



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

Amanda Isidora Troncoso González

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 Amanda Isidora Troncoso González

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento,
incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Este trabajo no solo representa el cierre de una etapa académica, sino también el reflejo de un camino lleno de aprendizajes, desafíos, miedo, mucho amor y dedicación. Nada de esto habría sido posible sin el apoyo incondicional y el cariño de quienes me acompañaron a lo largo de este proceso, de quienes confiaron en mí, y quienes me ayudaron a seguir adelante en los momentos más oscuros.

A mi mamá, por ser mi mayor ejemplo a seguir y fuente de inspiración. Por animarme en cada paso, y siempre demostrarme de lo que soy capaz; por no dejarme caer y recordarme que está bien no estar bien, porque al final de la tormenta siempre sale el sol. Gracias por nunca dejar de creer en mí y recordarme lo mucho que valgo, porque si hoy estoy aquí, es gracias a ti. Este trabajo es por ti, por tu esfuerzo incansable de ser mejor por ambas, por ser mi principal fuente de apoyo, y por tu resiliencia y amor que me impulsan a seguir.

A mi familia, mi tata y mi abuela, gracias por ser mi base y estar siempre ahí para apoyarme en lo que necesitaba. Por sus mensajes y saludos de cariño, y por dar todo para que yo estuviera bien y estable lejos de casa. Su apoyo fue esencial para sostenerme lejos de casa.

A mis amigos, por las risas, consejos y el alivio silencioso en los momentos más pesados. Gracias por escuchar cuando más los necesitaba, por esas salidas y conversaciones que reviven el alma, y principalmente por aceptar mi corazón tal como es.

A mi equipo de gimnasia, por ser mi hogar lejos de casa. Cada entrenamiento y momento compartido fue un regalo que atesoro inmensamente. Gracias a ustedes logré llegar aquí sin caer en la locura, su presencia en mi vida fue fundamental.

A los profesores que me acompañaron en este camino, gracias por su compromiso, enseñanzas y por las oportunidades que reafirmaron que estaba donde debía estar. Gracias por darme herramientas para crecer, no solo como profesional, sino también como persona.

Finalmente, a Alejandro López y Carlos Navarrete, gracias por depositar su confianza en este proyecto desde el inicio y guiarnos con claridad y convicción. Su apoyo fue clave para dar forma a este trabajo.

Este trabajo es fruto de muchas manos, palabras, silencios y gestos. A todos quienes formaron parte, aunque no hayan sido mencionados de manera directa, mi gratitud más sincera, de todo corazón.

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 *narrow-body* de LATAM Airlines Chile, específicamente de los modelos Airbus A320 y A321, a partir de datos de fuentes abiertas.

Lo anterior busca identificar comportamientos anómalos de forma temprana 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 un 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 se integran en un dashboard interactivo desarrollado en Streamlit (Python), que facilita la exploración dinámica de los datos mediante tres módulos: un panel general para monitorear el rendimiento y detectar eventos críticos; un análisis global que resalta rutas y aeronaves con alta incidencia anómala; y un análisis detallado por matrícula que describe patrones operacionales individuales.

Los principales hallazgos a través de la herramienta incluye la detección de eventos críticos, como la detención de 28 días de la aeronave CC-BEF (Airbus A321) en el aeropuerto Rafael Hernández (Puerto Rico), una instalación con capacidad especializada para mantenimiento mayor, o el vuelo de la aeronave CC-BFI (Airbus A320) a Sao Carlos para una intervención MRO. La validación con expertos de LATAM Airlines Chile confirmó que esta detención corresponde a un mantenimiento programado. Asimismo, se identificaron rutas como Calama–Santiago con alta recurrencia de vuelos anómalos que, tras el contraste con conocimiento experto, se atribuyen principalmente a factores operativos, más que a mantenimiento no 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 context of increasing operational complexity and sustained growth in commercial air transport, the management of Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) efforts has a direct impact on fleet efficiency and availability. Given the persistent challenge that maintenance efforts remain largely reactive, causing operational interruptions and economic losses for Airlines, this study aims to develop an analytical tool to characterize the operational behavior of LATAM Airlines Chile's *narrow-body* fleet, specifically Airbus A320 and A321 models, using open-source data.

The goal is to enable early identification of anomalous behaviors potentially associated with MRO events by integrating data analysis, unsupervised modeling, and interactive visualization. Operational records were collected via Flightradar24 API (*Explorer* license), focusing on flights conducted in March, April, and May 2025, due to access limitations inherent to the data source.

The data underwent a cleaning process to ensure integrity and traceability. Subsequently, a K-Means clustering model was applied, based on two variables: Flight Time and Turnaround Time (TAT). This model enabled the classification of flights into operational categories, including critical events aligned with MRO patterns, using predefined expectations for each fleet type.

The results are integrated into an interactive dashboard developed with Streamlit (Python), which enables dynamic data exploration through three modules: a general panel for monitoring fleet performance and detecting critical events; a global analysis highlighting routes and aircraft with high anomaly incidence; and a detailed analysis by tail number describing individual operational patterns.

Key findings include the detection of critical events such as the 28-day ground time of aircraft CC-BEF (Airbus A321) at Rafael Hernández Airport (Puerto Rico), a facility specialized in heavy maintenance, and the flight of aircraft CC-BFI (Airbus A320) to São Carlos for an MRO intervention. Validation with LATAM Airlines Chile experts confirmed that this downtime corresponded to scheduled maintenance. Additionally, routes like Calama–Santiago exhibited a high recurrence of anomalous flights, which expert review attributed mainly to operational factors rather than unscheduled maintenance.

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

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	3
Nomenclatura	4
1 Introducción	6
1.1 Contexto	6
1.2 Hipótesis	7
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivos específicos	8
2 Marco Teórico	9
2.1 Concepto de MRO (Maintenance, Repair and Overhaul)	9
2.2 Tipos de mantenimiento en la aviación comercial	9
2.2.1 Clasificación por enfoque funcional.....	10
2.2.2 Clasificación por nivel de infraestructura y/o frecuencia operativa	11
2.3 Estándar de operaciones para aeronaves narrow-body	13
2.4 Modelo K-Means de detección de anomalías	14
3 Metodología	15
3.1 Selección de la flota y definición del objeto de estudio	16
3.2 Recolección de datos operacionales	17
3.3 Limitaciones de los datos y preprocesamiento	19
3.3.1 Restricciones de la fuente.....	19
3.3.2 Limpieza y preparación de datos	19
3.4 Desarrollo del modelo MRO para detección de anomalías operacionales	20
3.5 Desarrollo del entorno de visualización interactiva (dashboards)	21
3.6 Lógica para la detección de patrones anómalos	22
3.6.1 Evaluación de criticidad por aeronave	22
3.6.2 Evaluación de criticidad por ruta	23
3.6.3 Clasificación del nivel de riesgo operacional.....	24
4 Resultados y análisis	25
4.1 Modelo para análisis MRO	25
4.1.1 Resultados del modelo de detección de anomalías para Airbus A321	25
4.1.2 Resultados del modelo de detección de anomalías para Airbus A320	27
4.2 Dashboard interactivo de visualización integrado	29

4.2.1	Ventana principal del dashboard.....	29
4.2.2	Análisis general de operaciones	30
4.2.3	Análisis individual por aeronave	32
4.3	Detección de comportamientos operacionales anómalos	33
4.3.1	Operaciones en Airbus A321	33
4.3.2	Rutas críticas para Airbus A321	36
4.3.3	Aeronaves críticas para Airbus A321	39
4.3.4	Operaciones en Airbus A320	44
4.3.5	Rutas críticas para Airbus A320.....	47
4.3.6	Aeronaves críticas para Airbus A320.....	51
4.4	Validación del modelo con conocimiento experto	54
5	Conclusiones.....	56
	Referencias.....	57

Lista de Figuras

Figura 1: Actividades durante TAT de aeronaves A321.Fuente: (Airbus, 2023).	14
Figura 2: Esquema metodológico.	16
Figura 3: Clústeres operacionales de Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025)	26
Figura 4: Histograma de horarios de aterrizaje en vuelos A321 clasificados como MRO leve (según periodo marzo-mayo 2025).	27
Figura 5: Histograma de horarios de despegue en vuelos A321 clasificados como MRO leve (según periodo marzo-mayo 2025).	27
Figura 6: Clústeres operacionales de Airbus A320 (periodo marzo 2025).	28
Figura 7: Histograma de horarios de aterrizaje en vuelos A320 clasificados como MRO leve (según periodo marzo 2025).	29
Figura 8: Histograma de horarios de despegue en vuelos A320 clasificados como MRO leve (según periodo marzo 2025).	29
Figura 9: Ventana principal según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 1).....	30
Figura 10: Ventana principal según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 2).....	30
Figura 11: Ventana de análisis general de operaciones según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 1).....	31
<i>Figura 12: Ventana de análisis general de operaciones según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 2).....</i>	<i>31</i>
Figura 13: Ventana de análisis por aeronave según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 1).....	32
Figura 14: Ventana de análisis por aeronave según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 2).....	33
Figura 15: Disponibilidad operacional de la flota Airbus A321 durante el periodo marzo-mayo 2025.....	34
Figura 16: Distribución porcentual de los vuelos de la flota A321 en el periodo marzo-mayo 2025.....	34
Figura 17: Actividad operacional de las aeronaves de la flota A321 en el periodo marzo-mayo 2025.....	35
Figura 18: Resumen operativo de CC-BEF Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).	40
Figura 19: Rutas críticas de CC-BEF Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).....	42
Figura 20: Resumen operativo de CC-BEH Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).....	42
Figura 21: Resumen operativo de CC-BEJ Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).....	43
Figura 22: Rutas críticas de CC-BEH Airbus A321 según periodo marzo-mayo 2025.....	44
Figura 23: Rutas críticas de CC-BEJ Airbus A321 según periodo marzo-mayo 2025.....	44
Figura 24: Disponibilidad operacional de la flota Airbus A320 durante el periodo marzo 2025.	45
Figura 25: Distribución porcentual de los vuelos de la flota A320 en el periodo marzo 2025.	45

Figura 26: Actividad operacional de las aeronaves de la flota A320 en el periodo marzo 2025.....46

Figura 27: Resumen operativo de CC-COK Airbus A320 (periodo marzo 2025).51

Figura 28: Resumen operativo de CC-COL Airbus A320 (periodo marzo 2025).52

Figura 29: Resumen operativo de CC-COO Airbus A320 (periodo marzo 2025).53

Lista de Tablas

Tabla 1: Costos suscripciones en Flightradar24.....	17
Tabla 2: Variables principales "params".....	17
Tabla 3: Variables críticas.....	18
Tabla 4: Datos extraídos y procesados desde Flightradar24 sobre vuelos Airbus A320....	18
Tabla 5: Límites de clasificaciones para modelo K-Means.....	21
Tabla 6: Variables para evaluar criticidad de aeronaves.....	23
Tabla 7: Variables para evaluar criticidad de rutas.....	23
Tabla 8: Clasificación de aeronaves según porcentaje de anomalías y eventos.....	24
Tabla 9: Clasificación de clústeres operacionales de Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).....	26
Tabla 10: Clasificación de clústeres operacionales de Airbus A320 (periodo marzo 2025).....	28
Tabla 11: Ranking de aeronaves críticas para la flota A321 según periodo marzo-mayo 2025.....	36
Tabla 12: Rutas críticas para Airbus A321 según periodo marzo-mayo 2025.....	37
Tabla 13: Resumen de detenciones de la aeronave CC-BEF Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).....	40
Tabla 14: Resumen de detenciones de la aeronave CC-BEJ Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).....	43
Tabla 15: Ranking de aeronaves críticas para la flota A320 según periodo marzo 2025....	47
Tabla 16: Rutas críticas para Airbus A320 según periodo marzo 2025.....	48

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
COCHILCO	: Comisión Chilena del Cobre
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

AEP	:	Aeroparque Jorge Newbery – Buenos Aires, Argentina
BBA	:	Aeropuerto Balmaceda – Balmaceda, Chile
BQN	:	Aeropuerto Rafael Hernández – Aguadilla, Puerto Rico
CCP	:	Aeropuerto Carriel Sur – Concepción, Chile
CJC	:	Aeropuerto El Loa – Calama, Chile
EZE	:	Aeropuerto Internacional Ministro Pistarini (Ezeiza) – Buenos Aires, Argentina
GRU	:	Aeropuerto Internacional de São Paulo-Guarulhos – São Paulo, Brasil
LIM	:	Aeropuerto Internacional Jorge Chávez – Lima, Perú
LSC	:	Aeropuerto La Florida – La Serena, Chile
PUQ	:	Aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo – Punta Arenas, Chile
QSC	:	Aeropuerto Mário Pereira Lopes – São Carlos, Brasil
SCL	:	Aeropuerto Arturo Merino Benítez – Santiago, Chile
ZCO	:	Aeropuerto La Araucanía – Temuco, Chile

Subíndices

CC-XXX	:	Aeronave de Matrícula Chilena
<i>nt</i>	:	Próximo Despegue (<i>next take-off</i>)
<i>l</i>	:	Aterrizaje (<i>landing</i>)

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 la flota. 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 (Apostolidis et al., 2020; Rodrigues & Lavorato, 2016).

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 estrecho (*narrow-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 *narrow-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 *narrow-body* de la empresa LATAM.
2. Implementar paneles de control (*dashboards*) interactivos para el análisis visual de datos, identificación de patrones y facilitar 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 reúne los principales conceptos y antecedentes que sustentan el desarrollo de este trabajo, abordando aspectos clave relacionados con la gestión del mantenimiento en la aviación comercial. Así también, se incluye la estandarización de parámetros relevantes que permiten estructurar y fundamentar la construcción de la herramienta analítica propuesta.

2.1 Concepto de MRO (*Maintenance, Repair and Overhaul*)

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 los ejemplares 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 a **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 casi 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 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 lo es la aviación comercial.

Este modelo operativo regulado por normativas como las mencionadas, obliga a las aerolíneas a implementar estándares homogéneas 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 tipo de mantenimiento es 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 derivar 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 ser realizadas 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, 2022a):

- **Revisiones en tránsito,** pre o post vuelo, los cuales consisten en inspecciones visuales de neumáticos, frenos y niveles de fluidos (aceites, hidráulicos).
- **Revisiones diarias,** realizados en intervalos de 24-72 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 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 150-180 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 toma 1 a 4 semanas de duración y hasta 6000 horas hombre. Las actividades de mantenimientos tipo C suele requerir que la aeronave permanezca en el hangar, para hacer tareas como exámenes de estructuras (fuselaje, alas) para detección de corrosión y daños, o la lubricación de componentes de la aeronave.
- **Tipo D (*Heavy Maintenance Visit*):** corresponde a la intervención de mayor envergadura en las aeronave, la cual se realiza cada 6 a 10 años. Esta exige el desmontaje casi total de los componentes, inspección integral, 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 sobre 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, como modificaciones mayores e intervenciones tipo D, LATAM se apoya en su centro de mantenimiento ubicado en São Carlos, Brasil, el cual opera bajo el modelo MRO. Este centro esta certificado no solo por la autoridad aeronáutica brasileña, sino también por la FAA y la EASA lo cual le permite brindar servicios a matrículas tanto nacional como internacional (LATAM Airlines, n.d.-b).

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 del centro de São Carlos, 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 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 *narrow-body*

En la aviación comercial, las aeronaves de fuselaje estrecho (*narrow-body*) como los modelos Airbus A320 y A321, están diseñados principalmente para operaciones de corto y medio alcance, con rangos típicos entre 3000 y 4000 millas náuticas, dependiendo de la variante y configuración de la aeronave (Airbus, 2024). Estas aeronaves cuentan con una sola cabina de pasillo y tienen capacidad entre 100 a 240 pasajeros, los cuales lo vuelven ideales para rutas domésticas o regionales de alta frecuencia.

En muchos contextos, los vuelos de las aeronaves *narrow-body* se clasifican como vuelos regionales puesto que conectan destinos dentro de un mismo país o entre países vecinos, en distancias que no requieren aviones de fuselaje ancho ni servicios de largo recorrido (AeroGuard, 2021). Complementando lo anterior, el desempeño operativo de estas aeronaves puede ser evaluado mediante dos indicadores clave: el tiempo de vuelo (***flight time***) y el tiempo de escala o rotación (***turnaround time – TAT***), los cuales tienen implicancias directas en la planificación de flota y mantenimiento.

El tiempo de vuelo (*flight time*) de acuerdo con la Organización de Aviación Civil Internacional, se define como 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, así como el vuelo como tal.

Por otro lado, según la Asociación Internacional del Transporte Aéreo (IATA por sus siglas en inglés) y estudios asociados, el **TAT** corresponde al intervalo entre la llegada de una aeronave (cuando se detiene en la puerta, en posición de estacionamiento) y su salida programada siguiente. Durante este tiempo, se realizan todas aquellas actividades necesarias para preparar la aeronave para su próximo vuelo, como el desembarque de pasajero, limpieza, catering, carga de equipaje, reabastecimiento de combustible, inspecciones técnicas y embarque de pasajero (IATA, 2025; Picchi Scardaoni et al., 2021).

En contexto de aviación comercial, la optimización del TAT es uno de los principales objetivos de las aerolíneas para maximizar la utilización de la flota, ya que afecta la competitividad y rentabilidad (More & Sharma, 2014). Este factor puede ser indicativo directo de una intervención MRO si sus tiempos se alinean con los definidos para cada tipo de mantenimiento, puesto que puede representar periodos extendidos de inactividad o detenciones prolongadas, las cuales se denominarán **downtimes** en términos de este trabajo. Se considerará un *downtime* si las aeronaves presentan un tiempo en tierra mayor a un umbral crítico de 24 horas (que indique al menos mantenimiento Tipo A).

En la práctica, el *flight time* promedio de operaciones con aeronaves *narrow-body* como Airbus A320 y A321 varía entre los **45 minutos hasta las 5 horas**, lo cual está en función de la ruta y las condiciones operativas (Airbus, 2024a). Por su parte, el TAT estándar para vuelos domésticos con este tipo de aeronaves oscila entre los **45 a 60 minutos** según manuales de operación y mantenimiento (Airbus, 2023), mientras que en operaciones internacionales puede extenderse a **75-90 minutos** debido a procedimientos migratorios y de seguridad más exigentes.

Un ejemplo visual de las tareas realizadas durante los tiempos de escala (TAT) lo presenta Airbus en su reporte de características y planeación para el mantenimiento de aeronaves Airbus A321 como se muestra en la Figura 1 (Airbus, 2023).

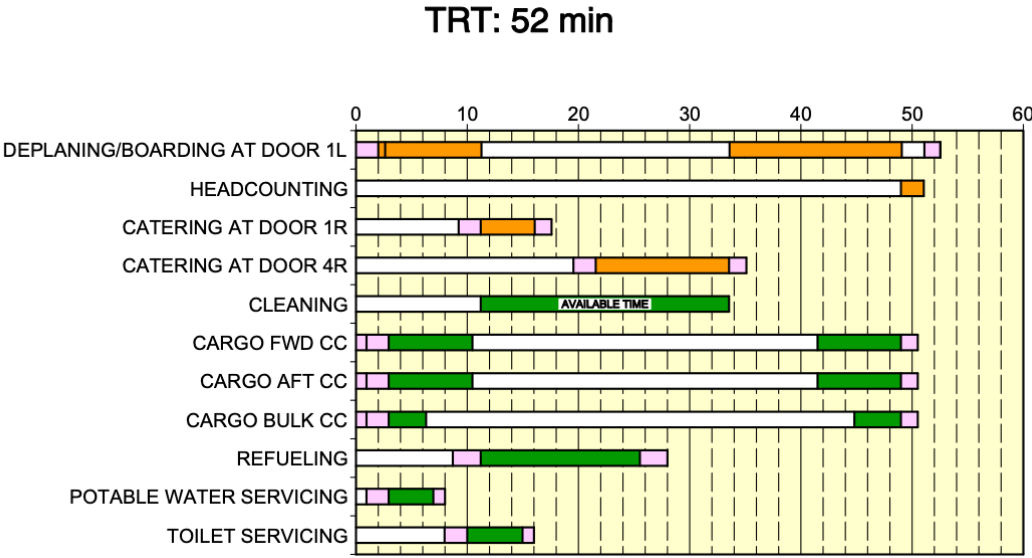


Figura 1: Actividades durante TAT de aeronaves A321. Fuente: (Airbus, 2023).

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 ciertos comportamientos operacionales que se encuentren fuera de lo común para así prevenir fallas, mejorar su rendimiento y mejorar la disponibilidad de las aeronaves. Estos comportamientos, conocidos como **anomalías**, comúnmente llevan a pérdidas económicas para las aerolíneas, por lo cual su detección temprana 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 y maximizando la diferencia entre grupos. Para ello, parte 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, 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 una flota aérea, particularmente aquellos compatibles con eventos de mantenimiento (MRO). Este enfoque busca combinar análisis cualitativo, modelamiento 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 procesados y clasificados en función de los comportamientos operacionales esperados de las aeronaves, mediante el desarrollo del modelo de análisis MRO que se ajustará a reglas predefinidas. Posteriormente, se desarrolla un entorno de visualización interactiva que permita explorar los resultados de manera dinámica y contextualizada. Finalmente, se identifican patrones críticos en la operación, como eventos prolongados en tierra o aeronaves anómalas que no cumplan con las expectativas definidas como normal.

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, identificación de eventos y valoración económica. Lo descrito se presenta en la Figura 2.

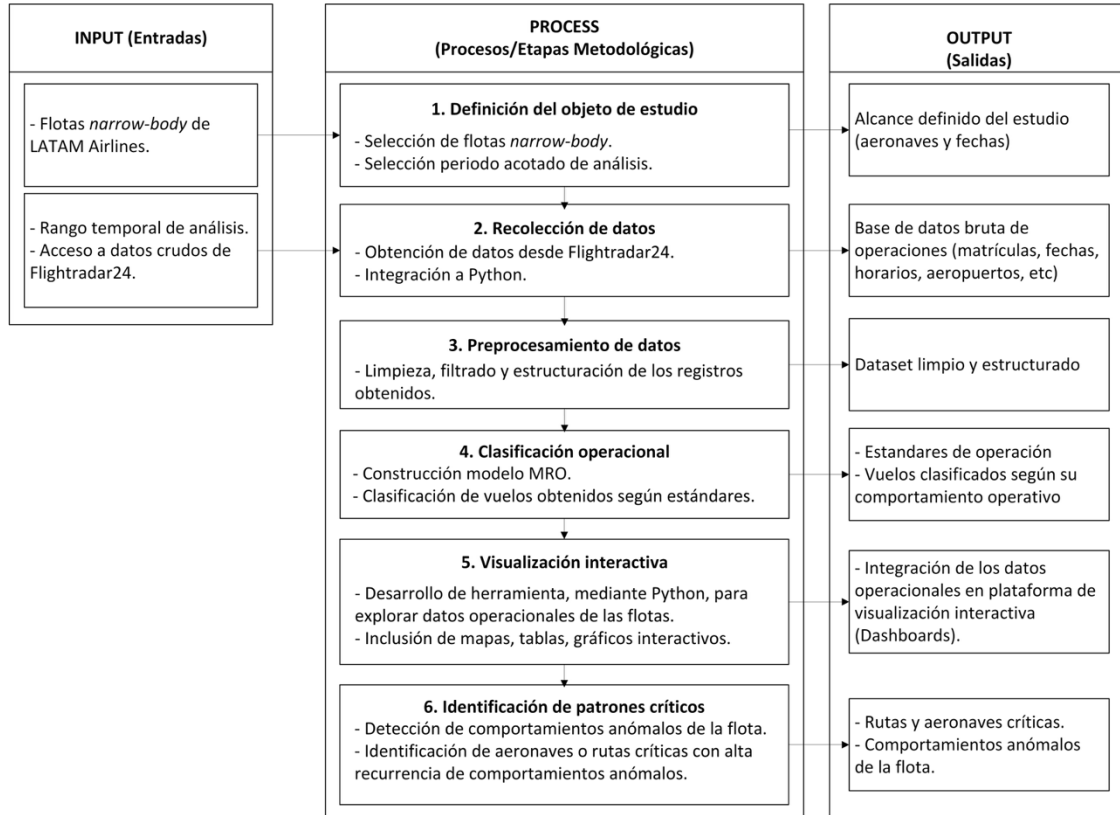


Figura 2: Esquema metodológico.

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 corresponder a un estudio de aeronaves *narrow-body*, se definen dos flotas específicas: **Airbus A321-200 y A320-200**, cuya selección se fundamenta en tres consideraciones principales. En primer lugar, ambas familias representan el núcleo de operaciones de corto y largo alcance de LATAM Airlines, constituyendo el 70% de su flota total activa al año 2024 (LATAM Airlines, 2024b). En segundo lugar, los modelos A320 y A321 comparten gran parte de su arquitectura técnica y programas de mantenimiento, lo que permite establecer comparaciones homogéneas en cuanto a eficiencia, tiempos de escala, recurrencia de eventos MRO y planificación operativa.

Así también, su alta frecuencia de utilización en rutas domésticas e internacionales regionales las convierte en plataformas críticas para la gestión de disponibilidad de flota y análisis de indicadores clave, como los son el TAT, sus *downtimes* y ocurrencia de eventos asociados a MRO. En este contexto, la elección de estas dos variantes representa un caso de estudio operacionalmente relevante, tanto para LATAM Airlines, como otras aerolíneas de perfil similar en América Latina.

A la fecha, LATAM Airlines cuenta con 18 aeronaves A321 con número de cola chilena, y con 78 aeronaves A320, cuya información se encuentra en los sitios institucionales de la aerolínea (LATAM Airlines, 2024a), y su detalle es trazable mediante Flightradar24.

3.2 Recolección de datos operacionales

Tras la definición de las flotas objeto de estudio, se procede a la recolección sistemática de datos operacionales correspondientes a ambas familias 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 atributos relevantes (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 *narrow-body* previamente definidas (Airbus A320 y A321), 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 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>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 (en formato ISO 8601)
<i>datetime_landed</i>	datetime	Fecha y hora del aterrizaje (en formato ISO 8601)
<i>flight_time</i>	float	Duración del vuelo desde el despegue hasta el aterrizaje (en minutos).

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 ya estructurado se presenta en Tabla 4.

Tabla 4: Datos extraídos y procesados desde Flightradar24 sobre vuelos Airbus A320.

<i>reg</i>	<i>orig_iata</i>	<i>dest_iata</i>	<i>datetime_takeoff</i>	<i>datetime_landed</i>	<i>flight_time</i>
CC-BFI	TBP	LIM	2025-03-01T00:00:44Z	2025-03-01T01:26:41Z	85.950
CC-BLN	BOG	BAQ	2025-03-01T00:04:37Z	2025-03-01T01:09:24Z	64.783
CC-BAY	SCL	ANF	2025-03-01T00:35:52Z	2025-03-01T02:13:28Z	97.600

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 solo 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 25000 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 créditos 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 que reduce significativamente la velocidad de descarga y exige implementar rutinas de extracción iterativas. Como resultado de estas restricciones, solo se hace posible recuperar información de un periodo continuo de tres meses (marzo, abril y mayo de 2025) para Airbus A321, y de un mes (marzo 2025) para Airbus A320 ya que su actividad operacional es significativamente mayor.

Lo anterior, considera que la misma licencia fue compartida con un estudio paralelo enfocado en aeronaves *wide-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 limitante crítica de la dependencia a 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 debe proceder a 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 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 derivar el indicador TAT que represente 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 en tierra correspondientes al TAT. Además, cada observación es asociada a la ruta correspondiente, permitiendo evaluar patrones de eficiencia por trayecto y detectar detenciones prolongadas en tierra. 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 debían 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 es asignado una etiqueta categórica, basada en el cruce de entre 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 y 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 *narrow-body* en operación regular. Para este caso, se opta por una clasificación escalonada donde los valores límite entre categorías ya incorporan implícitamente un margen de tolerancia operacional, permitiendo absorber variaciones menores atribuibles a condiciones reales como demoras en plataforma, ineficiencias logísticas o situaciones meteorológicas.

De esta manera, la lógica de clasificación se aprecia en la Tabla 5.

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

Categoría	Rango de Flight Time (min)	Rango de TAT (min)	Descripción operativa
Operación Normal	30–300	≤ 120	Operaciones regulares con tiempos en tierra dentro de lo esperado.
Operación Normal Prolongada	30–300	121–200	Operaciones extendidas en tierra, pero aún dentro de márgenes aceptables.
Retraso Operativo/ MRO Leve	30–300	201–1440	Detenciones prolongadas, potencialmente por mantenimientos menores.
Evento Crítico/ MRO Mayor	30–300	> 1440	Detenciones superiores a 24 horas, 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:

1. **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.
2. **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.

- 3. 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 relevante.

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, 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, se busca destacar aquellas aeronaves y rutas que indiquen ineficiencia operativa, donde para definir su criticidad se tienen diferentes métricas definidas a continuación.

3.6.1 Evaluación de criticidad por aeronave

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 clave presentadas en Tabla 6.

Tabla 6: Variables 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 (<i>downtime</i>) 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 reescalar 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 se considerarán como críticas, en función a su impacto acumulado sobre la eficiencia operativa.

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 Tabla 7.

Tabla 7: Variables 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 duración, elevada 1.2 para enfatizar las prolongadas	30 %
Cantidad de vuelos en la ruta	Total de operaciones en el trayecto durante el período de análisis	10 %

Al igual que en el caso anterior, se aplicó normalización con *MinMaxScaler* para estandarizar los valores. La combinación ponderada permitió 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 resumen en la Tabla 8.

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

Color	Condición lógica	Nivel de riesgo	Interpretación
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-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

En coherencia con los objetivos del estudio y la metodología previamente descrita, esta sección presenta los resultados del modelo de detección de anomalías operacionales aplicado a las flotas Airbus A321 y A320. 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 TAT y su tiempo de vuelo. Las clasificaciones resultantes permiten identificar tendencias operacionales de la flota, 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 para Airbus A321

Por medio de la API de Flightradar24, se extrajeron un total de 2384 datos para la flota Airbus A321, correspondientes a las operaciones de marzo, abril y mayo de 2025 de las 18 aeronaves de la flota. Luego del proceso de depuración y filtrado de datos según la presencia de la variable *flight_time*, la cantidad final de datos procesados corresponde a 2165 vuelos de **cinco aeronaves** A321 debido a la calidad y completitud de los registros operacionales. Esto representa una reducción del **9,2%** respecto al total inicial.

Si bien análisis final se realizó sobre una **muestra de cinco aeronaves**, correspondientes al 28% de la flota disponible, a pesar del tamaño muestral reducido, la información obtenida demostró ser suficiente para demostrar funcionalidad del modelo de análisis MRO puesto que sí fue posible visualizar comportamientos anómalos de la flota.

Para los cinco aviones en análisis, el modelo K-Means para detección de clústeres permitió clasificar los vuelos de las aeronaves en las cuatro categorías. Estos se alinean a los parámetros operacionales esperados de la flota (Sección 2.3) obteniendo los resultados visualizados en la Figura 3 y Tabla 9.

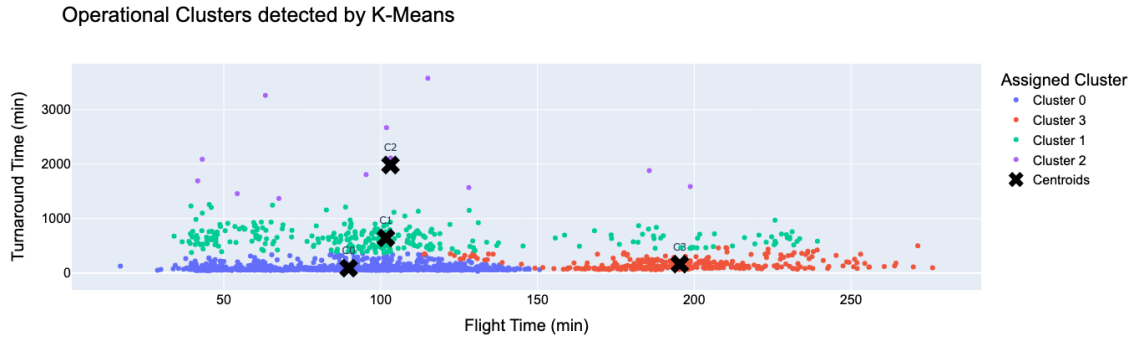


Figura 3: Clústeres operacionales de Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025) .

Tabla 9: Clasificación de clústeres operacionales de Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).

Clúster	Flight Time [min]	Turnaround Time [min]	Clasificación
0	89.82	88.41	Operación Normal
1	101.71	643.74	Retraso Operativo / MRO Leve
2	103.16	1983.03	Evento Crítico / MRO Mayor
3	195.41	163.13	Operación Normal Prolongada

Los resultados de la Tabla 9 reflejan que las operaciones que se le pueden atribuir a una intervención por Retraso Operativo / MRO Leve ocurren cuando existen detenciones cercanas a los 643.74 minutos (aproximadamente 11 horas). Según las definiciones de mantenimiento presentadas (Sección 2.2.2), el rango de detención no podría implicar completamente un mantenimiento de Tipo A en vista a su inclusión de las tareas del mantenimiento Tipo B (lo que implica una duración de al menos un día). Por lo anterior, los horario de aterrizaje de los vuelos con esta clasificación son analizados, así como la hora de despegue del siguiente vuelo, con el objetivo de identificar patrones consistentes con pernoctas operativas o mantenimiento de línea.

De un total de **291 vuelos con la clasificación MRO leve**, los resultados muestran que, si bien sólo **7 vuelos** cumplen estrictamente con un criterio clásico de pernocta (aterrizajes después de las 20:00 horas y despegue antes de las 09:00 horas), el análisis horario revela un patrón significativo. Por medio de los histogramas de la Figura 4 y Figura 5 la mayoría de los vuelos clasificados como MRO leve aterrizan entre las 23:00 y 03:00 horas, y sus siguientes despegues se concentran fuertemente entre las 09:00 y 13:00 horas.

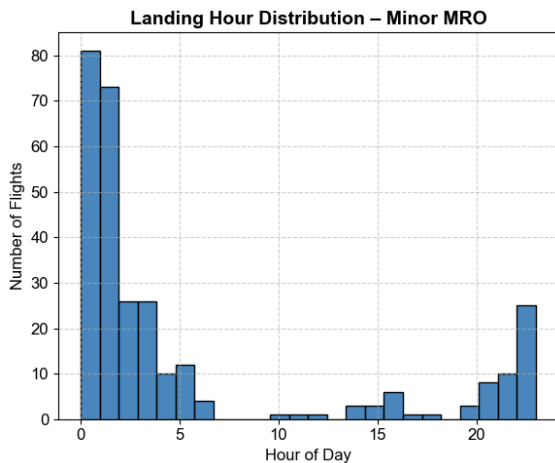


Figura 4: Histograma de horarios de aterrizaje en vuelos A321 clasificados como MRO leve (según periodo marzo-mayo 2025).

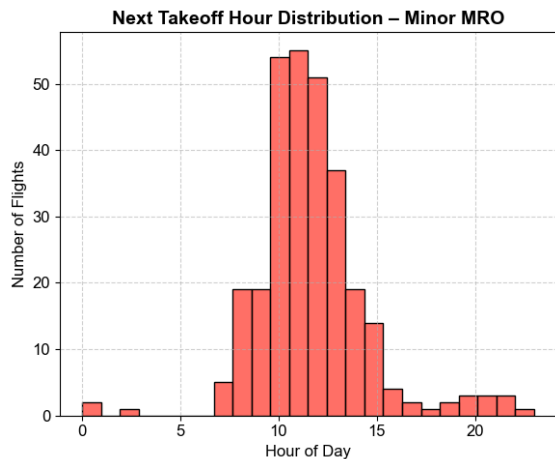


Figura 5: Histograma de horarios de despegue en vuelos A321 clasificados como MRO leve (según periodo marzo-mayo 2025).

Según lo analizado, y aplicando un criterio extendido para detectar posibles casos de mantenimiento de línea, se consideraron aquellos vuelos que permanecieron detenidos entre 6 y 14 horas (360–840 minutos), con aterrizajes posteriores a las 20:00 horas o previos a las 05:00 horas, y despegues posteriores a las 08:00 horas. Bajo este criterio, se identificaron 210 vuelos, lo que representa aproximadamente el 72% de los casos clasificados en dicha categoría.

Estos hallazgos permiten sostener que, aunque formalmente no todos los casos se ajustan a la definición convencional de pernocta, el comportamiento operacional observado sugiere que muchas de estas detenciones podrían responder a ventanas programadas de **mantenimiento de línea**, aprovechando los periodos de baja actividad nocturna para inspecciones y correcciones menores.

4.1.2 Resultados del modelo de detección de anomalías para Airbus A320

Para la flota de Airbus A320 se extrajeron un total 9025 datos operacionales para 56 aeronaves correspondientes al mes de marzo 2025; esto comparado al número total de ejemplares de la flota representa solo al 72% (respecto a las 78 registradas en Flightradar24). Sin embargo, tras el proceso de depuración para asegurar que cada evento contara con información completa sobre el tiempo de vuelo (*flight_time*), se conservaron 8272 registros del mismo número de aeronaves, es decir, una reducción del 8.3% del total de registros extraídos.

La clasificación de clústeres realizada sobre los vuelos de la flota se puede visualizar en la Figura 6 y Tabla 10, para las cuales se aplicaron los criterios descritos en la Sección 3.4 junto al modelo de detección de anomalías desarrollado.

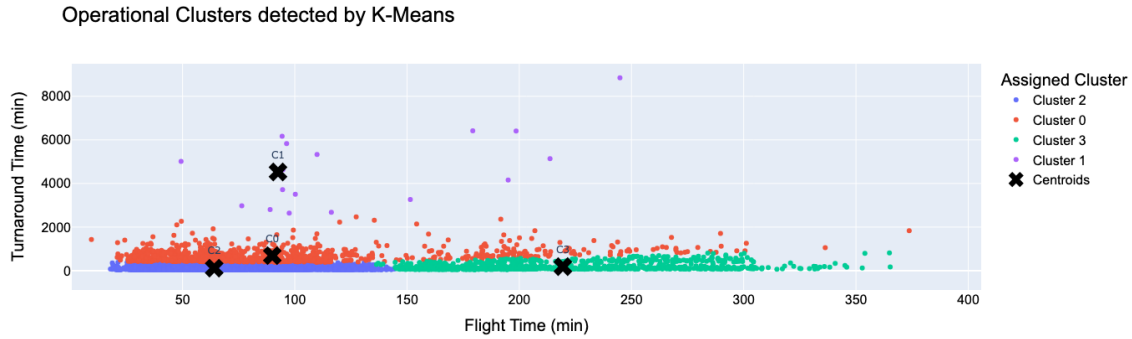


Figura 6: Clústeres operacionales de Airbus A320 (periodo marzo 2025).

Tabla 10: Clasificación de clústeres operacionales de Airbus A320 (periodo marzo 2025).

Clúster	Flight Time [min]	Turnaround Time [min]	Clasificación
0	89.94	689.66	Retraso Operativo / MRO Leve
1	92.52	4527.27	Evento Crítico / MRO Mayor
2	64.10	115.21	Operación Normal
3	219.44	183.88	Operación Normal Prolongada

Al analizar los clústeres presentados en la Tabla 10 se puede notar que el Clúster 0 de MRO leve presenta un comportamiento similar al caso de la flota A321, puesto que el tiempo de detención es levemente acotado para implicar un mantenimiento mayor de Tipo A. El clúster demuestra comportamientos con detenciones cercanas a los 689.66 minutos, correspondiente a 11 horas y media.

De los vuelos clasificados como MRO leve (1054 vuelos), un pequeño subconjunto de 54 vuelos (5%) muestra detenciones prolongadas durante la noche (entre las 20:00 horas y 09:00 horas). Por otra parte, un 61% presentan un patrón altamente compatible con mantenimiento de línea nocturno (llegadas tardías y salidas posteriores a las 08:00, con una detención entre 6 y 14 horas), los cuales se aprecian en la Figura 7 y Figura 8.

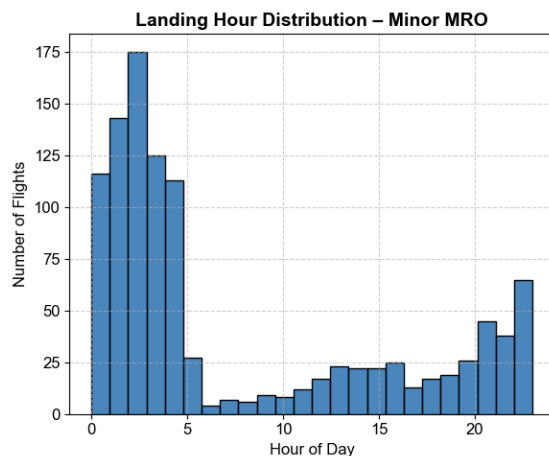


Figura 7: Histograma de horarios de aterrizaje en vuelos A320 clasificados como MRO leve (según periodo marzo 2025).

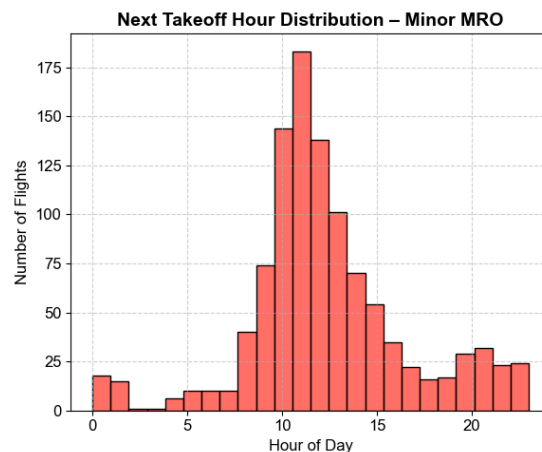


Figura 8: Histograma de horarios de despegue en vuelos A320 clasificados como MRO leve (según periodo marzo 2025).

4.2 Dashboard interactivo de visualización integrado

Como resultado del procesamiento y modelado de los datos operacionales, es desarrollado 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 del dashboard

Esta sección presentada en la Figura 9 y Figura 10, permite al usuario seleccionar tanto una flota específica como un rango de fechas a analizar, tras lo cual se despliegan cuatro visualizaciones clave. La primera muestra la disponibilidad diaria de la flota, es decir, el número de aeronaves que realizaron al menos un vuelo por día dentro del período seleccionado. A continuación, se presenta la distribución diaria de vuelos según su clasificación operacional, basada en los clústeres generados por el modelo de detección de anomalías (por ejemplo, operación normal, MRO leve o mayor).

En la segunda columna se incluye un DataFrame interactivo, 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 y rutas operadas. Los resultados de este último se alinean a lo presentado 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.

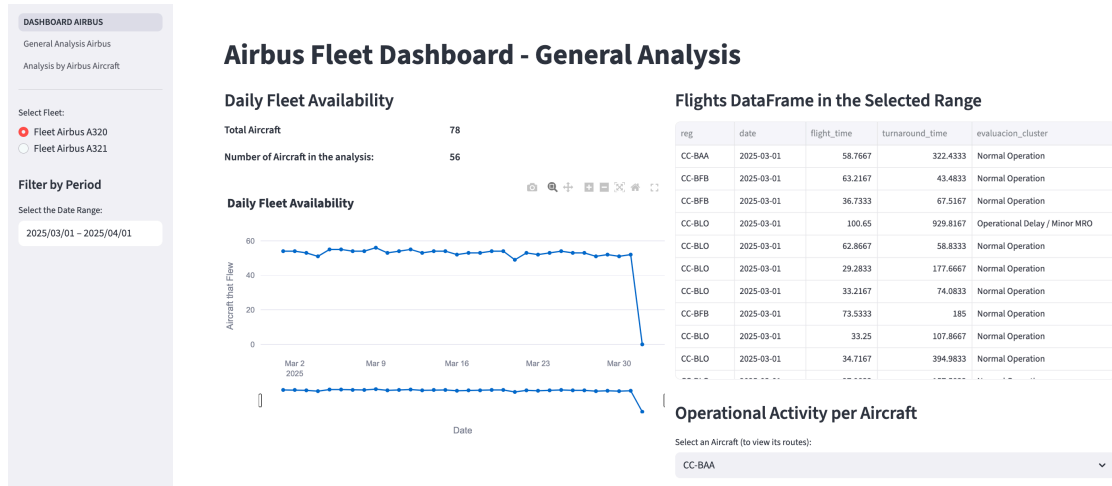


Figura 9: Ventana principal según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 1).

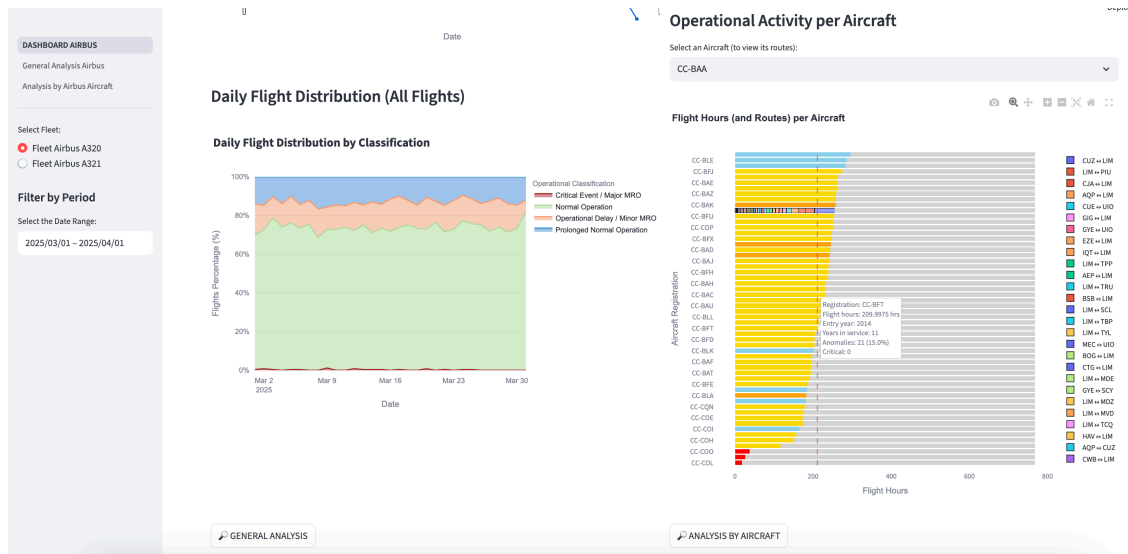


Figura 10: Ventana principal según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 2).

4.2.2 Análisis general de operaciones

En esta sección del dashboard interactivo (Figura 11 y Figura 12), se presentan visualizaciones que sintetizan el comportamiento operacional agregado de la flota. En primer lugar, se muestra la distribución global de vuelos según el modelo de detección utilizado. A continuación, se destacan las cinco aeronaves más críticas, identificadas a partir del 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).

Complementariamente, se incorpora un mapa de rutas operativas, en el cual se resaltan aquellas trayectorias que presentan alertas relevantes para la flota, ya sea por recurrencia de eventos anómalos o por concentraciones de detenciones significativas (según Tabla 7). Posteriormente, se enumeran las cinco rutas más críticas, de acuerdo con el puntaje obtenido desde el índice de criticidad. Finalmente, se incluye una visualización integrada que representa la salud operacional general de la flota, en base a los indicadores mencionados, facilitando una visión diagnóstica de alto nivel para la toma de decisiones estratégicas.

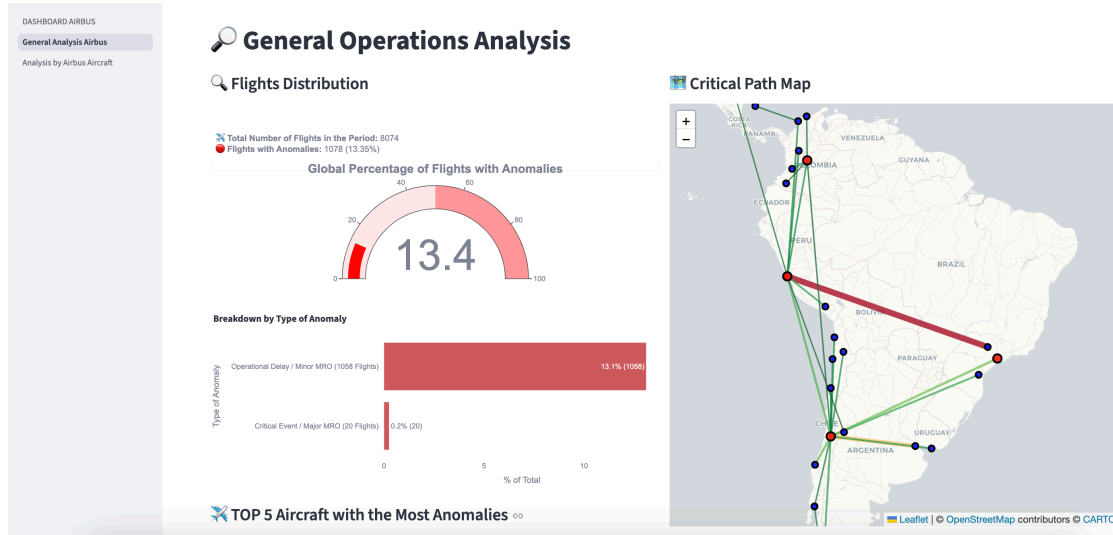


Figura 11: Ventana de análisis general de operaciones según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 1).

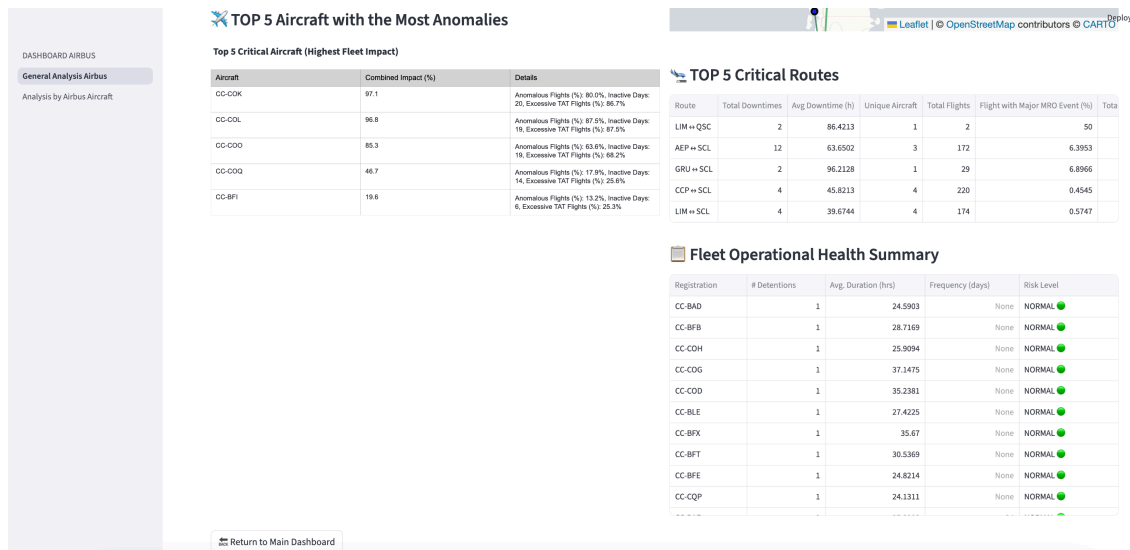


Figura 12: Ventana de análisis general de operaciones según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 2).

4.2.3 Análisis individual por aeronave

Para el módulo de análisis individual por aeronave (ver Figura 13 y Figura 14), el usuario inicia seleccionando en el dashboard principal una matrícula específica desde el gráfico de actividad operacional por aeronave. Tras esto, se despliegan los principales indicadores de rendimiento (KPIs), incluyendo el TAT promedio, la clasificación de vuelos, las horas de vuelo acumuladas y el número total de operaciones realizadas. Estos valores son presentados para comparar con los promedios de la flota, y evaluar el nivel relativo de criticidad de la aeronave.

Se incorpora además, un mapa de rutas específicas 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.

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 aeropuerto de llegada y el siguiente de salida, útil para identificar posibles vacíos de información o errores en los registros históricos.

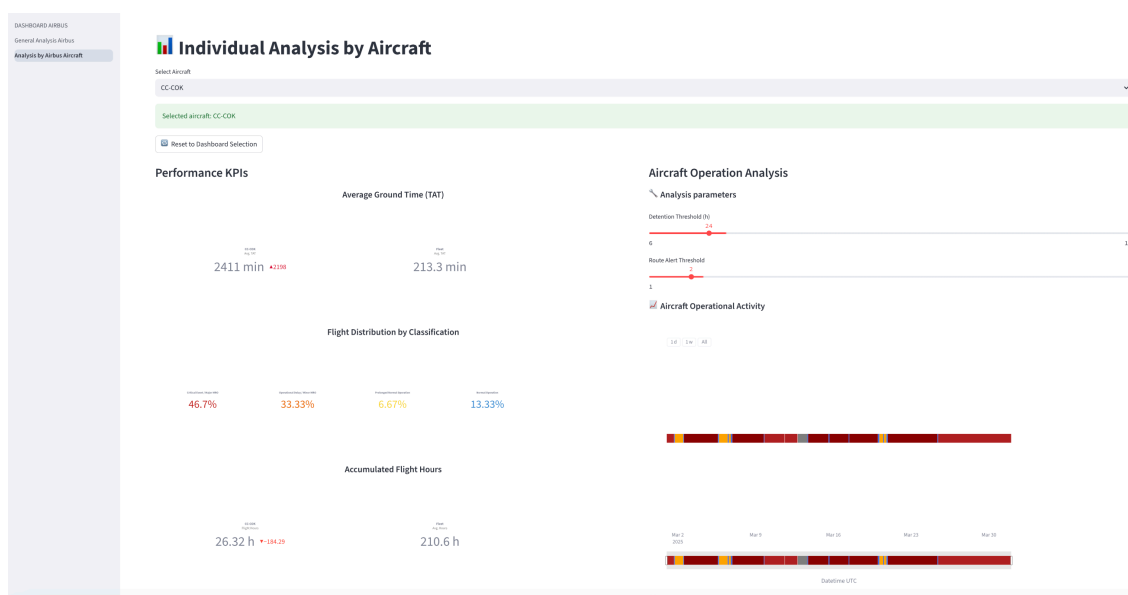


Figura 13: Ventana de análisis por aeronave según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 1).

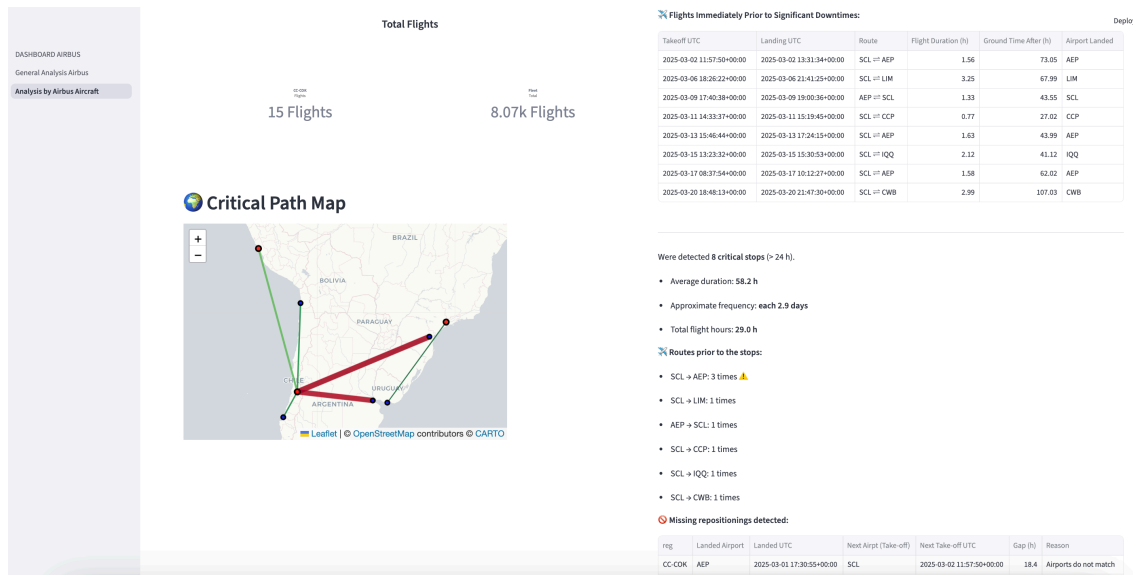


Figura 14: Ventana de análisis por aeronave según resultados para Airbus A320, periodo marzo 2025 (Parte 2).

4.3 Detección de comportamientos operacionales 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 lo esperado, 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 en Airbus A321

Los resultados obtenidos a partir de las visualizaciones del Dashboard Principal para los análisis de la flota A321 demuestran que sus aeronaves analizadas tienen un comportamiento normal y consistente en el tiempo, sin alertas graves de una ineficiencia operacional. El gráfico de la Figura 15 muestra que se tuvo una baja a 3 aeronaves durante los primeros días de marzo 2025, pero se mantuvo un comportamiento estable de 4 o 5 aeronaves durante los meses siguiente. Si bien la totalidad de los ejemplares analizados involucraron al menos una baja durante el periodo, CC-BEF se destacó por estar fuera de operaciones 16 días, los cuales ocurrieron a inicio del mes.

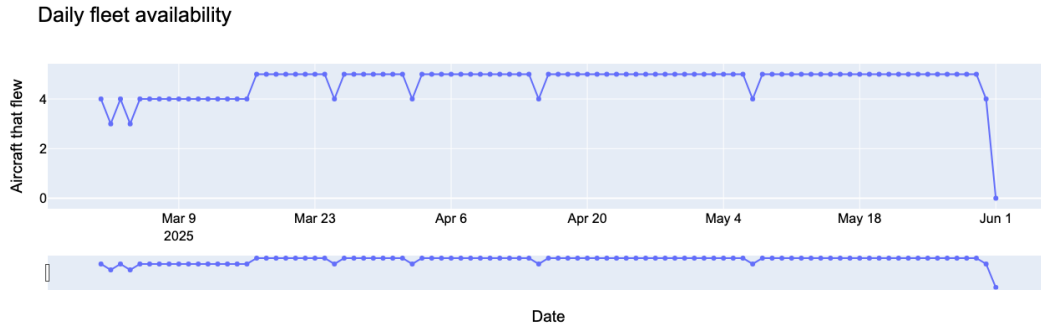


Figura 15: Disponibilidad operacional de la flota Airbus A321 durante el periodo marzo-mayo 2025.

El comportamiento normal de la flota se puede confirmar mediante la visualización del gráfico de la Figura 16, en la cual se refleja que al menos entre el 60% y 80% de los vuelos son clasificados como normal, es decir, con un tiempo de vuelo y TAT dentro de los parámetros esperados. Sin embargo, un no menor 10% es atribuible a intervenciones MRO mayor ciertos días.

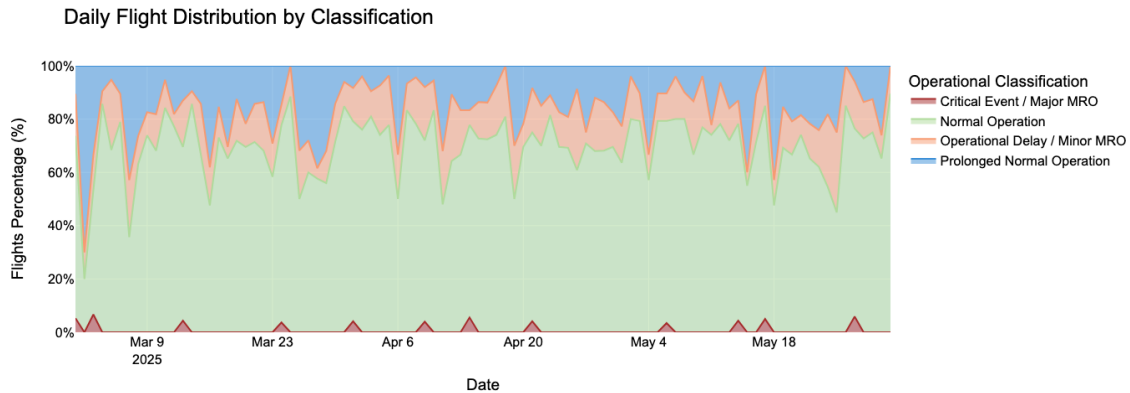


Figura 16: Distribución porcentual de los vuelos de la flota A321 en el periodo marzo-mayo 2025.

Junto a lo anterior, se evalúa el comportamiento operativo de las cinco aeronaves analizadas, considerando su historial completo de vuelos extraídos desde Flightradar24 para el periodo de análisis, y su clasificación según su nivel de formalidad y ocurrencia anómala (del tipo MRO leve o mayor). La Figura 17 muestra la distribución de las horas operativas por aeronave, categorizando su riesgo operacional según los criterios previamente definido.

De esta forma, los resultados muestran que las cinco aeronaves analizadas se encuentran en un rango de riesgo medio, lo que implica que una proporción significativa de sus operaciones pueden verse afectadas por incidencias técnicas, retrasos operacionales prolongados o condiciones de mantenimiento. Esto es recordando que según lo expuesto en la Tabla 8, una aeronave presenta **riesgo medio** cuando entre el **30% y el 60% de los**

vuelos presentan algún tipo de anomalía operacional, y/o cuando existe **al menos un evento crítico (MRO mayor)** registrado.

Si bien la proporción de vuelos anómalos no permite por sí sola establecer conclusiones determinantes respecto al estado técnico o eficiencia de la flota en su conjunto, sí permite identificar patrones preocupantes de ineficiencia a nivel individual. En particular, las aeronaves CC-BEH, CC-BEJ y CC-BEF exhiben un volumen total de vuelos considerablemente inferior al promedio de la flota, lo que sugiere baja disponibilidad operativa.

Este hallazgo es consistente con los resultados obtenidos a partir del índice compuesto de criticidad por aeronave presentado en la sección de Metodología, el cual incorpora la proporción de vuelos anómalos, días de inactividad y frecuencia de vuelos con posterior TAT excesivo. A partir de este índice, las aeronaves **CC-BEF, CC-BEH y CC-BEJ** se posicionan entre las más críticas (Tabla 11), destacando su impacto negativo en la disponibilidad global de la flota y por ser potencialmente responsables de pérdidas operacionales atribuibles a mantenimiento o subutilización estructural.

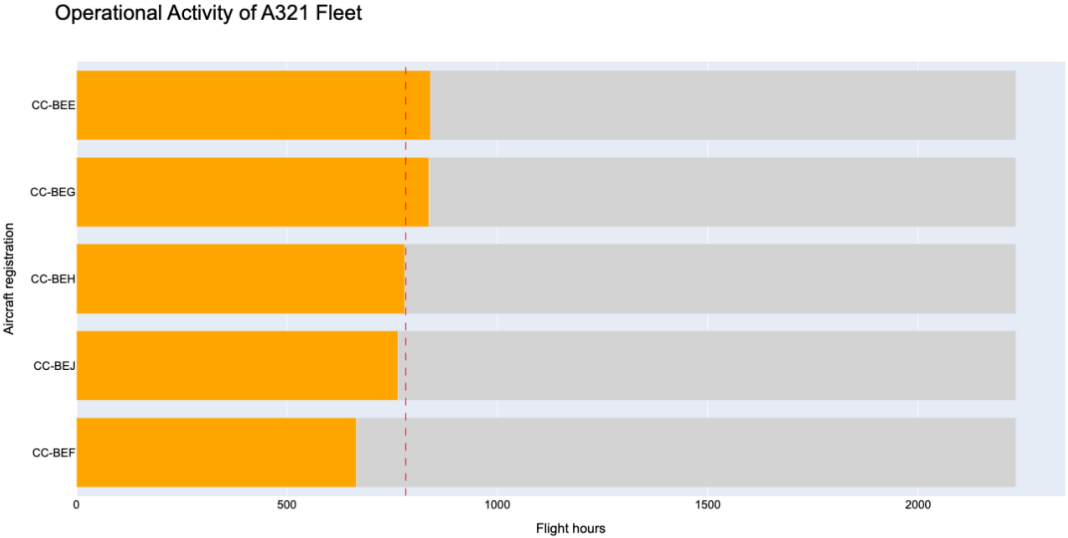


Figura 17: Actividad operacional de las aeronaves de la flota A321 en el periodo marzo-mayo 2025.

Tabla 11: Ranking de aeronaves críticas para la flota A321 según periodo marzo-mayo 2025.

Aeronave	Impacto Combinado (%)	Detalle
CC-BEF	81.40	Vuelos anómalos: 13.8% Días Inactivos: 17 Vuelos con TAT excesivo: 21.4%
CC-BEH	43.60	Vuelos anómalos: 15.9% Días Inactivos: 2 Vuelos con TAT excesivo: 20.2%
CC-BEJ	39.70	Vuelos anómalos: 14.7% Días Inactivos: 3 Vuelos con TAT excesivo: 21.3%
CC-BEG	22.80	Vuelos anómalos: 14.5% Días Inactivos: 0 Vuelos con TAT excesivo: 19.6%
CC-BEE	3.50	Vuelos anómalos: 12.5% Días Inactivos: 1 Vuelos con TAT excesivo: 17.8%

Este tipo de resultado y la apreciación individual del comportamiento operacional de las aeronaves de la flota permite priorizar intervenciones preventivas o correctivas específicas, lo cual contribuye a una gestión más eficiente de los recursos de mantenimiento, programación y asignación de flota.

En complemento, a través de las visualizaciones incluidas en el *Dashboard de Análisis General* (ver Figura 11 y Figura 12), se identifica que, de un total de 2151 vuelos analizados, únicamente un 14.3% presentó un comportamiento anómalo atribuible a eventos de mantenimiento (MRO). De este subconjunto, el 13.7% correspondió a casos asociados a MRO leve, mientras que solo un 0.6% fue clasificado como evento crítico o MRO mayor.

Estos resultados sugieren que, si bien la ocurrencia de eventos críticos es baja a nivel general, la detección temprana de tendencias operacionales irregulares puede ser clave para evitar acumulación de riesgos o tiempos fuera de servicio no planificados.

4.3.2 Rutas críticas para Airbus A321

Con lo anterior, se determina que para flota en su conjunto, son rutas críticas las presentadas en la Tabla 12. Estos resultados resumen las evaluaciones según el índice compuesto de criticidad (expuesto en Tabla 7), el cual fue calculado a partir de:

- Número y duración promedio de detenciones operativas prolongadas (**mayores a 24 horas**).

- Porcentaje de vuelos con eventos anómalos críticos (MRO mayor).
- Porcentaje de vuelos con potencial MRO (incluyendo MRO leve y mayor).
- Frecuencia operativa total por ruta.

Tabla 12: Rutas críticas para Airbus A321 según periodo marzo-mayo 2025.

Ruta	Cantidad de detención	Tiempo promedio de la detención	Vuelos totales	Vuelos MRO mayor (%)	Vuelos con potencial MRO (%)	Aeronaves que la vuelan	Criticidad
LSC-SCL	2	31.51	96	2.08	18.75	2	0.66
SCL-ZCO	1	54.39	99	2.03	16.16	1	0.62
CJC-SCL	3	36.61	358	0.84	15.36	3	0.53
EZE-SCL	1	59.63	78	1.28	32.05	1	0.53
BBA-SCL	1	26.13	54	1.85	1.85	1	0.34

A partir de los resultados presentados, se analiza lo siguiente:

La ruta **La Serena (LSC) y Santiago (SCL)** aparece como la ruta más crítica en términos del índice de criticidad, tanto por su proporción significativa de vuelos anómalos como por la frecuencia de detenciones prolongadas tras la operación. Esta ruta, aunque de corta distancia, presenta ciertas particularidades que pueden generar una carga operacional inesperada sobre las aeronaves.

LSC-SCL es una ruta que presenta alto volumen de vuelos diarios, asociado a una operación tipo "shuttle" (frecuente ida y vuelta en el mismo día), lo cual puede traducirse en intensos ciclos de vuelo por aeronave. Este tipo de operación puede aumentar el desgaste de ciertos sistemas, especialmente los vinculados a presurización y tren de aterrizaje.

Por otra parte, el aeropuerto de La Serena al operar en cercanías de la línea de costa, lo vuelve susceptible a condiciones meteorológicas específicas como la vaguada costera durante la mañana, especialmente en invierno y primavera. Este fenómeno puede provocar retrasos en el despegue, extendiendo los tiempos TAT y acumulando tareas de mantenimiento diferido, aumentando probabilidades de eventos MRO posteriores a la ruta.

La ruta **Temuco (ZCO) y Santiago (SCL)** también se posiciona entre las más críticas en el análisis, principalmente por su alta combinación de anomalías operacionales y detenciones significativas tras los vuelos. El aeropuerto La Araucanía de Temuco es un punto estratégico del sur de Chile, puesto que conecta a diversos puntos de alta afluencia turística de la región, como lo es Pucón, Lican Ray y Frutillar, esto lo vuelve un destino con alta demanda,

lo cual genera presión sobre la programación de aeronaves y eficiencia de su tiempo en tierra.

Desde un enfoque contextual, esta ruta se encuentra en una zona de alta exposición climática, en especial en los meses de otoño e invierno, con frecuentes lluvias intensas, niebla densa y baja visibilidad. Estas condiciones no solo puede generar retrasos operacionales de las aeronaves, si no que limita también tareas de mantenimiento ligero en plataforma. Esto, complementado de su limitada infraestructura técnica, lo vuelve un ruta altamente susceptible a mayores ventanas de inactividad.

De las rutas presentadas en la Tabla 12, emerge como una de las más significativas y críticas la **ruta Calama – Santiago (CJC-SCL)**, tanto por su frecuencia de operación como por su relevancia estratégica nacional. Calama es el aeropuerto de acceso a Chuquibambilla y otras faenas mineras del norte de Chile, vinculadas a la gran minería del cobre, una de las principales fuentes de ingreso del país (Corvera Vergara, 2021). Según datos del Consejo Minero y la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), la región de Antofagasta concentra más del 50% de la producción nacional de cobre (COCHILCO, 2024), y las faenas operan bajo sistemas de turnos altamente sincronizado (por ejemplo, 7x7 o 14x14).

De esta forma, la conectividad aérea entre Calama y Santiago constituye un eslabón crítico para mantener el flujo continuo de personal minero, lo cual se refleja en la alta afluencia de vuelos realizados por la flota. Un retraso o cancelación en esta ruta puede traducirse en pérdidas operacionales significativas para las empresas minera, tanto en horas hombre como en interrupción de ciclos de trabajo

De acuerdo al análisis efectuado sobre los vuelos registrados en esta ruta, se registraron múltiples eventos de detenciones prolongadas de más de 24 horas posteriores a vuelos en este trayecto, provocando que tenga un índice de criticalidad elevado y situándola entre las de mayor impacto dentro del sistema. Esto responde tanto a la frecuencia de vuelos anómalos (asociables a MRO) como al peso operativo que tiene dentro del ciclo de utilización de flota.

La coincidencia de eventos clasificados como MRO leve y algunos casos aislados de MRO mayor luego de vuelos CJC–SCL sugiere que esta ruta podría estar asociada a mayores exigencias mecánicas u operacionales, posiblemente debido a condiciones ambientales del altiplano (baja presión, altas temperaturas, polvo en suspensión).

El aeropuerto El Loa (CJC) opera a más de 2300 metros sobre el nivel del mar, lo cual afecta el rendimiento de motores y el requerimiento de potencia en despegue, aumentando el estrés térmico y mecánico sobre aeronaves (Federal Aviation Administration, 2023). Además, las condiciones desérticas, con gran amplitud térmica diaria y partículas minerales en el aire, pueden acelerar el desgaste de componentes como trenes de aterrizaje y superficies expuestas, como ha sido expresado según el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y otros estudios (U.S. Department of the Army., 1996; Wang et al., 2025).

Respecto a estas acotaciones, la identificación de la ruta CJC-SCL como crítica en términos de mantenimiento operativo permite recomendar:

- Planificación anticipada de mantenimientos de línea para aeronaves que realicen dicha ruta en ciclos frecuentes.
- Priorizar aeronaves más modernas o menos exigida para operar esa ruta.
- Considerar refuerzos de mantenimiento en aeropuertos de alta exigencia como lo es CJC, o mejorar el soporte técnico en estos puntos.

Junto a las rutas críticas presentadas, se suma la **ruta entre Balmaceda (BBA) de Coyhaique en la Región de Aysén, y Santiago (SCL)**, la cual es particularmente relevante dentro del contexto nacional chileno debido a su conectividad de zonas extremas. El análisis reveló una criticidad significativa, impulsada principalmente por una alta proporción de vuelos con TAT excesivo y eventos MRO menores.

Esta ruta atraviesa zonas de alta inestabilidad meteorológica, siendo común la presencia de vientos cruzados, lluvias intensas y niebla, particularmente en temporadas de otoño e invierno. Balmaceda, al ser un aeropuerto regional con limitaciones operacionales en infraestructura, al igual que el caso de ZCO, presenta desafíos adicionales para operaciones regulares de mantenimiento y atención en tierra. Esta situación puede conllevar a demoras acumulativas y aumentar el estrés operacional sobre las aeronaves, particularmente en condiciones de baja visibilidad o presencia de hielo en pista, por ejemplo.

Otra ruta que resulta de interés para la flota A321 es la **ruta internacional Buenos Aires Ezeiza (EZE) y Santiago (SCL)**. Esta ruta presenta una criticidad operacional elevada, con la mayor proporción de eventos anómalos en el conjunto analizado. Se identifican múltiples eventos asociados a demoras operacionales y mantenimientos menores, con una presencia no despreciable de eventos con MRO mayor.

La conexión de estos aeropuertos presenta grandes complejidades debido al cruce de la cordillera de los Andes, dejando a las aeronaves sujetas a turbulencias severas, visibilidad reducida y condiciones climáticas extremas. Este factor, junto a la alta densidad de tráfico aéreo y regulaciones que implica el transporte transfronterizo, vuelve a EZE-SCL una ruta crítica que refuerza la necesidad de un enfoque preventivo y robusto de planificación técnica para las aeronaves asignadas a esta operación.

4.3.3 Aeronaves críticas para Airbus A321

Como fue analizado, las aeronaves **CC-BEF, CC-BEH y CC-BEJ** se presentan como críticas a la disponibilidad de la flota. Analizando las visualizaciones proporcionadas para cada ejemplar en el Dashboard de Análisis Individual (Figura 13 y Figura 14) se presentan los siguientes resultados.

La aeronave **CC-BEF** en su posición de aeronave más crítica para la flota, evidenció un TAT promedio de 195.6 minutos, cifra que representa un incremento de 8.5 horas

acumuladas por sobre el promedio general de la flota. Esto sugiere una utilización subóptima del recurso, sugiriendo retrasos persistente en la rotación operacional o posibles cuellos de botella en procesos de preparación técnica o logística.

En cuanto a productividad, CC-BEF acumuló un total de 665 horas de vuelo durante el periodo, lo que representa una brecha negativa de 112 horas respecto al promedio de utilización de la flota (788 horas). Esta diferencia puede estar vinculada a tiempos de inactividad más prolongado asociados a mantenimiento, los cuales son visualizables en el gráfico de actividad operacional de la Figura 18.



Figura 18: Resumen operativo de CC-BEF Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).

Tabla 13: Resumen de detenciones de la aeronave CC-BEF Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).

Ruta	Aeropuerto Destino	Duración de la detención [hrs]	Duración del vuelo [hrs]
BQN-LIM	BQN	408	4.6
CJC-SCL	SCL	31.28	1.59
PUQ-SCL	SCL	31.38	3.09
LSC-SCL	SCL	28.21	0.69

Las detenciones observadas en la Figura 18 y detalladas en la Tabla 13, destacadas en color rojo, corresponden a eventos en los que la aeronave permaneció en tierra durante 24 horas o más. Este umbral permite identificar interrupciones operativas de magnitud significativa, frecuentemente asociadas a intervenciones de mantenimiento programados o correctivos.

Particularmente, la primera detención, con una duración de 17 días, es consistente con los tiempos típicos requeridos para inspecciones mayores en hangar, como tipo C. Esta hipótesis se ve reforzada por el hecho que el primer vuelo posterior a dicha detención tiene como origen el aeropuerto Rafael Hernández (BQN) en Aguadilla, Puerto Rico, una instalación reconocida por haber albergado centros de mantenimiento aeronáutico especializados en flotas Airbus, tales como Lufthansa Technik Puerto Rico (Lufthansa Technik, n.d.).

La hipótesis se ve confirmada al revisar los registros de vuelo directo en Flightradar24, puesto que la aeronave realizó un vuelo directo desde Lima (LIM) hacia el aeropuerto Rafael Hernández (BQN), en Aguadilla, Puerto Rico, el día 19 de febrero, y permaneció allí hasta el 16 de marzo, fecha en la que se registró su vuelo de retorno, completando 28 días detenida.

Esta secuencia operacional infiere el traslado deliberado hacia una instalación MRO, puesto que BQN ha sido históricamente una base de mantenimiento para aeronaves de la flota Airbus. Resulta particularmente significativo que esta aeronave pertenezca a LATAM Chile, ya que el aeropuerto BQN no forma parte de su red regular de operaciones en Sudamérica.

Aunque LATAM Airlines no posee un centro de mantenimiento propio en el aeropuerto Rafael Hernández (BQN), este aeropuerto ha alojado históricamente instalaciones MRO que ofrecen servicios a terceros, incluyendo clientes internacionales. LATAM ha externalizado parte de su mantenimiento mayor a centros especializados fuera de Chile, por ejemplo en Costa Rica y Emiratos Árabes (Etihad Engineering), por lo que el uso de una instalación externa en BQN resulta coherente con su modelo operativo (LATAM Airlines Group S.A., 2016).

Además, durante el período analizado, se identificaron detenciones operacionales prolongadas asociadas a un subconjunto de rutas que concluyen en el aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago (SCL). En particular, las rutas **CJC–SCL (Calama)**, **PUQ–SCL (Punta Arenas)** y **LSC–SCL (La Serena)** se destacan por concentrar detenciones cuya duración promedio supera las 29.9 horas, en el marco de un ciclo aproximado de 665.2 horas de vuelo acumuladas.

Este comportamiento es coherente con la planificación operativa esperada para el ingreso a mantenimientos tipo A, que suelen ser programados en dicho umbral de uso, y cuya ejecución es factible en el Centro de Mantenimiento (CMA) ubicado en Santiago. La concentración de estas detenciones en SCL responde tanto a la disponibilidad de capacidades técnicas como a la centralización de operaciones en ese hub principal.

Tal como se observa en la Figura 19, estas rutas coinciden con las más críticas según el índice de criticidad compuesto, el cual considera no solo la duración y frecuencia de las detenciones, sino también la incidencia de eventos MRO y la densidad operativa de la ruta. La ruta **PUQ–SCL** presenta el mayor nivel de criticidad con un **índice de 0.786**, atribuible a la combinación de largas detenciones, baja frecuencia de operación y condiciones climáticas extremas propias del sur austral, replicable al de la ruta crítica BBA-SCL.

Sin embargo, desde el punto de vista de impacto operacional, **la ruta CJC–SCL emerge como la de mayor relevancia crítica**, no necesariamente por su índice más alto, sino por su alta recurrencia y volumen de vuelos. Como se había mencionado, esta ruta es clave bajo el contexto minero del país, lo cual refuerza su condición de crítica para la flota. Este mismo comportamiento se visualiza para LSC-SCL, la cual es crítica tanto para la flota como para la aeronave.

En conjunto, estos hallazgos permiten establecer una correlación entre ciertas rutas, sus patrones de detención y la estrategia de mantenimiento implementada por la aerolínea, destacando la necesidad de integrar herramientas analíticas para una mejor programación preventiva y mayor disponibilidad de la flota en trayectos operativamente sensibles.



Figura 19: Rutas críticas de CC-BEF Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).

Dentro del grupo de aeronaves clasificadas como críticas, el análisis detallado de las operaciones de la **aeronave CC-BEH** no revela indicadores preocupantes en términos de desempeño general. Sus métricas operativas se encuentran alineadas con el promedio de la flota, con un tiempo promedio en tierra (TAT) de 189 minutos, muy cercano al valor medio de 187 minutos, mientras que el total de horas de vuelo acumuladas durante el período alcanzó las 781 horas, también coherente con el promedio general de 778 horas.

En cuanto a eventos anómalos relacionados con mantenimiento, solo el 15.88% de los vuelos realizados por esta aeronave fueron clasificados como asociados a posibles actividades MRO (leve o mayor), lo que no representa una proporción crítica desde la perspectiva operativa. Sin embargo, al observar la Figura 20, se identifica una única detención prolongada superior al umbral de 24 horas.

Esta detención se produce tras operar la ruta **BBA-SCL** (Balmaceda – Santiago), la cual ya ha sido previamente destacada como una ruta crítica dentro del análisis global de la flota. En este caso particular, la detención de CC-BEH alcanza una duración de 16.1 horas en el aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago, lo que sugiere una posible correlación entre las exigencias climáticas y operativas de esa ruta, y la necesidad de una intervención técnica o inspección posterior.



Figura 20: Resumen operativo de CC-BEH Airbus A321 (periodo marzo-mayo 2025).

Finalmente, la **aeronave CC-BEJ** presenta un comportamiento operativo que, si bien se mantiene dentro de los márgenes aceptables de desempeño para la flota, evidencia ciertos elementos que justifican una atención focalizada desde la gestión técnico-operacional. Durante el período analizado, su tiempo promedio de rotación en tierra (TAT) fue de 198 minutos, es decir, 10.9 minutos por sobre el promedio general de la flota, lo que sugiere ligeras ineficiencias en los procesos de *turnaround*. En paralelo, la aeronave acumuló un total de 764 horas de vuelo, 14 horas por debajo del promedio esperado (778 h), lo que podría estar relacionado con su mayor permanencia en tierra y con la ocurrencia de eventos anómalos aislados.

Un elemento distintivo del caso de esta aeronave es la ocurrencia de cuatro detenciones significativas, definidas como inactividades superiores a 24 horas posteriores a vuelos regulares, tal como se detalla en la Figura 21 y la Tabla 14. Estas detenciones no son aleatorias, en su mayoría, ocurren tras la ejecución de rutas identificadas como críticas en los análisis anteriores, tales como **EZE-SCL** (Buenos Aires – Santiago), **ZCO-SCL** (Temuco – Santiago), y **CJC-SCL** (Calama – Santiago). En conjunto, estas detenciones presentan una duración promedio de 46.2 horas, distribuida a lo largo de 763.9 horas de vuelo, lo cual resulta coherente con ventanas de programación asociadas a mantenimientos tipo A, especialmente cuando estos se realizan en bases con capacidades técnicas mayores, como Santiago.

Un aspecto particularmente relevante en el caso de CC-BEJ es la aparición de una detención adicional tras operar la **ruta SCL-LIM (Santiago – Lima)**. Si bien la duración de esta detención fue significativamente menor (26.46 h), su ocurrencia en un aeropuerto Hub internacional como Lima reviste importancia estratégica. Este hallazgo sugiere que la decisión de realizar una detención técnica fuera del país, aún dentro de un rango subcrítico de duración, puede estar asociada a estrategias logísticas de rotación técnica planificada, derivadas tanto del nivel de congestión en SCL como de la disponibilidad de slots de mantenimiento en bases alternas.



Figura 21: Resumen operativo de CC-BEJ Airbus A321 (período marzo-mayo 2025).

Tabla 14: Resumen de detenciones de la aeronave CC-BEJ Airbus A321 (período marzo-mayo 2025).

Ruta	Aeropuerto Destino	Duración de la detención [hrs]	Duración del vuelo [hrs]
EZE-SCL	SCL	56.63	1.92
SCL-LIM	LIM	26.46	3.31
ZCO-SCL	SCL	54.39	1.05
CJC-SCL	SCL	44.51	1.7

Las rutas que se consideran críticas para las aeronaves CC-BEH y CC-BEJ se presentan en la Figura 22 y Figura 23 respectivamente.

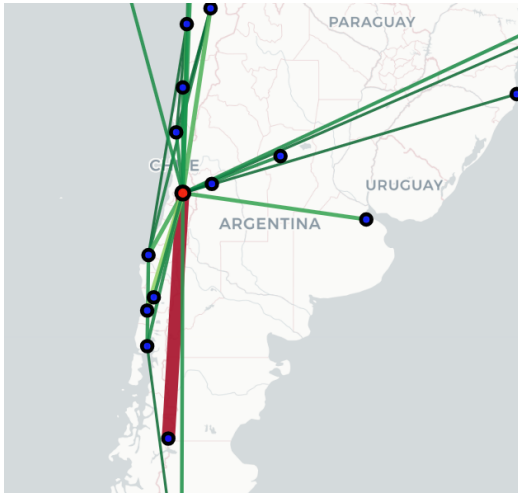


Figura 22: Rutas críticas de CC-BEH Airbus A321 según periodo marzo-mayo 2025.



Figura 23: Rutas críticas de CC-BEJ Airbus A321 según periodo marzo-mayo 2025.

Los resultados presentados sobre el comportamiento operacional de la flota Airbus A321 evidencian cómo el análisis integrado de rutas, aeronaves y eventos anómalos permite identificar patrones críticos que pueden afectar su eficiencia y disponibilidad. Este enfoque holístico permite priorizar decisiones de mantenimiento y/ planificación de activos considerando no solo frecuencia de los eventos, sino también su contexto logístico y funcional, especialmente en entornos complejos donde factores como la geografía, la infraestructura y la demanda específica de rutas convergen en decisiones claves para la sostenibilidad operativa.

4.3.4 Operaciones en Airbus A320

A partir de la Figura 24 y Figura 25, se da inicio al análisis general de las operaciones de la flota Airbus A320. Como se mencionó al comienzo de esta sección, las visualizaciones contemplan información operacional de 56 aeronaves con datos válidos, todas pertenecientes a una flota orientada a vuelos regionales en el contexto latinoamericano, principalmente Sudamérica.

Al analizar la disponibilidad operacional diaria durante el periodo (marzo 2025), mediante la Figura 24, se identifican variaciones importantes a lo largo del mes. En particular, el día 21 de marzo destaca como un punto crítico, donde se registró una reducción simultánea de **siete aeronaves** disponibles para operación. Este descenso abrupto en la flota activa podría asociarse a múltiples factores, ya sea procesos de mantenimiento planificados, o bien eventos no programados; de todas maneras, su aparición representa una oportunidad para evaluar la planificación de ciclos de mantenimiento y las estrategias de rotación de aeronaves para mitigar impactos grave sobre la red de rutas.

No obstante, por medio de la Figura 25, se evidenció que alrededor del 70% de los vuelos presentan un comportamiento operacional dentro de los rangos esperados, es decir, sin indicios de eventos MRO significativos. Este patrón indica un desempeño estable y consistente en la flota en término de operación rutinaria.

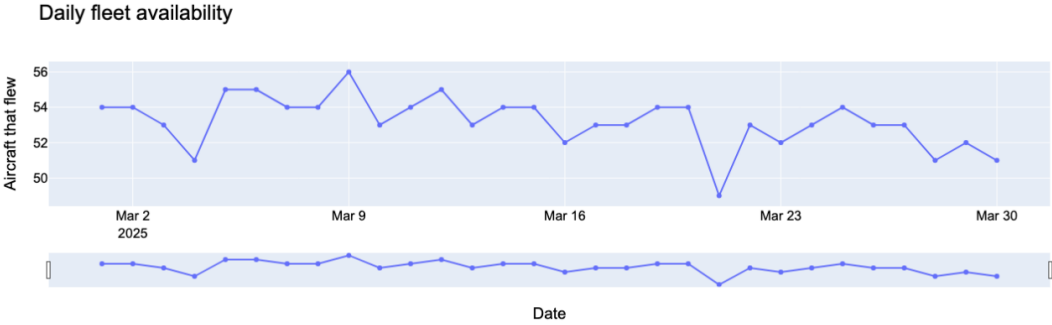


Figura 24: Disponibilidad operacional de la flota Airbus A320 durante el periodo marzo 2025.

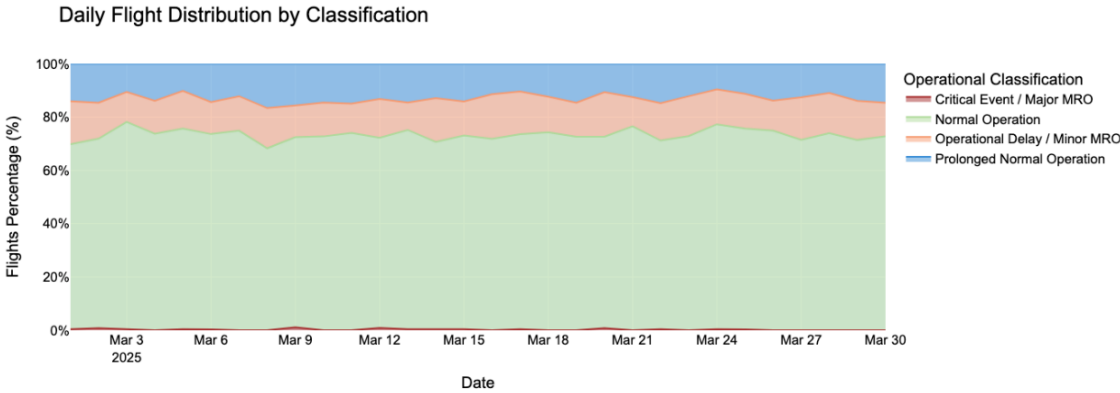


Figura 25: Distribución porcentual de los vuelos de la flota A320 en el periodo marzo 2025.

En línea a lo anterior, al ampliar el análisis general de la flota gracias a los indicadores de rendimiento (KPI) del Dashboard de Análisis General (Figura 11 y Figura 12), del total de 7854 vuelos registrados en el periodo, se identifica que solo un 13.8% de estos vuelos presentan comportamientos operacionales asociados a eventos potenciales de mantenimiento (MRO leve o mayor), donde el 0.3% son críticos. Este resultado resulta coherente con una tendencia operativa estable, especialmente considerando el alto volumen de operaciones, lo cual refuerza lo observado en la Figura 24 y Figura 25.

A pesar de que el comportamiento global de la flota no evidencia una tendencia alarmante en término de disponibilidad operacional, analizando la Figura 26 se identifican casos puntuales con desviaciones significativas respecto al patrón general de la flota. En particular, las aeronaves **CC-COO**, **CC-COK** y **CC-COL** emergen como ejemplares con comportamiento operacional crítico, según los criterios establecidos previamente para la clasificación de riesgo técnico-operacional.

Estas tres aeronaves se destacan por acumular múltiples eventos clasificados como MRO mayor, lo cual representa una afectación directa a su disponibilidad. Además, mantiene una alta proporción de vuelos con incidencias que se puede asociar a eventos MRO, clasificados como anómalos, lo cual refuerza su posición dentro de riesgo alto. Este hallazgo se ve agravado por el hecho que dichas aeronaves presentan una cantidad de horas voladas considerablemente inferior al promedio de la flota, lo cual refleja los tiempos extendidos de inactividad, ya sea por intervenciones de mantenimiento programada o no programadas, limitaciones estructurales o una menor eficiencia en su rotación operativa.

Además, un factor relevante a considerar es que las tres aeronaves (CC-COO, CC-COK y CC-COL) tienen una antigüedad superior a 22 años, lo cual las posiciona como algunas de las unidades más antiguas de la flota, considerando que las aeronaves más eficientes (como CC-BLE y CC-BFJ) operan con una edad promedio entre los 10 y 12 años. La avanzada edad de estas aeronaves no solo aumenta la probabilidad de incidencias técnicas y ciclos de mantenimiento más frecuentes, sino que también puede afectar negativamente su confiabilidad y disponibilidad operacional, tal como se observa en sus métricas de rendimiento.

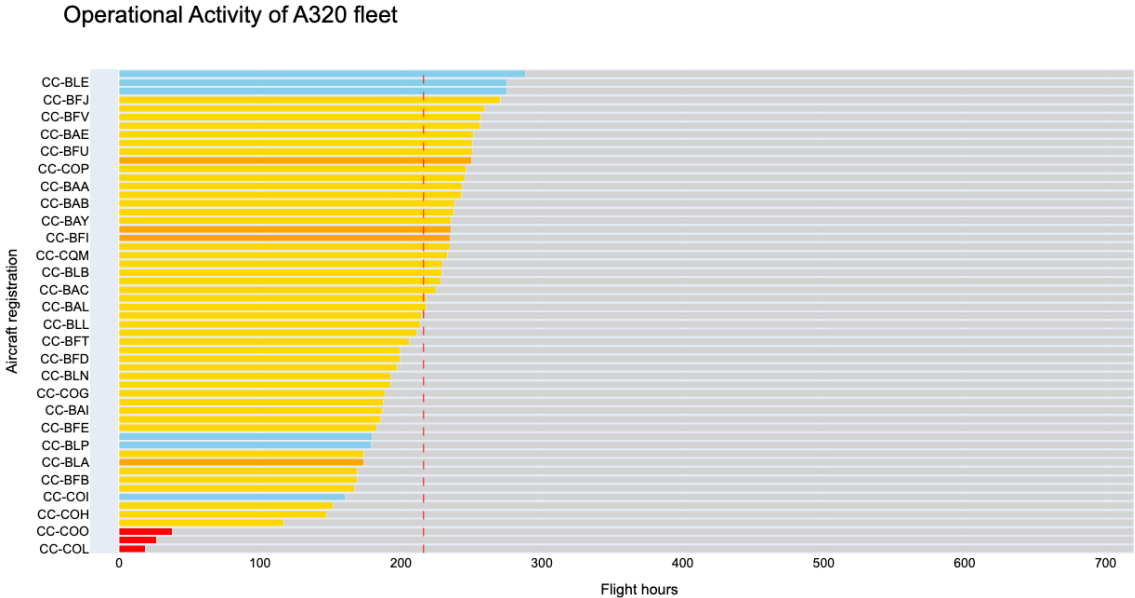


Figura 26: Actividad operacional de las aeronaves de la flota A320 en el periodo marzo 2025.

De forma consistente, al igual que en el caso de la flota A321, el ranking de aeronaves críticas elaborado a partir del índice compuesto de impacto operacional permite confirmar que las aeronaves previamente identificadas, son las que presentan mayor afectación en términos de disponibilidad. Esta posición se sustenta en su bajo número de días efectivos de operación, combinado con elevados valores de TAT y una alta proporción de vuelos anómalos, cuyos resultados se aprecian en la Tabla 15.

Este patrón de comportamiento refleja una operación ineficiente a nivel técnico y logístico, puesto que estas unidades no solo abordan una mayor carga de mantenimiento, sino también contribuyen a una subutilización estructural de la capacidad de la flota. En conjunto, estos factores las convierten en candidatas prioritarias para revisiones técnicas o recambios estratégicos, puesto que su impacto acumulado puede traducirse en pérdidas económicas por indisponibilidad y sobrecostos operacionales de mantenerlos en tierra.

Tabla 15: Ranking de aeronaves críticas para la flota A320 según periodo marzo 2025.

Aeronave	Impacto Combinado (%)	Detalle
CC-COK	97	Vuelos anómalos: 80% Días Inactivos: 18 Vuelos con TAT excesivo: 86.7%
CC-COL	97	Vuelos anómalos: 87.5% Días Inactivos: 17 Vuelos con TAT excesivo: 87.5%
CC-COO	85	Vuelos anómalos: 63.6% Días Inactivos: 17 Vuelos con TAT excesivo: 68.2%
CC-COQ	46	Vuelos anómalos: 17.9% Días Inactivos: 12 Vuelos con TAT excesivo: 25.6%
CC-BFI	21	Vuelos anómalos: 14.9% Días Inactivos: 5 Vuelos con TAT excesivo: 26.4%

4.3.5 Rutas críticas para Airbus A320

De manera análoga al análisis de rutas críticas de la flota A321, por medio de la Tabla 16 se presentan los resultados según la evaluación del índice compuesto de criticidad para Airbus A320.

Tabla 16: Rutas críticas para Airbus A320 según periodo marzo 2025.

Ruta	Cantidad detención	Tiempo promedio de la detención	Vuelos totales	Vuelos MRO mayor (%)	Vuelos con potencial MRO (%)	Aeronaves que la vuelan	Criticidad
LIM-QSC	2	86.42	2	50	100	1	0.67
AEP-SCL	12	63.65	172	6.40	27.91	3	0.44
GRU-SCL	2	96.21	29	6.90	20.69	1	0.17
CCP-SCL	4	45.82	220	0.45	20.91	4	0.15
LIM-SCL	4	39.67	174	0.57	21.84	4	0.13

Al analizar la Tabla 16, la ruta que conecta **Lima (LIM)** con **San Carlos (QSC)** emerge como la más crítica del conjunto evaluado, con un índice compuesto de criticidad de 0.67. Este resultado, aunque está basado en un volumen reducido de operaciones, revela un patrón altamente significativo desde el punto de vista del mantenimiento de aeronaves.

Durante el periodo de estudio, se puede apreciar que solo se registraron dos vuelos en la ruta LIM-QSC, ambos operados por la misma aeronave (CC-BFI) y con detenciones prolongadas superiores a 24 horas de una duración promedio de 86.42 horas en tierra. Lo relevante de estos eventos es que ambos son clasificados como MRO, y uno de ellos como MRO mayor, es decir, un evento crítico de mantenimiento con potencial impacto a la disponibilidad operativa de la flota.

Al profundizar en el comportamiento de la aeronave en particular, se observa que el patrón de vuelo fue exclusivamente de ida y vuelta entre Lima y San Carlos, sin participación en otras rutas durante el periodo. Esto sugiere que la operación tuvo como único propósito trasladar la aeronave a San Carlos para una intervención MRO planificada, lo que es coherente con el hecho que QSC (San Carlos) alberga el principal CMA de LATAM Airlines.

Este hallazgo es clave ya que permite demostrar que el modelo de análisis es capaz de detectar patrones técnico singulares, incluso en presencia de pocos vuelos, evidenciando su sensibilidad para identificar intervenciones estructurales que pueden no ser evidentes a simple vista, considerando la alta cantidad de aeronaves de la flota.

En este contexto, la alta puntuación de criticidad de la ruta LIM-QSC no representa un riesgo operativo para la flota, sino más bien una decisión estratégica de programación de mantenimiento que el modelo fue capaz de evidenciar mediante su índice de detección. Este tipo de patrones puede ser clave para entrenar futuras versiones del modelo y optimizar la planificación logística entre hubs técnicos regionales.

Por otra parte, la **ruta que conecta Buenos Aires (Aeroparque, AEP) con Santiago (SCL)** destaca por su alta relevancia operativa, posicionándose entre las rutas con mayor volumen de actividad en la flota A320, con un total de 172 vuelos registrados en el periodo analizado. Sin embargo, esta alta frecuencia contrasta un patrón preocupante pues la ruta presenta el mayor número de detenciones prolongadas superiores al umbral de 24 horas.

La ruta AEP-SCL cuenta con un total de 12 eventos de detención con una duración promedio de 63.6 horas. Este comportamiento indicia una tendencia significativa a la acumulación de tiempo en tierra posterior a la realización de esta ruta, lo cual puede comprometer la disponibilidad operativa de las aeronaves involucradas si no se gestiona adecuadamente.

Estos factores resultan particularmente relevantes al considerar que se trata de una ruta internacional cordillerana, similar a lo observado en el análisis de la flota A321 para la ruta EZE-SCL. Las operaciones que cruzan la cordillera de Los Andes están expuestas a condiciones meteorológicas altamente variables y adversas, especialmente en meses de otoño e invierno, donde visibilidad reducida y turbulencias severas son fenómenos frecuentes.

La combinación entre su alta recurrencia operacional y el impacto posterior en términos de disponibilidad sugiere que la ruta AEP-SCL debería ser considerado de **alta sensibilidad**, exigiendo una mayor planificación de contingencias y coordinación proactiva con centros MRO locales. Este patrón también valida la capacidad del modelo para identificar rutas que, pese a no mostrar indicadores extremos de riesgo, concentran eventos de detención con implicaciones operacionales relevantes.

En tercer lugar, la ruta **São Paulo (GRU) – Santiago (SCL)** emerge como un corredor de interés crítico al presentar un comportamiento poco frecuente pero operacionalmente severo. Durante el período de análisis, se registraron 29 vuelos en esta ruta, los cuales concentraron dos eventos de detención técnica prolongada con una duración promedio de 96.2 horas, cifra que supera significativamente los tiempos de detención observados en otras rutas críticas del conjunto.

Si bien el volumen de operaciones es bajo para esta ruta, lo cual limita su peso relativo dentro del índice compuesto de criticidad, el hecho que tan solo una aeronave de la flota A320 analizada atendió esta ruta durante el periodo, eleva su riesgo logístico potencial. Esta situación implica que cualquier interrupción en la cadena operativa asociada a esta ruta, como un evento MRO no programado, puede provocar interrupciones importantes, especialmente si no existen aeronaves de respaldo.

Adicionalmente, el carácter internacional de la ruta y su conexión a uno de los principales aeropuertos de Sudamérica (GRU como hub estratégico de LATAM), eleva su relevancia logística, ya que una interrupción en esta conexión puede afectar no solo las operaciones punto a punto, sino también las cadenas de conexiones intercontinentales o regionales. De

esta manera, la ruta GRU-SCL presenta un riesgo más bien asociado a la vulnerabilidad estructural del plan de flota, más que a la recurrencia de incidentes.

Continuando con las otras rutas presentadas, la **ruta Concepción (CCP) – Santiago (SCL)** se posiciona con una criticidad moderada, aunque con características que justifican una atención operativa especial. Durante el periodo de análisis, esta ruta presentó 220 vuelos, de los cuales 4 resultaron en detenciones técnicas prolongadas, con una duración promedio de 45.8 horas. Aunque los porcentajes de posibles eventos MRO es baja (20.9%), su volumen operativo y otras condiciones estructurales vuelven la ruta riesgosa.

Si bien a primera vista, esta conexión podría pasar desapercibida basado en tasas porcentuales de anomalías, su carácter de alta densidad operativa la convierte clave para la red doméstica chilena. Complementando lo presentado, un aspecto que acentúa la vulnerabilidad operativa de CCP-SCL es el perfil etario de la flota que cubre la ruta. Según los datos observados, la mayoría de las aeronaves asignadas superan los 20 años de antigüedad, siendo la más “nueva” de 17 años. La edad avanzada de la flota no solo está asociada a una mayor probabilidad de requerimientos técnicos, sino también a ciclos de mantenimiento más exigentes y una menor tolerancia a rotaciones intensivas, como es el caso de rutas de alta frecuencia como CCP–SCL.

Desde esa perspectiva, la combinación de alta utilización y flota envejecida puede acelerar la ocurrencia de eventos no programados, aún si los indicadores promedio parecen controlados. Así, la criticidad de CCP–SCL no reside exclusivamente en su proporción de anomalías, sino en el contexto operativo donde ocurre: alto volumen, envejecimiento de flota y proximidad logística que puede inducir a subestimar riesgos.

La **ruta Lima (LIM) – Santiago (SCL)**, con 174 vuelos registrados en el periodo de análisis, presenta una criticidad operativa comparativamente menor respecto a otras rutas evaluadas. No obstante, se identificaron 4 detenciones significativas, con una duración promedio de 39.7 horas, y un 21.26% de los vuelos mostraron comportamientos anómalos relacionados a eventos MRO, lo cual no es despreciable considerando su alta utilización como ruta de conexión regional.

Un aspecto diferenciador en esta ruta es la heterogeneidad etaria de las aeronaves que la operan. A diferencia de otras rutas donde predominan flotas envejecidas o acotadas a ciertos modelos, en LIM–SCL conviven aeronaves de distinto año de fabricación, lo que sugiere una mayor flexibilidad operativa y diversidad en las decisiones de asignación de flota. Este patrón podría estar vinculado a una estrategia de rotación cruzada, en la cual los hubs de Lima (LIM) y Santiago (SCL), se utilizan como puntos de relevo técnico o intervención planificada para el resto de la red.

Además, al ser una ruta interhub, es posible que algunas detenciones prolongadas no reflejen necesariamente fallas o contingencias inesperadas, sino más bien procesos de mantenimiento programado o de optimización de flota, lo cual justifica su aparente criticidad contenida. En este sentido, si bien la ruta LIM–SCL no presenta un nivel de criticidad

elevado en términos absolutos, su peso estratégico dentro de la conexión entre rutas internacionales la posicionan como una ruta que no debe ser subestimada en la planificación táctica ni en la definición de estrategias de mantenimiento.

4.3.6 Aeronaves críticas para Airbus A320

Según los resultados de ranking de impacto operacional de la Tabla 15, se destacan a las aeronaves CC-COK, CC-COL y CC-COO como críticas para la disponibilidad de la flota, debido a su clara ineficiencia operativa en el periodo analizado. Estas aeronaves cuentan como característica común que llevan más de 20 años en servicio, lo cual puede ser indicativo de fatiga operacional. El detalle de la situación operacional de cada ejemplar se pudo realizar mediante las visualizaciones del Dashboard de Impacto Individual (Figura 13 y Figura 14), cuyas se principales conclusiones se presentan a continuación.

De acuerdo con el índice compuesto de impacto operacional, la **aeronave CC-COK** se posiciona como la unidad más crítica dentro de la flota A320 (Tabla 15). Este resultado se sustenta en conjunto de indicadores que reflejan tanto ineficiencia operacional como una alta frecuencia de eventos técnicos relevantes reflejados en los KPI del Dashboard de Análisis Individual.

En primer lugar, la aeronave alcanzó un tiempo promedio en tierra entre vuelos de 2410 minutos, superando en más de 1023% el estándar esperado de 213 minutos para la flota, sugiriendo una subutilización severa de la aeronave. Esta condición es agravada al observar que solo acumula 26.3 horas de vuelo en el mes, lo cual representa una reducción del 87% respecto al promedio de 211 horas, situándola con bajo desempeño operacional.

Desde el punto de vista de anomalías en las operaciones, el 46.7% de sus vuelos se clasifican como eventos MRO mayores y el 33.3% como MRO leve, totalizando un 80% de operaciones asociadas a alguna intervención de mantenimiento. Esta es una proporción significativamente elevada y alarmante, por lo cual las operaciones requieren profundización.

Adicionalmente, se identificaron 8 detenciones significativas durante el periodo analizado, con una duración promedio de 58.2 horas y una frecuencia estimada de un detención cada 29 horas de vuelo, las cuales se pueden observar en la Figura 27. Este patrón se encuentra muy por debajo del umbral técnico habitual para mantenimiento tipo A, cuya frecuencia se estima entre las 400 y 600 horas de vuelo. Estas detenciones ocurren en su mayoría tras vuelos en la ruta AEP-SCL, la cual se identifica como crítica para la flota.

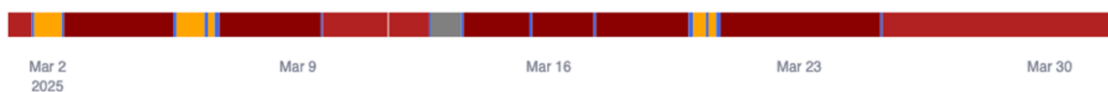


Figura 27: Resumen operativo de CC-COK Airbus A320 (periodo marzo 2025).

No obstante, al contrastar estos resultados con registros operacionales reales obtenidos directamente desde la plataforma de Flightradar24, se identifica que varios de los periodos catalogado como detenciones prolongadas, en realidad contienen vuelos intermedios que no fueron capturados por la API utilizada para la extracción. Este fenómeno revela claramente una limitación técnica importante del modelo, su dependencia directa de fuentes abiertas con resolución restringida y las limitaciones de la licencia *Explorer* mencionadas en la sección 3.3.1.

A diferencia de lo observado en los análisis de la flota A321, donde los registros si fueron consistentes, en el caso de A320 estas omisiones sugieren la necesidad de precaución adicional al interpretar métricas automatizadas de detención. Pese a las limitaciones identificadas, de todas maneras se demuestra la capacidad del modelo para identificar cuellos de botellas en las operaciones de la flota, lo cual es solucionable integrando datos primarios de las aerolíneas que aporten una trazabilidad directa.

La **aeronave CC-COL** también se posiciona dentro del grupo de mayor riesgo operacional para la flota Airbus A320, evidenciando un patrón sistemático de ineficiencia severa y alta frecuencia de eventos asociados a MRO. Durante el periodo analizado, la aeronave presenta un incremento del 870% respecto al estándar (2080 minutos respecto a 213). Esta condición se alinea con un uso operacional bajo de 18.47 horas de vuelo, una reducción del 91% respecto al promedio de 211 horas.

En términos de vuelos anómalos, la situación de CC-COL se presenta especialmente crítica, ya que es el 62.5% de sus vuelos se clasifican como MRO leve, mientras que un 25% corresponden a eventos MRO mayores, lo cual la posiciona como un riesgo operacional severo. Esto se refuerza con el análisis de patrones de detención, del cual se identifican 6 detenciones mayores a 24 horas, con una duración promedio de 66.3 horas ocurriendo cada 24.5 horas (Figura 28). Esto es incompatible con las expectativas de mantenimiento para la flota.

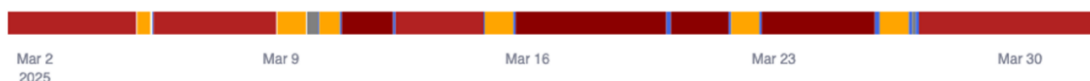


Figura 28: Resumen operativo de CC-COL Airbus A320 (periodo marzo 2025).

Desde estos resultados, las detenciones más críticas son atribuibles tras la ruta CCP-SC y SCL-AEP, las cuales son identificadas previamente como una de las rutas críticas de la flota. Sin embargo, al igual que con CC-COK, se llevó a cabo una validación cruzada con datos reales desde Flightradar24, encontrándose que varias de las detenciones prolongadas identificadas por el modelo contienen vuelos omitidos por la API.

Esto nuevamente expone las limitaciones técnicas inherentes al uso de fuentes abiertas con cobertura incompleta. De particular interés fue un evento del 10 de marzo, posterior a un vuelo AEP-SCL, donde el modelo identificó una detención de 34.9 horas, pero

Flightradar24 mostró dos vuelos con información incompleta (sin datos de destino u horario), sugiriendo un problema de indexación o transmisión parcial del ADS-B.

Este tipo de errores no solo afectan la clasificación de las detenciones, sino que también pueden modificar la criticidad atribuida a ciertas rutas o aeronaves si no se dispone de datos internos más precisos. Por lo tanto, si bien los resultados del dashboard ofrecen una representación útil de los patrones generales, en el caso de CC-COL es necesario complementar el diagnóstico con datos internos para confirmar la severidad y frecuencia de las detenciones observadas.

Finalmente, en el comportamiento operacional de la **aeronave CC-COO**, se identifican desviaciones significativas respecto a los patrones esperados para la flota A320. Esta aeronave reportó un tiempo en tierra promedio de 1602 minutos por vuelo, implicando un aumento del 750% respecto al estándar de la flota (213 minutos). Esto representa una señal alarmante de ineficiencia operativa, puesto que además, el 40.9% de sus vuelos se clasificaron como Retraso Operativo / MRO leve, mientras que un alarmante 22.7% fueron asociados a eventos críticos o MRO mayor.

En términos de utilización, la aeronave acumula solo 37.8 horas de vuelo durante todo marzo, lo cual representa una disminución de 172.8 horas respecto al promedio mensual de 210.6 horas estimado para aeronaves A320. Este nivel de subutilización es indicativo no solo de baja eficiencia operativa, sino también de un impacto negativo directo en la disponibilidad de la flota.

Desde la perspectiva de sus patrones de detención prolongada (Figura 29) se detectan 6 eventos significativos, con una duración promedio de 75.2 horas y una frecuencia anómala de ocurrencia, puesto que ocurren cada aproximadamente 49 horas de vuelo, nuevamente inferior a los esperados para mantenimientos de Tipo A (400-600 horas).



Figura 29: Resumen operativo de CC-COO Airbus A320 (periodo marzo 2025).

Estas detenciones se producen principalmente tras vuelos SCL-AEP y GRU-SCL, ambas rutas de carácter internacional de mayor exigencia técnica y logística. No obstante, al verificar estos episodios de manera directa en Flightradar24, se identifica que la aeronave en realidad, sí mantuvo actividad operacional durante algunos de los periodos donde se infería una detención prolongada.

Esta aeronave pone nuevamente en evidencia las limitaciones del modelo actual y su dependencia exclusiva de datos inferidos por secuencia temporal (aterrizaje-siguiente despegue) sin validación cruzada externa. Por tanto, si bien el modelo identifica correctamente comportamiento anómalos para CC-COO, los eventos de detención pueden estar sobreestimados, lo que evidencia la necesidad de validación con datos internos de

aerolínea para un diagnóstico completo, permitiendo una mayor robustez y validez del modelo.

A pesar de esta limitación, los patrones observados permiten evidenciar que es posible identificar un conjunto de aeronaves cuya operación durante el periodo analizado se aparta significativamente de los parámetros esperados de eficiencia y confiabilidad para la flota A320. Si bien algunas detenciones podrían estar influenciadas por vacíos o inconsistencias en los registros, los hallazgos evidencian fenómenos operacionales detectables que justifican una revisión más profunda.

En este contexto, se refuerza la necesidad de fortalecer los sistemas de trazabilidad operacional mediante el uso de fuentes internas más completas o licencias empresariales más permisivas, que permitan validar con precisión eventos críticos y mantener la integridad del diagnóstico. Como consecuencia, ciertos resultados previamente reportados, como la clasificación de rutas críticas o la posición de determinadas aeronaves como prioritarias, deben ser interpretados con cautela, reconociendo la posible influencia de errores o sesgos en los datos brutos, más que fallas estructurales reales.

4.4 Validación del modelo con conocimiento experto

Los comportamientos operacionales anómalos detectados se contrastaron con conocimiento experto en mantenimiento de LATAM Airlines Chile. Esta validación permitió confirmar en gran medida los fenómenos observados, en especial que las detenciones extensas detectadas responden a patrones operativos reales y coherentes con la gestión de flota.

Respecto al análisis de rutas críticas, se pudo constatar que algunas aeronaves mantienen asignaciones recurrentes en rutas específicas hasta que son interrumpidas por un evento operativo o técnico, generalmente debido a una intervención de mantenimiento. Con esto, se establece que en varios casos, especialmente en rutas nacionales, las detenciones no necesariamente obedecen a una falla o necesidad técnica no programada, sino a la propia planificación de rotaciones y descansos operativos. Ejemplos de ello son las paradas posteriores a vuelos como Concepción–Santiago (CCP–SCL), Santiago–Calama (SCL–CJC) o Santiago–Temuco (SCL–ZCO), que forman parte de secuencias operacionales planificadas.

Asimismo, es válido que ciertos aeropuertos constituyen indicadores claros de actividades MRO, como São Carlos (Brasil) y Aguadilla (Puerto Rico), utilizados casi exclusivamente para mantenimiento. De este modo, cualquier aeronave que opere hacia São Carlos está ingresando a mantenimiento, cuya clasificación como programado o no programado dependerá de la duración y del contexto del evento. Con lo anterior, se determinó que detenciones superiores a una semana permiten inferir un mantenimiento de tipo heavy programado.

Bajo estos criterios, se confirmó que el evento de la aeronave CC-BEF (Airbus A321), con 28 días de detención en Aguadilla (BQN), correspondió a un mantenimiento programado tercerizado. De forma similar, se validó que la detención de la aeronave CC-BFI (Airbus

A320) obedeció a una intervención de mantenimiento, dado que la ruta implicada no corresponde a operación comercial.

La validación también permitió confirmar otros patrones, como ventanas de detención recurrentes menores a 15 horas, principalmente nocturnas, que se alinean con la ejecución de mantenimiento de línea (*Daily Check*) según los procedimientos de la aerolínea. Adicionalmente, aunque la muestra de aeronaves críticas de la flota Airbus A320 no fue completamente representativa por limitaciones de la fuente de datos, se pudo corroborar que las aeronaves con más de 12 años de operación presentan una mayor frecuencia de ingresos a mantenimiento.

Sin embargo, la interacción también reveló aspectos a refinar en el modelo, orientados a aumentar su precisión y reducir falso positivos. En particular, se plantea la necesidad de incorporar mecanismos para identificar y filtrar detenciones que no estén asociadas a mantenimiento, fenómeno frecuente en rutas regionales nacionales donde las paradas responden a la planificación operativa y no fallas técnicas.

Asimismo, se sugiere integrar información pública sobre la red de rutas y destinos de LATAM Airlines, lo que permitiría anticipar si una operación corresponde a un patrón normal o a un traslado hacia un centro MRO reconocido, como São Carlos. Finalmente, se destaca la necesidad de perfeccionar la distinción entre mantenimientos programados y no programados, incorporando variables como la duración de la detención y el aeropuerto involucrado, con el fin de determinar con mayor certeza si una operación presenta un comportamiento verdaderamente anómalo.

En síntesis, la validación confirma que el modelo es capaz de identificar correctamente eventos que reflejan el comportamiento real de la flota, aunque requiere ajustes finos para optimizar la clasificación de la naturaleza de los mantenimientos y reducir falsos positivos, aumentando así su confiabilidad para el seguimiento operacional.

5 Conclusiones

Ante la creciente complejidad de las operaciones aéreas comerciales, el desarrollo de nuevas herramientas para monitorear y optimizar el desempeño técnico-operativo de las aeronaves fue un eje central en este trabajo. En este contexto, la presente memoria de título comprendió el desarrollo de una herramienta analítica para evaluar el comportamiento operacional de la flota *narrow-body* de LATAM Airlines Chile, específicamente aplicado a Airbus A320 y A321.

Mediante un enfoque que combina análisis de datos, modelado no supervisado y visualización interactiva, la herramienta permitió identificar anomalías operacionales y eventos (MRO), utilizando como fuente principal datos históricos obtenidos mediante la API de Flightradar24. El análisis aplicado a las operaciones de flotas durante un periodo comprendido entre marzo y mayo de 2025 permitió cumplir con el objetivo general del trabajo, entregando una caracterización operativa robusta de la aeronaves.

La herramienta se construyó en base a un modelo de detección de anomalías operacionales basado en el algoritmo K-Means, utilizando como variables clave el tiempo de vuelo y el *turnaround time* (TAT). Este modelo permitió identificar anomalías relevantes asociadas a posibles eventos MRO al clasificar los vuelos según los estándares de operación de las flotas, facilitando clasificación operacional basada en evidencia que da cumplimiento al objetivo específico 1.

Además, el desarrollo de un dashboard interactivo permitió visualizar y analizar de forma dinámica los resultados del modelo, cumpliendo con el objetivo específico 2. Entre las anomalías identificadas, destacó la aeronave CC-BEF (Airbus A321), que registró una detención de 28 días en el aeropuerto Rafael Hernández (Puerto Rico), instalación con capacidad CMA especializada en Airbus. La validación con conocimiento experto confirmó que este evento era coherente con actividades de mantenimiento mayor. Por otra parte, la ruta CJC–SCL mostró inicialmente una alta recurrencia de vuelos clasificados como anómalos; sin embargo, el contraste con conocimiento operacional permitió concluir que buena parte de estos casos respondían a planificaciones operativas, más que eventos de mantenimiento.

Estos hallazgos, complementados con la implementación de métricas normalizadas y ponderadas para estimar el impacto operativo en las flotas, permitieron cumplir al 100% el objetivo específico 3, estableciendo una jerarquía de riesgo operacional por aeronave y ruta útil para la toma de decisiones en mantenimiento y validando la hipótesis planteada.

La validación confirmó la efectividad de la herramienta, pero también reveló la necesidad de mejorar su precisión y reducir falsos positivos. Para ello, será clave filtrar detenciones no asociadas a mantenimiento, cruzar información de rutas normales y centros MRO, y diferenciar con mayor exactitud si el mantenimiento es programado o no. Además, las limitaciones de la licencia Explorer de Flightradar24 afectan la cobertura y precisión, por lo que integrar datos internos y nuevas métricas es fundamental para futuras mejoras.

Referencias

- AeroGuard. (2021). *¿Qué son las aerolíneas regionales?* Flyaeroguard.Com. <https://www.flyaeroguard.com/learn/how-to-become-a-pilot/what-are-regional-airlines/>
- 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>
- Air Charter Advisors. (2012, June 29). *Airbus A320 Charter | Hourly Rates, Specifications & Photos*. <https://www.aircharteradvisors.com/airbus-a320/>
- Airbus. (2023). *A321 Aircraft Characteristics - Airport and Maintenance Planning*.
- Airbus. (2024a). *A320neo*. Aircraft.Airbus.Com. <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/case-study/2024-10-a320neo-future-proof-solution>
- Airbus. (2024b). *Familia A320*. Airbus.Com. <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a320-family>
- 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>
- 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 API - Subscriptions & credits*. Retrieved April 30, 2025, from <https://fr24api.flightradar24.com/subscriptions-and-credits>
- Flightradar24. (n.d.-d). *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 3). *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
- IATA. (2025). *Airport Handling Manual*.
- ICAO. (2022). *Annex 6 — Operation of Aircraft — Part II: International General Aviation — Aeroplanes*.
- 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*.
- 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). *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.-c). *Nuestros principales aeropuertos* | LATAM Airlines. Retrieved May 2, 2025, from <https://www.latamairlines.com/cl/es/experiencia/aeropuerto/principales-aeropuertos>
- LATAM Airlines. (2024a). *Flota*. Latam Airlines Group S.A. <https://www.latamairlinesgroup.net/es/fleet>
- LATAM Airlines. (2024b). *Memoria Anual Grupo LATAM 2024*. <https://www.latamairlinesgroup.net/static-files/45a94e77-8c52-4604-9214-0888599f4478>
- Latam Airlines Group S.A. (2025). *OPERACIONES GRUPO LATAM Febrero Acumulado a Febrero*. 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. (2024, April 12). *Minimizing Downtime: How AOG Events Impact Airlines Like Delta - AAA Air Support*. https://www.aaaairsupport.com/minimizing-downtime-how-aog-events-impact-airlines-like-delta/?utm_source=chatgpt.com
- O'Connor, P. D. T., & Kleyner, A. (2011). Practical reliability engineering: Fifth edition. *Practical Reliability Engineering: Fifth Edition*, 1–484. <https://doi.org/10.1002/9781119961260>
- 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>
- 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>
- 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>
- Suau, P. (2024, October 25). *¿Qué es un hub?* <https://blogs.uoc.edu/economia-empresa/es/que-es-un-hub-2/>
- 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>
- Wiebe Helder. (2023, June 12). *Boosting Efficiency with Logistics Software for AOG in Aviation - Cargobase*. <https://www.cargobase.com/blog/aog-logistics-aviation-TM>