



Carrera  
Ingeniería Civil Aeroespacial  
Universidad de Concepción

# **Evaluación de mantenimiento, reparación y overhaul (MRO) en operaciones aéreas de aeronaves comerciales wide-body a través de modelado, visualización y análisis de datos de aerolíneas**

**Bertila Gisela Velásquez Cárdenas**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de  
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesor guía:  
Dr. Ing. Alejandro López Telgie

Agosto 2025  
Concepción, Chile

©2025 Bertila Gisela Velásquez Cárdenas  
Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento,  
incluyendo la cita bibliográfica del documento

## **Agradecimientos**

*La finalización de este trabajo considera años de esfuerzo, aprendizaje y crecimiento personal. Este logro no habría sido posible sin el apoyo, compañía y orientación de quienes estuvieron junto a mí en este camino.*

*En primer lugar, agradezco profundamente a mis padres, por su amor incondicional y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Su paciencia y palabras de ánimo fueron un pilar fundamental para cumplir con este largo proceso. Este logro también va dedicado para ustedes.*

*A esto quiero sumar a mi hermano, quien siempre estuvo presente, preocupándose de mi bienestar y acompañándome a la distancia en los momentos más exigentes de este camino. Tu presencia, apoyo y cercanía son un recordatorio de que siempre estarás cuando más lo necesite.*

*A mi pareja, por su paciencia, comprensión y por acompañarme en cada etapa, alentándome en momentos difíciles con palabras de aliento cuando las cosas no salían como lo esperaba. Tu apoyo ha sido esencial para mantener el enfoque y la motivación.*

*También quiero expresar mi gratitud a los profesores que me apoyaron durante la carrera, en especial a Alejandro López y Carlos Navarrete, por su disposición, orientación y confianza durante el desarrollo de este proyecto. Su aporte ha sido clave tanto en mi formación profesional como en mi crecimiento personal.*

*Finalmente, agradezco a todas las personas que, aunque no estén directamente mencionados, aportaron con gestos, palabras o acciones que me ayudaron a avanzar y mantenerme firme hasta el final. A todos, muchas gracias.*

## Resumen

En un escenario de creciente complejidad operacional y expansión del transporte aéreo comercial, la gestión de los procesos de mantenimiento, reparación y overhaul (MRO), impacta directamente la eficiencia y disponibilidad de las flotas. Frente a la problemática que los esfuerzos de mantenimiento siguen siendo mayoritariamente, generando interrupciones operativas y pérdidas económicas a las aerolíneas, el siguiente trabajo plantea como objetivo desarrollar una herramienta analítica que permita caracterizar el comportamiento operacional de la flota *wide-body* de LATAM Airlines Chile, específicamente de los modelos Boeing 787-8 y 787-9 a partir de datos de fuentes abiertas.

Lo anterior busca identificar comportamientos anómalos de forma temprana, los que puedan ser atribuidos a posibles eventos MRO, mediante la integración de análisis de datos, modelado y visualización interactiva. Para ello, se recopilan registros operacionales mediante la API (licencia *Explorer*) de Flightradar24, específicamente operaciones de los meses de marzo, abril y mayo de 2025 en respuesta a las limitaciones que impone la fuente.

Los datos obtenidos son sometidos a un proceso de depuración para asegurar su integridad y trazabilidad, los que luego son analizados utilizando el modelo K-Means basado en dos variables: el tiempo de vuelo (*Flight Time*) y el tiempo de rotación en tierra de las aeronaves (*Turnaround Time – TAT*). El modelo permite clasificar los vuelos en distintas categorías operacionales, incluyendo eventos críticos compatibles con MRO, en base a expectativas operacionales predefinidas para las flotas.

Los resultados del modelo son integrados en un dashboard interactivo desarrollado con Streamlit (Python), orientado a apoyar el análisis operacional de la flota, al visualizar y explorar dinámicamente estos. La interfaz se estructura en tres módulos: una ventana principal enfocada al rendimiento general de la flota y eventos críticos; un análisis general que destaca rutas de alta ocurrencia anómala y aeronaves de alto impacto; y un módulo de análisis individual que detalla el desempeño por matrícula y sus patrones de vuelo.

Los principales hallazgos con la herramienta incluyen la identificación de eventos operacionales críticos como aeronaves y rutas con un alto índice de operaciones anómalas. Entre ellas, destacan las aeronaves CC-BBH (787-8), CC-BGL y CC-BGK (787-9) y las rutas São Carlos – Santiago y Madrid – Abu Dabi, ambas caracterizadas por detenciones prolongadas, que según información recopilada se asocian a diferentes eventos MRO, lo cual, al ser validado con conocimiento experto se determina como MRO programado.

En definitiva, la herramienta transforma datos operacionales en visualizaciones que permiten detectar de forma temprana anomalías operacionales y eventos de mantenimiento. Esto facilita priorizar y planificar intervenciones con mayor eficiencia, optimizando la disponibilidad de la flota y reduciendo tiempos improductivos. Además, su interfaz modular apoya el análisis a nivel de flota e individual, y permite la integración futura de datos internos que superen limitaciones actuales, potenciando su precisión, confiabilidad y promoviendo decisiones basadas en evidencia.

## Abstract

In a scenario of increasing operational complexity and the continued expansion of commercial air transport, the management of Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) processes directly impact fleet efficiency and availability. Since maintenance efforts remain largely reactive, this results in operational disruptions and economic losses for airlines. This project aims to develop an analytical tool to characterize the operational behavior of LATAM Airlines Chile's wide-body fleet, specifically the Boeing 787-8 and 787-9 models, using open-source data.

The objective is to enable early identification of anomalous behaviors that could be attributed to potential MRO events, through the integration of data analysis, modeling, and interactive visualization. To achieve this, operational records are collected via the Flightradar24 API (Explorer license), focusing on flight operations during March, April, and May 2025, as limited by the data source.

The data collected undergoes a cleaning process to ensure integrity and traceability, after which it is analyzed using a K-Means clustering model based on two variables: flight time and aircraft turnaround time (TAT). This model classifies flights into different operational categories, including critical events compatible with MRO, based on predefined operational expectations for the fleet.

The results of the model are integrated into an interactive dashboard developed with Streamlit (Python), aimed at supporting fleet operational analysis through dynamic data visualization and exploration. The interface is structured into three modules: a main window focused on overall fleet performance and critical events; a general analysis module highlighting routes with high anomalous occurrence and high-impact aircraft; and an individual analysis module detailing aircraft performance by registration number and associated flight patterns.

The main findings obtained with the tool include the identification of critical operational events, such as aircraft and routes with a high rate of anomalous operations. Among them, the aircraft CC-BBH (787-8), CC-BGL, and CC-BGK (787-9), as well as the São Carlos – Santiago and Madrid – Abu Dhabi routes, stand out. Both routes are characterized by prolonged ground time which, according to the information gathered, is associated with different MRO events that, when validated with expert knowledge, were determined to be scheduled MRO.

In summary, the tool transforms operational data into visualizations that enable the early detection of operational anomalies and maintenance events. This facilitates the prioritization and planning of interventions more efficiently, optimizing fleet availability and reducing downtime. Furthermore, its modular interface supports both fleet-level and individual analysis, and allows for the future integration of internal data to overcome current limitations, thereby enhancing its accuracy and reliability while promoting evidence-based decision-making.

# Contenidos

<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>1</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>2</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>5</b>
1.1 Contexto .....	5
1.2 Hipótesis .....	6
1.3 Objetivos .....	6
1.3.1 Objetivos específicos .....	6
<b>2 Marco teórico</b> .....	<b>8</b>
2.1 Concepto de MRO (Maintenance, Repair and Overhaul) en la aviación comercial .....	8
2.2 Tipos de mantenimiento en la aviación comercial .....	8
2.2.1 Clasificación por enfoque funcional .....	9
2.2.2 Clasificación por nivel de infraestructura y/o frecuencia operativa.....	10
2.3 Estándar de operaciones para aeronaves wide-body .....	12
2.4 Modelo K-Means de detección de anomalías .....	13
<b>3 Metodología</b> .....	<b>14</b>
3.1 Selección de la flota y definición del objeto de estudio.....	15
3.2 Recolección de datos operacionales .....	15
3.3 Limitaciones de los datos y preprocesamiento.....	18
3.3.1 Restricciones de la fuente .....	18
3.3.2 Limpieza y preparación de datos.....	18
3.4 Desarrollo del modelo MRO para detección de anomalías operacionales ..	19
3.5 Desarrollo del entorno de visualización interactiva (dashboards).....	20
3.6 Lógica para la detección de patrones anómalos.....	21
3.6.1 Evaluación de criticidad por aeronaves .....	21
3.6.2 Evaluación de criticidad por ruta.....	22
3.6.3 Clasificación del nivel de riesgo operacional.....	22
<b>4 Resultados y análisis</b> .....	<b>24</b>
4.1 Modelo para análisis MRO .....	24
4.1.1 Resultados del modelo de detección de anomalías B787-8 .....	24
4.1.2 Resultados del modelo de detección de anomalías B787-9 .....	25
4.2 Dashboard de análisis de operaciones .....	26
4.2.1 Ventana principal .....	26

4.2.2	Análisis general de operaciones .....	27
4.2.3	Análisis por aeronave.....	28
<b>4.3</b>	<b>Detección de comportamientos anómalos .....</b>	<b>30</b>
4.3.1	Operaciones Boeing 787-8.....	30
4.3.2	Operaciones Boeing 787-9.....	39
4.3.3	Análisis general.....	47
4.3.4	Validación del modelo con conocimiento experto.....	48
<b>5</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>50</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>51</b>

## Lista de Figuras

Figura 1: Turnaround time diario por avión dependiendo del número de asientos (Hernández, 2024).....	13
Figura 2: Esquema metodológico.....	15
Figura 3: Clústeres flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025).....	24
Figura 4: Clústeres flota 787-9 (periodo Marzo – Mayo 2025).....	25
Figura 5: Dashboard principal según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 1).....	27
Figura 6: Dashboard principal según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 2).....	27
Figura 7: Ventana de análisis general de operaciones según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 1).....	28
Figura 8: Ventana de análisis general de operaciones según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 2).....	28
Figura 9: Ventana de análisis por aeronave (CC-BBB Boeing 787-8), según periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 1). ....	29
Figura 10: Ventana de análisis por aeronave (CC-BBB Boeing 787-8), según periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 2). ....	30
Figura 11: Distribución diaria de vuelos por clasificación flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025). ....	31
Figura 12: Disponibilidad diaria flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025). ....	31
Figura 13: Actividad operacional por aeronave flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025). ....	32
Figura 14: Mapa rutas críticas flota 787-8. ....	33
Figura 15: Comparación TAT CC-BBH vs flota. ....	35
Figura 16: Actividad operativa CC-BBH. ....	35
Figura 17: Actividad operativa CC-BBI. ....	36
Figura 18: Actividad operativa CC-BBB.....	37
Figura 19: Vuelos no identificado CC-BBB.....	37
Figura 20: Actividad operativa CC-BBE.....	38
Figura 21: Actividad operativa aeronave VT-ANB (Air India). ....	39
Figura 22: Actividad operativa CC-BBC. ....	39
Figura 23: Distribución diaria de vuelos por clasificación flota 787-9.....	40
Figura 24: Distribución vuelos flota 787-9. ....	40
Figura 25: Disponibilidad diaria flota 787-9. ....	41
Figura 26: Actividad operacional por aeronave flota 787-9.....	41
Figura 27: Mapa rutas críticas flota 787-9.....	42
Figura 28: Comparación TAT CC-BGK vs flota.....	44
Figura 29: Actividad operativa CC-BGK. ....	44
Figura 30: Actividad operativa CC-BGL.....	45
Figura 31: Actividad operativa CC-BGF.....	46
Figura 32: Actividad operativa CC-BGH.....	46

# Lista de Tablas

- Tabla 1: Costos suscripciones en Flightradar24..... 16
- Tabla 2: Variables principales "params"..... 16
- Tabla 3: Variables críticas. .... 17
- Tabla 4: Datos extraídos y procesados desde Flightradar24 sobre vuelos Boeing B789.. 17
- Tabla 5: Límites de clasificaciones para modelo K-Means. .... 20
- Tabla 6: Métricas para evaluar criticidad de aeronaves..... 22
- Tabla 7: Métricas para evaluar criticidad de rutas..... 22
- Tabla 8: Clasificación de aeronaves según porcentaje de anomalías y eventos..... 23
- Tabla 9: Clasificación de clústeres operacionales Boeing 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025). .... 25
- Tabla 10: Clasificación de clústeres operacionales Boeing 787-9 (periodo Marzo – Mayo 2025). .... 26
- Tabla 11: TOP 5 rutas críticas flota 787-8..... 34
- Tabla 12: TOP 5 aeronaves críticas flota 787-8..... 34
- Tabla 13: TOP 5 rutas críticas flota 787-9. .... 43
- Tabla 14: TOP 5 aeronaves críticas flota 787-9..... 43

## Nomenclatura

API	: Interfaz de Programación de Aplicaciones ( <i>Application Programming Interface</i> )
APU	: Unidad Auxiliar de Potencia ( <i>Auxiliary Power Unit</i> )
ADS-B	: Vigilancia Dependiente Automática-Transmisión ( <i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i> )
CBM	: Mantenimiento Basado en la Condición ( <i>Condition-Based Maintenance</i> )
CFR	: Código de Regulaciones Federales ( <i>Code of Federal Regulations</i> )
CMA	: Centro de Mantenimiento Aeronáutico
DAN	: Normas Aeronáuticas
DGAC	: Dirección General de Aeronáutica Civil
EASA	: Agencia Europea de Seguridad Aérea ( <i>European Union Aviation Safety Agency</i> )
IATA	: Asociación Internacional de Transporte Aéreo ( <i>International Air Transport Association</i> )
IFR	: Reglas de Vuelo por Instrumentos ( <i>Instrumental Flight Rules</i> )
ICAO	: Organización de Aviación Civil Internacional ( <i>International Civil Aviation Organization</i> )
FAA	: Administración Federal de Aviación de Estados Unidos ( <i>Federal Aviation Administration</i> )
KPI	: Indicador Clave de Rendimiento ( <i>Key Performance Indicator</i> )
MPM	: Manual de Procedimientos de Mantenimientos
MRO	: Mantenimiento, Reparación y Overhaul ( <i>Maintenance, Repair and Overhaul</i> )
T	: Horario operacional (en UTC)
TAT	: Tiempo de rotación entre vuelos ( <i>Turnaround Time</i> )
USD	: Dólar Estadounidense ( <i>U.S. Dollar</i> )
UTC	: Tiempo Universal Coordinado ( <i>Coordinated Universal Time</i> )

## **Códigos IATA Aeropuertos**

AKL	: Aeropuerto Internacional de Auckland – Auckland, Nueva Zelanda
AUH	: Aeropuerto Internacional Zayed – Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos
BOG	: Aeropuerto Internacional El Dorado – Bogotá, Colombia
CDG	: Aeropuerto Internacional de París (Charles de Gaulle) - París, Francia
DEL	: Aeropuerto Internacional Indira Gandhi – New Delhi, India
GRU	: Aeropuerto Internacional de São Paulo (Governador André Franco Montoro) – São Paulo, Brasil
IPC	: Aeropuerto de Isla de Pascua – Rapa Nui, Chile
JFK	: Aeropuerto Internacional John F. Kennedy – New York, Estados Unidos
LIM	: Aeropuerto Internacional Jorge Chávez – Lima, Perú
MEX	: Aeropuerto Internacional Benito Juárez – Ciudad de México, México
MIA	: Aeropuerto Internacional de Miami – Miami, Estados Unidos
MAD	: Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid (Barajas) – Madrid, España
QSC	: Aeropuerto Internacional de São Carlos – São Carlos, Brasil
SCL	: Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez – Santiago, Chile
SYD	: Aeropuerto Internacional Kingsford Smith – Sídney, Australia

## **Subíndices**

nt	: Próximo despegue (next take-off)
l	: Aterrizaje (landing)
CC-XXX	: Aeronave de matrícula chilena

# 1 Introducción

El presente trabajo de memoria de título se enmarca en el ámbito del mantenimiento aeronáutico, abordando problemáticas operacionales que inciden en la disponibilidad operativa de las diferentes flotas. En un escenario donde la demanda aérea se mantiene en constante crecimiento, resulta indispensable fortalecer la gestión del mantenimiento para asegurar niveles adecuados de eficiencia, seguridad y continuidad del servicio.

Considerando lo anterior, este capítulo presenta el contexto técnico y operativo que fundamenta este trabajo, abordando elementos clave de la industria aeronáutica actual. Esto permite enmarcar adecuadamente el problema de estudio, así como justificar las decisiones metodológicas adoptadas para el desarrollo del proyecto. Asimismo, se presentan la hipótesis de trabajo y los objetivos que lo orientan.

## 1.1 Contexto

En la industria aeronáutica, los procesos de mantenimiento, reparación y overhaul (MRO) desempeñan un papel fundamental en la seguridad, eficiencia y disponibilidad de las aeronaves, reduciendo el riesgo de fallas y optimizando las operaciones. A febrero de 2025, aerolíneas como LATAM Airlines han incrementado sus operaciones en un 1.8% respecto a 2024, reflejando el crecimiento sostenido de la aviación comercial en los últimos años, como lo indican los informes anuales de la IATA (International Air Transport Association, 2024; Latam Airlines Group S.A, 2025).

Debido al impacto directo del MRO en la seguridad y eficiencia de las aerolíneas, además de la creciente demanda de vuelo y el envejecimiento de muchas flotas, los servicios MRO se vuelven cada vez más cruciales. Estudios han demostrado que un programa MRO bien gestionado reduce el tiempo en tierra de las aeronaves, aumentando la disponibilidad de la flota y con ello la eficiencia operativa (Rodrigues & Lavorato, 2016).

Actualmente, muchos procesos de MRO aún se gestionan de manera reactiva en los primeros días tras la detección de una falla. Sin embargo, el mantenimiento no programado puede alterar la planificación de vuelos, provocando demoras, cancelaciones y pérdidas económicas. Estudios indican que los costos asociados al mantenimiento de aeronaves representan el 40% de los presupuestos operativos (Apostolidis et al., 2020; Sudarno et al., 2022). Esto plantea una oportunidad para la implementación de modelos predictivos en la gestión del mantenimiento aeronáutico, ya que, mediante la recopilación y el análisis de datos, es posible desarrollar modelos cuantitativos y cualitativos que faciliten la toma de decisiones y fortalezcan los programas de mantenimiento de las aerolíneas.

Durante los últimos años, el uso de inteligencia artificial e integración de datos ha permitido la implementación de modelos cuantitativos predictivos que anticipan fallos en los componentes, optimizando la programación del mantenimiento (Dermouche et al., 2022). Asimismo, se han implementado modelos para la gestión de riesgos en la aviación (Shyur, 2008). Sin embargo, la integración de estos enfoques en las operaciones aéreas sigue siendo un desafío debido a restricciones logísticas en las aerolíneas y la incertidumbre

operativa, lo que dificulta su aplicación en entornos dinámicos. Esto resalta la necesidad de un modelo híbrido que combine técnicas cuantitativas y cualitativas para una mejor adaptación a las condiciones reales de operación.

Una posible solución al problema de las restricciones logísticas, particularmente en la disponibilidad de datos en tiempo real para MRO, es el uso de datos operacionales de acceso abierto. En dicho contexto, *Flightradar24* es una herramienta clave en la industria aeronáutica, ya que permite recopilar datos en tiempo real gracias al sistema ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*), proporcionando información detallada sobre la ubicación, altitud, velocidad y trayectoria de las diferentes aeronaves (KALAGIREVA & RADKOV, 2016). Investigaciones previas han demostrado que es de gran utilidad en la industria; por ejemplo, un estudio realizó una investigación sobre el accidente de una aeronave Boeing 737 MAX utilizando *Flightradar24* para evaluar el comportamiento de la aeronave en la fase de ascenso, identificando patrones de vuelo inusuales que evidenciaron el comportamiento anómalo comparado con el perfil de ascenso típico de aeronaves del mismo modelo (Passarella & Nurmaini, 2022).

Finalmente, frente a la problemática central de que la gestión MRO en la aviación sigue siendo mayormente reactiva, implicando interrupciones operativas y consecuentes gastos económicos, es que se identifica una oportunidad de desarrollar un modelo híbrido para la visualización interactiva de datos operacionales disponibles en bases de datos como *Flightradar24*. Esto permitiendo una gestión más proactiva al identificar comportamientos atípicos en la operación de aeronaves comerciales, anticipando problemas de mantenimiento antes de que afecten la disponibilidad de la flota.

Debido a la diversidad de flotas en las aerolíneas comerciales, este trabajo se centrará en el modelado, visualización y análisis de datos operacionales de **LATAM Airlines Group S.A.**, enfocándose específicamente en aeronaves de fuselaje ancho (*wide-body*).

## 1.2 Hipótesis

Si se analizan los datos operacionales de aeronaves comerciales mediante modelos híbridos, representados visualmente en dashboards, entonces es posible identificar comportamientos atípicos relacionados con MRO, los cuales pueden ser relevantes para monitorear preventivamente el servicio entregado por las aerolíneas comerciales.

## 1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es evaluar el comportamiento operacional de dos flotas wide-body de LATAM Airlines, identificando anomalías asociadas a eventos MRO, mediante el desarrollo de modelos analíticos utilizando fuentes de datos abiertas y operacionales.

### 1.3.1 Objetivos específicos

En vista de cumplir con el objetivo general establecido, el trabajo tendrá los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar un modelo de análisis MRO que procese datos de al menos un mes, sobre vuelos de aeronaves wide-body de la empresa LATAM.

2. Implementar paneles de control (dashboards) interactivos para el análisis visual de datos, identificación de patrones y facilitación de la toma de decisiones preventivas.
3. Identificar comportamientos atípicos (outliers) en la operación de aeronaves, mediante el análisis de los datos visualizados en los dashboards, apoyado de conocimiento experto.

## 2 Marco teórico

La presente sección incluye la definición de los principales conceptos y antecedentes que sustentan el desarrollo de este trabajo, abarcando elementos claves relacionados a la gestión del mantenimiento en la aviación comercial. Así también se incluye la estandarización de ciertos parámetros relevantes que permiten estructurar y fundamentar la construcción de la herramienta analítica propuesta.

### 2.1 Concepto de MRO (Maintenance, Repair and Overhaul) en la aviación comercial

El término **MRO (Maintenance, Repair and Overhaul)** comprende el conjunto de actividades técnicas y logísticas orientadas a preservar o restaurar la aeronavegabilidad, seguridad operacional y funcionalidad de las aeronaves y sus componentes. El concepto abarca actividades de mantenimiento tanto preventivo como correctivo, así como procesos de reparación profunda, modificación estructural, inspecciones mayores y overhaul de motores o fuselajes.

Dentro de este contexto, es esencial distinguir cada término, puesto que cada uno implica acciones técnicas y operacionales diferentes (Lu, 2025):

El **mantenimiento (*maintenance*)** comprende todas las tareas ejecutadas para preservar el estado funcional y aeronavegable de una aeronave, por lo cual es el aspecto proactivo y preventivo del MRO. En este se distinguen distintos tipos, los cuales pueden variar según la frecuencia operacional de la aeronave (horas de vuelo / ciclos de operación). Estos implican principalmente revisiones regulares de la salud de la aeronave y sus componentes, para prevenir fallas antes que ocurran.

La **reparación (*repair*)** hace referencia a la acción de restaurar un componente o sistema que ha perdido su condición de aeronavegable, por lo cual es el componente reactivo y correctivo. Este puede incluir tareas simples como soldaduras o parches de abolladuras, hasta la rectificación de secciones dañadas, por lo cual, las reparaciones pueden clasificarse como menores o mayores dependiendo de su impacto estructural.

Finalmente, el aspecto más intenso y restaurador del MRO corresponde al **overhaul (*revisión general*)**. Este implica el desmontaje completo de una aeronave, motores o componentes principales como el tren de aterrizaje y unidades auxiliares de potencia (APU). Cada pieza es inspeccionada, restaurada o reemplazada meticulosamente, hasta que la unidad completa se vuelve a ensamblar. El objetivo final del overhaul es restaurar el sistema o componente a su condición especificada por el fabricante, equivalente a un estado nuevo o semi nuevo.

### 2.2 Tipos de mantenimiento en la aviación comercial

Como se ha podido destacar, el mantenimiento aeronáutico constituye un componente esencial para garantizar la seguridad operacional, la disponibilidad de la flota y cumplimiento normativo. En la aviación comercial, este proceso se encuentra estandarizado por diversos organismos regulatorios, como la Administración Federal de Aviación de

Estados Unidos (FAA), la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) y la Dirección General de Aeronáutica Civil en el caso de Chile (DGAC). Estos organismos se encargan de asegurar que las aerolíneas cumplan con un programa de mantenimiento continuo que se alinee a con las metodologías desarrolladas por los fabricantes, las cuales deben ser definidas y presentadas antes la autoridad aeronáutica correspondiente.

En el contexto chileno, las aerolíneas pueden desempeñarse como Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) cuando obtienen una certificación conforme a la normativa DAN 145 de la DGAC (DGAC, 2025). Esta establece los requisitos técnicos, documentales y de infraestructura que deben cumplir las organizaciones de mantenimiento para operar de manera legal en el territorio nacional.

Dentro de sus principales exigencias, se encuentra la presentación y aprobación de un Manual de Procedimientos de Mantenimiento (MPM), el cual debe detallar la estructura organizacional, capacidades técnicas, procedimientos de control de calidad, formación del personal, trazabilidad de componentes y protocolos de seguridad operacional. De esta manera, la certificación DAN 145 permite a las organizaciones realizar tareas de mantenimiento tanto preventivo como correctivo sobre aeronaves matriculadas en Chile, y en algunos casos extranjeras, siempre que exista un acuerdo bilateral o validación técnica.

Este marco normativo nacional se articula con estándares internacionales como la parte 145 de la EASA (EASA, 2021) o el Título 14 CFR Parte 145 de la FAA (Federal Aviation Administration, 2025), las cuales permiten la interoperabilidad técnica y la validación cruzada entre autoridades aeronáuticas. Esta armonización es esencial para mantener un entorno altamente regulado y transnacional como la aviación comercial.

Este modelo operativo regulado por normativas como las mencionadas, obliga a las aerolíneas a implementar estándares homogéneos en materias de mantenimiento. Bajo este enfoque, resulta imprescindible comprender las **tipologías de mantenimiento aeronáutico** que estructuran las operaciones técnicas de cualquier operador aéreo. Estos pueden clasificarse según un **enfoque técnico-funcional**, **frecuencia operativa** y el **nivel de intervención e infraestructura** necesario para su ejecución.

### 2.2.1 Clasificación por enfoque funcional

**Mantenimiento preventivo:** este tipo de mantenimiento tiene como objetivo evitar fallas antes de que estas ocurran, mediante tareas programadas en intervalos definidos, ya sea por horas de vuelo o ciclos de operación (Kinnison & Siddiqui, 2013). Este mantenimiento es de carácter obligatorio y forma parte integral de los sistemas que aseguran la aeronavegabilidad, definida como la condición en la que una aeronave cumple con su diseño aprobado y está en condiciones seguras de operación, según DAN 145 (DGAC, 2025).

Dentro del mantenimiento preventivo, se pueden destacar dos subcategorías relevantes (Ahmed Murtaza et al., 2024):

- **Mantenimiento predictivo:** apoyado por sistemas de monitoreo de condición (*Condition Monitoring Systems*), los cuales permiten anticipar fallos mediante el análisis de parámetros como vibraciones, temperaturas o consumos anómalos.
- **Mantenimiento basado en condición (CBM por sus siglas en inglés):** ajusta las intervenciones según el estado real de los componentes, evaluando su estado y detectando fallas tempranas, lo cual permite optimizar la vida útil de estos sin comprometer la seguridad.

**Mantenimiento correctivo:** este tipo de mantenimiento se ejecuta posterior a la detección de una falla o anomalía. Puede derivarse de una inspección planificada o de un evento inesperado, cuya urgencia dependerá de la afectación a la aeronavegabilidad de la aeronave (Aviation Group, 2022b). Cuando el defecto compromete la seguridad de vuelo, la aeronave debe quedar fuera de servicio hasta que se resuelva, conforme a lo estipulado en los manuales del fabricante y las directivas de aeronavegabilidad aplicables.

Este tipo de mantenimiento es el que se puede identificar como **reparación** en el concepto MRO, mientras que el preventivo comprende el aspecto de **mantenimiento**.

## 2.2.2 Clasificación por nivel de infraestructura y/o frecuencia operativa

**Mantenimiento de línea (*Line Maintenance*):** es el tipo de mantenimiento más común y rutinario, los cuales suelen ocurrir post-vuelo. Requieren de herramientas mínimas y suelen realizarse en las mismas plataformas de los aeropuertos, puesto que es de baja complejidad y está orientada a garantizar la aeronavegabilidad entre los vuelos (Dough, 2022). Este tipo de mantenimiento incluye actividades como (Aviation Group, 2022):

- **Revisiones en tránsito:** pre o post vuelo, los cuales consisten en inspecciones visuales de neumáticos, frenos y niveles de fluidos (como aceites o hidráulicos).
- **Revisiones diarias:** realizados en intervalos de 24 a 72 horas, los cuales incorporan verificaciones de sistemas de emergencia, luces, fluidos, alas, softwares, interior de la cabina de pasajeros y de vuelo.

**Mantenimiento en base o hangar (*Base/Heavy Maintenance*):** corresponden a mantenimientos ejecutados en hangares con recursos técnico-especializados. Comprenden niveles A-D, puesto que dependen de un intervalo de frecuencia operativa (Dough, 2022).

- **Tipo A:** se realiza cada 400-600 horas de vuelo o 200-300 vuelos. Requieren entre 10 a 70 horas hombre y abarca inspección exterior, filtros, lubricación y pruebas funcionales de motores, luces o sistemas de frenos. El mantenimiento durante estas inspecciones suele realizarse de noche para no interrumpir los programas de las aerolíneas, y puede variar según el tipo de aeronave, los ciclos de vuelo o las horas voladas desde la última operación.
- **Tipo B:** son mantenciones realizadas cada 6-8 meses, las cuales demandan entre 150 a 180 horas hombre y pueden completarse en 1 a 3 días. Estas revisiones suelen completarse durante la fase A, por lo que ha sido eliminada gradualmente

por las aerolíneas, contribuyendo a reducir el tiempo de inactividad de la aeronave y optimizar el uso de recursos. Trabajos típicos que incluye son verificaciones de alineación y torque del tren de aterrizaje, o inspecciones a los tubos hidráulicos de las ruedas.

- **Tipo C:** es un mantenimiento mayor que ocurre cada 18-24 meses. Incluye inspecciones profundas de estructuras y sistemas, por lo cual tiene una duración entre 1 a 4 semanas y hasta 6000 horas hombre. Las actividades de mantenimientos tipo C suelen requerir que la aeronave permanezca en el hangar, para hacer tareas como exámenes de estructuras (fuselaje, alas, entre otros) para detección de corrosión y daños, o la lubricación de todos los componentes de la aeronave.
- **Tipo D (*Heavy Maintenance Visit*):** corresponde a la intervención de mayor envergadura en las aeronaves, la cual se realiza cada 6 a 10 años. Esta exige el desmontaje casi total de los componentes, inspección integral y revisión de fuselajes y sistemas, por lo cual puede durar entre 4 a 6 semanas, implicando costos multimillonarios y hasta 50,000 horas hombre. En estas etapas, las aerolíneas a menudo deciden renovar los interiores de los aviones y actualizarlos, aprovechando su desmantelamiento. Por lo anterior, en esta categoría se pueden encontrar intervenciones tipo **overhaul** del concepto MRO.

Al corresponder a intervenciones de alta complejidad e infraestructura, los tipos de mantenimiento presentados corresponden a **mantenimientos preventivos programados**. Esto porque se realizan en función a intervalos fijos (horas de vuelo, ciclos de despegue/aterrizajes), cuyo objetivo es detectar y mitigar fallas antes de que ocurran o progresen.

LATAM Airlines, es un operador aéreo certificado en distintos países de América Latina, cuyas capacidades de mantenimiento se encuentran distribuidas en distintos puntos del continente. En el caso de LATAM Chile, cuenta con la certificación DAN 145 que la habilita como Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA), autorizado por la DGAC para realizar tareas de mantenimiento de línea y hangar de su flota en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago (SCL) (LATAM Airlines, n.d.-a). En él, dispone de infraestructura técnica, hangares y personal certificado para inspecciones de tránsito, diarias o eventualmente en base (Tipo A, B, C).

Actividades de mantenimiento mayor para LATAM, como modificaciones mayores e intervenciones tipo D, suelen ser realizadas en su centro de mantenimiento ubicado en São Carlos, Brasil, el cual opera bajo el modelo MRO. Este centro está certificado no solo por la autoridad aeronáutica brasileña (ANAC), sino también por la FAA y la EASA lo cual le permite brindar servicios a matrículas tanto nacional como internacional (LATAM Airlines, n.d.-c).

En São Carlos, LATAM realiza overhaul estructural, renovación interior de cabinas, trabajos de pintura, y revisiones programadas de tipo C y D para aeronaves Airbus y Boeing, incluyendo modelos A320, A321 y Boeing 767.

Además de los centros mencionados, LATAM dispone de capacidades adicionales en bases como Lima (Perú), Bogotá (Colombia) y Quito (Ecuador), las cuales operan bajo la normativa local y ofrecen soporte técnico para mantenimiento en línea y menor. Esta estructura distribuida permite a LATAM optimizar sus costos operacionales, minimizar tiempos de inactividad (*downtime*) y mantener un control directo sobre la calidad técnica de sus procesos de mantenimiento, alineados con los estándares internacionales del sector.

### **2.3 Estándar de operaciones para aeronaves wide-body**

Dentro de la industria aeronáutica, las aeronaves wide-body en su versión comercial cuentan con 2 pasillos, con una distribución de asientos entre 200 a 300 según los modelos de la aerolínea LATAM (SeatMaps, n.d.). Además, están diseñadas para transportar grandes volúmenes de pasajeros o carga, ya sea a larga o media distancia, dentro de los cuales se espera que mantenga niveles de utilización diaria de 12 y 16 horas, minimizando los tiempos en tierra entre vuelos para maximizar la rentabilidad.

Considerando lo anterior se determina que el desempeño operacional de las aeronaves puede ser definida en base a dos variables claves: el tiempo de vuelo (*flight time*) y el tiempo de rotación entre vuelos (*Turnaround Time – TAT*). El tiempo de vuelo, de acuerdo con la Organización de Aviación Civil Internacional, se define como el “el periodo que comienza cuando la aeronave empieza a moverse con el propósito de despegar, hasta que se detiene completamente al finalizar el vuelo” (ICAO, 2022). Esta métrica incluye el rodaje previo al despegue y el posterior al aterrizaje, y el vuelo como tal.

En cuanto al TAT corresponde al intervalo de tiempo que transcurre entre que una aeronave finaliza el vuelo anterior y está habilitada para despegar nuevamente. Durante este periodo se habilita la aeronave para su siguiente viaje con actividades como: embarque de pasajeros, equipaje, cargas de combustible, entre otros (Picchi Scardaoni et al., 2021). El TAT es un indicador clave del rendimiento de las aeronaves, por lo que es uno de los elementos más importantes en la industria ya que afecta la competitividad y rentabilidad (More & Sharma, 2014). En caso de tenerse tiempos prolongados de TAT esto podría asociarse a actividades MRO, por ejemplo, un TAT de 3 meses podría indicar operaciones MRO como un Overhaul (Tipo D), mientras que uno de 1 hora indicaría escalas de vuelo o condiciones similares.

En vista de lo mencionado, se busca definir los valores estándar de estas variables. En primer lugar, para el TAT promedio, estudios indican que este parámetro se aproxima según la cantidad de asientos por aeronave (Hernández, 2024). Por lo cual, según la estandarización de asientos mencionada (hasta 300) y en base a la Figura 1 se determina que este valor es de aproximadamente 4 horas (240 minutos).

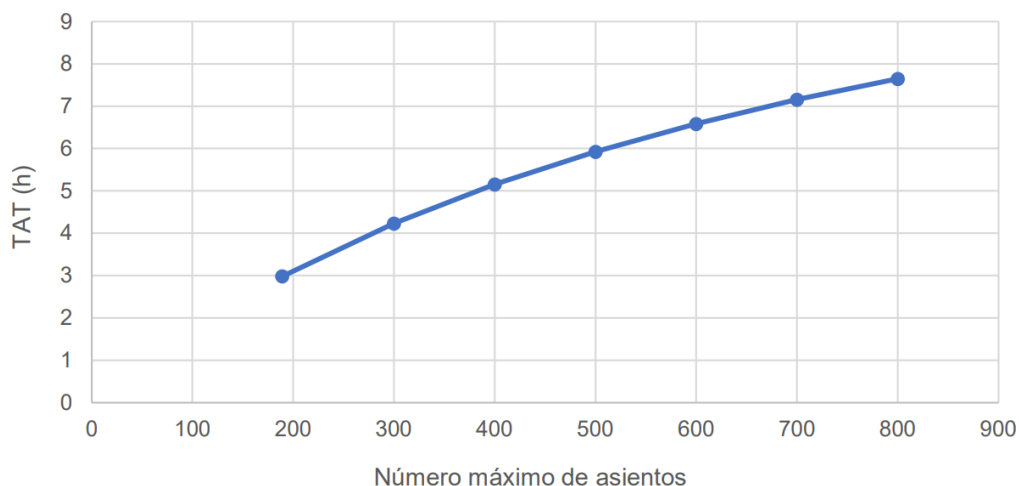


Figura 1: Turnaround time diario por avión dependiendo del número de asientos (Hernández, 2024).

En cuanto a las horas de vuelo diarias, según fuentes, la flota mundial de aeronaves Boeing 787 (alrededor de 1170 aeronaves) realizan operaciones de larga y media distancia, donde comúnmente realizan un vuelo de 12 a 16 horas por día o dos vuelos de media distancia de 6 a 8 horas cada uno, dependiendo de la planificación de la aerolínea (Forbes Travel, 2025). Por lo cual, este parámetro obtiene como máximo un valor de 16 horas, donde se pueden incluir escalas de vuelos o similares.

## 2.4 Modelo K-Means de detección de anomalías

Para mantener una gestión adecuada de las flotas con las que cuentan las aerolíneas, es fundamental identificar comportamientos operacionales que se encuentren fuera de lo común, para así prevenir fallas y con esto mejorar el rendimiento y disponibilidad de las aeronaves. Estos comportamientos, conocidos como **anomalías**, comúnmente llevan a pérdidas económicas por lo cual la detección temprana de estos eventos es fundamental.

Por lo anterior, uno de los métodos que permiten identificar estos comportamientos es el modelo **K-Means**, una técnica de aprendizaje no supervisado que permite clasificar datos en un número definido de grupos, también conocidos como clústeres. El objetivo de este algoritmo consiste en agrupar datos con características similares entre sí, minimizando la variación entre los datos del grupo y maximizando la diferencia con los demás. Para ello, se comienza con una cantidad de  $K$  clústeres para luego asignar cada dato al grupo cuyo centroide esté más cercano, iterando constantemente hasta obtener una configuración estable. Esta metodología es ampliamente utilizada debido a su simplicidad, eficiencia computacional y facilidad de interpretación (Kavlakoglu & Winland, 2024).

En el contexto del análisis de operaciones MRO, este modelo puede ser utilizado como herramienta de detección de anomalías en vista de los patrones de comportamiento de las aeronaves. Para su aplicación, es esencial la utilización de las dos variables operacionales claves mencionadas anteriormente, correspondientes a el **TAT** y el **flight time**.

### 3 Metodología

El enfoque metodológico adoptado en este estudio integra distintas técnicas de análisis de datos, clasificación operacional y visualización interactiva, con el objetivo de detectar eventos anómalos en las operaciones de flotas aéreas, particularmente aquellos compatibles con eventos de mantenimiento (MRO). Este enfoque busca combinar análisis cualitativo, modelado basado en reglas y herramientas visuales para generar conocimiento accionable sobre la operación real de las flotas analizadas, desarrollado en el ambiente de programación Python.

La metodología se estructura en una secuencia lógica de seis etapas interrelacionadas. En primer lugar, se define el objeto de estudio mediante la selección de las dos flotas específicas a analizar y la delimitación temporal del análisis. En segundo lugar, se realiza la recolección de datos abiertos de vuelo a través de Flightradar24. A continuación, los registros obtenidos son preprocesados y filtrados con el fin de garantizar la calidad, completitud y continuidad de la información.

En una cuarta etapa, los datos son clasificados en función de los comportamientos operacionales esperados de las aeronaves, mediante el desarrollo del modelo de análisis MRO que se ajusta a reglas predefinidas. Posteriormente, se desarrolla un entorno de visualización interactiva que permite explorar los resultados de manera dinámica y contextualizada. Para finalizar, se identifican patrones críticos en la operación, como eventos prolongados en tierra o aeronaves anómalas que no cumplan con los estándares de operación.

El diseño metodológico puede resumirse en un esquema Input-Process-Output (IPO), el cual ilustra el flujo de trabajo desde la obtención de datos hasta la generación de visualizaciones e identificación de eventos. Lo descrito se presenta en la Figura 2.

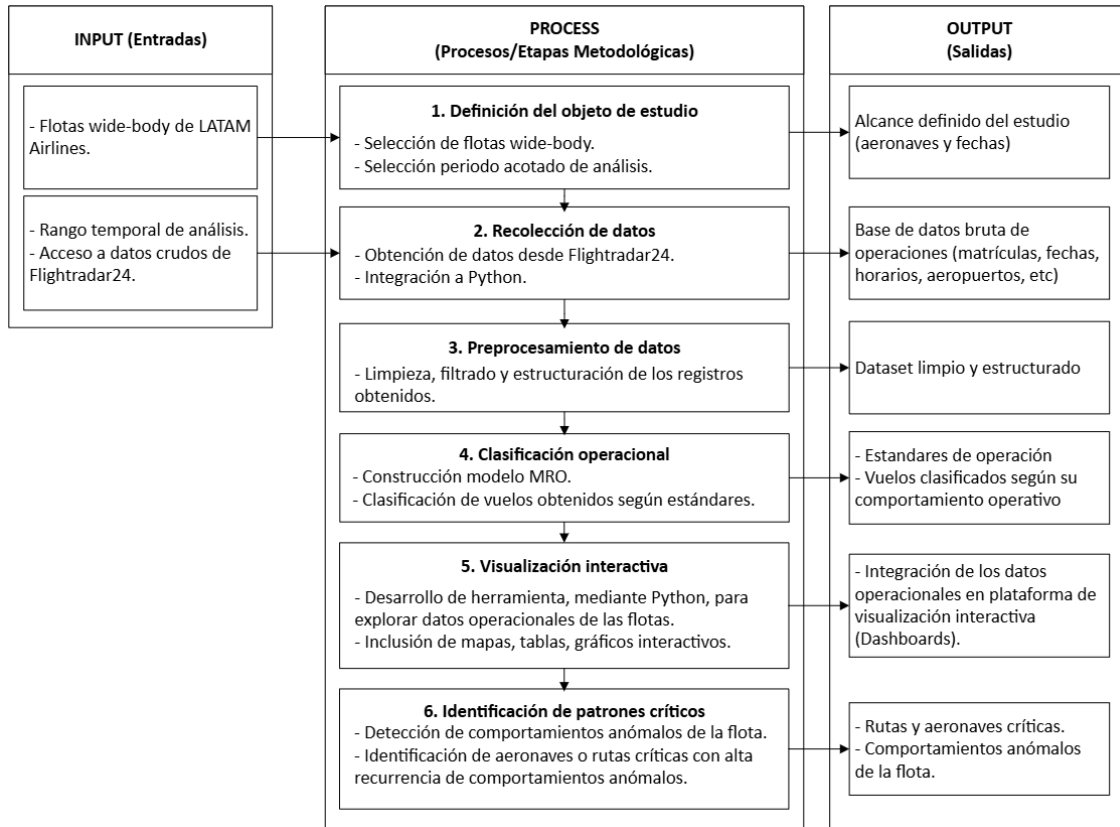


Figura 2: Esquema metodológico.

Las etapas mencionadas en el desarrollo de la metodología son detalladas a continuación:

### 3.1 Selección de la flota y definición del objeto de estudio

Al ser un estudio de aeronaves wide-body, se definen dos flotas específicas: **Boeing 787-8 y 787-9**. Esta selección se basa en los reiterados problemas que el modelo ha presentado en sus motores. Se han presentado fallas tanto en los motores Rolls-Royce Trent 1000 como General Electric GEnx, las cuales incluyen desgaste prematuro, agrietamiento, vulnerabilidad en la formación de hielo y fallas en componentes críticos (Aviación Comercial, 2025; PANDIAN et al., 2020).

Por lo anterior, estas aeronaves están en constantes inspecciones, mantenimientos antes de las fechas establecidas, entre otros. A esto se suma el reciente accidente ocurrido durante el mes de junio del presente año, que corresponde al primer accidente fatal de una aeronave Boeing 787-8, investigándose la posible falla de ambos motores y configuración de los flaps (LA NACION, 2025).

### 3.2 Recolección de datos operacionales

Tras la definición de las flotas objeto de estudio, se procede a la recolección sistemática de sus datos operacionales durante un periodo determinado. Esta etapa se lleva a cabo mediante el uso de la plataforma Flightradar24 y su correspondiente API (*Application Programming Interface*), la cual permite el acceso a información estructurada sobre vuelos,

aeronaves y trayectorias históricas. La API consiste en un conjunto de protocolos y estándares de comunicación que posibilita la interacción programática entre el entorno de Flightradar24 y aplicaciones externas (Flightradar24, n.d.-c.), lo que permite la descarga, procesamiento y almacenamiento de los datos, empleando el lenguaje de programación Python.

Los distintos niveles de acceso disponibles mediante suscripciones mensuales condicionan el alcance del set de datos obtenido, cuyos valores se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Costos suscripciones en Flightradar24.

Suscripción	Costo
Flightradar24 Plan GOLD (Anual)	44.99 USD
Flightradar24 API Plan EXPLORER (Mensual)	9.00 USD

Las licencias de acceso adquiridas permiten obtener registros históricos de vuelo, garantizando la continuidad en la adquisición de la información y nivel de detalle requeridos para el estudio. Los datos recopilados incluyen variables clave como: **tiempo de vuelo, ruta, aeropuertos de origen y destino, tipo y modelo de aeronave, matrícula e identificador de vuelo**, entre otros (Flightradar24, n.d.-b). Esta información resulta esencial para construir una base robusta que represente la operación de las flotas seleccionadas.

Con el objetivo de extraer únicamente los datos correspondientes a LATAM Airlines y a las flotas *wide-body* previamente definidas (Boeing B787-8 y B787-9), se desarrolla un procedimiento en Python, en el cual se emplea la variable “*params*” (definida por la propia estructura de la API) para establecer los filtros de consulta. Esta variable actúa como un parámetro de búsqueda que especifica las condiciones de recuperación de la información, como intervalos temporales, identificación de la aerolínea y de la flota.

Los atributos seleccionados para cada vuelo se encuentran descritos en la Tabla 2, la cual representa las principales variables de extracción.

Tabla 2: Variables principales “*params*”.

Variable “ <i>params</i> ”	Descripción
<i>Operating_as</i>	Código ICAO de la aerolínea que opera el vuelo
<i>Aircraft</i>	Modelo de la aeronave
<i>Flight_datetime_from</i>	Inicio del rango de fecha y hora (UTC)
<i>Flight_datetime_to</i>	Fin del rango de fecha y hora (UTC)

A partir de los datos extraídos mediante la API de Flightradar24, se obtiene un conjunto amplio de registros que incluyen diversas variables asociadas a la operación de vuelo. La relevancia de cada variable depende del tipo de análisis a realizar, por lo cual para este trabajo se identifican como variables clave las detalladas en la Tabla 3. Estas son

seleccionadas por su capacidad de describir aspectos esenciales del comportamiento operacional de las aeronaves, siendo especialmente útiles para la detección de patrones operacionales, tiempos de detención prolongados y TAT anómalos.

Tabla 3: Variables críticas.

Variable	Tipo	Descripción
<i>reg</i>	str	Matricula de la aeronave (ej: CC-PAT)
<i>flight</i>	str	Número de vuelo comercial (ej: LA4022)
<i>orig_iata</i>	str	Código IATA del aeropuerto de origen
<i>dest_iata</i>	str	Código IATA del aeropuerto de destino
<i>datetime_takeoff</i>	datetime	Fecha y hora del despegue
<i>datetime_landed</i>	datetime	Fecha y hora del aterrizaje
<i>flight_time</i>	float	Duración del vuelo desde el despegue hasta el aterrizaje (en segundos).

Posterior a la extracción, los datos son estructurados en un DataFrame mediante herramientas de procesamiento en Python, considerando únicamente las variables relevantes seleccionadas. Esto permite la construcción de una base de datos organizada y filtrada adecuada para el trabajo, cuya vista representativa del conjunto de datos estructurado se presenta en Tabla 4.

Tabla 4: Datos extraídos y procesados desde Flightradar24 sobre vuelos Boeing 787-9.

reg	orig_iata	dest_iata	datetime_takeoff	datetime_landed	flight_time
CC-BGL	SYD	AKL	2025-03-01T01:05:42Z	2025-03-01T03:50:48Z	9906.0
CC-BGJ	MEL	SCL	2025-03-01T01:46:58Z	2025-03-01T13:27:47Z	42049.0
CC-BGH	MIA	SCL	2025-03-01T02:13:21Z	2025-03-01T09:43:28Z	27007.0

Es importante destacar que los registros temporales extraídos están expresados en el formato ISO 8601, un estándar internacional ampliamente utilizado para representar fecha y horas en sistemas computacionales (ISO, 2020). Este formato sigue la estructura *YYYY-MM-DDTHH:MM:SSZ*, donde *T* separa la fecha de la hora y *Z* indica que el valor se encuentra expresado en tiempo universal coordinado (UTC). De esta forma, por ejemplo, 2025-03-01T00:00:44Z corresponde al 1 de marzo de 2025 a las 00:00:44 en horario UTC+0.

Dado que el uso de este formato puede no resultar inmediatamente legible, con el fin de facilitar la interpretación y trazabilidad de los eventos en análisis, se opta por transformar todos los registros temporales al formato UTC estándar (YYYY-MM-DD HH:MM:SS).

### 3.3 Limitaciones de los datos y preprocesamiento

#### 3.3.1 Restricciones de la fuente

La implementación de la API bajo la suscripción Explorer, permite acceder a datos históricos de vuelo con un nivel razonable de detalle; no obstante, esta herramienta presenta una serie de limitaciones operativas que puede afectar directamente el alcance del estudio. En primer lugar, el uso de la API se encuentra condicionado a una cuota mensual de 25,000 créditos, la cual se consume rápidamente al realizar consultas históricas o extraer atributos detallados por vuelo. La cantidad de créditos utilizados depende de la antigüedad del dato extraído, lo cual es un aspecto esencial a considerar, utilizando hasta 6 créditos por datos con más de 30 días de antigüedad, y 3 para los del mes actual (Flightradar24, n.d.-a).

Así también, el servicio impone una restricción de paginación que limita hasta 20 registros por llamada, lo cual reduce significativamente la velocidad de descarga y exige implementar rutinas de extracción iterativas. Como resultado de estas restricciones, solo fue posible recuperar información de un periodo continuo de tres meses (marzo, abril y mayo de 2025) para ambas flotas.

Lo anterior, considera que la misma licencia fue compartida con un estudio paralelo enfocado en aeronaves *narrow-body*, por lo cual el uso de créditos debe ser tratado con discreción. Sin embargo, a pesar de las limitaciones identificadas, el volumen y resolución de datos extraídos son suficientes para identificar secuencia de vuelo y patrones de uso respecto a los estándares operacionales esperados.

Es esencial considerar, que debido a los Términos y Condiciones del proveedor (Flightradar24, 2024), se pueden detectar inconsistencias atribuibles a una resolución limitada de la API Explorer sobre ciertos contextos operativos, como vuelos no comerciales, trayectos sin planes IFR declarados o errores en asignaciones por matrícula. En particular, se puede encontrar lagunas temporales, ausencia de vuelos intermedios o información nula de las operaciones de ciertas aeronaves, lo cual refleja una dependencia crítica de fuentes abiertas que debe ser considerado a la hora de interpretar los resultados.

Por tanto, si bien los datos extraídos permiten construir una base representativa para análisis exploratorio, se recomienda complementar este tipo de estudios con registros internos de aerolínea o fuentes oficiales adicionales, a fin de aumentar la confiabilidad y continuidad de la información operacional.

#### 3.3.2 Limpieza y preparación de datos

Considerando las limitaciones de la herramienta, y una vez extraídos los datos brutos desde la API, se continúa con una fase de limpieza y depuración, con el objetivo de asegurar la integridad y utilidad del conjunto de datos. En esta etapa pueden identificarse registros incompletos, particularmente aquellos que carecen de valores en la variable *flight\_time*, la cual es esencial para calcular métricas operacionales y detectar posibles anomalías.

Los registros incompletos deben ser excluidos del set de datos, dado que su ausencia compromete la trazabilidad y continuidad de los vuelos de las aeronaves. Por lo anterior, se inicia una etapa de preparación de datos, centrada en la construcción de variables clave requeridas para el modelo. Si bien la variable *flight\_time* ya se presenta en los datos, en esta etapa es necesario determinar el indicador *TAT* que representa el intervalo entre el aterrizaje de un vuelo ( $T_l$ ) y el despegue del siguiente para una misma aeronave ( $T_{nt}$ ), como se muestra en la Ecuación 1.

$$TAT_{CC-XXX} = T_{nt,CC-XXX} - T_{l,CC-XXX} \quad (1)$$

El cálculo de esta variable se realiza estableciendo emparejamientos secuenciales por matrícula y fecha, permitiendo la captura de ventanas de inactividad correspondientes al indicador mencionado. Además, cada observación es asociada a la ruta correspondiente, permitiendo evaluar patrones de eficiencia por trayecto y detectar detenciones prolongadas. Este indicador constituye una variable crítica para la identificación de eventos irregulares, como retrasos operativos o condiciones logísticas atípicas que puedan atribuirse a MRO.

### 3.4 Desarrollo del modelo MRO para detección de anomalías operacionales

Tal como se describe en el marco teórico, el algoritmo **K-Means** se emplea en este trabajo como método no supervisado para la detección de patrones operacionales atípicos de las aeronaves. El modelo se construye a partir de un espacio bidimensional definido por dos variables clave: **TAT y Flight Time**, seleccionadas por su capacidad de representar el comportamiento de las operaciones aéreas tanto en tierra como en vuelo.

Al aplicar K-Means sobre el conjunto de datos, se permite generar agrupaciones (clústeres) que reflejan perfiles operacionales homogéneos y similares. Cada clúster se representa por un centroide que sintetiza el comportamiento promedio de los vuelos pertenecientes al grupo, en términos de TAT y duración de vuelo. Esta estructuración permite identificar vuelos que se desvían significativamente del patrón general, facilitando la detección de posibles anomalías operacionales.

Con el fin de facilitar la interpretación de resultados, se opta por dividir el conjunto de datos en cuatro clústeres operacionales. A cada clúster se le asigna una etiqueta categórica, basada en los valores promedio de TAT y Flight Time, y los rangos operacionales para la flota, definidos en base a literatura técnica y datos históricos. Estas variables permiten representar tanto la fase aérea como la logística/técnica de cada operación, lo que las convierte en dimensiones críticas para la detección de posibles eventos irregulares.

La asignación de categorías se realiza mediante una segmentación basada en umbrales discretos, definidos a partir del comportamiento típico de aeronaves *wide-body* en operaciones regulares. Para este caso, se opta por una clasificación escalonada donde los valores límites entre categorías ya incorporan implícitamente un margen de tolerancia operacional (específicamente un margen de 25%), permitiendo absorber variaciones menores atribuibles a condiciones reales como: demoras en plataforma, ineficiencias logísticas o situaciones meteorológicas.

Cabe recalcar que, según lo descrito en pasos anteriores una operación normal de aeronaves wide-body implica vuelos entre 12 y 16 horas por día, sin embargo, esto puede incluir escalas de vuelo en hubs operacionales o similares, por lo cual no se considera una limitante para las operaciones de estos modelos. En vista de lo mencionado, se tiene la Tabla 5, donde se describen las operaciones junto a sus limitaciones en el TAT.

Tabla 5: Límites de clasificaciones para modelo K-Means.

Tipo de operación	Rango de TAT + 25% (min)	Descripción
Operación Normal	≤ 300	Operaciones regulares con tiempos en tierra dentro de lo esperado.
Operación normal prolongada	301-1800	Operaciones extendidas en tierra, pero aún dentro de márgenes aceptables.
Retraso Operativo / MRO Leve	1801-7200	Detenciones prolongadas, potencialmente por mantenimientos menores.
Evento Crítico / MRO Mayor	> 7200	Detenciones superiores a 5 días, asociadas a mantenimientos mayores o fallas.

### 3.5 Desarrollo del entorno de visualización interactiva (dashboards)

Como parte final de procesamiento y modelado de los datos, se desarrolla un entorno de visualización interactiva tipo dashboard, implementado mediante la herramienta **Streamlit**, la cual permite construir aplicaciones web dinámicas utilizando scripts en **Python**. Esta herramienta es seleccionada por su facilidad de despliegue, capacidad de integración con bibliotecas de visualización y eficiencia en el prototipado de interfaces de análisis técnico.

El propósito principal de este entorno es servir como plataforma de apoyo al análisis operacional, brindando al usuario una interfaz interactiva que facilite la exploración de resultados, la detección de patrones relevantes y la interpretación de indicadores técnicos a partir de los datos procesados. El dashboard es diseñado con un enfoque modular organizado en tres secciones funcionales:

- i. **Ventana Principal:** presenta una visión general de la evolución operacional en el tiempo. Incluye indicadores como la disponibilidad diaria de la flota, distribución de eventos críticos y rendimiento promedio de las aeronaves, lo que permite observar tendencias operativas a nivel global.
- ii. **Análisis General de Flota:** permite identificar patrones agregados y rutas críticas a partir de análisis de detenciones prolongadas, salud operacional de la flota y comportamiento consolidado de las aeronaves. Esta sección busca facilitar la identificación de aeronaves con alto impacto negativo en la eficiencia global, así como posibles cuellos de botella operativos.
- iii. **Análisis Individual por Aeronave:** ofrece una vista desagregada y detallada del desempeño de cada matrícula específica. Se presentan indicadores clave de

desempeño (KPIs) relacionados con su actividad aérea, duración en tierra, rutas ejecutadas y frecuencia de eventos anómalos. Las visualizaciones buscan permitir rastrear la trayectoria operativa de cada aeronave y evaluar su consistencia en el tiempo.

Para el desarrollo del modelo y dashboard se utilizan bibliotecas de Python ampliamente reconocidas. Además de **Streamlit** para el desarrollo de la interfaz interactiva, se utilizan librerías como **pandas** y **numpy** para manipulación y análisis de datos; **plotly** y **matplotlib** para visualización gráfica; **scikit-learn** para modelado de anomalías (K-Means) y escalamiento de variables; además de **folium** y **streamlit-folium** para representar rutas en mapas. Estas herramientas permitieron construir una plataforma robusta y visualmente informativa para la evaluación operacional de la flota.

Con las distintas visualizaciones generadas en el entorno interactivo, se permite detectar ineficiencias operacionales mediante el análisis histórico de las actividades de vuelo y permanencia en tierra de las aeronaves. Este recurso constituye un apoyo directo a la toma de decisiones, ya que transforma los datos en información interpretable, facilitando la identificación de patrones operativos relevantes.

### **3.6 Lógica para la detección de patrones anómalos**

Con el objetivo de interpretar los resultados generados por el modelo de detección de anomalías y traducirlos en información útil para la gestión operativa, se diseña una lógica de evaluación de criticidad orientada a identificar aeronaves y rutas que presentan comportamientos fuera de los márgenes esperados. Estos casos pueden estar asociados a deficiencias técnicas, ineficiencias logísticas o necesidades de mantenimiento.

La detección de estos patrones anómalos permite anticipar riesgos para la eficiencia y confiabilidad de la flota, y constituye un factor clave para apoyar la toma de decisiones en el ámbito MRO. En este sentido, es esencial identificar las aeronaves con mayor incidencia de vuelos irregulares o detenciones prolongadas, y por otro lado, aquellas rutas con alta frecuencia de operaciones críticas que puedan estar sometidas a condiciones que aceleren el desgaste estructural o las necesidades de mantenimiento.

Desde lo anterior, para destacar aquellas aeronaves y rutas que presenten ineficiencia operativa, se utilizan diferentes métricas que definan su criticidad, las cuales son descritas a continuación.

#### **3.6.1 Evaluación de criticidad por aeronaves**

La identificación de aeronaves críticas se realiza a partir de los resultados del modelo K-Means, permitiendo clasificar vuelos según su comportamiento operativos. Cada aeronave se evalúa según tres métricas presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6: Métricas para evaluar criticidad de aeronaves.

Métrica	Descripción	Ponderación
Porcentaje de vuelos anómalos	Proporción de vuelos clasificados como “Evento Crítico / MRO Mayor”	30 %
Días de inactividad operacional	Total de días sin operación (down time) durante el período analizado	60 %
Porcentaje de TAT elevados	Fracción de vuelos pertenecientes al 20 % superior de TAT observados	10 %

Las métricas son normalizadas utilizando la técnica *MinMaxScaler* para escalar los resultados a un intervalo entre 0 y 1, utilizado para calcular un índice compuesto ponderado para cada aeronave. Las aeronaves con los cinco valores más altos en función de su impacto acumulado sobre la eficiencia operativa, se considerarán como críticas.

### 3.6.2 Evaluación de criticidad por ruta

De forma análoga, se construye un índice de criticidad para rutas operacionales, considerando su exposición a eventos anómalos y su relevancia dentro del patrón de vuelo. Las métricas utilizadas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Métricas para evaluar criticidad de rutas.

Métrica	Descripción	Ponderación
Porcentaje de vuelos con anomalías graves	Proporción de vuelos clasificados como “Evento Crítico / MRO Mayor”	40 %
Porcentaje total de vuelos con anomalías	Incluye eventos clasificados como “MRO Leve” o “MRO Mayor”	20 %
Peso total de las detenciones	Suma de las detenciones, ponderada como $\text{duración}^{1.2}$ para enfatizar las prolongadas	30 %
Cantidad de vuelos en la ruta	Total de operaciones en el trayecto durante el periodo de análisis	10 %

Al igual que en el caso anterior, se aplica normalización con *MinMaxScaler* para estandarizar los valores. La combinación ponderada permite obtener un índice de criticidad por ruta, cuya interpretación permite priorizar aquellas conexiones con mayor exposición a ineficiencias o exigencias técnicas.

### 3.6.3 Clasificación del nivel de riesgo operacional

Como parte de la detección de comportamientos anómalos de la flota, las aeronaves pueden ser clasificadas según su riesgo operacional, lo cual como fue mencionado, será

visualizado en el dashboard principal como el rendimiento promedio de las aeronaves en el periodo. Esto se basa en dos indicadores clave: el **número de eventos críticos** y el **porcentaje de vuelos anómalos**.

A partir de estos parámetros, se establecen cuatro niveles de riesgo codificados por color, lo que facilita su visualización e interpretación en el entorno interactivo. La lógica de esta clasificación se resume en la Tabla 8.

*Tabla 8: Clasificación de aeronaves según porcentaje de anomalías y eventos.*

<b>Color</b>	<b>Condición lógica</b>	<b>Nivel de riesgo</b>	<b>Interpretación</b>
Rojo	Eventos críticos > 5, % anomalías > 60	Alto	Aeronave con múltiples eventos críticos o con una proporción muy elevada de vuelos anómalos.
Naranja	Eventos críticos > 0, 30 < % anomalías ≤ 60	Medio	Presencia de eventos graves aislados o anomalías frecuentes, aun sin superar umbral crítico.
Amarillo	Eventos críticos > 0, 10 < % anomalías ≤ 30	Bajo - Moderado	Anomalías ocasionales sin indicios de eventos críticos. Seguimiento recomendable.
Celeste	Eventos críticos = 0, % anomalías ≤ 10	Bajo o Normal	Operación estable sin señales relevantes de anomalías o interrupciones técnicas.

## 4 Resultados y análisis

A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos por medio de la herramienta de análisis MRO desarrollada, junto a su respectiva interpretación y análisis. Los resultados mencionados se organizan en función de su relevancia, destacando eventos operacionales críticos y patrones anómalos como rutas de alto impacto y aeronaves críticas. Además, se discuten las implicancias de estos hallazgos en la planificación del mantenimiento y la gestión operativa de la flota.

### 4.1 Modelo para análisis MRO

Considerando los objetivos de estudio y la metodología previamente descrita, esta sección presenta los resultados del modelo de detección de anomalías operacionales aplicado a las flotas Boeing 787-8 y 787-9. El análisis se basa en los datos históricos obtenidos a través de la API de Flightradar24, los cuales fueron procesados mediante el algoritmo K-Means, permitiendo clasificar las operaciones según su comportamiento en torno a los valores de TAT y tiempo de vuelo.

Las clasificaciones resultantes permiten identificar tendencias operacionales de las flotas, entregando una caracterización cuantitativa y visual de su rendimiento durante el periodo analizado, cumpliendo con lo establecido en el Objetivo Específico 1 (OE1).

#### 4.1.1 Resultados del modelo de detección de anomalías B787-8

Para la flota Boeing 787-8 se extrae un total de 941 datos por medio de la API de Flightradar24 asociados a operaciones de 9 aeronaves (desde marzo a mayo de 2025), los que luego del proceso de depuración y filtrado se reducen a 826 datos, en vista de que la variable **flight time** presentó casos sin información. Luego, los datos filtrados son aplicados al método de detección de anomalías K-Means para la definición de los cuatro clústeres como se describe en la metodología.

Según lo mencionado, en la Figura 3 se notan los grupos formados junto a sus respectivos centroides. Junto a esto se tiene además la Tabla 9 donde se desglosa la información asociada a cada grupo y su respectiva etiqueta según lo descrito anteriormente (punto 3.4).

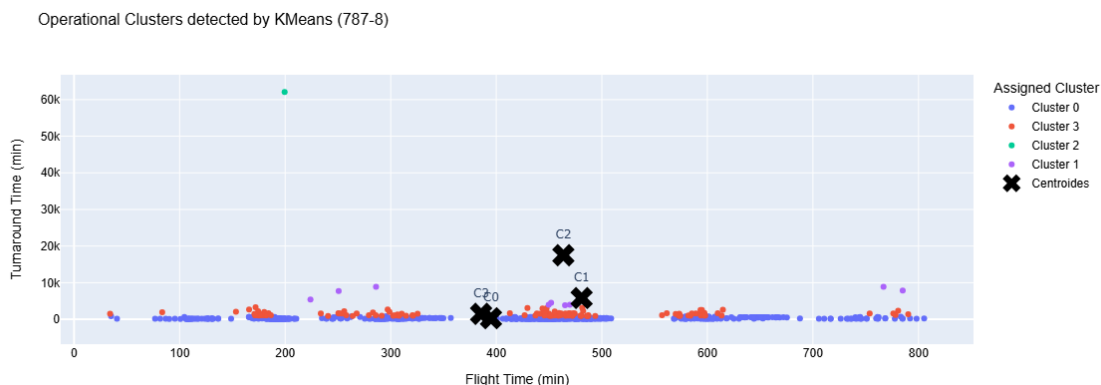


Figura 3: Clústeres flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025).

Tabla 9: Clasificación de clústeres operacionales Boeing 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025).

Clúster	Flight Time [min]	Turnaround Time [min]	Clasificación
0	395.04	292.96	Operación Normal
1	480.87	5797.88	Retraso Operativo / MRO Leve
2	463.57	17498.77	Evento Crítico / MRO Mayor
3	385.65	1471.18	Operación Normal Prolongada

Los resultados de la Tabla 9 indican que las operaciones etiquetadas como “Retraso Operativo / MRO Leve” se dan con detenciones entre vuelos cercanas a los 5797.88 minutos (alrededor de 4 días), lo que se asimila con un Mantenimiento Tipo A en vista de que este tiene una duración de 1 a 3 días, sin embargo, considerando que se analizan aeronaves wide-body estas pueden presentar un periodo más extenso de mantención.

En cuanto a las operaciones clasificadas como “Evento Crítico / MRO Mayor”, al tener detenciones de aproximadamente 12 días se puede considerar como un Mantenimiento Tipo C o Tipo D, según el periodo de inactividad que presente. Finalmente, con respecto a la clasificación “Operación Normal Prolongada”, se identifican detenciones cercanas a las 24 horas que, si bien podría ligarse a un Mantenimiento Tipo A también puede corresponder a un mantenimiento en línea o condiciones adversas que generan retrasos en los vuelos.

#### 4.1.2 Resultados del modelo de detección de anomalías B787-9

En cuanto a la flota Boeing 787-9 se inicia con 3679 datos que se reducen a 3385 debido al proceso de depuración y limpieza, donde los vuelos registrados se asocian a 26 aeronaves que corresponden a la totalidad de la flota con matrícula chilena. Nuevamente, aplicando el modelo de detección de anomalías se obtienen los clústeres mostrados en la Figura 4, los que se asocian con la información descrita en la Tabla 10.

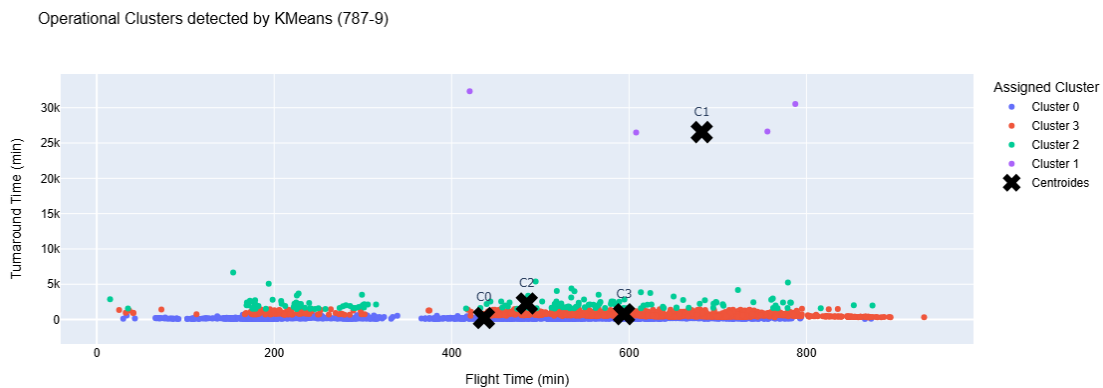


Figura 4: Clústeres flota 787-9 (periodo Marzo – Mayo 2025).

Tabla 10: Clasificación de clústeres operacionales Boeing 787-9 (periodo Marzo – Mayo 2025).

Clúster	Flight Time [min]	Turnaround Time [min]	Clasificación
0	436.49	221.46	Operación Normal
1	682.02	26555.43	Evento Crítico / MRO Mayor
2	484.80	2280.36	Retraso Operativo / MRO Leve
3	594.35	758.11	Operación Normal Prolongada

Desde la Tabla 10 se identifica como “Evento Crítico / MRO Mayor” operaciones con detenciones cercanas a los 18 días, asociándolo a Mantenimiento Tipo C o D según sea el caso. Mientras que, para la clasificación de “Retraso Operativo / MRO Leve” las detenciones son de aproximadamente 38 horas, asociado a un Mantenimiento Tipo A o en línea. Finalmente, la clasificación de “Operación Normal Prolongada” tiene detenciones cercanas a 12 horas, nuevamente implicando un mantenimiento en línea o condiciones adversas que retrasan los vuelos.

## 4.2 Dashboard de análisis de operaciones

Como resultado del procesamiento y modelado de los datos operacionales, se desarrolla un dashboard interactivo que da cumplimiento al Objetivo Específico 2 (OE2), orientado a facilitar el análisis visual y exploratorio de la eficiencia operacional de la flota. Esta herramienta es implementada utilizando la biblioteca **Streamlit** y se estructura en tres secciones funcionales según lo descrito en la metodología: ventana principal, análisis general de la flota y análisis individual por aeronave.

### 4.2.1 Ventana principal

Esta sección (Figura 5 y Figura 6) permite al usuario seleccionar tanto una flota específica como el rango de fecha a analizar, con lo cual se despliegan 4 visualizaciones. La primera, muestra la disponibilidad diaria de la flota, es decir, cuantas aeronaves realizaron al menos un vuelo por día en el periodo seleccionado. Luego, se presenta la distribución diaria de los vuelos según su clasificación, basado en los clústeres formados por el modelo de detección de anomalías.

En la segunda columna se incluye un DataFrame, que despliega el detalle de los vuelos contenidos en el intervalo analizado, permitiendo profundizar en aspectos específicos si el usuario lo requiere. Finalmente, se presenta un gráfico de actividad operacional por aeronave, que permite identificar comportamientos individuales, tales como aeronaves con desempeño bajo el promedio, horas totales de vuelo acumuladas, año de entrada en servicio, rutas operadas, motores de la aeronave, entre otros. Cabe recalcar que los resultados de esta figura se alinean a la información entregada en la Tabla 8.

Desde esta ventana principal, el usuario puede navegar hacia las otras dos secciones mediante botones de acceso directo ubicados al pie de la interfaz, uno dirigido al análisis general de la flota y otro al análisis individual por matrícula, facilitando una exploración secuencial y personalizada de los resultados.

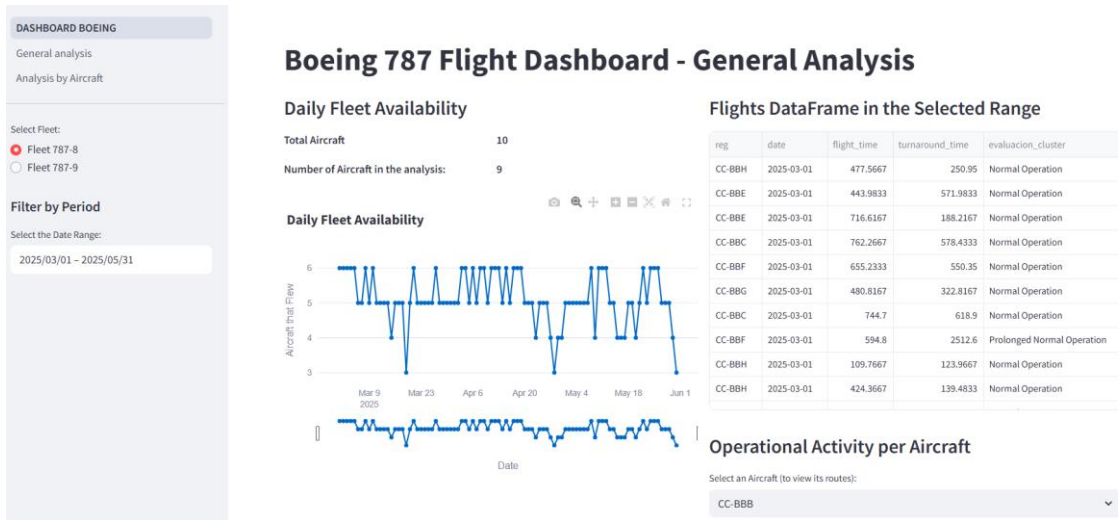


Figura 5: Dashboard principal según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 1).

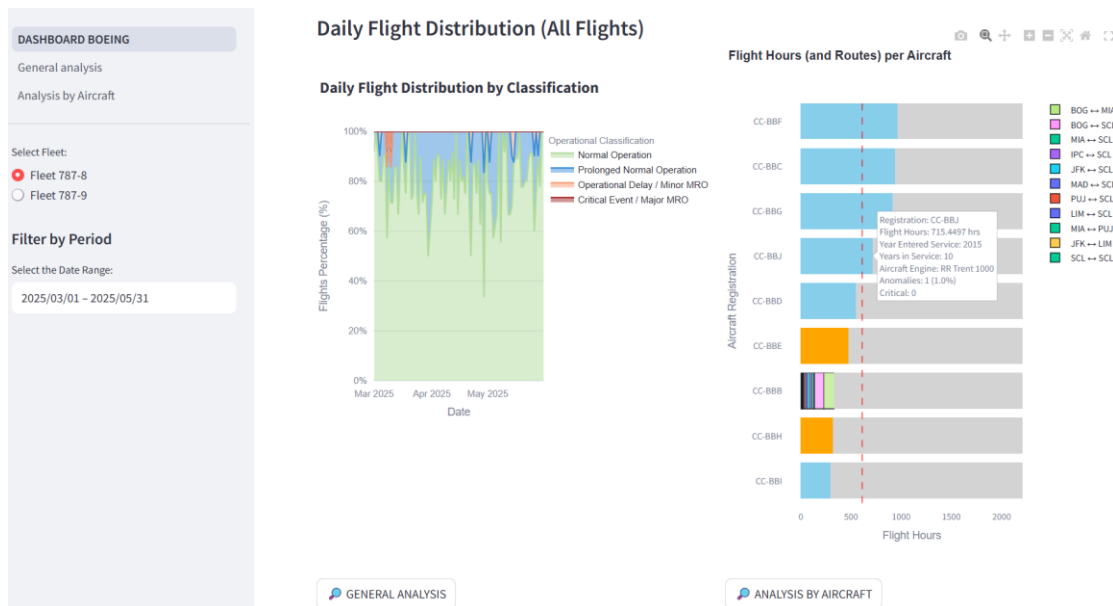


Figura 6: Dashboard principal según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 2).

#### 4.2.2 Análisis general de operaciones

En esta sección del dashboard (Figura 7 y Figura 8) se presentan visualizaciones que sintetizan el comportamiento general de la flota. En primer lugar, se muestra la distribución global de vuelos según lo clasificado con el modelo K-Means, destacando los eventos asociados a las etiquetas MRO leve o mayor. A esto lo siguen las 5 aeronaves más críticas, las cuales son identificadas a partir de un índice compuesto de criticidad que considera la proporción de vuelos anómalos, la magnitud de los tiempos en tierra (TAT) y la cantidad de días de inactividad operacional (según Tabla 6).

En complemento, se incorpora un mapa de rutas donde se destacan aquellas que presenten una alerta a la flota, ya sea por recurrencia de eventos anómalos o por concentraciones de

detenciones significativas (según Tabla 7). Posteriormente, se incorporan las 5 rutas más críticas de acuerdo con el índice de criticidad y finalmente un despliegue de la salud operacional de la flota en base a los indicadores mencionados, facilitando una visión diagnóstica de alto nivel para la toma de decisiones estratégicas.

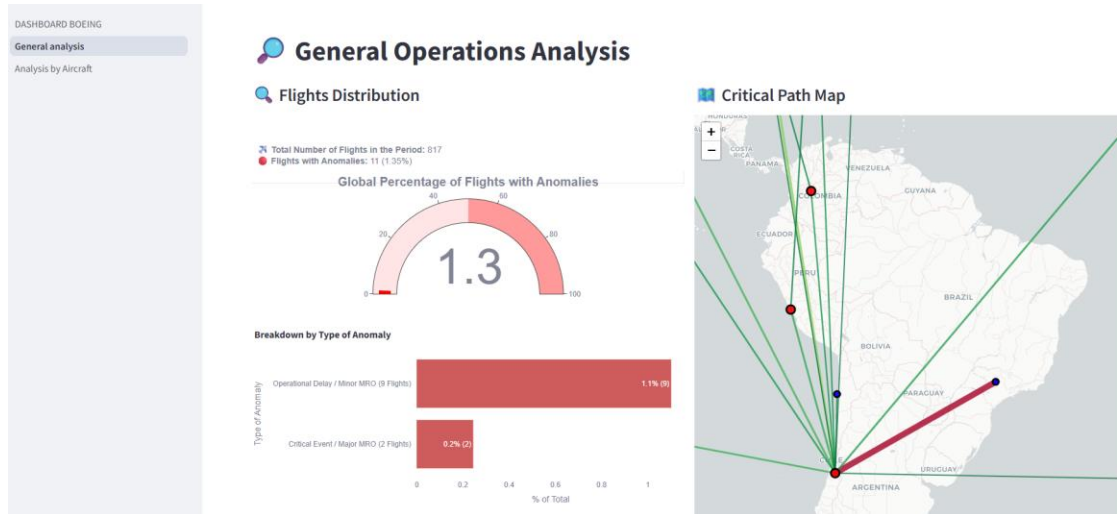


Figura 7: Ventana de análisis general de operaciones según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 1).

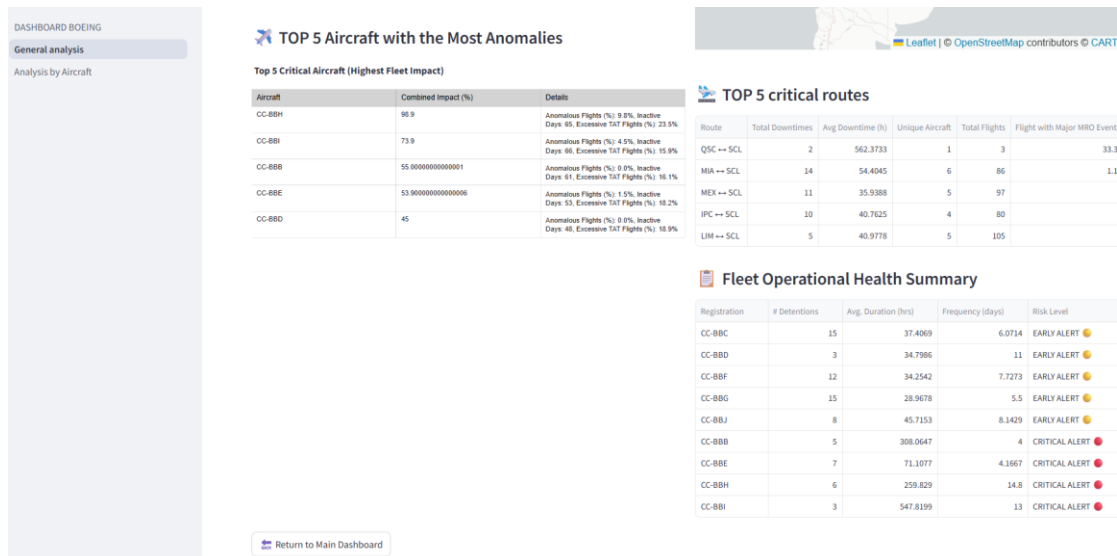


Figura 8: Ventana de análisis general de operaciones según resultados Boeing 787-8, periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 2).

### 4.2.3 Análisis por aeronave

Para el análisis por aeronave (Figura 9 y Figura 10) se comienza con la selección de matrícula, que también puede ser seleccionada desde la ventana principal, con lo que se despliega información de KPIs de rendimiento, tales como: TAT promedio, clasificación de sus vuelos, horas de vuelo acumuladas y el total de vuelos realizados, cada uno comparado con el rendimiento de la flota con la finalidad de evaluar el nivel de criticidad.

Además, se incorpora un mapa de rutas operadas por la aeronave, diferenciando en escala de color (rojo-verde) aquellos trayectos críticos, considerando métricas como el tiempo en tierra y la recurrencia de eventos anómalos. A continuación, el dashboard presenta un análisis visual de la actividad operacional de la aeronave, donde se grafican los tiempos de vuelo y detención por fecha, destacando estos últimos mediante una escala cromática que facilita la identificación de patrones atípicos.

Por otro lado, el panel incluye también un DataFrame con vuelos que superan un umbral de detención definido por el usuario, junto con una lista de rutas implicadas. Finalmente, se entrega un resumen estadístico que incluye el tiempo promedio de detención, su frecuencia y las horas de vuelo acumuladas, complementado con una tabla que detecta discrepancias entre el aeropuerto de llegada y el siguiente de salida, útil para identificar posibles vacíos de información o errores en los registros históricos.

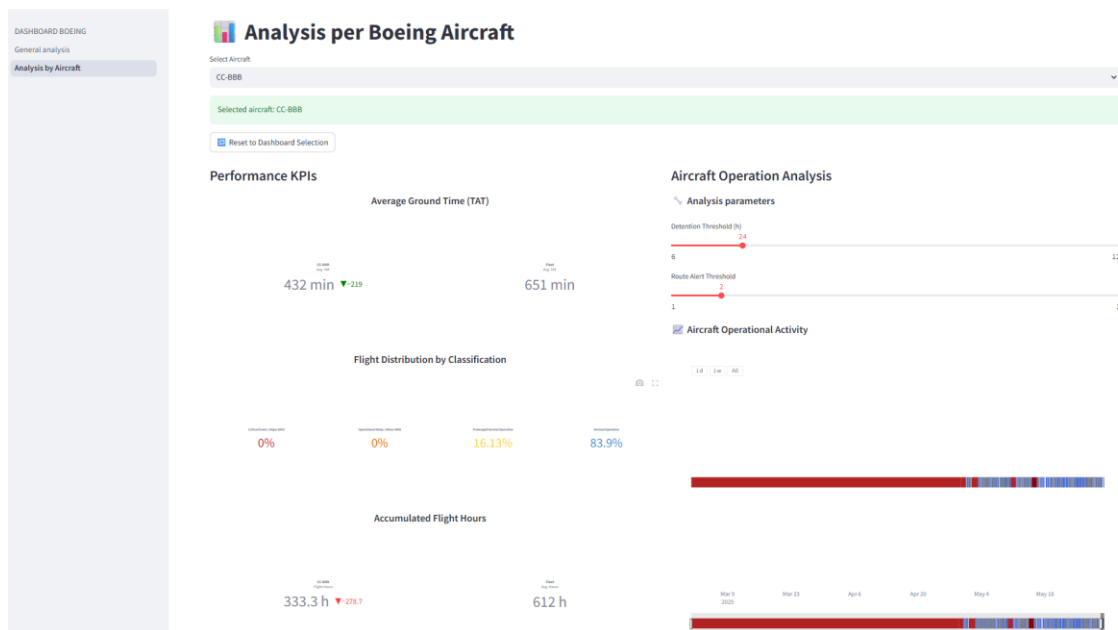


Figura 9: Ventana de análisis por aeronave (CC-BBB Boeing 787-8), según periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 1).

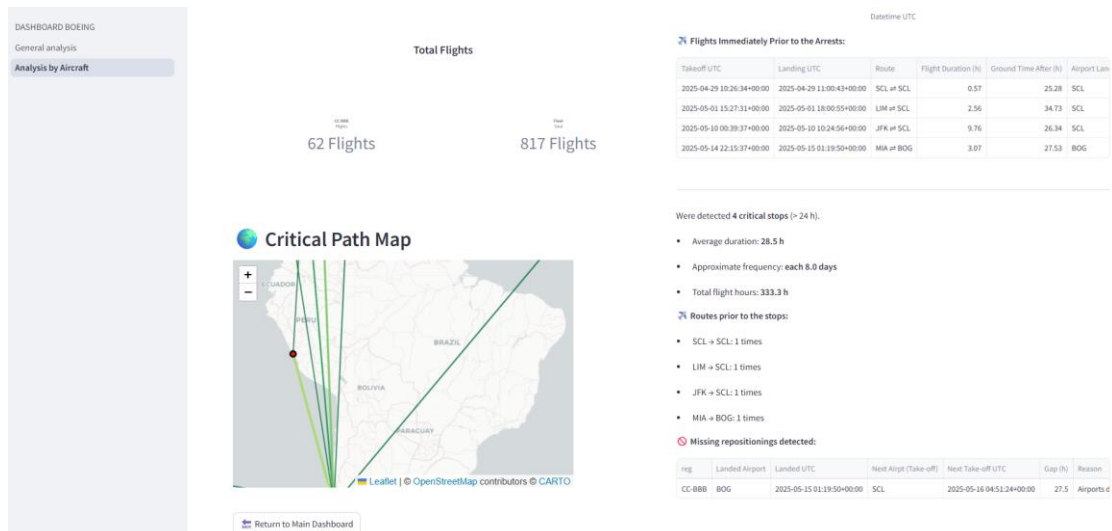


Figura 10: Ventana de análisis por aeronave (CC-BBB Boeing 787-8), según periodo Marzo – Mayo 2025 (Parte 2).

### 4.3 Detección de comportamientos anómalos

Para cumplir con el Objetivo Específico 3 (OE3), se analiza el comportamiento operacional de las flotas a partir de las visualizaciones e indicadores generados en el dashboard interactivo. Este análisis permite identificar patrones de operación fuera de norma, los cuales pueden estar asociados a distintos tipos de eventos de mantenimiento (MRO), tales como detenciones prolongadas, secuencias operativas irregulares o TAT atípicos. De este modo, se facilita la detección de comportamientos anómalos de interés técnico, permitiendo vincular las desviaciones observadas con posibles necesidades de mantenimiento preventivo, correctivo o no programado.

#### 4.3.1 Operaciones Boeing 787-8

Analizando su comportamiento, según la Figura 11 se destaca que en su mayoría las operaciones son normales, sin embargo, se nota la intermitencia de operaciones fuera de norma, que según lo mostrado en el dashboard de análisis general (Figura 7) corresponden a un 1.3% del total de vuelos, lo que no representa un riesgo significativo a la flota considerando que solo se asocia a 11 vuelos.

### Daily Flight Distribution by Classification

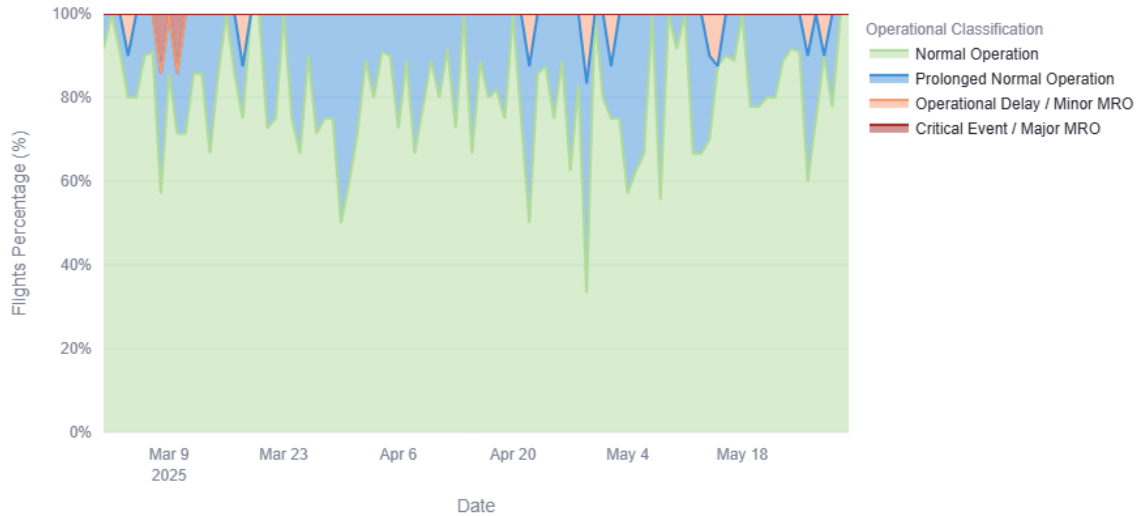


Figura 11: Distribución diaria de vuelos por clasificación flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025).

Por otro lado, se tiene la disponibilidad de la flota (Figura 12) donde se nota que, si bien durante el periodo existieron 9 aeronaves activas, se tiene como máximo un uso de 6 y mínimo de 3, indicando ineficiencia en su programa de utilización. Al verificar, se nota que esto se debe a que durante el periodo de marzo y abril aeronaves como CC-BBB y CC-BBI se encontraron totalmente inactivas, lo que puede indicar que se encontraban en actividades MRO, representando una señal de alerta en vista de la ineficiente planificación a menos que correspondan a mantenimientos no programados por fallas.

### Daily Fleet Availability

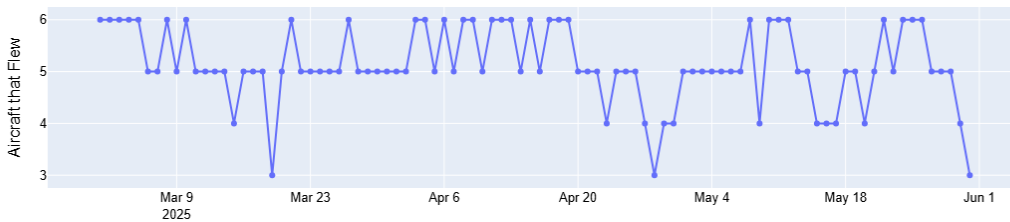


Figura 12: Disponibilidad diaria flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025).

En cuanto a la actividad operacional (Figura 13) se muestra que más del 50% de la flota operó por debajo del promedio (612 horas), lo que resulta limitado considerando que se analizan 3 meses. Además, según la información dispuesta por Flightradar24 existen 10 aeronaves en la flota, sin embargo, la aeronave CC-BBA no presenta actividad durante todo el periodo analizado, siendo un indicio de que se encontraba en actividades de mantenimiento, específicamente en un Overhaul.

Se visualiza también información de los motores que utilizan las aeronaves, de lo cual se determina que solo las aeronaves CC-BBB y CC-BBC utilizan motores General Electric

Genx y las demás Rolls-Royce (Airfleets, n.d.), donde este último correspondiente al motor crítico declarado por los stakeholders. Adicionalmente, según lo observado en el gráfico, si bien no existen aeronaves críticas, se muestran dos que presentan al menos un evento crítico (MRO mayor), para las que es relevante realizar un análisis individual.

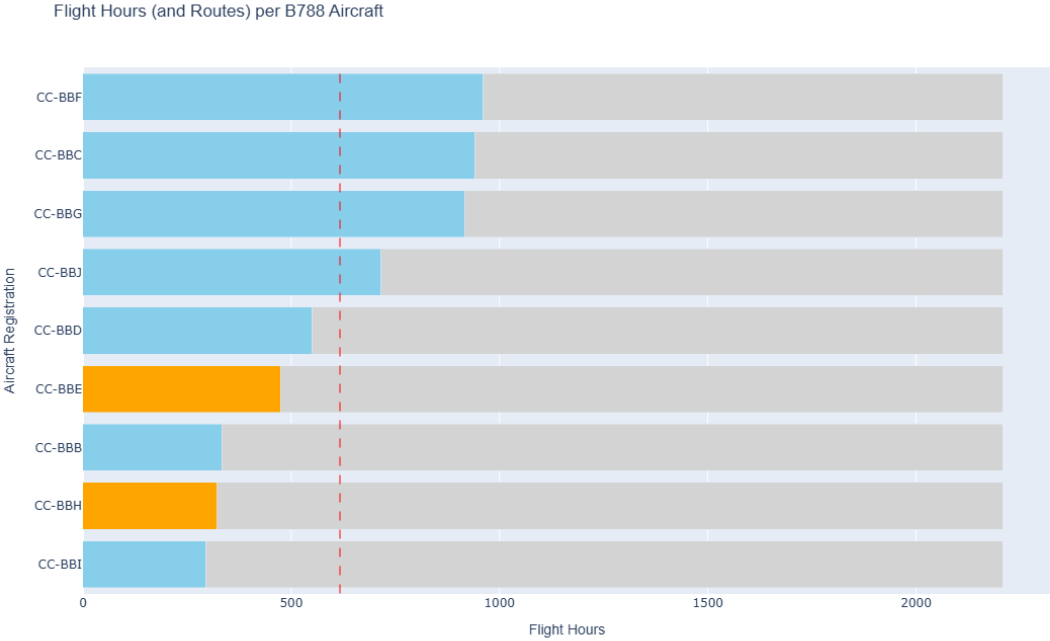


Figura 13: Actividad operacional por aeronave flota 787-8 (periodo Marzo – Mayo 2025).

4.3.1.1 Rutas críticas flota Boeing 787-8

Para conocer las rutas críticas identificadas según el criterio presentado en la metodología, se tiene el mapa de la Figura 14, donde destaca **Santiago (SCL) – São Carlos (QSC)**. A esto se suma la Tabla 11, donde se nota que este trayecto fue realizado 3 veces con 2 detenciones significativas asociadas a una aeronave. Según LATAM Airlines, en QSC existe un CMA que comúnmente es utilizado para mantenimiento pesado (LATAM Airlines, n.d.-d) por lo que la aeronave involucrada se pudo encontrar en este proceso de mantención. Además, al ser una ruta operacionalmente sensible es probable que únicamente se realice para procesos logísticos de mantenimiento, dado el escaso número de operaciones identificadas durante el periodo.

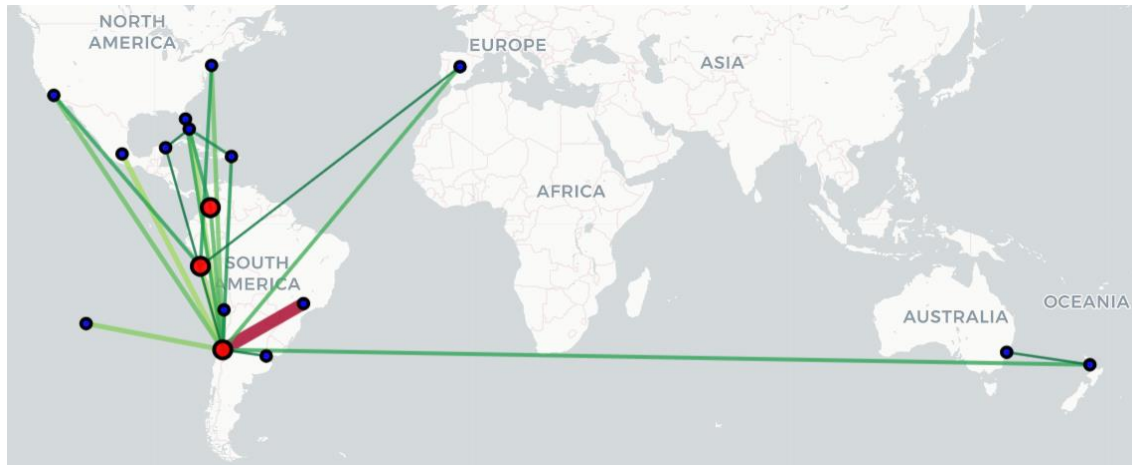


Figura 14: Mapa rutas críticas flota 787-8.

Por otro lado, se tiene la segunda ruta más crítica correspondiente a **Miami (MIA) – Santiago (SCL)** con 14 detenciones (de un total de 86 vuelos) y un tiempo promedio de 54 horas, obteniendo una criticidad de 24%. Se determina que la ruta debe ser monitoreada dado que comúnmente se realiza en 8 horas de vuelo, lo que no representa una exigencia operativa para aeronaves diseñadas para realizar este tipo de trayecto. Si bien, solo se estudia un periodo de 3 meses, se debe extender el horizonte temporal para revelar la criticidad operativa con mayor precisión. De lo que, al obtenerse un valor significativamente mayor, deberán evaluarse las causas subyacentes.

En cuanto a las rutas **México (MEX) – Santiago (SCL)** e **Isla de Pascua (IPC) – Santiago (SCL)** se tienen 11 y 10 detenciones respectivamente con tiempos promedios de hasta 40 horas, implicando un nivel medio de criticidad. Al no presentar eventos graves, pero si recurrencias significativas para la flota, se debe gestionar a tiempo estas detenciones en vista de que pueden derivar pérdidas económicas para la aerolínea. Finalmente, la ruta **Lima (LIM) – Santiago (SCL)** solo presenta 5 detenciones de los 105 vuelos realizados, lo cual no indica una alerta operacional. Además en vista de que la aerolínea cuenta con talleres de motor en el lugar (LATAM Airlines, n.d.-b), puede vincularse a estas actividades.

Tabla 11: TOP 5 rutas críticas flota 787-8.

Ruta	Cantidad detención	Tiempo promedio detención	Vuelos totales	Vuelos MRO mayor (%)	Vuelos con potencial MRO (%)	Aeronaves detención	Criticidad
QSC-SCL	2	562.37	3	33.33	66.66	1	0.90
MIA-SCL	14	54.40	86	1.16	4.65	6	0.24
MEX-SCL	11	35.93	97	0	1.03	5	0.15
IPC-SCL	10	40.76	80	0	1.25	4	0.14
LIM-SCL	5	40.97	105	0	0	5	0.13

Para finalizar, aunque estas rutas no presentan un riesgo inmediato es necesario monitorear las detenciones para que a lo largo del tiempo no involucren un problema mayor en las operaciones, sin embargo, al evaluar un corto periodo es significativa la presencia de detenciones en Santiago.

#### 4.3.1.2 Aeronaves críticas flota Boeing 787-8

Según el criterio mencionado en la metodología se clasifican las 5 aeronaves más críticas (Tabla 12), de la cual se observan aquellas con detenciones en tierra superiores a 48 días. En vista de lo mencionado, se continúa con un análisis individual de aquellas que posean un impacto combinado mayor a 50% para evaluar su comportamiento operacional.

Tabla 12: TOP 5 aeronaves críticas flota 787-8.

Aeronave	Impacto Combinado (%)	Detalle
CC-BBH	96.90	Vuelos anómalos: 9.8% Días Inactivos: 65 Vuelos con TAT excesivo: 23.5%
CC-BBI	73.90	Vuelos anómalos: 4.5% Días Inactivos: 66 Vuelos con TAT excesivo: 15.9%
CC-BBE	55.00	Vuelos anómalos: 0% Días Inactivos: 61 Vuelos con TAT excesivo: 16.1%
CC-BBB	53.90	Vuelos anómalos: 1.5% Días Inactivos: 53 Vuelos con TAT excesivo: 18.2%
CC-BBD	45.00	Vuelos anómalos: 10% Días Inactivos: 48 Vuelos con TAT excesivo: 18.9%

Comenzando con la aeronave **CC-BBH**, según la Figura 15, se da a conocer que esta posee un TAT promedio de 2191 minutos, siendo hasta 3 veces el promedio general (651 min). Por otro lado, al analizar su actividad operacional (Figura 16) y considerando detenciones mayores a 24 horas (involucrando mantenimiento tipo A, C o D), se detectan 6 inactividades entre 26 a 1034 horas en tierra.

Analizando, se ve un comportamiento poco común a inicios de sus operaciones, teniendo su primera detención en SCL (129 horas), posteriormente se traslada a QSC donde permanece inactivo durante 43 días, para finalmente retornar y detenerse durante 4 días. De esto se deduce que durante la estadía en Brasil se realizó un MRO Tipo C o D, para finalizar con actividades menores en Santiago.

Un punto importante identificado durante el análisis es que se presentan 2 detenciones en SCL de 130 horas, lo cual se asociaría a un MRO Tipo A. sin embargo, según lo mencionado anteriormente, este tipo de mantenimiento se debe realizar al acumular entre 400 y 600 horas de vuelo, de lo cual la aeronave solo acumuló 322 horas durante todo el periodo de estudio, indicando posibles fallas prematuras.



Figura 15: Comparación TAT CC-BBH vs flota.

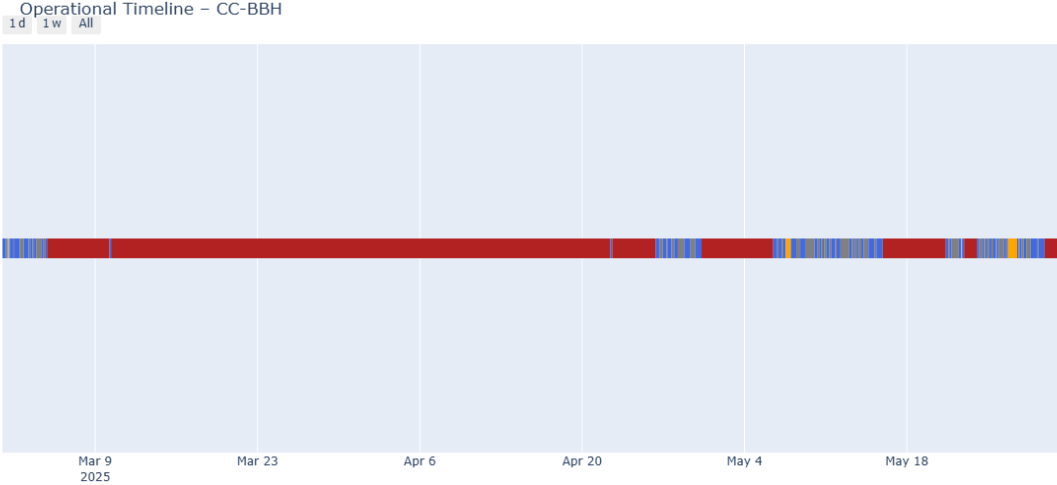


Figura 16: Actividad operativa CC-BBH.

En cuanto a la aeronave **CC-BBI** esta presenta un TAT de 546 minutos, sin embargo, al analizar su actividad (Figura 17) se nota inactiva durante marzo y abril, de lo que al no tener información del vuelo previo no se asocia un TAT durante la detención. No obstante, se identifica que el primer vuelo inicia en Santiago, indicando que durante el periodo inactivo estuvo en actividades de mantención, específicamente, en un MRO mayor.

Adicionalmente se notan otras dos detenciones, ambas asociadas a la ruta Miami-Santiago cada una con una permanencia aproximada de 66 horas y una frecuencia de 14 días entre eventos. Este patrón sugiere ejecuciones de un MRO Tipo A, sin embargo, dado que la aeronave acumuló 295 horas de vuelo en el periodo analizado, se infiere que estas detenciones pudieron deberse a fallas prematuras u otras necesidades operativas.

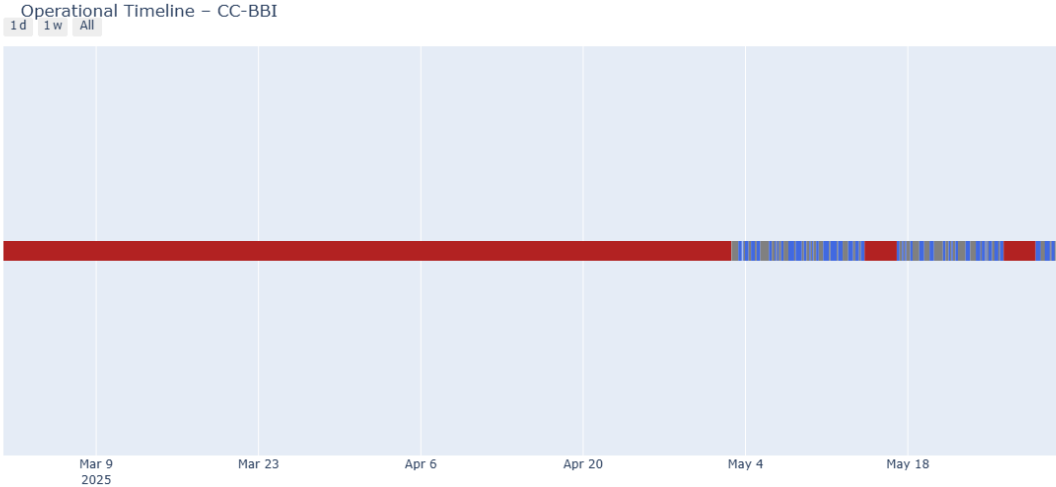


Figura 17: Actividad operativa CC-BBI.

Por otro lado, **CC-BBB** tiene un comportamiento similar a CC-BBI, con un periodo de inactividad significativo (Figura 18) y en consecuencia un TAT (432 min) inferior al promedio. De igual modo el primer vuelo parte desde Santiago, implicando un MRO Mayor, mientras que de las demás detenciones identificadas se distinguen tres en Santiago y una en Bogotá, donde las relacionadas a SCL fueron de 25 a 34 horas, pudiendo ser un MRO Tipo A o en línea.

En cuanto a la detención en Bogotá, desde la información desglosada en el dashboard se nota incongruencia entre los lugares de aterrizaje y despegue del siguiente vuelo, lo cual al ser verificado con Flightradar24, se nota que se realizó el vuelo BOG-SCL (Figura 19), implicando que la detención identificada no es significativa para el análisis y que se derivó de las pérdidas en los datos por efectos de la API utilizada.

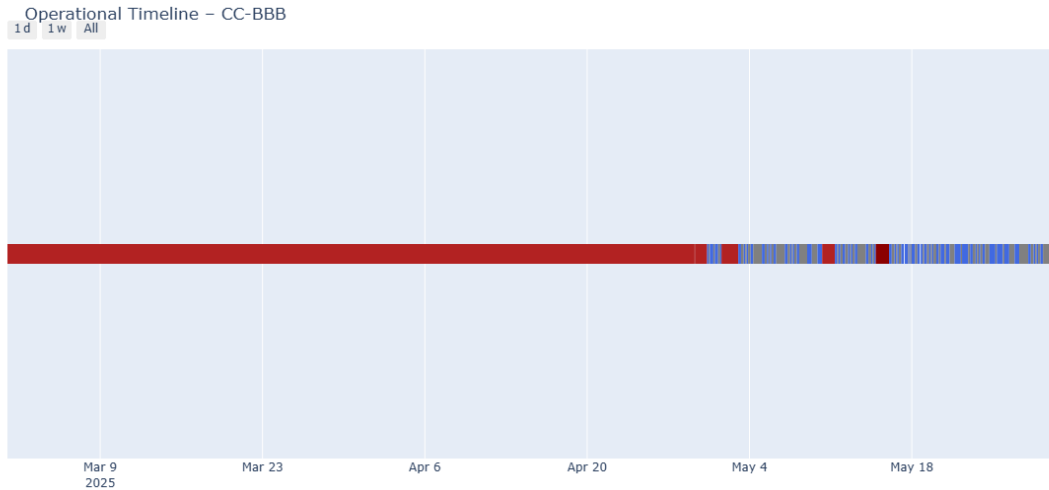


Figura 18: Actividad operativa CC-BBB.

16 May 2025	Santiago (SCL)	Bogota (BOG)	LA578	5:37	00:30	00:51	05:40	Landed 05:28
15 May 2025	Bogota (BOG)	Santiago (SCL)	LA579	5:03	00:45	01:23	07:35	Landed 07:26
14 May 2025	Miami (MIA)	Bogota (BOG)	LA579	3:04	17:45	18:15	19:58	Landed 20:19

Figura 19: Vuelos no identificado CC-BBB.

Finalmente, **CC-BBE** posee un TAT (789 min) superior al promedio de la flota. Según la Figura 20 se nota una detención prolongada luego del último vuelo, de lo que, al no tener un siguiente despegue no se identifica un TAT, indicando que este podría ser mayor al mencionado. En cuanto al último vuelo realizado por la aeronave corresponde a la ruta Santiago (SCL) - New York (JFK), sin embargo, en New York no existen CMA de la aerolínea. Al verificar con Flightradar24 se determina que se realizó un vuelo de retorno para luego mantenerse en SCL durante más de 1 mes, indicando un MRO mayor.

En cuanto a las demás detenciones se identifican seis en Santiago y uno en Isla de Pascua, sin embargo, este último no coincide con el siguiente despegue lo cual es verificado con Flightradar24, notándose el vuelo de retorno y por tanto implicando la no criticidad de la detención. En cuanto a las asociadas a Santiago, estas tienen permanencias entre 26 y 291 horas (12 días) las que tienden a ocurrir cada 7 u 8 días, implicando mantenimiento Tipo A (y Tipo C para el periodo prolongado). Sin embargo, la aeronave acumula alrededor de 90 horas de vuelo entre detenciones, lo que puede indicar casos aislados de fallas prematuras, no obstante, se debe considerar conocimiento experto para analizar el comportamiento.

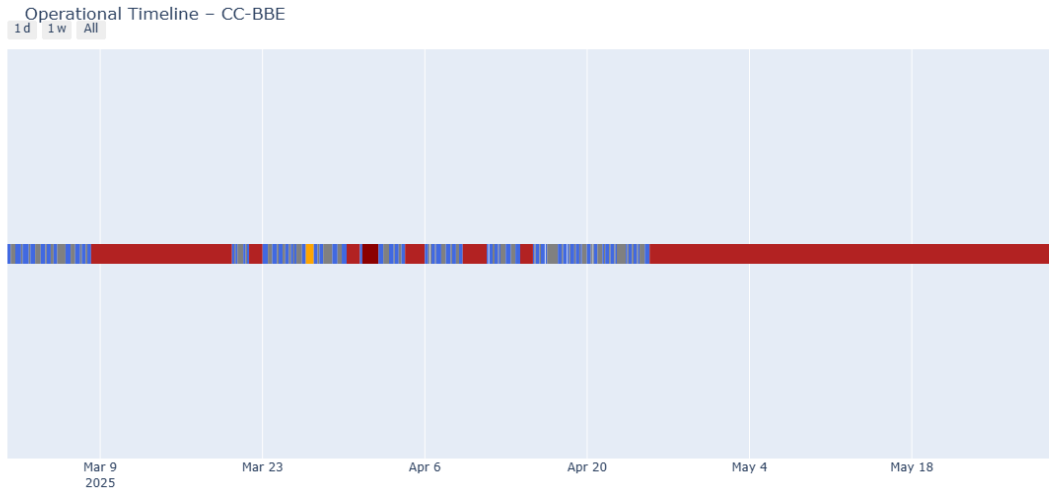


Figura 20: Actividad operativa CC-BBE.

En general, se observa ineficiencia operativa por las detenciones involucradas, particularmente durante los meses de marzo y abril. En este periodo, las aeronaves CC-BBH, CC-BBI, CC-BBB y CC-BBA (sin registros de vuelo) presentaron inactividades significativas, a lo que se adhiere la aeronave CC-BBE con una detención de 12 días en marzo. En conjunto, esto implica que un 50% de la flota se mantuvo inactivas simultáneamente.

Esta situación es relevante desde el punto de vista operativo, ya que afecta la disponibilidad e impacta en la eficiencia debido a que se busca una planificación de mantenimiento optimizada. Sin embargo, la inactividad simultánea pudo deberse a un mantenimiento no programado, considerando que la mayoría de las aeronaves tuvieron un MRO Tipo A antes de tiempo, implicando posibles problemas en los motores según lo declarado por los stakeholders.

#### 4.3.1.3 Caso de estudio: Análisis aeronave VT-ANB

Simultáneamente se analiza el comportamiento de la aeronave de Air India que sufrió un accidente durante el mes de junio (LA NACION, 2025b), la cual corresponde a un modelo Boeing 787-8 con motores General Electric GENx (similar a las aeronaves CC-BBB y CC-BBC). Se menciona que la aeronave acumulaba alrededor de 40,000 horas de vuelos y cerca de 7400 ciclos al momento del incidente (Schofield & Flottau, 2025), sin embargo, no se conoce con exactitud la causa detrás de la falla.

Su comportamiento operacional puede notarse en la Figura 21, donde se observan densos segmentos de vuelo sugiriendo una alta utilización sin evidencia de detenciones prolongadas, indicando la ausencia de un MRO mayor durante el periodo analizado. Durante este periodo la aeronave acumuló 455 horas en tierra y 1061 horas de vuelo, las que se distribuyeron en 151 vuelos. De esta además se identifican 13 detenciones con duraciones de 25 a 104 horas, en su mayoría realizadas en el aeropuerto DEL (New Delhi, India), el cual es uno de los principales hubs de la aerolínea y uno de los aeropuertos más importantes en India (India eVisa, n.d.).

Este patrón se compara con el de la aeronave CC-BBC de la flota B787-8 (Figura 22) la cual registró 15 detenciones, acumulando 554 horas en tierra y 940 de vuelo. Esta comparación permite evidenciar una utilización intensa por parte de la aeronave india, que voló 121 horas más que la aeronave chilena y por lo tanto implicando menor permanencia en tierra, lo que puede indicar planificaciones de mantenimiento ajustadas y actividades más restringidas.

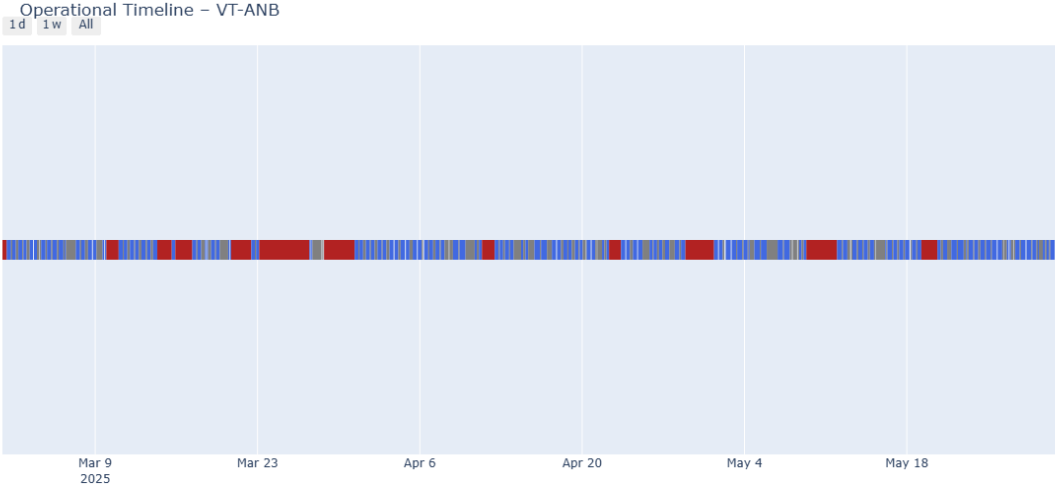


Figura 21: Actividad operativa aeronave VT-ANB (Air India).

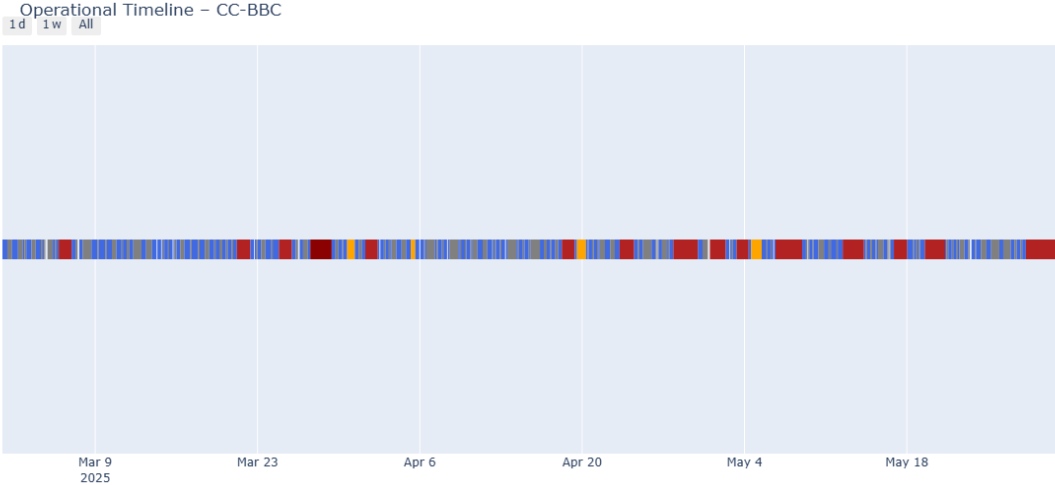


Figura 22: Actividad operativa CC-BBC.

### 4.3.2 Operaciones Boeing 787-9

En cuanto a la flota 787-9, según la Figura 23 se nota una presencia constante de operaciones asociadas a MRO leve o mayor, de lo cual según la Figura 24 se puede notar que existen 150 vuelos con anomalías de un total de 3359, con 4 de ellos clasificados como MRO mayor. Considerando que para la flota B788 solo se tuvieron 11 vuelos anómalos, se determina que este es un valor elevado para ser aeronaves similares, sin embargo, se debe analizar con otras visualizaciones para comprender el comportamiento operacional.

### Daily Flight Distribution by Classification

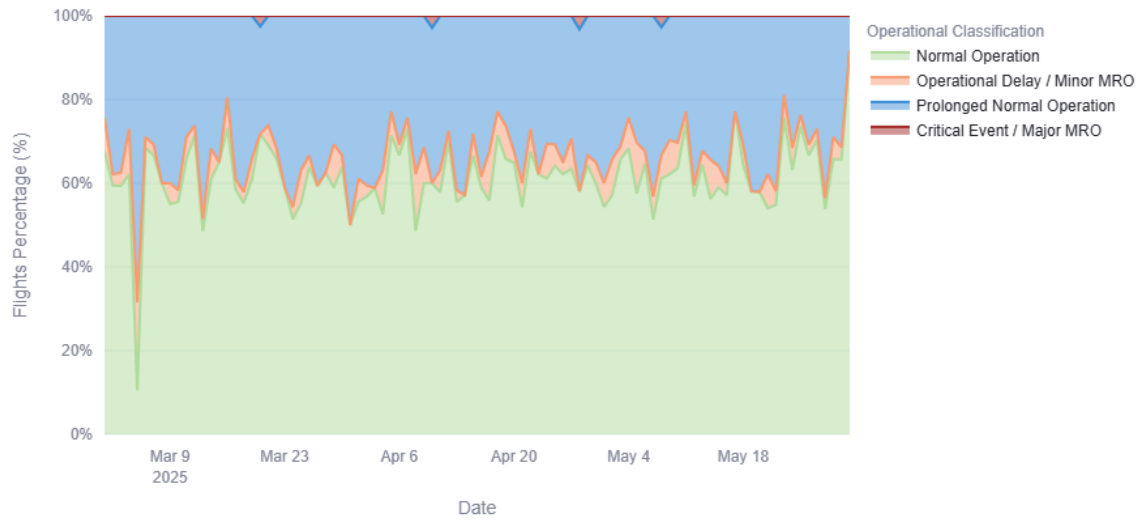
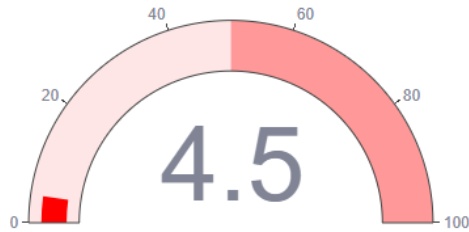


Figura 23: Distribución diaria de vuelos por clasificación flota 787-9.

✈ Total Number of Flights in the Period: 3359  
 ● Flights with Anomalies: 150 (4.47%)

### Global Percentage of Flights with Anomalies



### Breakdown by Type of Anomaly

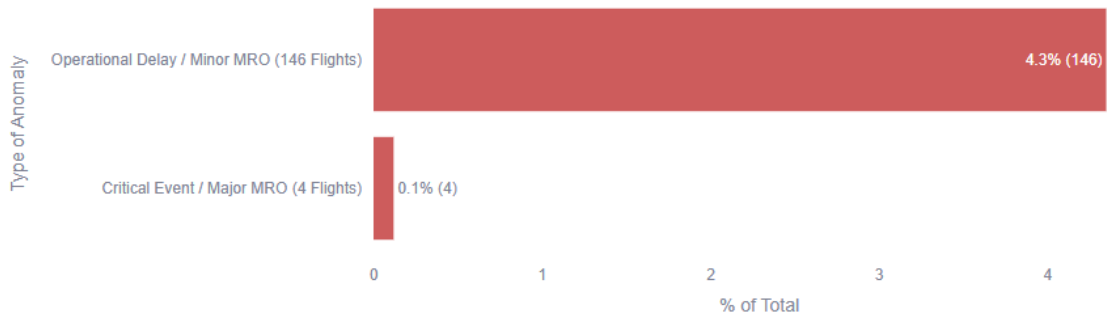


Figura 24: Distribución vuelos flota 787-9.

En cuanto a la disponibilidad de la flota, según Flightradar24 se tienen 26 aeronaves con matrícula chilena. A través de la Figura 25 se nota una variación de uso entre su totalidad

hasta un mínimo de 10 aeronaves. Este último dato se considera como una alerta en la planificación, sin embargo, debido a que en la visualización se consideran los despegues, esto indica que algunas aeronaves se encontraban aterrizando y por lo tanto permaneciendo en tierra el resto del día.

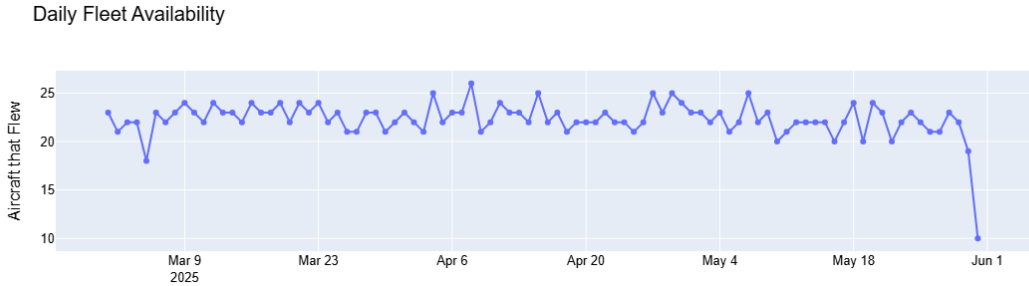


Figura 25: Disponibilidad diaria flota 787-9.

Continuando con el análisis, de la Figura 26 se puede notar la criticidad de 4 aeronaves. Con un promedio de vuelo de 1052 horas, 10 aeronaves de la flota operaron bajo este valor, 8 de ellas realizando operaciones desde 2016 donde 4 son parte de las aeronaves críticas identificadas, implicando una alerta en los modelos que comenzaron a operar en el año mencionado. Cabe recalcar que la totalidad de la flota 787-9 utiliza motores Rolls-Royce.

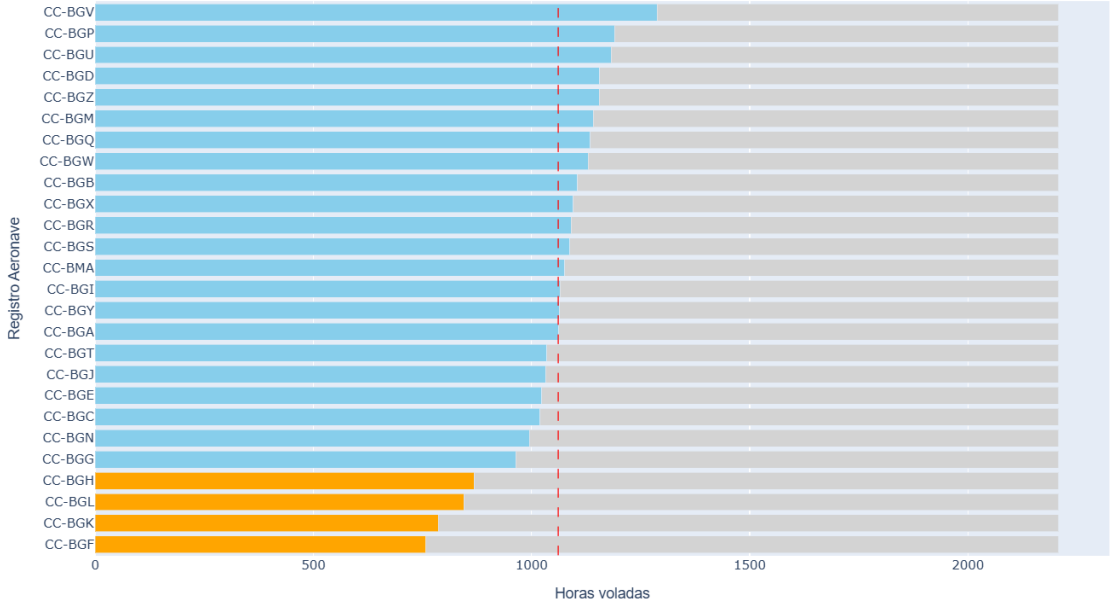


Figura 26: Actividad operacional por aeronave flota 787-9.

4.3.2.1 Rutas críticas flota Boeing 787-9

Las rutas de la flota 787-9 pueden notarse en la Figura 27, destacando la criticidad de **Madrid (MAD) – Abu Dabi (AUH)**, en vista de que se realizó 2 veces con un tiempo de inactividad prolongado en una de ellas (Tabla 13). La detención en AUH genera cierta incertidumbre, ya que no existe registro de que LATAM Airlines cuente con una base de mantenimiento en el lugar, no obstante, se menciona que el mantenimiento programado de

la flota Dreamliner (787) se realiza normalmente en el sector (AVIACIONLINE, 2024). Además, la aerolínea menciona que el mantenimiento pesado de sus motores se lleva a cabo en instalaciones certificadas por el fabricante (LATAM Airlines, n.d.-b), a lo que se suman los acuerdos realizados entre Rolls-Royce y Sanad Aerotech (Mubadala, 2019).

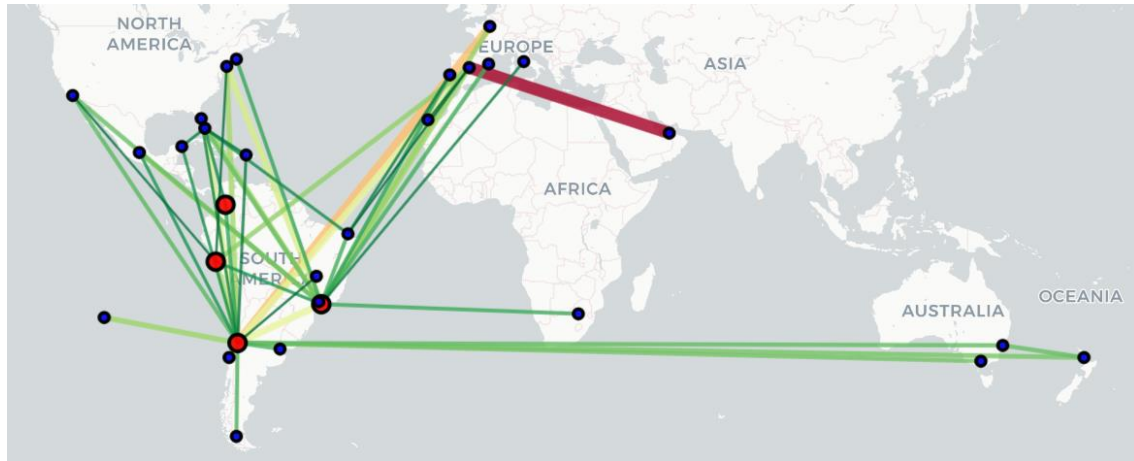


Figura 27: Mapa rutas críticas flota 787-9.

Desde la Tabla 13 también se nota la ruta **Madrid (MAD) – Santiago (SCL)**, la cual presenta una criticidad de 41% considerando que tuvo 16 detenciones con un promedio de 97 horas entre ellas. Al verificar la información con los datos disponibles se nota que estas inactividades se llevan a cabo en Santiago, lo que indica que al ser un vuelo de larga distancia (alrededor de 13 horas de vuelo) que involucra ciclos de vuelos y uso de sistemas críticos prolongados (motores y presurización), eleva las probabilidades de requerir inspecciones post-vuelo. Sin embargo, considerando que un 7.6% del total de vuelos son detenciones, esto indicaría que pueden deberse a mantenimientos programados o posibles fallas menores.

Aunque la ruta MAD – SCL presenta vuelos prolongados, se esperaría que trayectos como como Santiago – Auckland (AKL) o Santiago – Sídney (SYD) presenten vuelos aún más largos según lo mostrado en el mapa de rutas, no obstante, estas rutas generalmente varían entre 11 a 13 horas de vuelo. Esta diferencia puede atribuirse a la congestión del espacio aéreo europeo lo que implica trayectorias menos directas y mayores tiempo de espera, así como condiciones de vuelos favorables en las rutas transpacíficas que contribuye en la disminución del tiempo de vuelo y el consumo durante su transcurso.

Se identifican además como rutas críticas **São Paulo (GRU) – Santiago (SCL)** y **São Paulo (GRU) – New York (JFK)**, las que no presentan eventos críticos, pero si concentran un alto número de detenciones, lo que se puede asociar a que São Paulo corresponde a un Hub operacional de la aerolínea, implicando escalas de vuelo. Por otro lado, al tenerse una relación con Santiago para la primera ruta, esto puede indicar actividades MRO luego de realizar rutas prolongadas, mientras que, New York se consideraría por el tráfico del lugar al ser el aeropuerto más grande de Estado Unidos.

Finalmente, la ruta **París (CDG) – Santiago (SCL)** corresponde a un evento aislado, en vista de que durante el periodo analizado solo se identificó un vuelo, por lo que no es posible

establecer conclusiones robustas, sin embargo, debe ser monitoreada en caso de repetirse el patrón operacional al expandir el periodo de estudio.

Tabla 13: TOP 5 rutas críticas flota 787-9.

Ruta	Cantidad detención	Tiempo promedio detención	Vuelos totales	Vuelos MRO mayor (%)	Vuelos con potencial MRO (%)	Aeronaves detención	Criticidad
AUH-MAD	1	538.91	2	50	50	1	0.62
MAD-SCL	16	96.75	210	0.95	7.14	11	0.41
GRU-SCL	18	39.88	242	0	6.61	13	0.21
CDG-SCL	1	33.26	1	0	100	1	0.20
GRU-JFK	15	39.92	156	0	9.62	10	0.16

#### 4.3.2.2 Aeronaves críticas flota Boeing 787-9

En cuanto a las aeronaves críticas de la flota Boeing 787-9 se tiene la Tabla 14, donde se presentan las destacadas desde la Figura 26 y además la matrícula CC-BGN debido a su porcentaje de vuelos anómalos y cantidad de días inactiva. Por lo mencionado, se continúa con un análisis individual de aquellas aeronaves destacadas desde la actividad operacional de la flota.

Tabla 14: TOP 5 aeronaves críticas flota 787-9.

Aeronave	Impacto Combinado (%)	Detalle
CC-BGK	84.70	Vuelos anómalos: 5.2% Días Inactivos: 30 Vuelos con TAT excesivo: 23.7%
CC-BGL	84.60	Vuelos anómalos: 6.5% Días Inactivos: 29 Vuelos con TAT excesivo: 19.6%
CC-BGF	82.20	Vuelos anómalos: 7.5% Días Inactivos: 26 Vuelos con TAT excesivo: 21.5%
CC-BGH	77.60	Vuelos anómalos: 5.6% Días Inactivos: 27 Vuelos con TAT excesivo: 21.5%
CC-BGN	71.70	Vuelos anómalos: 8.0% Días Inactivos: 22 Vuelos con TAT excesivo: 17.6%

En primer lugar, la aeronave **CC-BGK** presentó un TAT promedio de 862 minutos (Figura 28), superior al de la flota de 518 minutos. Desde su actividad (Figura 29) se destacan cinco detenciones entre 40 y 539 horas, cuatro realizadas en SCL y la más prolongada en AUH (Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos), correspondiente a la ruta crítica identificada en el mapa (Figura 27).

Según lo mencionado anteriormente y lo señalado por LATAM Airlines, el mantenimiento pesado de los motores se realiza en talleres externos certificados por la aerolínea o el fabricante del motor (LATAM Airlines, n.d.-b). Esto indicaría que la detención realizada en AUH pudo asociarse a este tipo de actividad, implicando un MRO Tipo C o D, según cuales sean las reparaciones realizadas, considerando además que la aeronave durante el periodo analizado acumuló un total de 786 horas de vuelo distribuidas en 97 vuelos, indicando una alta utilización.

En cuanto a las cuatro detenciones realizadas en Santiago, estas poseen una duración promedio de 40 horas. En vista del tiempo de detención, se considera que estas se asocian a un MRO Tipo A, considerando que en general tienden a ocurrir cada 18 días durante lo cual acumulan entre 200 y 300 horas de vuelo, correspondiendo a un valor cercano al estándar de mantenimiento. Sin embargo, como se nota, se presentan detenciones cercanas (12 y 15 de abril) lo cual puede atribuirse a posibles fallas prematuras.



Figura 28: Comparación TAT CC-BGK vs flota.

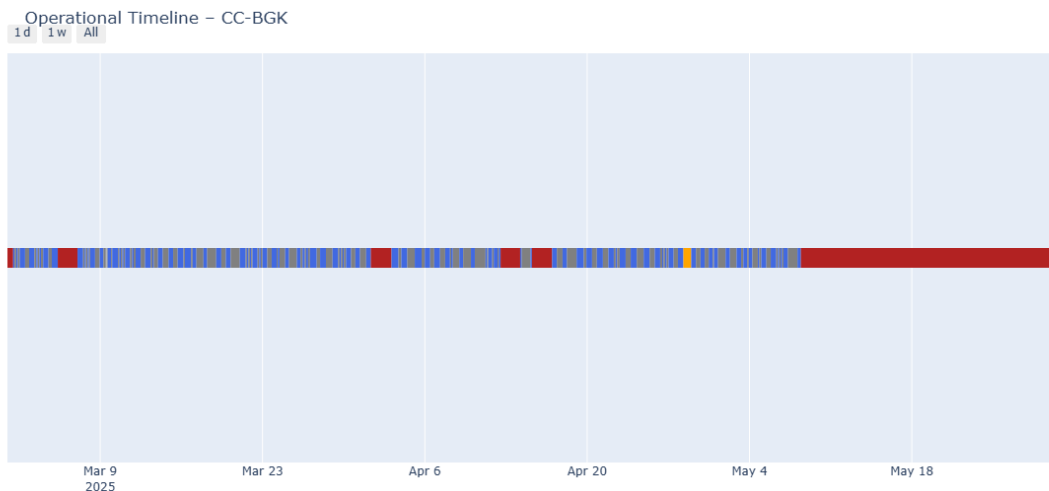


Figura 29: Actividad operativa CC-BGK.

Por otro lado, con un TAT promedio de 762 minutos la aeronave **CC-BGL** presenta siete detenciones entre 27 a 440 horas (Figura 30), realizadas en los aeropuertos de Santiago, São Paulo, Lima y Madrid. En cuanto a la detención más prolongada (18 días), esta fue realizada en SCL, indicando un posible MRO Tipo C. En el caso de la detención en Madrid

(27 horas), al ser un evento aislado se asocia con escalas de vuelo, cargas de combustible o condiciones climáticas adversas que no permitieron el despegue en el horario establecido.

Por otro lado, según lo señalado por la propia aerolínea, en caso de necesitar reparaciones en los motores que no involucren un desarme completo de él, estas normalmente son realizadas en los talleres de motor de LATAM ubicados en Brasil, Chile, Perú y Estados Unidos (LATAM Airlines, n.d.-b), por lo cual las detenciones realizadas en Lima (48 horas) y São Paulo (66 horas) pudieron relacionarse con este tipo de actividad.

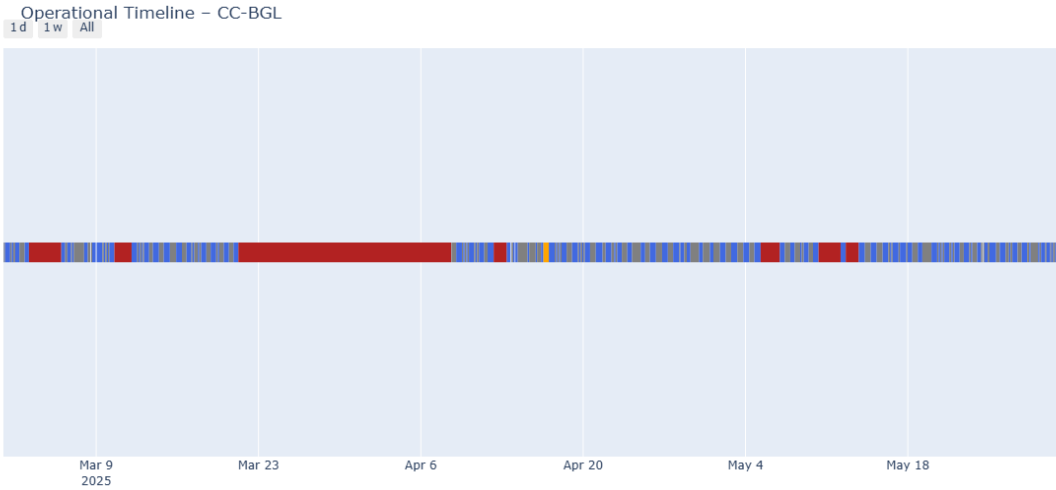


Figura 30: Actividad operativa CC-BGL.

Para **CC-BGF** se tiene un TAT promedio de 804 minutos, siendo el segundo más alto de la flota. Según la Figura 31 se notan diversas detenciones, siete de ellas en SCL y las demás en Madrid y São Paulo, sin embargo, se tienen inconsistencias con respecto a las 2 últimas. Verificando con Flightradar24 se encuentran vuelos que no fueron identificados durante la extracción, determinando que estas detenciones no son congruentes ni significativas para el análisis. En vista de lo mencionado, la totalidad de las detenciones se realizan en Santiago, asociándolas a MRO Tipo A o en línea (según sea el caso) y la más prolongada (21 días) a uno Tipo C.

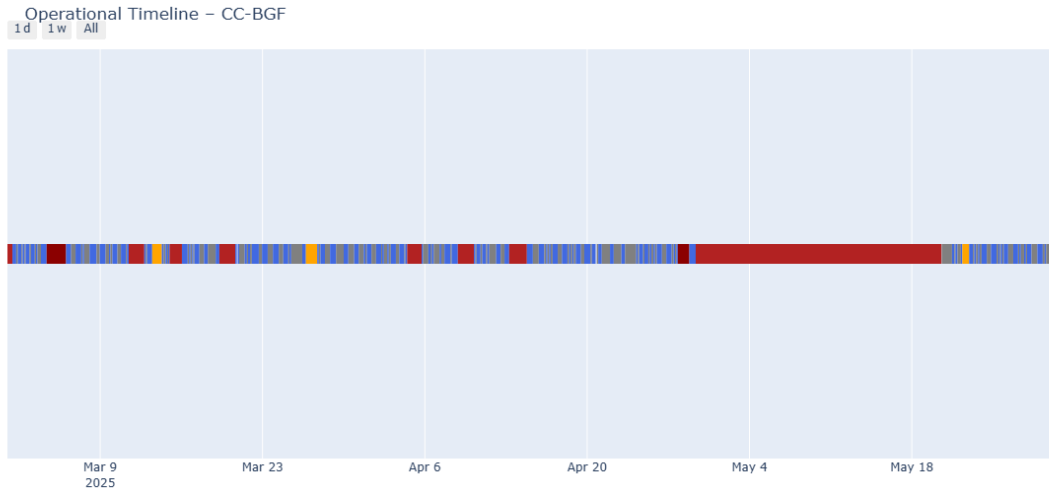


Figura 31: Actividad operativa CC-BGF.

Finalmente, la aeronave **CC-BGH** posee un TAT de 748 minutos, con la actividad operativa de la Figura 32. En esta del mismo modo se encuentran inconsistencias en los vuelos, donde al verificar con Flightradar24, se identifican sus vuelos de retorno, implicando que no corresponden a detenciones prolongados. En cuanto a las demás detenciones se identifican cuatro en SCL, donde la más extensa fue de 443 horas (18 días) indicando un MRO Tipo C y las demás se asocian a un MRO Tipo A o en línea considerando que las detenciones fueron entre 24 y 36 horas.

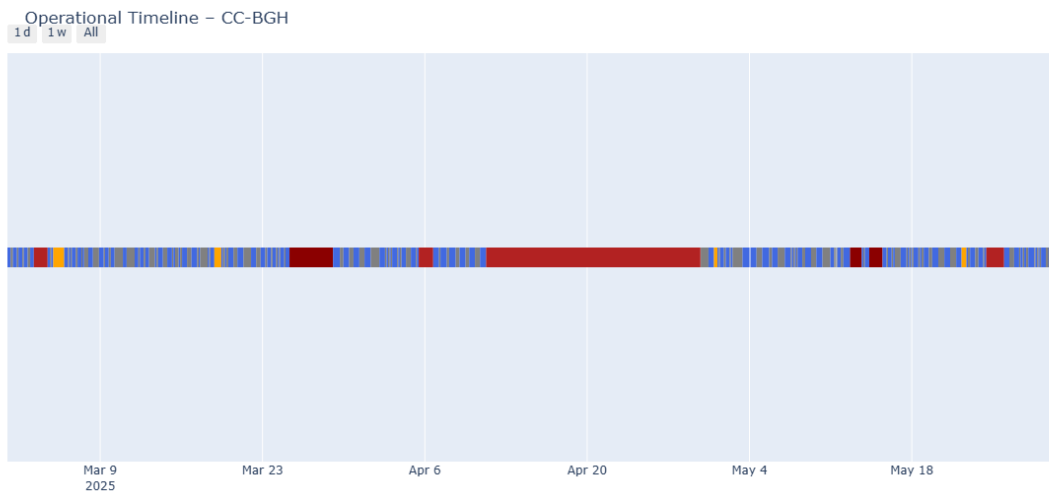


Figura 32: Actividad operativa CC-BGH.

Finalizando con el análisis, se puede notar que, si bien la flota tiene detenciones significativas, no son de magnitudes extensas ni realizadas simultáneamente como las identificadas para la flota 787-8. Esta observación, implica una mejor planificación en las actividades de mantenimiento de la flota, indicando que las detenciones pudieron ser programadas.

### 4.3.3 Análisis general

De manera general, se identifican 4 aeronaves con índice de impacto combinado superior al 80%, correspondientes a las matrículas CC-BBH (787-8), CC-BGF, CC-BGL y CC-BGK (787-9). Esta elevada valorización se debió a su frecuencia de vuelos anómalos, detenciones prolongadas y una considerable cantidad de días inactivos. En relación con el último punto mencionado, se suman además las aeronaves CC-BBB y CC-BBI (787-8) las cuales se mantuvieron inactivas durante un periodo cercano a 2 meses.

En vista de que se presentaron inactividades superiores a los 18 días, esto sugiere ejecución de actividades MRO Tipo C o D, según sea el caso. Adicionalmente, en cuanto a las rutas críticas encontradas en base a las detenciones prolongadas, se destacan eventos en ubicaciones como Abu Dabi (787-9), donde si bien la aerolínea no cuenta con un CMA en el sector existen antecedentes de mantenimiento de la flota Dreamliner en el lugar; y São Carlos (787-8), donde la aerolínea cuenta con un CMA en el cual comúnmente se realizan actividades de Overhaul (MRO Tipo D). Además, se destaca una alta concentración de detenciones en Santiago, sede de otro CMA, lo que sugiere la realización de diferentes actividades MRO Tipo A y C, considerando que el Overhaul es realizado en Brasil.

En cuanto al Turnaround Time (TAT) determinado por cada flota, se observa que el promedio para los modelos 787-8 fue de 651 minutos, aunque algunas aeronaves alcanzaron valores de hasta 3 veces el mencionado. Cabe destacar que este valor podría ser aún mayor, en vista de que aeronaves como CC-BBB y CC-BBI poseen detenciones prolongadas que no involucran un TAT al no presentar un vuelo previo. En el caso de la flota 787-9, el promedio de TAT fue de 518 minutos, con valores máximos cercanos a los 870 minutos.

Este comportamiento y en vista de que la flota 787-8 presenta detenciones simultáneas de hasta 5 aeronaves, permite concluir que la flota 787-9 presenta una mejor planificación de sus actividades de mantenimiento. Por otro lado, se determina que las detenciones ocurridas también pueden involucrar mantenimiento no programado, en vista de que las situaciones presentadas corresponden a detenciones antes del tiempo sugerido para realizar dichas actividades.

Estos hallazgos permiten priorizar aeronaves y rutas críticas con detenciones prolongadas, que de no estar asociadas a lugares donde se cuenten con CMA, representan señales de alerta operacional, por lo que se recomienda optimizar tanto la planificación como la ejecución de las actividades de mantenimiento. A partir de lo anterior, se evidencia el valor del modelo desarrollado como herramienta de apoyo para la gestión operativa y de mantenimiento, facilitando la toma de decisiones basada en datos históricos.

Una importante observación es que durante el análisis se detectaron pérdidas de datos operacionales, reflejado desde las inconsistencias encontradas entre eventos de aterrizaje y despegue posterior. Estos problemas se atribuyen a las limitaciones de la API utilizada (Licencia Explorer), generando inconsistencias y afectando la trazabilidad de algunos vuelos. Sin embargo, dichas omisiones fueron validadas manualmente para evitar conclusiones erróneas.

Finalmente, según las detenciones prolongadas identificadas, muchas de ellas ocurren en ubicaciones donde existen Centros de Mantenimiento o lugares con acuerdos operativos, principalmente asociadas a motores. Esta tendencia permite evidenciar lo señalado por los stakeholders, quienes destacaron los problemas recurrentes presentados para motores Rolls-Royce, sugiriendo que dichas detenciones pueden vincularse a fallas en ellos.

Además, según lo obtenido esto demuestra que la herramienta desarrollada es capaz de identificar tendencias operacionales, lo cual sumado con la información rescatada de la web, evidencia su potencial. Sin embargo, su implementación con datos propios de aerolíneas permitiría aumentar su precisión, consolidándola como un sistema eficaz para la mejora continua en la gestión operativa.

#### 4.3.4 Validación del modelo con conocimiento experto

Los comportamientos detectados durante este trabajo fueron contrastados con conocimiento experto en mantenimiento, con la finalidad de verificar la validez de los resultados. Esta validación confirmó que gran parte de las detenciones responden a patrones operativos reales.

Respecto al análisis de rutas se rescata que, en operaciones regulares las aeronaves mantienen programaciones de rutas fijas hasta que un evento operativo o técnico interrumpe esta asignación, implicando periodos en tierra que en su mayoría se asocian a intervenciones de mantenimiento. De esta manera, se determina que las detenciones prolongadas no siempre se vinculan a fallas imprevistas, sino también a la planificación de rutas y descansos posteriores a vuelos, en gran parte de largo alcance.

Con la interacción se determina que vuelos con destino a São Carlos (Brasil) se realizan únicamente para realizar trabajos MRO, considerando además que en el sector se encuentra el CMA más grande de la aerolínea. De igual modo, la detención identificada en Abu Dabi (Emiratos Árabes Unidos) se clasificó como un MRO programado en vista de acuerdos que mantiene la aerolínea. En rutas de alta frecuencia, las detenciones pueden ser asociadas a mantenimiento programado de corto plazo como a inspecciones post-vuelo. En general, las detenciones se clasifican como programado o no programado dependiendo de la duración y del contexto del evento, donde periodos superiores a una semana tienden a corresponder a mantenimiento mayor.

Si bien la herramienta permitió determinar resultados preliminares sólidos, la validación reveló ciertos aspectos a refinar con la finalidad de aumentar la precisión de los resultados y reducir la presencia de falsos positivos. Para ello, se plantea la necesidad de incorporar mecanismos que identifiquen detenciones significativas que no se asocien a mantenimiento.

Adicionalmente, se sugiere integrar información de la aerolínea asociada a sus rutas y destinos, lo cual permitiría anticipar si el patrón de operación es normal o un traslado hacia un CMA. Finalmente, se sugiere mejorar la distinción entre mantenimientos programados y no programados, lo cual implicaría utilizar umbrales de tiempo e indicar el tipo de aeropuerto (es decir, si corresponde a un CMA, Hub operacional o aeropuerto comercial), donde al

presentarse detenciones significativas en lugares comerciales, esto indicaría comportamientos realmente anómalos.

En conclusión, la validación permitió confirmar que el modelo es capaz de identificar eventos alineados al comportamiento real de las flotas analizadas, no obstante el refinamiento del modelo permitiría aumentar su utilidad y confiabilidad, siendo una herramienta relevante para la gestión preventiva del mantenimiento.

## 5 Conclusiones

El presente trabajo abordó la evaluación y análisis del comportamiento operacional de aeronaves wide-body, específicamente las flotas Boeing 787 de LATAM Airlines. El objetivo de este proyecto consistió en identificar anomalías asociadas a eventos MRO a través del desarrollo de un modelo utilizando fuentes de datos abiertas, donde para cumplir lo mencionado se utilizan datos históricos extraídos por medio de la API de Flightradar24.

A través del desarrollo de un modelo de detección de anomalías (K-Means) alimentado con información extraída desde Flightradar24, fue posible clasificar las operaciones en cuatro categorías considerando su tiempo de vuelo y detenciones en tierra (TAT), permitiendo diferenciar operaciones normales y eventos que se asocian a MRO. Las clasificaciones se integraron en la herramienta de visualización desarrollada en Python para lo que se utiliza Streamlit, lo cual facilitó el análisis de los datos de cada flota.

En base a lo anterior, se identificaron rutas críticas, como São Carlos (QSC) – Santiago (SCL) correspondiente a un trayecto que involucra traslados entre centros de mantenimiento (CMA) de la aerolínea. Por otro lado, la ruta Madrid (MAD) – Abu Dabi (AUH), indica posibles reparaciones en los motores bajo acuerdos entre de la empresa Rolls-Royce. Así mismo, se identificaron aeronaves críticas como CC-BBH, CC-BGF y CC-BGK, debido a su alta frecuencia de detenciones, representando un foco de atención desde el punto de vista económico y operacional. Además, se observan detenciones simultáneas en la flota 787-8, lo que indica una ineficiencia operativa entre las planificaciones de mantenimiento.

Los resultados obtenidos fueron validados con conocimiento experto, de lo cual se pudo confirmar que los eventos detectados por el modelo corresponden a patrones operativos reales. De esto se pudo determinar que detenciones realizadas en São Carlos y Abu Dabi se relacionan a mantenimientos programados. La interacción permitió entregar solidez al enfoque, además de identificar oportunidades de mejora para el refinamiento del modelo, lo cual permitiría reforzar la aplicación de la herramienta como apoyo a la gestión preventiva del mantenimiento.

Estos hallazgos permitieron validar la hipótesis planteada, cumpliendo en su totalidad con los objetivos específicos planteados. Sin embargo, como proyección futura se propone mejorar la herramienta considerando los puntos mencionados por conocimiento experto.

Además, en vista de las restricciones presentadas por la API Explorer utilizada, se considera la necesidad de integrar datos internos de aerolíneas con la información utilizada por el modelo, para así garantizar resultados precisos y útiles que permitan apoyar la toma de decisiones estratégicas en flotas comerciales. Asimismo, el proyecto permite demostrar que herramientas desarrolladas a partir de fuentes de datos abiertas pueden entregar información valiosa para el monitoreo operacional, facilitando la identificación de patrones críticos, optimizando la toma de decisiones estratégicas y abriendo la posibilidad de implementar soluciones de mantenimiento más eficientes.

## Referencias

- Ahmed Murtaza, A., Saher, A., Hamza Zafar, M., Kumayl Raza Moosavi, S., Faisal Aftab, M., & Sanfilippo, F. (2024). Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study. *Results in Engineering*, 24, 102935. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102935>
- Airfleets. (n.d.). *Airfleets*. Retrieved June 24, 2025, from <https://www.airfleets.es/home/>
- Apostolidis, A., Pelt, M., & Stamoulis, K. P. (2020). Aviation Data Analytics in MRO Operations: Prospects and Pitfalls. *2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/RAMS48030.2020.9153694>
- Aviación Comercial. (2025, June 12). *Boeing 787 Dreamliner: un historial de desafíos técnicos bajo la lupa tras el primer accidente fatal*. Aviacion Line. <https://www.aviacionline.com/boeing-787-dreamliner-un-historial-de-desafios-tecnicos-bajo-la-lupa-tras-el-primer-accidente-fatal>
- AVIACIONLINE. (2024, November 8). *LATAM Airlines construirá un nuevo hangar de mantenimiento para su flota Boeing 787 Dreamliner*. Simple Flying. <https://www.aviacionline.com/latam-airlines-construira-un-nuevo-hangar-de-mantenimiento-para-su-flota-boeing-787-dreamliner>
- Aviation Group. (2022a). *Tipos de mantenimiento de una aeronave*. Aviationgroup.Es. <https://www.aviationgroup.es/actualidad/tipos-mantenimiento-aeronave/#%3A~%3Atext%3DMantenimiento%20correctivo%3A%20Son%20reparaciones%20>
- Aviation Group. (2022b). *Tipos de mantenimiento de una aeronave - Aviation Group*. <https://www.aviationgroup.es/actualidad/tipos-mantenimiento-aeronave/>
- Boeing. (2008). *Boeing Commercial Airplanes Operations Center*. <https://web.archive.org/web/20080130122957/http://www.boeing.com/commercial/global/opscenter.html>
- Dermouche, R., Talaoubrid, A., Barazane, L., Sellami, Y., Tadjine, M., & Zioui, N. (2022). Qualitative and quantitative analysis of the reliability of NPC and ANPC power converters for aeronautical applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4863–4873. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.056>
- DGAC. (2025). *Norma Aeronáutica DAN 145: Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)*. <https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2025/02/DAN-145-ED2-ENM5-04FEB2025.pdf>
- Dough, J. (2022). *The Different Types of Aviation Maintenance Checks*. National Aviation Academy. <https://www.naa.edu/types-of-aviation-maintenance-checks/>
- EASA. (2021). *Part 145 - Maintenance organisation approvals* .
- Federal Aviation Administration. (2025). *14 CFR Part 145 – Repair Stations*.

- Flightradar24. (n.d.-a). *Flightradar24 API - Credit Overview*. Retrieved July 3, 2025, from <https://fr24api.flightradar24.com/docs/credit-overview>
- Flightradar24. (n.d.-b). *Flightradar24 API - Flight Summary: Light & Full Endpoints Overview*. Retrieved April 30, 2025, from <https://fr24api.flightradar24.com/docs/endpoints/flight-summary>
- Flightradar24. (n.d.-c). *Flightradar24: Live Flight Tracker*. Retrieved April 30, 2025, from <https://www.flightradar24.com/premium/?change=true>
- Flightradar24. (2024). *Flightradar24 Terms of Service*. <https://www.flightradar24.com/terms-and-conditions>
- FLYING Magazine. (2024, October). *AOG: When an Airplane—or We—Can't Fly*. [https://www.flyingmag.com/aog-when-an-airplane-or-we-cant-fly/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.flyingmag.com/aog-when-an-airplane-or-we-cant-fly/?utm_source=chatgpt.com)
- Forbes Travel. (2025, May 6). *Más de mil millones de pasajeros en 14 años, 2.100 vuelos diarios y 425 rutas: las impresionantes cifras del Boeing 787 Dreamliner*. <https://forbes.es/forbestravel/699754/la-flota-de-boeing-787-dreamliner-supera-los-1-000-millones-de-pasajeros-en-sus-14-anos-de-actividad/>
- Hernández, A. (2024). *Implementación de aviones de fuselaje ancho en rutas de corto radio en una aerolínea de bajo coste* [Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/412617/memoria.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- ICAO. (2022). *Annex 6 — Operation of Aircraft — Part II: International General Aviation — Aeroplanes*.
- India eVisa. (n.d.). *Aeropuerto Internacional Indira Gandhi, Nueva Delhi, Delhi*. Retrieved July 6, 2025, from <https://india-evisa.it.com/es/airports/indira-gandhi-international-airport-new-delhi-delhi/>
- International Air Transport Association. (2024). *Annual Review 2024*.
- ISO. (2020). *ISO 8601 — Formato de fecha y hora*. <https://www.iso.org/iso-8601-date-and-time-format.html>
- KALAGIREVA, K., & RADKOV, V. (2016). DISPLAYING THE AIR SITUATION THROUGH THE COLLECTION AND PROCESSING OF FLIGHT INFORMATION ON FLIGHTRADAR24 PROJECT. *SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATION IN THE AIR FORCE*, 18(1), 267–272. <https://doi.org/10.19062/2247-3173.2016.18.1.36>
- Kavlakoglu, E., & Winland, V. (2024, June 26). *¿Qué es la agrupación en clústeres k-means?* <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/k-means-clustering>
- Kinnison, H. A., & Siddiqui, T. (2013). *Aviation maintenance management*.
- LA NACION. (2025a, June 12). *Las causas del accidente del Boeing 787 Dreamliner de Air India, según los expertos*. <https://www.lanacion.com.ar/el-mundo/las-causas-del-accidente-del-boeing-787-dreamliner-de-air-india-segun-los-expertos-nid12062025/>

- LA NACION. (2025b, June 12). *Las causas del accidente del Boeing 787 Dreamliner de Air India, según los expertos*. <https://www.lanacion.com.ar/el-mundo/las-causas-del-accidente-del-boeing-787-dreamliner-de-air-india-segun-los-expertos-nid12062025/>
- LATAM Airlines. (n.d.-a). *Centro de Mantenimiento en Santiago: Una historia que cumple 30 años*. Latamairlines.Com. Retrieved July 1, 2025, from <https://www.latamairlines.com/cl/es/vamos/volar/aviacion/centro-mantenimiento-santiago>
- LATAM Airlines. (n.d.-b). *¿Cómo se realiza el mantenimiento de los motores de los aviones?* Retrieved June 28, 2025, from <https://www.latamairlines.com/cl/es/vamos/volar/aviacion/curiosidades-sobre-las-turbinas>
- LATAM Airlines. (n.d.-c). *Dentro de un centro de mantenimiento de aeronaves*. Latamairlines.Com. Retrieved July 1, 2025, from <https://www.latamairlines.com/cl/es/vamos/volar/aviacion/mantenimiento-aviones>
- LATAM Airlines. (n.d.-d). *Dentro de un centro de mantenimiento de aeronaves*. Retrieved June 28, 2025, from <https://www.latamairlines.com/cl/es/vamos/volar/aviacion/mantenimiento-aviones>
- Latam Airlines Group S.A. (2025). *OPERACIONES GRUPO LATAM Febrero Acumulado a Febrero*. [www.latam.com](http://www.latam.com)
- Lu, J. (2025, May 9). *MRO Meaning in Aviation*. Qoco.Aero. <https://www.qoco.aero/blog/mro-meaning-in-aviation>
- Matt Kerster. (n.d.). *Minimizing Downtime: How AOG Events Impact Airlines Like Delta - AAA Air Support*. Retrieved June 23, 2025, from [https://www.aaaairsupport.com/minimizing-downtime-how-aog-events-impact-airlines-like-delta/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.aaaairsupport.com/minimizing-downtime-how-aog-events-impact-airlines-like-delta/?utm_source=chatgpt.com)
- More, D., & Sharma, R. (2014). The turnaround time of an aircraft: a competitive weapon for an airline company. *DECISION*, 41(4), 489–497. <https://doi.org/10.1007/s40622-014-0062-0>
- Mubadala. (2019). Abu Dhabi's Sanad Aerotech and Rolls-Royce announce Landmark USD 6.5bn Engine Maintenance Agreement. *Mubadala*. <https://www.mubadala.com/en/news/abu-dhabis-sanad-aerotech-and-rolls-royce-announce-landmark-usd-65bn-engine-maintenance-agreement>
- PANDIAN, G., PECHT, M., ZIO, E., & HODKIEWICZ, M. (2020). Data-driven reliability analysis of Boeing 787 Dreamliner. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(7), 1969–1979. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.02.003>
- Passarella, R., & Nurmaini, S. (2022). Behavioral evidence of public aircraft with historical data: The case of Boeing 737 MAX 8 PK-LQP. *Journal of Applied Engineering Science*, 20(4), 1254–1262. <https://doi.org/10.5937/jaes0-38696>

- Picchi Scardaoni, M., Magnacca, F., Massai, A., & Cipolla, V. (2021). Aircraft turnaround time estimation in early design phases: Simulation tools development and application to the case of box-wing architecture. *Journal of Air Transport Management*, 96, 102122. <https://doi.org/10.1016/J.JAIRTRAMAN.2021.102122>
- Rodgers, C. (2024, June 23). *Analysis: What Are The Operating Costs Of The Main Widebody Aircraft Families?* <https://simpleflying.com/widebody-aircraft-operating-costs-guide/>
- Rodrigues, D., & Lavorato, P. (2016). Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Fundamentals and Strategies: An Aeronautical Industry Overview. *International Journal of Computer Applications*, 135(12), 21–29. <https://doi.org/10.5120/ijca2016908563>
- Schofield, A., & Flottau, J. (2025, June 12). *Air India Boeing 787-8 Crashes After Takeoff*. AVIATION WEEK. [https://aviationweek.com/air-transport/safety-ops-regulation/air-india-boeing-787-8-crashes-after-takeoff?utm\\_source=chatgpt.com](https://aviationweek.com/air-transport/safety-ops-regulation/air-india-boeing-787-8-crashes-after-takeoff?utm_source=chatgpt.com)
- SeatMaps. (n.d.). *Flota de aviones LATAM Airlines (LA)*. Retrieved June 24, 2025, from <https://seatmaps.com/es/airlines/la-latam-airlines/>
- Shyur, H.-J. (2008). A quantitative model for aviation safety risk assessment. *Computers & Industrial Engineering*, 54(1), 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.032>
- Sudarno, Putri, N. Y., Renaldo, N., Hutahuruk, M. Br., & Cecilia. (2022). Leveraging Information Technology for Enhanced Information Quality and Managerial Performance. *Journal of Applied Business and Technology*, 3(1), 102–114. <https://doi.org/10.35145/jabt.v3i1.97>
- SuperYacht. (n.d.). *Explora el mundo de los jets privados: modelos principales, propietarios y tendencias de la industria*. Retrieved June 24, 2025, from <https://www.superyachtfan.com/es/private-jet/>
- Wiebe Helder. (2023, June 12). *Boosting Efficiency with Logistics Software for AOG in Aviation - Cargobase*. <https://www.cargobase.com/blog/aog-logistics-aviation-TMS>