se lleva a cabo, en la mayor parte de los casos, desde el Centro de Control de Área (ACC) el cual tiene, dentro de su zona de jurisdicción, el aeropuerto en cuestión. Cuando se trata de aeropuertos muy pequeños, la gestión de los aviones puede realizarse desde la torre de control del mismo aeropuerto [9].

La misión de los controladores de aproximación es organizar el tráfico en evolución (cambios de nivel), de manera que todos los aviones estén correctamente separados, permitiendo que los vuelos de salida sigan una trayectoria ascendente fluida y se incorporen a sus rutas de vuelo, mientras que los vuelos de llegada puedan descender de manera continua, y se alineen correctamente a la pista designada para el aterrizaje.

Según estipula la LOA (Letter of Authorization), que contiene diferentes normas a seguir en el espacio aéreo, los controladores deben garantizar una separación concreta entre las aeronaves. Un aspecto crucial es considerar el tipo de aviones bajo control, ajustando las distancias de acuerdo a si son pesados, medianos o ligeros. En el caso de las salidas también es de importancia la ruta que va a seguir cada avión, pues esto permite dejar separaciones distintas. A continuación, se puede ver un ejemplo en el caso de operaciones segregadas a pistas paralelas del aeropuerto de Barcelona.

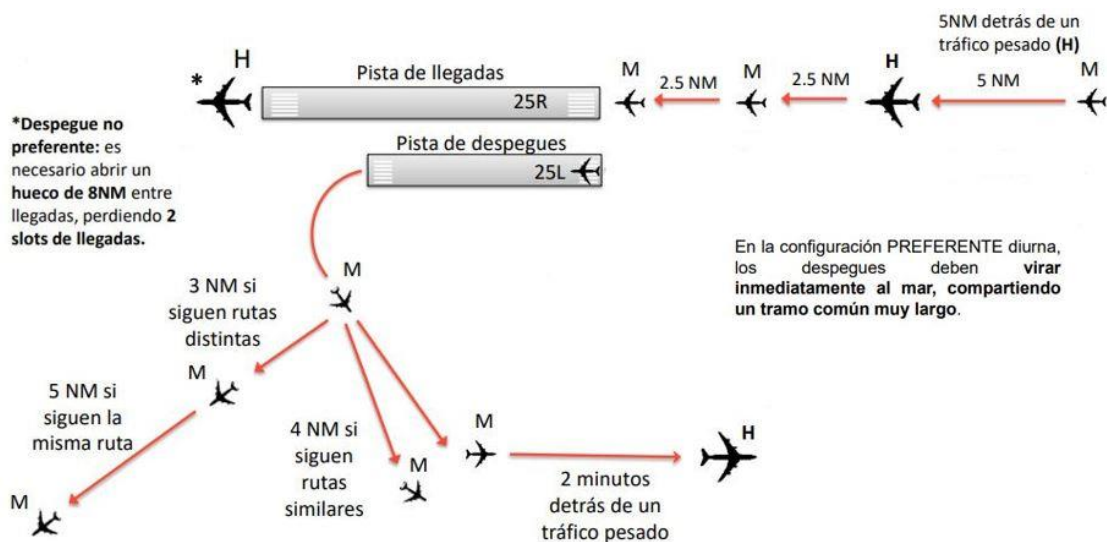


Fig. 3.2 Separación entre aviones en el aeropuerto de Barcelona [45]

Otro factor que no hay que olvidar en el caso de las llegadas, es el efecto de "acordeón" que se genera: el primer vuelo que va a aterrizar reduce la velocidad antes que el segundo, lo que disminuye la separación entre ellos; el segundo lo hace antes que el tercero, reduciendo también la distancia. Eso conlleva que el controlador deba incrementar la separación en medida de lo que sea necesario.

- **Control de área o ruta:** su función es asegurar un flujo ordenado y eficiente de aeronaves a través del espacio aéreo durante la fase de vuelo de crucero. Este servicio se presta desde los cinco Centros de Control de Área (ACC) que hay en España, cada uno, a su respectiva aérea [17].

Los controladores de área supervisan la aeronave durante su recorrido, asegurando que siga la ruta especificada en su plan de vuelo. Además, emiten instrucciones como cambios de dirección o altitud con el objetivo de mantener siempre la distancia requerida.

Cada controlador de ruta asume la responsabilidad de las aeronaves que atraviesan un volumen definido de espacio aéreo asignado, denominado "sector".

Una tarea adicional de los controladores es evaluar la posibilidad de recortar la ruta predefinida, ya sea debido a condiciones apropiadas o a solicitud del piloto. Este ajuste ofrece varios beneficios, como ahorro de tiempo y combustible, lo que puede llevar a un ligero aumento en la capacidad de tráfico gestionable. No obstante, la concesión de permisos para modificar la ruta requiere una evaluación de la situación, ya que puede afectar el tráfico en mayor o menor medida.

Existen dos métodos distintos para gestionar el tráfico aéreo, tanto en el control de aproximación como en la ruta [16]. Se diferencian según la disponibilidad de un sistema radar homologado: el control por radar y el control por procedimientos.

El control por radar utiliza ondas electromagnéticas para detectar y ubicar a las aeronaves. Este método permite a los controladores visualizar información en pantalla, facilitándoles la toma de decisiones necesarias para mantener la separación requerida entre las aeronaves.

Por otro lado, el control por procedimientos se utiliza cuando no se cuenta con información radar. En este escenario, los controladores trabajan con procedimientos preestablecidos. Con base en la información proporcionada por los pilotos sobre su posición en el espacio en un momento dado, y teniendo conocimiento de la planificación prevista de cada vuelo (ascenso, descenso, nivel de vuelo, rumbo), los controladores gestionan de manera segura el tráfico aéreo.

En España, la mayor parte del espacio aéreo controlado cuenta con cobertura radar y la tecnología necesaria para ofrecer servicios de control radar en la ruta y aproximación. Únicamente en la aproximación a ciertos aeropuertos, generalmente con un tráfico reducido, y en algunas zonas de rutas transoceánicas en el Atlántico Sur, se emplea el control por procedimientos.

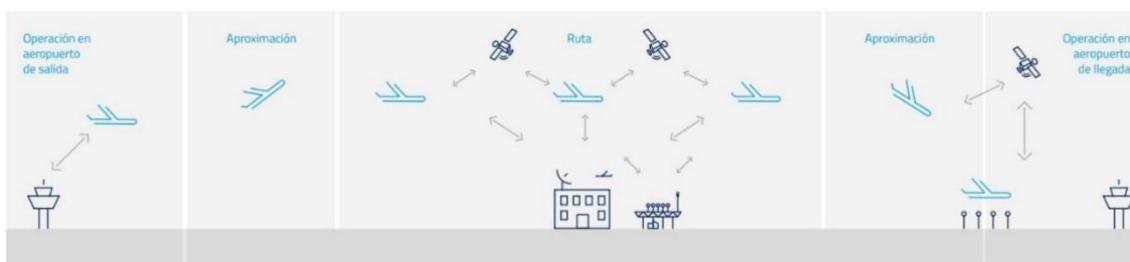


Fig. 3.3 Organización del Control de Tráfico Aéreo (ATC) [3]

- **Información de vuelo (FIS)**

El Servicio de Información de Vuelo (FIS) es gran importancia para la seguridad aérea. Proporciona datos actualizados sobre condiciones meteorológicas, estado de ayudas de navegación, estado de las pistas, etc.

Cuando no hay servicio de control, se informa a las aeronaves sobre otro tráfico aéreo que pueda haber en la zona y de posibles riesgos, aunque no se garantiza una separación segura. Por eso, en situaciones favorables, se utiliza el control de tráfico aéreo, ya que asegura la separación entre aeronaves, mientras que el FIS se limita a proporcionar información y consejos [18].

Los datos enviados a través del FIS se transmiten mediante transmisiones VHF-HF o por el servicio automático de emisión de información de área terminal de voz (voz-ATIS).

- **Alerta**

Este servicio tiene como objetivo recopilar toda la información relevante para asistir a aeronaves que se encuentren en situaciones de peligro [19]. Posteriormente, se notifica a las autoridades competentes sobre las aeronaves que requieren ayuda en operaciones de búsqueda y rescate, las cuales están equipadas con los recursos necesarios para brindar la asistencia requerida

- **Gestión del espacio aéreo (ASM) y Gestión del flujo y la capacidad de tráfico aéreo (ATFCM)**

El ASM tiene como principal objetivo lograr un uso más eficiente del espacio aéreo de acuerdo con las necesidades reales, garantizando al mismo tiempo un rendimiento óptimo de la red. Esto implica la planificación y gestión de las estructuras del espacio aéreo para diferentes fines dentro del transporte aéreo, atendiendo a una diversidad de usuarios, civiles y militares, cada uno con sus propias necesidades y requisitos. [24]

En cuanto al ATFCM, en un enfoque temporal, se puede considerar como el siguiente paso del ASM. Este servicio se encarga de regular el flujo de aeronaves para evitar la saturación de los sectores de control, optimizando así la utilización de la capacidad del espacio aéreo y garantizando la seguridad en las

operaciones. Su principal objetivo consiste en lograr un equilibrio en tiempo real entre la demanda y la capacidad.

Hasta hace unos años, este servicio era llamado ATFM, no se manejaba la capacidad del espacio aéreo. En otras palabras, si la demanda superaba la capacidad, los vuelos adicionales se demoraban hasta que fuera posible gestionarlos. En los últimos años, con el aumento de operaciones, si se prevé que la demanda supere la capacidad, se estudia la situación en ese momento para ver si sería factible superarla, o si no, se intentan desviar los vuelos o cambiarlos de nivel, con el fin de minimizar las demoras.

La gestión del espacio aéreo, se basa en el concepto de “Flexible Use of Airspace” (FUA), que permite adaptarse a la variada demanda de los diversos usuarios del espacio aéreo. Este enfoque se organiza en tres niveles temporales para una gestión eficiente y equitativa: estratégico, pre-táctico y táctico [24].

- **Nivel estratégico:** En este nivel, Eurocontrol colabora con los proveedores privados de cada país, como ENAIRE en el caso de España. Aquí, se realizan pronósticos, análisis de escenarios y se proponen medidas para afrontar problemas relacionados con el incremento de la demanda en los Centros de Control de Área (ACC) y aeropuertos de la red. Además, se busca identificar limitaciones operativas y puntos críticos para desarrollar medidas que permitan resolverlos o mitigar su impacto.
- **Nivel pre-táctico:** Este nivel se lleva a cabo de 48 a 24 horas antes de la operación y es donde entra en juego el ATFCM. El objetivo es lograr un equilibrio y optimización de la demanda frente a la capacidad, utilizando eficientemente los recursos, como la organización del espacio aéreo y la implementación de diversas medidas. Se asignan diariamente estructuras y zonas del espacio aéreo según las necesidades de los usuarios. Durante el día de la operación, la unidad ATFCM regula la demanda existente en función de la capacidad máxima disponible, asignando nuevas horas de salida para los vuelos que hayan sido demorados.
- **Nivel táctico:** este nivel tiene lugar durante el transcurso de una operación aérea. Se realizan ajustes en tiempo real como pueden ser la asignación de rutas y altitudes a las aeronaves, la coordinación de desviaciones de rutas debido a condiciones meteorológicas adversas o situaciones inesperadas, la gestión de la capacidad disponible en tiempo real para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones, entre otras tareas.

La responsabilidad principal en el nivel táctico recae en el Control de Tráfico Aéreo (ATC). Los controladores aéreos desempeñan un papel crucial en este nivel, tomando decisiones operativas para mantener un flujo ordenado y seguro del tráfico aéreo, considerando factores y tomando decisiones inmediatas.

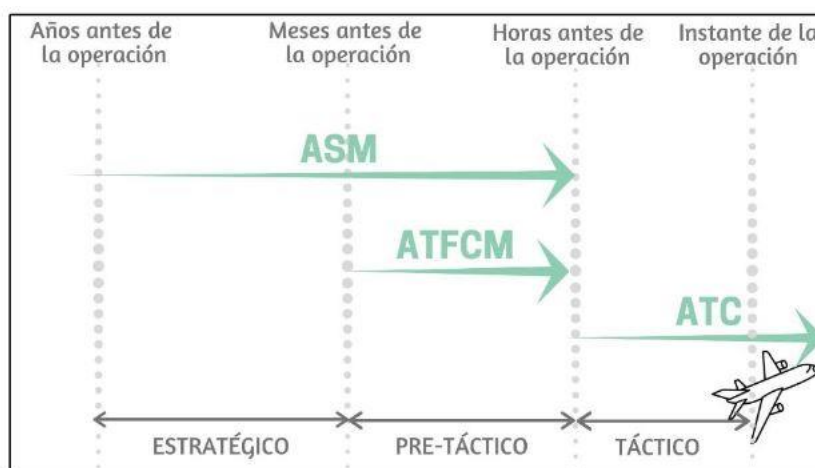


Fig. 3.4 Horizonte temporal de la gestión del tráfico aéreo [24]

3.1.2. Comunicaciones aeronáuticas, navegación aérea y vigilancia (CNS)

Se trata de un conjunto de sistemas, tecnologías, y procedimientos fundamentales para la gestión y seguridad del tráfico aéreo. Se puede distinguir entre lado tierra, lado aire y lado espacio en cada uno de los servicios. [23]

En cuanto a las **comunicaciones**, permiten la transmisión de información entre aeronaves y entre aeronaves y controladores de tráfico aéreo.

- Lado tierra: comprende instalaciones de telecomunicaciones, que incluyen infraestructuras como antenas, estaciones terrestres y enlaces de datos. Estos permiten la transmisión de información entre aeronaves y los centros de control, desde donde la gestión del tráfico aéreo se lleva a cabo mediante sistemas de comunicación por voz, interactuando con las aeronaves y proporcionando instrucciones, rutas y monitoreo. Se utiliza comúnmente el espectro de muy alta frecuencia (VHF, de 108 a 137 MHz) en Europa, dividido en canales de 8,33 Hz, permitiendo 2280 canales diferentes. En vuelos de larga distancia o sobre áreas oceánicas, se recurre a la alta frecuencia (HF) debido a su mayor alcance.
- Lado aire: incluye las aeronaves equipadas con distintos sistemas de comunicación y sistemas de datos (CPDLC, ACARS) para permitir la comunicación con controladores en tierra.
- Lado espacio: desempeñan un papel importante los satélites, que se utilizan para sistemas de posicionamiento global (GPS) y comunicaciones de largo alcance (por ejemplo, enlaces de datos a través de satélites).

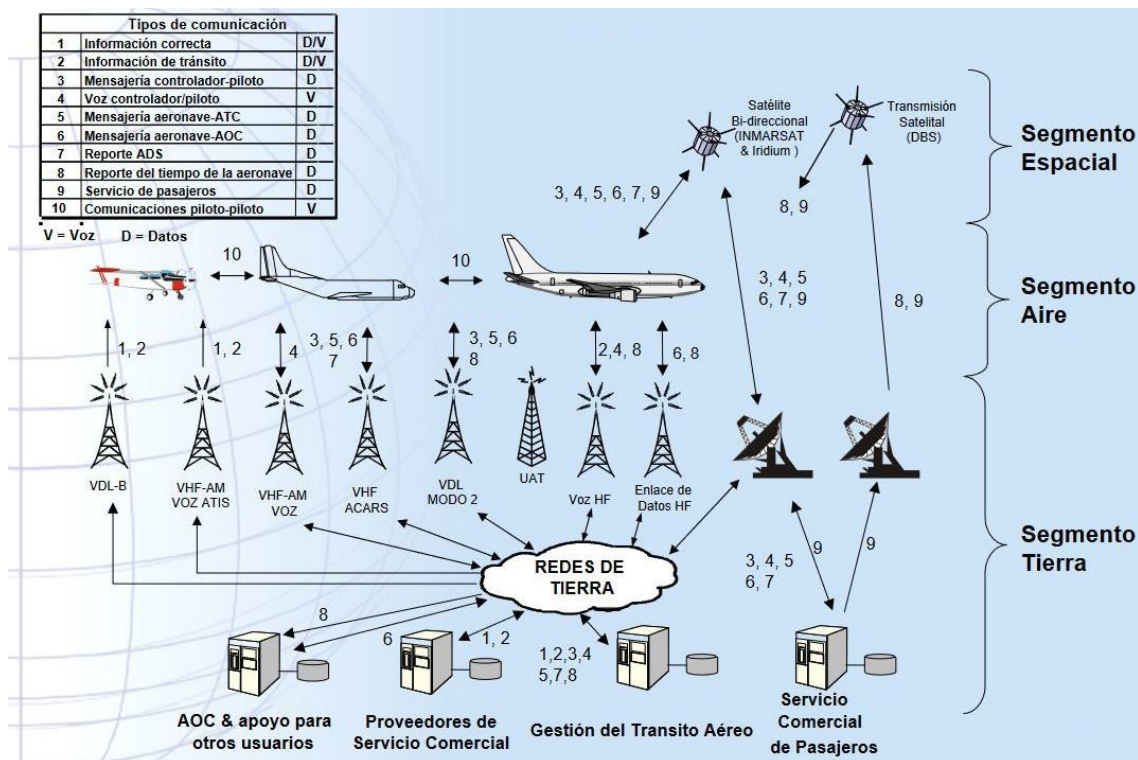


Fig. 3.5 Arquitectura de los sistemas de comunicación [22]

En relación con la **navegación aérea**, incluye los sistemas y métodos utilizados por las aeronaves para determinar su posición, trayectoria y velocidad.

- Lado tierra: se compone de sistemas como el VOR, NDB, o sistemas DME, los cuales suministran información de navegación a las aeronaves. También estaciones de Control de Tráfico Aéreo donde coordinan y supervisan el tráfico aéreo.
- Lado aire: las aeronaves están equipadas con sistemas de navegación, como GPS y sistemas inerciales, que permiten determinar su posición, trayectoria y velocidad durante el vuelo. También cuentan con indicadores como el de orientación horizontal (HSI) o el altímetro, para poder mantener el rumbo y la altitud.
- Lado espacio: destacan sistemas satelitales como el GPS, GLONASS o SBAS. Estos proporcionan información de posición y tiempo a las aeronaves, mejorando la precisión y la cobertura de la navegación, especialmente en áreas remotas.

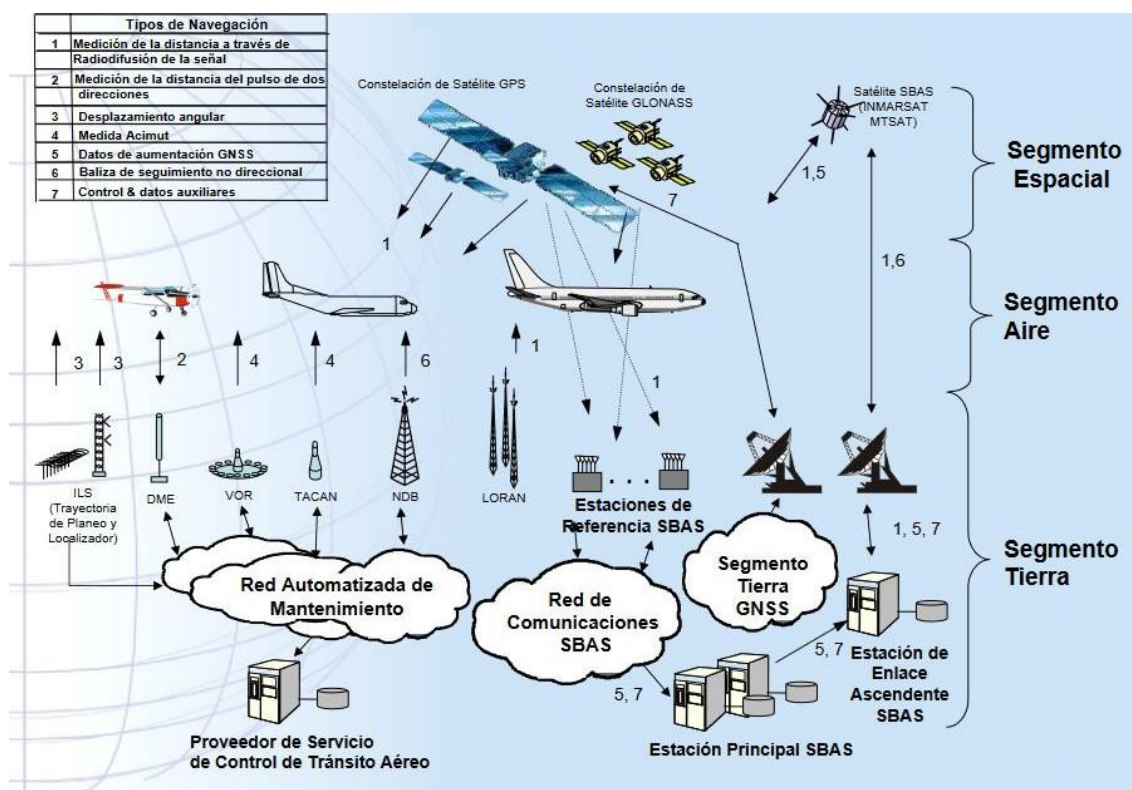


Fig. 3.6 Arquitectura de los sistemas de navegación [22]

Y, por último, la **vigilancia aérea**, que hace referencia a los sistemas utilizados para monitorear y rastrear la posición de las aeronaves en tiempo real.

- Lado tierra: compuesto por radares terrestres (primario y secundario) que son la base de la vigilancia aérea, proporcionando información de posición, velocidad y altitud de las aeronaves dentro del alcance del radar. Además, incluye sistemas de vigilancia, como multilateración y ADS-B, que ofrecen una vigilancia más precisa y detallada en áreas donde los radares tradicionales pueden tener limitaciones.
- Lado aire: formado por sistemas a bordo de las aeronaves, como los transpondedores que emiten señales captadas por los sistemas de vigilancia terrestre, proporcionando información de identificación y posición. También, el ADS-B permite a las aeronaves determinar su posición a través de GPS y transmitir esa información a estaciones terrestres y otras aeronaves equipadas con sistemas similares.
- Lado espacio: lo constituyen los satélites diseñados para mejorar la cobertura y precisión, especialmente en áreas donde la vigilancia terrestre es limitada.

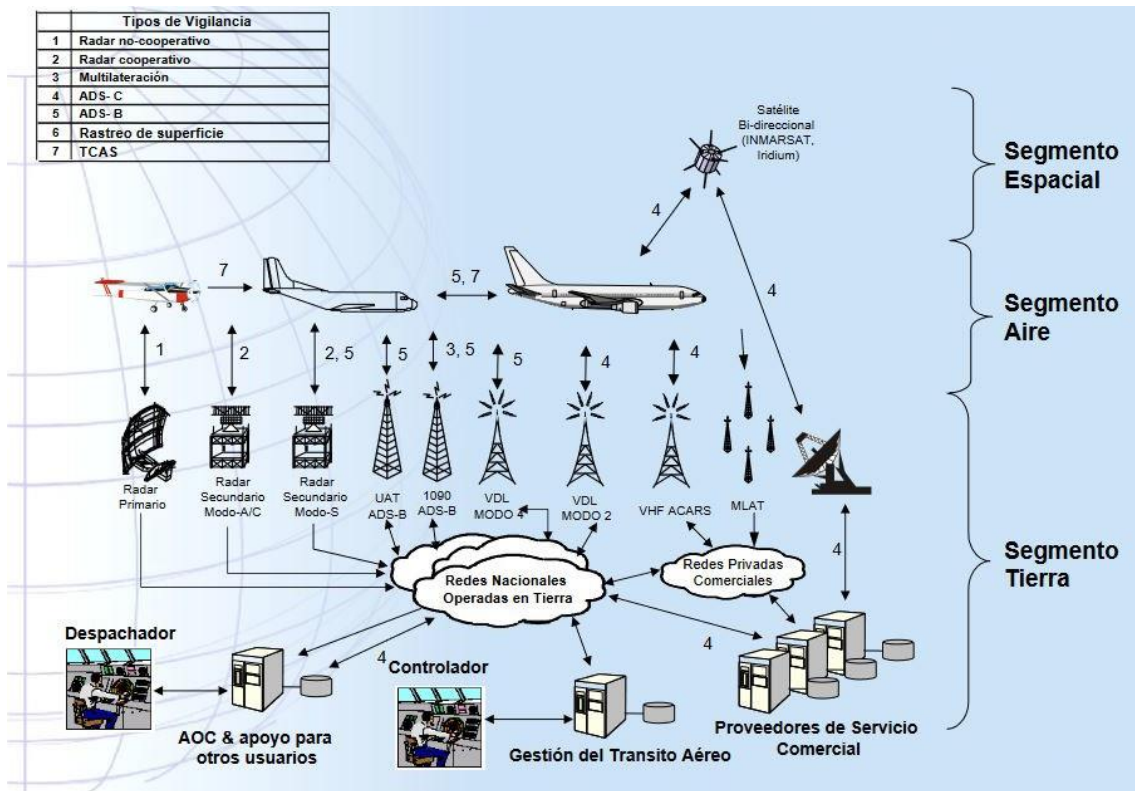


Fig. 3.7 Arquitectura de los sistemas de vigilancia [22]

3.1.3. Servicio de meteorología (MET)

Se ocupa de proporcionar información meteorológica imprescindible para la aviación. Recopila datos sobre las condiciones climáticas, como la velocidad y dirección del viento, visibilidad, presión atmosférica, temperatura, humedad, entre otros. Esta información es fundamental para que los pilotos y los controladores de tráfico aéreo tomen decisiones seguras respecto las rutas y altitudes a volar.

El servicio MET también emite pronósticos meteorológicos a corto y largo plazo, ayudando a la planificación eficiente de los vuelos. Esto de vital importancia, ya que anticiparse a malas condiciones meteorológicas es clave para la seguridad en la navegación aérea.

En el caso de los Centros de Control de Área (ACC) de Gavà, Torrejón y Sevilla, existe una posición en la sala de control con especialistas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) destinados a dar un mayor apoyo meteorológico. [41]

3.1.4. Servicio de información aeronáutica (AIS)

Su objetivo es suministrar los datos e información básica para garantizar la seguridad y eficiencia en la navegación aérea. [20]

Según ACI Anexo 15, la información aeronáutica debe ser publicada como un paquete de información aeronáutica integrada (IAIP), compuesta de los siguientes elementos según el tipo de información a distribuir:

- La publicación de información aeronáutica (AIP)
- Circulares de información aeronáutica (AIC)
- NOTAM alertas pilotos de aviones de cualquier peligro en ruta o en una ubicación específica)
- Información previa al vuelo Boletines (PIB)

Cada elemento tiene establecidas sus propias normas y unos plazos de publicación.

3.1.5. Búsqueda y Salvamento Aéreo (SAR)

El SAR tiene la responsabilidad de coordinar y llevar a cabo operaciones de rescate en caso de accidentes o incidentes aéreos. Se basa en la detección, localización y asistencia a aeronaves en peligro o accidentadas. Para llevar a cabo estas tareas, se utilizan diversas tecnologías y equipos que incluyen radares, sistemas de comunicación, satélites y aeronaves especializadas en búsqueda y rescate.

La colaboración estrecha entre los servicios de navegación aérea y las autoridades responsables del SAR es esencial. Por ejemplo, el servicio de Alerta desempeña un papel crucial al proporcionar información sobre la ubicación y trayectoria de las aeronaves en situación de emergencia [21].

3.2. Organización del espacio aéreo

En esta sección se analizará, por un lado, como está estructurado el espacio aéreo nacional y, por otro, la parte operativa del espacio aéreo, es decir, como se coordinan los controladores aéreos para poder operar con base en la estructura del espacio. Con esto se buscará que el concepto de “control de tráfico aéreo” quede orientado a la evolución y transformación para poder encontrar hipotéticas mejoras con la aplicación de la IA.

3.2.1 Estructura del espacio aéreo nacional

Las divisiones geográficas más destacadas a nivel mundial son las regiones de información de vuelo, FIR/UIR.

Dentro de cada FIR/UIR (Región de Información de Vuelo/Región de Información de Vuelo Superior), se encuentran subdivisiones adicionales del espacio. Estas son el CTA (Área de Control), TMA (Área de Control Terminal), CTR (Zona de Control), ATZ (Zona de Tráfico del Aeródromo), OCA (Área de Control Oceánica) o FIZ (Zona de Información de Vuelo). Todos estos volúmenes se combinan para formar la estructura del espacio aéreo, adaptándose a las necesidades específicas y al uso previsto, ya sea para vuelo por instrumentos (IFR), vuelo visual (VFR), gestión del tráfico, corredores visuales, rutas ATS, entre otros. Y, por estas subdivisiones atraviesan las aerovías (AWY) [26].

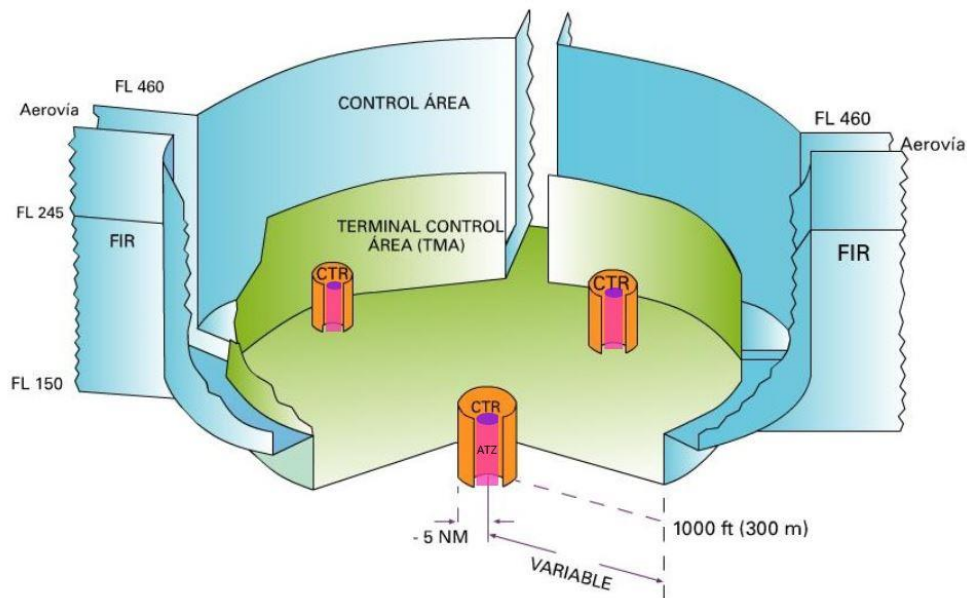


Fig. 3.8 Estructura del espacio aéreo [26]

➤ Región de Información de Vuelo/Superior (FIR/UIR)

La finalidad de estas regiones es proporcionar información y servicios de control de tráfico aéreo en su área designada y autorizar volar dentro de sus dominios.

Los límites laterales están definidos basándose en las fronteras de cada país, es decir, cada nación tiene por lo menos una región. Y por límites verticales, la FIR es el volumen que se extiende, generalmente, desde el FL150 (hay excepciones donde empieza en la superficie) hasta un nivel de vuelo específico; en España suele ser hasta el FL195 para los casos de Madrid y Barcelona y en el FL245 en el caso de Canarias. Y, justo por encima, se encuentra la UIR (Upper Information Region) que alcanza el nivel más alto del espacio aéreo controlado, siendo el FL660 en todo el espacio aéreo nacional. [2]

Se observa en la siguiente figura como en España existen tres FIR/UIR. Estas son LECM (Madrid), LECB (Barcelona) y GCCC (Canarias). Entre todas ellas colindan con 7 Estados diferentes y varias regiones de información de vuelo: Francia (Brest, Burdeos y Marsella), Reino Unido (Shanwick), Portugal (Lisboa y Santa Maria), Marruecos (Casablanca), Argelia, Cabo Verde y Senegal.

Los controladores de los diferentes estados o regiones se reúnen constantemente para conseguir una transferencia de responsabilidades de control de manera suave y segura.

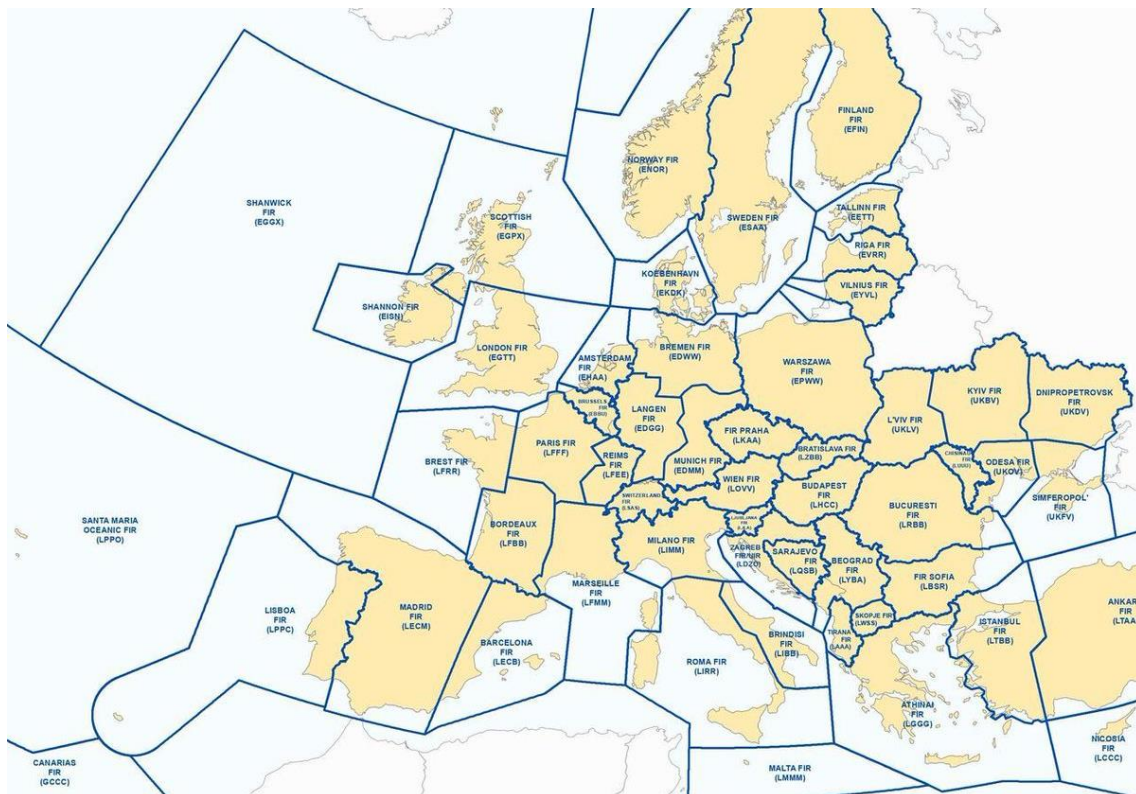


Fig. 3.9 Divisiones FIR/UIR de Europa [1]

➤ Área de control (CTA)

Como su propio nombre indica, es todo el espacio donde se proporciona control de tráfico aéreo. En este sentido, podría considerarse como equivalente a la FIR/UIR, excluyendo los otros volúmenes más específicos explicados.

En el caso de España estas áreas están limitadas por encima de 300 metros sobre el terreno, ya que en esos primeros metros se permite operar a aeronaves bajo condiciones VFR (libre circulación). Se extienden, generalmente, hasta el nivel más alto controlado (FL660) [25].

Como límites horizontales, se encuentran definidos en la AIP, pero suelen estar divididas por las zonas donde hay aeropuertos. Si estos tienen un tráfico aéreo reducido o menos denso, el CTA realiza la función del TMA.

➤ Área de control terminal (TMA)

Se trata de la zona del espacio aéreo que rodea un aeropuerto o una serie de aeropuertos IFR con una alta densidad de tráfico o con una red de rutas compleja. Está diseñada para gestionar y controlar el tráfico aéreo en las fases de aproximación tanto para llegadas como para salidas [25].

Este espacio aéreo está bajo la responsabilidad de los controladores de tráfico aéreo de aproximación y se caracteriza por ser altamente difícil de controlar, ya que debe garantizar la seguridad y fluidez del tráfico aéreo.

Los límites inferiores también están en los 300 metros para permitir la libre circulación, y los superiores varían en función de las necesidades del tráfico. En España se pueden encontrar 12 Áreas de Control Terminal (TMA), situadas en los aeropuertos más importantes (con más tráfico aéreo).

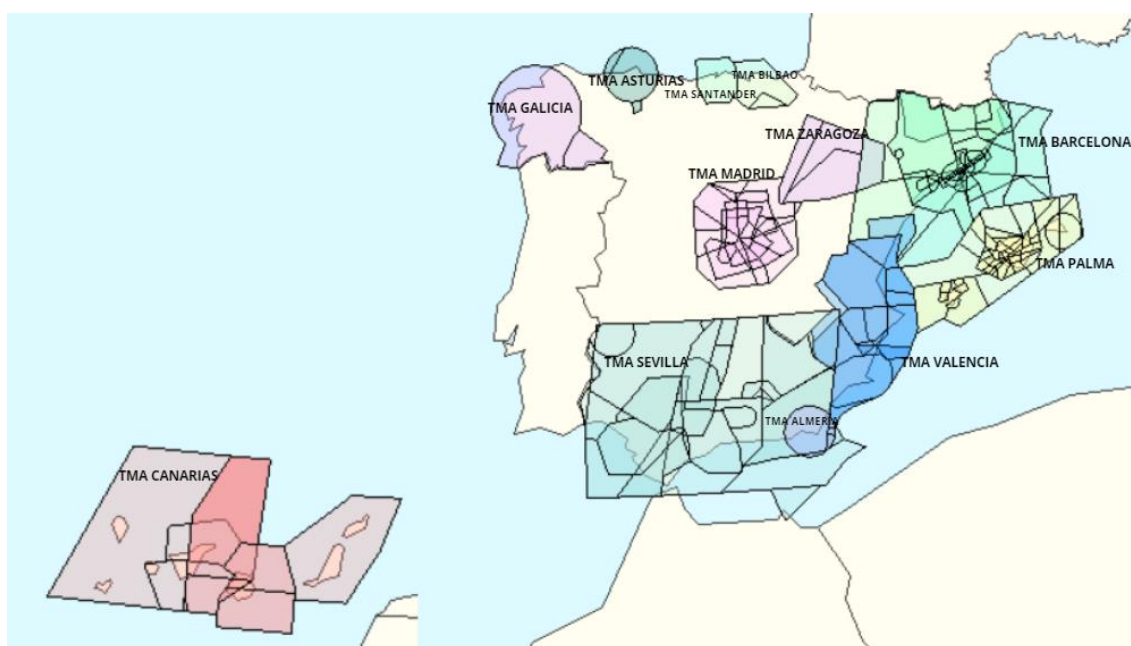


Fig. 3.10 TMA de España [48]

➤ Zona de control (CTR)

Es un espacio definido en las inmediaciones de un aeródromo que tiene por objeto proteger las entradas y salidas IFR. En caso de existir varios aeródromos próximos se suele definir un solo CTR que los incluya. [25]

Los límites laterales suelen conformar una especie de cilindro vertical de 5 NM medidas a partir del centro del aeropuerto, el límite inferior es la superficie terrestre, y el superior, como mínimo el nivel inferior del CTA u otra altura superior definida en el AIP.

➤ Zona de tráfico del aeródromo (ATZ)

Se establece para que la Torre de Control (TWR) pueda controlar el tráfico del aeródromo y proteger a los vuelos VFR. En los casos que hay tráfico IFR y se ha establecido un CTR, este suele englobar al ATZ. Es por esto, que varios aeropuertos no cuentan con ATZ. [25]

Su máxima extensión lateral es de 25 NM, aunque en España las dimensiones máximas se circunscriben a un cilindro de 8 Km y una altura de 900 metros.

➤ Área de control oceánica (OCA)

Están destinadas a ofrecer el servicio de control de tráfico aéreo a aeronaves que vuelan sobre océanos o áreas marítimas remotas, donde la cobertura radar puede ser limitada o inexistente. Por lo tanto, se emplean otros métodos de vigilancia y comunicación, como el seguimiento basado en reportes de posición, sistemas de satélite o comunicaciones de largo alcance [27].

En España existe control oceánico, gestionado desde GCCO, como parte de la FIR/UIR de Canarias. Los límites laterales suelen coincidir con la FIR/UIR definida en esa zona y los verticales varían, pero típicamente tienen como límite inferior el FL55 y pueden no tener límite superior.



Fig. 3.11 OCAs en el Atlántico Norte [27]

➤ Zona de información de vuelo (FIZ)

Definida en torno a un aeródromo no controlado solamente para ofrecer servicio de información de vuelo en salida o llegada. Su finalidad es proporcionar información sobre otras aeronaves que están operando, meteorología, estado de la pista, etc. No se dan instrucciones ni autorizaciones, excepto en el rodaje. [27]

➤ Aerovías (AWY)

Vienen a ser las “carreteras del cielo”. Son el corredor por donde deben volar las aeronaves con tal de hacerlo de forma coordinada y ordenada.

Generalmente, y dependiendo de cada espacio aéreo, las aerovías son designadas unas para ida y otras para regreso. Esto se realiza para tener orden y seguridad en dichos espacios aéreos. En los casos donde la aerovía es de doble sentido, para evitar colisiones, se determina que en un sentido se vuele en niveles de vuelo pares, y en el sentido contrario que vuele en niveles de vuelo impares. De esta manera, los tráficos quedan separados y protegidos.

En el caso de España, ENAIRE tiene organizadas las aerovías, diferenciando entre nivel inferior (SFC – FL195) o nivel superior (FL195 - UNL) [28].

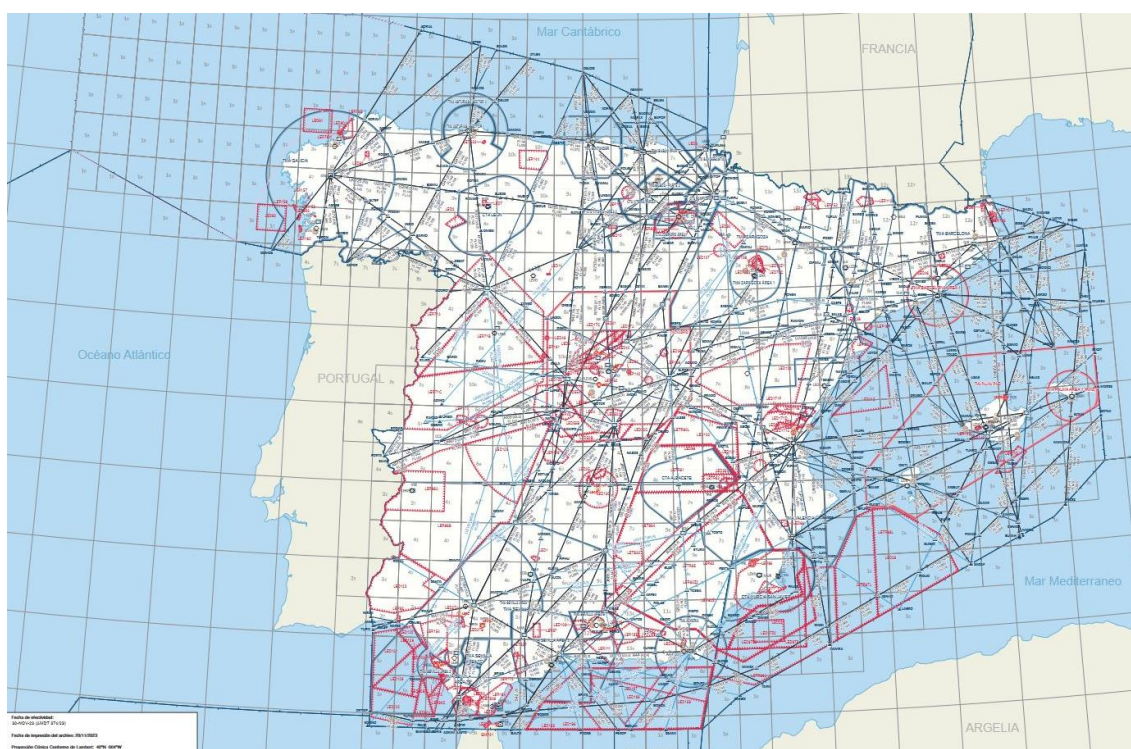


Fig. 3.12 Aerovías nivel inferior península [29]

3.2.2. Operatividad en el espacio aéreo nacional

Con el objetivo de gestionar los tráficos en condiciones óptimas, los 5 centros de control desde donde se prestan los servicios ATS para el tráfico en ruta (CTA) y en aproximación (TMA), estructuran el espacio en sectores.

Un **sector** se trata de un componente operativo primario de la estructura del espacio aéreo, diseñado en función de las trayectorias que van a seguir los vuelos, ya sea en aproximación o en ruta. Cada uno de ellos es gestionado por una pareja de controladores (táctico y planificador) [5].

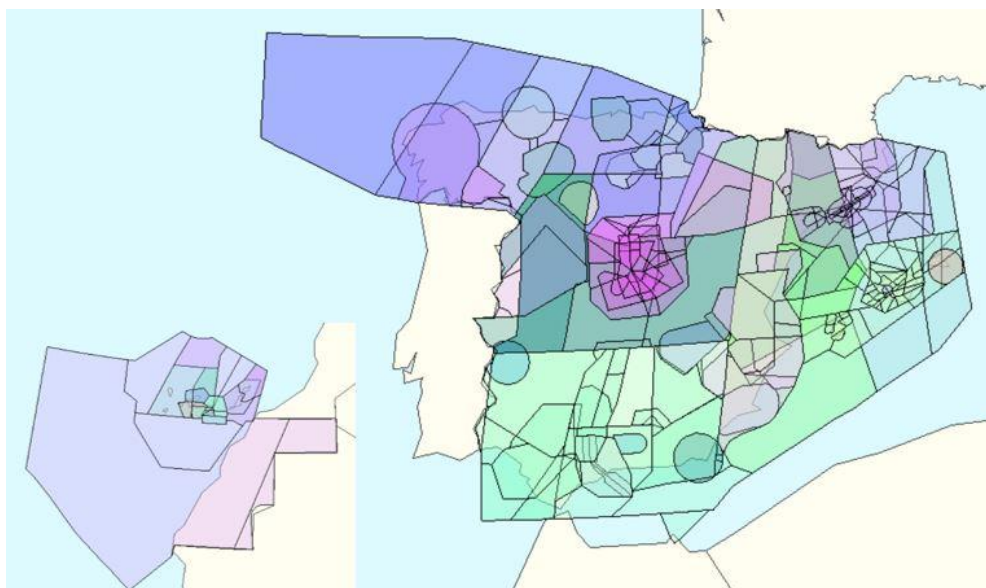


Fig. 3.13 Sectores del espacio aéreo español [48]

Una de sus finalidades es definir un valor de capacidad, elemental para el sistema ATM. Esta capacidad es la base para poder organizarse en la gestión del tráfico aéreo. Con ese valor se sabe de antemano cuál es el número de operaciones por hora que se pueden llegar a controlar en un sector, lo que permite aumentar la eficiencia, y a la vez, la seguridad aérea. Si esto se combina con la previsión de demanda de tráfico, es posible anticiparse a sobrecargas del espacio o picos de tráfico, situaciones que serían imposibles de gestionar de una forma correcta.

Aquí es donde aparece en escena el ATFCM, que son los encargados de buscar el equilibrio óptimo entre la capacidad y demanda. Para los casos de un exceso de demanda, una solución muy común es aplicar regulaciones en esos sectores.

Una **regulación** consiste en limitar la capacidad de un sector a un valor en concreto de forma temporal. Los principales motivos son o bien porque la demanda supera la capacidad máxima o bien porque hay malas condiciones meteorológicas, lo que reduce el número de operaciones que se pueden gestionar. Esto, pero, tiene consecuencias, y son las famosas demoras del mundo de la aviación. Cuando se aplica una regulación, los vuelos que ya están

volando de una forma u otra hay que gestionarlos, pero los que aún no han despegado son demorados. Esto genera muchos problemas, principalmente económicos, pero es la única forma de evitar olas de tráfico que provoquen situaciones de descontrol. [41]

Profundizando más con los sectores, son clasificados en elementales y en agrupados. Están así organizados para adaptarse de una mejor forma al tráfico aéreo en todo momento. Un sector elemental es la división más básica del espacio aéreo y es utilizado cuando la demanda así lo exige (alta cantidad de tráfico). Pero, en los momentos de menor tráfico, los sectores se van juntando (formando los sectores agrupados), para así reducir la complejidad a la hora de controlar y sobre todo no tener un exceso de personal trabajando sin ser necesario. Este proceso es llamado sectorización.

Una **sectorización** es el hecho de ir juntando los sectores elementales con tal de organizar de forma óptima el espacio aéreo. Para ello existen las configuraciones, una serie de combinaciones ya definidas, formadas por sectores elementales y agrupados.

Para verlo de forma más específica, se va a explicar que configuraciones existen, como se utilizan y como se agrupan los sectores, por ejemplo, del ACC de Barcelona, el cual es el encargado de gestionar el CTA de Barcelona (vuelos en Ruta) y el tráfico del TMA de Barcelona. En el primer caso, el CTA de Barcelona, se divide en Ruta Oeste y Ruta Este.

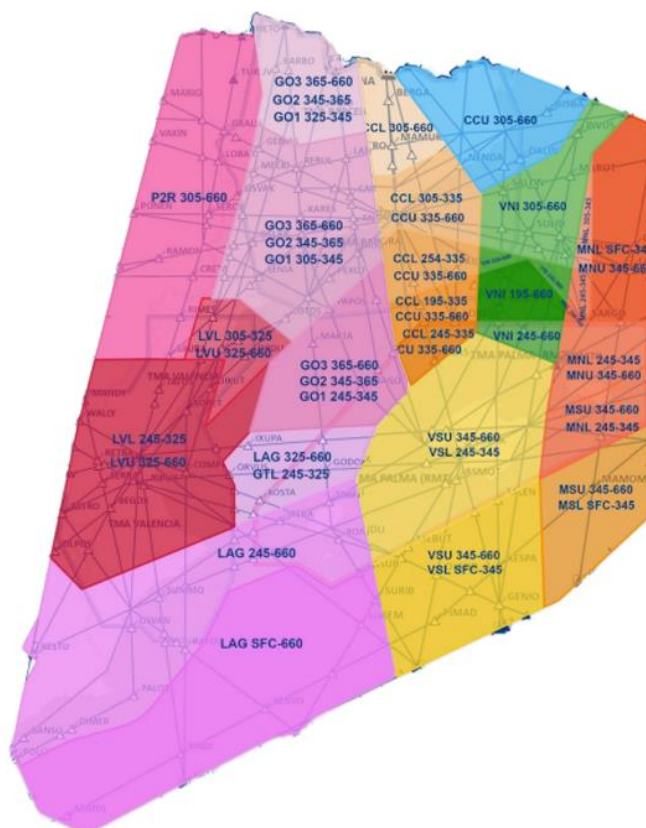


Fig. 3.14 Sectores del CTA de Barcelona [44]

Tanto en Ruta Este como en Ruta Oeste hay 7 sectores elementales que se van combinando para crear nuevos sectores, los agrupados. La máxima agrupación, para ambos casos, son los 7 sectores elementales juntados.

Por lo tanto, el procedimiento que se sigue en una sala de control es el siguiente: en los momentos de menor tráfico se trabaja con un único sector abierto (BKW o BKE), generalmente de noche, y se van cambiando las configuraciones y abriendo sectores hasta que, si es necesario, lo están todos los elementales, siendo el momento de mayor despliegue.

A continuación, hay un ejemplo de las sectorizaciones que se produjeron un día de agosto, en Ruta Oeste. Se observa como a primeras horas de la madrugada, cuando el tráfico es poco elevado, es posible controlarlo todo con un solo sector. Conforme el día avanza y el tráfico aumenta, se van abriendo (separando) sectores utilizando la configuración que mejor se adapta a la cantidad y al tipo de tráfico recibido en ese momento. Al acercarse al final del día se vuelven a utilizar configuraciones con menor despliegue de sectores.

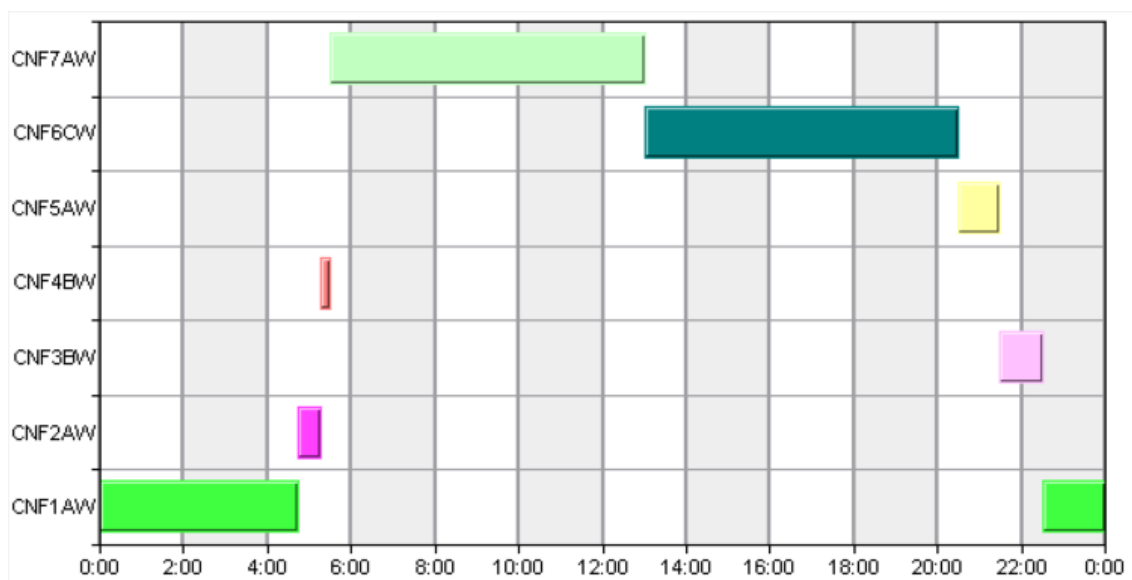


Fig. 3.15 Sectorizaciones 23/08/2023 en Ruta Oeste [48]

La siguiente imagen muestra la demanda que hubo ese mismo día, para así poder ver la relación que guarda la cantidad de tráfico y las configuraciones utilizadas.

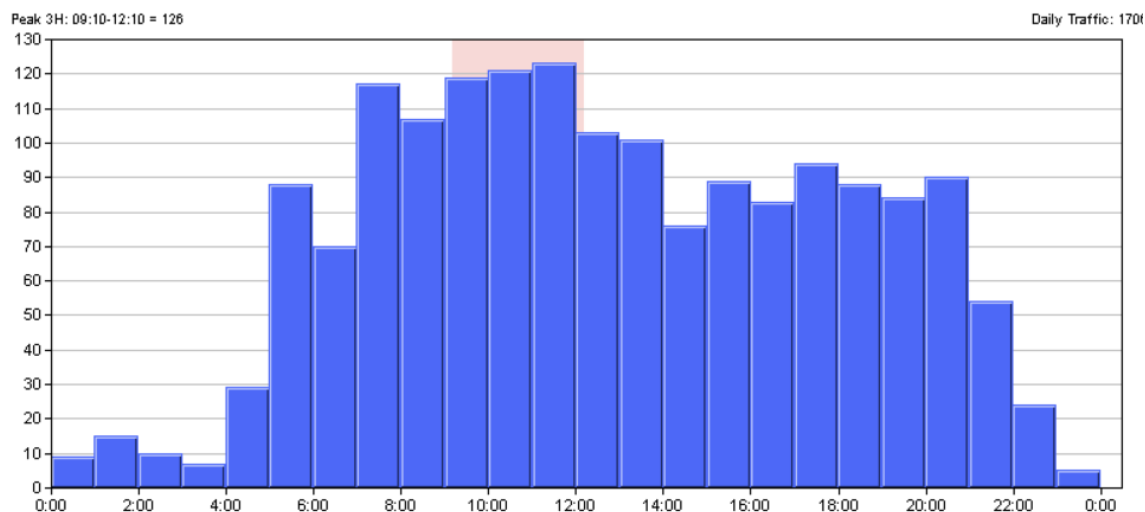


Fig. 3.16 Demanda 23/08/2023 en Ruta Oeste [48]

Hay una clara dependencia entre el número de sectores abiertos y la demanda recibida. Aunque, los jefes y supervisores de la sala de control también tienen en cuenta que tipo de tráfico les va a llegar para así juntar unos sectores u otros y poder trabajar con las configuraciones más adecuadas.

Por ejemplo, una situación muy común es analizar si el tráfico va a ser en evolución (el aeropuerto origen o destino pertenece a la FIR de Barcelona) o sobrevuelos (ni el aeropuerto origen ni destino pertenece a la FIR de Barcelona).

En el caso de la agrupación GOI, formada por los sectores elementales GO1, GO2, y GO3, concentra una gran parte del tráfico en evolución de las salidas de los aeropuertos de baleares, valencianos, de Murcia o Barcelona. Al ser, este tipo de tráfico, el más difícil de controlar, los GOI están diseñados, tanto por la forma, como por las divisiones horizontales, (cada uno de ellos cubre diferentes niveles de vuelo) para gestionarlo de la mejor manera.

Como se puede ver a continuación, las divisiones horizontales permiten tener un tiempo menor cada vuelo en cada sector, lo que mejora tanto la eficiencia como la seguridad de los vuelos a la hora de gestionarlos. También se observa cómo va cambiando el nivel inferior del GO1 con el fin de controlar todo ese tráfico en evolución. En la primera imagen aparecen todos los vuelos en evolución con origen o destino en algún aeropuerto de la FIR de Barcelona.

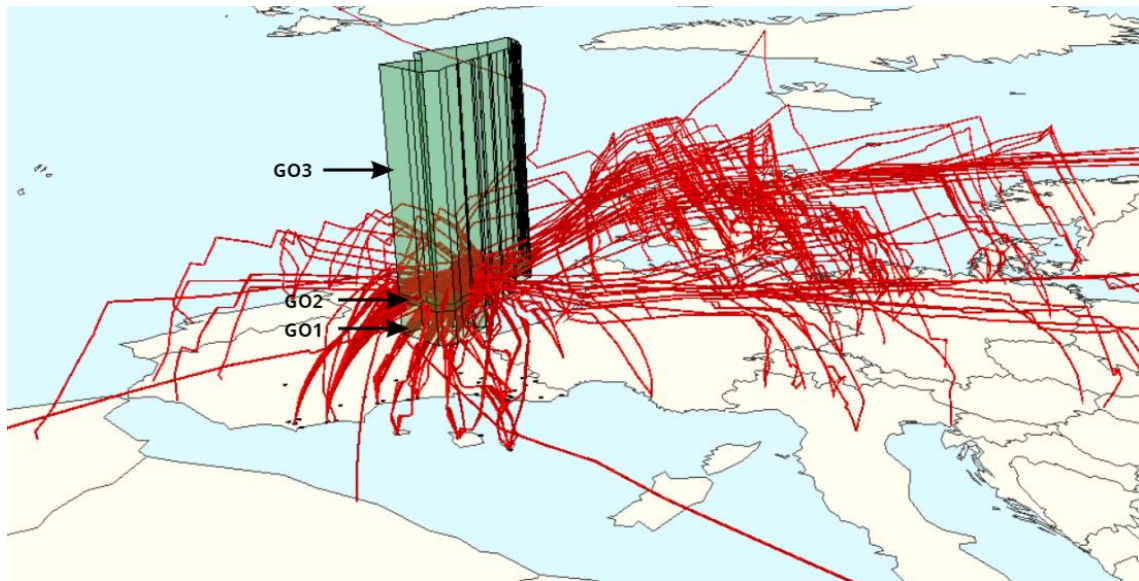


Fig. 3.17 Tráfico en evolución 23/08/2023 por los Gos [48]

Y, por otro lado, si se filtran los vuelos, exceptuando los anteriores, se puede comprobar en la siguiente imagen como también hay una gran cantidad de sobrevuelos.

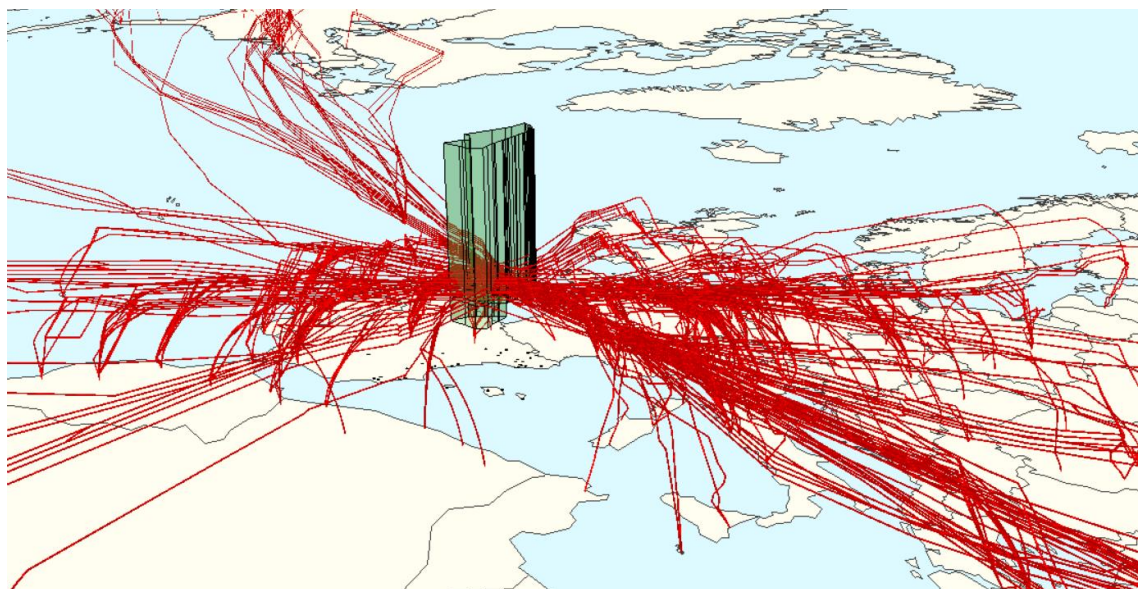


Fig. 3.18 Tráfico en sobrevuelo 23/08/2023 por los Gos [48]

Se observa cómo hay muchos vuelos procedentes de diferentes direcciones que se cruzan con el tráfico en evolución. Esto hace que los sectores de G01 sean unos de los más complejos de gestionar.

Por lo tanto, cuando hay una gran cantidad de tráfico en evolución es necesario trabajar con los GOs separados para realizar un trabajo eficiente, en cambio, si hay una mayoría de sobrevuelos (más tipo en invierno) no es tan conveniente dividir el espacio en divisiones horizontales y si es factible trabajar con la configuración que contiene los tres GOs juntos, es decir, GOI.

Y en cuanto al TMA de Barcelona, está organizado por Configuración Norte, Configuración Este y Configuración Oeste. La elección entre estas Configuraciones depende de la pista o la orientación de pista que se utilice para los despegues y aterrizajes en un momento dado.

Igual que el CTA, el TMA se divide en sectores elementales y agrupados, lo que permite crear diferentes configuraciones. En total cuenta con 34 sectores elementales y 87 sectores agrupados entre las tres Configuraciones (aunque la mayoría de ellos se van repitiendo).

Al tratarse de un entorno más reducido, los flujos de tráfico suelen ser uniformes, siguiendo rutas específicas de salida (SID) o llegada (STAR), lo que implica que las sectorizaciones utilizadas normalmente sean las mismas.



Fig. 3.19 Sectores del TMA de Barcelona [48]

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL ESCENARIO PROPUESTO: Aplicación de la Inteligencia Artificial (IA)

4.1 Principal desafío en el ATC

4.1.1. Contexto del desafío

Como se ha podido comprobar, un factor clave para gestionar el espacio aéreo es saber de antemano cuál será la demanda de tráfico. Pero, surge un gran problema, la enorme volatilidad que tienen las predicciones [35]. Esto supone consecuencias en múltiples aspectos, ya que una previsión errónea de la demanda significa tener que improvisar a la hora de la verdad, afectando a la eficiencia y optimización del espacio, y como no, a la seguridad en la navegación aérea.

Actualmente, los servicios de ATFCM utilizan una aplicación de Eurocontrol, llamada CHMI (Collaboration Human Machine Interface). Muestra a los usuarios diferentes datos e información gráfica en tiempo real. Esto permite la toma de decisiones y gestionar la demanda futura junto a la capacidad. Pero, la enorme volatilidad de los datos sigue siendo un inconveniente [30].

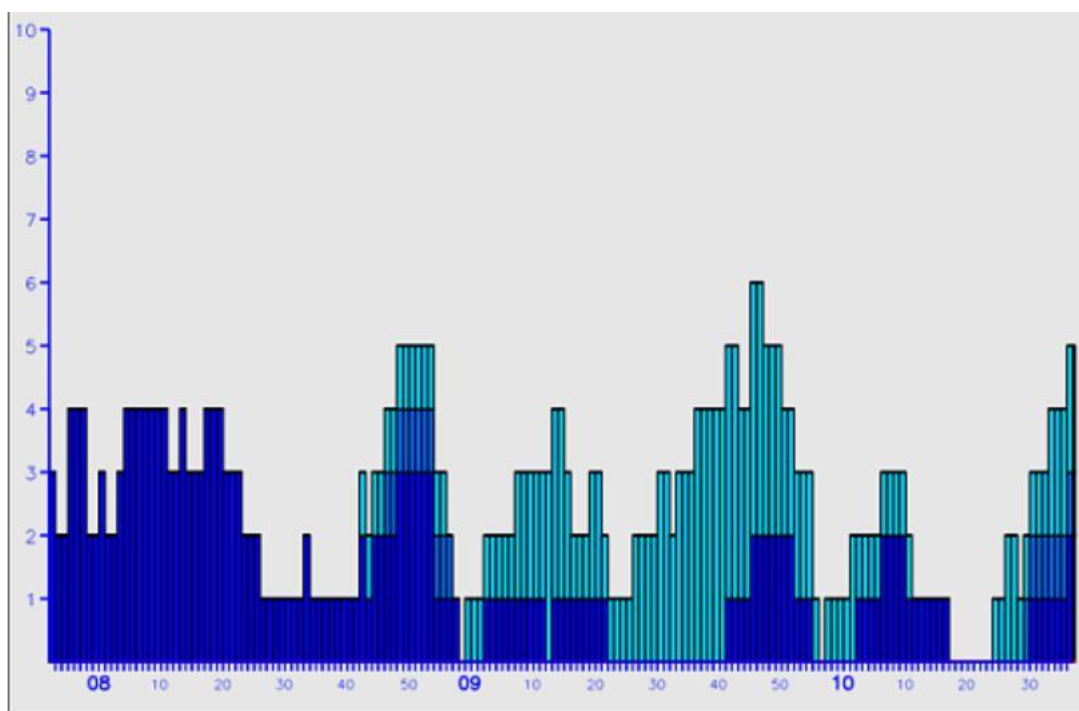


Fig. 4.1 Gráfica de ocupación por minuto en la CHMI [31]

Conforme va llegando información más precisa y acercándose el momento en concreto, se van actualizando los gráficos, siendo mucho más realistas.

Posteriormente, desde ATFCM distinguen entre tráfico inicial y tráfico actual, siendo un tipo el tráfico previsto y el otro la última versión de datos, es decir, el tráfico que realmente se tuvo. Con esto pueden estimar la magnitud de la volatilidad que se hubo.

A continuación, se muestran algunos de los gráficos de mayor interés, que son, por un lado, la ocupación que tuvo cada sector minuto a minuto y, por otro lado, la previsión de demanda en diferentes intervalos horarios. En ellos aparece una comparación entre el tráfico inicial y el actual, lo que sirve para hacerse una idea de lo explicado.

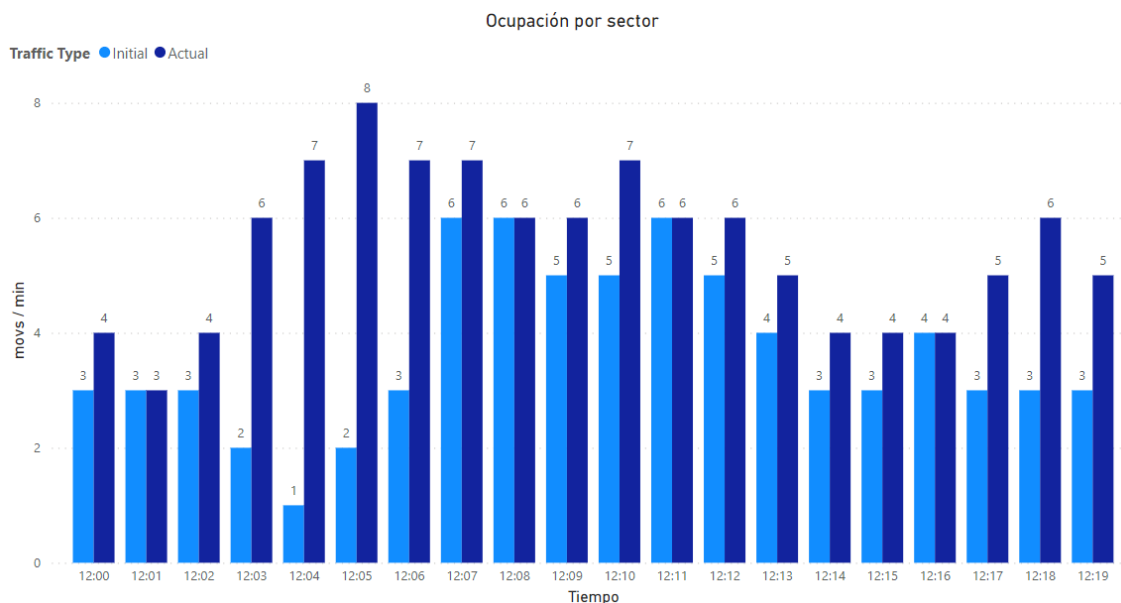


Fig. 4.2 Ocupación por minuto GO2 el 10/06/2023 [48]

Se puede observar la ocupación del sector GO2 durante un período de 20 minutos el 10 de junio de 2023. Esto evidencia cómo, por ejemplo, a las 12:05 h, el cambio de una previsión de 2 vuelos a gestionarse a encontrarse con 8 vuelos en tiempo real altera significativamente la dinámica operativa. Por supuesto, hay un cierto umbral de diferencia que no supone problema para los controladores aéreos, ya que si no el trabajo sería imposible de realizar.

Sin embargo, en casos tan exagerados como el que se nombra, puede generarse una saturación del espacio aéreo, lo que conlleva diversas consecuencias. Por esta razón es crucial poder visualizar la ocupación del sector minuto a minuto, ya que permite prever con mayor precisión si se acerca un pico de tráfico aéreo.

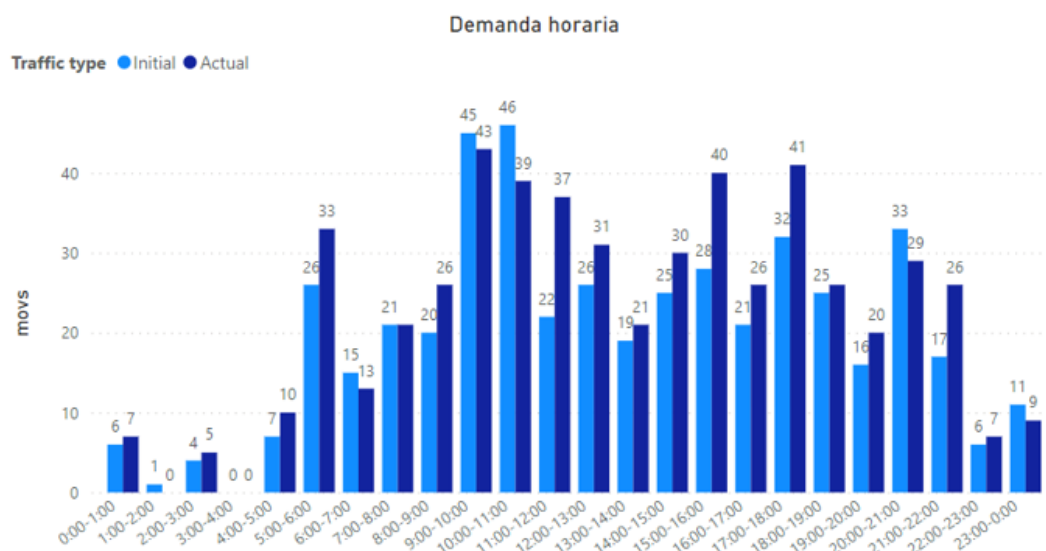


Fig. 4.3 Demanda horaria GO2 el 10/06/2023 [48]

En el caso de la demanda horaria el mismo día en el sector GO2, una de las mayores variaciones se produce a las 15:00 h. Se esperaba gestionar 28 vuelos durante la siguiente hora, pero la realidad muestra que fueron 40, generando un pico de tráfico. Esta situación requiere estar preparado para improvisar en cualquier momento, siendo más difícil actuar a medida la información correcta se obtiene más tarde. La importancia de los valores de demanda por hora viene dada porque el valor de capacidad de cada sector está definido con movimientos por hora. Por lo tanto, sirve para ver en qué horas la capacidad va a ser superada.

El motivo por el que se produce esta volatilidad viene dado por múltiples factores. Los más destacados son, debido a cambios en los planes de vuelo que son actualizados muy tarde por parte de la aerolínea, a condiciones meteorológicas adversas que obligan a regular un sector o desviar el tráfico, rutas recortadas respecto el plan de vuelo y por la influencia del viento en ruta, que puede aumentar o reducir el tiempo de vuelo.

4.1.2. Consecuencias derivadas

La principal consecuencia de los picos de tráfico inesperados es tener que regular uno a varios sectores al verse superada la capacidad máxima. Cuanto menor es la antelación en la que se obtiene la información correcta, mayores son los efectos. Se estima que una regulación debe activarse dos horas antes del suceso, para así evitar que los vuelos hayan despegado y no estar obligado a gestionarlos, viéndose afectada la seguridad aérea.

También puede darse el caso contrario, que las previsiones te indiquen que es necesario aplicar una regulación y que finalmente haya que cancelarla antes de lo previsto porque ya no es necesaria. De todos modos, este caso no conlleva consecuencias negativas, simplemente sirve de reflejo para ver la volatilidad con

la que trabajan. Y es que, en 2023, en el CTA de Barcelona, el 9% (99 en total) de las regulaciones activadas terminaron siendo canceladas en algún momento.

En la siguiente imagen se puede ver como el motivo de las regulaciones con mayor número de cancelaciones eran por capacidad y después por condiciones meteorológicas adversas. Es decir, por una previsión errónea de demanda y meteorológica.

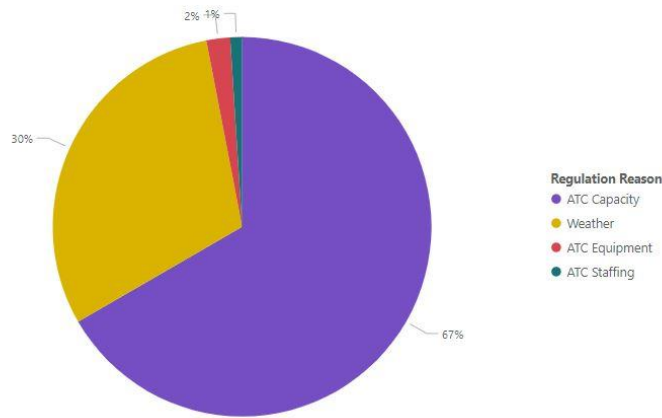


Fig. 4.4 Motivo de las regulaciones canceladas durante 2023 [48]

Otro aspecto muy importante que está estrechamente ligado, son los minutos de demora que se generan con cada regulación. Se estima que el coste medio por cada minuto de retraso en los vuelos es de alrededor de 100 euros [41].

Para hacerse una idea de la magnitud que se está hablando, en el 2023, únicamente en los sectores del CTA de Barcelona, hubo 1098 regulaciones por capacidad y meteorología (96% respecto el total), generando un total de 415000 minutos de demora.

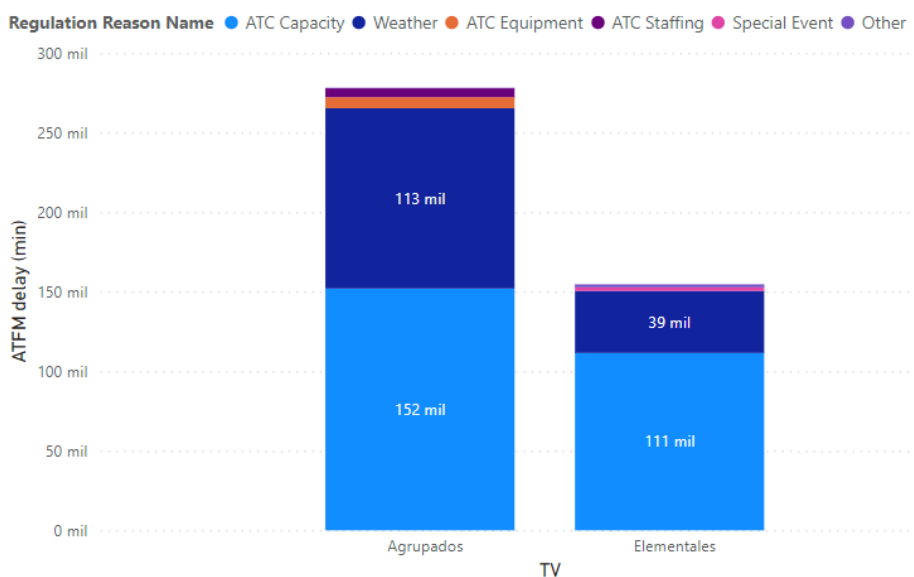


Fig. 4.5 Demora generada en el CTA de Barcelona durante 2023 [48]

4.2. Oportunidades de mejora a través de la IA

Actualmente, los planes de vuelos se crean esperando un escenario perfecto en cuanto a la eficiencia aérea. Pero, como la realidad no es esta, el procedimiento a seguir siempre será el mismo; aplicar una regulación, ya sea por sobredemanda o por meteorología adversa.

Obtener previsiones mucho más fiables sería crucial para optimizar el espacio aéreo y a la vez aumentar la seguridad. Se podrían reasignar las horas de salida o cambiar el plan de vuelo en medida de lo posible, para aliviar los efectos económicos de las demoras.

Una posible solución a este desafío sería intentar mejorar cada uno de los factores que provoca la volatilidad, principalmente a partir de patrones seguidos, obteniendo, así, una previsión más real, lo que ayudaría a suavizar todas sus consecuencias.

4.2.1. Previsiones meteorológicas

- Descripción

La meteorología desempeña un papel crucial en el control del tráfico aéreo. Como se nombra anteriormente, se cuentan con expertos de la AEMET que proporcionan información actualizada sobre las condiciones en los diferentes volúmenes del espacio aéreo, ya que estas pueden tener un impacto significativo en la seguridad aérea. Sin embargo, surge un desafío importante, la limitada fiabilidad de las previsiones meteorológicas debido a la inestabilidad atmosférica.

Esto puede dar lugar a situaciones problemáticas, y suponer consecuencias como las explicadas en el apartado anterior. Como se nombra, estos escenarios implican un fuerte impacto tanto en la seguridad aérea como en el coste económico sobre las compañías aéreas y los usuarios [41].

- Estudio

Anticipar de manera precisa y confiable las condiciones meteorológicas desfavorables en un determinado volumen del espacio aéreo es esencial para una preparación adecuada y una respuesta eficaz. Los datos históricos ofrecen patrones recurrentes que pueden ser de utilidad. A continuación, se presentan dos ejemplos que muestran estos patrones en situaciones de malas condiciones meteorológicas.

En el primer gráfico, se detalla el porcentaje de días respecto las tres primeras semanas de septiembre que estuvo regulado cada sector a cada hora por la meteorología. Destaca el sector CCC, que tiende a ser regulado con mayor frecuencia durante las tardes. Además, se señala que este sector estuvo regulado hasta en un 38% de los días en alguna de las horas analizadas.

Mapa de regulaciones

TV	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
LECBBAS						5 %	10 %	5 %	5 %	5 %	5 %	10 %	19 %	19 %	5 %	5 %				
LECBCCC			5 %	14 %	19 %	24 %	24 %	24 %	24 %	29 %	29 %	33 %	29 %	38 %	33 %	19 %	5 %			
LECBG23								5 %	5 %	5 %	5 %	5 %		5 %	10 %	10 %	10 %	5 %		
LECBGO1					5 %	5 %	10 %	10 %	10 %	5 %	5 %	5 %								
LECBGOI					5 %	5 %	10 %	10 %	10 %	5 %	5 %	5 %								
LECBLGU											5 %	5 %	5 %	5 %						
LECBLVL				5 %	10 %	19 %	19 %	14 %	10 %						5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %
LECBLVS								5 %	5 %	5 %	5 %		5 %	5 %						
LECBLVU						10 %	14 %	14 %	10 %	5 %			5 %	5 %						
LECBMMI													5 %	5 %	5 %	5 %				
LECBMNI			5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	10 %	10 %	10 %	5 %	5 %	5 %			
LECBMNL					10 %	10 %														
LECBMVS																			5 %	5 %
LECBP2R				5 %	5 %	5 %											5 %	5 %	5 %	

Fig. 4.6 Regulaciones en el CTA de Barcelona por meteorología [48]

Durante la primera mitad de junio de 2023, la situación fue aún más notable, con varias horas en las que el sector CCC estuvo regulado más de la mitad de los días.

Mapa de regulaciones

TV	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
LECBCCC				13 %	13 %	13 %	13 %	27 %	40 %	47 %	53 %	53 %	47 %	53 %	47 %	33 %				
LECBGO1									7 %	7 %	7 %	7 %	13 %	7 %						
LECBGO2						7 %	13 %	20 %	20 %											
LECBGO3						7 %	13 %	13 %	13 %	7 %										
LECBLVC											7 %	7 %	7 %	7 %	7 %					
LECBLVU												20 %	20 %	7 %						

Fig. 4.7 Regulaciones en el CTA de Barcelona por meteorología [48]

Al comparar la previsión anticipada para esos días con los hechos reales, tanto en términos de condiciones meteorológicas como de regulaciones de sectores, se podrían identificar patrones valiosos.

- Aplicación de la Inteligencia Artificial

Una posible solución para evitar estos inconvenientes sería mejorar las previsiones meteorológicas mediante la aplicación de inteligencia artificial. A partir del “Aprendizaje automático” (Machine Learning), las máquinas son capaces de aprender, es decir, identificar patrones complejos en millones de datos para llegar a alguna solución o decisión. [46]

En los últimos años, los investigadores han empleado sistemas de inteligencia artificial para mejorar la clasificación de modelos climáticos, detectar ciclones y otros fenómenos meteorológicos extremos. Un ejemplo es el programa desarrollado por Huawei, en China, llamado PanguWeather. Ha sido entrenado con datos meteorológicos mundiales para predecir temperatura, viento, presión y humedad a diferentes alturas. Es 10.000 veces más rápido que los métodos actuales de previsión, ya que hace en segundos tareas en las que hoy se invierten horas. Esto supone un ahorro económico enorme para las agencias meteorológicas. [38]

Se espera que esto, combinado con leyes físicas, sea el futuro para las previsiones meteorológicas. Se lograría una mayor precisión en las predicciones, por lo que se tendría a disposición información más fiable y, en consecuencia, previsiones de demanda más ajustadas a la realidad.

4.2.2. Impacto del viento en la velocidad de vuelo

➤ Descripción

El viento es un factor esencial a tener en cuenta, ya que influye en la velocidad de avance de la aeronave. Dependiendo de si el vuelo experimenta viento a favor o en contra, la velocidad va a variar. Este fenómeno está vinculado al conocido "jet stream", que son corrientes de aire generadas por la rotación de la Tierra que se encuentran en la troposfera, generalmente entre 7 y 12 kilómetros de altura.

En el hemisferio Norte, el aire que se desplaza hacia el Norte se ve desviado hacia el Este debido a la fuerza de Coriolis, pudiendo alcanzar velocidades de más de 300 km/h. El "jet stream" se asemeja a un "río" continuo de aire, adoptando una forma serpenteante. Esto se debe a las variaciones en el efecto Coriolis en diferentes latitudes, lo que explica por qué estas corrientes a menudo no fluyen directamente hacia el Este [40]. Es por eso, que este fenómeno no solo beneficia a las rutas que se dirigen hacia el Este, sino que también se pueden generar pasillos o corredores de vientos del norte, conectando por ejemplo Reino Unido con la Península Ibérica.

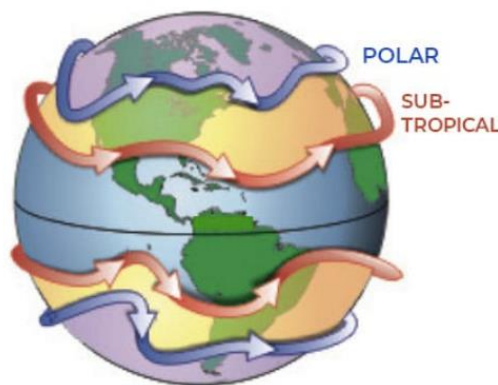


Fig. 4.8 Corrientes "Jet stream" [39]

En la aviación, se trata de un factor clave para ahorrar combustible y recortar el tiempo de vuelo. Según un estudio realizado [40], en un vuelo desde Los Ángeles a Tokio-Haneda, volar a través de un "jet stream" con el aire en contra significa un tiempo de vuelo de 12 horas y 45 minutos y un consumo de combustible estimado de 94.800 kg. Por lo contrario, si se desvía la ruta, a pesar de volar 123 millas náuticas más, se evita la corriente de aire, reduciendo 1 hora y 20 minutos el tiempo de vuelo y casi 10 toneladas de combustible. Este estudio demuestra la importancia que supone tener en cuenta el viento para conseguir una mejor eficiencia en el tráfico aéreo.

No obstante, estas corrientes, al introducir variabilidad en los tiempos de vuelo, tienen un impacto en las previsiones de tráfico aéreo. Cuando se vuela a favor del viento, los vuelos llegan antes de lo programado, generando un aumento en la demanda. En cambio, volar en contra del viento provoca llegadas más tardías, pudiendo generar un aumento en la demanda en el momento de la llegada

Y a pesar de que las aerolíneas analizan minuciosamente toda la información meteorológica, como mapas aeronáuticos significativos, METAR, TAF y otras informaciones aeroportuarias relevantes para elaborar cada plan de vuelo, la inestabilidad meteorológica altera las previsiones en cierta medida [42].

➤ Estudio

Como se aprecia en la figura 4.8, los "jet streams" generalmente siguen una trayectoria más o menos horizontal de oeste a este. Por ello, una primera ruta de interés para el análisis son los vuelos desde Estados Unidos a España, como el trayecto de Los Ángeles (KLAX) a Barcelona (LEBL) y viceversa.

En los dos gráficos siguientes se presentan los vuelos de la segunda mitad de agosto de 2023 que siguieron esta ruta. En ellos se detalla la duración en minutos, tanto la prevista inicialmente como la real.

Como se mencionó anteriormente, las aerolíneas consideran las condiciones meteorológicas al diseñar el plan de vuelo, evidenciándose, por ejemplo, una menor duración en los vuelos con destino a Barcelona debido a dirigirse hacia el este. Sin embargo, a pesar de este factor, la inestabilidad atmosférica continúa generando variabilidad en los tiempos de vuelo.

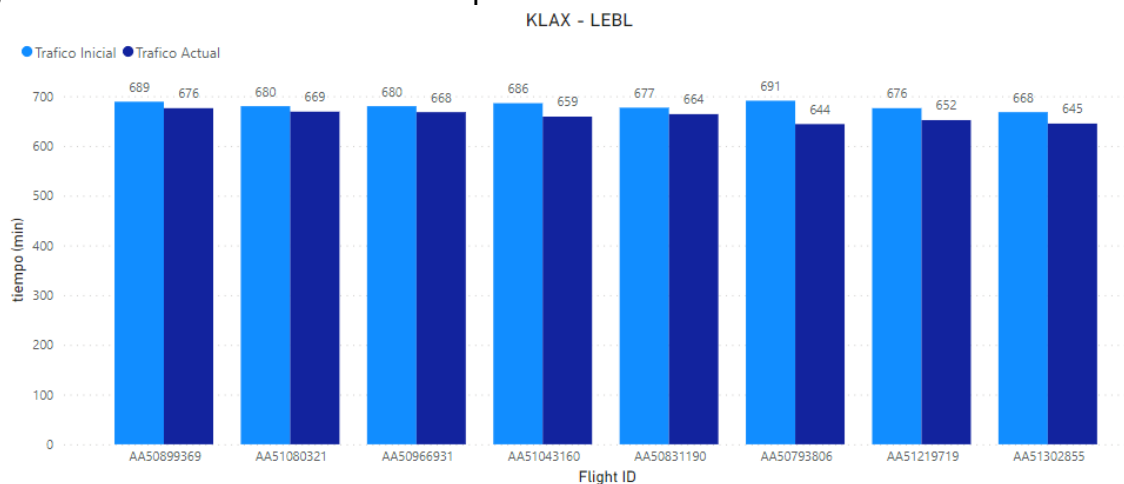


Fig. 4.9 Vuelos con ruta KLAX-LEBL [48]

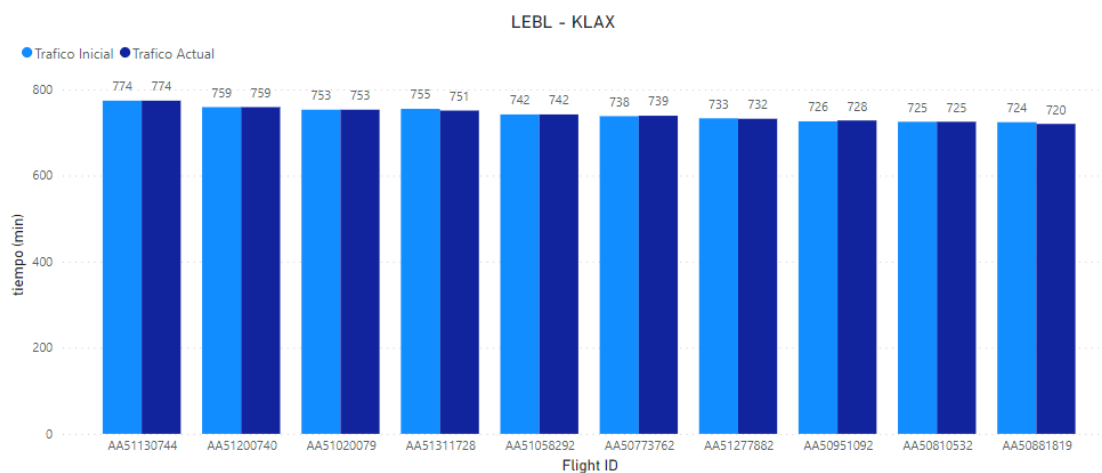


Fig. 4.10 Vuelos con ruta LEBL-KLAX [48]

Se observa que en los vuelos con dirección oeste (LEBL-KLAX), las aerolíneas suelen acertar con precisión la duración prevista del vuelo. Esto se debe a que, al enfrentarse al viento en contra, se elige una ruta que evite la corriente de aire, manteniendo el vuelo en condiciones "estándares". En contraste, en los vuelos hacia el este, como aprovechan de los vientos favorables, debido a la naturaleza inestable de este fenómeno, se observa como las aerolíneas no aciertan con las previsiones. A pesar de esperar una duración menor, la real es aún más reducida, siendo aproximadamente 20 minutos menos en todos los vuelos.

Es importante señalar que esta tendencia no siempre se seguirá, pero estos casos ejemplifican cómo se pueden identificar patrones de manera rápida.

A continuación, se presenta otro ejemplo que trata sobre cómo el fenómeno del "jet stream" afecta directamente a la velocidad del avión, ya que la duración del vuelo al final es un efecto indirecto del viento debido a que también intervine la distancia recorrida.

Para calcular la velocidad, se ha dividido la distancia recorrida entre la duración del vuelo.

Además, se ha aprovechado para hacerlo sobre vuelos que se vieron afectados por el "jet stream" entre Reino Unido y España, ya que al ser un caso no tan común se estudian los efectos. Y es en la primera imagen donde se muestra el mapa meteorológico de la corriente de aire prevista para el 19 de marzo de 2023, a las 1:00 LT.

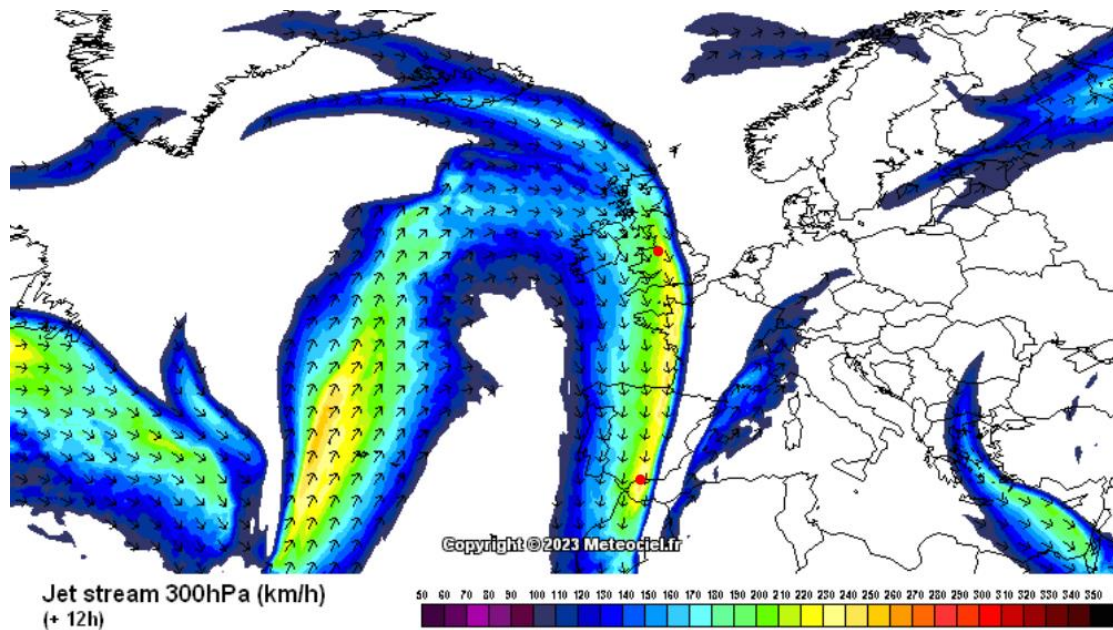


Fig. 4.11 Previsión "jet stream" del 19/03/2023 [43]

Así que se han seleccionado vuelos con origen en Liverpool (EGGP) y destino Málaga (LEMG), y viceversa, los cuales tuvieron que volar a través de las corrientes del "jet stream". En los dos gráficos siguientes, se presenta una comparativa de la velocidad media del vuelo, contrastando la velocidad prevista con la velocidad real en cada caso.

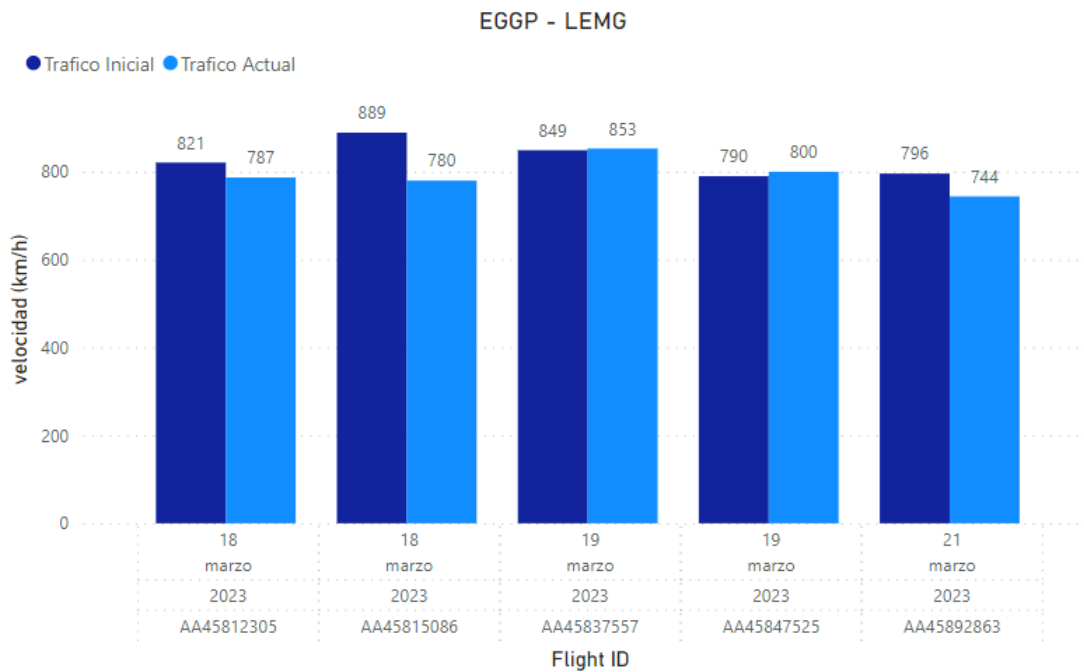


Fig. 4.12 Vuelos con ruta EGGP-LEMG [48]



Fig. 4.13 Vuelos con ruta LEMG-EGGP [48]

La primera observación, similar al caso anterior, es que las aerolíneas ya anticipan que la velocidad de vuelo será mayor (y la duración menor) en los vuelos de Liverpool a España (viento a favor). Sin embargo, se demuestra que estas previsiones no siempre son fiables.

En los vuelos de EGGP a LEMG, el día antes de la previsión del "jet stream", la velocidad media prevista era considerablemente alta, alrededor de un 25% superior a un vuelo en sentido contrario. No obstante, esta previsión resultó errónea, posiblemente por exagerar la influencia del viento, ya que ambos vuelos del 18 de marzo tuvieron una velocidad media menor, es decir, llegaron más tarde de lo previsto a Málaga. En el sentido contrario, se observa una situación similar, con una previsión de velocidad muy baja y que, en realidad, tuvieron una velocidad mucho mayor, es decir, llegaron antes a Liverpool.

En cambio, para el 19 de marzo, cuando la corriente de aire sí impactaba directamente, a pesar de que la previsión de velocidad también era alta en el caso de viajar a favor del viento y baja en contra del viento, para la ida a Málaga la velocidad real incluso superó la prevista, y para la ida a Liverpool, en uno de los dos vuelos fue aún más baja y en el otro ligeramente superior.

En resumen, se evidencia el impacto de las corrientes en los vuelos, generando volatilidad en las previsiones de velocidad del vuelo, y por ende a su duración. La complejidad de predecir con exactitud se debe tanto a la inestabilidad en las previsiones meteorológicas como a la dificultad para anticipar con fiabilidad cómo afectará exactamente el viento a la velocidad del vuelo, dado que su intensidad y dirección varían constantemente.

➤ Aplicación de la Inteligencia Artificial

Su aplicación sería muy similar al caso anterior. A partir del aprendizaje profundo con los datos históricos, se puede conseguir una previsión meteorológica más fiable, y, por lo tanto, previsiones y comportamientos más precisos de las corrientes de aire.

Las aerolíneas tendrían acceso a información menos volátil, por lo que sus planificaciones en las condiciones de vuelo estarían más ajustadas a la realidad, contribuyendo así a una gestión más eficiente y precisa.

4.2.3. Patrón de rutas desviadas o recortadas

➤ Descripción

Recortar rutas o desviarse de la prevista, es otro factor que puede alterar la demanda de tráfico aéreo, ya que se atraviesan puntos o sectores no planificados. Aunque los controladores evalúan cuidadosamente la viabilidad de estos recortes antes de autorizarlos, por lo que no generan cambios muy drásticos e inesperados.

La observación de patrones relacionados con las modificaciones de rutas puede ofrecer una previsión más realista sobre cuándo y en qué circunstancias se alteran las rutas, mejorando así la capacidad de anticipación y gestión del tráfico aéreo.

➤ Estudio

En primer lugar, es posible identificar desvíos en los vuelos en evolución, es decir, aquellos con aeropuerto origen o destino en la FIR de Barcelona. En estos casos, los vuelos pueden entrar o salir por un sector no previsto, o incluso pasar por el CTA cuando únicamente se esperaba que lo hicieran por el TMA.

Un primer ejemplo que presenta desvíos de rutas es el sector CCL, mayormente destinado a guiar los vuelos en descenso hacia Palma. Inicialmente, no se contempla que ningún vuelo originario de Palma ascienda a través de este sector, pero la realidad muestra lo contrario. El 27 de agosto de 2023, hasta 38 vuelos origen Palma que no estaban previstos que atravesaran el sector CCL si lo hicieron. Y a lo largo de todo el mes de agosto fueron hasta 141 vuelos los desviados.

En la siguiente imagen se muestran cómo fueron desviados algunos de los vuelos del día 27 de agosto (siendo la trayectoria roja la prevista y la verde la real).

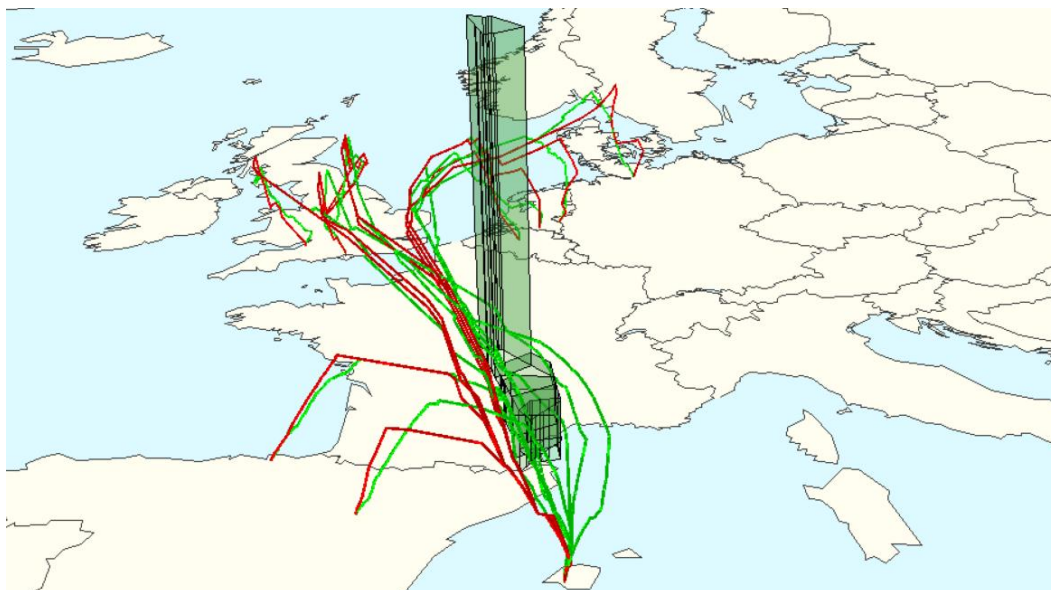


Fig. 4.14 Vuelos no previstos que atravesaran el sector CCL [48]

En segundo lugar, es necesario analizar los sobrevuelos, (aeropuertos de origen y destino no pertenecen a la FIR de Barcelona). Puede ocurrir que los vuelos atraviesen un sector no previsto o dejen de atravesarlo, debido a un recorte o desvío en la ruta.

Un ejemplo es en los vuelos que entran por el punto HAMRA, y posteriormente pasan por el sector LVU. Debido a un recorte en la ruta, finalmente evitan el sector. El 19 de junio de 2023, había 16 vuelos previstos que entrarán por HAMRA y luego pasarán por el LVU, pero finalmente solo pasaron 8. En la siguiente imagen se observa el recorte que se realizó en algunos de ellos.

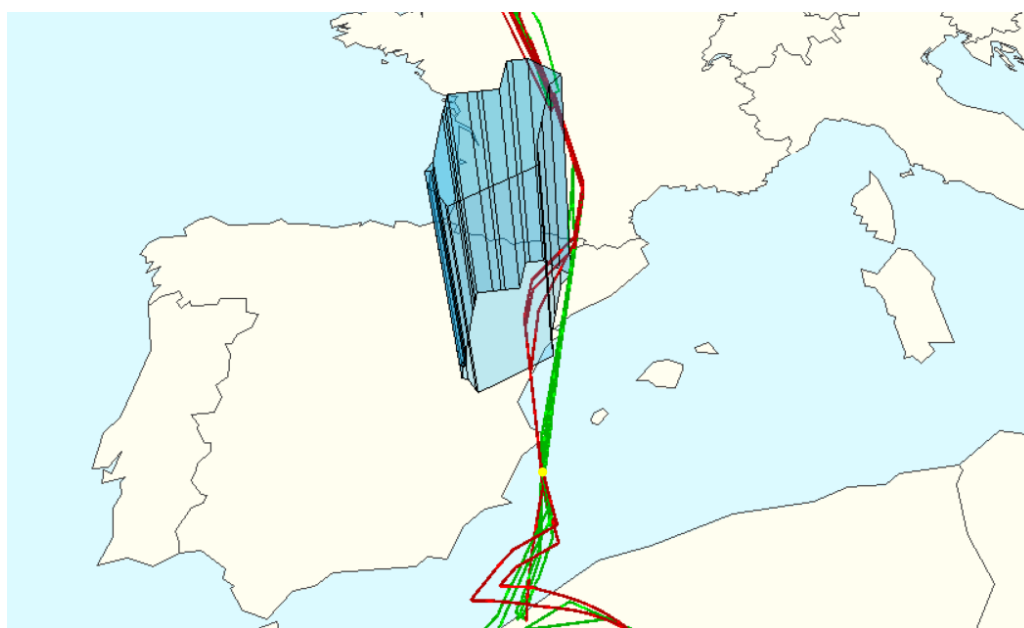


Fig. 4.15 Vuelos recortados que evitaron el sector LVU [48]

En todo el mes de junio, 181 vuelos de los 395 planificados (con esta ruta) siguieron un patrón similar, experimentando recortes o desvíos en la ruta.

Y otro ejemplo muy similar ocurre en los vuelos previstos que entrarán por el punto SADAF y posteriormente cruzarán el sector LVS. Varios de ellos fueron recortados al entrar, por lo que evitaron ese sector.

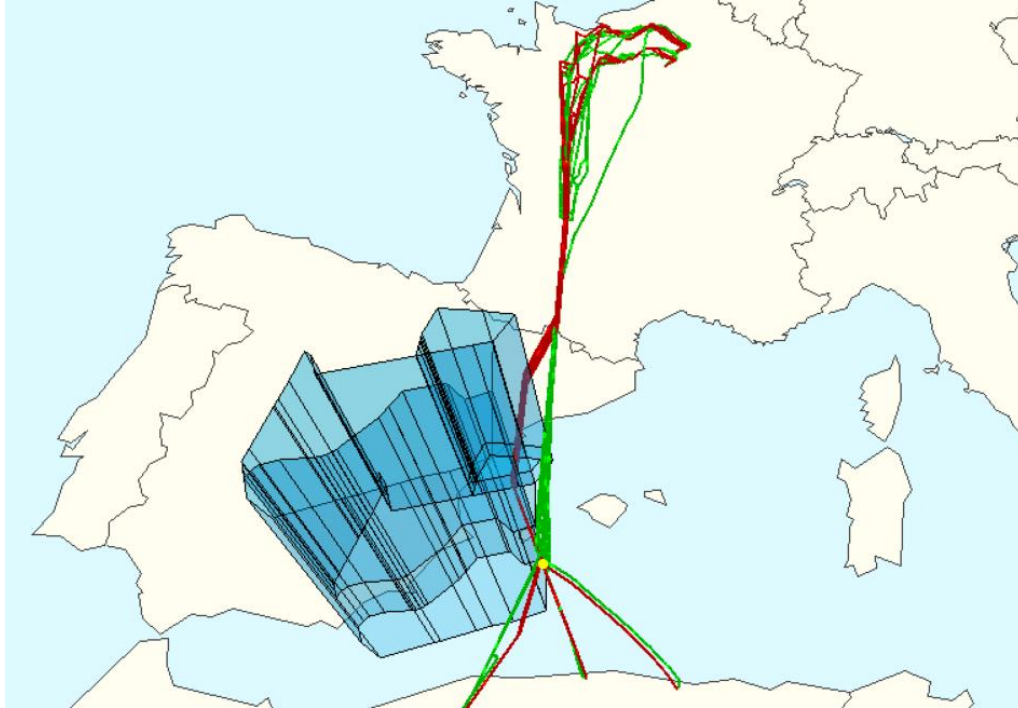


Fig. 4.16 Vuelos recortados que evitaron el sector LVS [48]

El 15 de julio de 2023, había 36 vuelos previstos que entrarán por SADAF y de estos, 30 (83% respecto al total), que cruzarán el LVS. Finalmente, por otros motivos, solo entraron 30 vuelos por SADAF y únicamente 13 (43% respecto al total) pasaron por el LVS.

En algunos casos, el recorte de rutas evitará un sector, sin pasar por ningún otro adicional, mientras que en otros casos, en su lugar, se van a atravesar sectores no previstos.

Como ya se nombra en otros apartados, un recorte de ruta provoca que se llegue antes a puntos y sectores posteriores. Sin embargo, este proceso no se trata de un problema significativo, ya que antes de llevar a cabo el recorte, el controlador aéreo encargado de gestionar el sector afectado es debidamente informado. A pesar de esta previsión y coordinación, los datos presentados demuestran cómo los recortes y desvíos contribuyen a la volatilidad de las previsiones en el tráfico aéreo.

➤ Aplicación de la Inteligencia Artificial

Nuevamente, el Aprendizaje Automático (Machine Learning) sería de gran utilidad. Estos algoritmos tienen la capacidad de analizar extensos volúmenes de datos y descubrir relaciones y estructuras subyacentes. Un tipo de algoritmo particularmente adecuado para solucionar este desafío sería el de agrupamiento (similar al aprendizaje no supervisado), el cual se utiliza para identificar grupos o "clusters" en conjuntos de datos no etiquetados. Por ejemplo, en el análisis de mercado, un algoritmo de agrupamiento podría identificar distintos tipos de clientes en función de sus características y comportamientos [32].

Esta idea trasladada al control de tráfico aéreo, serviría para aprender en que momentos y circunstancias se producen los recortes y desvíos en las trayectorias de los vuelos, obteniendo una previsión más próxima a la realidad.

4.2.4 Coordinación entre aerolíneas y Servicios de tráfico aéreo (ATS)

➤ Descripción

El desafío de trabajar con previsiones volátiles, como se ha explicado, genera demoras significativas en los vuelos. Sin embargo, lo más problemático es que se trata de un proceso que se retroalimenta. En otras palabras, retrasar un vuelo mediante la aplicación de regulaciones implica que, tarde o temprano, deberá ser gestionado, alterando de nuevo las previsiones.

Esto conlleva que la aerolínea tenga que ajustar su plan de vuelo, enviarlo nuevamente y proporcionar nueva información a los controladores aéreos. Este ciclo continuo de adaptaciones genera una complejidad adicional en la gestión del tráfico aéreo.

➤ Estudio

A medida que llega toda la información de los nuevos planes de vuelo, las previsiones experimentan cambios, y lógicamente, estos cambios se intensifican con un mayor volumen de tráfico. Si un vuelo demorado se encuentra a una distancia considerable, aún existe margen de maniobra antes de que ingrese al espacio aéreo en cuestión. Sin embargo, si el vuelo está cercano, la actualización del nuevo plan de vuelo generará cambios demasiado próximos en la previsión de tráfico.

Por lo tanto, si la cantidad de tráfico vuelve a ser excesiva, será necesario aplicar nuevamente regulaciones, lo que generará más demoras en los vuelos y aumentará la volatilidad en las previsiones futuras. Este proceso se convierte en un ciclo cerrado sin un final claro. La complejidad se incrementa a medida que los ajustes en tiempo real interactúan con la dinámica del tráfico aéreo, creando un desafío continuo en la gestión eficiente del espacio aéreo.

Actualmente, con el objetivo de descongestionar el tráfico aéreo, es posible realizar intercambios simples entre dos vuelos. Estos intercambios ayudan a las

compañías aéreas a priorizar determinados vuelos en función de la estructura de costes de los vuelos, a fin de minimizar los costes y reducir los retrasos de los pasajeros. Por lo tanto, para las compañías aéreas, la asignación (y el intercambio) de estas franjas horarias de vuelo constituyen un problema de costes crítico. Pero una limitación importante, es que la estructura de costes de los vuelos se trata de información confidencial, que en la mayoría de los casos las aerolíneas no desean compartir entre ellas, lo que dificulta el intercambio de franjas horarias [47].

➤ Aplicación de la Inteligencia Artificial

El papel de la Inteligencia Artificial (IA) aparece a en momento de realizar intercambios en la asignación de vuelos para tratar de equilibrar la demanda de tráfico aéreo.

Existe un proyecto llamado "SlotMachine" que realiza una tarea similar. A través de una interfaz gráfica, los usuarios del espacio aéreo pueden ingresar sus preferencias de vuelo de manera segura, junto con datos de respaldo. Estos datos se envían al optimizador heurístico del sistema, donde se aplican algoritmos a la información combinada para encontrar soluciones cada vez más efectivas en la priorización de vuelos. Finalmente, la herramienta de privacidad de la plataforma evalúa estas listas de vuelo, contribuyendo a determinar la mejor opción.

Las simulaciones han demostrado la efectividad de esta tecnología en la determinación de la secuencia óptima de vuelos para las aerolíneas, al mismo tiempo que protege información confidencial. El éxito del proyecto establece las bases para continuar desarrollando lo que podría convertirse en un elemento esencial en la gestión del tráfico aéreo. Un mercado confiable y eficaz para intercambiar franjas horarias promoverá un uso más eficiente de los recursos disponibles, contribuyendo a la mayor eficiencia de las aerolíneas y reduciendo emisiones y retrasos [47].

CAPÍTULO 5. DESAFÍOS Y LIMITACIONES

5.1 Desafíos actuales

En este apartado, se explicarán más los desafíos en los que se trabaja actualmente. La implementación de la inteligencia artificial se encuentra en pleno auge, con numerosos proyectos ya en marcha que buscan maximizar los beneficios de la IA y por eso se describen algunos de estos proyectos en curso.

Como se nombra anteriormente, a medida que los viajes aéreos continúan creciendo, el reto de administrar el tráfico aéreo de manera segura y eficiente se vuelve cada vez más complejo. Para hacer frente a ello, se está trabajando con sistemas basados en IA, que tienen el potencial de mejorar la precisión y la velocidad del control y la gestión del tráfico aéreo, así como de reducir la carga de trabajo de los controladores de tráfico aéreo.

A pesar de algunas dificultades que van apareciendo en los siguientes desafíos, muchos expertos trabajan sin descanso para que los sistemas de control y gestión del tráfico aéreo basados en IA sean el camino hacia el futuro y así poder administrar el tráfico aéreo de manera segura y eficiente.

➤ **Mejora en la precisión de las previsiones de tráfico mediante la IA**

Uno de los desafíos que podría servir para respaldar o como la continuación de este trabajo, es un proyecto de Eurocontrol. Consiste en mejorar la precisión de las previsiones de tráfico mediante la aplicación inteligente de la IA. [35]

Se considera que aplicando cuidadosamente las nuevas técnicas de aprendizaje automático (machine learning) se puede reducir la creciente volatilidad del tráfico aéreo. El motivo por el que se produce se atribuye a la creciente imprevisibilidad de la industria, que se vuelve más propensa a cambios repentinos debido a turbulencias de índole industrial, económica y ambiental. Aunque afirman tener una mejor comprensión de los patrones clave que proporcionan indicaciones de la demanda futura.

Con la ayuda de nuevas técnicas de inteligencia artificial (IA) y las mejoras asociadas en la comprensión de la dinámica del tráfico aéreo, se logra una mayor capacidad para mejorar la precisión de los pronósticos, a través de pequeñas pero constantes mejoras.

Durante los últimos años, la IA ha dotado a Eurocontrol con un conjunto de nuevas herramientas altamente predictivas. Por ejemplo, una de ellas es XGBoost, un método de aprendizaje conjunto que se basa en un potente algoritmo que impulsa el aprendizaje rápido a través de computación paralela, ofreciendo un uso eficiente de la memoria. Sin embargo, explican que se intentó aplicar esta técnica para mejorar los pronósticos de tendencias de sobrevuelo y los resultados fueron decepcionantes.

Les queda mucho trabajo por delante, pero aseguran que cuando la IA funciona, los resultados son impresionantes.

➤ **Aplicación de la IA en un espacio aéreo urbano**

Otro ejemplo es un proyecto de la NASA, destinado a facilitar el control aéreo en un espacio aéreo urbano. [33] Se quiere que la inteligencia artificial llegue a las torres de control para que ejerza de controlador aéreo en las ciudades y lugares complicados para volar.

Por eso aparece el proyecto Data & Reasoning Fabric (DRF) de la NASA, destinado a ayudar a gestionar el espacio aéreo urbano y permitir la integración de una gran cantidad de aeronaves en él sin saturarlo.

DRF es un sistema basado en IA capaz de procesar y distribuir datos en tiempo real a cada una de las aeronaves que esté volando en la ciudad, gestionando el espacio aéreo y permitiendo el vuelo seguro dentro de la ciudad. En resumen, un sistema automatizado y autónomo de control aéreo que solamente necesitaría ser supervisado por controladores aéreos. Se prevé que, a corto plazo, se realice la primera prueba en un área urbana simulada, modelada en el área metropolitana de Phoenix (Arizona).



Fig. 5.1 Escenario futuro del proyecto DRF [33]

Este escenario podrá ayudar a los proveedores de datos y servicios de apoyo a la toma de decisiones y a comprender mejor las necesidades de los futuros usuarios del espacio aéreo.

➤ **Implementación de una constelación de satélites para mejorar la gestión del tráfico aéreo**

Startical, una compañía creada por ENAIRE e Indra, buscará desarrollar y poner en órbita una constelación de satélites con el objetivo de mejorar la gestión del tráfico aéreo [34]. De este proyecto se espera que sea un hito significativo en la gestión de vuelos, confiando en que marcará un antes y un después en este ámbito.

La iniciativa consiste en el despliegue de pequeños satélites diseñados para ofrecer servicios de vigilancia y comunicación, focalizándose especialmente en áreas remotas y oceánicas, que con los sistemas de navegación aérea actuales carecen de cobertura. La propuesta tecnológica presentada es pionera a nivel mundial, ya que ofrecerá soluciones de última generación, muy diferenciales, en comunicación entre satélites al contar con capacidades avanzadas de Inteligencia Artificial y Big Data.

Otro propósito de esta innovación, es aliviar la congestión del espacio aéreo en áreas saturadas, con la expectativa de facilitar la labor de los controladores aéreos, incrementando la seguridad, capacidad, eficiencia y puntualidad de los vuelos. Además, se prevé que esta iniciativa contribuya a la reducción de emisiones de CO₂ a nivel global, estimándose una disminución de 13 millones de toneladas al año para el horizonte temporal de 2030.

Pero, estas propuestas de mejora tienen que ser capaces de garantizar que los sistemas basados en IA sean seguros y confiables. Dado que los sistemas de IA se utilizan cada vez más para gestionar el tráfico aéreo, existe el riesgo de que actores malintencionados utilicen el sistema de IA para interrumpir el tráfico aéreo. Para evitar esto, los sistemas de IA deben probarse y monitorearse exhaustivamente para garantizar su fiabilidad.

5.2. Limitaciones existentes

➤ **Coste económico**

Un primer aspecto que puede suponer una limitación es enfrentarse al coste de la tecnología puntera necesaria. La introducción de sistemas de gestión y control del tráfico aéreo basados en satélites y alimentados por inteligencia artificial puede entrañar costos considerables, requiriendo inversiones sustanciales tanto en hardware como en software.

Además, se suma el costo asociado a la formación de los controladores de tránsito aéreo para familiarizarse con el sistema de inteligencia artificial y garantizar que se sientan cómodos con él. Por lo tanto, es de gran importancia buscar un equilibrio entre la reducción de costos operativos y los gastos en nueva tecnología, procurando optimizar al máximo la implementación de la inteligencia artificial [36].

➤ **Habilidades cognitivas**

La automatización de tareas cognitivas está experimentando un avance más rápido que las tareas manuales. Sin embargo, en el caso del ATM, que se caracteriza por ser un sistema socio-técnico altamente complejo, con interacciones entre humanos, entre humanos y máquinas, así como entre las propias máquinas, la situación no es tan simple. Por lo que surge la siguiente pregunta: ¿Es posible que una máquina reemplace a un ser humano?

Tomislav Radišić, profesor en la Universidad de Zagreb, argumenta que, aunque ciertas tareas pueden ser automatizadas, los humanos desempeñan roles mucho más amplios y complejos. También sostiene que la inteligencia artificial se encontraría dificultades al intentar lidiar con las tareas complicadas que los controladores aéreos realizan. Sin embargo, plantea la idea de que la IA podría beneficiarse al comprender estos aspectos humanos, sugiriendo que "los humanos, por lo general, comprenden bastante bien a las máquinas, por lo que estas deberían reciprocarse ese entendimiento" [37].

➤ **Regulaciones impuestas**

Aparte de encontrar el método de implementar a IA en el Control de Tráfico Aéreo (ATC), los sistemas se deben implantar de manera segura. La gestión de datos es un reto a nivel técnico, ya que es necesario ser capaz de manejar toda esta información para incorporarla eficazmente en todos los procedimientos. [37]

EASA, en colaboración con AESA y otros organismos estatales, ha estado discutiendo reglamentaciones para clasificar estos sistemas de IA y, en función de ellos, repartir responsabilidades, atendiendo al riesgo y la complejidad.

➤ **Ética en la IA**

Por último, pero no menos importante, es necesario que la IA sea aceptada por la sociedad. Se trata de una tecnología estratégica; en la Unión Europea, solamente en esta década, entre fondos públicos y privados, se han invertido más de 20 mil millones de euros. Para que este gasto cobre sentido, se debe establecer confianza, integrar la dimensión ética, prepararse para la certificación y ver qué protocolos seguir para su implementación. [37]

En el contexto europeo, la confianza se consigue asegurando que las tecnologías sean lícitas (normativas), éticas y robustas (que respondan a lo que se espera de ellas).

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Tras estudiar con detalle cómo están compuestos los servicios de navegación aérea, la estructura del espacio aéreo y como es gestionado el tráfico actualmente, se han propuesto ideas, para, a partir de la Inteligencia Artificial, atenuar un problema actual, que es la volatilidad en las previsiones de tráfico aéreo.

El primer objetivo del trabajo era conseguir mejorar tanto la eficiencia y seguridad en la navegación aérea, trabajando de forma más optimizada con la aplicación de la IA. Por ello, tras analizar el escenario actual, se ha comprobado como un limitante principal de la eficiencia aérea es el hecho de no tener previsiones de tráfico fiables. Por eso, con el creciente aumento de la demanda aérea, y, por ende, de las demoras en los vuelos, era un punto crucial que intentar mejorar.

Investigando sobre el problema en cuestión y basándome en los conocimientos obtenidos durante prácticas curriculares realizadas a ENAIRE, se han señalado los principales factores que generan esa variabilidad en las previsiones de demanda. Para cada uno de ellos, se explica el caso y se estudia, en medida de lo posible, el impacto real que tiene en las previsiones. Esto se realiza con datos proporcionados por Eurocontrol, tratando de desarrollar la idea en cuestión.

Se han buscado diversos patrones asociados a la falta de fiabilidad en las previsiones meteorológicas que han dado lugar a varias regulaciones debido a condiciones meteorológicas, así como a cambios en la velocidad de vuelo debido a corrientes de viento, afectando la duración de los vuelos. También se han investigado patrones en desvíos y recortes de las rutas de vuelo, lo que sin duda altera la previsión. Y finalmente, se analiza el impacto de reasignar de manera no inteligente los vuelos demorados, generando una variabilidad continua en las previsiones. Al encontrar información relevante, se proponen ideas o métodos ya existentes, para implementar la Inteligencia Artificial, lo que podrá servir como primera solución al desafío de la volatilidad.

En resumen, este trabajo puede servir para abordar la implementación teórica de un algoritmo inteligente, pensado como herramienta de apoyo en el control del tráfico aéreo, lo que podría proporcionar información de una forma mucho más precisa y fiable a la actual. Conseguir eso, sería crucial para mejorar la planificación y gestión del tráfico aéreo, ya que ayudaría a reducir los minutos de demora generados y evitaría momentos que ponen en riesgo la seguridad aérea, como pueden ser escenarios con picos de tráfico a controlar.

Por ello, el trabajo a futuro sería intentar implementar ese algoritmo, siendo esta la única forma de comprobar con certeza la eficacia de los métodos propuestos para reducir la volatilidad de las previsiones y aumentar la eficiencia y seguridad aérea.

REFERENCIAS

- [1] El Orden Mundial [@elOrdenMundial]. (2019, 27 de mayo). Tweet. Consultado el 10/10/2023. Disponible en: <https://twitter.com/elOrdenMundial/status/1133043984824229890>
- [2] AENA. "AIP España: ENR 2.1 - Regiones de Información de Vuelo (FIR/UIR)". Consultado el 10/10/2023. Disponible en: https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/ENR/LE_ENR_2_1_en.pdf
- [3] ENAIRE. "Memoria 2020". Consultado el 23/10/2023. Disponible en: [Memoria \(enaire.es\)](http://enaire.es)
- [4] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. "Organismos Internacionales - EASA". Consultado el 25/10/2023. Disponible en: <https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/organismos-internacionales/easa>
- [5] UPM. (2020, junio). TFM_Alberto_Rubio_Sobrino.pdf. Consultado el 10/12/2023. Disponible en: https://oa.upm.es/63643/1/TFM_Alberto_Rubio_Sobrino.pdf
- [6] ENAIRE. "Memoria 2020". Consultado el 25/10/2023. Disponible en: [memoria_2020 \(enaire.es\)](http://enaire.es/memoria_2020)
- [7] Cynoteck. "What is Artificial Intelligence?". Consultado el 02/11/2023. Disponible en: <https://cynoteck.com/es/blog-post/what-is-artificial-intelligence/>
- [8] Neiva, F. (2014). Economic Efficiency of Air Navigation Service: An in-depth Study. Semanticscholar. Consultado el 06/11/2023. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Economic-Efficiency-of-Air-Navigation-Service-An-in-Neiva/950df51bf9fe687c07cca0a2d43086466d21d001>
- [9] TS2 Space. (2023, 30 de abril). El potencial de la IA en el control y la gestión del tráfico aéreo por satélite [Artículo web]. Consultado el 04/11/2023. Disponible en: <https://ts2.space/es/el-potencial-de-la-ia-en-el-control-y-la-gestion-del-trafico-aereo-por-satelite/#gsc.tab=0>
- [10] Iberdrola. (s.f.). Machine Learning (Aprendizaje Automático) [Artículo web]. Consultado el 03/11/2023. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/innovacion/machine-learning-aprendizaje-automatico>
- [11] Calderón, D. (2018). "Machine Learning y Big Data: Aplicación en la gestión del tráfico aéreo" [Documento PDF]. Universidad de Vigo. Consultado el 02/11/2023. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es:8080/api/core/bitstreams/fee59149-de72-4805-ac2b-b8420eb755a2/content>
- [12] IBM. (s.f.). Computer Vision. Consultado el 4/11/2023. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/computer-vision>

- [13] IBM. (s.f.). Procesamiento del lenguaje natural. Consultado el 4/11/2023. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/natural-language-processing>
- [14] Telefónica. (s.f.). Usos y aplicaciones de la inteligencia artificial en robótica. Consultado el 4/11/2023. Disponible en: <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/usos-y-aplicaciones-de-la-inteligencia-artificial-en-robotica/>
- [15] OneAir. (s.f.). ¿Qué es el espacio aéreo? [Sitio web]. Consultado el 10/11/2023. Disponible en: https://www.oneair.es/que-es-el-espacio-aereo/#cta_controlled_terminal_area
- [16] Aprocta. (s.f.). La Profesión. Consultado el 10/11/2023. Disponible en: <https://www.aprocta.es/la-profesion/>
- [17] ENAIRE. "Servicios de Tránsito Aéreo (ATS) - Control de Tráfico Aéreo (ATC)". Consultado el 11/11/2023. Disponible en: https://www.enaire.es/servicios/atm/servicios_de_transito_aereo_ats/control_de_trafico_aereo_atc
- [18] ENAIRE. (s.f.). Servicio de Información de Vuelo (FIS). Consultado el 15/11/2023. Disponible en: https://www.enaire.es/servicios/atm/servicios_de_transito_aereo_ats/servicio_de_informacion_de_vuelo_fis
- [19] ENAIRE. (s.f.). Alerta. Consultado el 15/11/2023. Disponible en: https://www.enaire.es/publico/servicios/atm/servicios_de_transito_aereo_ats/alerta
- [20] Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA). (s.f.). Proveedores de Servicios y Funciones de Navegación Aérea. Consultado el 16/11/2023. Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/proveedores-de-servicios-y-funciones-de-navegacion-aerea/servicios-y-funciones>
- [21] ENAIRE. (2022, 3 de noviembre). AIP España: LE_GEN_3_6_en.pdf. Consultado el 17/11/2023. Disponible en: https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/GEN/LE_GEN_3_6_en.pdf
- [22] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2009, 4-8 de mayo). Workshop on the Development of a National Performance Framework for the ANS. [Documento PDF] Consultado el 19/11/2023. Disponible en: https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/Workshop_DEV_NPF_AN_SYS/ne%206%20qans.pdf
- [23] Jiménez Fernández, F. J. (2015, octubre). Implementación de un prototipo de Sistema de Vigilancia Automática Dependiente-Broadcast para vehículos no tripulados. [Documento PDF] Consultado el 19/11/2023. Disponible en: https://oa.upm.es/38212/7/PFC_FRANCISCO_JAVIER_JIMENEZ_FERNANDEZ_2.pdf

[24] Serrano Mira, L. (2020, julio). Desarrollo de un sistema de vigilancia basado en tecnología ADS-B. Consultado el 22/11/2023. [Documento PDF] Disponible en: https://oa.upm.es/76503/3/TFM_LIDIA_SERRANO_MIRA.pdf

[25] Controladores Aéreos. (2016, 25 de mayo). Cómo se divide y organiza el espacio aéreo (FIR/CTA/TMA/ATZ). [Video]. Consultado el 02/12/2023. Disponible en: <http://www.controladoresaereos.org/2016/05/25/como-se-divide-y-organiza-el-espacio-aereo-firctrmtaatzcta-video/>

[26] IVAO España. (s.f.). Información sobre controladores de tráfico aéreo. Consultado el 28/11/2023. Disponible en: <https://es.ivao.aero/?module=assets&page=infoATC&id=36>

[27] IVAO España. (s.f.). Espacios Aéreos: Tipos. Consultado el 28/11/2023. Disponible en: <https://wiki.es.ivao.aero/books/2-private-pilot-pp/page/espacios-aereos-tipos>

[28] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (s.f.). Espacio aéreo. Recuperado el 30/11/2023. [Documento PDF] Disponible en: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/pdf/A73A8869-E2A3-4CFE-BD30-69C40D40DFBE/67795/3_Espacio_aereo.pdf

[29] AENA. (s.f.). ENR_Peninsula_Inferior_VIGOR. Recuperado el 30/11/2023. [Documento PDF] Disponible en: https://aip.enaire.es/contenido_cartasInsigniaImpresas/ENR_Peninsula_Inferior_VIGOR.pdf

[30] Eurocontrol. (s.f.). Collaboration Human-Machine Interface. Consultado el 27/12/2023. Disponible en: <https://www.eurocontrol.int/tool/collaboration-human-machine-interface>

[31] Eurocontrol. (s.f.). Traffic Counts. Consultado el 27/12/2023. Disponible en: https://www.nm.eurocontrol.int/HELP/Traffic_Counts.html

[32] Canal Innova. (s.f.). Reconocimiento de Patrones: La Magia del Machine Learning. Consultado el 16/01/2024. Disponible en: <https://canalinnova.com/reconocimiento-de-patrones-la-magia-del-machine-learning/>

[33] Sandglass Patrol. (2023, 5 de marzo). Movilidad Aérea Urbana: La NASA ensaya tecnología de gestión tráfico aéreo basada en IA. Consultado el 15/01/2024. Disponible en: [Movilidad Aérea Urbana: La NASA ensaya tecnología de gestión tráfico aéreo basada en IA - Sandglass Patrol](#)

[34] startical.com. (s.f.). Gestión del tráfico aéreo. Consultado el 15/01/2024. Disponible en: [Gestión del tráfico aéreo \(startical.com\)](#)

[35] EUROCONTROL. (s.f.). Improving forecast accuracy through the intelligent application of AI. Consultado el 15/01/2024. Disponible en: [Improving forecast accuracy through the intelligent application of AI | EUROCONTROL](#)

[36] Mazzima. (s.f.). ¿Por qué la IA no va a quitarte el trabajo? Consultado el 16/01/2024. Disponible en: <https://www.mazzima.com/por-que-la-ia-no-va-a-quitarte-el-trabajo/>

[37] Controladores Aéreos. (2023, 14 de junio). La inteligencia artificial (IA) en la gestión del tráfico aéreo. Consultado el 16/01/2024. Disponible en: <https://controladoresaereos.es/la-inteligencia-artificial-ia-en-la-gestion-del-traffic-aereo/>

[38] La Vanguardia. (2023, 5 de julio). La inteligencia artificial integra la meteorología. Consultado el 21/01/2024. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/ciencia/20230705/9089676/inteligencia-artificial-integra-meteorologia.html>

[39] Aertec Solutions. (s.f.). Corrientes en chorro. Consultado el 24/01/2024. Disponible en: <https://aertecsolutions.com/2023/11/03/corrientes-en-chorro/>

[40] Aviación Global. (s.f.). El jet stream. Consultado el 24/01/2024. Disponible en: <https://www.aviacionglobal.com/articulos-tecnicos-de-aviacion/el-jet-stream/>

[41] Aemetblog. (2019, 25 de octubre). Asesoramiento meteorológico en los centros de control de área: nuevo servicio AEMET. Consultado el 22/01/2024. Disponible en: [Asesoramiento meteorológico en los centros de control de área: nuevo servicio AEMET | Aemetblog](#)

[42] tiempo.com. (2018, 15 de marzo). Los fuertes vientos también afectan a nuestros vuelos. Consultado el 22/01/2024. Disponible en: [Los fuertes vientos también afectan a nuestros vuelos \(tiempo.com\)](#)

[43] meteovigo.es. (2023, 18 de marzo). Así se retuerce el Jet Stream en estos momentos sobre España. Consultado el 25/01/2024. Disponible en: [Así se retuerce el Jet Stream en estos momentos sobre España \(meteovigo.es\)](#)

[44] Consultado 04/01/2024. Disponible en: Manual operativo LECB de ENAIRE.

[45] Consultado el 25/11/2023. Disponible en: Proyecto BRAIN de ENAIRE

[46] Cazatormentas. (2017, 26 de octubre). La inteligencia artificial está siendo aplicada con éxito a la meteorología. Consultado el 24/01/2024. Disponible en: <https://cazatormentas.com/la-inteligencia-artificial-esta-siendo-aplicada-con-exito-a-la-meteorologia/>

[47] CORDIS. (2022, 7 de octubre). "La asignación de vuelos impulsada por IA reduce costos y retrasos". Consultado el 29/01/2024. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/442208-ai-powered-flight-allocation-cuts-costs-and-delays/es>

[48] Información extraída de NEST, Eurocontrol