

“



# Análisis de la demora a través de metodologías de Big data aplicado al aeropuerto de Barcelona

Alejandro Martín Iglesias

29 de agosto de 2024



# Agradecimientos

## Institutional

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Álvaro Rodríguez Sanz, mi tutor en este proyecto. Su guía, experiencia y apoyo han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Gracias a su orientación, he podido combinar de manera innovadora el estudio de datos técnicos aeronáuticos con las técnicas de big data, abriendo nuevas perspectivas en el análisis de operaciones aeroportuarias. Asimismo, agradezco a la Universidad Europea de Madrid por proporcionar los recursos y el entorno académico necesarios para llevar a cabo esta investigación. La calidad de la formación y el apoyo institucional han sido cruciales para el éxito de este proyecto.

## Personal

A Lu por estar siempre a mi lado y saber que siempre voy a poder contar contigo. Mucha gracias por aguantar todas esas tardes pegado al ordenador sin moverme. Se de sobra que siempre será así. No me olvido de mis antiguos compañeros de Ineco del equipo Atenea que me abrieron las puertas a este mundo, nunca me olvidaré de vosotros.



# Resumen

Este estudio presenta un análisis integral de las operaciones aéreas en el aeropuerto de Barcelona-El Prat (LEBL), una de las infraestructuras aeroportuarias más importantes de Europa. La investigación abarca múltiples aspectos críticos de la gestión aeroportuaria, incluyendo la unificación de bases de datos heterogéneas, el análisis de patrones de vuelo, la evaluación de la capacidad y demanda, el estudio de las escalas aeroportuarias, y la identificación de factores que influyen en la puntualidad de las operaciones. Mediante el uso de técnicas avanzadas de procesamiento de datos y análisis estadístico, este trabajo busca proporcionar una comprensión profunda de la dinámica operativa de LEBL. El estudio no solo ofrece una caracterización detallada de las operaciones actuales, sino que también sienta las bases para futuras mejoras en la eficiencia y la toma de decisiones estratégicas. Los resultados de esta investigación tienen implicaciones significativas para la optimización de recursos, la planificación de capacidad y la mejora de la experiencia de los pasajeros en el aeropuerto de Barcelona.



# Abstract

This study presents a comprehensive analysis of air operations at Barcelona-El Prat Airport (LEBL), one of Europe's most significant airport infrastructures. The research encompasses multiple critical aspects of airport management, including the unification of heterogeneous databases, analysis of flight patterns, assessment of capacity and demand, study of airport layovers, and identification of factors influencing operational punctuality. Through the use of advanced data processing techniques and statistical analysis, this work aims to provide a deep understanding of LEBL's operational dynamics. The study not only offers a detailed characterization of current operations but also lays the groundwork for future improvements in efficiency and strategic decision-making. The results of this research have significant implications for resource optimization, capacity planning, and enhancing passenger experience at Barcelona Airport.



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	1
1.2. Metodología . . . . .	2
1.3. Alcance . . . . .	3
1.4. Estructura del documento . . . . .	4
<b>2. Descripción del aeropuerto de aplicación</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción . . . . .	5
2.2. Entorno ATM . . . . .	6
2.2.1. Descripción del modo de operación . . . . .	7
2.2.2. Distribución de las configuraciones operativas . . . . .	8
2.3. Relación Capacidad - Demanda . . . . .	9
<b>3. Análisis Exploratorio</b>	<b>11</b>
3.1. Análisis meteorológico . . . . .	11
3.1.1. Velocidad del Viento . . . . .	13
3.1.2. Dirección del Viento . . . . .	17
3.2. Descripción del tipo de operación . . . . .	21
3.2.1. Clase de tráfico y servicio . . . . .	23
3.2.2. Clase de operación según origen y destino . . . . .	24
3.2.3. Categoría de estela turbulenta y modelos de aeronave . . . . .	28
3.2.4. Estudio de Asientos y Pasajeros. Ratio de ocupación . . . . .	32
3.2.5. Resumen de Hipótesis . . . . .	35
<b>4. Variables derivadas a través de metodologías de Big Data</b>	<b>37</b>
4.1. Estudio de la demanda . . . . .	38
4.1.1. Estudio de la Demanda/Horaria Real . . . . .	38
4.1.1.1. Análisis descriptivo de las series temporales . . . . .	40
4.1.1.2. Análisis porcentual de los períodos . . . . .	43
4.1.2. Análisis de demanda real frente a demanda prevista . . . . .	43
4.1.3. Conclusiones extraídas del estudio . . . . .	47
4.2. Estudio de escalas . . . . .	48
4.2.1. Generalización de los modelos Hub and Spoke . . . . .	48
4.2.2. Generación del cosido de aeronaves . . . . .	50
4.2.3. Descripción de la tipología de escalas . . . . .	51
4.2.4. Correlación del tiempo de escala y la demora . . . . .	53
<b>5. Variable objetivo: Cálculo de la Demora</b>	<b>61</b>
5.1. Introducción . . . . .	61
5.2. Análisis descriptivo . . . . .	62
5.2.1. Detección de Outliers . . . . .	64
5.3. Correlación de variables . . . . .	64
5.3.1. Compañía frente a Demora . . . . .	66

5.3.2. Tipología del vuelo frente a Demora . . . . .	67
5.3.3. Tipología de operación frente a Demora . . . . .	69
5.3.4. Categoría de estela frente a Demora . . . . .	71
5.3.5. Ratio de ocupación frente a Demora . . . . .	72
5.3.6. Mes de ejercicio frente a Demora . . . . .	74
5.3.7. Hora de ejercicio frente a Demora . . . . .	76
5.3.8. Intensidad del viento frente a Demora . . . . .	78
5.3.9. Dirección del viento frente a Demora . . . . .	80
<b>6. Conclusiones</b>	<b>83</b>
6.1. Introducción . . . . .	83
6.2. Conclusiones sobre la ingestión de datos . . . . .	84
6.3. Conclusiones del Análisis Exploratorio . . . . .	85
6.4. Conclusiones del estudio de la demanda . . . . .	86
6.5. Conclusiones del estudio de escalas . . . . .	87
6.6. Conclusiones del estudio de correlaciones . . . . .	88
6.7. Conclusiones Generales . . . . .	89
<b>7. Trabajo Futuro</b>	<b>91</b>
7.1. Introducción . . . . .	91
7.2. Líneas de desarrollo. . . . .	91
<b>References</b>	<b>93</b>

# Índice de figuras

2.1.	Imagen aérea de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat . . . . .	6
2.2.	Desglose de sectores del espacio aéreo adyacente al aeropuerto . . . . .	7
2.3.	Plano en planta de las pistas y calles de rodadura del aeropuerto . . . . .	8
2.4.	Esquema de los Modos de operación DEP- ARR . . . . .	9
3.1.	Muestra de históricos METAR estudiados . . . . .	12
3.2.	Intensidad del viento en función de la época del año . . . . .	14
3.3.	Histograma de la velocidad del viento en LEBL . . . . .	15
3.4.	Diagrama de cajas de la velocidad del viento en LEBL . . . . .	15
3.5.	Histograma de la velocidad del viento en LEBL - Sin outliers . . . . .	16
3.6.	Diagrama de cajas de la velocidad del viento en LEBL - Sin outliers . .	16
3.7.	Histograma de la dirección del viento en LEBL - Sin Outliers . . . . .	18
3.8.	Diagrama de vientos - Configuración diurna . . . . .	19
3.9.	Diagrama de vientos - Configuración nocturna . . . . .	20
3.10.	Recuento de operaciones anuales en el aeropuerto LEBL . . . . .	21
3.11.	Recuento de operaciones diarias en el aeropuerto LEBL . . . . .	22
3.12.	Distribución de la Clase de operación . . . . .	25
3.13.	Distribución de la Clase de operación - Caracterizada a 3 variables .	26
3.14.	Distribución de la Clase de operación - Top 20 City Pairs . . . . .	27
3.15.	Modelos de aeroneves mas utilizados en función de la WTC . . . . .	29
3.16.	Aeronaves WTC Medium: izquierda A32A - derecha 738W . . . . .	30
3.17.	Aeronaves WTC Heavy: izquierda A333 - derecha B773 . . . . .	30
3.18.	Aeronaves WTC Light: izquierda SW2 - derecha DA40 . . . . .	31
3.19.	Aeronave WTC Superheavy: Airbus A380 . . . . .	31
3.20.	Gráfico de densidad N° de pasajeros vs capacidad máxima . . . . .	32
3.21.	Ratio de Ocupación . . . . .	34
4.1.	Ejemplo creación de periodos horarios . . . . .	38
4.2.	Recuento de operaciones segregadas entre ARR - DEP anuales . . . .	39
4.3.	Distribución anual de Operaciones/Hora . . . . .	40
4.4.	Distribución mensuales de Operaciones/Hora . . . . .	41
4.5.	Distribución semanal de Operaciones/Hora . . . . .	42
4.6.	Distribución horaria de Operaciones/Hora . . . . .	42
4.7.	Arribadas/Hora reales frente a previstas (Media y máximos) . . . .	44
4.8.	Despegues/Hora reales frente a previstas (Media y máximos) . . . .	45
4.9.	Diferencia de aeronaves reales menos previstas por operación .	46
4.10.	Comparativa Hub and Spoke vs vuelos directos . . . . .	48
4.11.	Definición de escala . . . . .	50
4.12.	Identificación efectiva de cosidos . . . . .	51
4.13.	Tipología de escalas en LEBL . . . . .	52
4.14.	Tipología de escalas en LEBL SEGÚN AEROLÍNEAS . . . . .	53
4.15.	Categorización de escalas en función de la demora . . . . .	54
4.16.	Relación Demora - Tiempo de escala: Caso de uso 1 . . . . .	56
4.17.	Relación demora - Tiempo de escala: Caso de uso 2 . . . . .	57
4.18.	Relación demora - Tiempo de escala: Caso de uso 2 . . . . .	58
4.19.	Relación tiempo de escala vs demora en arribada . . . . .	59
4.20.	Relación demora arribada vs demora en arribada . . . . .	60

5.1. Distribución de la demora en arribada de vuelos . . . . .	62
5.2. Distribución de la demora en despegue de vuelos . . . . .	63
5.3. Correlación de la demora en arribada frente a la aerolínea . . . . .	66
5.4. Correlación de la demora en despegue frente a la aerolínea . . . . .	67
5.5. Correlación de la demora en arribada frente a la tipología de conexión . . . . .	68
5.6. Correlación de la demora en despegue frente a la tipología de conexión . . . . .	68
5.7. Correlación de la demora en arribada frente a la clase de vuelo . . . . .	69
5.8. Correlación de la demora en despegue frente a la clase de vuelo . . . . .	70
5.9. Correlación de la demora en arribada frente a la categoría de estela . . . . .	71
5.10. Correlación de la demora en despegue frente a la categoría de estela . . . . .	71
5.11. Correlación de la demora en arribada frente al ratio de ocupación . . . . .	72
5.12. Correlación de la demora en despegue frente al ratio de ocupación . . . . .	73
5.13. Correlación de la demora en despegue frente al mes de ejercicio . . . . .	74
5.14. Correlación de la demora en despegue frente al mes de ejercicio . . . . .	75
5.15. Correlación de la demora en despegue frente a la Hora prevista . . . . .	76
5.16. Correlación de la demora en despegue frente a la Hora prevista . . . . .	77
5.17. Correlación de la demora en arribada frente a la intensidad del viento . . . . .	78
5.18. Correlación de la demora en despegue frente a la intensidad del viento . . . . .	79
5.19. Correlación de la demora en arribada frente a la dirección del viento . . . . .	81
5.20. Correlación de la demora en despegue frente a la dirección del viento . . . . .	81
6.1. Diagrama de flujo de las bases de datos . . . . .	84

# Índice de cuadros

3.1.	Clasificación de la intensidad del viento en nudos. . . . .	14
3.2.	Distribución de Movimientos Aéreos por Clase de Tráfico. . . . .	23
3.3.	Distribución de Movimientos Aéreos por Clase de servicio. . . . .	24
3.4.	Distribución de la Categoría Estela. . . . .	28
3.5.	Distribución de la Categoría Estela. . . . .	35
3.6.	clase de operación filtrada. . . . .	35
3.7.	clase de WTC filtrada. . . . .	35
3.8.	Tabla de percentiles y valores de ocupación . . . . .	36
4.1.	Porcentaje de casos . . . . .	43
4.2.	Porcentaje de casos . . . . .	44



## Lista de abreviaturas

<b>AENA</b> . . . . .	Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea. Es una empresa pública española encargada de la gestión de aeropuertos y servicios de navegación aérea en España. Es responsable de la planificación, desarrollo, mantenimiento y operación de la mayoría de los aeropuertos civiles en el país, así como de la gestión de las rutas aéreas y el control del tráfico aéreo.
<b>AHP</b> . . . . .	Indicador utilizado en la gestión aeroportuaria y en la planificación de tráfico aéreo que se refiere al número máximo de aeronaves que pueden aterrizar o despegar en un aeropuerto durante su hora punta.
<b>AHM</b> . . . . .	Indicador utilizado en la gestión aeroportuaria y en la planificación de tráfico aéreo que se refiere al número promedio de aeronaves que aterrizan o despegan en un aeropuerto durante una hora típica de operación.
<b>ATM</b> . . . . .	Air Traffic Management (Gestión del Tráfico Aéreo). Sistema que engloba todos los servicios relacionados con la navegación, control y flujo del tráfico aéreo, asegurando un movimiento seguro y eficiente de aeronaves en todas las fases de operación.
<b>Big Data</b> . . . .	Término que describe conjuntos de datos extremadamente grandes y complejos que superan la capacidad de las herramientas de procesamiento de datos tradicionales. Implica el uso de tecnologías avanzadas para recopilar, almacenar, procesar y analizar estos datos, extrayendo información valiosa para la toma de decisiones.
<b>City pairs</b> . . .	Combinaciones específicas de ciudades que actúan como puntos de origen y destino en rutas aéreas. Son fundamentales para analizar la demanda del mercado y optimizar las redes de vuelos.
<b>Hub and Spoke</b>	Modelo de red de transporte aéreo donde las rutas se organizan como una rueda (hub) con rayos (spokes). Los vuelos se concentran en un aeropuerto central (hub) desde donde se distribuyen a destinos secundarios (spokes), optimizando conexiones y eficiencia operativa.
<b>LEBL</b> . . . . .	Es el código de identificación utilizado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para el Aeropuerto de Barcelona-El Prat, también conocido por su código IATA, BCN.
<b>METAR</b> . . . .	METeorological Aerodrome Report, Informe Meteorológico de Aeródromo.
<b>MTOW</b> . . . . .	Maximum Takeoff Weight, Peso Máximo al Despegue. Este peso incluye no solo la masa de la aeronave en sí, sino también la carga útil, el combustible y otros elementos necesarios para el vuelo.
<b>OACI</b> . . . . .	Organización de Aviación Civil Internacional. Agencia especializada de las Naciones Unidas, establecida en 1944 para gestionar y regular el transporte aéreo internacional. Su objetivo principal es asegurar un desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil

	en todo el mundo, estableciendo normas y regulaciones necesarias para la seguridad, eficiencia y regularidad de la aviación.
<b>Point to Point</b>	Sistema de transporte aéreo donde los vuelos operan directamente entre dos destinos sin pasar por un hub central. Este modelo ofrece rutas más directas, reduce tiempos de viaje y congestión en grandes aeropuertos, siendo comúnmente utilizado por aerolíneas de bajo costo.
<b>TMA . . . . .</b>	Terminal Control Area. Es una región del espacio aéreo designada y controlada que rodea uno o más aeropuertos ocupados. La TMA se establece para gestionar la llegada y salida eficiente y segura de aeronaves en las cercanías de estos aeropuertos.
<b>Ratio de ocupación</b>	Porcentaje que representa la proporción de asientos ocupados en relación al total de asientos disponibles en un vuelo. Es un indicador clave de eficiencia y rentabilidad para las aerolíneas.
<b>Sharklets . . .</b>	Son extensiones curvadas y afiladas en las puntas de las alas, con una forma que se asemeja a una aleta de tiburón. Son una creación específica de Airbus.
<b>Winglets . . .</b>	Son extensiones verticales en las puntas de las alas, tienen una forma angular y pueden variar en diseño, desde rectos hasta curvados.

# 1

## Introducción

### Índice

---

<b>1.1.</b>	<b>Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>1.2.</b>	<b>Metodología</b>	<b>2</b>
<b>1.3.</b>	<b>Alcance</b>	<b>3</b>
<b>1.4.</b>	<b>Estructura del documento</b>	<b>4</b>

---

### 1.1. Objetivos

A continuación, se van a presentar los puntos principales que se van a desarrollar, Dichos objetivos serán los siguientes:

- El primer objetivo es realizar la ingesta y procesamiento efectivo de millones de operaciones aeroportuarias registradas durante la última década. Este proceso implicará el uso de herramientas y tecnologías de Big Data para gestionar y analizar estos datos a gran escala.
- Se llevará a cabo un análisis exploratorio detallado de los factores clave asociados con cada operación aeroportuaria. El objetivo es identificar posibles correlaciones entre estos factores y las demoras en los aeropuertos. Esto podría incluir variables como condiciones climáticas, tráfico aéreo, horarios de vuelo, entre otros.
- Se evaluará la situación actual de saturación del aeropuerto de Barcelona mediante un análisis de capacidad frente a la demanda. Este análisis proporcionará información crucial sobre la capacidad operativa del aeropuerto y cómo se compara con el volumen actual de operaciones.

- Se desarrollará la capacidad de identificar y aislar correctamente las operaciones de escala en los datos. Esto implica la capacidad de separar claramente las fases de llegada y salida para comprender mejor los tiempos de espera y las interacciones entre vuelos de conexión.
- Presentar un análisis exhaustivo de las correlaciones entre factores operativos y meteorológicos, y su impacto en las demoras de las operaciones aeroportuarias en Barcelona, identificando patrones significativos y relaciones complejas.

## 1.2. Metodología

Para maximizar el potencial del estudio, ha sido necesario digitalizar una ingente cantidad de datos asociados a todos los registros de operaciones aéreas del Aeropuerto de Barcelona-El Prat (LEBL) durante un periodo de ocho años, abarcando desde 2009 hasta 2016. Para manejar y analizar esta vasta cantidad de información, se requiere la implementación de avanzadas técnicas de análisis de datos masivos, comúnmente conocidas como Big Data [1].

El concepto de Big Data se refiere a la acumulación y gestión de grandes volúmenes de datos provenientes de diversas fuentes, que requieren métodos especializados para su almacenamiento, procesamiento y análisis. Estas técnicas son esenciales debido a la incapacidad de las tecnologías y herramientas convencionales para manejar eficientemente estos datos. La explotación efectiva de Big Data permite a las organizaciones descubrir patrones, identificar nuevas oportunidades de negocio, optimizar sus operaciones y eliminar componentes ineficaces dentro de su estructura organizativa.

En este estudio, se ha elegido el lenguaje de programación Python [2] para el desarrollo de las aplicaciones necesarias debido a su naturaleza de código abierto y su creciente relevancia en el ámbito de Big Data. Python se ha consolidado como una herramienta vital en este campo debido a sus múltiples ventajas, que incluyen:

- **Velocidad en el procesamiento de datos:** Python ofrece un rendimiento notable en el manejo de grandes volúmenes de datos, lo cual es crucial para los análisis en tiempo real y el procesamiento rápido de información.
- **Amplio soporte de bibliotecas:** Python cuenta con una extensa colección de bibliotecas y frameworks especializados en análisis de datos, como Pandas, NumPy[3] y Scikit-Learn[4], que facilitan la implementación de complejas tareas analíticas y de aprendizaje automático.
- **Compatibilidad con diversos entornos:** Python es altamente compatible con diferentes plataformas y sistemas operativos, lo que permite su integración en entornos heterogéneos y su utilización en diversas etapas del ciclo de vida de los datos.
- **Facilidad para la visualización de gráficos:** Las capacidades de Python para la visualización de datos son sobresalientes, con bibliotecas como Matplotlib [5]

y Seaborn [6], que permiten la creación de gráficos y visualizaciones complejas de manera sencilla y efectiva, facilitando la interpretación y comunicación de los resultados obtenidos.

En resumen, la digitalización y el análisis de los datos de operaciones aéreas del aeropuerto de LEBL mediante técnicas de Big Data y la utilización de Python como lenguaje de programación clave, han sido fundamentales para llevar a cabo este estudio, permitiendo extraer conocimientos valiosos y optimizar los procesos de toma de decisiones.

### 1.3. Alcance

El presente estudio tiene como objetivo principal predecir las demoras en los movimientos aeroportuarios mediante el uso de metodologías de Big Data. A través de un análisis detallado de variables meteorológicas, operacionales y de demanda, se pretende desarrollar modelos predictivos que puedan ser utilizados por una variedad de clientes y beneficiarios. Entre los principales clientes y beneficiarios se encuentran:

- **AENA (Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea):** Como el principal gestor aeroportuario en España, AENA puede beneficiarse enormemente de este estudio. La capacidad de predecir demoras con antelación permitirá a AENA optimizar la gestión de sus aeropuertos, mejorar la eficiencia operativa, y reducir los costos asociados con las demoras. Además, una mejor previsión de las demoras puede contribuir a una experiencia de usuario más satisfactoria para los pasajeros.
- **Empresas aeroportuarias:** Otras empresas que gestionan aeropuertos, tanto a nivel nacional como internacional, pueden utilizar los modelos predictivos desarrollados en este estudio para mejorar la planificación y operación de sus instalaciones. La predicción precisa de demoras permitirá una gestión más eficaz del tráfico aéreo y una mejor coordinación con las aerolíneas.
- **SESAR (Single European Sky ATM Research) de Eurocontrol:** [7] es el programa de investigación y desarrollo de Eurocontrol, se beneficiará de los resultados de este estudio para avanzar en su objetivo de modernizar y optimizar el sistema de gestión del tráfico aéreo en Europa. Los modelos predictivos pueden integrarse en las herramientas de gestión de tráfico aéreo de SESAR para mejorar la previsión y mitigación de demoras, contribuyendo así a un cielo único europeo más eficiente y seguro.
- **Aerolíneas:** Las aerolíneas podrán utilizar las predicciones de demoras para mejorar la planificación de sus operaciones de vuelo, minimizar el impacto de las demoras en sus horarios, y mejorar la satisfacción del cliente mediante una comunicación más precisa y oportuna sobre posibles retrasos.
- **Pasajeros:** Los pasajeros son indirectamente uno de los mayores beneficiarios de este estudio. Una mejor gestión y previsión de las demoras se traducirá en una reducción de tiempos de espera y una experiencia de viaje más fluida.

- **Investigadores y académicos:** Los resultados y metodologías desarrolladas en este estudio podrán servir como base para futuras investigaciones en el campo de la predicción de demoras y la gestión del tráfico aéreo, contribuyendo al avance del conocimiento en este ámbito.

En resumen, este estudio no solo tiene implicaciones directas en la mejora de la gestión operativa de aeropuertos y el tráfico aéreo, sino que también puede tener un impacto positivo en la experiencia de los pasajeros y en la eficiencia del transporte aéreo en general. La colaboración y aplicación de estos modelos por parte de AENA, SESAR de Eurocontrol y otras entidades relevantes permitirá avanzar hacia un sistema de transporte aéreo más eficaz y predecible.

## 1.4. Estructura del documento

En esta sección se describe la estructura general del presente documento, la cual se compone de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Se presentan los objetivos, la metodología empleada, el alcance del estudio y una descripción general de la estructura del documento.
- **Capítulo 2: Descripción del aeropuerto de aplicación.** Se introduce el aeropuerto en estudio, el entorno ATM, el modo de operación y la relación capacidad-demanda.
- **Capítulo 3: Análisis Exploratorio.** Se realiza un análisis meteorológico, una descripción del tipo de operación, y se estudian varias características como la velocidad y dirección del viento, la clase de tráfico y servicio, y otras variables relevantes.
- **Capítulo 4: Variables derivadas a través de metodologías de Big Data.** Se lleva a cabo un estudio de la demanda, se analiza la demanda real frente a la prevista, y se extraen conclusiones. Además, se estudian las escalas, incluyendo la generalización de modelos Hub and Spoke, y se describen la tipología de escalas y la correlación del tiempo de escala con la demora.
- **Capítulo 5: Estudio de correlación de la demora** Esta sección examina detalladamente cómo factores como la hora del día, la intensidad y dirección del viento afectan la puntualidad de las operaciones aéreas, presentando datos estadísticos y gráficos comparativos.

Cada uno de estos capítulos se estructura en secciones y subsecciones que abordan con detalle los aspectos específicos del estudio, proporcionando un análisis exhaustivo y una comprensión integral del tema investigado.

# 2

## Descripción del aeropuerto de aplicación

### Índice

---

<b>2.1. Introducción</b>	5
<b>2.2. Entorno ATM</b>	6
2.2.1. Descripción del modo de operación	7
2.2.2. Distribución de las configuraciones operativas	8
<b>2.3. Relación Capacidad - Demanda</b>	9

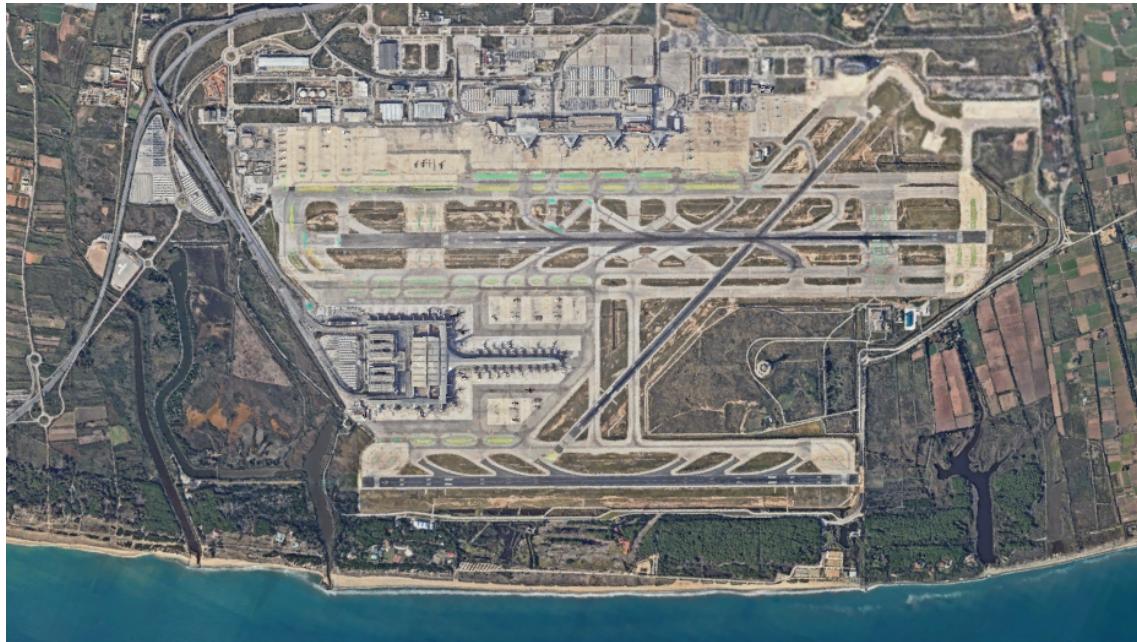
---

### 2.1. Introducción

El Aeropuerto de Barcelona - Josep Tarradellas, situado en las coordenadas 41°17'49"N 2°04'44"E, es un nodo vital en el sistema de transporte aéreo europeo. Su ubicación estratégica, aproximadamente 12 kilómetros al suroeste del centro de Barcelona, lo convierte en un punto crucial de conexión entre Europa, el Mediterráneo y otras regiones del mundo. Con una capacidad actual de manejo de pasajeros que supera los 50 millones por año, se posiciona como uno de los aeropuertos más transitados de Europa. Es el segundo mayor aeropuerto internacional en España, después del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, y es el primero de Cataluña y de la costa mediterránea, es por ello que se ha elegido de como caso de análisis para el presente estudio.

El Aeropuerto de Barcelona - El Prat consta de dos terminales que se usan por compañías. La Terminal 1 opera un 70% de los vuelos y cubre más de 500.000 m<sup>2</sup>. La Terminal 2 se divide en 3 sub-terminales: A, B y C, y es utilizada solamente por unas pocas aerolíneas de bajo coste o regionales. El aeropuerto es capaz de manejar hasta 55 millones de pasajeros al año y llegar a 90 operaciones por hora. Actualmente

el Aeropuerto de Barcelona tiene cierta congestión, por lo que se está estudiando añadir una terminal satélite, T1S en un futuro próximo. Esta terminal incrementará la capacidad de pasajeros a unos 70 millones por año. [8]



**Figura 2.1:** Imagen aérea de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat

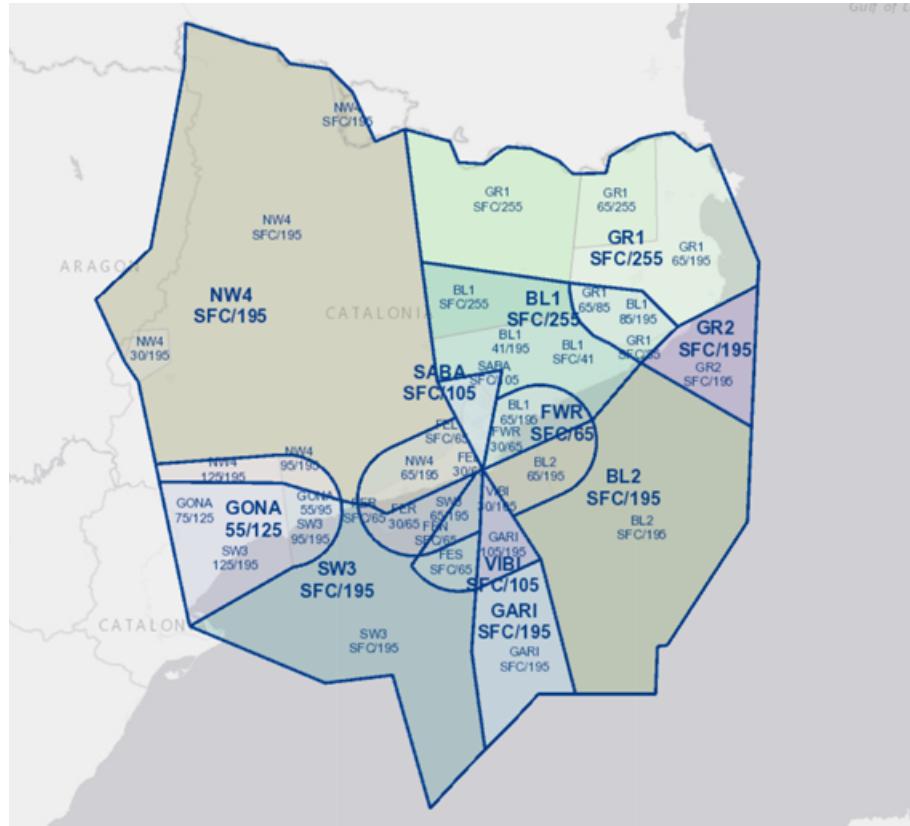
## 2.2. Entorno ATM

A continuación, se procede a presentar al usuario la configuración del espacio aéreo de Barcelona. Esta información es pública y cualquier lector interesado podrá consultarla en la página web tanto AIP[9] como de Insignia[10], ambas gestionadas por Enaire.

El espacio aéreo del TMA de Barcelona, se encuentra subdividido en 4 sectores, T1 (Noreste), T2 (Sureste), T3 (Suroeste), T4 (Noroeste). Estos sectores se designan como sectores de aproximación, ya que es el espacio aéreo que debe atravesar una aeronave desde el espacio aéreo controlado por la torre de Barcelona hasta alcanzar el nivel de vuelo de crucero (en un despegue) o desde el nivel de crucero hasta el espacio de control designado a torre( En una arribada).

Este despliegue de 4 sectores se produce en su máxima operatividad, en condiciones de baja carga pueden llegar a colapsarse en dos sectores , el T1-T2, y el T3 - T4. Cuando los 4 sectores se encuentran desplegados (Situación de alta carga) el funcionamiento es que dos sectores actúen a modo de Alimentadores (Gestionan las llegadas al aeropuerto) y dos a modo de despegadores (Gestionan las salidas del aeropuerto). Estos roles no son fijos, las necesidades tanto meteorológicas, de carga, situacionales etc permitan que pueden variar entre ellos, pero siempre a pares , es decir, T1 y T2 siempre tendrán el mismo rol , contrario a T3 y T4. Este desglose de

los sectores de operación esta directamente relacionado a los modos de operación y configuración del aeropuerto, es por ello que se detallarán a continuación en un apartado dedicado.



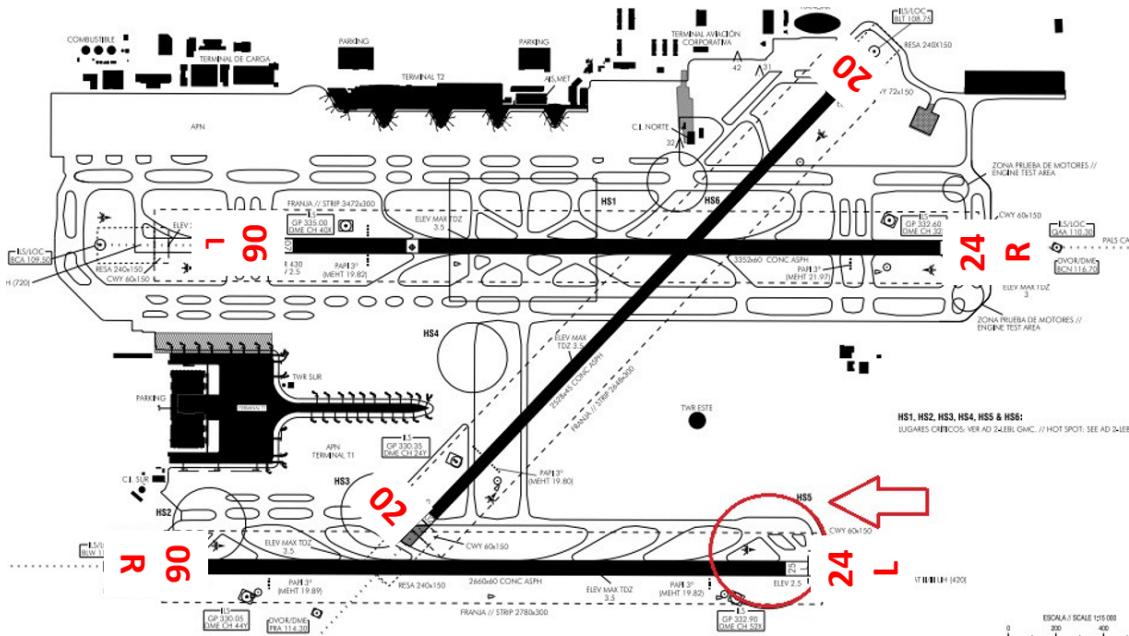
**Figura 2.2:** Desglose de sectores del espacio aéreo adyacente al aeropuerto

### 2.2.1. Descripción del modo de operación

El funcionamiento de las pistas de aterrizaje y despegue en el Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat es un aspecto crítico de su operación aeroportuaria. En general se distinguen dos enfoques fundamentales en la gestión de las pistas extendido en el mundo aeroportuario [11]:

- Sistema de pistas independientes: implica que ambas pistas paralelas se utilizan simultáneamente tanto para aterrizajes como para despegues. Esta operativa es especialmente ventajosa en momentos de alto tráfico, ya que permite un mayor flujo de aeronaves y una mayor flexibilidad operativa.
- Sistema de pistas dependientes: se asigna una pista específica para despegues y la otra para aterrizajes durante un período determinado. Esta operativa es especialmente eficiente en condiciones de tráfico moderado y visibilidad adecuada, ya que minimiza las interrupciones en el flujo de aeronaves que aterrizan y despegan. Sin embargo, requiere una coordinación precisa entre el control de tráfico aéreo y la torre de control para asegurar que las pistas se utilicen de manera eficaz.

El caso del aeropuerto de Barcelona presenta un modo de operación de pistas segregadas, sin embargo existe una limitación relacionada con la longitud de la pista número tres, la mas cercana al mar. Esta es más corta que la pista paralela adyacente lo que no permite el despegue de aviones más pesados. En la siguiente figura, donde se representa el plano de la planta del aeropuerto, se puede observar este detalle.



**Figura 2.3:** Plano en planta de las pistas y calles de rodadura del aeropuerto

## 2.2.2. Distribución de las configuraciones operativas

En cuanto las configuraciones de uso de pista existen tres:

- Configuración Oeste [W]: Se corresponde a la configuración diurna, desde las 0700 hasta las 2300 horas (hora local), siendo la preferente del aeropuerto, siempre que no exista meteorología adversa. En esta configuración las arribadas se realizan por la pista 24R y los despegues por la 24L.
- Se considera la configuración no preferente del aeropuerto. Se aplica en casos de meteorología adversa entre las 07:00 y las 23:00 , hora local. En esta configuración las arribadas se realizan por la pista 06L y los despegues por la 06R.
- Configuración Norte [N]: Se corresponde a la configuración nocturna que abarca desde las 23:00 hasta las 07:00 horas (hora local). En esta configuración, las llegadas se llevarán a cabo en la pista 02, y las salidas se efectuarán desde la pista 06R.

Como se mencionó al describir el modo de operación de pistas segregadas, Barcelona presenta una peculiaridad. La pista nominal designada para arribadas es

la 24R/06L (larga) y la pista para despegues sería la 24L/06R (corta). Esta decisión se tomó debido a medidas medioambientales y de gestión de ruido, ya que lo más eficiente en términos operacionales sería utilizar las pistas de forma contraria, es decir, despegar por la 24R/06L (larga) y aterrizar por la 24L/06R(corta). De esta forma todas las tipologías de aeronaves podrían despegar por la pista 24R y se podrían utilizar las pistas de forma segregada completamente.



**Figura 2.4:** Esquema de los Modos de operación DEP- ARR

Para poder dar servicio a las aeronaves más pesadas, se debe introducir el concepto de despegue no preferente. Se describe como un cambio de configuración temporal, donde se genera una ventana de tiempo reducida (entorno a 7 minutos) donde las aeronaves dejan de aterrizar por la pista nominal 24R/06L (larga) y se aprovecha para despegar a dicha aeronave.

### 2.3. Relación Capacidad - Demanda

La gestión eficaz de la capacidad y la demanda es esencial para garantizar la operatividad segura y eficiente de los aeropuertos en un entorno de crecimiento continuo del tráfico aéreo global . En este contexto:

- La capacidad aeroportuaria se define como la habilidad máxima de un aeropuerto para gestionar operaciones aéreas dentro de un período de tiempo determinado, generalmente expresada como el número máximo de aeronaves que puede atender por hora. La capacidad aeroportuaria abarca múltiples dimensiones, incluyendo capacidad de pista, capacidad de terminal y capacidad de calles de rodaje, entre otras. Para propósitos de este estudio, nos centraremos específicamente en la capacidad operativa por hora (Aeronaves Hora Punta - AHP), que representa un indicador crítico de la eficiencia operativa de un aeropuerto. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) destaca la importancia de la capacidad aeroportuaria como un parámetro clave para la planificación estratégica de infraestructuras aeroportuarias. Esta capacidad no solo determina la viabilidad operativa de un aeropuerto, sino que también

influye en la distribución y la puntualidad de las operaciones aéreas.

- La demanda aeroportuaria se refiere al volumen de tráfico aéreo que un aeropuerto debe gestionar en un período específico, generalmente medido en términos de número de vuelos o pasajeros. Esta demanda puede variar significativamente en función de factores estacionales, tendencias económicas y cambios en las preferencias de viaje. Por ejemplo, durante la temporada alta de vacaciones, como Navidad o verano, muchos aeropuertos experimentan un aumento sustancial en la demanda de vuelos de pasajeros. Además, ciertos eventos especiales, como conferencias internacionales o competiciones deportivas, pueden generar picos de demanda temporales que requieren una capacidad adicional por parte del aeropuerto para manejar el aumento del tráfico aéreo. Por ejemplo, durante los Juegos Olímpicos, los aeropuertos cercanos a la sede experimentan un incremento significativo en la demanda de vuelos, lo que puede desafiar la capacidad operativa y generar demoras si no se planifica adecuadamente.

La comprensión detallada de la demanda aeroportuaria es crucial para la planificación estratégica de infraestructuras, ya que permite anticipar y gestionar eficazmente los períodos de alta demanda y minimizar el impacto de posibles congestiones. En este contexto, análisis históricos y modelos predictivos se utilizan para estimar la demanda futura y diseñar estrategias de expansión que permitan satisfacer las necesidades operativas del aeropuerto de manera eficiente y rentable.

Una vez se tienen en cuenta estos parámetros se puede asociar al aeropuerto de estudio, LEBL. En cuanto a los datos de capacidad declarada, ésta consta actualmente de aproximadamente 80 operaciones por hora (38 aterrizajes y 40 despegues). [12]

# 3

## Análisis Exploratorio

### Índice

---

<b>3.1. Análisis meteorológico . . . . .</b>	<b>11</b>
3.1.1. Velocidad del Viento . . . . .	13
3.1.2. Dirección del Viento . . . . .	17
<b>3.2. Descripción del tipo de operación . . . . .</b>	<b>21</b>
3.2.1. Clase de tráfico y servicio . . . . .	23
3.2.2. Clase de operación según origen y destino . . . . .	24
3.2.3. Categoría de estela turbulenta y modelos de aeronave . .	28
3.2.4. Estudio de Asientos y Pasajeros. Ratio de ocupación . .	32
3.2.5. Resumen de Hipótesis . . . . .	35

---

### 3.1. Análisis meteorológico

La aviación y el funcionamiento de los aeropuertos están intrínsecamente ligados a las condiciones meteorológicas. El viento, uno de los elementos más influyentes, impacta de manera significativa en la seguridad de los vuelos, la planificación de rutas, la eficiencia operativa y la capacidad de los aeropuertos.

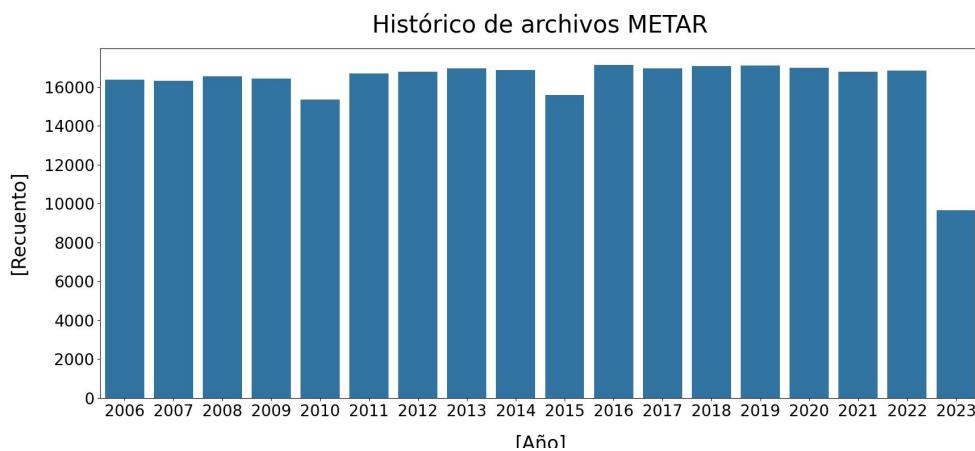
El viento es uno de los factores meteorológicos más influyentes en las operaciones aéreas. Las ráfagas de viento repentinamente o turbulencias pueden afectar negativamente la estabilidad de una aeronave durante el despegue, el aterrizaje o el vuelo. Las aerolíneas y pilotos consideran el viento para determinar la altitud de vuelo y el rumbo más eficiente. El viento en contra puede ralentizar un vuelo, mientras que el

viento a favor puede acelerarlo y reducir el consumo de combustible. [13]

A su vez también afecta directamente a las operaciones de despegue y aterrizaje. La dirección del viento es esencial para decidir en qué dirección deben realizarse los despegues y aterrizajes en un aeropuerto. Las aeronaves tienden a despegar y aterrizar contra el viento (en la medida de lo posible) para aprovechar la mayor cantidad de sustentación durante el despegue y el frenado durante el aterrizaje. Esto mejora la seguridad de estas fases críticas del vuelo. Indicar que condiciones críticas de meteorología pueden implicar cerrar temporalmente o limitar el número de operaciones permitidas afectando la capacidad de un aeropuerto.

En el marco del presente estudio, se ha empleado un conjunto histórico de informes METAR, abarcando el periodo desde 2006 hasta agosto de 2023 [14]. Los informes METAR, acrónimo de "METeorological Aerodrome Report" (Informe Meteorológico de Aeródromo), son reportes meteorológicos sistematizados generados periódicamente en estaciones meteorológicas distribuidas globalmente. Estos informes proporcionan una descripción detallada de las condiciones meteorológicas en una ubicación específica y en un momento preciso [15]. Recopilan datos esenciales sobre múltiples parámetros meteorológicos, incluyendo, pero no limitándose a, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, visibilidad, dirección y velocidad del viento, estado del cielo (nubosidad, presencia de precipitación, etc.), y otros elementos relevantes. Estos datos son cruciales para el análisis y la comprensión de las condiciones climáticas prevalecientes en una región o localidad específica.

La cadencia de emisión de un fichero METAR es de 30 minutos. Es por ello como se puede apreciar en la siguiente figura que cada año estudiado tiene un total de 160000 ficheros.



**Figura 3.1:** Muestra de históricos METAR estudiados

Este estudio se adentrará en la importancia de comprender y gestionar las condiciones meteorológicas, específicamente dos parámetros asociados al viento.

- La dirección del viento se refiere al punto cardinal o la brújula hacia el cual

el viento está soplando en un momento dado. Se expresa en grados, donde 0 grados (o 360 grados) representa el norte, 90 grados el este, 180 grados el sur y 270 grados el oeste.

- **Velocidad del Viento:** es la cantidad de movimiento del aire en un punto específico y se mide en unidades como metros por segundo (m/s), kilómetros por hora (km/h) o millas por hora (mph). Indica cuán rápido se está moviendo el aire en una dirección determinada en un momento dado.

### 3.1.1. Velocidad del Viento

La velocidad del viento desempeña un papel esencial en las operaciones aeropuertarias, donde la seguridad y la eficiencia son imperativas. Este análisis exploratorio se enfoca en la evaluación detallada de datos de velocidad del viento, con énfasis en su influencia en las actividades aeroportuarias. Comprender las variaciones en la velocidad y dirección del viento en diferentes momentos y ubicaciones es fundamental para la gestión de pistas de aterrizaje y despegue, la programación de vuelos y la toma de decisiones relacionadas con la seguridad y la eficiencia en los aeropuertos [16].

A su vez, el análisis permitirá identificar condiciones meteorológicas adversas, como vientos cruzados y ráfagas, que afectan directamente a las operaciones aeroportuarias y son esenciales para garantizar la seguridad y el flujo continuo de vuelos en un entorno aeroportuario. Esta información contribuye significativamente a la toma de decisiones informadas y a la implementación de medidas preventivas para garantizar la operación segura y eficiente del Aeropuerto de Barcelona y otros aeropuertos similares. Una clasificación general de la intensidad del viento se basa en los siguientes rangos:

- **Viento en calma (0-5 nudos):** el viento es prácticamente inexistente o muy ligero. Estas condiciones son favorables para las operaciones de arribada y despegue, ya que proporcionan una mayor estabilidad y facilidad de control para la aeronave.
- **Viento Ligero (6-10 nudos):** se caracteriza por velocidades de viento modestas. Aunque aún son condiciones favorables para la mayoría de las operaciones, los pilotos deben estar atentos a posibles ráfagas y ajustar sus procedimientos en consecuencia.
- **Viento Moderado (11-20 nudos):** El viento moderado puede crear cierta turbulencia y requerir maniobras adicionales por parte del piloto durante el despegue o el aterrizaje. Si bien es manejable para aeronaves Comerciales, puede complicar las operaciones en aeronaves más pequeñas o ligeras.
- **Viento Fuerte (21-35 nudos):** e puede dificultar las operaciones de arribada y despegue, especialmente para aeronaves más pequeñas. Requiere un mayor nivel de habilidad y experiencia por parte de los pilotos y puede llevar a restricciones operativas en algunos aeropuertos.

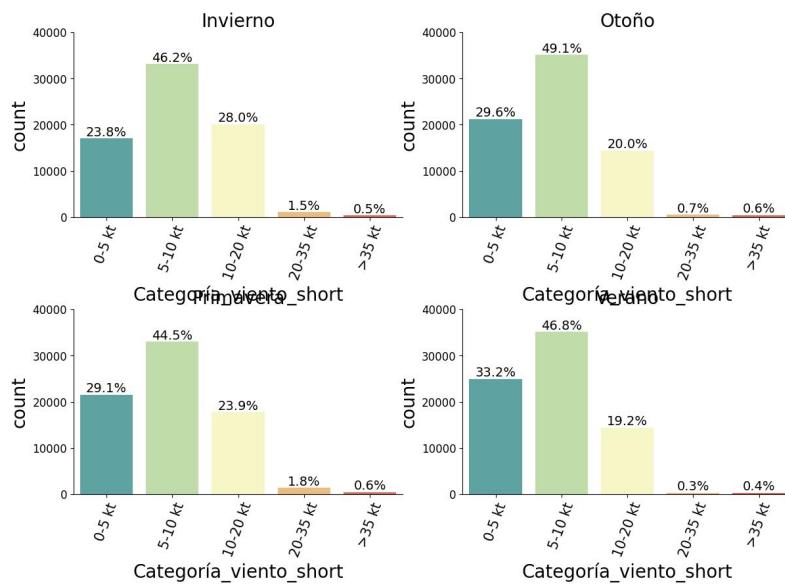
- Viento Muy Fuerte (más de 35 nudos): Las condiciones de viento muy fuerte son extremadamente desafiantes y peligrosas para la mayoría de las aeronaves. Las operaciones de arribada y despegue se vuelven muy complicadas, y en muchos casos, los aeropuertos pueden cerrar temporalmente debido a estas condiciones.

Para obtener una vista preliminar de los valores de la categoría de viento, se ha realizado una clasificación de la intensidad del viento en los rangos mencionados anteriormente y su distribución en función del número de caso. Se puede apreciar en la siguiente tabla como el aeropuerto LEBL no presenta una casuística desfavorable en función de la meteorología, ya que la inmensa mayoría de las operaciones aeroportuarias se realizan con viento en calma o ligero (aproximadamente un 76 % de las mismas). En cuanto a las operaciones con climatología muy adversa se limita a ser menor de un 2 %.

Categoría de viento	Recuento	Porcentaje [%]
[0-5 kt] Viento en calma	84658	28.96
[5-10 kt] Viento Ligero	136352	46.65
[10-20 kt] Viento Moderado	66519	22.76
[20-35 kt] Viento Fuerte	3163	1.08
[>35 kt] Viento Muy Fuerte	1617	0.55

**Cuadro 3.1:** Clasificación de la intensidad del viento en nudos.

A continuación, se procede a realizar una discretización basada en la estabilidad de los períodos, dividiendo así en las cuatro estaciones para examinar detalladamente posibles variaciones en la intensidad del viento.

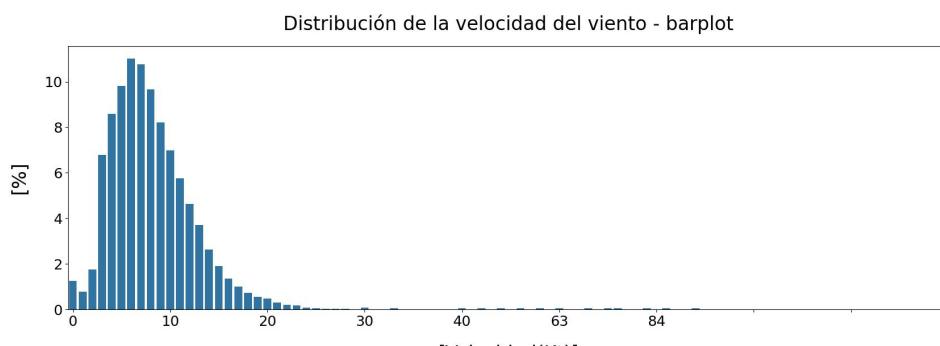


**Figura 3.2:** Intensidad del viento en función de la época del año

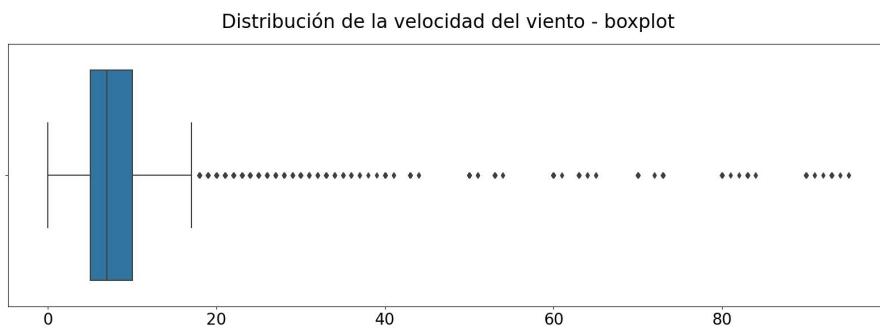
Se observa que los porcentajes se mantienen de manera similar. Sin embargo, al definir el rango de 0 a 10 kt como operaciones en las cuales las arribadas y

despegues apenas se ven afectados por el viento, se aprecia que Otoño y Verano, con un 78.7 % y 80 %, respectivamente, son las estaciones con las condiciones de viento más favorables. En contraste, Invierno destaca por una notable concentración de viento moderado, alcanzando un 28 %, mientras que Primavera exhibe el mayor porcentaje de condiciones extremas, llegando al 2.4 % de operaciones con ráfagas de 20 kt o más.

En el estudio se presentarán los datos en dos diagramas, el primero , un diagrama de barras donde se representará la intensidad del viento en el eje x y porcentaje que representa en el eje y. El segundo método de representación sera un diagrama de cajas.



**Figura 3.3:** Histograma de la velocidad del viento en LEBL



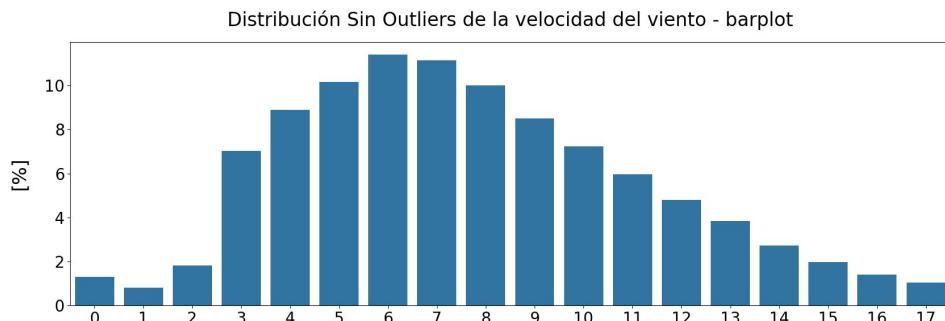
**Figura 3.4:** Diagrama de cajas de la velocidad del viento en LEBL

En el contexto del diagrama presentado, se observa que la muestra de datos meteorológicos debe ser examinada específicamente hasta alcanzar los 20 kt, dado que más del 98 % de los valores se sitúan dentro del intervalo comprendido entre 0 y 20 kt. Como resultado, para obtener una comprensión integral de la meteorología en el aeropuerto LEBL, se llevará a cabo un análisis de datos que excluye los valores atípicos.

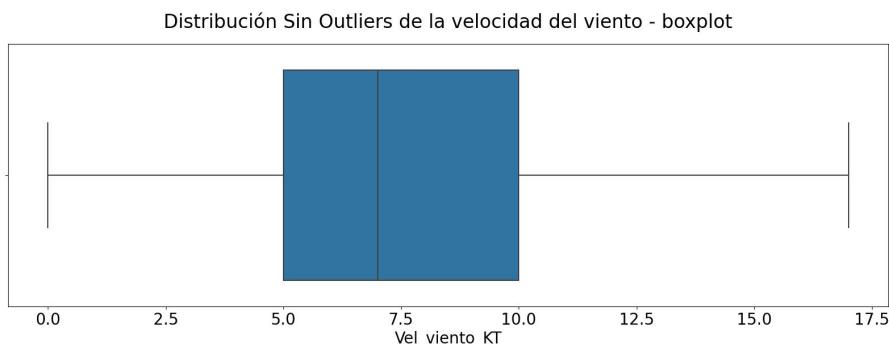
Es esencial destacar que estos valores atípicos no serán eliminados del conjunto de datos, ya que la operación en condiciones adversas no debe ser excluida del estudio. no obstante, para un análisis inicial y general de las condiciones climáticas,

se enfocará en las condiciones operativas más habituales

De esta forma se proceden a representar los diagramas anteriores discretizados en el rango:



**Figura 3.5:** Histograma de la velocidad del viento en LEBL - Sin outliers



**Figura 3.6:** Diagrama de cajas de la velocidad del viento en LEBL - Sin outliers

Para aquel lector que no se encuentre familiarizado con él , un diagrama de cajas presenta una caja central que representa el rango intercuartil, que contiene el 50 % central de los datos. El borde inferior de la caja marca es el valor por debajo del cual se encuentra el . El borde superior de la caja marca el tercer cuartil (Q3, 75 % de los datos). Aplicado al presente estudio, se puede extrapolar que el 75 % de las operaciones diarias en el aeropuerto de LEBL se desarrollan con una intensidad de viento entre los 0 - 10 kt.

### 3.1.2. Dirección del Viento

En la aeronáutica, los vientos son un factor crítico que afecta a las operaciones aeroportuarias y a la seguridad de los vuelos. Los tipos de vientos en función de la dirección se clasifican en tres categorías principales:

#### 1. Viento de frente (*Headwind*):

- Este tipo de viento sopla en dirección opuesta al movimiento de la aeronave, es decir, hacia ella.
- Ventajas: Proporciona un aumento en la velocidad del aire sobre las alas, lo que permite un despegue más corto y un aterrizaje a una velocidad más baja.
- Desafíos: En el despegue, puede requerir una mayor distancia para alcanzar la velocidad de despegue. En el aterrizaje, es importante reducir la velocidad lo suficiente para evitar problemas en la pista.

#### 2. Viento de cola (*Tailwind*):

- Este tipo de viento sopla en la misma dirección que la aeronave, aumentando su velocidad en relación con el suelo.
- Ventajas: Puede acelerar la aeronave durante el despegue, lo que reduce la distancia necesaria para despegar. También puede permitir un aterrizaje más suave y con una menor distancia de frenado.
- Desafíos: Un viento de cola excesivo puede hacer que la aeronave tenga una velocidad de aterrizaje demasiado alta, lo que podría aumentar la distancia de aterrizaje requerida y dificultar el control.

#### 3. Viento cruzado (*Crosswind*):

- El viento cruzado sopla de lado con respecto a la dirección de la pista.
- Ventajas: Permite el despegue y el aterrizaje en pistas que no están alineadas con la dirección del viento predominante.
- Desafíos: Puede ser uno de los vientos más difíciles de manejar para los pilotos, ya que requiere habilidades de control precisas para mantener la aeronave en la pista durante el despegue y el aterrizaje. Los vientos cruzados fuertes pueden ser especialmente desafiantes.

Además de estos tipos de vientos, es importante tener en cuenta que la velocidad y la dirección del viento pueden variar en diferentes altitudes y áreas del aeropuerto, lo que puede afectar significativamente las decisiones de despegue y aterrizaje. Los pilotos y controladores de tráfico aéreo trabajan juntos para tomar decisiones informadas sobre las operaciones en función de las condiciones del viento en un aeropuerto específico. La seguridad siempre es la prioridad principal en la aviación, por lo que se deben considerar cuidadosamente los efectos del viento en todas las etapas del vuelo.

La práctica de despegar y aterrizar contra el viento es fundamental en la aviación debido a varios factores críticos relacionados con la seguridad y el rendimiento de las aeronaves. A continuación, se detallan las razones clave por las cuales esta técnica es esencial:

1. **Aumento de la velocidad del aire relativa:** la aeronave experimenta un aumento en la velocidad del aire relativa sobre las alas generando mayor sustentación. Permite velocidades de despegue más eficientes y con una distancia de pista más corta. De manera análoga, al aterrizar contra el viento, la velocidad relativa reducida disminuye la velocidad reduciendo la distancia de pista requerida.
2. **Mayor control direccional:** El despegue y el aterrizaje contra el viento brindan una mayor estabilidad y control direccional a los pilotos. Esto se debe a que el viento frontal aumenta la fuerza de control, ayudando a mantener la aeronave alineada con la pista durante las fases críticas de despegue y aterrizaje. En contraste, el despegue o aterrizaje con viento de cola o viento cruzado puede presentar desafíos significativos en términos de control de la dirección.

Es importante indicar que la condición de viento en cara es muy importante y es por ello que la mayoría de grandes aeropuertos (con dos o más pistas) adaptan sus modos de operación en función de la dirección usual del viento. De esta forma surgen las configuraciones preferentes y no preferentes de los modos de operación.

De igual forma que en el estudio de la intensidad del viento se procede a representar el completo de la muestra estadística de los valores de dirección del viento agrupados por rangos de  $10^{\circ}$ . Es importante indicar que cuando se indica que el viento presenta dirección de  $10^{\circ}$  es que sopla desde 1. Siendo  $0^{\circ}$  el norte magnético.

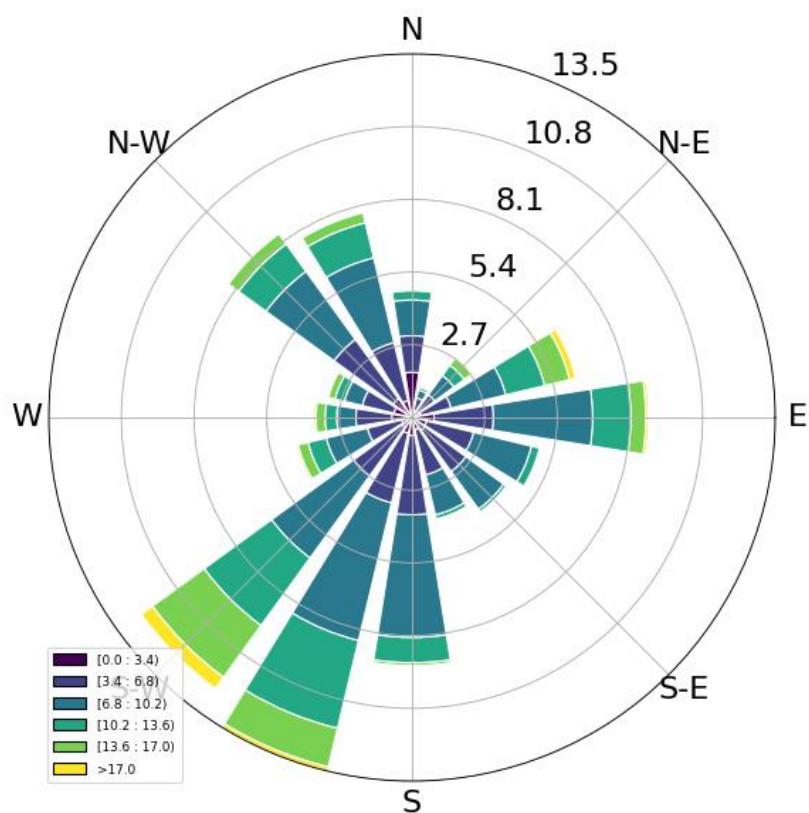


**Figura 3.7:** Histograma de la dirección del viento en LEBL - Sin Outliers

Como se ha visto en el capítulo anterior la configuración de pistas del aeropuerto de LEBL, presenta un total de 3 configuraciones. Estas configuración están ligadas a la dirección del viento y su importancia en las maniobras de arribada y despegue. A su vez la meteorología es muy variada, incluso varía radicalmente de unas horas a otras dentro de un mismo día. Además Barcelona al ser un aeropuerto cercano al mar se ve muy influenciado por las mareas y corrientes marítimas, ya que durante el día

la superficie terrestre se calienta, lo que puede generar brisas marítimas y terrestres. Por ejemplo, en las horas diurnas, la brisa marítima tiende a predominar, es decir que el viento provenga de la costa, mientras que por la noche, la brisa terrestre puede invertir la dirección del viento.

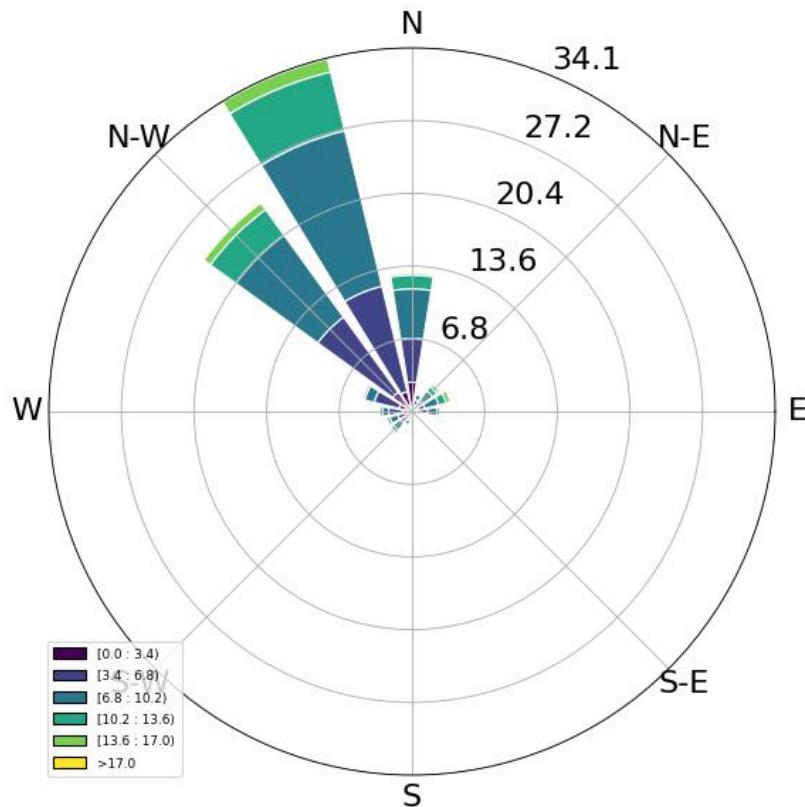
Para poder ver esto de manera visual se procede a representar un diagrama de rosa de vientos. Consiste en un círculo dividido en 360 grados, correspondientes a las direcciones geográficas, donde 0 grados (o 360 grados) es el norte, 90 grados el este, 180 grados el sur y 270 grados el oeste. En él se representan triángulos apuntando hacia el centro del círculo desde la dirección en la que sopla el viento. Las pirámides serán mayores en función del porcentaje de la muestra, una pirámide mayor, indicará mayor casuística de casos de esa dirección de viento. A su vez cada pirámide se colorea en función de la distribución de la velocidad del viento. Se ha dividido el estudio en dos gráficas, la primera para los períodos horarios diurnos comprendidos donde las configuraciones empleadas son la Oeste[W] (aterrizajes por la 24R y despegues por la 24L) ó Este[E] con (aterrizajes por la 06L y despegues por la 06R).



**Figura 3.8:** Diagrama de vientos - Configuración diurna

Se puede apreciar claramente con la configuración preferente se alinea con la dirección del viento ya que este toma en casi un 30 % de la casuística la dirección proveniente entre 200-240°, quedando alineada con la cabecera de pista de los aterrizajes nominales que se encuentra orientada dirección 240°, pista 24R. A su vez

se puede detectar un menor porcentaje de caso con una dirección del viento originaria del este, unos  $90^\circ$ , estos casos son un porcentaje menor entorno a 9 %, y se pueden asociar a días de meteorología variable que impliquen desplegar la configuración de pista alternativa. Por último mencionar una pequeña agrupación en torno los  $340^\circ$  e origen de viento, que como se verá a continuación es usual de los periodos nocturnos, por lo que se atribuye a las transiciones entre la configuración nocturna y diurna.



**Figura 3.9:** Diagrama de vientos - Configuración nocturna

Se puede apreciar claramente con la configuración preferente se alinea con la dirección del viento ya que este toma en casi un 30 % de la casuística la dirección proveniente entre  $200-240^\circ$ , quedando alineada con la cabecera de pista de los aterrizajes nominales que se encuentra orientada dirección  $240^\circ$ , pista 24R. A su vez se puede detectar un menor porcentaje de caso con una dirección del viento originaria del este, unos  $90^\circ$ , estos casos son un porcentaje menor entorno a 9 %, y se pueden asociar a días de meteorología variable que impliquen desplegar la configuración de pista alternativa. Por último mencionar una pequeña agrupación en torno los  $340^\circ$  e origen de viento, que como se verá a continuación es usual de los periodos nocturnos, por lo que se atribuye a las transiciones entre la configuración nocturna y diurna.

### 3.2. Descripción del tipo de operación

La segunda base de datos esencial para el presente estudio recoge a cada uno de los movimientos aeroportuarios, proporcionando una descripción detallada de cada operación. Esta base de datos ha sido proporcionada por el tutor académico que supervisa este trabajo y su uso o distribución no están permitidos. Cabe destacar que el uso de los datos en este estudio ha sido únicamente académico, sin fines lucrativos.

La base de datos abarca un registro exhaustivo de todas las operaciones llevadas a cabo en el aeropuerto LEBL, clasificadas en diversas categorías que se explorarán en detalle más adelante. Los datos recopilados abarcan los movimientos aeroportuarios desde el año 2009 hasta el año 2017. Con el fin de analizar de manera más efectiva la distribución temporal de estos movimientos, se ha optado por representarlos mediante un gráfico de barras agrupado por año. Este enfoque visual proporcionará una comprensión más clara de las tendencias y patrones que han caracterizado la actividad aeroportuaria durante este período de tiempo.

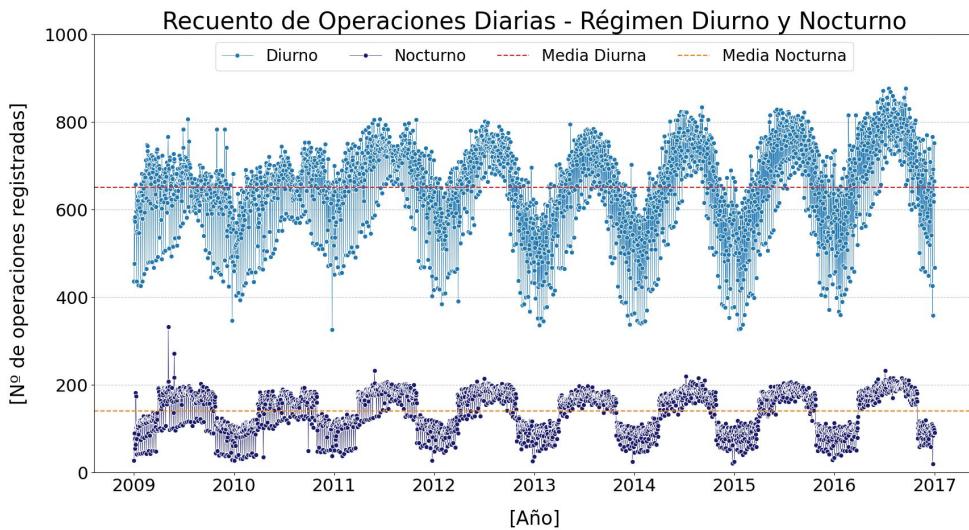


**Figura 3.10:** Recuento de operaciones anuales en el aeropuerto LEBL

En el diagrama se evidencia que el aeropuerto ha gestionado un mínimo de 280,000 operaciones anuales, y lo notable es que la tendencia desde 2013 ha sido ascendente, superando las 300,000 operaciones anuales. Además, se observa una línea horizontal que representa la media de operaciones durante el período analizado. En el inicio del gráfico, en 2009 y 2010, coincide con la crisis económica mundial, lo que resultó en una marcada disminución de las operaciones, cayendo significativamente por debajo de la media. Sin embargo, a partir de 2013, el tráfico en el aeropuerto de Barcelona ha mostrado una tendencia alcista, experimentando un crecimiento de hasta el 6.2% en el año 2016.

No obstante, la distribución temporal de las operaciones a lo largo del año no exhibe equidad, sino que responde a la estacionalidad del período. Para una

comprensión más detallada, recurrimos a la representación gráfica adjunta, donde se ha configurado un análisis diario del número de operaciones en el aeropuerto de Barcelona. Dado que las operaciones no se distribuyen de manera homogénea a lo largo del día, se ha establecido una distinción entre dos períodos que coinciden con los regímenes de operación de las configuraciones del aeropuerto. La configuración diurna, con una duración de 16 horas, comprendida entre las 07:00 y las 23:00 horas (hora local), se representa en color azul claro. En contraste, la configuración nocturna, abarcando desde las 24:00 hasta las 06:00 horas (8 horas en total), se representa en azul oscuro. Asimismo, se han trazado líneas horizontales que indican la media de operaciones para cada uno de los períodos, siendo rojo para el periodo diurno y marrón para el nocturno.



**Figura 3.11:** Recuento de operaciones diarias en el aeropuerto LEBL

La tendencia observada en la distribución de operaciones a lo largo de los años revela de manera evidente una naturaleza cíclica, alcanzando su punto máximo durante los meses estivales y descendiendo al mínimo en los meses invernales. Esta variación estacional se encuentra directamente correlacionada con la tipología del tráfico aéreo del aeropuerto, siendo su dinámica intrínsecamente vinculada al sector turístico, especialmente durante la temporada estival, donde la ciudad de Barcelona experimenta un aumento significativo de visitantes. Esta tendencia se manifiesta de manera más pronunciada en la configuración diurna del aeropuerto. Es esencial destacar que, a pesar de esta variabilidad estacional, la media diurna de operaciones se mantiene en 650 operaciones diarias. Al extraer este promedio a lo largo de las 16 horas que abarca el periodo diurno, se obtiene un total sostenido de 54 operaciones por hora a lo largo de todo el año. Este indicador posiciona al aeropuerto de Barcelona en el segundo aeropuerto más transitado de España. A lo largo del capítulo se continuará describiendo la clasificación de las operaciones aeroportuarias.

### 3.2.1. Clase de tráfico y servicio

En este apartado comenzaremos detallando la clase de tráfico y servicio de los movimientos. Para ello nos apoyaremos en el cuadro 3.2, el cual proporciona una descomposición detallada de los movimientos aéreos en Barcelona según **la clase de tráfico**. En esta categoría, destaca significativamente la prevalencia de operaciones de tipo *Comercial*, que abarcan un impresionante 99.04 % del total de movimientos aéreos. Este predominio en las operaciones comerciales puede atribuirse a la posición estratégica de Barcelona como un importante centro económico y turístico en la región. La presencia de un aeropuerto con un enfoque particular en vuelos comerciales refleja la fuerte demanda de conectividad aérea para actividades empresariales y turísticas en la zona. Aunque las *Otras clases de tráfico* constituyen el 0.96 % restante, su diversidad y especificidad probablemente contribuyen al carácter multifacético de las operaciones aéreas en Barcelona.

**Cuadro 3.2:** Distribución de Movimientos Aéreos por Clase de Tráfico.

Clase Trafico	Recuento	%
Comercial	2289518	99.04
Otras clases de tráfico	22227	0.96

La categoría *Comercial* engloba la gran mayoría de los movimientos aéreos, representando un impresionante 99.04 % del total. Este tipo de operación se refiere a vuelos destinados principalmente a actividades comerciales y empresariales. Algunos ejemplos son Vuelos de líneas aéreas regulares ó chárter comercial. Mientras que el 0.96 % representa el conjunto restante de los movimientos aéreos y abarca operaciones que no caen directamente bajo la clasificación comercial. Esta categoría es diversa y puede incluir una variedad de operaciones aéreas especializadas y menos frecuentes.

A la vista de los datos, se tomará la siguiente hipótesis. Restringir el análisis a los movimientos aéreos clasificados como Comercial. Esta decisión se fundamenta en la homogeneización de la tipología de vuelos, simplificando así el modelo al eliminar la variabilidad asociada a otras clases de tráfico. La categoría Comercial se considera uniforme, lo que permite una focalización precisa en los factores específicos de este tipo de operaciones aéreas. **De esta forma la variable Clase de tráfico no será un input del modelo ya que es una constante.**

Una clasificación adicional que reviste importancia es la referente a la **clase de servicio** asociada a los movimientos aéreos, abordando diversas categorías de servicios que se encuentran vinculados con dichos movimientos. En el análisis de los datos en bruto, se distinguen tres grupos fundamentales. En primer lugar, se encuentran los movimientos regulares, caracterizados por su regularidad y programación establecida. El segundo grupo comprende los movimientos no regulares, que presentan una mayor variabilidad en términos de frecuencia y horarios. En el tercer grupo se engloban casuísticas especiales, abarcando movimientos vinculados a trabajos aéreos específicos, funciones gubernamentales, operaciones militares o actividades docentes. Esta categoría se asociará al grupo *Otros*.

Con el propósito de realizar un análisis más exhaustivo de la categoría de la clase de servicio y mejorar la comprensión de los datos en el contexto de este estudio, se hace uso del cuadro 3.3 que se exhibe a continuación.

**Cuadro 3.3:** Distribución de Movimientos Aéreos por Clase de servicio.

Clase servicio	Recuento	%
Regular	2150625	93.04
No regular	115226	4.98
Otros	45894	1.98

De igual forma que en la casuística anterior, se aprecia como la categoría *Regular* engloba la gran mayoría de los movimientos aéreos, representando el 93.04 % del total. Este tipo de operaciones implica la ejecución sistemática y programada de vuelos por una aerolínea, siguiendo una planificación específica de horarios, rutas y frecuencias. Se caracteriza por la repetición constante de servicios de transporte aéreo entre destinos predeterminados. La eficiencia de estas operaciones depende de la gestión precisa de recursos, la logística coordinada, la optimización de flotas, el cumplimiento normativo y la seguridad operacional. Su importancia radica en la facilitación del transporte masivo de pasajeros y carga de manera predecible y programada, contribuyendo a la conectividad global de manera eficiente y segura. Es por ello que solo se tendrán en cuenta este tipo de datos para el modelo, de tal forma que **la variable Clase de servicio no será un input del modelo ya que es una constante**.

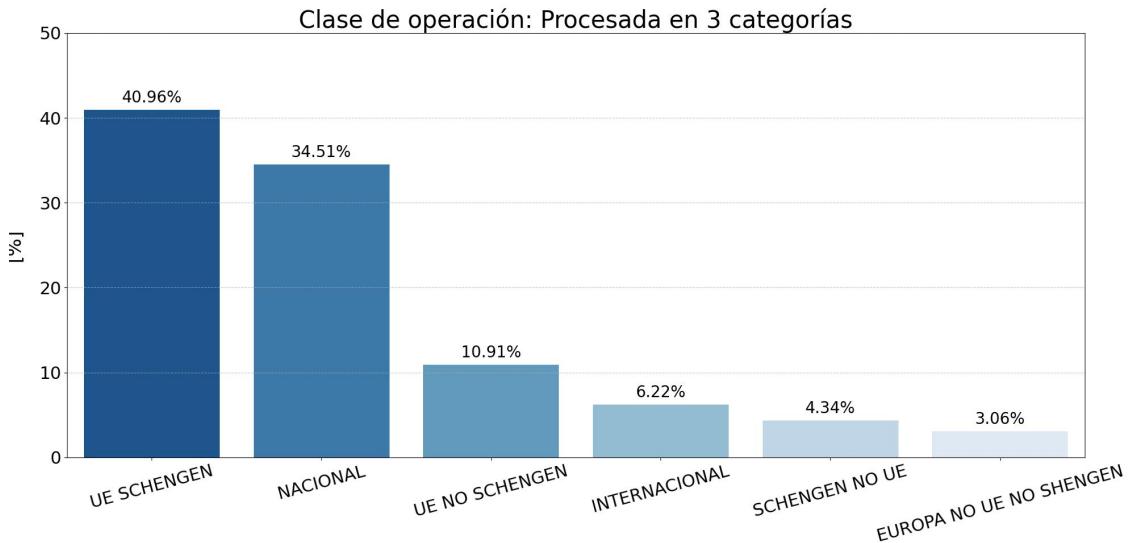
### 3.2.2. Clase de operación según origen y destino

En el marco del análisis exploratorio de movimientos aéreos, se procederá a desglosar las categorías de vuelos en aeropuertos nacionales de España. Esta descomposición según alcance geográfico y propósito proporciona una visión detallada de la complejidad operativa en el ámbito aeroportuario. A continuación, se presentan las categorías fundamentales, sus definiciones técnicas y ejemplos específicos, arrojando luz sobre la diversidad y particularidades de las operaciones aéreas en este contexto.

- UE Shengen: Vuelos con destino a países que forman parte del espacio Shengen de la Unión Europea, facilitando el movimiento sin controles fronterizos internos. Un vuelo desde Barcelona a París, ambos ubicados en países Shengen.
- Nacional: Vuelos domésticos que conectan diferentes regiones dentro de España. Un ejemplo sería un vuelo desde Barcelona a Madrid, ambos destinos dentro del territorio nacional español.
- UE no Shengen: Vuelos con destino a países de la Unión Europea que no forman parte del espacio Shengen, implicando posiblemente controles fronterizos. Un ejemplo sería un vuelo desde Barcelona a Bucarest, Rumanía.

- Internacional: Vuelos con destino a países fuera de la Unión Europea, involucrando procedimientos aduaneros y de inmigración. Un ejemplo sería un vuelo desde Barcelona a Nueva York, Estados Unidos.
- Shengen no UE: Vuelos con destino a países del espacio Schengen que no son miembros de la Unión Europea. Un ejemplo sería un vuelo desde Barcelona a Oslo, noruega.
- Europa no UE no Shengen: Vuelos con destino a países europeos que no son miembros ni del espacio Schengen ni de la Unión Europea. Un ejemplo sería un vuelo desde Barcelona a Londres, Reino Unido.

Los datos utilizados en el presente análisis presentan una distribución en la que la categoría *UE Schengen* destaca respecto al resto, con un 41 %. Le sigue la clase *Nacional*, indicando una presencia destacada de operaciones aéreas de carácter doméstico. Entre estas dos categorías se logra agrupar entorno a un 75 % de las operaciones totales del aeropuerto de LEBL. Por otro lado, las clases *UE no Schengen*, *Internacional*, *Shengen no UE* y *Europa no UE no Schengen* contribuyen en menor medida, reflejando una diversificación de operaciones internacionales y regionales en el aeropuerto. Esta diversidad de clases de operación pone de manifiesto la complejidad y la variedad de servicios aéreos que caracterizan la actividad aeroportuaria en Barcelona.

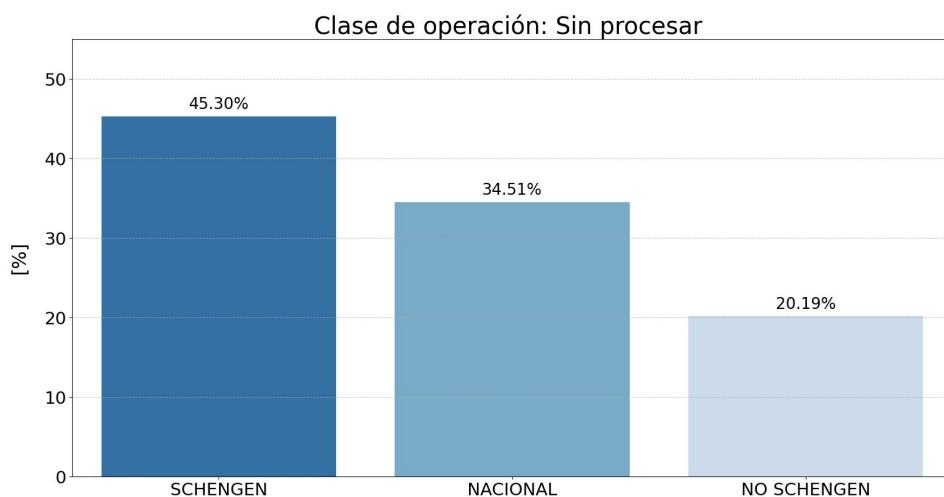


**Figura 3.12:** Distribución de la Clase de operación

No obstante, la clasificación en seis bloques no es la configuración óptima para un modelo predictivo, ya que al tratarse de una variable categórica, generaría seis entradas binarias. La decisión de no utilizar la clasificación en seis bloques se basa en consideraciones de eficiencia computacional en el contexto del aprendizaje automático. Dado que la variable en cuestión es categórica, cada categoría se traduciría en una representación binaria, generando así seis entradas binarias distintas. Este enfoque

conlleva un aumento significativo en la complejidad computacional, ya que implica el manejo de múltiples dimensiones y operaciones.

Por ende, optar por una reducción a tres grupos implica simplificar la representación de la variable categórica, limitándola a tres entradas binarias en lugar de seis. Esta reducción tiene el propósito de mitigar la carga computacional asociada con el procesamiento de datos, facilitando así la eficiencia y la velocidad de entrenamiento del modelo predictivo en el ámbito del machine learning. Esta nueva clasificación sería: vuelos nacionales, operaciones con países pertenecientes al espacio Schengen y aquellas que no forman parte del mismo. De esta manera, se logra una nueva distribución que optimiza la eficiencia computacional del modelo. Esta nueva clasificación quedaría representada de la siguiente forma:

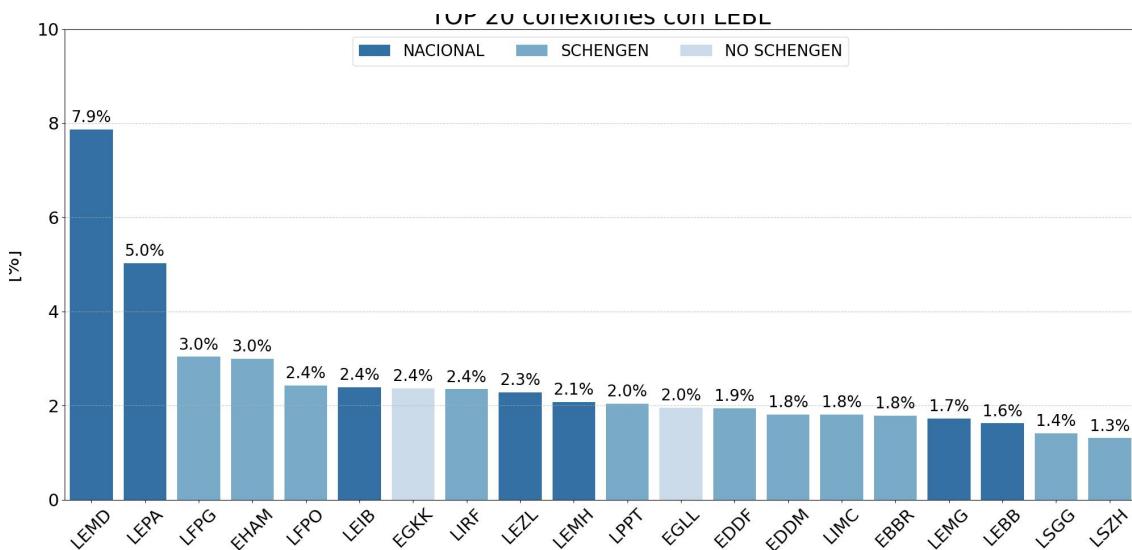


**Figura 3.13:** Distribución de la Clase de operación - Caracterizada a 3 variables

Además, se ha decidido desarrollar un análisis de conexiones aeroportuarias, por número de operaciones. Estas conexiones se denominan *City pairs* y se define como combinaciones específicas entre dos ciudades que actúan como puntos de origen y destino. Comprender los *City pairs* es crucial para las aerolíneas, los aeropuertos y los planificadores de aviación, ya que les ayuda a evaluar la demanda del mercado, planificar rutas y optimizar sus redes. El concepto es fundamental para analizar el flujo de pasajeros y carga entre diferentes centros urbanos, permitiendo a los interesados tomar decisiones informadas sobre la programación de vuelos, la planificación de la capacidad y la gestión general de los viajes aéreos. A continuación se muestran los 20 aeropuertos con más numero de operaciones en un diagrama de barras:

Del gráfico anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se puede comprobar que la ruta más transitada se corresponde a la conexión con Madrid-Barajas (LEMD). Esta es una ruta nacional y representa casi el



**Figura 3.14:** Distribución de la Clase de operación - Top 20 City Pairs

8 % de todos los movimientos. La alta frecuencia se deberse a la importancia de estas dos ciudades como centros de negocios y políticos en España, generándose lo que se conoce como puente aéreo.

- La segunda conexión principal también es un aeropuerto nacional, Palma de Mallorca (LEPA) con alrededor del 5 % de los movimientos. Esto puede explicarse por la popularidad de la isla como destino turístico, especialmente desde Barcelona.
- El siguiente destino ya sería un país europeo, Francia, con los aeropuertos de París - Charles de Gaulle (LFPG) y París - Orly (LFPO), siendo la tercera y quinta conexión, sumando entre ambos un 5.5 % del total. Le siguen otras ciudades europeas como Amsterdam - Schiphol (EHAM), an con un 3 % de los movimientos ó Londres - Gatwick (EGKK) que a pesar de no pertenecer al espacio Schengen, la ruta ocupa el séptimo lugar en términos de frecuencias. Esto sugiere una demanda significativa de vuelos a Londres desde Barcelona.

A continuación se procede a representar las rutas de los top 20 conexiones desde LEBL. En el gráfico se puede apreciar claramente que todos los destinos son de corto - medio alcance, siendo un 35 % vuelos nacionales, un 55 % vuelos a países Schengen y el 10 % restante a países no Schengen. Además se intenta detallar el porcentaje que supone estos destinos mediante el grosor de la línea de conexión destacando Madrid (LEMD) y Palma (LEPA).

### 3.2.3. Categoría de estela turbulenta y modelos de aeronave

La clasificación de aeronaves en términos de estela turbulenta se fundamenta en la masa máxima certificada al despegue (MTOW), estableciendo categorías específicas para definir las distancias mínimas de separación. Esta clasificación está asociada a la documentación específica publicada por la empresa ENAIRE, recogido en el documento [17], del que se puede extraer la siguiente clasificación:

- La categoría *Super (J)* se reserva exclusivamente para las aeronaves Airbus A380-800, dada su envergadura y masa única.
- La categoría *Heavy (H)* agrupa a aeronaves con una MTOW igual o superior a 136.000 kg. Esta clasificación se proyecta hacia las aeronaves de mayor tonelaje, imponiendo distancias mínimas de separación que reflejan la magnitud de las perturbaciones turbulenta generadas por estas máquinas.
- La categoría *Medium (M)* engloba a aeronaves con una MTOW inferior a 136.000 kg pero superior a 7.000 kg, representando a aeronaves de tamaño medio con requerimientos de separación intermedios.
- La categoría *Light (L)* incluye a aeronaves con una MTOW de 7.000 kg o menos, denotando aeronaves más pequeñas y livianas con menores exigencias de separación.

A continuación se procede a analizar la clasificación de la categoría según la estela turbulenta aplicada al caso de estudio.

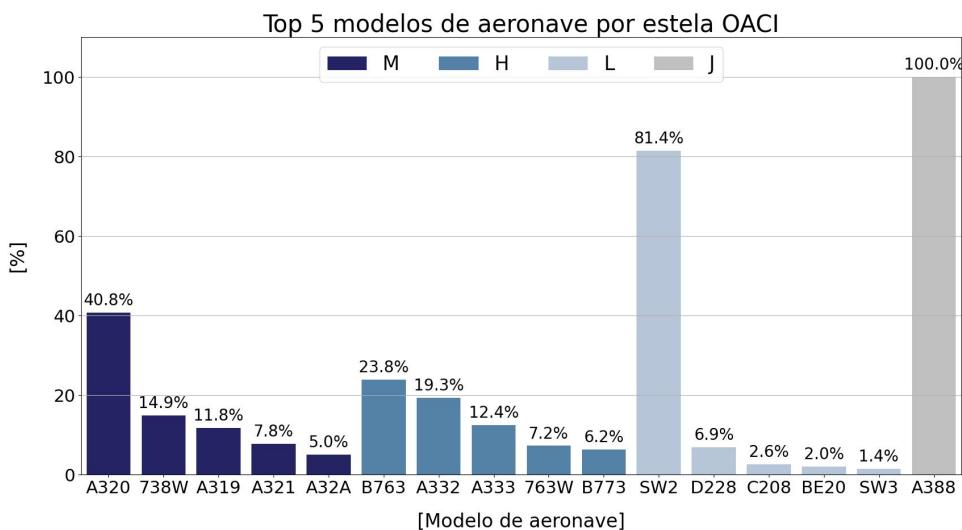
**Cuadro 3.4:** Distribución de la Categoría Estela.

WTC	Recuento	%
M	2188692	94.67
H	87093	3.87
L	29468	1.27
J	2536	0.11
-	4172	0.18

Se puede apreciar que la categoría dominante es la tipología *Medium (M)*, seguida de *Heavy (H)*, solo estas dos categorías suponen casi el total de las operaciones aeroportuarias de LEBL. A su vez en la tabla anterior se puede observar que existe un pequeño porcentaje de casos en los que no se ha podido distinguir la estela de la aeronave, este tipo de casos se deciden eliminar directamente del modelo, ya que no suponen un porcentaje elevado de los casos. Esta categoría supondrá una entrada categórica al modelo que optará de 4 posibles valores.

Tras la categorización de las estelas, se inicia un análisis focalizado en las diversas aeronaves que integran dicha clasificación. Para realizar este estudio, se realizará una selección de los cinco modelos de aeronaves con mayor porcentaje de uso en la muestra estadística de cada categoría. Cabe destacar que, en este contexto, la

aeronave se refiere al vehículo en sí mismo, mientras que la estela hace referencia a los rastros visibles o medibles dejados en la atmósfera por la interacción de la aeronave con el entorno. La diferencia fundamental radica en que la aeronave es el objeto físico y mecánico que se desplaza a través del aire, mientras que la estela se centra en los efectos colaterales visibles o detectables generados por la aeronave durante su desplazamiento. Es por ello que distintos modelos de aeronave se agrupan dentro de una misma categoría. El estudio se llevará a cabo utilizando una representación gráfica específica como herramienta de apoyo para la investigación.



**Figura 3.15:** Modelos de aeroneves mas utilizados en función de la WTC

En la gráfica se ha separado por categoría de estela, ordenando de izquierda a derecha, aquellas con mayor casuística, es decir, a la izquierda aparece representada la categoría M que como se ha explicado anteriormente aglutina casi el 94 % del total de los movimientos, en contraposición, a la derecha de la gráfica se encuentra representada la categoría Super Heavy (J) que apenas supone un 0.2 % del total. Dentro de cada grupo se han elegido los 5 modelos con mayor casuística:

- La categoría *Medium(M)* engloba a los modelos Airbus A-320 prestige [A320] (40.76 %), Boeing 737-800 winglets [738W] (14.85 %), Airbus A-319 ACJ[A319] (11.75 %), Airbus A-321[A321] (7.79 %) y Airbus A-320 con sharklets [A32A] (5 %).

Son todo aeronaves de pasillo único, de corto - medio alcance. Dentro de la familia Airbus se diferencian por el número total de asientos máximos, siendo el A319 el más pequeño (124-156), seguido del A320 (140-200) y del A321 (185-240). Mencionar la presencia del A32A, que es un A320 pero con Sharklets. Mientras que por la contraparte de Boeing se encuentra el Boeing 737-800 Winglets (738W) con alrededor de 190 pasajeros.



**Figura 3.16:** Aeronaves WTC Medium: izquierda A32A - derecha 738W

- La categoría *Heavy(H)*: está encabezada por el modelo Boeing 767-300 [B763] (23.9 %) y cuenta además del Boeing 767-300 Winglets[763W] y Boeing 777-300 [B773], Alcanzando el 37.4 % de representación dentro de la categoría de pesados. Por parte del fabricante europeo Airbus, ocupa el segundo y tercer puesto de esta categoría con su modelo A330, tanto en la versión [A333] y [A332] sumando un 31.62 %.



**Figura 3.17:** Aeronaves WTC Heavy: izquierda A333 - derecha B773

Todos los modelos mencionados dentro de la categoría Heavy se caracterizan por ser aviones de fuselaje ancho, ideales para rutas de largo alcance y vuelos transoceánicos. Las diferencias se centran en la capacidad de pasajeros, llegando en el A333 a estar entre 277-440 o 550 pasajeros en el B773.

- La categoría *Light (L)*: En esta clasificación nos encontramos con aeronaves ligeras, que no superan los 20 pasajeros en la mayoría de casos. El primer exponente es swearingen SA-26 Merlin 2[SW2] (54 %) seguido del Diamond da-40 Katana Star [DA40] (24%). Estos modelos abarcan desde aeronaves de entrenamiento y recreación hasta opciones regionales y especializadas.
- La categoría *Superheavy (J)*: En esta categoría solo se encuentra un modelo de aeronave, el Airbus A380-800 [A388]. Representa un hito en la aviación como el avión de pasajeros más grande del mundo, con capacidad para 550 personas. Sin embargo, a pesar de sus logros técnicos, el A380-800 ha experimentado desafíos en su operación. El desuso gradual de este modelo se ha visto reflejado en la retirada de su producción, en parte debido a la evolución de la demanda del



**Figura 3.18:** Aeronaves WTC Light: izquierda SW2 - derecha DA40

mercado hacia aviones más eficientes en términos de consumo de combustible y mayor flexibilidad operativa. Además, la complejidad logística asociada con el manejo de este avión en los aeropuertos, incluyendo la necesidad de infraestructuras específicas, ha contribuido a su retirada de servicio en algunas aerolíneas.

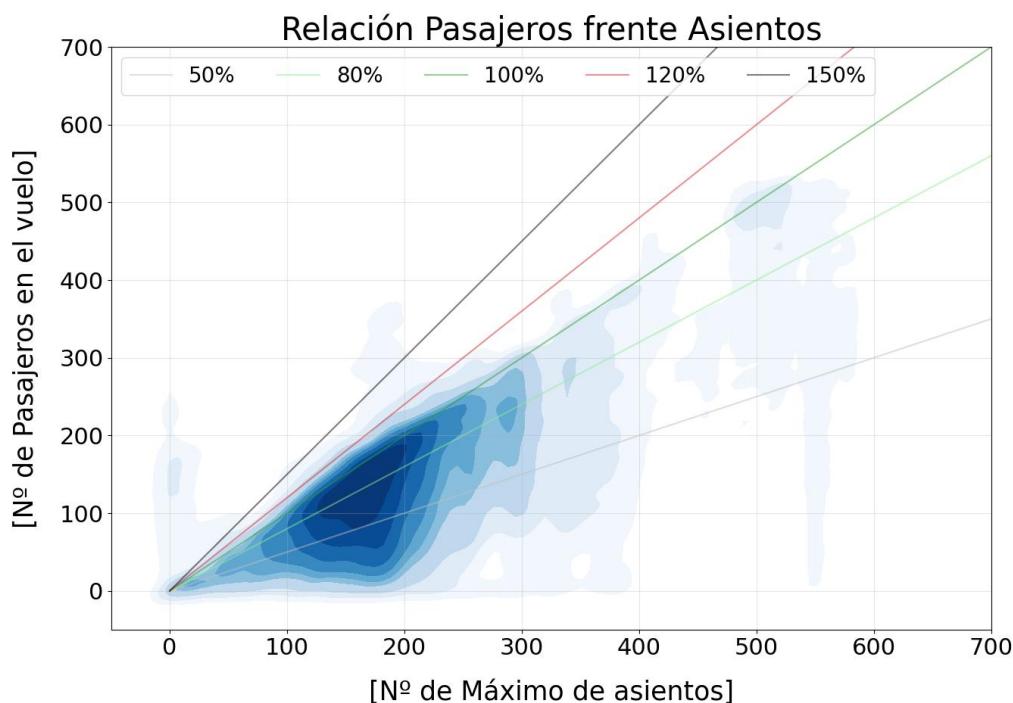


**Figura 3.19:** Aeronave WTC Superheavy: Airbus A380

### 3.2.4. Estudio de Asientos y Pasajeros. Ratio de ocupación

En el presente análisis se llevará a cabo un estudio exhaustivo del nivel de ocupación de las aeronaves en cada una de las operaciones registradas en la base de datos. Para este propósito, se emplearán dos variables fundamentales: el número de pasajeros transportados y el número máximo de asientos disponibles en cada aeronave. La primera variable representa el número real de individuos transportados durante una operación, mientras que la segunda denota la capacidad máxima de pasajeros que puede alojar una aeronave en una operación específica.

Ambas variables serán visualizadas gráficamente en un diagrama de dispersión, donde el eje y representa el número de pasajeros del vuelo y el eje x representa el número máximo de asientos disponibles en la aeronave. Este diagrama de dispersión será complementado con un mapa de calor que resalta las combinaciones más recurrentes de ambas variables en la muestra de datos. En este mapa, los tonos azules más oscuros indican una mayor densidad de observaciones, mientras que los tonos más claros denotan menor densidad.



**Figura 3.20:** Gráfico de densidad Nº de pasajeros vs capacidad máxima

Se extraer las siguientes conclusiones:

- Se observa una concentración notable de casos en el rango de 170 a 200 pasajeros, así como una tendencia similar en cuanto al número máximo de asientos ofertados. Esta observación se alinea con la distribución predominante de la estela WTC medium (M) entre las aeronaves analizadas, la cual sugiere una capacidad máxima de pasajeros cercana a los 180-200 asientos. Este fenómeno

se relaciona directamente con la estrategia operativa de las aerolíneas, quienes buscan maximizar la eficiencia de sus operaciones y minimizar la cantidad de asientos vacíos durante los vuelos.

- También se pueden apreciar valores anómalos como por ejemplo en el extremo inferior izquierdo de la figura se muestra que existe un pequeño cúmulo de casos (azul claro) donde el número de pasajeros es entorno a doscientos pero el número máximo de asientos es 0. En estos casos se ha decidido sustituir el número de asientos por la moda del modelo de aeronave. Un ejemplo sería una operación que indique que trasladó 81 pasajeros pero el número de asientos era de 0 para un modelo de aeronave A321, se sustituirá el número de asientos por la moda de ese modelo de aeronave en concreto es de 200.
- A su vez en el gráfico se representan unas rectas, estas representan el cociente entre las dos variables para distintos pendientes. De tal forma que representan el porcentaje de ocupación 50 (marrón), 80(verde claro), 100(verde), 120(rojo) y 150(negro). Se puede ver claramente que la muestra estadística se encuentra entre las dos líneas de color verde, que representan un 80 %-100 % de ocupación. Aunque si se pueden distinguir zonas tanto en rangos superiores como inferiores. Este cociente se define como ratio de ocupación de una aeronave, y es una variable muy descriptiva, por ello a continuación se dedica un estudio aislado para poder entender y comprender mejor este índice.

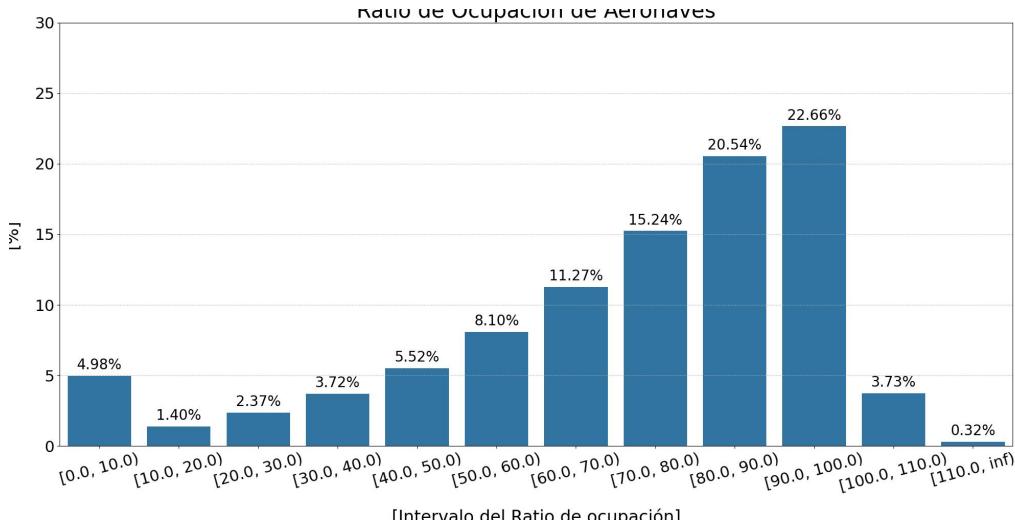
El ratio de ocupación de una aeronave se refiere a la proporción de asientos ocupados en relación con el número total de asientos disponibles en un vuelo específico. Se expresa comúnmente como un porcentaje y es un indicador clave para las aerolíneas, ya que afecta directamente sus ingresos y rentabilidad. Un alto ratio de ocupación generalmente indica una buena eficiencia en la utilización de la capacidad de la aeronave, mientras que un ratio bajo podría sugerir que la aerolínea está teniendo dificultades para llenar sus vuelos. Las aerolíneas buscan mantener ratios de ocupación elevados principalmente por razones económicas y de eficiencia operativa. Además, un mayor ratio de ocupación contribuye a la maximización del ingreso por asiento-milla disponible (RASM) que indica los ingresos generados por cada asiento-milla ofrecido. para tratar de disminuir el costo por asiento-milla (CASM). Esta eficiencia en la gestión de costos es crucial para la rentabilidad de las aerolíneas, ya que permite afrontar los desafíos de una industria caracterizada por márgenes estrechos y costos significativos.

Una vez entendido el potencial de esta variable se decide realizar un estudio enfocado a esta variable, sin embargo, este valor no se encontraba en la base de datos, por lo que se ha procedido a calcular como se mencionaba anteriormente :

$$\text{Ratio de Ocupación} = \left( \frac{\text{Número de Pasajeros}}{\text{Número Total de Asientos}} \right) \times 100$$

Una vez calculado el ratio de ocupación se ha decidido agrupar por rangos porcentuales de 10 %. De esta forma se genera el siguiente diagrama de barras donde se puede apreciar el factor de ocupación de una forma mucho mas clara y concisa. En el eje x

se muestran los distintos rangos de ocupación (calculados en porcentaje) y en el eje y la frecuencia (también en porcentaje) de la frecuencia de cada uno:



**Figura 3.21:** Ratio de Ocupación

Se ratifica como los principales ratios de ocupación se encuentran entre el 60 % - 100 %, aglutinando casi un 75 % de locas casos. Esto serían vuelos en rutas altamente demandadas, especialmente en períodos de alta temporada o en vuelos internacionales de corta duración. Destacar que existen casuísticas como la sobreocupación, llegando a un casi 4 % de los casos registrados, esto podría deberse a situaciones excepcionales, como reservas de último minuto en vuelos muy solicitados.

A su vez también se aprecia casi un total del 15 % de los casos con un porcentaje de ocupación menor al 50 %. Algunos ejemplos serían vuelos en rutas con demanda variable o en horarios poco populares ó vuelos regulares pero de carga , en la que el número de pasajeros apenas supera un 10 % del máximo de la aeronave. Finalmente se decide tomar la decisión de retirar del modelo aquellas casuísticas con un porcentaje de ocupación superior de un 110 % de ocupación , ya que no se corresponden a casuísticas estándar sino que responden a valores muy atípicos, y representan únicamente el 0.3 %.

### 3.2.5. Resumen de Hipótesis

En el presente estudio, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis que incluyó la formulación y evaluación de diversas hipótesis. Este proceso inició con un conjunto inicial de datos que comprendía un total de 2.311.961 operaciones. Sin embargo, como resultado de un riguroso proceso de filtrado y refinamiento de los datos, el análisis exploratorio culminó con un conjunto reducido de 2.148.573 operaciones. Esta reducción en la muestra de datos representó un 7.07 % del total inicial.

El conjunto de hipótesis tomadas para el filtrado de los datos son las siguientes:

- Solo se tendrán en cuenta las operaciones que presenten la clase de Tráfico Comercial y la clase de servicio regular.

**Cuadro 3.5:** Distribución de la Categoría Estela.

Clase Tráfico	Clase servicio	Recuento	%
Comercial	Regular	2148573	100

- La clase de operación podrá adquirir un total de 3 valores categóricos: vuelos nacionales, operaciones con países pertenecientes al espacio Schengen y aquellas que no forman parte del mismo.

**Cuadro 3.6:** clase de operación filtrada.

Clase Operación	Recuento	%
Schengen	973591	45.31
Nacional	740178	34.45
No Schengen	434804	20.24

- La clase de estela turbulenta(WTC) podrá adquirir un total de 4 valores categóricos: Super (J), Heavy (H), Medium (M) y Light(L)

**Cuadro 3.7:** clase de WTC filtrada.

Clase de estela WTC	Recuento	%
Medium (M)	2062244	95.98
Heavy (H)	83057	3.87
Super (J)	2525	0.12
Light (L)	747	0.03

- Se han combinado dos variables, el número de pasajeros y el número máximo de asientos en una nueva variable, el ratio de ocupación, ya descrito en la sección 3.2.4. Este parámetro será un valor numérico, que podrá adoptar valores desde el 0 % - 110 %, debido a que se han eliminado los registros con valores superiores a 110 %, como se ha explicado con anterioridad. Al ser una variable numérica los futuros modelos podrán adoptar cualquier entrada siempre que se mantenga en este rango.

Para poder describir la muestra se ha decidido representar los percentiles desde el 5 hasta el 100 en la siguiente tabla.

**Cuadro 3.8:** Tabla de percentiles y valores de ocupación

Percentil	Ratio de Ocupación
5 %	30.00
10 %	42.69
20 %	56.84
30 %	66.11
40 %	73.37
50 %	79.44
60 %	84.43
70 %	88.89
80 %	92.78
90 %	96.67
100 %	109.94

# 4

## Variables derivadas a través de metodologías de Big Data

### Índice

---

<b>4.1. Estudio de la demanda . . . . .</b>	<b>38</b>
4.1.1. Estudio de la Demanda/Horaria Real . . . . .	38
4.1.2. Análisis de demanda real frente a demanda prevista . . .	43
4.1.3. Conclusiones extraídas del estudio . . . . .	47
<b>4.2. Estudio de escalas . . . . .</b>	<b>48</b>
4.2.1. Generalización de los modelos Hub and Spoke . . . . .	48
4.2.2. Generación del cosido de aeronaves . . . . .	50
4.2.3. Descripción de la tipología de escalas . . . . .	51
4.2.4. Correlación del tiempo de escala y la demora . . . . .	53

---

En los capítulos anteriores, se ha demostrado cómo el análisis exploratorio de datos se ha vuelto cada vez más desafiante debido al crecimiento exponencial en el volumen y la complejidad de los conjuntos de datos disponibles. El advenimiento de la era del Big Data ha permitido a los investigadores acceder a una cantidad sin precedentes de información, generando nuevas oportunidades y desafíos en la extracción de conocimiento significativo. Sin embargo, el mero acceso a grandes cantidades de datos no garantiza insights valiosos; es esencial la habilidad para generar nuevas variables que capturen aspectos relevantes de los fenómenos estudiados.

En este contexto, este capítulo se enfoca en la generación de variables mediante técnicas avanzadas de Big Data. Para ello se han generado dos verticales de análisis: Un primer estudio sobre la relación entre la demanda prevista y la real y un segundo estudio de las escalas aeroportuarias.

## 4.1. Estudio de la demanda

En esta sección del estudio se procede a analizar la demanda del aeropuerto, comparando así la demanda prevista frente a la demanda real que finalmente existió, es decir, el número de aeronaves que solicitan realizar una operación (Demanda prevista) frente a lo que el aeropuerto fue capaz de absorber (Demanda real).

### 4.1.1. Estudio de la Demanda/Horaria Real

Como se mencionó en la sección 2.3 sobre la Relación Capacidad - Demanda, el aeropuerto de LEBL declara una capacidad operativa de aproximadamente 80 operaciones por hora, con una distribución específica de 38 aterrizajes y 40 despegues. Esta capacidad refleja el máximo potencial operativo durante las horas de mayor demanda, conocido como AHP (Aeronaves por Hora Punta). Sin embargo, es importante destacar que un aeropuerto rara vez opera de manera constante bajo estas condiciones máximas. La capacidad efectiva varía significativamente según factores temporales como el año, el mes, el día de la semana y, crucialmente, la hora del día o variables exógenas como las condiciones meteorológicas, conflictos internacionales etc. Para abordar esta variabilidad operativa, se introduce el concepto de Aeronaves Hora Media (AHM), que representa el promedio de aeronaves atendidas por hora en función de las variables temporales analizadas.

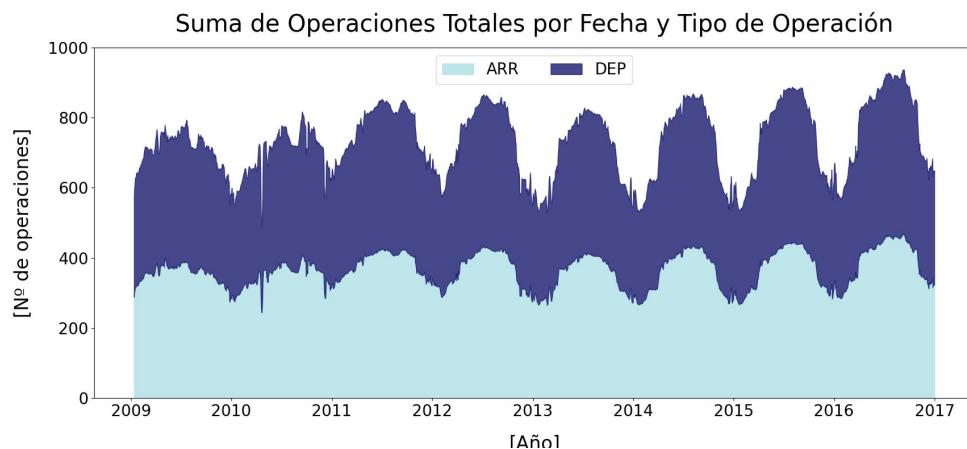
Para realizar este estudio se han requerido calcular 4 variables nuevas, el número de arribadas/hora reales, el número de arribada/hora prevista, el número de despegues reales y finalmente el número de despegues previstos. Se han creado períodos horarios que abarcan desde el 01-01-2009 a la 01:00 hasta el 31-12-2017. Estos segmentos cubren todas las fechas para las cuales se tienen registros de operaciones. Posteriormente, cada registro de operación analizado en el capítulo anterior ha sido evaluado para clasificar su hora real y prevista dentro de estos segmentos horarios. Esto implica que un vuelo puede ser contabilizado en dos segmentos horarios: uno para su hora real de operación y otro para su hora prevista. Sin embargo, la suma total de operaciones es constante; es decir, el número total de registros reales es exactamente igual al de registros previstos. A continuación se presenta un ejemplo ilustrativo:

Número de vuelo	Operación	Hora real	Hora prevista	Periodo	Capacidad ARR	Demanda ARR	Capacidad DEP	Demanda DEP
IBE3264	DEP	18:10	17:30	17:00 -18:00	2	1	0	1
RYR548	DEP	18:05	18:02	18:00 – 19:00	0	1	2	1
JKK213	ARR	17:40	17:58					
TAP1520	ARR	17:58	18:08					

**Figura 4.1:** Ejemplo creación de períodos horarios

Una vez completada esta clasificación, se puede obtener la distribución total del número de operaciones en cada uno de los días del periodo de estudio. Este análisis proporciona una visión detallada de la actividad operativa en el aeropuerto de LEBL a lo largo del tiempo. En el gráfico siguiente se muestra la suma total de operaciones

diarias, diferenciando entre llegadas (representadas en color azul claro) y salidas (en color azul oscuro).



**Figura 4.2:** Recuento de operaciones segregadas entre ARR - DEP anuales

La representación gráfica revela una notable estabilidad estacional, con un aumento significativo durante los meses de verano, donde se alcanzan movimientos cercanos a 900 operaciones por día. Además de la estacionalidad observada, se destaca un incremento gradual en el número total de operaciones a lo largo del período estudiado. Este aumento podría reflejar un crecimiento continuo en la demanda de servicios aéreos o cambios en las políticas operativas del aeropuerto.

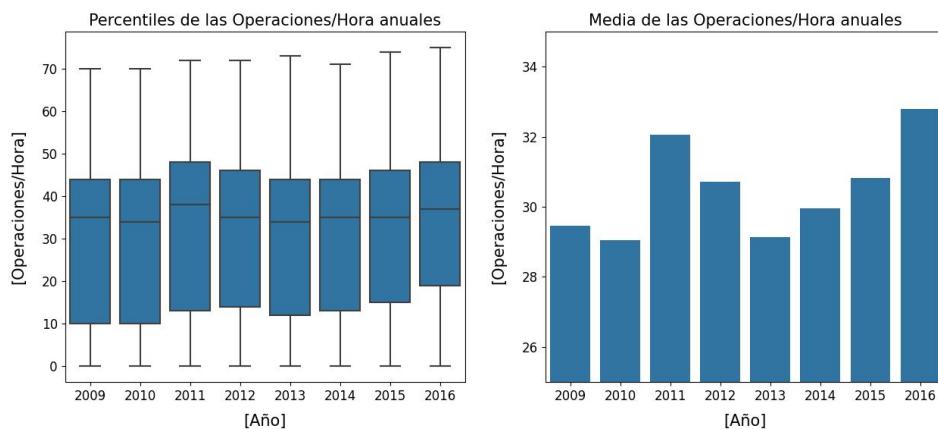
operaciones a la hora y en se encontraba por debajo de operaciones a la hora.supera las

Sin embargo, en el presente estudio, el objetivo es analizar períodos horarios específicos para estudiar las horas pico y valle de la actividad operativa. Esta distinción entre el análisis horario y el análisis total de operaciones es crucial para identificar las horas de máxima capacidad del aeropuerto, es decir, donde se concentra un elevado número de operaciones en un lapso corto de tiempo. Esto se ilustra con el siguiente ejemplo: en un día con 720 operaciones, la carga operativa del aeropuerto variará significativamente dependiendo de cómo se distribuyan estas operaciones. Por ejemplo, si se distribuyen de manera uniforme a lo largo de 24 horas (es decir, aproximadamente 30 operaciones por hora), la situación será distinta a si hay 5 horas pico durante las cuales se concentran 500 operaciones (aproximadamente 100 operaciones por hora), con el resto del día manteniendo un promedio de alrededor de 14 operaciones por hora. Desde un punto de vista operativo, gestionar la segunda situación es considerablemente más complejo que la primera.

#### 4.1.1.1. Análisis descriptivo de las series temporales

Para analizar las variables como series temporales y calcular la media de operaciones por hora, se utilizarán dos tipos de gráficos por cada secuencia temporal estudiada. Primero, se empleará un diagrama de cajas para visualizar la distribución de percentiles de las operaciones totales, además se mostrará un diagrama de barras que representará la distribución media de operaciones por hora, proporcionando una visión general de la actividad operativa a lo largo del tiempo analizado.

La primera variable temporal a analizar es la anual:



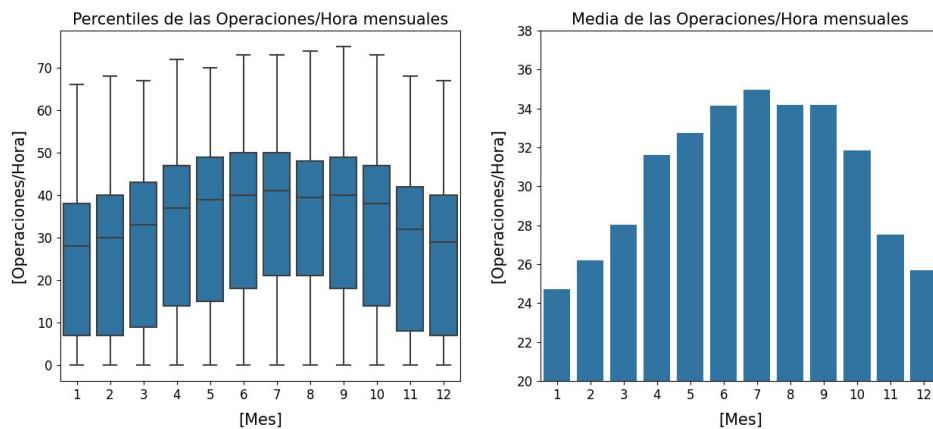
**Figura 4.3:** Distribución anual de Operaciones/Hora

El gráfico analiza la estacionalidad del número de operaciones por hora durante el período de 2009 a 2016. En el diagrama de la izquierda se muestra un gráfico de cajas con los percentiles 0, 25, 50, 75 y 100. Se observa que el percentil 50 es relativamente constante alrededor de 35 operaciones por hora a lo largo de los años, mostrando poca variación. Sin embargo, al analizar los valores máximos en el diagrama de cajas, se nota que el incremento anual en las operaciones totales está directamente relacionado con el aumento de este valor. En 2009, este valor se situaba alrededor de 69 operaciones por hora y superó las 75 en 2016. Esto se debe a que el aumento en el número total de operaciones implica un incremento en la capacidad pico del aeropuerto (AHP), que es crucial para mitigar la congestión y mantener un alto número sostenido de arribadas por hora. En el caso de 2016, el número de 76 operaciones por hora podría indicar que se alcanzaron horas con 38 arribadas y 38 despegues simultáneos por hora, evidenciando una alta capacidad operativa durante ese período.

En el gráfico de la derecha se representa la variación media del parámetro de operaciones por hora para cada año. Este gráfico es complementario al percentil 50 del gráfico de la izquierda. Se observa que la oscilación mínima de esta variable fue de 29 operaciones por hora en 2010 y 2013, mientras que el máximo fue de 33 operaciones por hora en 2016, lo que representa una variación del 13.7%. Este porcentaje relativamente pequeño sugiere que, en términos de entrenamiento de un modelo de predicción, el año como variable no introduce un sesgo significativo. Cualquier

periodo horario comprendido entre 2009 y 2016 puede considerarse completamente descriptivo en este contexto.

La siguiente variable temporal a relacionar con el número de operaciones/Hora es el mes de operación:

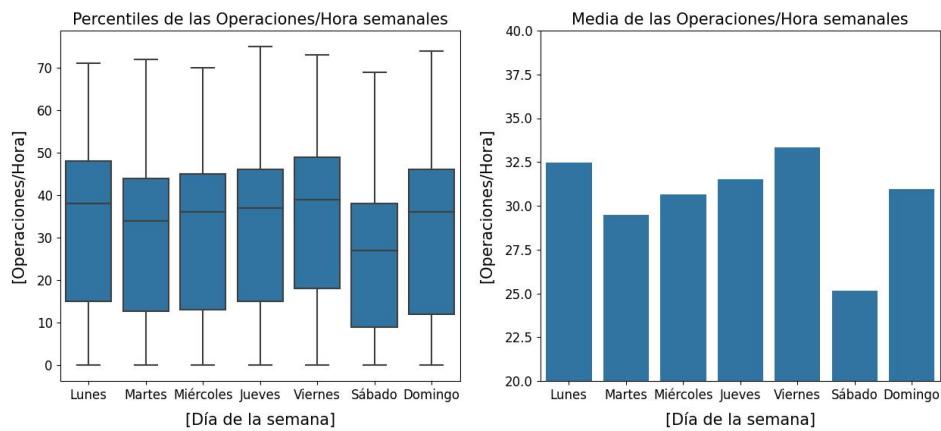


**Figura 4.4:** Distribución mensual de Operaciones/Hora

En el gráfico presentado, se observa una variación en la media de Operaciones por Hora en función del mes de estudio. Aunque los valores máximos no muestran una caída abrupta, todos se mantienen por encima de las 65 operaciones por hora, lo cual es esperado dado que cada mes puede presentar una hora pico que permite mantener este máximo alrededor de las 70. Sin embargo, la distribución de los percentiles entre el 25 % y el 75 % varía considerablemente. Se nota que durante los meses de invierno, el número de operaciones por hora está por debajo de las 40, mientras que en verano se encuentra en promedio alrededor de las 50, lo que representa una variación de aproximadamente el 25 %. Este análisis se visualiza con mayor claridad en el subgráfico de la derecha, donde se puede observar que durante los meses de enero, febrero, noviembre o diciembre, las operaciones por hora no superan las 28. En contraste, durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre, no se ha registrado una cantidad inferior a 34 operaciones por hora en ningún caso.

La siguiente variable temporal a relacionar con el número de operaciones/Hora es el día de la semana de operación:

En este análisis, se ha reducido el intervalo temporal de estudio, pasando de año y mes a desglosar los datos por día de la semana, con el propósito de investigar si el día de la semana tiene un impacto significativo en la media del número de operaciones por hora. El gráfico presentado muestra que esta variable no exhibe una variabilidad considerable en términos de percentiles y media. No obstante, se observa una diferencia notable entre los días laborables (lunes a viernes) y los fines de semana (sábado y domingo), donde las tasas de operaciones en general experimentan una disminución con respecto a los días laborables. Específicamente, los sábados muestran una disminución más marcada, llegando hasta un 28 % menos respecto a

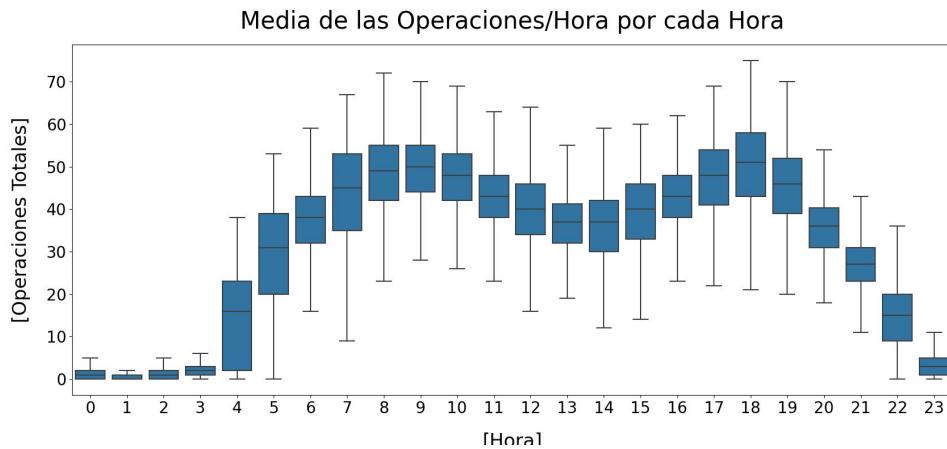


**Figura 4.5:** Distribución semanal de Operaciones/Hora

los días laborables.

Esta variación puede atribuirse al perfil de tráfico aéreo diario en Barcelona, donde una proporción significativa de los vuelos está vinculada a actividades laborales. Los vuelos comerciales relacionados con negocios tienden a tener una demanda más constante y predecible durante los días laborables, mientras que durante los fines de semana esta demanda se reduce considerablemente debido al descanso laboral y a una menor actividad empresarial.

Finalmente la última variable temporal a analizar la relación del número de operaciones/Hora frente a la hora de operación. Para este estudio se utilizará el siguiente diagrama de cajas:



**Figura 4.6:** Distribución horaria de Operaciones/Hora

Este gráfico detalla la distribución de operaciones por hora en un aeropuerto. Se observa una marcada disminución en el número de operaciones durante el intervalo nocturno, de 23:00 a 05:00, con una media que no supera las 10 operaciones por hora. Este período corresponde al horario de operación nocturna, caracterizado por una carga operativa reducida en comparación con el resto del día. Por el contrario,

se identifican picos de actividad durante las AHP (Aeronaves Hora Punta) en dos franjas principales: por la mañana, de 08:00 a 10:00, y por la tarde, de 16:00 a 18:00. En estas franjas, el número máximo de operaciones por hora supera las 70.

#### 4.1.1.2. Análisis porcentual de los períodos

A continuación una vez analizada en la sección anterior la distribución del recuento de operaciones totales en función de distintas series temporales, se decide generar un análisis descriptivo sobre la cuantitividad de la complejidad del tráfico aéreo, es decir, con qué frecuencia se da una situación de alta carga en el aeropuerto de LEBL.

Para ello, hemos optado por distinguir entre los movimientos de llegada y los de salida. Esta distinción se justifica porque generalmente la planificación de las salidas puede realizarse de manera más ordenada y eficiente, ya que depende principalmente de las condiciones y capacidades del aeropuerto. En cambio, las llegadas pueden estar más sujetas a variables externas del aeropuerto, lo que puede alterar considerablemente la secuencia nominal de llegadas previstas a partir de la demanda esperada. A su vez, para el siguiente cuadro solo se han tenido en cuenta las franjas horarias de la operativa nominal diurna (07:00h - 23:00h), ya que son las que presentan una mayor carga .

**Cuadro 4.1:** Porcentaje de casos

Arribadas/Hora reales	Recuento	%
>35 operaciones	370	0.79
30 - 35 operaciones	3509	7.53
25 - 30 operaciones	9304	19.97
20 - 25 operaciones	15411	33.08
<20 operaciones	17998	38.63

En la tabla mostrada se aprecia como el rendimiento general del aeropuerto se corresponde a períodos horarios con menos de 25 operaciones de arribada, esta casuística se da en el 65 % de los casos estudiados. Sin embargo se ha dado un 0.79 % de períodos horarios estudiados en los que se han alcanzado un ratio de más de 35 arribadas a la hora. Es en este tipo de períodos donde el aeropuerto debe acentuar los recursos para maximizar la eficiencia en la gestión de aterrizajes, ya que es cuando se puede llegar a superar la capacidad nominal declarada y se pueden llegar a establecer regulaciones aéreas que impliquen demoras y retrasos en los vuelos, limitando el crecimiento del aeropuerto.

#### 4.1.2. Análisis de demanda real frente a demanda prevista

En el punto anterior se realizó un análisis comparando distintas series temporales frente a la demanda real. En ese dicho análisis se concluyó que los picos de operación dependen en su mayoría de la hora de operación, pudiendo destacar entre horas valle y horas pico. A continuación se procede a realizar una comparativa entre esa

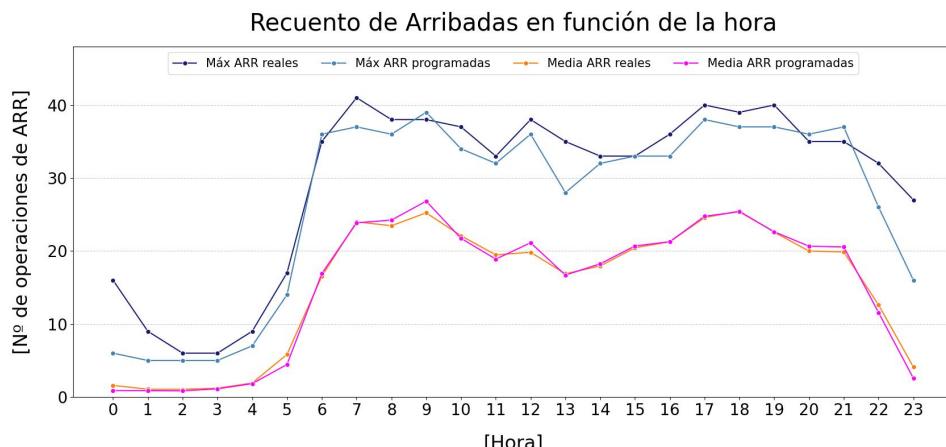
**Cuadro 4.2:** Porcentaje de casos

Despegues/Hora reales	Recuento	%
>35 operaciones	523	1.12
30 - 35 operaciones	3214	6.90
25 - 30 operaciones	8941	19.19
20 - 25 operaciones	12979	27.86
<20 operaciones	20935	44.93

demandas reales frente a las que se previo horas antes, es decir la prevista.

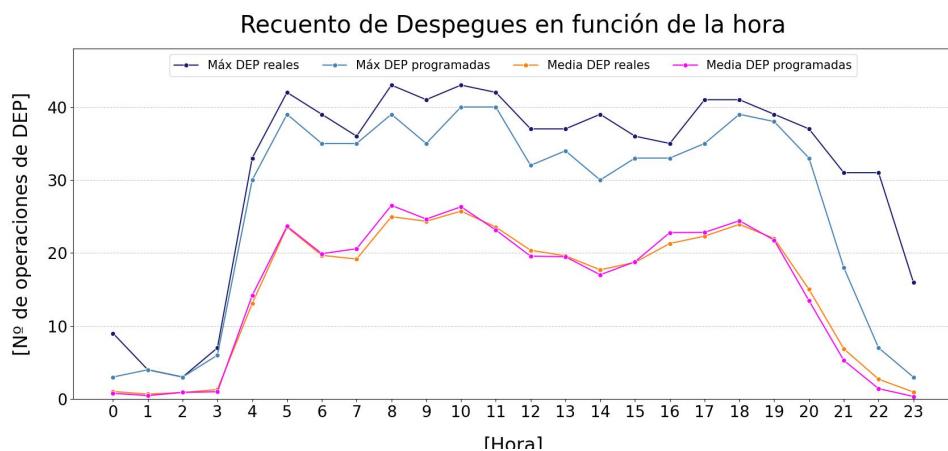
En el análisis comparativo entre la demanda real y la prevista, es imperativo considerar las variaciones que pueden surgir entre ambas. Estas discrepancias son fundamentales para comprender la eficacia de los modelos de predicción y su aplicabilidad en entornos operativos. Una de las principales fuentes de variación radica en las regulaciones de capacidad, las cuales ejercen una influencia significativa en la demanda real observada. Una regulación de capacidad [18] se refiere a las limitaciones impuestas en la capacidad de los sistemas o infraestructuras para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Estas regulaciones pueden derivarse de diversas consideraciones, como restricciones de recursos, políticas operativas o condiciones ambientales. Ejemplos típicos se producen cuando la demanda supera la capacidad máxima de operaciones que puede realizar un aeropuerto y se limita el número de aeronaves con destino a dicho aeropuerto. Sin embargo, cuando esta situación se produce es muy común que se den retrasos en vuelos lo que se traduce en pérdidas económicas tanto para el aeropuerto como principalmente para las compañías aéreas, ya que aumenta la demora, el tiempo entre escalas etc.

Comprendiendo la esencia del principio regulatorio, se vislumbra la relevancia de optimizar la capacidad aeroportuaria. Aunque un aeródromo opere la mayor parte del tiempo por debajo de su capacidad máxima, solo será viable su crecimiento si puede gestionar la demanda máxima en períodos pico sin incurrir en demoras adicionales.

**Figura 4.7:** Arribadas/Hora reales frente a previstas (Media y máximos)

Si se analizan las arribadas, a continuación se genera una gráfica en la que se representan el número promedio de arribadas/Hora en función de cada hora , tanto las reales como las previstas. A su vez se detallan las máximas arribadas/hora reales y previstas que se dieron en dicha hora a lo largo de todos los períodos de estudio. Se aprecia claramente como en el configuración nocturna de 23:00 - 07:00h, el número de arribadas/ Hora es muy bajo y solo se alcanzan medias superiores a 20 movimientos en las horas de operación nominal.

A su vez se procede a realizar un análisis específico de los despegues, análogo del caso anterior de las arribadas. En la siguiente gráfica se aprecia claramente como la configuración nocturna presenta un registro de actividad mucho menor que en configuración diurna, sin embargo si se aprecia que de media la tendencia se encuentra entre 20 - 30 operaciones de media en las horas centrales, ligeramente superior al caso de las arribadas. Si se analizan las líneas asociadas a los máximos despegues y arribadas por hora, se destacan picos por encima de 41 despegues reales, remarcando cercanía de la capacidad del aeropuerto a su máximo teórico. Comparando con la gráfica de arribadas se puede apreciar como la línea de máximos es ligeramente superior a la de arribadas.



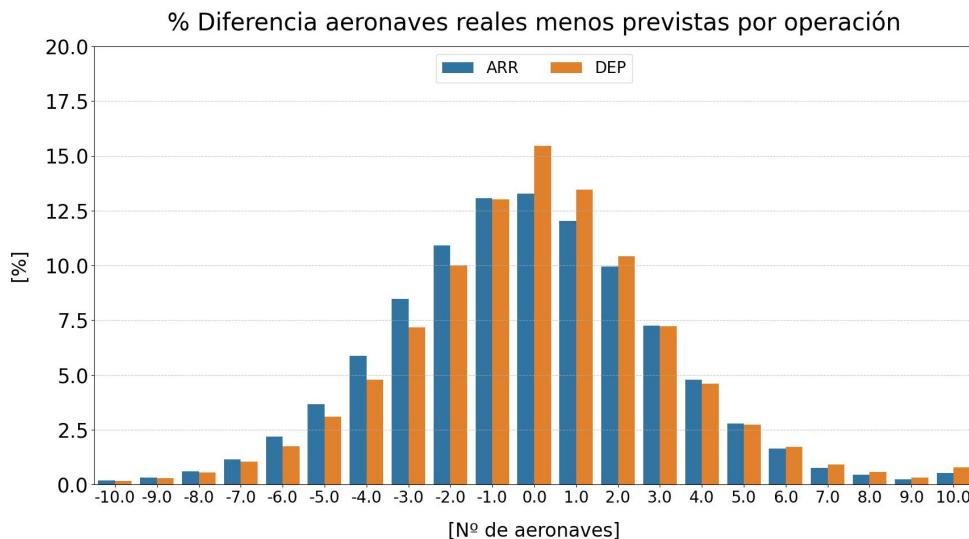
**Figura 4.8:** Despegues/Hora reales frente a previstas (Media y máximos)

Tras la fase inicial de análisis descriptivo, en la cual se evaluó el número de aeronaves tanto reales como previstas en función de su fase operativa, incluyendo la presentación de estadísticas resumidas como los valores medios y máximos, se procede a una etapa de mayor profundidad analítica.

En esta nueva fase, se desarrolla un gráfico adicional con el propósito de comparar la disparidad absoluta entre las cantidades de aeronaves medidas en su estado real y las estimadas previamente. Este gráfico proporciona una visualización clara y concisa de las diferencias numéricas entre las aeronaves esperadas y las realmente presentes, para cada período horario bajo estudio.

La diferencia entre estas cifras ofrece una perspectiva más detallada sobre la variación de la demanda de aeronaves a lo largo del tiempo y permite una evaluación más precisa de la precisión de las previsiones. Además, al realizar esta resta, se

obtiene un conjunto de valores que se someten a un análisis adicional para generar una distribución porcentual del número de casos, lo que proporciona una visión más completa y detallada de la discrepancia entre las expectativas y la realidad en términos de la disponibilidad de aeronaves en cada período horario examinado.



**Figura 4.9:** Diferencia de aeronaves reales menos previstas por operación

La figura ilustra la diferencia entre las operaciones de aeronaves reales y las previstas en el eje x, representando la diferencia en valor absoluto. Un valor positivo indica una mayor cantidad de operaciones registradas en comparación con las previstas, mientras que un valor negativo indica lo contrario. Se derivan las siguientes conclusiones de la gráfica:

- En términos generales, aproximadamente el 80 % de los períodos estudiados se sitúan dentro del intervalo entre -4 y +4 aeronaves. Esto sugiere que las variaciones en la demanda no son significativas y que, en general, la asignación de la demanda esperada es precisa durante los períodos horarios.
- Se procede a analizar el punto en el eje x donde la discrepancia es 0. Este punto indica que las operaciones se han ajustado exactamente según lo previsto, lo que implica una precisión total en la estimación de la demanda de aeronaves. Al desglosar por fase de operación, se observa que la fase de despegues es aproximadamente un 2 % más precisa que el promedio general.
- Al examinar la parte positiva del eje x, que indica una demanda real superior a la prevista, se destaca que en el rango de valores entre 1 y 3, la fase de despegues tiende a exceder las estimaciones, lo que sugiere una subestimación en la capacidad prevista para los despegues. Por otro lado, en la parte negativa del eje x, específicamente en la fase de arribada, los valores tienden a ser superiores, lo que indica una capacidad real de arribadas menor a la prevista.

#### 4.1.3. Conclusiones extraídas del estudio

Para concluir este estudio se presentan resumidas las conclusiones principales que se han obtenido:

- El aeropuerto de estudio presenta una capacidad declarada de 38 aterrizajes y 40 despegues. El número de operaciones diarias se ha ido constantemente incrementando hasta rozar las 900 operaciones diarias en el año 2016.
- La estacionalidad es muy marcada a la hora de analizar la operativa del aeropuerto. La media de operaciones en los meses de verano puede variar hasta un 25 % frente a los meses de invierno.
- El número de aeronaves por hora media es de 26-34, aunque fluctúa considerablemente en función de la hora. Se ha observado que el máximo de aeronaves por hora punta se concentra en dos períodos horarios, de 08:00 - 10:00 y de 16:00 - 18:00h, llegando a sobrepasar las 40 operaciones tanto en despegues como arribadas.
- Finalmente se ha analizado que la previsión de la demanda no presenta grandes variaciones frente al número de operaciones reales. En el 80 % de los períodos estudiados, la variación entre demanda prevista y real se ha situado en un intervalo de -4 y +4 aeronaves.

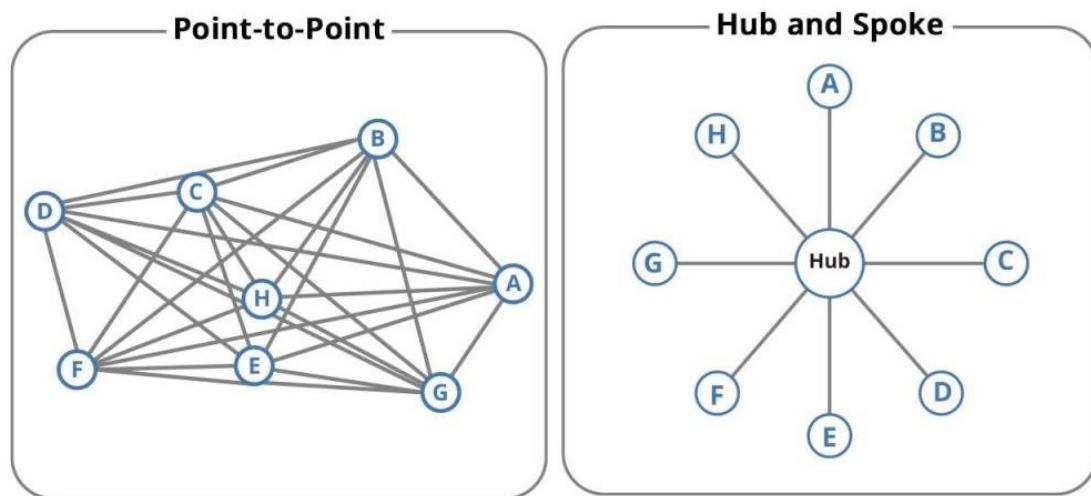
## 4.2. Estudio de escalas

### 4.2.1. Generalización de los modelos Hub and Spoke

El crecimiento exponencial de la industria aeronáutica en las últimas décadas ha llevado a un aumento significativo en el número de vuelos comerciales y, por ende, en la importancia estratégica de las conexiones aeroportuarias. Esto ha derivado que la industria vire desde un modelo tradicional de un sistema de vuelos directos a un modelo Hub and Spoke [19].

El concepto de "hub and spoke" se refiere a un modelo de operación en el que un aeropuerto central (hub) actúa como centro de conexiones para vuelos (spokes) que provienen de distintos destinos. Este modelo es ampliamente utilizado por aerolíneas para optimizar la eficiencia operativa y mejorar la conectividad de sus redes de rutas.

Se plantea el siguiente ejemplo. Existiendo 8 aeropuertos, ¿como sería la comparativa entre un modelo tradicional de vuelos directos versus un modelo Hub and Spoke?.



**Figura 4.10:** Comparativa Hub and Spoke vs vuelos directos

- En el modelo de vuelos directos, cada destino está conectado directamente con todos los demás destinos. Si se consideran 8 destinos en total, cada destino necesita 7 vuelos directos para conectarse con los otros 7 destinos restantes, dando un total de 56 vuelos directos necesarios.
- Sin embargo, si se elige uno de estos aeropuertos como Hub, el resto de aeropuerto se considerarían spokes. Por cada destino spoke se necesitan 2 vuelos(ida y vuelta), lo que da un total de 16 vuelos necesarios para cubrir todos los destinos.

Basado en los cálculos realizados, se puede concluir que el modelo "hub and spoke" requiere significativamente menos vuelos para cubrir una red de destinos determinada

en comparación con el modelo de vuelos directos. Sin embargo, otros factores como la conveniencia para los pasajeros y los costos operativos también deben tenerse en cuenta al evaluar la eficiencia de cada modelo.

Un componente fundamental para el desarrollo efectivo de este modelo son las escalas aeroportuarias. Las escalas aeroportuarias representan una parte esencial del viaje aéreo global. Estas paradas intermedias entre el punto de partida y el destino final de un vuelo desempeñan un papel crucial en la eficiencia operativa y la conectividad de las redes de transporte aéreo en todo el mundo.

De esta forma las escalas aeroportuarias ofrecen una serie de beneficios tanto para los operadores de aerolíneas como para los pasajeros:

- **Eficiencia Operativa:** El modelo «hub and spoke» permite a las aerolíneas consolidar el tráfico en un solo lugar, lo que facilita la programación de vuelos y optimiza el uso de aeronaves.
- **Mayor Conectividad:** Al concentrar los vuelos en un hub central, se facilita el acceso a una mayor cantidad de destinos a través de conexiones rápidas y convenientes.
- **Optimización de Recursos:** Los aeropuertos spokes pueden ser de menor tamaño y capacidad, lo que reduce costos de infraestructura y operativos para las aerolíneas. Las escalas permiten a las aerolíneas optimizar sus rutas y programación de vuelos, lo que puede conducir a una mayor eficiencia operativa y reducción de costos.
- **Flexibilidad en los itinerarios:** Las escalas ofrecen flexibilidad en la planificación de viajes al permitir a los pasajeros elegir entre una variedad de opciones de horarios y rutas.

Sin embargo, en contraposición a las ventajas anteriormente mencionadas, es esencial considerar las siguientes desventajas en relación con las escalas aeroportuarias:

- **Aumento del tiempo total de viaje:** Las escalas pueden alargar la duración total del viaje, especialmente si hay largos tiempos de espera entre los vuelos de conexión.
- **Riesgo de retrasos y pérdida de equipaje:** Las escalas aumentan el riesgo de retrasos en los vuelos y la posibilidad de que el equipaje se pierda durante las transferencias entre aviones.
- **Fatiga del viajero:** Las escalas pueden resultar agotadoras para algunos pasajeros, especialmente si tienen que esperar durante largos períodos de tiempo o si experimentan cambios frecuentes de husos horarios.
- **Costos adicionales:** Las escalas pueden aumentar los costos totales del viaje debido a gastos adicionales como comidas, transporte terrestre entre aeropuertos y posibles tarifas de hospedaje si la espera es prolongada.

- **Menor tiempo de espera en destino:** En algunos casos, las escalas pueden reducir el tiempo disponible para disfrutar del destino final, especialmente si las esperas entre vuelos son cortas.

Es por todo ello que se procede a realizar un estudio sobre las escalas en la muestra de datos del presente estudio. Para ello definiremos el concepto de «cosido de aeronaves», que se desarrollará en el siguiente apartado.

#### 4.2.2. Generación del cosido de aeronaves

El análisis de las escalas en la muestra de datos del presente estudio implica una evaluación detallada del concepto de «cosido de aeronaves». Este término se define como el estudio exhaustivo de la secuencia temporal de eventos que ocurren desde la llegada de una aeronave hasta su partida, incluyendo el tiempo de escala intermedio. Los objetivos principales de este estudio son determinar cómo la demora en la llegada de una aeronave impacta en su tiempo de salida posterior.



Figura 4.11: Definición de escala

1. Primero se ordenan todas las operaciones registradas por las variables matrícula de avión y hora de operación. La matrícula se refiere a un código único alfanumérico asignado a una aeronave civil por la autoridad de aviación de un país. Esta matrícula sirve como identificación oficial de la aeronave y se muestra de manera prominente en el exterior de la misma, generalmente en las alas, el fuselaje o la cola. Es un distintivo único por lo que al ordenar por ella sabemos todas las operaciones que ha hecho ordenadas de forma temporal.
2. El cosido se ha definido como la secuencia de una arribada seguida de un despegue. Por lo que se busca establecer el despegue asociado a cada arribada. Para ello se impone la condición que toda llegada sea considerado como Fase 1 y todo despegue como fase 2. De esta forma no se considerará cosido un despegue y la vuelta de nuevo de ese destino.
3. Finalmente se establecerá una condición de tiempo entre operaciones. Esta variable será definida como el tiempo de escala y será de un máximo de 12h.

De tal forma que solo se considerará «un cosido» aquella secuencia de arribada - despegue si ha sucedido en un intervalo inferior a 12h. Si no es el caso no será considerado como escala, sino como vuelos independientes.

Con todo ello la información queda estructurada de la siguiente manera:

Código OACI Compañía	Matrícula Avión	Movimiento	Aeropuerto Origen/Destino	dt_real	dt_Prog	Demora	Time_diff	Iter
VLG	EC-JGM	LLEGADA	NAPOLES	2010-04-27 13:26:00	2010-04-27 13:30:00	-4.0	0.0	Step_1
VLG	EC-JGM	SALIDA	ROMA / FIUMICINO	2010-04-27 14:20:00	2010-04-27 14:20:00	0.0	54.0	Step_2
VLG	EC-JGM	LLEGADA	ROMA / FIUMICINO	2010-04-27 18:18:00	2010-04-27 18:30:00	-12.0	0.0	Step_1
VLG	EC-JGM	SALIDA	ALICANTE-ELCHE MIGUEL HDEZ.	2010-04-27 18:55:00	2010-04-27 19:05:00	-10.0	37.0	Step_2
VLG	EC-JGM	LLEGADA	ALICANTE-ELCHE MIGUEL HDEZ.	2010-04-27 21:32:00	2010-04-27 21:45:00	-13.0	0.0	Step_1
VLG	EC-JGM	SALIDA	PARIS /ORLY	2010-04-28 03:53:00	2010-04-28 04:00:00	-7.0	381.0	Step_2

**Figura 4.12:** Identificación efectiva de cosidos

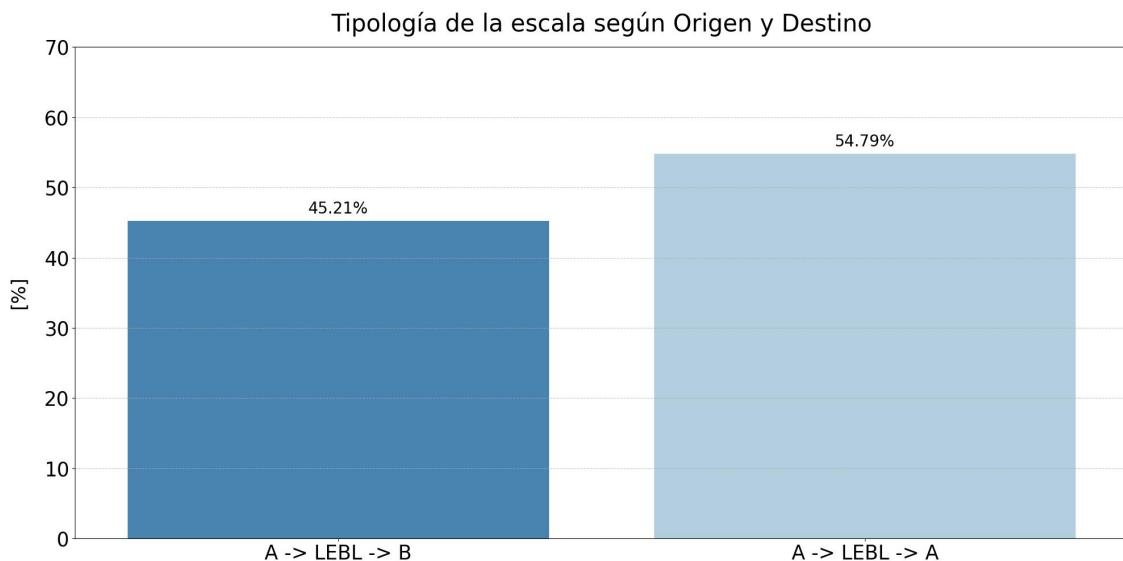
Se aprecia como quedan ordenadas las secuencias de llegada - salida, clasificándolas como Step1 y Step2, respectivamente. A su vez se indica la columna Demora asociada a cada una de las fases así como una columna "Time\_diff" que se corresponde al tiempo de escala (Para la llegada este valor siempre será cero y es en la salida donde se indica).

#### 4.2.3. Descripción de la tipología de escalas

Una vez definido el concepto de «cosido», que será considerado como una escala evaluable en el contexto aeroportuario, procedemos a realizar un análisis descriptivo de la tipología de este proceso. Para ello, es necesario examinar el tipo de conexión que se realiza durante la escala. Se distinguen dos casuísticas principales:

- Tipología: **A → LEBL → A**: En esta tipología, el vuelo que aterriza en el Aeropuerto de Barcelona-El Prat (LEBL) procede de un origen (A) y, tras completar la escala en dicho aeropuerto, retorna al mismo origen (A). Este escenario puede entenderse como un vuelo de ida y vuelta desde y hacia un mismo destino, lo que sugiere una analogía con la operación descrita en la sección anterior como «Point to Point».
- Tipología: **A → LEBL → B**: En este caso, el vuelo parte de un origen (A) y, después de realizar una escala en el Aeropuerto de Barcelona-El Prat (LEBL), continúa hacia un destino distinto al origen (B). Esta tipología se ajusta al modelo «Hub and Spoke» detallado previamente, donde un centro de conexiones (hub) como LEBL sirve como punto intermedio para rutas que conectan múltiples destinos (spokes).

Una vez descrita estas dos casuísticas, se procede a mostrar un gráfico de barras donde se pueden comparar:



**Figura 4.13:** Tipología de escalas en LEBL

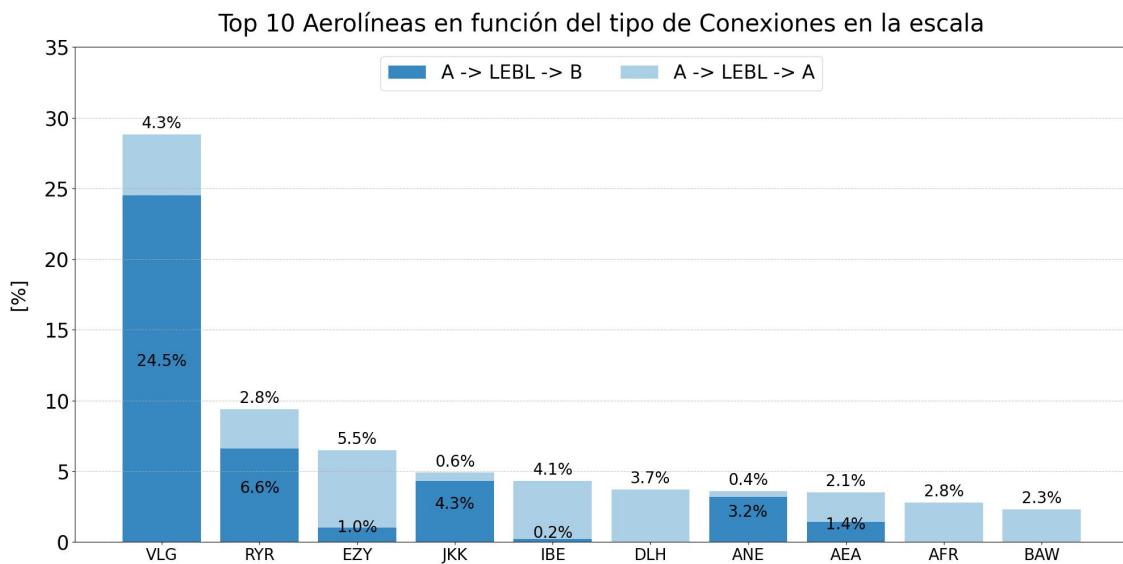
En el gráfico se evidencia la inclinación del aeropuerto LEBL hacia la clasificación de aeropuerto «Point to Point», con un porcentaje más alto en las escalas estudiadas (54.79 %) en comparación con la categoría «Hub and Spoke» (45.21 %).

Esta tendencia puede atribuirse al perfil turístico vacacional de la región donde se ubica el aeropuerto. Dado que LEBL sirve como puerta de entrada a destinos turísticos populares en la región, como Barcelona y sus alrededores, es probable que la demanda de vuelos directos desde una variedad de ciudades de origen sea mayor. En este contexto, el modelo «Point to Point» permite una conectividad más directa entre los destinos turísticos y los aeropuertos de origen, lo que puede explicar la preferencia de LEBL por este modelo de operación.

Sin embargo, es crucial descomponer estas operaciones según la aerolínea operadora de los vuelos. Por consiguiente, se presenta el siguiente gráfico que ilustra las 10 aerolíneas con el mayor porcentaje de operaciones (estas 10 aerolíneas representan el 70 % del total de vuelos). En el gráfico se muestra en el eje y el porcentaje total de operaciones de cada compañía. Además, se desglosa en dos colores: azul oscuro para las conexiones con origen y destino diferentes (*Hub and Spoke*) y azul claro para las conexiones con el mismo origen y destino (*Point to Point*). Estas están ordenadas de izquierda a derecha de mayor a menor porcentaje de operación:

Se observa que la aerolínea con el mayor índice de escalas detectadas es Vueling (VLG), alcanzando un total de 28.82 %. Seguida por Ryanair (RYR) con un 9.41 % y EasyJet (EZY) con un 6.55 %. Todas estas operadoras pertenecen al segmento de corto y medio alcance. Al analizar en detalle estas tres compañías, que en conjunto representan un 45 % del total de operaciones, se evidencian los dos modelos de escala previamente mencionados.

- Vueling (VLG) se destaca por operar principalmente bajo el modelo *Hub*



**Figura 4.14:** Tipología de escalas en LEBL SEGÚN AEROLÍNEAS

and Spoke, con cerca del 85 % de sus operaciones en conformidad con esta metodología. Resaltan especialmente las conexiones entre Madrid y París, obviamente con escala en LEBL.

- Por otro lado, EasyJet (EZY) se caracteriza por adoptar el modelo *Point to Point*, con un 85 % de sus operaciones basadas en este enfoque. Los principales nodos de conexión son los trayectos entre Londres, Milán, París y Berlín, que son capitales europeas de importancia.

#### 4.2.4. Correlación del tiempo de escala y la demora

El objetivo último de este capítulo es poder establecer una posible relación de causalidad entre el tiempo de escala y la demora experimentada en cada una de las fases del proceso de cosido .

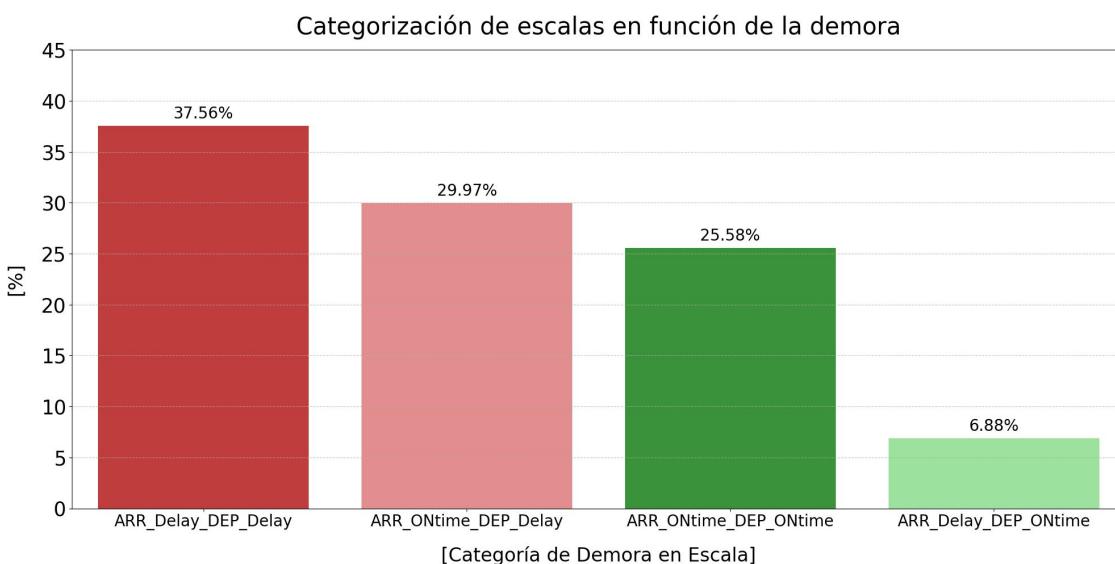
Para llevar a cabo este propósito, se procede a calcular la demora asociada a cada una de las etapas del proceso, considerando primeramente el momento de llegada y posteriormente el de despegue de la aeronave. Este cálculo, que ya ha sido realizado durante la fase de análisis exploratorio, consiste en la diferencia temporal entre el horario real de ejecución y el horario estimado para dichas fases.

Una vez calculada se pueden identificar 4 agrupaciones, generándose así las siguientes 4 categorías:

- **ARR\_ONtime\_DEP\_ONtime:** Cuando tanto la demora de llegada como la demora de salida son menores o iguales a cero, se asigna esta categoría. Esta situación es la más beneficiosa para la operativa aeroportuaria, ya que indica que tanto el aterrizaje como el despegue se realizaron dentro del horario planificado, lo que contribuye a la puntualidad y eficiencia del servicio.

- **ARR\_ONtime\_DEP\_Delay:** Si la demora de llegada es menor o igual a cero pero la demora de salida es mayor que cero, se asigna esta categoría. Aunque el avión llega a tiempo, el retraso en la salida puede tener impactos negativos en la operativa, como la congestión en las pistas de despegue y la acumulación de aeronaves en tierra, lo que podría afectar la puntualidad de los vuelos posteriores.
- **ARR\_Delay\_DEP\_ONtime:** Cuando la demora de llegada es mayor que cero pero la demora de salida es menor o igual a cero, se asigna esta categoría. Aunque el avión experimenta un retraso en su llegada, si logra despegar puntualmente, se minimiza el impacto en la operativa aeroportuaria, ya que se libera la puerta de embarque para otros vuelos y se reduce la congestión en tierra.
- **ARR\_Delay\_DEP\_Delay:** Si tanto la demora de llegada como la demora de salida son mayores que cero, se asigna esta categoría. Esta situación es la más perjudicial para la operativa aeroportuaria, ya que implica tanto retrasos en la llegada como en la salida de la aeronave, lo que puede generar efectos en cadena en la programación de vuelos, la disponibilidad de puertas de embarque y la eficiencia en el uso de las instalaciones aeroportuarias.

Las categorías recientemente definidas se aplicarán a los datos recopilados en este estudio. El análisis de estos datos se representará gráficamente para proporcionar una visualización clara y efectiva de la distribución de las demoras en los vuelos analizados.



**Figura 4.15:** Categorización de escalas en función de la demora

Los datos revelan que la situación más común es experimentar demoras tanto en la llegada como en la salida, representando el 37.56 % de los vuelos . El 29.97 % de los vuelos llegaron a tiempo pero salieron con retraso. Esta situación puede ser causada por problemas internos de la aerolínea, como retrasos en la preparación de la

aeronave o procesos de abordaje prolongados, que impactan la salida del vuelo. Por otro lado, el 25.58 % de los vuelos llegaron y salieron puntualmente. Esta situación refleja una operación eficiente por parte de la aerolínea y una experiencia positiva para los pasajeros. Es notable que la casuística menos común es la de llegar con retraso pero despegar puntualmente, representando solo el 6.88 % de los vuelos. Esta situación puede indicar una eficiente capacidad de recuperación por parte de la aerolínea para minimizar el impacto de las demoras iniciales y mantener el horario programado para los vuelos posteriores, lo que resalta la importancia de la gestión eficaz de las demoras en la aviación para garantizar la puntualidad y la satisfacción del cliente.

Realizado el estudio preliminar en función de las 4 categorías descritas anteriormente, el siguiente objetivo es poder relacionar la causalidad de dicha demora con la variable del tiempo de escala. Para ello se procede a analizar en detalle la escala en función de como se ha dado la fase inicial, es decir, la fase de arribada. De esta forma se compararán aquellas operaciones que no han sufrido demora en la etapa de arribada y como han evolucionado en despegues con o sin demora tras el tiempo de escala, y viceversa, los casos que sufrieron demora en llegada como han evolucionado a más demora en salida o por el contrario han conseguido revertir la situación y despegar sin demora.

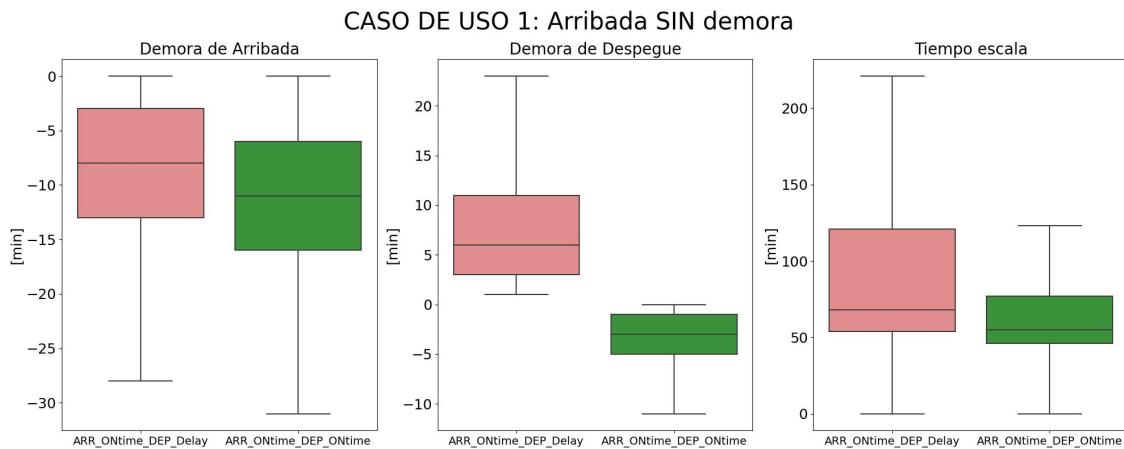
Para poder realizar este estudio se aislan las siguientes tres variables: el tiempo de demora en arribada (positivo si ha sido demora o negativo si se ha producido un adelanto), la duración de la escala y el tiempo de demora en despegue (ídem que en arribada, positivo si ha sido demora o negativo si se ha producido un adelanto). Una vez aisladas las variables se representan en diagramas de cajas, para saber la distribución estadística de los mismos.

#### Caso de uso 1: Arribada SIN demora.

En este escenario de análisis se comparan dos casuísticas predominantes, que representan el 56 % del total de los casos evaluados. Dentro de este porcentaje, un 30 % corresponde a llegadas sin demora pero con salidas demoradas, mientras que un 26 % corresponde a llegadas y salidas sin demora. Esto indica que el muestreo por número de casos es bastante equilibrado, sin predominancia clara de un campo sobre otro.

Se observa que:

- Respecto a la demora en arribada, en ambos casos, la ausencia de demora es evidente y esperada (El eje vertical del gráfico de la izquierda siempre adquiere valores negativos, adelanto de la hora de llegada frente al previsto), dado que es consistente con la regla descriptiva establecida para analizar casos sin demora en despegue. Además, observamos que en ambos casos, el percentil 75 se sitúa entre 0 y 15 minutos de adelanto, es decir, el 75 % adelantaron su hora de llegada entre 0 - 15 minutos. No obstante, se nota una ligera diferencia en los casos de despegue sin demora, donde el percentil 50 se sitúa alrededor de los 13 minutos de adelanto, comparado con los casos de demora en despegue que



**Figura 4.16:** Relación Demora - Tiempo de escala: Caso de uso 1

se sitúa alrededor de los 7 minutos. En resumen, aterrizar con mayor adelanto es preferible en comparación con experimentar demoras en el despegue. Por último, es notable que ninguno de los casos en ambas categorías supera los 30 minutos de adelanto.

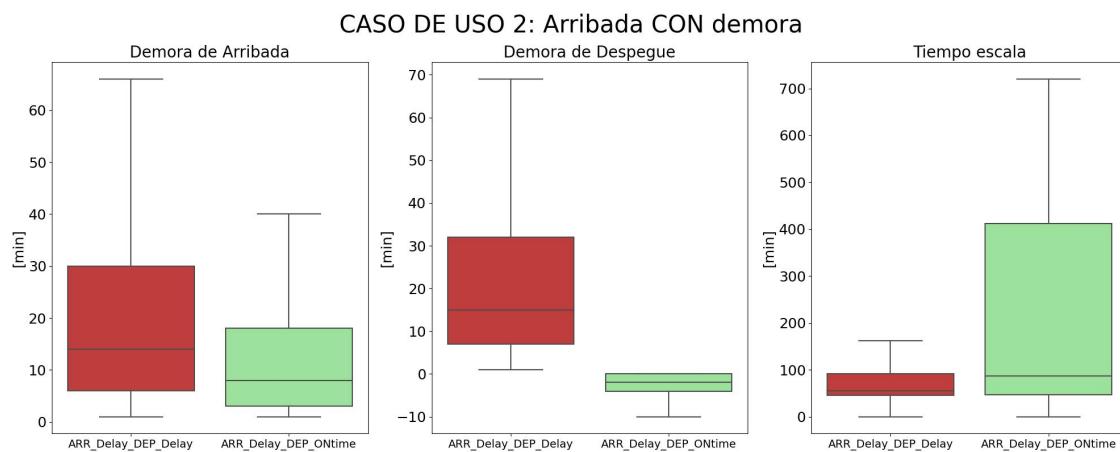
- La segunda subgráfica, ubicada en el centro, representa un diagrama relativo a las demoras en el despegue, exhibiendo notables diferencias que categorizan los grupos. El primer bloque representa las aeronaves que experimentaron demoras en el despegue (representadas en color rojo claro), mientras que el segundo bloque representa las aeronaves que no tuvieron demoras. En el 75 % de los casos analizados, las demoras no superaron los 10 minutos, aunque en algunos casos alcanzaron hasta los 20 minutos (cabe destacar que los outliers no se incluyeron en la representación gráfica). En términos de distribución, se observa que los rangos en ambos grupos son bastante restringidos: el bloque central de la muestra (entre el 25 % y el 75 % de los registros) se concentra principalmente en un rango de 0 a 10 minutos de demora y de 0 a 5 minutos de adelanto.
- La tercera gráfica representa la comparación del parámetro de tiempo de escala, proporcionando conclusiones significativas. Las aeronaves con demoras en el despegue exhiben un tiempo de escala superior. Aunque aproximadamente la mitad de las aeronaves en ambos casos experimentan una escala de alrededor de 50 minutos, el restante de los vuelos muestra diferencias significativas: un primer grupo alcanza incluso hasta 120 minutos de escala, mientras que el segundo grupo no supera los 80 minutos en el 75 % de la muestra. Además, al comparar los valores totales, se observa que el máximo tiempo de escala para el primer grupo es de 230 minutos, mientras que para el segundo grupo no supera los 130 minutos, suponiendo casi un 40 % menos. Estos hallazgos son esenciales en la determinación de que tiempos de escala más prolongados están correlacionados con demoras en la salida de las aeronaves.

Con todo ello se puede extraer ciertas conclusiones preliminares. Cuando la operativa es una llegada sin demora, tiempos de escala menores favorecen a que no exista demora en el despegue. A su vez el no existir demora implica que la demora

máxima (sin contar valores extremos) ha sido menor a 20 minutos.

Caso de uso 2: Arribada CON demora.

En este escenario de análisis se comparan el grupo mayoritario, con un total del 37 % de los casos, frente al minoritario con un 8 %. Esta disparidad en las proporciones indica una clara discrepancia en la distribución de los casos entre ambas categorías, sugiriendo una posible divergencia en los comportamientos o condiciones asociadas a cada una de ellas dentro del contexto estudiado.



**Figura 4.17:** Relación demora - Tiempo de escala: Caso de uso 2

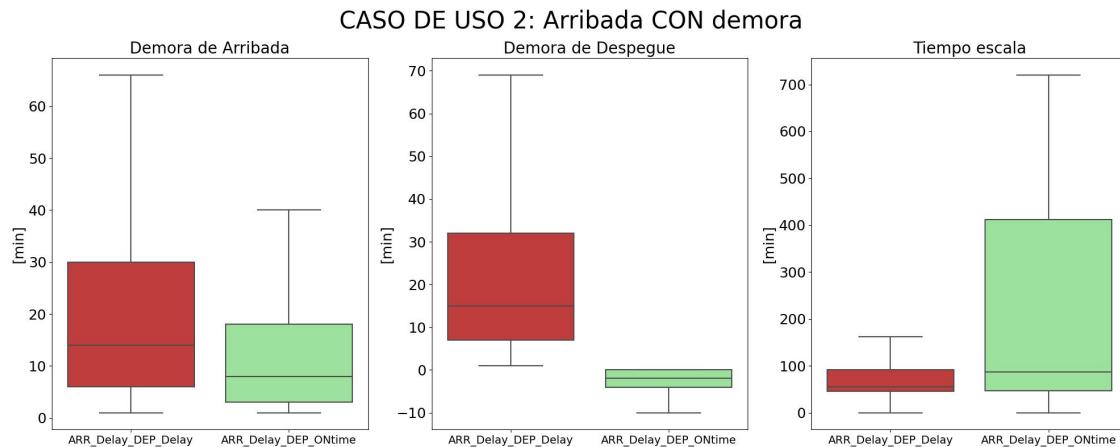
Se observa que:

- En relación a la demora en la llegada, se observa que ambos grupos muestran demoras positivas; no obstante, se aprecia una diferencia significativa en la media entre el grupo que posteriormente despega sin demora y el grupo que también experimenta demora en el despegue. Al examinar con mayor detalle, el percentil 75 en el grupo de despegue sin demora muestra demoras en la llegada por debajo de los 20 minutos, mientras que en el grupo con demora en el despegue, este percentil se eleva a 30 minutos. Esto representa un aumento del 50 % en la demora medida en este percentil entre los dos grupos mencionados.
- En relación a la demora en el despegue, se observa una marcada disparidad entre los grupos analizados. El grupo de despegue sin demora exhibe una concentración notable en demoras de 0-5 minutos (adelanto), mientras que el grupo de despegue con demora muestra una distribución más dispersa, con un rango amplio que alcanza más de 30 minutos de demora adicional en el despegue en el percentil 75, y un valor máximo registrado de 70 minutos de demora.
- La tercera gráfica destaca como un componente crucial del estudio al representar el análisis del tiempo de escala. En este gráfico se evidencia una diferencia significativa entre los vuelos que despegan sin demora y aquellos con demora en el despegue en cuanto a sus tiempos de escala. El percentil 75 del tiempo

de escala para los vuelos sin demora en el despegue alcanza los 400 minutos, mientras que para los vuelos con demora en el despegue, este valor se sitúa en 100 minutos.

El análisis del segundo caso de uso arroja conclusiones significativas. Se observa que si la demora en la llegada (fase 1) supera los 20 minutos, existe una mayor probabilidad de que esta demora no pueda ser recuperada y que la segunda fase (despegue) acumule también demoras. El segundo factor crítico identificado es el tiempo de escala. Se ha determinado que tiempos de escala más largos favorecen la capacidad de absorber la demora experimentada en la primera fase. Este umbral crítico se sitúa en los 100 minutos de tiempo de escala; si el tiempo de escala es inferior a este umbral, es más probable que la demora no pueda ser absorbida de manera efectiva.

Una vez analizados los casos de uso por separado, se aprecia que la variable más relevante es el tiempo de escala, ya que es la más elástica en función del caso y la que puede arrojar mayores conclusiones de correlación. Para ello se ha generado el siguiente gráfico, donde se han establecido rangos de 3 minutos de demora en la llegada ( $\Delta t_{arr}$ ) representados en el eje x. Los rangos de demora se dividen en dos grupos: de 0 a -30 minutos para casos sin demora en la llegada (es decir, ARR\_ONtime\_DEP\_ONtime y ARR\_ONtime\_DELAY), y de 0 a 30 minutos para casos con demora en la llegada (ARR\_Delay\_DEP\_Delay y ARR\_Delay\_DEP\_ONtime). En el eje y, se ha calculado la media del tiempo de escala en cada uno de estos rangos.



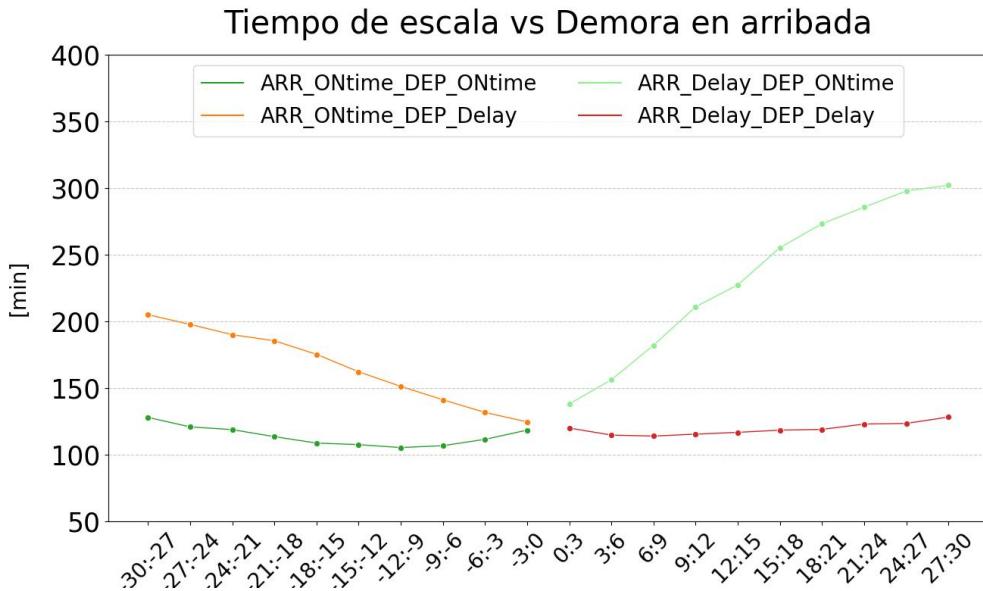
**Figura 4.18:** Relación demora - Tiempo de escala: Caso de uso 2

Finalmente se muestra un resumen comparativo de estos resultados en dos gráficas asiladas. Estas gráficas se han generado estableciendo en el eje x el tiempo de demora en la fase 1 del cosido, la fase de arribada, y se han agrupado por rangos de 3 en 3 minutos. Desde valores negativos (-30) que indican que la aeronave ha llegado con adelanto sobre lo previsto hasta valores positivos (30), que indican retrasos en la primera fase de la arribada. En dichos gráficos se representan 4 diagramas de líneas por cada uno de los 4 casos de estudio generados durante el capítulo. En el eje y, se representa la media de la agrupación de registros por cada rango del eje x. Es decir, el marcador que representa el eje y, es la media de todos los registros comprendidos

en el intervalo indicado del eje x. En ambas gráficas se ha decidido establecer como eje x la demora en la fase de arribada ya que es la que inicia la definición del cosido.

Una vez se ha detallado la construcción de las gráficas se procede a analizarlas.

Análisis del tiempo de escala:



**Figura 4.19:** Relación tiempo de escala vs demora en arribada

Primero se analizará los casos asociados a la fase de arribada sin demora, en el gráfico se representan en el color azul oscuro y naranja. Para el primer caso (verde oscuro), la tendencia es casi constante sin aparente correlación entre el tiempo de adelanto frente al tiempo de escala, sin embargo el segundo grupo (color naranja) si presenta una pendiente lineal creciente. Es decir, se aprecia que cuanto más adelanto presente un vuelo en la fase de arribada, tiempos de escala superiores suelen derivar en retrasos en la fase de despegue. Esto se traduce en que si la aeronave no sufre un retraso en salida el tiempo de escala suele oscilar entre los 110 - 140 minutos, sin embargo, de media, si una aeronave se retrasa en despegue por cada 3 minutos de adelanto en la fase de arribada puede traducirse en tiempo de escala superiores al 25 %. Por tanto se puede apreciar que la mejor fase de operación es acercarse al tiempo previsto de arribada, ya que un adelanto respecto a este tiempo no implica despegar a tiempo en la fase de escala.

Para el caso de aeronaves que han aterrizado con demora, se pueden distinguir dos grupos, aquellos que recuperan la demora y despegan a tiempo o aquellos que trasladan la demora a la segunda fase. Para esta casuística es muy notorio como los tiempos de escala superiores favorecen a esta recuperación de la demora. Esto se traduce a que por cada 3 minutos de demora es necesario incrementar aproximadamente 40 minutos el tiempo de escala (de media) para poder recuperar

esa demora.

Análisis de la demora en despegue frente arribada:

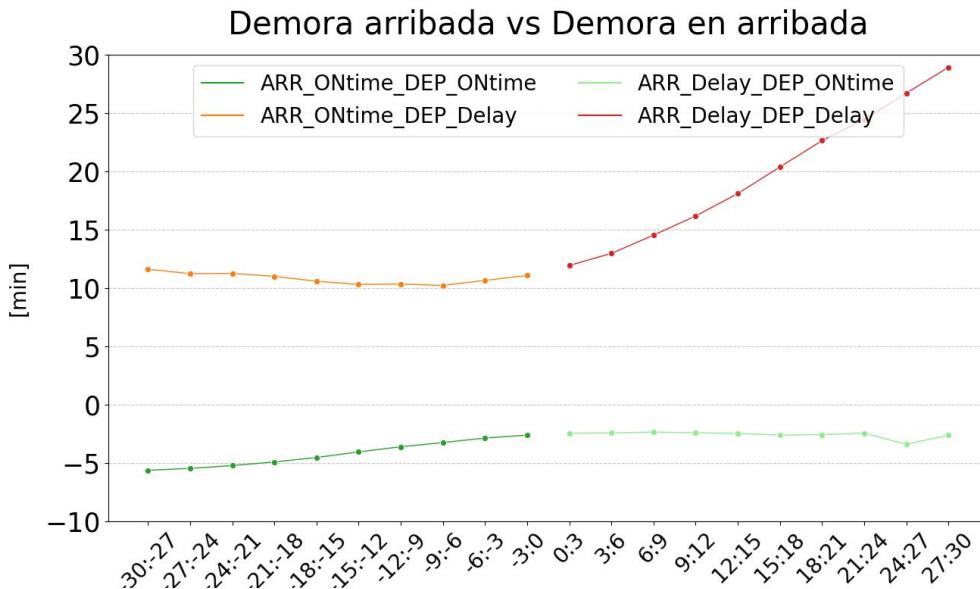


Figura 4.20: Relación demora arribada vs demora en arribada

Primero, se analizarán los casos relacionados con la fase de arribada sin demora, representados en el gráfico con los colores azul oscuro y naranja. En el primer caso (verde oscuro), se observa una tendencia casi constante, sin una correlación aparente entre las demoras. No se evidencia una relación entre los minutos de adelanto y las demoras. Sin embargo, en la parte derecha del gráfico, se perciben cambios en la correlación: a mayor demora en la arribada, la demora en el despegue aumenta exponencialmente. Esto se puede observar claramente en la línea roja del gráfico, que muestra una pendiente ascendente pronunciada en comparación con las otras líneas. La línea naranja también muestra un ligero aumento, pero no tan pronunciado como la línea roja. La línea verde oscuro permanece relativamente estable, indicando que no hay una correlación significativa en ese caso. En resumen, el gráfico muestra que cuando hay una mayor demora en la arribada, especialmente representada por la línea roja, la demora en el despegue tiende a aumentar de manera exponencial. Esto sugiere que es crucial gestionar las demoras en la arribada para evitar impactos significativos en las demoras de despegue.

# 5

## Variable objetivo: Cálculo de la Demora

### Índice

---

<b>5.1. Introducción</b>	<b>61</b>
<b>5.2. Análisis descriptivo</b>	<b>62</b>
5.2.1. Detección de Outliers	64
<b>5.3. Correlación de variables</b>	<b>64</b>
5.3.1. Compañía frente a Demora	66
5.3.2. Tipología del vuelo frente a Demora	67
5.3.3. Tipología de operación frente a Demora	69
5.3.4. Categoría de estela frente a Demora	71
5.3.5. Ratio de ocupación frente a Demora	72
5.3.6. Mes de ejercicio frente a Demora	74
5.3.7. Hora de ejercicio frente a Demora	76
5.3.8. Intensidad del viento frente a Demora	78
5.3.9. Dirección del viento frente a Demora	80

---

### 5.1. Introducción

En este capítulo, se procederá a la definición y análisis detallado de la variable dependiente de interés en nuestra investigación: la demora en el proceso de cosido. Esta variable reviste una importancia crítica en el desarrollo del modelo predictivo que se pretende construir, dado que posibilitará la precisión en la predicción de retrasos en las secuencias de llegadas y salidas en un aeropuerto específico. La adecuada definición y comprensión de esta variable es fundamental para garantizar

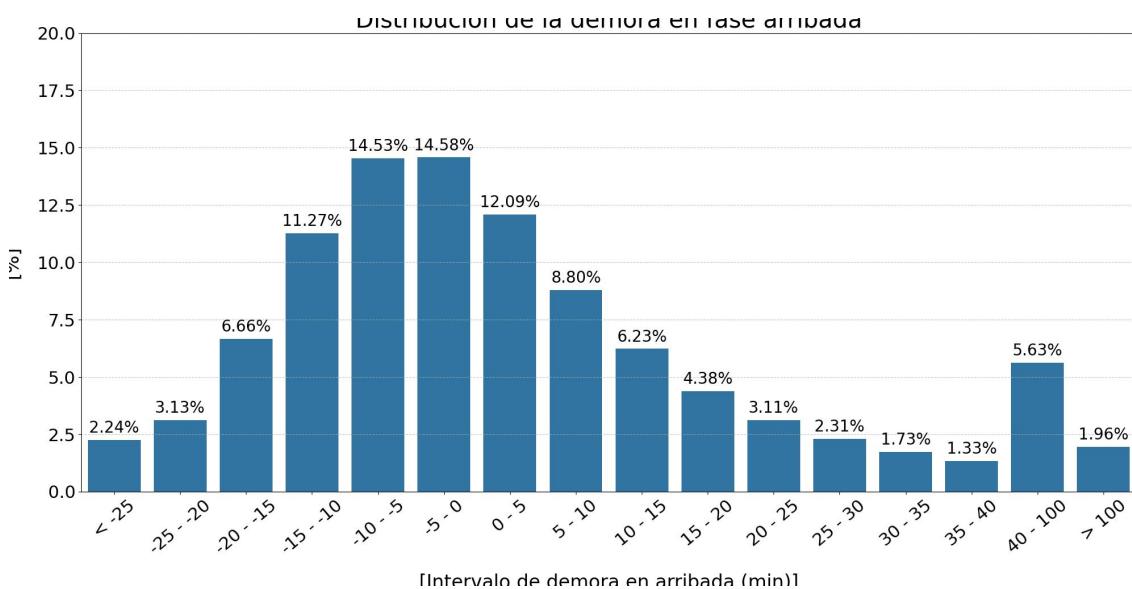
el éxito del modelo propuesto.

El objetivo último de este estudio consiste en desarrollar un modelo predictivo capaz de calcular tanto la demora en la fase inicial de llegada como la demora acumulada hasta la fase subsiguiente de salida, utilizando únicamente información relacionada con la tipología de vuelo, datos meteorológicos y los horarios programados tanto de llegada como de salida de vuelos.

## 5.2. Análisis descriptivo

El enfoque del estudio se divide en dos vertientes principales: la demora en arribada y la demora en despegue de vuelos. Primero, se realiza un análisis exploratorio de los datos utilizando diagramas de barras para obtener la distribución de la muestra en ambos casos.

Se procede a generar un diagrama de barras para visualizar la distribución de la demora en arribada, como se muestra en la Figura 5.1.



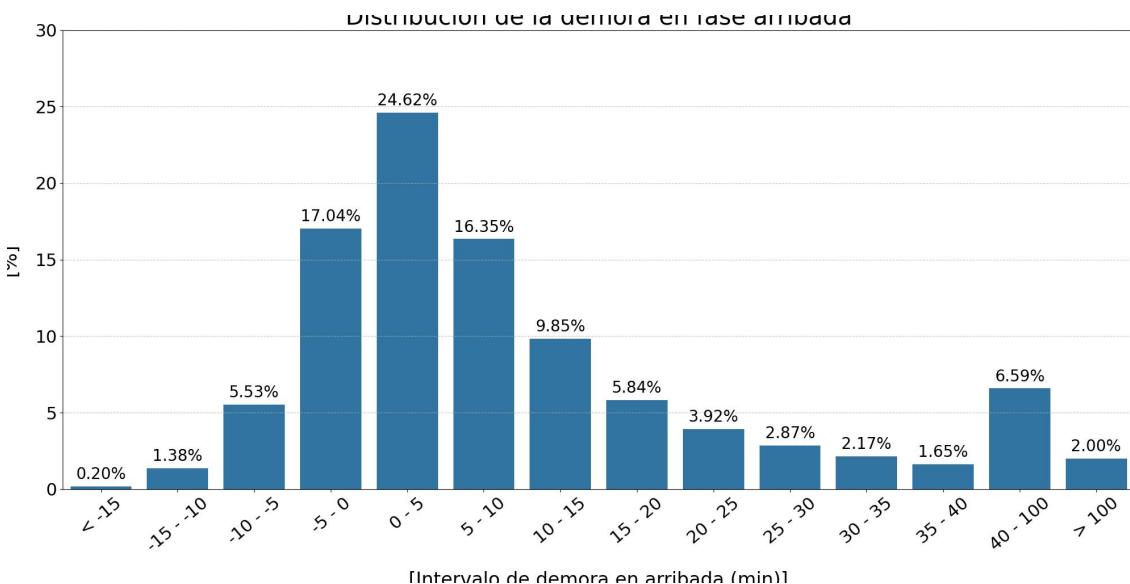
**Figura 5.1:** Distribución de la demora en arribada de vuelos

En la Figura 5.1, se observa inicialmente una distribución que sugiere normalidad, centrada alrededor de cero, lo cual indica que la mayoría de los vuelos llegan a tiempo o con ligeras variaciones. El rango de -5 a 5 minutos de demora abarca aproximadamente el 30 % de todos los registros. Por otro lado, los adelantos en arribada (demora negativa) muestran una menor dispersión, concentrándose más del 80 % de los datos en el rango de -25 a 0 minutos. En contraste, los retrasos muestran una dispersión mayor en el lado derecho de la distribución normal, indicando que hay intervalos con demoras más significativas. La distribución de la demora en arribada presenta varios patrones destacados. En primer lugar, el intervalo de -5 a 0 minutos es el más frecuente, representando el 14.60 % de los casos, seguido de cerca por el intervalo de 0 a 5 minutos con un 12.11 %. Esto indica que la mayoría de los vuelos

llegan con una pequeña demora, similar a lo observado en los despegues. En segundo lugar, los adelantos menores a -5 minutos también son comunes, con un 14.55 % de los vuelos llegando entre -10 y -5 minutos, y un 11.28 % llegando entre -15 y -10 minutos. Estos datos sugieren una tendencia a programar vuelos con un margen que permita adelantos menores.

A medida que aumenta la demora, la frecuencia disminuye, lo que es consistente con la tendencia observada en los despegues. Por ejemplo, los intervalos de 5 a 10 minutos y 10 a 15 minutos representan el 8.81 % y el 6.24 % de los casos, respectivamente. Esta reducción en frecuencia continúa en los intervalos superiores. Las demoras extremas, tanto positivas como negativas, son menos comunes. Los vuelos que llegan con una demora mayor a 100 minutos representan solo el 1.88 % de los casos, mientras que aquellos con una demora menor a -25 minutos constituyen el 2.21 %. Esto muestra que la mayoría de los vuelos se gestionan dentro de un rango razonable de tiempo.

Similarmente, se analiza la demora en despegue mediante un diagrama de barras, presentado en la Figura 5.16.



**Figura 5.2:** Distribución de la demora en despegue de vuelos

La Figura 5.16 muestra la distribución de la demora en despegue, donde se observan varios patrones interesantes que merecen atención. En primer lugar, se destaca la alta frecuencia de demoras pequeñas. Los intervalos con demoras de 0 a 5 minutos representan el mayor porcentaje (24.62 %) de los casos, seguido por el intervalo de -5 a 0 minutos (17.04 %). Esto sugiere que la mayoría de los despegues ocurren con una demora mínima, lo que indica una gestión eficiente en la mayoría de los casos. En segundo lugar, se observa una prevalencia de adelantos menores. Las demoras negativas en el intervalo de -5 a 0 minutos son también bastante comunes, representando el segundo grupo más frecuente. Esto puede indicar una tendencia a programar vuelos con un margen de tiempo que permita adelantos menores. Además,

se aprecia una reducción en frecuencia a medida que aumenta la demora. Por ejemplo, el intervalo de 5 a 10 minutos (16.35 %) es considerablemente menos frecuente que el de 0 a 5 minutos. Esta tendencia continúa en los intervalos siguientes, como 10 a 15 minutos (9.85 %) y 15 a 20 minutos (5.84 %). También se identifica una baja frecuencia de demoras extremas. Las demoras extremas, tanto positivas como negativas, son bastante raras. Los intervalos de demora mayores a 40 minutos y menores a -10 minutos suman menos del 10 % del total. Esto muestra un buen control sobre los tiempos de despegue, evitando retrasos y adelantos excesivos.

Finalmente, aunque la mayoría de las demoras se agrupan en intervalos menores, hay casos de dispersión significativa, especialmente en los intervalos extremos. Estos casos podrían estar asociados a situaciones excepcionales que requieren una mayor atención y análisis para identificar y mitigar las causas subyacentes.

### 5.2.1. Detección de Outliers

Basado en el análisis de los gráficos anteriores, se identifican dos rangos donde se acumulan potenciales outliers. El objetivo del estudio es desarrollar un modelo predictivo robusto que pueda manejar situaciones típicas y mitigar el impacto de situaciones anómalas como condiciones meteorológicas extremas, limitaciones de capacidad o regulaciones operativas.

Para abordar esto, se han tomado las siguientes acciones:

- **Demora en Arribada:** Se eliminan todos los registros con adelantos superiores a una hora respecto a lo programado. Además, se excluyen de las variables de entrada aquellos registros con demoras superiores a 420 minutos (equivalente a 7 horas de retraso).
- **Demora en Despegue:** Se aplica el mismo criterio, eliminando registros con adelantos o retrasos extremos según los límites establecidos.

Estas consideraciones son cruciales para garantizar que el modelo predictivo se enfoca en patrones típicos y no sea influenciado de manera desproporcionada por eventos excepcionales que podrían distorsionar las predicciones.

## 5.3. Correlación de variables

En esta sección, se explorará la relación entre las variables seleccionadas y la variable objetivo, que es la demora en arribada y despegue de vuelos. El análisis de correlación es fundamental para comprender cómo cada variable puede influir en los tiempos de demora de vuelo, proporcionando insights importantes para la gestión y optimización de operaciones aéreas.

A través de diversas técnicas estadísticas, se examinará la fuerza y la dirección de las relaciones entre las variables predictoras y la demora en los tiempos de arribada y despegue. Esto permitirá identificar qué factores podrían estar contribuyendo

significativamente a las variaciones en los tiempos de vuelo, facilitando así la toma de decisiones informadas para mejorar la eficiencia y puntualidad operativa.

El análisis detallado aquí ayudará a construir un modelo comprensivo que pueda predecir con mayor precisión las demoras en los vuelos, contribuyendo a una gestión más eficiente y efectiva de los recursos en el sector aeronáutico.

Para poder realizar mejor el análisis de correlación de variables, se ha optado por parametrizar la variable *demora* en la siguiente clasificación:

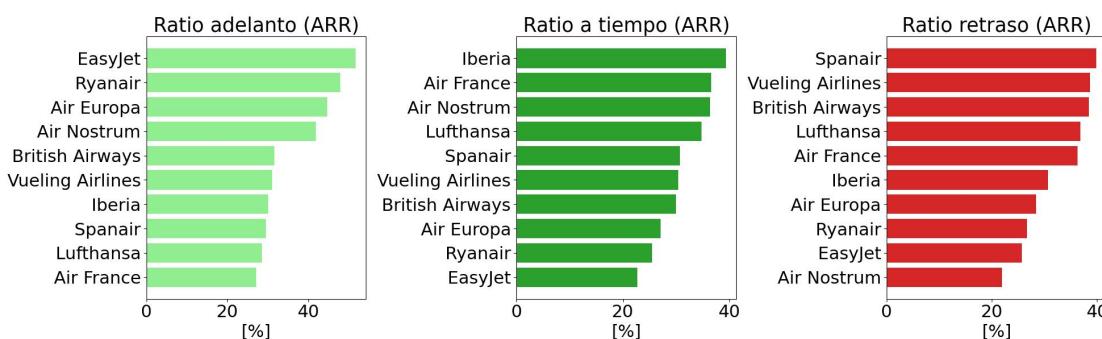
- Si *demora* es menor que -5 minutos, la función retorna la categoría **Adelanto**. Esto indica que la aeronave ha llegado o salido más de 5 minutos antes del tiempo programado.
- Si *demora* es mayor que 5 minutos, la función retorna la categoría **Retraso**. Esto indica que la aeronave ha llegado o salido más de 5 minutos después del tiempo programado.
- Si *demora* está entre -5 y 5 minutos, inclusive, la función retorna la categoría **A tiempo**. Esto indica que la aeronave ha llegado o salido dentro de un margen de 5 minutos respecto al horario programado.

Esta clasificación permite una interpretación más clara y estructurada de los datos de puntualidad, facilitando así el análisis y la correlación con otras variables relevantes en el estudio.

### 5.3.1. Compañía frente a Demora

En este estudio, se analizan las 10 compañías aéreas con mayor número de operaciones en el dataset. Estas compañías son Vueling Airlines (VLG), Ryanair (RYR), EasyJet (EZY), Spanair (JKK), Iberia (IBE), Lufthansa (DLH), Air Nostrum (ANE), Air Europa (AEA), Air France (AFR) y British Airways (BAW).

Se inicia el estudio analizando la demora en la fase de arribada. Para cada compañía, se ha calculado el porcentaje de adelantos, retrasos y vuelos a tiempo, así como las medias de adelanto y retraso en minutos.



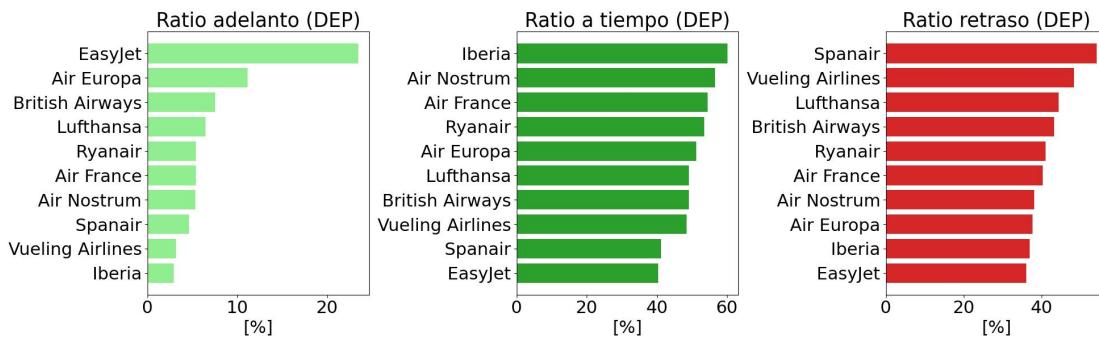
**Figura 5.3:** Correlación de la demora en arribada frente a la aerolínea

EasyJet destaca por tener el mayor porcentaje de vuelos con adelanto en el tiempo de arribada (51.59 %) y uno de los tiempos de adelanto más altos (14.94 minutos de adelanto). Sin embargo, esta compañía también presenta una media de retraso considerable (38.04 minutos) cuando ocurren retrasos. Por otro lado, Iberia (IBE) tiene el mayor porcentaje de arribadas a tiempo (39.35 %), lo que indica una buena gestión del tiempo en general. Air Nostrum (ANE) presenta un balance notable entre arribadas con adelanto (41.74 %) y puntualidad (36.36 %), con medias de adelanto y retraso moderadas en comparación con otras aerolíneas. Además, aerolíneas como Iberia y Lufthansa (DLH) muestran altos porcentajes de puntualidad y menores tiempos de retraso en comparación con otras.

Las compañías con altos porcentajes de adelanto, como EasyJet (51.59 %) y Ryanair (47.82 %), también presentan tiempos promedio de adelanto más largos, con valores de -14.944 y -14.819 minutos respectivamente. En contraste, compañías con altos porcentajes de retraso, como Spanair (39.80 %) y Vueling Airlines (38.61 %), muestran tiempos promedio de retraso significativos, con 32.386 y 34.454 minutos respectivamente.

En cuanto a la demora en fase de despegue:

Iberia muestra el mayor porcentaje de vuelos puntuales con un 60.19 %, seguida de Air Nostrum (56.62 %) y Ryanair (53.56 %). EasyJet presenta el menor porcentaje de puntualidad con solo un 40.38 %. El porcentaje de retrasos más alto lo tiene Spanair con un 54.20 %, seguido de Vueling Airlines (48.29 %) y British Airways (43.25 %). Las medias de retraso más significativas son para EasyJet (37.06 minutos)



**Figura 5.4:** Correlación de la demora en despegue frente a la aerolínea

y British Airways (31.05 minutos). EasyJet lidera en términos de adelantos con un 23.51 %, aunque también tiene una media de adelanto más negativa (-9.80 minutos), lo que indica adelantos más significativos. Vueling Airlines y Air Nostrum tienen los porcentajes de adelanto más bajos, con 3.18 % y 5.33 % respectivamente.

**Al comparar las demoras en salidas y llegadas**, se observa que

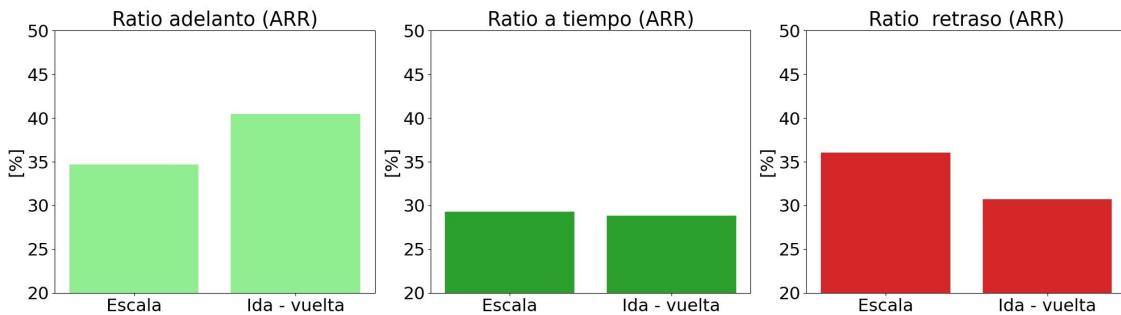
- EasyJet presenta altos porcentajes de adelanto tanto en salidas como en llegadas, esto quiere decir que se presenta como una compañía que suele sobre estimar los tiempos. Ryanair, con un 5.38 % de adelantos en salidas y 47.82 % en llegadas, también muestra un patrón similar, con tiempos de adelanto más largos en llegadas (-14.819 minutos).
- Por otro lado, compañías como Vueling Airlines y Spanair destacan por sus altos porcentajes de retraso tanto en salidas como en llegadas. Vueling Airlines tiene un 48.29 % de retrasos en salidas y 38.61 % en llegadas, con tiempos promedio de retraso de 26.24 y 34.454 minutos respectivamente. Spanair presenta un 54.20 % de retrasos en salidas y 39.80 % en llegadas, con tiempos promedio de retraso de 29.01 y 32.386 minutos respectivamente.
- La comparación revela que las aerolíneas con altos porcentajes de puntualidad y menores tiempos de retraso en salidas, como Iberia y Lufthansa, también mantienen un buen desempeño en llegadas. Esto sugiere una consistencia en la gestión del tiempo y eficiencia operativa.

### 5.3.2. Tipología del vuelo frente a Demora

La siguiente variable para el estudio de correlaciones es la tipología del vuelo. Como se ha descrito en la sección 4.2, los tipos de vuelos se pueden clasificar según su ruta y características específicas. Un vuelo con escala es aquel en el que la aeronave realiza una parada en uno o más aeropuertos antes de llegar a su destino final. En este caso, el pasajero comienza su viaje en el aeropuerto A, hace una parada intermedia en Barcelona, y continúa hacia el aeropuerto B, siendo A y B aeropuertos distintos. Por otro lado, los vuelos de ida y vuelta con escala son aquellos en los que el pasajero sale del aeropuerto A, hace una parada intermedia en Barcelona, y regresa al mismo aeropuerto A. Esta clasificación permite diferenciar entre vuelos que utilizan una

escala para conectar diferentes aeropuertos y aquellos que, aunque también incluyen una escala, regresan al mismo aeropuerto de origen.

Respecto a la demora en arribada:



**Figura 5.5:** Correlación de la demora en arribada frente a la tipología de conexión

Los vuelos de ida y vuelta muestran un porcentaje de llegadas con adelanto del 8.85 %, un porcentaje de retrasos del 44.59 % y un porcentaje de llegadas a tiempo del 46.56 %. La media de adelantos es de -8.97 minutos y la media de retrasos es de 29.68 minutos. En comparación, los vuelos con escala tienen un porcentaje de llegadas con adelanto del 5.01 %, un porcentaje de retrasos del 46.41 % y un porcentaje de llegadas a tiempo del 48.58 %. La media de adelantos es de -9.01 minutos y la media de retrasos es de 26.55 minutos. Estas diferencias sugieren que los vuelos con escala tienen una ligera ventaja en términos de puntualidad en llegadas, con tiempos de retraso promedio menores.

Respecto a la demora en despegue:



**Figura 5.6:** Correlación de la demora en despegue frente a la tipología de conexión

Los vuelos de ida y vuelta presentan un porcentaje de salidas con adelanto del 40.47 % y un porcentaje de retrasos del 30.73 %. La media de adelantos es de -14.13 minutos, mientras que la media de retrasos es de 31.07 minutos. Por otro lado, los vuelos con escala tienen un porcentaje de salidas con adelanto del 34.67 % y un porcentaje de retrasos del 36.02 %. La media de adelantos es de -13.42 minutos y la

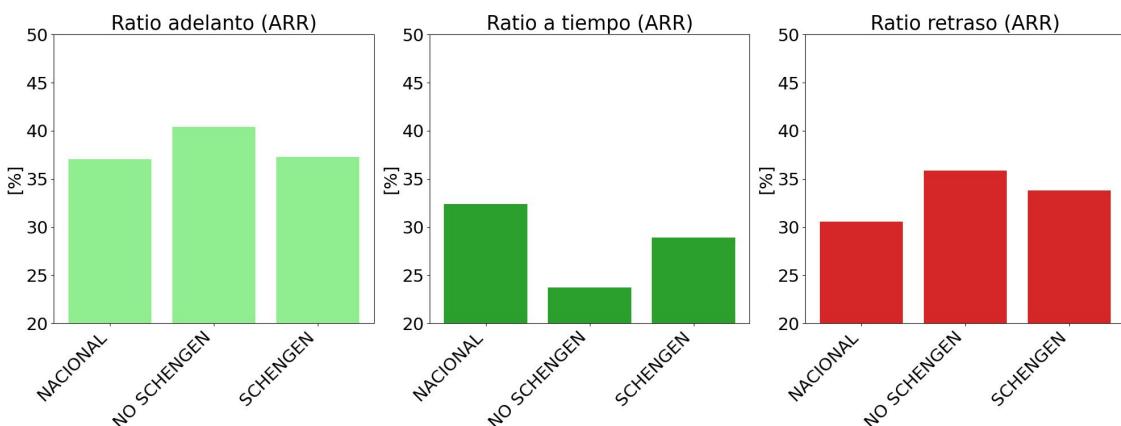
media de retrasos es de 33.95 minutos. Esto indica que los vuelos de ida y vuelta tienden a tener un mayor porcentaje de adelantos en salidas, aunque los vuelos con escala presentan tiempos de retraso ligeramente mayores.

En conclusión, los vuelos de ida y vuelta tienden a mostrar mejores resultados en términos de adelantos tanto en salidas como en llegadas en comparación con los vuelos con escala. Sin embargo, los vuelos con escala presentan un porcentaje ligeramente mayor de puntualidad en llegadas y tiempos de retraso promedio menores en llegadas. Estas observaciones sugieren que los vuelos con escala pueden ser más consistentes en términos de puntualidad en llegadas, aunque los vuelos de ida y vuelta demuestran una mejor gestión del tiempo en salidas.

### 5.3.3. Tipología de operación frente a Demora

Este estudio analiza la puntualidad en operaciones aeroportuarias, comparando llegadas y salidas de vuelos Schengen, nacionales y no Schengen. Se examinan los porcentajes de vuelos adelantados, retrasados y puntuales, así como las medias de adelanto y retraso para cada categoría. El objetivo es identificar patrones y diferencias entre tipos de vuelos y operaciones, proporcionando información valiosa para la mejora de la gestión aeroportuaria y la reducción de demoras.

Respecto a la demora en arribada:

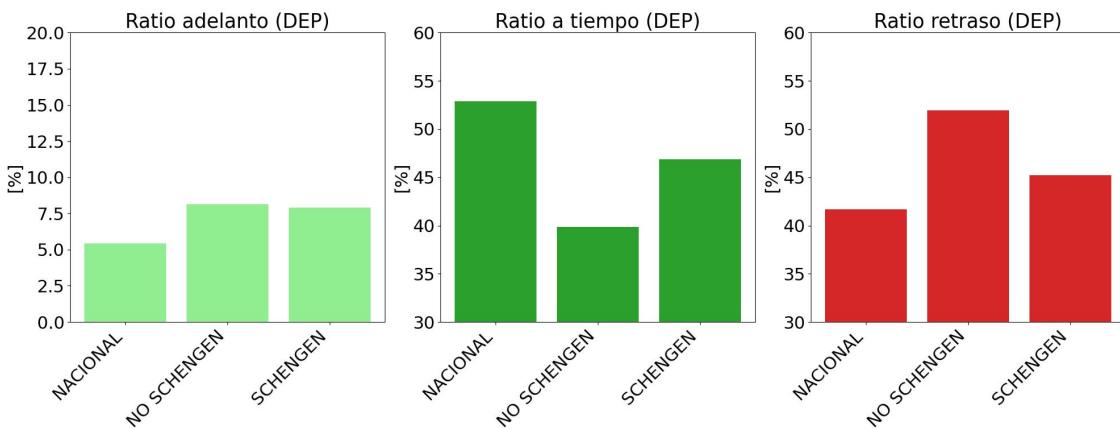


**Figura 5.7:** Correlación de la demora en arribada frente a la clase de vuelo

La tabla de salidas refleja patrones diferentes en comparación con las llegadas. La categoría "Schengen" también lidera con 45.40 % de las operaciones. Sin embargo, aquí, el porcentaje de adelantos es muy bajo (7.92 %), mientras que los retrasos son predominantes con 45.23 %. La media de adelantos (-9.16) y la media de retrasos (26.94) muestran que los retrasos son bastante comunes y significativos en esta categoría. Para Nacional, que tiene el 34.03 % de las operaciones, los adelantos son aún más bajos (5.41 %) comparados con los retrasos (41.69 %), y la media de adelantos es menos negativa (-8.39) que en "Schengen". Por último, No Schengen muestra un

20.58 % de las operaciones con un 8.16 % de adelantos y un notable 51.96 % de retrasos, destacando como la categoría con mayor proporción de retrasos y la media más alta de retrasos (25.07).

Respecto a la demora en despegue:



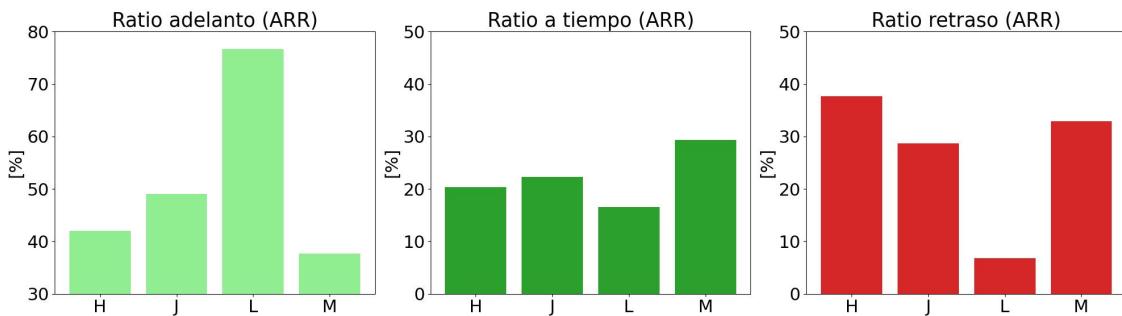
**Figura 5.8:** Correlación de la demora en despegue frente a la clase de vuelo

Se observan diferentes patrones de desempeño según la clase de operación. La categoría Schengen tiene el mayor porcentaje (%) con 45.50 %, indicando que casi la mitad de las operaciones de llegada pertenecen a esta categoría. Dentro de Schengen, el porcentaje de adelantos es 37.27 %, mientras que los retrasos son ligeramente inferiores con 33.81 %. Esto contrasta con Nacional y no Schengen. Nacional tiene un porcentaje de operaciones del 33.89 % con una distribución de 37.06 % en adelantos y 30.53 % en retrasos. Por último, No Schengen, con un 20.60 % de las operaciones, presenta el mayor porcentaje de adelantos (40.42 %) y retrasos (35.88 %).

Comparando las llegadas y salidas, se observa una clara tendencia donde Schengen domina en volumen de operaciones tanto en llegadas como en salidas. Sin embargo, hay una diferencia notable en los patrones de adelantos y retrasos. Para las llegadas, tanto Schengen como Nacional y No Schengen presentan una distribución más equilibrada entre adelantos y retrasos, mientras que en las salidas, los retrasos son significativamente más altos en todas las categorías. La media de adelantos y retrasos también refleja esta diferencia, siendo menos negativa en las salidas para todas las categorías, lo que sugiere que las operaciones de salida tienden a tener menores adelantos y mayores retrasos en comparación con las llegadas. Especialmente, No Schengen tiene las medias más extremas tanto en adelantos como en retrasos para las llegadas y una distribución de retrasos muy alta en las salidas, lo cual podría indicar problemas operativos específicos a esta categoría que afectan más a las salidas.

### 5.3.4. Categoría de estela frente a Demora

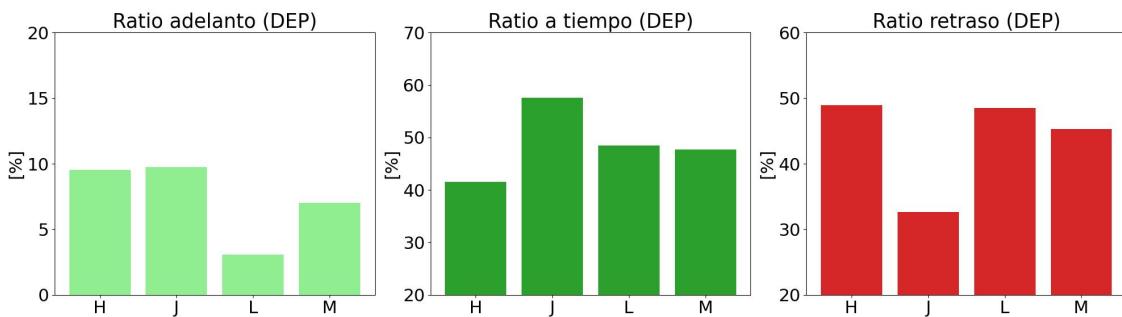
Respecto a la demora en arribada:



**Figura 5.9:** Correlación de la demora en arribada frente a la categoría de estela

En la tabla de salidas, la categoría M sigue representando el 96.05 % de las operaciones, pero muestra un menor porcentaje de adelantos (7.02 %) y un mayor porcentaje de retrasos (45.29 %), mientras que el 47.70 % de los vuelos sale a tiempo. La categoría H mantiene un 3.81 % de las operaciones, con un 9.51 % de adelantos, un 48.90 % de retrasos y un 41.59 % de vuelos a tiempo. La categoría J tiene un 0.12 % de las operaciones, con un 9.74 % de adelantos, un 32.67 % de retrasos y un 57.59 % de vuelos a tiempo. La categoría L sigue con un 0.02 % de las operaciones, con un 3.07 % de adelantos, un 48.47 % de retrasos y un 48.47 % de vuelos a tiempo.

Respecto a la demora en despegue:



**Figura 5.10:** Correlación de la demora en despegue frente a la categoría de estela

En la tabla de llegadas, la categoría M domina con un 96.05 % de las operaciones. Dentro de esta categoría, el 37.67 % de los vuelos llega adelantado, el 32.95 % llega con retraso y el 29.38 % llega a tiempo. La categoría H representa el 3.81 % de las operaciones y muestra un mayor porcentaje de adelantos (41.98 %) y retrasos (37.67 %), pero un menor porcentaje de vuelos a tiempo (20.35 %). La categoría "J" con solo un 0.12 % de las operaciones, presenta el mayor porcentaje de adelantos (49.04 %) y el menor porcentaje de retrasos (28.67 %), con un 22.28 % de vuelos a tiempo. Finalmente, la categoría L con la menor representación (0.02 %), destaca por

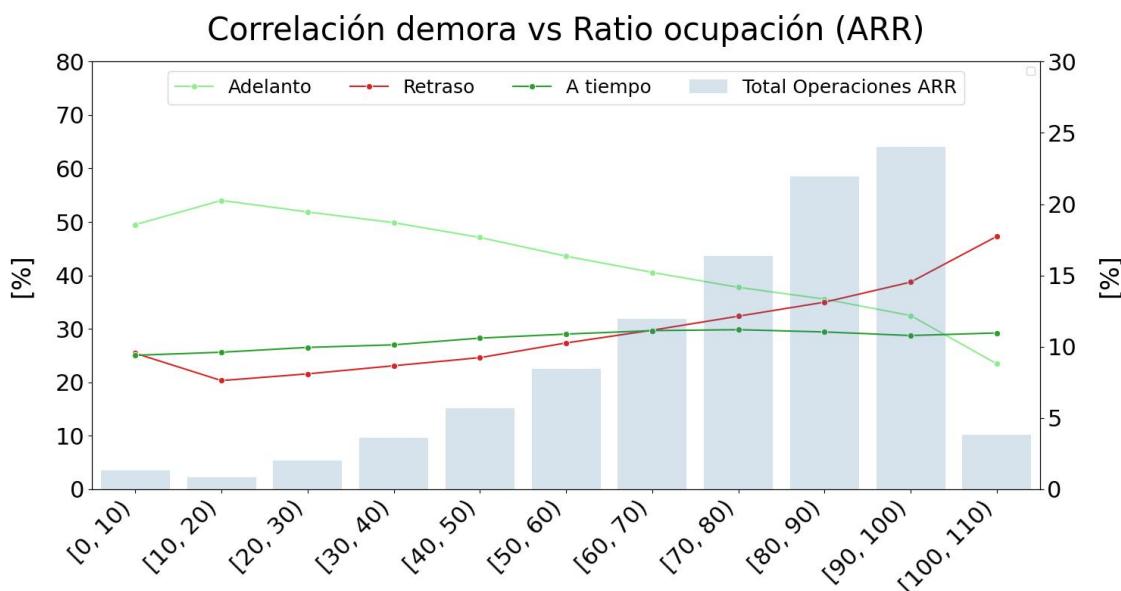
un alto porcentaje de adelantos (76.69 %) y un bajo porcentaje de retrasos (6.75 %).

Al comparar las tablas de llegadas y salidas:

- se observan algunas diferencias significativas en los patrones de rendimiento. La categoría M, aunque domina en ambas fases con un 96.05 % de las operaciones, tiene un porcentaje mucho menor de adelantos en salidas (7.02 %) comparado con llegadas (37.67 %), y un mayor porcentaje de vuelos a tiempo en salidas (47.70 %) que en llegadas (29.38 %).
- La categoría H muestra una disminución en el porcentaje de adelantos de llegadas (41.98 %) a salidas (9.51 %) y un incremento en vuelos a tiempo de llegadas (20.35 %) a salidas (41.59 %).
- La categoría J también presenta menos adelantos en salidas (9.74 %) que en llegadas (49.04 %), pero un notable incremento en vuelos a tiempo (57.59 %) en salidas comparado con las llegadas (22.28 %).
- Finalmente, la categoría L mantiene altos porcentajes de adelantos en llegadas (76.69 %) y un bajo porcentaje en salidas (3.07 %), con una mayor estabilidad en vuelos a tiempo en salidas (48.47 %) que en llegadas (16.56 %). Estas variaciones indican diferencias operativas significativas entre las fases de llegada y salida para cada categoría de estela.

### 5.3.5. Ratio de ocupación frente a Demora

Respecto a la demora en arribada:

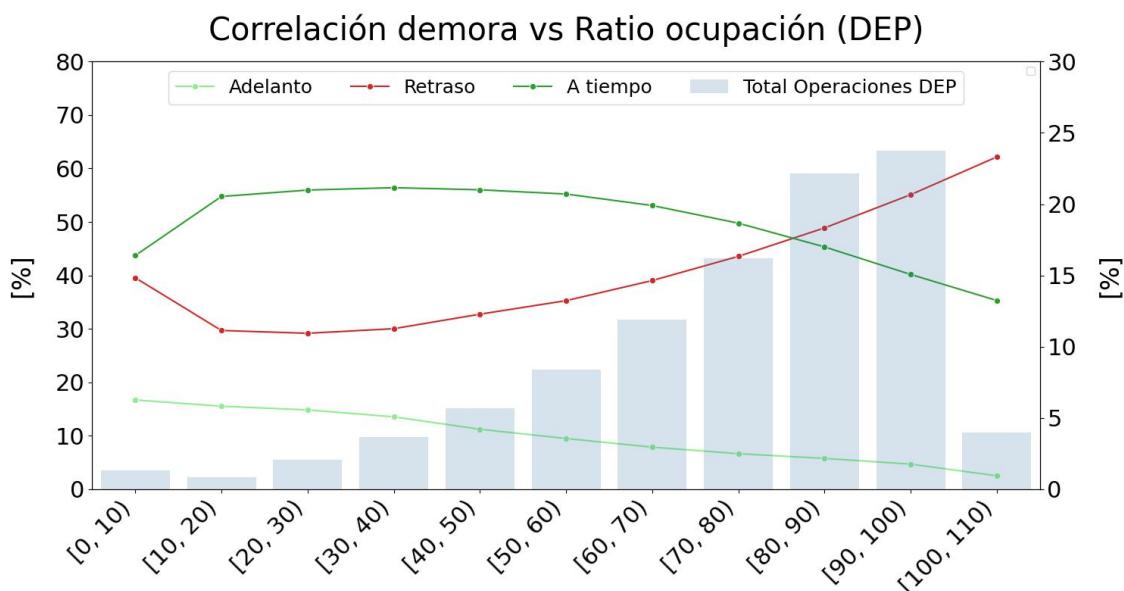


**Figura 5.11:** Correlación de la demora en arribada frente al ratio de ocupación

El ratio de ocupación también influye notablemente en la puntualidad de las arribadas en el aeropuerto de Barcelona. A medida que aumenta el ratio de ocupación, se observa una tendencia general en la que el porcentaje de adelantos disminuye y el porcentaje de retrasos aumenta. Las ocupaciones más comunes están en los rangos del 80-90 % (21.93 %) y 90-100 % (24.01 %). En estos rangos, los porcentajes de adelantos son menores (35.58 % y 32.50 %), mientras que los retrasos son más frecuentes (34.99 % y 38.75 %).

- Adelantos más altos: [10, 20) (54.03 %), [20, 30) (51.88 %)
- Retrasos más altos: [100, 110) (47.29 %), [90, 100) (38.75 %)
- Vuelos a tiempo más altos: [50, 60) (29.03 %), [60, 70) (29.68 %)

Respecto a la demora en despegue:



**Figura 5.12:** Correlación de la demora en despegue frente al ratio de ocupación

El ratio de ocupación también afecta significativamente la puntualidad de las salidas en el aeropuerto de Barcelona. A medida que aumenta el ratio de ocupación, se observa una tendencia general donde el porcentaje de adelantos disminuye y el porcentaje de retrasos aumenta. Las ocupaciones más comunes están en los rangos del 80-90 % (22.17 %) y 90-100 % (23.74 %). En estos rangos, los porcentajes de adelantos son menores (5.78 % y 4.71 %), mientras que los retrasos son más frecuentes (48.88 % y 55.10 %).

- Adelantos más altos: [0, 10) (16.71 %), [10, 20) (15.53 %)
- Retrasos más altos: [100, 110) (62.15 %), [90, 100) (55.10 %)
- Vuelos a tiempo más altos: [20, 30) (55.96 %), [30, 40) (56.41 %)

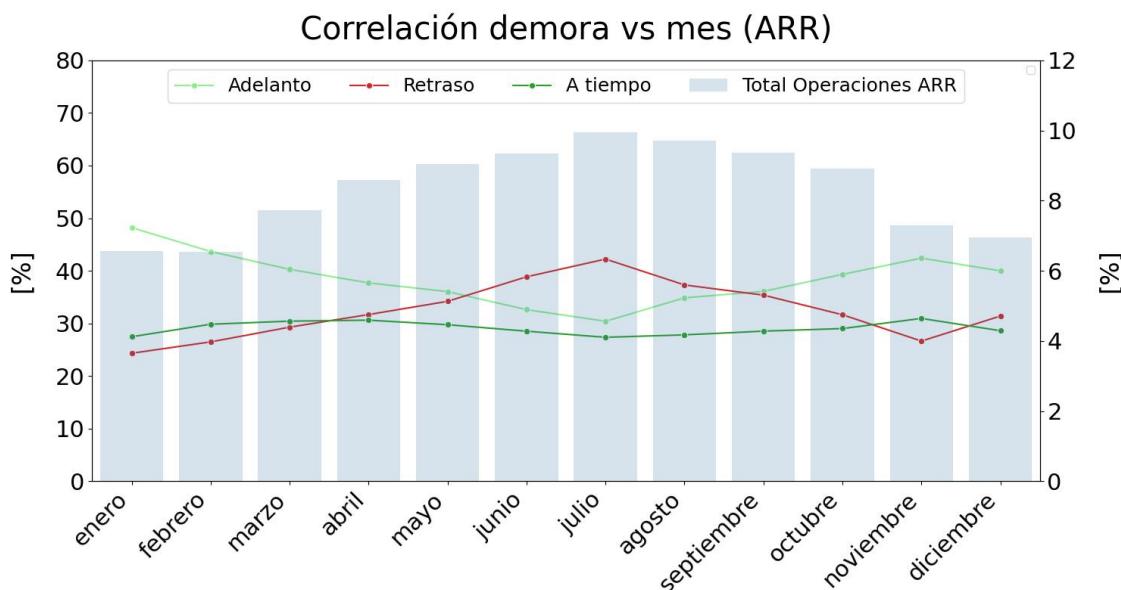
Al comparar los datos de arribadas y salidas, se pueden observar similitudes y diferencias en cómo el ratio de ocupación afecta estas operaciones aeroportuarias. Tanto en arribadas como en salidas, un mayor ratio de ocupación tiende a aumentar los retrasos y disminuir los adelantos. Las ocupaciones más comunes para ambas operaciones están en los rangos del 80-100 %. Sin embargo, en los despegues, el porcentaje de vuelos a tiempo es mayor en rangos de ocupación moderada (20-40 %) en comparación con las arribadas, donde los vuelos a tiempo son más constantes pero más bajos en promedio.

- Similitudes: Aumento de retrasos con mayores ratios de ocupación, mayor frecuencia de adelantos en rangos de ocupación bajos.
- Diferencias: Los vuelos a tiempo son más frecuentes en despegues a ratios de ocupación moderada (20-40 %), mientras que en las arribadas estos se mantienen más constantes pero con menor variabilidad.

### 5.3.6. Mes de ejercicio frente a Demora

En este apartado se analizarán las demoras en función de los meses del año tanto en los despegues como en las arribadas. Utilizando gráficos que muestran las líneas para los porcentajes de adelanto, a tiempo y retraso, así como barras para el total de vuelos, se pretende identificar patrones y comportamientos específicos en diferentes épocas del año. Este análisis nos permitirá comprender mejor las variaciones estacionales y las posibles causas subyacentes de las demoras en el tráfico aéreo.

Respecto a la demora en arribada:

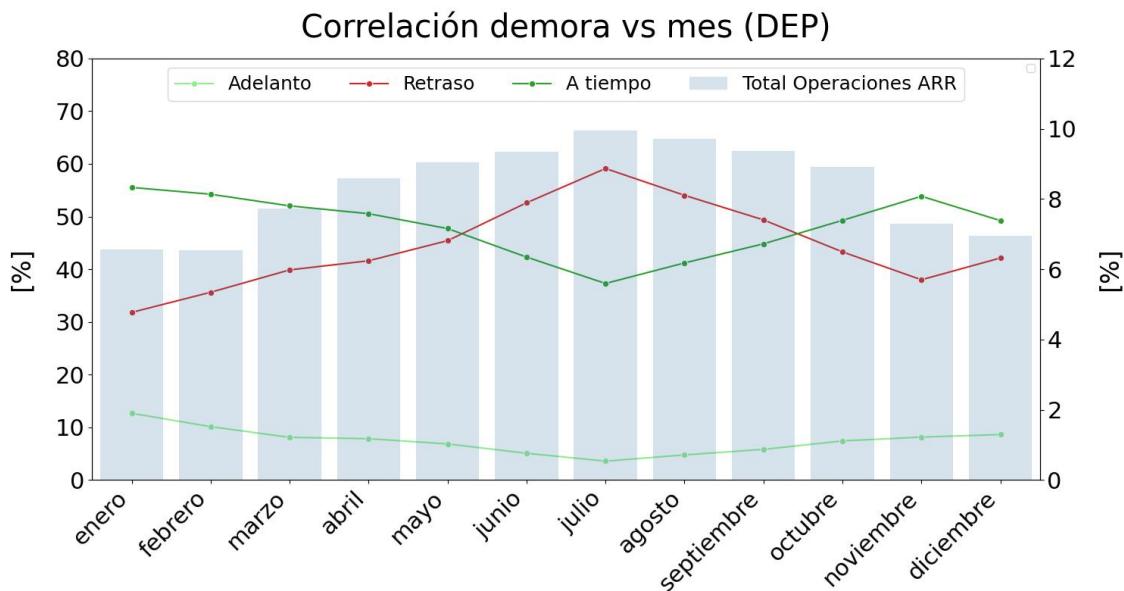


**Figura 5.13:** Correlación de la demora en despegue frente al mes de ejercicio

El análisis de las demoras en arribadas a lo largo de los meses del año revela varios patrones interesantes. En enero, el 6.57 % de los vuelos arribaron adelantados

con una media de adelanto de 27.47 minutos, el 48.20 % de los vuelos llegaron con retraso con una media de 14.23 minutos de retraso, y el 24.33 % de los vuelos llegaron a tiempo. A medida que avanza el año, se observa un incremento en el porcentaje de vuelos retrasados, alcanzando su pico en julio con un 42.23 % de vuelos retrasados y una media de retraso de 37.90 minutos. Durante este mes, también se nota una disminución en el porcentaje de vuelos a tiempo y adelantados, lo que sugiere un impacto significativo en la puntualidad de los vuelos.

Respecto a la demora en despegue:



**Figura 5.14:** Correlación de la demora en despegue frente al mes de ejercicio

El análisis de las demoras en despegues muestra que en enero, el 6.57 % de los vuelos despegaron adelantados con una media de 55.52 minutos de adelanto, mientras que el 12.67 % despegaron con retraso, con una media de 8.94 minutos de retraso, y el 31.81 % de los vuelos despegaron a tiempo. A lo largo del año, el porcentaje de vuelos retrasados en despegue muestra un notable aumento, alcanzando un máximo en julio con un 59.11 % de vuelos retrasados y una media de retraso de 33.13 minutos. Este aumento en julio es acompañado por una baja en el porcentaje de vuelos adelantados a solo 3.59 %, reflejando mayores dificultades en mantener la puntualidad en los despegues durante este mes.

Se pueden extraer varias conclusiones adicionales de este análisis:

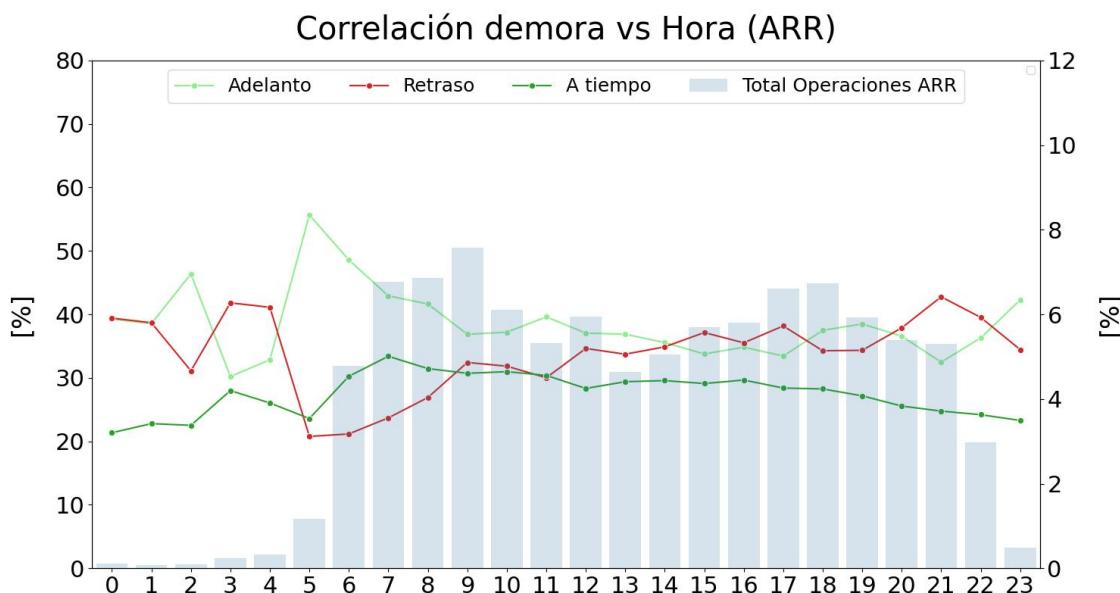
- Los meses de verano (julio y agosto) muestran consistentemente los mayores porcentajes de vuelos retrasados tanto en arribadas como en despegues, lo cual podría estar directamente relacionado con el aumento del tráfico aéreo.
- Aunque los despegues tienden a tener mayores tiempos de adelanto en comparación con las arribadas, la variabilidad en los tiempos de despegue es significativamente mayor, lo que sugiere una planificación menos precisa en las operaciones de salida.

- Existe una discrepancia notable entre los porcentajes de vuelos adelantados y retrasados, lo que indica que mientras algunos vuelos logran adelantarse significativamente, otros experimentan retrasos considerables, creando una distribución no uniforme de la puntualidad.

### 5.3.7. Hora de ejercicio frente a Demora

En este estudio, se analizan los datos de demoras en salidas de vuelos, enfocándonos en los porcentajes de operaciones totales, adelantos, retrasos y salidas a tiempo. Este análisis tiene como objetivo identificar patrones y tendencias significativas para mejorar la gestión de operaciones de vuelo.

Respecto a la demora en arribada:



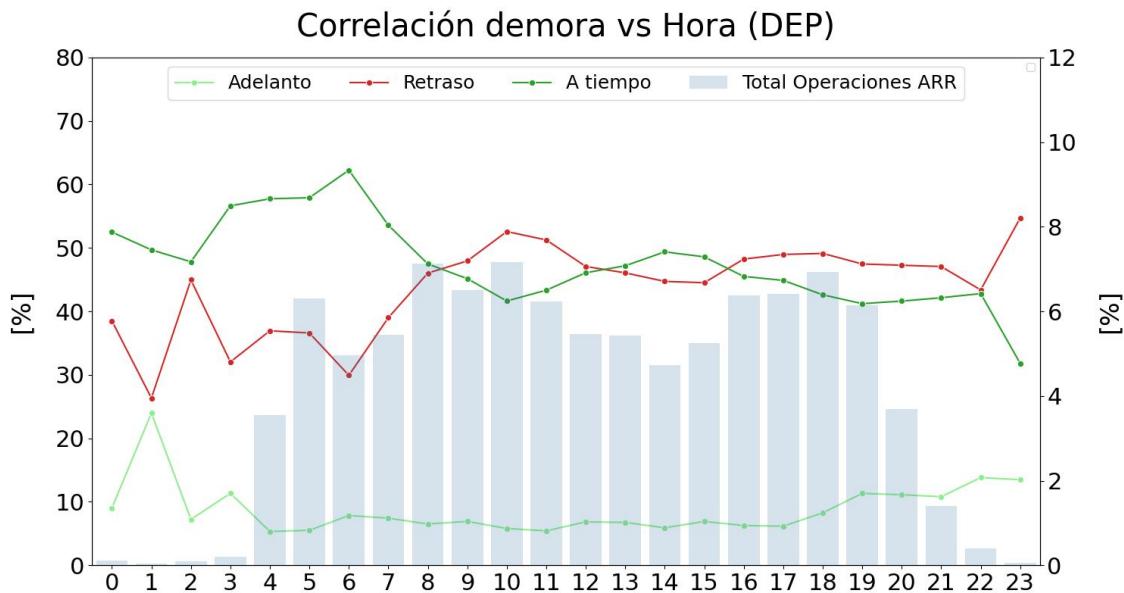
**Figura 5.15:** Correlación de la demora en despegue frente a la Hora prevista

En las primeras horas de la madrugada (00:00-04:00), esta fase presenta cierta irregularidad, siendo las salidas puntuales las menores en porcentaje, y los adelantos las superiores. A medida que amanece, surge una tendencia marcada hacia arribadas adelantadas, alcanzando su punto máximo a las 05:00 con un 55.64 % de vuelos llegando antes de lo programado y solo un 20.77 % de retrasos. Esta tendencia positiva continúa en las primeras horas de la mañana, con un pico de puntualidad a las 07:00, donde el 33.39 % de los vuelos llegan a tiempo. Conforme avanza la mañana, el volumen de tráfico aumenta significativamente, llegando a un primer pico entre las 10:00 y 12:00, con la hora 10 registrando el máximo de 6.10 % del total de arribadas diarias. Este incremento en el tráfico parece correlacionarse con una disminución en la puntualidad.

Durante la tarde, se mantiene un flujo constante de arribadas, con fluctuaciones en los porcentajes de puntualidad. Al llegar la noche, especialmente a partir de las

21:00, se observa una clara propensión a los retrasos, alcanzando su punto máximo con un 42.76 % de vuelos retrasados a esta hora. Esta progresión a lo largo del día sugiere una relación entre el volumen de tráfico y la puntualidad, donde los períodos de menor congestión en la madrugada y primeras horas de la mañana favorecen las llegadas adelantadas, mientras que las horas pico y el final del día están asociados a una mayor incidencia de retrasos.

Respecto a la demora en despegue:



**Figura 5.16:** Correlación de la demora en despegue frente a la Hora prevista

En las primeras horas de la madrugada (00:00-03:00), se observa una baja actividad, al igual que en las llegadas. A medida que amanece, entre las 04:00 y 06:00, se produce un aumento significativo en el volumen de salidas, aunque con una disminución notable en las salidas adelantadas. Durante la mañana, el tráfico se intensifica, con picos de actividad entre las 07:00 y 10:00, siendo las 08:00 y 09:00 las horas más concurridas. Este período muestra una tendencia creciente en los retrasos.

El mediodía presenta una ligera disminución en el volumen, pero mantiene altos porcentajes de retrasos. Por la tarde, entre las 15:00 y 18:00, se observa otro período de alta actividad, con el pico máximo de salidas a las 18:00 (6.93 %). Durante estas horas, los retrasos se mantienen elevados, oscilando entre 44.51 % y 49.13 %. Hacia el final del día, a partir de las 19:00, aunque el volumen de salidas disminuye, se nota un incremento en el porcentaje de vuelos adelantados. Esta progresión diaria sugiere una correlación entre el volumen de tráfico y la puntualidad, donde los períodos de menor congestión en la madrugada y última hora del día favorecen las salidas adelantadas, mientras que las horas pico están asociadas a una mayor incidencia de retrasos.

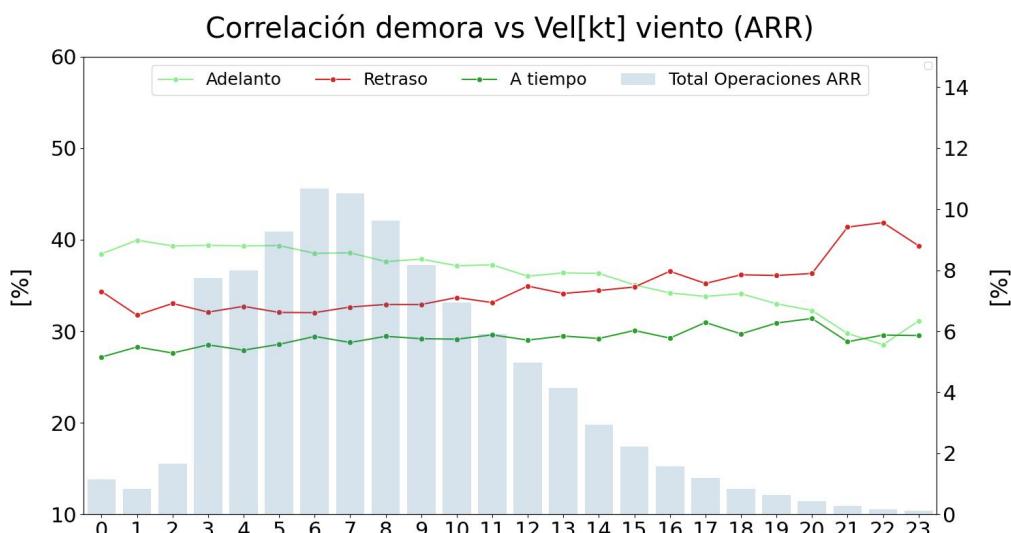
Comparando los datos de demoras en arribadas y salidas, se observan varias

tendencias y diferencias clave:

- **Puntualidad:** Las arribadas mantienen una puntualidad más estable a lo largo del día, oscilando entre 21.35 % y 33.39 %. En contraste, la puntualidad de las salidas varía más ampliamente, con un rango de 31.82 % a 62.23 %. Las salidas tienden a ser más puntuales en las horas de menor actividad, especialmente en la madrugada y primeras horas de la mañana.
- **Retrasos:** Las arribadas experimentan sus mayores retrasos hacia el final del día, con un pico de 42.76 % a las 21:00. Las salidas, por su parte, muestran retrasos más pronunciados durante las horas pico de actividad, alcanzando un máximo de 52.57 % a las 10:00 y manteniéndose elevados durante la tarde. Curiosamente, las salidas registran su mayor porcentaje de retrasos (54.69 %) a las 23:00, aunque con un volumen muy bajo de operaciones.
- **Adelantos:** Las arribadas presentan una clara tendencia a adelantarse en las primeras horas de la mañana, con un máximo de 55.64 % a las 05:00. En cambio, las salidas muestran sus mayores porcentajes de adelantos en dos períodos distintos: en la madrugada (49.02 % a las 00:00) y hacia el final del día (13.82 % a las 22:00), aunque con volúmenes de operación significativamente diferentes.
- **Franja crítica de máxima operatividad:** Para las arribadas, la franja crítica se concentra entre las 10:00 y 12:00, con un pico de 6.10 % del total de arribadas diarias a las 10:00. Las salidas, sin embargo, presentan dos franjas críticas: una por la mañana entre las 07:00 y 10:00, y otra por la tarde entre las 15:00 y 18:00, con el pico máximo de 7.16 % a las 10:00. Estas franjas de máxima operatividad coinciden con los períodos de mayor incidencia de retrasos.

### 5.3.8. Intensidad del viento frente a Demora

Respecto a la demora en arribada:



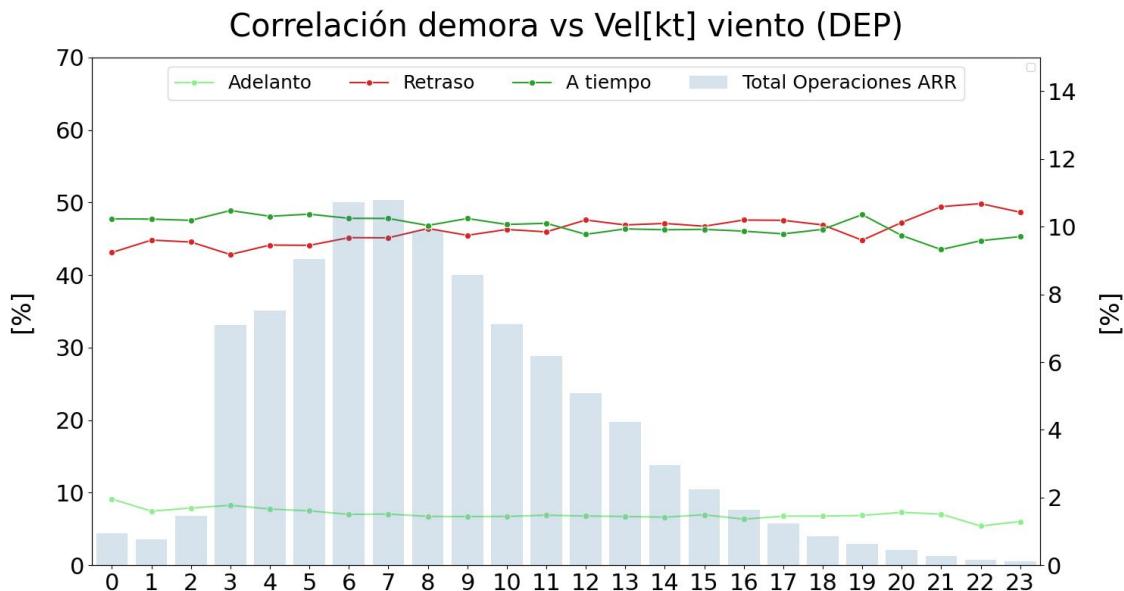
**Figura 5.17:** Correlación de la demora en arribada frente a la intensidad del viento

La intensidad del viento, medida en nudos (KT), también tiene un impacto significativo en la puntualidad de las arribadas de vuelos en el aeropuerto de Barcelona. En general, se observa que a medida que aumenta la velocidad del viento, la proporción de vuelos adelantados tiende a disminuir ligeramente, mientras que la proporción de retrasos y vuelos a tiempo presenta variaciones más complejas. Las velocidades de viento más comunes para las arribadas son 6 KT (10.68 %), 7 KT (10.52 %), y 8 KT (9.63 %). En estas velocidades, los porcentajes de adelantos son relativamente constantes, alrededor del 38-39 %, mientras que los retrasos y vuelos a tiempo no muestran tendencias claras.

- Adelantos más altos: 0 KT (38.46 %), 1 KT (39.95 %)
- Retrasos más altos: 22 KT (41.87 %), 21 KT (41.38 %)
- Vuelos a tiempo más altos: 20 KT (31.40 %), 23 KT (29.53 %)

Al comparar las diferentes intensidades de viento, se observa que los porcentajes de retrasos aumentan significativamente a partir de los 21 KT, alcanzando su punto máximo en 22 KT (41.87 %). En contraste, los adelantos son más frecuentes en velocidades de viento bajas, específicamente 0 KT (38.46 %) y 1 KT (39.95 %), sugiriendo que las condiciones de viento más calmadas favorecen la puntualidad o incluso adelantos en las arribadas. Los vuelos a tiempo son más frecuentes en velocidades de viento moderadas a altas, destacándose 20 KT (31.40 %) y 23 KT (29.53 %), lo cual podría indicar que las operaciones se ajustan mejor a las condiciones previstas bajo vientos más fuertes.

Respecto a la demora en despegue:



**Figura 5.18:** Correlación de la demora en despegue frente a la intensidad del viento

La intensidad del viento, medida en nudos (KT), también afecta considerablemente la puntualidad de los despegues en el aeropuerto de Barcelona. Se observa que, en

general, a medida que aumenta la velocidad del viento, los porcentajes de vuelos adelantados y a tiempo tienden a disminuir ligeramente, mientras que los retrasos muestran un patrón más variable. Las velocidades de viento más comunes para los despegues son 6 KT (10.73 %), 7 KT (10.78 %), y 8 KT (9.90 %). En estas velocidades, los porcentajes de adelantos son relativamente bajos, alrededor del 7-8 %, mientras que los retrasos y vuelos a tiempo varían más.

- Adelantos más altos: 0 KT (9.13 %), 3 KT (8.27 %)
- Retrasos más altos: 21 KT (49.43 %), 22 KT (49.85 %)
- Vuelos a tiempo más altos: 3 KT (48.90 %), 0 KT (47.75 %)

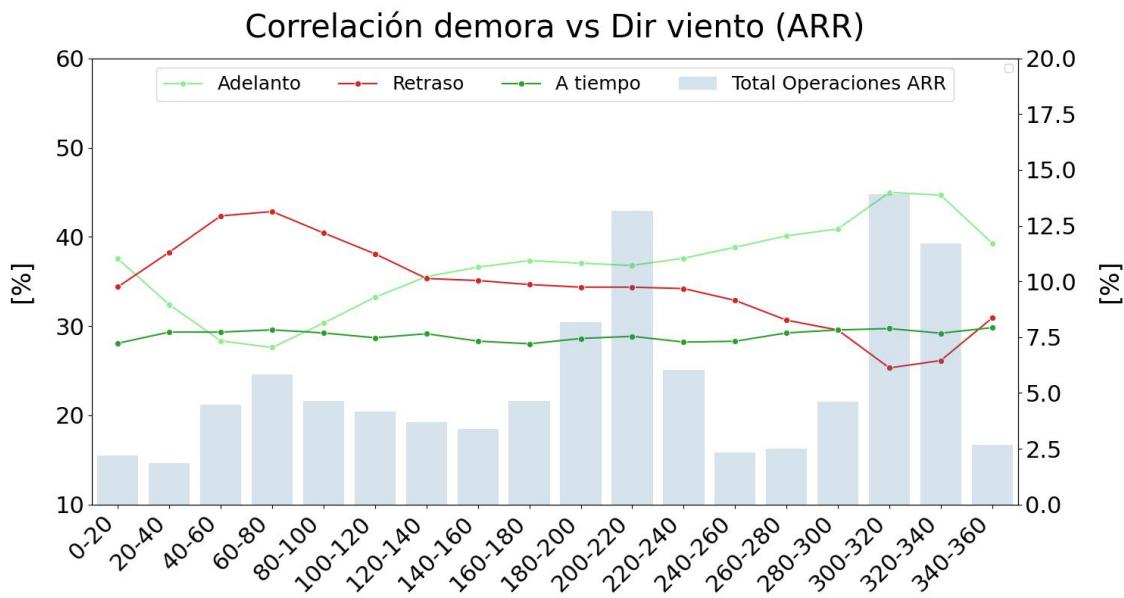
Al comparar los datos de arribadas y despegues, se observan similitudes y diferencias en la influencia de la velocidad del viento. En ambos casos, los vientos más comunes son 6 KT, 7 KT, y 8 KT, lo que refleja una consistencia en las condiciones del viento durante las operaciones del aeropuerto. Sin embargo, mientras que las arribadas tienden a presentar mayores porcentajes de adelantos en condiciones de viento calmo (0-1 KT), los despegues muestran mayores adelantos en condiciones de viento ligeramente más fuertes (0 KT y 3 KT). En cuanto a los retrasos, tanto arribadas como despegues experimentan sus picos más altos a velocidades de viento superiores a 20 KT, específicamente en 21 KT y 22 KT. Los vuelos a tiempo son más frecuentes en condiciones de viento moderado a calmo en ambas operaciones, aunque los despegues muestran un mayor porcentaje de vuelos a tiempo en condiciones de viento calmo (0 KT y 3 KT) en comparación con las arribadas.

- Similitudes: Velocidades de viento más comunes (6-8 KT), mayor porcentaje de retrasos a velocidades superiores a 20 KT.
- Diferencias: Adelantos más frecuentes en arribadas a velocidades de 0-1 KT, mientras que en despegues a 0 KT y 3 KT; mayor porcentaje de vuelos a tiempo en despegues en condiciones de viento calmo.

### 5.3.9. Dirección del viento frente a Demora

Respecto a la demora en arribada:

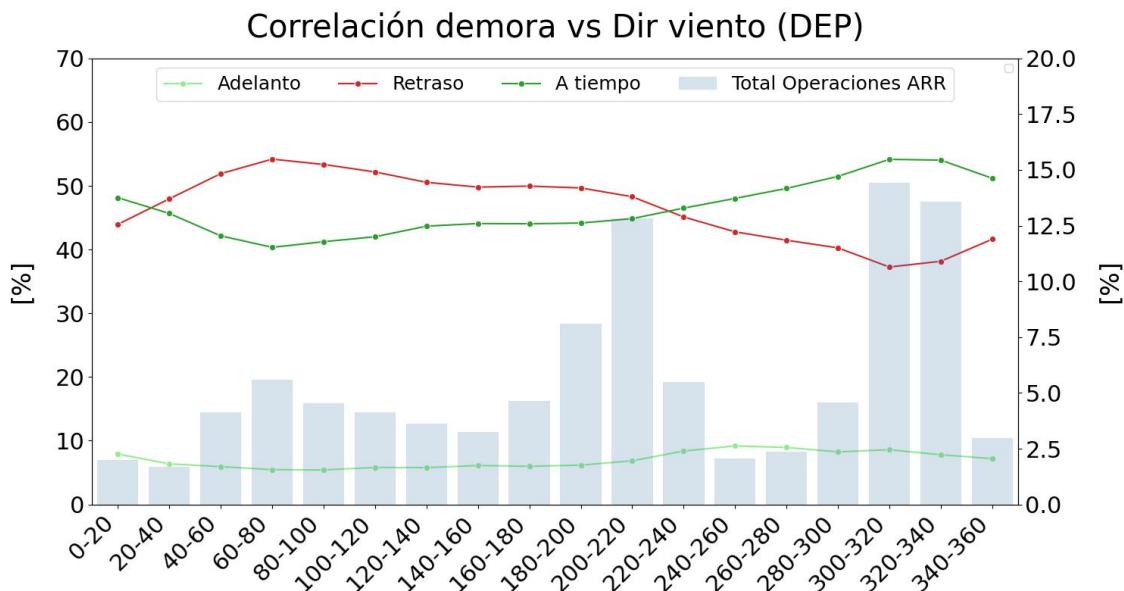
La dirección del viento tiene un impacto significativo en la puntualidad de los vuelos en el aeropuerto de Barcelona, cuyas pistas están orientadas en las direcciones 06 y 24. Las direcciones de viento con mayores porcentajes de retrasos son 40-60 (42.34 %) y 60-80 (42.83 %), lo que sugiere la presencia de vientos cruzados en estas direcciones, complicando las operaciones. Por otro lado, los mayores porcentajes de adelantos se observan en las direcciones 300-320 (44.98 %) y 320-340 (44.67 %), posiblemente debido a vientos en cola favorables. Las direcciones de viento más comunes son 200-220 (13.18 %) y 300-320 (13.92 %), lo que indica que estas son las más frequentadas y, aun así, mantienen una alta puntualidad. En resumen, las condiciones de viento cruzado tienden a aumentar los retrasos, mientras que los vientos en cola moderados pueden favorecer los adelantos.



**Figura 5.19:** Correlación de la demora en arribada frente a la dirección del viento

Retrasos más altos: 40-60 (42.34 %), 60-80 (42.83 %). Adelantos más altos: 300-320 (44.98 %), 320-340 (44.67 %). Direcciones de viento más comunes: 200-220 (13.18 %), 300-320 (13.92 %)

Respecto a la demora en despegue:



**Figura 5.20:** Correlación de la demora en despegue frente a la dirección del viento

La dirección del viento también influye significativamente en la puntualidad de las salidas de vuelos en el aeropuerto de Barcelona. Las direcciones de viento con mayores porcentajes de retrasos en las salidas son 60-80 (54.19 %) y 80-100 (53.36 %), lo cual indica posibles condiciones de viento cruzado que complican las operaciones

de despegue. En contraste, los mayores porcentajes de adelantos se encuentran en las direcciones 240-260 (9.18 %) y 260-280 (8.94 %), sugiriendo que estas condiciones de viento podrían facilitar los despegues más rápidos. Las direcciones de viento más comunes para despegues son 300-320 (14.44 %) y 320-340 (13.56 %), reflejando una preferencia por estas direcciones debido a su estabilidad y menor impacto negativo en la puntualidad.

Retrasos más altos: 60-80 (54.19 %), 80-100 (53.36 %). Adelantos más altos: 240-260 (9.18 %), 260-280 (8.94 %). Direcciones de viento más comunes: 300-320 (14.44 %), 320-340 (13.56 %)

Al comparar las estadísticas de arribadas y salidas en función de la dirección del viento, se observan tanto similitudes como diferencias significativas. En ambas operaciones, los vientos en las direcciones 300-320 y 320-340 son los más comunes, reflejando una preferencia operativa debido a su relativa estabilidad. Sin embargo, mientras que las arribadas presentan mayores porcentajes de adelantos con estos vientos, las salidas muestran altos porcentajes de vuelos a tiempo. En cuanto a los retrasos, las arribadas son más afectadas por vientos en las direcciones 40-60 y 60-80, mientras que las salidas tienen mayores retrasos en las direcciones 60-80 y 80-100, sugiriendo que los vientos cruzados impactan de manera similar pero no idéntica en ambas operaciones. Además, las direcciones que favorecen adelantos en arribadas (300-320 y 320-340) no coinciden con las direcciones que favorecen adelantos en salidas (240-260 y 260-280), indicando diferencias en cómo las condiciones del viento afectan los distintos momentos de las operaciones aeroportuarias.

- Similitudes: direcciones de viento más comunes (300-320 y 320-340), impacto de vientos cruzados en retrasos.
- Diferencias: direcciones que favorecen adelantos, mayor porcentaje de vuelos a tiempo en salidas.

# 6

## Conclusiones

### Índice

---

6.1. Introducción . . . . .	83
6.2. Conclusiones sobre la ingestión de datos . . . . .	84
6.3. Conclusiones del Análisis Exploratorio . . . . .	85
6.4. Conclusiones del estudio de la demanda . . . . .	86
6.5. Conclusiones del estudio de escalas . . . . .	87
6.6. Conclusiones del estudio de correlaciones . . . . .	88
6.7. Conclusiones Generales . . . . .	89

---

### 6.1. Introducción

El presente estudio ha abordado un análisis exhaustivo de las operaciones aéreas en el aeropuerto de Barcelona-El Prat (LEBL), con el objetivo de proporcionar una comprensión profunda y multidimensional de su funcionamiento.

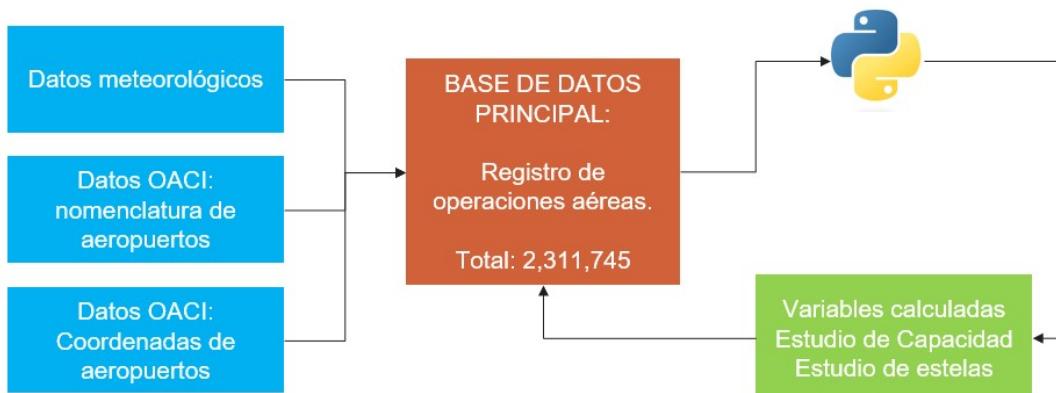
Esta sección presenta las conclusiones generales derivadas de los diferentes análisis realizados, ofreciendo una visión integrada de los hallazgos más significativos y su relevancia para la gestión y optimización de las operaciones en LEBL. Estas conclusiones no solo reflejan el cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados, sino que también revelan insights valiosos que pueden contribuir significativamente a la mejora de la eficiencia operativa y la toma de decisiones estratégicas en el ámbito aeroportuario.

## 6.2. Conclusiones sobre la ingesta de datos

Este trabajo ha alcanzado con éxito uno de sus objetivos principales, la unificación de múltiples bases de datos heterogéneas y la ingesta de millones de filas de datos relacionados con operaciones aéreas. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia del enfoque adoptado:

- 1. Unificación exitosa:** Se ha logrado integrar eficientemente la base de datos principal del aeropuerto de Barcelona con múltiples fuentes de datos complementarias:

- Datos meteorológicos, incluyendo velocidad y dirección del viento.
- Coordenadas OACI de los aeropuertos de origen y destino.
- Coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cada aeropuerto.
- Información sobre la categoría de estela turbulenta de las aeronaves.



**Figura 6.1:** Diagrama de flujo de las bases de datos

- 2. Manejo eficiente de datos masivos:** El uso de Python y la biblioteca Pandas ha permitido procesar y unificar 2,311,745 registros iniciales, manteniendo la integridad de los datos sin duplicaciones significativas.
- 3. Enriquecimiento sustancial de datos:** La fusión de diversas fuentes ha resultado en un conjunto de datos significativamente más rico y completo, proporcionando una base sólida para análisis futuros más profundos y precisos.
- 4. Generación de nuevas variables:** El procesamiento avanzado de la información ingestada ha permitido la creación de nuevas variables cruciales para los estudios de Capacidad y Escalas, ampliando el potencial analítico del conjunto de datos.
- 5. Establecimiento de una base robusta para análisis futuros:** La unificación y enriquecimiento de los datos han sentado las bases para una comprensión más completa y multidimensional de las operaciones aeroportuarias.

En conclusión, este trabajo no solo ha cumplido su objetivo inicial, sino que ha superado las expectativas al proporcionar un conjunto de datos unificado, enriquecido y preparado para impulsar mejoras significativas en la gestión y operación del aeropuerto de Barcelona. El éxito de este proceso de ingesta y unificación de datos masivos abre nuevas posibilidades para la optimización de procesos y la toma de decisiones estratégicas en el ámbito aeroportuario.

### 6.3. Conclusiones del Análisis Exploratorio

El análisis exploratorio realizado sobre las operaciones aéreas en el aeropuerto de Barcelona (LEBL) ha proporcionado valiosas percepciones sobre la naturaleza y características de los vuelos. Las principales conclusiones que se pueden extraer son:

1. **Condiciones meteorológicas favorables:** El estudio de la velocidad del viento revela que aproximadamente el 76 % de las operaciones se realizan en condiciones de viento en calma o ligero, lo que indica un entorno generalmente favorable para las operaciones aéreas en LEBL.
2. **Predominio de vuelos comerciales regulares:** El análisis muestra que el 99.04 % de las operaciones son de tipo comercial, y el 93.04 % son vuelos regulares. Esto sugiere una alta previsibilidad y estabilidad en las operaciones del aeropuerto.
3. **Distribución geográfica de vuelos:** La mayoría de las operaciones (79.76 %) se concentran en vuelos nacionales y dentro del espacio Schengen, lo que indica una fuerte conectividad regional y europea.
4. **Predominio de aeronaves de tamaño medio:** El 95.98 % de las operaciones involucran aeronaves de categoría Medium (M) según la clasificación de estela turbulenta, lo que sugiere una optimización para rutas de corto y medio alcance.
5. **Alta eficiencia en la ocupación:** El análisis del ratio de ocupación muestra que aproximadamente el 75 % de los vuelos operan con una ocupación entre el 60 % y el 100 %, indicando una gestión eficiente de la capacidad por parte de las aerolíneas.
6. **Conexiones clave:** El estudio de los city pairs revela que las rutas más frecuentes son domésticas (Madrid, Palma de Mallorca) y europeas (París, Amsterdam), reflejando la importancia de LEBL como hub regional y turístico.
7. **Estacionalidad marcada:** Se observa una clara variación estacional en el número de operaciones, con picos durante los meses de verano, lo que subraya la influencia del turismo en la actividad del aeropuerto.

Estas conclusiones proporcionan una base sólida para comprender las dinámicas operativas del aeropuerto de Barcelona. La predominancia de vuelos comerciales regulares de medio alcance, junto con la alta eficiencia en la ocupación y las condiciones meteorológicas generalmente favorables, sugieren un entorno operativo estable y predecible. Sin embargo, la marcada estacionalidad y la concentración

en ciertas rutas indican áreas donde la gestión de la capacidad y la planificación estratégica son cruciales.

El análisis realizado sienta las bases para futuros estudios más detallados y para la toma de decisiones informadas en áreas como la gestión de la capacidad aeroportuaria, la planificación de rutas y la optimización de recursos. Además, proporciona un contexto valioso para entender cómo factores como la meteorología, los tipos de aeronaves y los patrones de demanda interactúan en el complejo ecosistema de las operaciones aeroportuarias en Barcelona.

## 6.4. Conclusiones del estudio de la demanda

El análisis exhaustivo de la demanda en el aeropuerto de LEBL ha permitido alcanzar el objetivo principal de este estudio, proporcionando una visión detallada y cuantitativa de los patrones operativos y la capacidad aeroportuaria. Las principales conclusiones son:

1. **Capacidad y evolución operativa:** Se ha confirmado la capacidad declarada del aeropuerto de 38 aterrizajes y 40 despegues por hora. El estudio revela un incremento sostenido en las operaciones diarias, alcanzando cerca de 900 en 2016, lo que indica un crecimiento significativo en la demanda de servicios aéreos.
2. **Estacionalidad marcada:** Se ha identificado una variación estacional pronunciada, con una diferencia de hasta un 25 % en la media de operaciones entre los meses de verano e invierno. Esta información es crucial para la planificación de recursos y la gestión de la capacidad aeroportuaria.
3. **Distribución horaria de operaciones:** El análisis revela que la media de Aeronaves Hora Media (AHM) oscila entre 26 y 34, con variaciones significativas según la hora del día. Se han identificado dos períodos pico (08:00-10:00 y 16:00-18:00) donde las operaciones superan las 40 por hora, aproximándose a la capacidad máxima declarada.
4. **Precisión en la previsión de demanda:** El estudio comparativo entre la demanda real y la prevista demuestra una alta precisión en las estimaciones. En el 80 % de los períodos analizados, la variación entre la demanda prevista y real se situó en un intervalo de  $\pm 4$  aeronaves, lo que indica una planificación eficiente de las operaciones.
5. **Diferenciación entre arribadas y despegues:** Se ha observado una ligera tendencia a subestimar la capacidad de despegues y sobreestimar la de arribadas en las previsiones, información valiosa para ajustar los modelos predictivos.

En conclusión, este estudio ha logrado proporcionar una caracterización detallada de la demanda aeroportuaria en LEBL, ofreciendo insights valiosos sobre patrones operativos, capacidad real y precisión de las previsiones. Estos resultados constituyen

una base sólida para la optimización de la gestión aeroportuaria, la planificación de recursos y el desarrollo de estrategias para manejar los períodos de alta demanda, contribuyendo así a la mejora continua de la eficiencia operativa del aeropuerto.

## 6.5. Conclusiones del estudio de escalas

El análisis exhaustivo de las escalas aeroportuarias en el Aeropuerto de Barcelona-El Prat (LEBL) ha cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados al inicio de este estudio:

- Se ha definido y aplicado con éxito el concepto de "código de aeronaves", permitiendo un análisis detallado de las secuencias de llegada y salida de las aeronaves.
- Se ha logrado categorizar las escalas en dos tipologías principales: "Point to Point" y "Hub and Spoke", revelando que LEBL tiene una ligera inclinación hacia operaciones "Point to Point" (54.79 % vs 45.21 %).
- Se ha realizado un análisis pormenorizado de las operaciones por aerolínea, identificando patrones específicos para las principales compañías que operan en LEBL.
- Se ha establecido una correlación clara entre el tiempo de escala y las demoras experimentadas en las fases de llegada y salida, cumpliendo uno de los objetivos principales del estudio.
- Se han identificado umbrales críticos de demora y tiempo de escala que influyen significativamente en la probabilidad de experimentar demoras subsecuentes.

Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para la optimización de las operaciones aeroportuarias:

- Se ha determinado que tiempos de escala más prolongados (superiores a 100 minutos) favorecen la absorción de demoras iniciales.
- Se ha cuantificado que por cada 3 minutos de demora en la llegada, se requiere un incremento de aproximadamente 40 minutos en el tiempo de escala para recuperar dicha demora.
- Se ha observado que las demoras en la llegada superiores a 20 minutos tienen una mayor probabilidad de propagarse a la fase de salida.

Estas conclusiones no solo cumplen con los objetivos iniciales del estudio, sino que también proporcionan una base sólida para la toma de decisiones en la gestión de operaciones aeroportuarias y la planificación de vuelos. El análisis realizado contribuye significativamente a la comprensión de la dinámica de las escalas en LEBL y ofrece insights valiosos para la mejora de la eficiencia operativa del aeropuerto.

## 6.6. Conclusiones del estudio de correlaciones

El presente estudio ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de las correlaciones entre diversos factores operativos y meteorológicos, y su impacto en las demoras de las operaciones aeroportuarias. Este enfoque multifactorial ha permitido identificar patrones significativos y relaciones complejas que influyen en la puntualidad de las arribadas y salidas en el aeropuerto de Barcelona.

Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para la comprensión de los factores que afectan la eficiencia operativa del aeropuerto, ofreciendo insights valiosos para la optimización de la gestión aeroportuaria y la mejora de la experiencia del pasajero. A continuación, se presentan las conclusiones principales, organizadas por categorías de análisis:

- **Compañías aéreas:** EasyJet muestra el mayor porcentaje de vuelos adelantados en arribadas (51.59 %) y salidas. Iberia presenta la mayor puntualidad, con el mayor porcentaje de vuelos a tiempo en arribadas (39.35 %) y salidas (60.19 %). Vueling y Spanair exhiben consistentemente altos porcentajes de retrasos en ambas fases operativas.
- **Tipología de vuelo:** Los vuelos con escala muestran una ligera ventaja en puntualidad de arribadas (48.58 % a tiempo) frente a los vuelos de ida y vuelta (46.56 %). En salidas, los vuelos de ida y vuelta presentan un mayor porcentaje de adelantos (40.47 %) comparado con los vuelos con escala (34.67 %).
- **Operaciones Schengen vs. No Schengen:** Los vuelos nacionales muestran mayor puntualidad, especialmente en salidas (52.41 % a tiempo). Los vuelos No Schengen presentan mayor incidencia de retrasos (51.96 % en arribadas). Vuelos Schengen mantienen un desempeño intermedio en puntualidad. Todas las categorías exhiben mejor puntualidad en salidas que en arribadas.
- **Categoría de estela:** La categoría M domina con el 96.05 % de las operaciones en ambas fases. La categoría H muestra mayor variabilidad: 41.98 % de adelantos en arribadas pero solo 9.51 % en salidas.
- **Ratio de ocupación:** Mayor ratio de ocupación correlaciona con aumento de retrasos y disminución de adelantos. Ocupaciones entre 80-100 % muestran los mayores porcentajes de retrasos (hasta 55.10 % en salidas para 90-100 % de ocupación).
- **Estacionalidad:** Los meses de verano (julio y agosto) presentan los mayores porcentajes de vuelos retrasados. Julio muestra un 42.23 % de arribadas retrasadas y un 59.11 % de salidas retrasadas. Los meses de invierno tienden a tener más vuelos adelantados.
- **Hora del día.** La madrugada (00:00-04:00) muestra mayor irregularidad en puntualidad. Los picos de tráfico (10:00-12:00 y 15:00-18:00) correlacionan con disminución en puntualidad. A partir de las 21:00, se observa una tendencia hacia mayores retrasos.

- **Intensidad del viento.** Las velocidades más comunes oscilan entre 6-8 KT (aprox 30 % de operaciones). Vientos superiores a 20 KT aumentan significativamente los retrasos (41.87 % en arribadas y 49.85 % en salidas para 22 KT).
- **Dirección del viento.** Vientos entre 40-80° causan los mayores retrasos en ambas fases operativas. Direcciones 300-340° son las más comunes y mantienen buena puntualidad (hasta 44.98 % de adelantos en arribadas).

## 6.7. Conclusiones Generales

El presente estudio sobre las operaciones aéreas en el aeropuerto de Barcelona (LEBL) ha alcanzado con éxito sus objetivos principales, proporcionando una visión integral y detallada de la dinámica operativa de esta importante infraestructura. A través de un riguroso proceso de unificación e ingestión de datos masivos, se ha logrado crear una base de información sólida y enriquecida, que ha permitido análisis profundos en múltiples aspectos de las operaciones aeroportuarias. Este trabajo no solo ha cumplido las expectativas iniciales, sino que las ha superado, ofreciendo insights valiosos sobre la capacidad, demanda, patrones de vuelo y factores que influyen en la puntualidad de las operaciones.

Los resultados obtenidos han proporcionado una caracterización detallada de LEBL, desde sus patrones de tráfico y estacionalidad hasta la eficiencia en la gestión de escalas y la influencia de diversos factores en las demoras. El estudio ha demostrado la precisión de las previsiones de demanda del aeropuerto y ha identificado áreas clave para la optimización de recursos y la mejora de la eficiencia operativa. Estos hallazgos constituyen una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en la gestión aeroportuaria, ofreciendo oportunidades significativas para mejorar la experiencia de los pasajeros y la eficacia de las operaciones. En última instancia, este trabajo sienta las bases para futuros estudios y desarrollos que podrían llevar a importantes avances en la gestión y planificación aeroportuaria, contribuyendo así al crecimiento sostenible y la excelencia operativa de LEBL.



# 7

## Trabajo Futuro

### Índice

---

7.1. Introducción . . . . .	91
7.2. Líneas de desarrollo. . . . .	91

---

### 7.1. Introducción

El presente estudio ha establecido una base sólida para el análisis de las operaciones aéreas en el aeropuerto de Barcelona-El Prat (LEBL), proporcionando un conjunto de datos limpio, unificado y enriquecido. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones más avanzadas, particularmente en el campo del aprendizaje automático y la inteligencia artificial. A continuación, se proponen líneas de investigación futuras que podrían aprovechar significativamente el trabajo realizado:

### 7.2. Líneas de desarrollo.

- Desarrollo de una Red Neuronal para Predicción de Demoras. Una de las aplicaciones más prometedoras del machine learning en el contexto aeroportuario es la predicción precisa de demoras. Se propone el desarrollo de una red neuronal que utilice los datos procesados en este estudio para predecir retrasos en las operaciones.
- Implementación de Algoritmos de Aprendizaje Profundo para Optimización de Recursos. El aprendizaje profundo ofrece oportunidades significativas para optimizar la asignación de recursos aeroportuarios. Se propone desarrollar

modelos que puedan Predecir la demanda de pasajeros y carga en diferentes períodos, permitiendo una asignación más eficiente de personal y equipamiento.

- Desarrollo de un Sistema de Recomendación para la Gestión de Escalas. Aprovechando los insights obtenidos en el análisis de escalas, se propone crear un sistema de recomendación basado en machine learning que pueda: Sugerir tiempos óptimos de escala basados en factores como tipo de aeronave, ruta, ocupación y condiciones operativas, Predecir la probabilidad de que una escala se extienda más allá del tiempo programado y recomendar acciones preventivas y Optimizar la secuencia de operaciones de tierra durante las escalas para minimizar retrasos.
- Creación de un Sistema de Monitoreo en Tiempo Real. Finalmente, se propone desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real que integre todas las predicciones y recomendaciones generadas por los modelos de machine learning. Este sistema podría: Proporcionar un dashboard interactivo para la toma de decisiones operativas en tiempo real, Implementar alertas predictivas para potenciales disruptpciones en las operaciones, Facilitar la simulación de escenarios para la planificación estratégica a largo plazo.

La implementación de estas líneas de investigación futuras tiene el potencial de transformar significativamente la gestión operativa del aeropuerto de Barcelona-El Prat, llevando la eficiencia y la experiencia del pasajero a nuevos niveles. El trabajo realizado en este estudio proporciona la base de datos y los insights necesarios para hacer realidad estas aplicaciones avanzadas de machine learning en el contexto aeroportuario.

## References

- [1] Min Chen, Shiwen Mao y Yunhao Liu. «Big Data: Related Technologies, Challenges and Future Prospects». En: *Springer* 1.2 (2014), págs. 89-93.
- [2] *Web de descarga python*. Python. URL: <https://www.python.org/> (visitado 02-06-2024).
- [3] *Librería de procesado de datos NumPy*. NumPy. URL: <https://numpy.org/> (visitado 15-06-2024).
- [4] *Librería "machine Learning"scikit-learn*. scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (visitado 15-06-2024).
- [5] *Librería graficado Matplotlib*. Python. URL: <https://matplotlib.org/stable/index.html> (visitado 02-06-2024).
- [6] *Librería graficado Seaborn*. Seaborn. URL: <https://seaborn.pydata.org/examples/index.html> (visitado 02-06-2024).
- [7] *SESAR Joint Undertaking*. OACI. URL: <https://www.sesarju.eu/> (visitado 15-06-2024).
- [8] *Datos negocio LEBL*. AENA. URL: <https://www.aena.es/es/aerolineas/aeropuertos-y-destinos/nuestros-aeropuertos/josep-tarradellas-barcelona-el-prat.html#:~:text=Barcelona%2DEl%20Prat%20es%20el,de%20aeropuertos%20europeos%20m%C3%A1s%20transitados.> (visitado 02-06-2024).
- [9] *Referencia WEB AIP aplicado a LEBL*. ENAIRE. URL: <https://aip.enaire.es/AIP/#LEBL> (visitado 02-04-2024).
- [10] *Referencia WEB INSIGNIA*. ENAIRE. URL: <https://insignia.enaire.es/> (visitado 02-04-2024).
- [11] *Tipología de pistas*. ivao. URL: <https://es.ivao.aero/atc/procedimientos/separaciones/aerodromo> (visitado 02-06-2024).
- [12] *Plan director Aeropuerto Barcelona*. OACI. URL: [https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/pdf/8D5C86BB-202B-4E53-A879-8EDDE47F862A/54114/Evolucion\\_aeropuerto.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/pdf/8D5C86BB-202B-4E53-A879-8EDDE47F862A/54114/Evolucion_aeropuerto.pdf) (visitado 15-06-2024).
- [13] *Afección del viento en operaciones aeroportuarias*. ivao. URL: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2011/AGAASEROSTUDIES/Presentacion%203%20-%20Aterrizajes%20y%20Despegues.pdf> (visitado 02-06-2024).
- [14] *Web con registro METARS LEBL*. METAR TAF. URL: <https://metar-taf.com/es/LEBL> (visitado 02-06-2024).
- [15] *Descripción del contenido de un fichero METAR*. METAR TAF. URL: <https://metar-taf.com/es/explanation> (visitado 02-06-2024).

- [16] *Manual de Práctica Meteorológica Aeronáutica de la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO)*. OACI. URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2506.pdf> (visitado 15-06-2024).
- [17] ENAIRE. «PROCEDIMIENTOS SUPLEMENTARIOS REGIONALES». En: *AIP* (feb. de 2022), pág. 10. URL: [https://aip.enaire.es/aip/contenido\\_AIP/ENR/LE\\_ENR\\_1\\_13\\_en.pdf](https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/ENR/LE_ENR_1_13_en.pdf) (visitado 06-01-2024).
- [18] *Descripción de regulación aérea*. AESA. URL: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/espacio-aereo/descripcion> (visitado 02-04-2024).
- [19] *Modelos Hub and Spoke*. HowStuffWorks. URL: <https://science.howstuffworks.com/transport/flight/modern/airline3.htm> (visitado 02-06-2024).