



Universidad Politécnica
de Madrid

**Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Informáticos**



Grado en Ingeniería Informática

Trabajo Fin de Grado

**SIMULACIÓN DE OPERACIONES,
FLUJO DE AERONAVES Y SISTEMAS
AUXILIARES EN UN AEROPUERTO**

Autor: Julio Martín López
Tutor: Juan A. Fdz del Pozo

Madrid, Enero 2026

Este Trabajo Fin de Grado se ha depositado en la ETSI Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid para su defensa.

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Informática

Título: SIMULACIÓN DE OPERACIONES, FLUJO DE AERONAVES Y
SISTEMAS AUXILIARES EN UN AEROPUERTO

Enero 2026

Autor: Julio Martín López

Tutor: Juan A. Fdz del Pozo

Departamento de Inteligencia Artificial (DIA)

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos

Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

Los aeropuertos son un elemento fundamental en la movilidad global y el transporte aéreo, jugando un papel clave en la economía, el turismo y el comercio. Su gestión es esencial para garantizar tanto la seguridad como la comodidad de los pasajeros, así como para optimizar recursos, mejorar la coordinación de operaciones y minimizar los tiempos de espera.

En los últimos años, los aeropuertos han visto un aumento de demanda [1] y la complejidad de sus operaciones. Por tanto, hace que la planificación de flujos de pasajeros, la coordinación de aeronaves y la asignación de recursos sea cada vez más importante. Esto, en parte, resalta la necesidad de herramientas de simulación que permitan analizar distintos escenarios.

Por esto, este TFG busca proporcionar una herramienta accesible y flexible diseñada tanto para mejorar como para comprender los procesos aeroportuarios. Además, el desarrollo permitirá probar diferentes escenarios y formas de gestionar las operaciones, ayudando a entender mejor cómo funcionan los procesos del aeropuerto y ofreciendo información para tomar decisiones más acertadas. De esta manera, contribuirá a mejorar la eficiencia y coordinación de eventos complejos y dinámicos.

Abstract

Airports are a fundamental component of global mobility and air transport, playing a key role in the economy, tourism and trade. Their management is essential to ensure both passenger safety and comfort, as well as to optimize resources, improve operational coordination, and minimize waiting times.

In recent years, airports have experienced a growing demand [1] and increased operational complexity. Therefore, the planning of passenger flows, aircraft coordination, and resource allocation has become increasingly important. This, in part, highlights the need for simulation tools that allow the analysis of different scenarios.

For this reason, this Final Degree Project aims to provide an accessible and flexible tool designed to both improve and better understand airport processes. Moreover, the development of this tool will make it possible to test different scenarios and management approaches, helping to gain a deeper understanding of how airport operations work and providing valuable insights for more informed decision-making. In this way, it will contribute to improving the efficiency and coordination of complex and dynamic events.

Tabla de contenidos

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación del proyecto | 1 |
| 1.2. Definición del problema | 1 |
| 1.3. Objetivos | 2 |
| 1.4. Estructura del documento | 2 |
| 2. Estado del arte y Trabajo previo | 5 |
| 2.1. Estado del arte | 5 |
| 2.1.1. Métodos de simulación | 5 |
| 2.1.2. Herramientas de simulación | 6 |
| 2.1.3. Escenarios críticos | 6 |
| 2.1.4. Limitaciones | 7 |
| 2.2. Fundamentos teóricos | 7 |
| 2.3. Trabajos previos | 8 |
| 3. Modelo Empírico Descriptivo | 9 |
| 3.1. Caracterización estadística de las operaciones aéreas | 9 |
| 3.2. Variables de estado | 10 |
| 3.3. Aeronaves | 11 |
| 3.4. Pistas | 11 |
| 3.5. Gestión de plataforma | 12 |
| 3.6. Procesos de terminal | 12 |
| 3.7. Gestión de las instalaciones | 12 |
| 3.8. Servicios auxiliares | 13 |
| 3.9. Gestión de contingencias y factores externos | 13 |
| 3.9.1. Meteorología | 13 |
| 3.9.2. Retrasos en cadena | 13 |
| 3.9.3. Fallos técnicos | 14 |
| 3.10. Diagrama visual del flujo | 14 |
| 3.11. Diagrama de sistema físico | 15 |
| 4. Prototipo 1º | 17 |
| 4.1. Definición de los límites del prototipo | 17 |
| 4.1.1. Componentes incluidos en el prototipo | 17 |
| 4.1.2. Componentes excluidos en el prototipo | 18 |
| 4.2. Modelo matemático | 18 |

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----------|
| 4.2.1. Modelado temporal del flujo de llegada | 18 |
| 4.2.2. Modelado del proceso de llegadas | 19 |
| 4.2.3. Modelado temporal del flujo de salidas | 19 |
| 4.2.4. Modelado del sistema de salidas | 19 |
| 4.2.5. Modelado de los tiempos de servicio | 20 |
| 4.2.6. Grafo de conexiones de aeropuertos | 20 |
| 4.2.7. Influencia de factores externos | 21 |
| 4.3. Modelo computacional | 22 |
| 4.3.1. Diseño del simulador | 22 |
| 4.3.2. Estructura de datos | 24 |
| 4.3.3. Funciones principales de la simulación | 25 |
| 4.3.4. Parámetros del modelo | 26 |
| 4.3.5. Datos de la simulación | 27 |
| 4.3.6. Evolución del código | 28 |
| 4.4. Experimentación del prototipo | 30 |
| 4.4.1. Diseño de escenarios | 30 |
| 4.4.2. Parámetros de las simulaciones | 31 |
| 4.5. Análisis de los datos de la simulación | 31 |
| 4.5.1. Análisis descriptivo | 31 |
| 4.5.2. Inferencia estadística | 37 |
| 5. Prototipo 2º | 41 |
| 5.1. Dashboard aeroportuario | 41 |
| 5.2. Evolución de la lógica de la simulación | 43 |
| 5.2.1. Gestión de pistas | 43 |
| 5.2.2. Asignación de estacionamientos | 44 |
| 5.2.3. Procesamiento de procesos en paralelo | 44 |
| 5.3. Análisis de los datos de la simulación | 44 |
| 5.4. Resultados de la experimentación del prototipo | 46 |
| 6. Resultados y conclusiones | 57 |
| 6.1. Análisis comparativo de los prototipos | 57 |
| 6.2. Evaluación de los objetivos del TFG | 59 |
| 6.3. Trabajo futuro | 61 |
| 6.4. Análisis del impacto | 62 |
| 6.4.1. Impacto general | 62 |
| 6.4.2. Impacto en los objetivos de desarrollo sostenible | 62 |
| Bibliografía | 65 |
| Anexos | 69 |
| A. Primer anexo | 69 |
| A.1. Módulos del programa | 69 |
| A.2. Código fuente de la simulación | 69 |
| A.3. Gráficos completos | 77 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 3.1. Diagrama ciclo de las aeronaves | 14 |
| 3.2. Diagrama del sistema físico del aeropuerto | 15 |
| 4.1. Diagrama del flujo de llegada | 19 |
| 4.2. Grafo centralizado de conexiones | 21 |
| 4.3. Ops. aéreas por turno escenario base prototipo 1 | 34 |
| 4.4. Ops. aéreas por turno escenario de estrés prototipo 1 | 34 |
| 4.5. Ops. aéreas por turno escenario adverso prototipo 1 | 35 |
| 4.6. Regresión escenario base | 36 |
| 4.7. Regresión escenario de estrés | 36 |
| 4.8. Regresión escenario adverso | 37 |
| 4.9. Intervalo escenario base | 38 |
| 4.10.Intervalo escenario de estrés | 38 |
| 4.11.Intervalo escenario adverso | 39 |
| 5.1. Centro de control dashboard | 41 |
| 5.2. Vista operativa dashboard | 42 |
| 5.3. Vista táctica dashboard | 42 |
| 5.4. Alerta crítica dashboard | 43 |
| 5.5. Vuelo de emergencia dashboard | 43 |
| 5.6. Evolución de la cola de aterrizaje | 46 |
| 5.7. Ops. aéreas por turno escenario base prototipo 2 | 47 |
| 5.8. Ops. aéreas por turno escenario de estrés prototipo 2 | 47 |
| 5.9. Ops. aéreas por turno escenario adverso prototipo 2 | 48 |
| 5.10.Ops. aéreas por turno escenario crítico | 48 |
| 5.11.Heatmap escenario base | 49 |
| 5.12.Heatmap escenario de estrés | 50 |
| 5.13.Heatmap escenario adverso | 51 |
| 5.14.Heatmap escenario crítico | 52 |
| 5.15.Gráfica pasajeros escenario base | 53 |
| 5.16.Gráfica pasajeros escenario de estrés | 53 |
| 5.17.Gráfica pasajeros escenario adverso | 54 |
| 5.18.Gráfica pasajeros escenario crítico | 55 |
| A.1. Gráfica pasajeros volumen entero escenario base | 78 |
| A.2. Gráfica pasajeros volumen entero escenario de estrés | 78 |
| A.3. Gráfica pasajeros volumen entero escenario adverso | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| A.4. Gráfica pasajeros volumen entero escenario crítico | 79 |
|---|----|

Índice de cuadros

| | |
|--|----|
| 4.1. Estructura de datos de las aeronaves | 24 |
| 4.2. Estructura de datos de los recursos | 25 |
| 4.3. Parámetros de entrada | 26 |
| 4.4. Coeficientes enero-diciembre (Factores adimensionales de ponderación mensual) | 27 |
| 4.5. Perfil horario de operaciones | 27 |
| 4.6. Tabla de la meteorología por estación | 27 |
| 4.7. Clasificación de datos de la simulación | 28 |
| 4.8. Muestra de los eventos registrados en el log | 29 |
| 4.9. Parámetros de cada escenario | 31 |
| 4.10. Estadísticas escenario base | 32 |
| 4.11. Estadísticas escenario de estrés | 32 |
| 4.12. Estadísticas escenario de atasco | 33 |
| 5.1. Parámetros actualizados prototipo 2 | 45 |
| 5.2. Parámetros escenario crítico | 45 |
| 6.1. Comparativa escenario base | 58 |
| 6.2. Comparativa escenario de estrés | 58 |
| 6.3. Comparativa escenario adverso | 59 |

Capítulo 1

Introducción

En este apartado se introduce la problemática de la gestión de operaciones en aeropuertos. Se presentarán los objetivos principales de este trabajo para estudiar el flujo de aeronaves y el rendimiento de los recursos críticos del sistema. Finalmente, se expondrá la estructura general que seguirá el proyecto y la organización del documento.

1.1. Motivación del proyecto

El presente Trabajo de Fin de Grado surge como respuesta al crecimiento sostenido del sector aéreo, una tendencia que está llevando al límite la capacidad operativa de las infraestructuras aeroportuarias actuales. Esta tendencia crea cuellos de botella que terminan convirtiéndose en retrasos y malas experiencias para los viajeros.

Por ello, es fundamental poder anticiparse. Desarrollar un simulador es la estrategia más inteligente, ya que nos permite crear escenarios complejos y medir la eficiencia del aeropuerto de manera segura y barata.

1.2. Definición del problema

En los últimos años, la creciente complejidad de las operaciones aeroportuarias y el aumento del tráfico aéreo han hecho que la gestión de los aeropuertos se convierta en un desafío tanto estratégico como operativo. La planificación de flujos de pasajeros, la coordinación de operaciones en pista y la optimización de los recursos requieren herramientas que permitan analizar diferentes escenarios posibles e intentar anticipar posibles fallos y cuellos de botella sin que esto afecte a la operación real.

En este contexto, la simulación de eventos discretos se ha consolidado como una metodología efectiva para evaluar procesos e identificar problemas potenciales, ya que permite reproducir de manera controlada el comportamiento de

Capítulo 1. Introducción

sistemas complejos en función del tiempo y de la interacción entre múltiples recursos.

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio y modelización del flujo de aeronaves, con especial atención a los procesos de aterrizaje, estacionamiento y despegue, así como la influencia de los servicios auxiliares en los tiempos operativos. El sistema se ha implementado mediante técnicas de análisis de datos y metodologías estadísticas. El sistema de simulación produce información estructurada sobre el flujo de aeronaves y las operaciones del aeropuerto, incorporando variaciones debidas a temporadas de vacaciones, condiciones climáticas y otros eventos que pueden causar retrasos o cambios en la programación de vuelos.

En resumen, este Trabajo de Fin de Grado busca ofrecer una aproximación práctica al análisis de operaciones aeroportuarias mediante la simulación, aportando una herramienta que contribuya a la gestión eficiente de operaciones en entornos de alta complejidad.

1.3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un modelo de simulación de eventos basado en tiempo discreto que reproduzca el flujo de aeronaves en un aeropuerto, incluyendo las fases de llegada, aterrizaje, estacionamiento y salida, así como los procesos auxiliares asociados y factores externos.

De este objetivo general se han definido una serie de metas que son las siguientes:

- **Definir y modelar el sistema aeroportuario:** identificando los componentes físicos, los flujos de aeronaves y los factores empíricos que impactan la operación.
- **Formular la metodología matemática:** basándose en la *Teoría de Colas* y en procesos estocásticos para modelar el flujo operacional aeroportuario.
- **Implementar y validar un prototipo funcional:** que gestione correctamente la concurrencia de eventos y el uso de recursos compartidos.
- **Analizar e interpretar los resultados obtenidos:** evaluando métricas clave, como los tiempos de espera y los cuellos de botella, para proponer mejoras operativas.

1.4. Estructura del documento

En esta sección se redacta un breve listado con las secciones de interés del trabajo. Está compuesto por capítulos y anexos.

- **Capítulo 2.** Está dedicado al estudio del arte, donde se analizan los principales conceptos teóricos, trabajos previos y metodologías existentes.

1.4. Estructura del documento

- **Capítulo 3.** Describe el modelo empírico descriptivo del proyecto, detallando los componentes que definen el funcionamiento de un aeropuerto en el mundo real.
- **Capítulo 4.** Detalla el desarrollo e implementación del primer prototipo.
- **Capítulo 5.** Detalla el desarrollo e implementación del segundo prototipo.
- **Capítulo 6.** Presenta los resultados obtenidos a partir de la simulación y recoge las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del proyecto.
- **Bibliografía y Anexo.** Presenta la bibliografía, los anexos de código y resultados, y las referencias empleadas a lo largo del trabajo.

Capítulo 2

Estado del arte y Trabajo previo

Este capítulo presenta una revisión del Estado del Arte y los trabajos previos relevantes para la simulación de operaciones aeroportuarias [2]. El objetivo es establecer el contexto teórico y tecnológico en el que se enmarca este proyecto, analizando los fundamentos de las metodologías claves empleadas en el sector.

2.1. Estado del arte

El objetivo de este apartado es revisar las tecnologías, metodologías y herramientas utilizadas en la simulación de operaciones aeroportuarias. Se analizan tanto los fundamentos prácticos como teóricos que sustentan el desarrollo del modelo, así como las soluciones existentes en el ámbito académico.

2.1.1. Métodos de simulación

Actualmente, existen diversos métodos de simulación que permiten modelar y analizar de manera precisa las operaciones [3]:

- **Simulación discreta (DES):** se centra en la representación de eventos que ocurren en momentos específicos, como las llegadas y despegue de aeronaves y el flujo de pasajeros.
- **Simulación basada en agentes (ABS):** Modela el comportamiento individual de cada componente del sistema a través de reglas definidas que determinan sus acciones y decisiones.
- **Simulación continua:** Representa los flujos de manera ininterrumpida, siendo especialmente útil para analizar el flujo de pasajeros y densidad de aeronaves. Permite simular simultáneamente los eventos puntuales de los vuelos.
- **Simulación estocástica:** Se centra en incorporar aleatoriedad o incertidumbre en los modelos, los valores de entrada pueden variar según las distribuciones de probabilidad. Esto hace que se produzca una incertidumbre en los tiempos y flujos, evaluando así el rendimiento del sistema.

2.1.2. Herramientas de simulación

Existen varias herramientas que permiten modelar y analizar el flujo de aeronaves, como puede ser Arena [4], GPSS [5] o Simpy [6]. Estas facilitan la evaluación de tiempos de espera y la optimización de recursos.

Varias de estas herramientas ofrecen interfaces visuales intuitivas, mientras que otras destacan por la flexibilidad y personalización mediante código. Por lo general, estas plataformas nos permiten identificar cuellos de botella, como la saturación de la pista de aterrizaje, el retraso en el embarque de pasajeros o la gestión ineficiente de los recursos como vehículos de servicio y puertas de embarque, y evaluar diferentes escenarios operativos en aeropuertos, proporcionando información útil que ayuda en la toma de decisiones y en la planificación de mejoras operativas.

Además de identificar cuellos de botella, las herramientas de simulación permiten evaluar diferentes escenarios operativos, lo que ayuda a los gestores aeroportuarios a tomar decisiones informadas sobre la mejora de procesos.

Una de las principales ventajas de las herramientas de simulación es su capacidad para optimizar los procesos operativos de un aeropuerto. Utilizando estas simulaciones, es posible modelar y probar diferentes estrategias de asignación de recursos, como la asignación de puertas de embarque o la gestión del flujo de pasajeros.

Teniendo esto en cuenta, simulando diferentes niveles de capacidad o ajustes en los tiempos de servicio, es posible encontrar la combinación óptima que mejore la utilización de los recursos disponibles. Esto no solo mejora la experiencia de los usuarios, sino que también aumenta la eficiencia de manejo del aeropuerto.

2.1.3. Escenarios críticos

Además de la optimización de procesos, estas herramientas permiten la evaluación de escenarios críticos que podrían afectar la eficiencia de las operaciones aeroportuarias.

Estos escenarios críticos pueden incluir:

- **Condiciones meteorológicas adversas:** Pueden reducir la capacidad de aproximación y despegue, afectan tanto a las aeronaves como al flujo de pasajeros.
- **Alta demanda de pasajeros:** El incremento en el flujo de pasajeros provoca colas más largas y puede generar retrasos en los vuelos debido a la acumulación de pasajeros en áreas operativas.
- **Retrasos de vuelos:** Estos retrasos no solo afectan a la puntualidad de vuelos individuales, sino que pueden generar un efecto dominó sobre otras operaciones.

2.1.4. Limitaciones

Dicho esto, estas herramientas tienen sus limitaciones que pueden dificultar su uso o restringir los resultados que se pueden obtener de la simulación:

- **Complejidad:** Muchas de estas plataformas requieren de conocimientos avanzados de programación o modelado.
- **Limitaciones de interfaz:** Plataformas basadas en código (Simpy [6]) no tienen interfaz visual, lo que puede dificultar la interpretación del modelo.
- **Especialización:** GPSS [5] es muy específica para los tipos de simulación militar e industrial, por lo que puede no ser ideal para simulaciones completas de operaciones aeroportuarias.
- **Escalabilidad:** Algunas de estas plataformas tienen limitaciones para adaptar el modelo a escenarios cambiantes o específicos.

2.2. Fundamentos teóricos

El modelo propuesto se basa en una simulación de eventos basada en tiempos discretos, dinámicos y estocásticos, siguiendo los principios de simulación descritos por Antonio Jiménez Martín [7]. Dicho sistema avanza cada vez que ocurren eventos relevantes, como puede ser la llegada o el aterrizaje de una aeronave.

En este modelo, en la simulación de eventos discretos se describe el estado del sistema con conjuntos de variables de estado. Estas variables son condiciones que pueden ir cambiando con el transcurso del tiempo. Por ejemplo, que la pista de despegue esté libre u ocupada, es decir, si una aeronave quiere despegar, pero hay tres aeronaves por delante esperando. Se trata de un modelo dinámico, ya que el sistema va evolucionando cada vez que transcurre el tiempo, y estocástico, ya que presenta comportamientos aleatorios debido a diferentes factores, como la cantidad de demanda, el tráfico de aeronaves o la meteorología, siguiendo así el enfoque estocástico que plantea Sixto Ríos Insua [8].

El modelo aeroportuario se basará en la *Teoría de Colas* (Fundamental of queueing theory [9] y *Queueing systems* [10]), que ayuda a realizar el análisis matemático de los sistemas de espera y capacidad. En concreto, en este caso el modelo aeroportuario será un modelo de cola FIFO. Este tipo de modelo de cola (First in, First out) funciona de tal manera que la entidad que llegue antes al servicio es atendida antes que las que lleguen después (Probability, statistics, and queueing [11]). En este caso, los aviones actúan como entidades que ingresan al sistema para recibir un servicio, en este caso, el aterrizaje o despegue, y permanecen en la cola hasta que el servicio se libere. Por ejemplo, cuando ya no haya aviones en la pista. Además, no permite operaciones simultáneas. Por lo tanto, serán secuenciales y habrá una pista con la capacidad de despegue y aterrizaje. Existen otras políticas de gestión de las colas de espera, que tienen en cuenta prioridades, resolución de incidentes y conflictos. En un escenario real se puede

Capítulo 2. Estado del arte y Trabajo previo

implementar FIFO como base y activar otras según ciertas reglas. La simulación puede servir para evaluar que gestión de las colas es mejor en cada escenario.

Este enfoque del modelo de simulación, permite que el flujo de las operaciones y el estado del sistema se pueda analizar como el resultado de experimentos de simulación donde trabajamos sobre indicadores como el tiempo promedio de espera de cada avión que está en la cola, el tamaño de dicha cola, el nivel de utilización de dicha pista, etc. [12].

2.3. Trabajos previos

En los últimos años, ha habido varios estudios sobre la simulación de operaciones aeroportuarias, enfocándose en la logística de pasajeros, la gestión de los servicios aeroportuarios y la optimización del flujo de operaciones. Entre estos estudios, quiero destacar el trabajo realizado en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México [13].

Este trabajo desarrolló dos modelos de simulación que coordinaban las llegadas y salidas de las aeronaves, así como sus movimientos. Este estudio permitió identificar patrones de congestión y propuso muchas mejoras en las asignaciones de aeronaves en pista. Usaron modelos de simulación discreta, donde se representan actividades que ocurren en momentos específicos, como la llegada o el aterrizaje. Se basaron en datos reales del AICM, mostrando operaciones de vuelo, distancias, tiempo, etc. Determinaron que (AICM) tenía operaciones cercanas a su máxima capacidad y propusieron ajustes operativos para mejorar la eficiencia. Usaron un simulador clásico, técnico y sencillo de codificar (SIMNET II). Su metodología hace que el desarrollo de modelos como el propuesto tenga una base sólida.

Más allá de estudios de casos específicos, una de las principales organizaciones europeas es Eurocontrol [14], que actúa como el gestor de tráfico aéreo y establece el marco empírico, publicando datos sobre la capacidad de las pistas y los retrasos, proporcionando así información crucial para la optimización del espacio aéreo.

Además, a nivel de investigación y desarrollo, se encuentra la iniciativa SESAR[15], que busca modernizar y armonizar la gestión del tráfico aéreo en toda Europa. Para ello, construyen modelos de simulación de eventos basados en tiempos discretos a gran escala.

Finalmente, a nivel de implementación industrial, encontramos compañías tecnológicas líderes como Leonardo[16]. Esta empresa es fundamental, ya que construye e implementa la tecnología que materializa los trabajos de investigación de SESAR y los requisitos de gestión de Eurocontrol. Su labor es crucial porque desarrollan los sistemas tangibles que operan en las torres de control y los centros de ruta en el mundo real.

Capítulo 3

Modelo Empírico Descriptivo

Para abordar el desarrollo del prototipo de este trabajo, se comenzará describiendo la modelización empírica, en la cual se analizan y definen los componentes del sistema aeroportuario y los factores externos que influyen en él. El resultado de este análisis es el modelo empírico descriptivo, el cual describe conceptualmente los elementos clave de la simulación.

3.1. Caracterización estadística de las operaciones aéreas

El modelo empírico desarrollado para esta simulación representa las operaciones de aeronaves y el flujo de pasajeros dentro del aeropuerto. Se consideran las pistas de aterrizaje y despegue, áreas de estacionamiento y procesos asociados a cada vuelo.

Para la construcción del modelo empírico se han usado datos reales proporcionados por AENA sobre el Aeropuerto de Madrid Barajas. Estos datos permiten caracterizar de manera precisa las operaciones aéreas.

A partir de esta información se establecen las distribuciones empíricas, lo que permite replicar en la simulación la variabilidad observada en la operación real del aeropuerto.

Revisando los datos estadísticos del año pasado [1], durante 2024, se registraron un total de 420,182 operaciones, con un promedio mensual de 35,017 operaciones y una desviación típica de 1,952 aprox (1,951.88).

Durante el año 2024, el aeropuerto registró un total de 419,332 (99.79%) operaciones comerciales y 850 de aviación general (0.21%). Entre las operaciones comerciales, 131,095 (31.3%) fueron nacionales y 288,237 (68.7%) internacionales.

Aunque los datos detallados por franja horaria no están disponibles pública-

mente, estos valores sirven como base para estimar la tasa media de llegadas y salidas, la cual se emplea en el modelo matemático. Sin embargo, es importante destacar que la cantidad de operaciones se adapta a la configuración específica simulada.

3.2. Variables de estado

Las variables de estado son fundamentales para analizar la eficiencia de las operaciones y la evolución del sistema bajo distintos escenarios. Se describen a continuación las variables principales que se emplean durante la simulación, podemos distinguirlas en diferentes tipos:

- Variables de entidad: identifican y caracterizan al agente principal (la aeronave) en su ciclo de vida (aterrizaje → despegue). Podemos encontrar atributos como:
 - Id aeronave: Identificador único y permanente asignado a cada aeronave. Permite rastrear los diferentes vuelos que realiza y su cambio de datos operativos. Ejemplo: V921.
 - Id vuelo: Identificador del vuelo específico que realiza una aeronave en una ruta determinada. Este identificador cambia con cada nuevo trayecto. Ejemplo: IB334.
 - Número de pasajeros: Número total de pasajeros transportados por vuelo.
 - Origen: Ciudad desde el cual despegue la aeronave.
 - Destino: Ciudad al cual llega la aeronave.
 - Hora de Salida del Origen: Hora real en la que la aeronave despegue del aeropuerto de origen.
 - Hora Programada de Llegada al destino: Hora estimada de llegada según la programación del vuelo.
 - Hora real de Llegada: Hora efectiva en la que la aeronave aterriza en el aeropuerto de destino.
 - Hora de Estacionamiento: Momento en el que la aeronave finaliza su rodaje y queda estacionada en el aeropuerto.
 - Hora Programada de Salida: Hora establecida en el itinerario para que la aeronave despegue del aeropuerto.
 - Hora de Despegue: Hora real en la que la aeronave despegue, dando por finalizado su ciclo en el aeropuerto.
 - Tiempo de Ciclo de la aeronave: Duración total del tiempo que transcurre desde el aterrizaje de la aeronave hasta su siguiente despegue.
- Variables de recursos: definen la capacidad y el estado de los servidores físicos que atienden a las aeronaves. En este caso, son:

- Pista de Aterrizaje: Cada aeronave debe solicitar permiso para poder aterrizar. La pista cuenta con una capacidad máxima de 10 aeronaves en cola, lo que permite un flujo ordenado y seguro durante las operaciones de llegada.
 - Pista de Despegue: Cada aeronave debe solicitar autorización para utilizar pista. Esta también tiene una capacidad máxima de 10 aeronaves en cola, garantizando un control adecuado del tráfico aéreo y evitando congestiones en las salidas.
 - Parking: Es el área donde las aeronaves permanecen estacionadas después de aterrizar. Actualmente, su capacidad es ilimitada, aunque se recomienda establecer un tope para optimizar el uso de espacio.
- Variables de estado operacional: Se enfocan en la posición en el tiempo y en la lógica de la simulación. La variable principal, denominada **estado** es actualizada por cada evento de la simulación, lo que permite trazar y garantizar la secuencia lógica y cronológica de las operaciones.

3.3. Aeronaves

Distinguir los tipos de aeronaves [17] que operan en el aeropuerto es crucial para la simulación. Esta clasificación permite identificar información esencial sobre cada vuelo. En el modelo de simulación se han clasificado dos categorías fundamentales:

- Aeronaves comerciales: Engloba todas las aeronaves que transportan pasajeros, independientemente de su tamaño.
- Aeronaves de carga: Aeronaves dedicadas exclusivamente al transporte de mercancías (suele ser la minoría). Su característica es que no llevan pasajeros y sus tiempos en tierra suelen ser diferentes.

3.4. Pistas

Las pistas [18] son elementos clave en la infraestructura aeroportuaria y actúan como los servidores principales dentro del modelo matemático de colas que representa el flujo de aeronaves. Cada pista funciona de manera independiente:

- Pista de aterrizaje: Representa el punto de entrada al sistema aeroportuario para las aeronaves, su función es procesar las operaciones de aterrizaje.
- Pista de despegue: Este recurso actúa como punto de salida del sistema para las aeronaves que han completado sus operaciones en tierra, se utiliza exclusivamente para las maniobras de despegue.

Las pistas, por lo tanto, son componentes esenciales, ya que determinan el rendimiento del sistema, la formación de colas y los tiempos de espera.

3.5. Gestión de plataforma

El parking es un elemento fundamental en la operatividad aeroportuaria, ya que es el espacio donde se ubican las aeronaves una vez en tierra. Su gestión influye directamente en la fluidez del tráfico aéreo, si el parking se satura, el resto del sistema también se ve afectado, generando retrasos y bloqueos en la cadena operativa. Por este motivo, la asignación de plazas y el orden de ocupación son procesos esenciales para mantener un funcionamiento eficiente y evitar la congestión del aeropuerto.

- Posiciones de Contacto: Permiten el desembarque directo a la terminal mediante un finger o una pasarela.
- Posiciones remotas: Requieren transporte adicional, como autobuses, para llevar a los pasajeros a la terminal.

3.6. Procesos de terminal

Los procesos de terminal engloban todas las etapas que un pasajero debe completar desde que entra al edificio terminal hasta que accede a la aeronave.

Incluyen la facturación y despacho de equipaje, también conocido como check-in, los controles de seguridad y el control de pasaportes en vuelos internacionales. Estos procesos son vitales, ya que la congestión en estos puntos retrasa el proceso de *embarque* [19] y, en consecuencia, impide que la aeronave pueda ser programada para su salida a tiempo.

3.7. Gestión de las instalaciones

La gestión se centra en la operatividad y mantenimiento de la infraestructura física del aeropuerto [20]. Se trata de asegurarse de que todo lo que necesitan los pasajeros, la mercancía y las aeronaves esté disponible y funcionando.

Dentro de un aeropuerto hay varias infraestructuras clave que, si fallan, pueden afectar en gran medida al sistema aeroportuario. Algunos ejemplos de estas infraestructuras son:

- Pasarelas de Embarque: También conocidas como fingers, que conectan la aeronave con la terminal.
- Sistemas de Transporte de Personas: Incluyen las escaleras mecánicas y pasillos rodantes.
- Suministros: Se tienen en cuenta la limpieza y la electricidad.
- Sistema de Equipajes: Son las cintas que llevan las maletas y las máquinas que las clasifican.

Para que todo esto funcione bien, se intenta que las cosas se averíen lo menos posible para no generar retrasos, y si pasa, que se arreglen lo más rápido posible.

Por ello, hay dos tipos de mantenimiento a tomar en cuenta:

- Preventivo: Son revisiones programadas para evitar averías importantes.
- Correctivo: Reparación de algo que se ha averiado de forma inesperada.

3.8. Servicios auxiliares

Los servicios auxiliares se refieren al conjunto de operaciones técnicas y logísticas que se realizan sobre la aeronave mientras se encuentra en la plataforma o puerta de embarque.

Estas tareas se ejecutan de forma concurrente e incluyen:

- Repostaje: Suministro de combustible mediante camiones cisterna.
- Handling de Rampa: Carga y descarga de equipajes y mercancías.
- Servicios de Cabina: Catering, limpieza interior, y gestión de residuos.

La eficiencia y coordinación de estos servicios son cruciales, ya que determinan el tiempo total que la aeronave permanece inoperativa en el parking. Cualquier retraso es cualquiera de estos procesos impacta directamente a la hora de salida, pudiendo generar retrasos que impacten a la hora de salida de otros vuelos.

3.9. Gestión de contingencias y factores externos

La capacidad real de un aeropuerto casi nunca coincide con su capacidad teórica, esto se debe a que siempre hay factores externos que complican las operaciones aeroportuarias tales como la seguridad, los pasajeros, el mantenimiento, repostaje, equipaje y carga que obligan a recurrir a otros planes para mantener todo funcionando.

3.9.1. Meteorología

La Meteorología es el factor externo que más afecta posiblemente a la aviación. El viento, la niebla o tormentas fuertes hacen que se reduzca la capacidad de operatividad de un aeropuerto.

Esto obliga a aumentar la distancia entre aviones tanto en el aire como en tierra. El problema es que eso reduce el número de despegues y aterrizajes y como consecuencia, empiezan a formarse colas de espera y retrasos en tierra.

3.9.2. Retrasos en cadena

Un aeropuerto funciona como parte de una red global. Por ello, la puntualidad de un vuelo depende de varios factores, incluyendo lo que pase tanto en el aeropuerto de destino como el de origen.

Capítulo 3. Modelo Empírico Descriptivo

Si un avión llega tarde de su vuelo anterior, ya se empieza a desorganizar todo y provoca imprevistos que hacen que el aeropuerto tenga que reorganizar sus recursos sobre la marcha.

3.9.3. Fallos técnicos

Los aeropuertos suelen estar preparados para todo tipo de imprevistos. Aun así, hay veces que ocurren fallos imprevistos que provocan percances:

- Bloqueos de pista: Si se detecta alguna incidencia menor o algún objeto en pista, hay que cerrar la pista para inspeccionarla.
- Averías: Cuando una aeronave tiene una avería mientras está estacionado y no puede moverse.

3.10. Diagrama visual del flujo

A continuación, se presenta un diagrama visual que representa el flujo general de eventos en el aeropuerto y cómo las aeronaves transitan entre los distintos estados operativos:

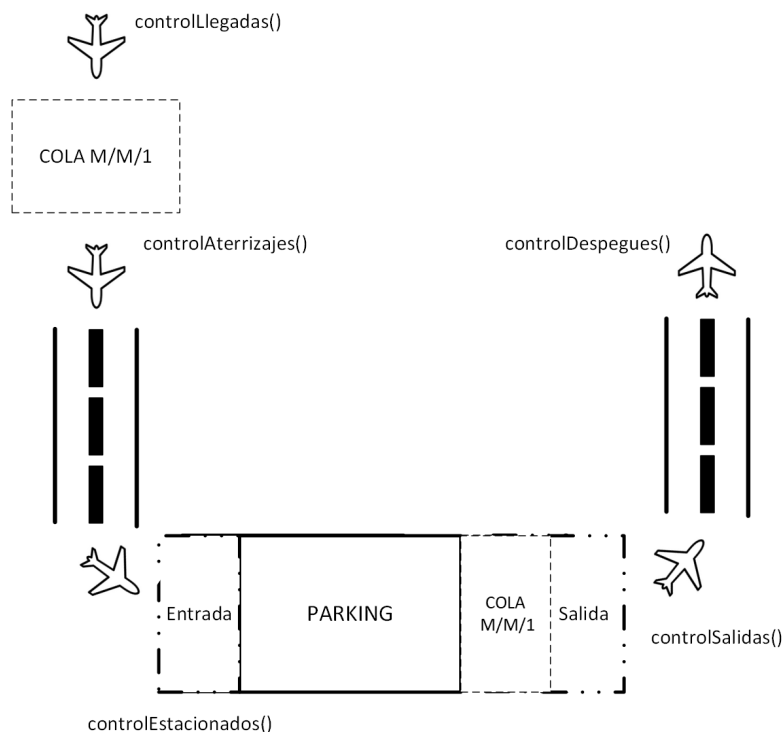


Figura 3.1: Diagrama ciclo de las aeronaves

3.11. Diagrama de sistema físico

Este esquema sintetiza visualmente los componentes del modelo empírico descritos en las secciones anteriores. El diagrama ilustra el flujo principal de las aeronaves a través de los recursos clave y las colas asociadas, así como la influencia de los procesos de terminal, la gestión de las instalaciones y los servicios auxiliares.

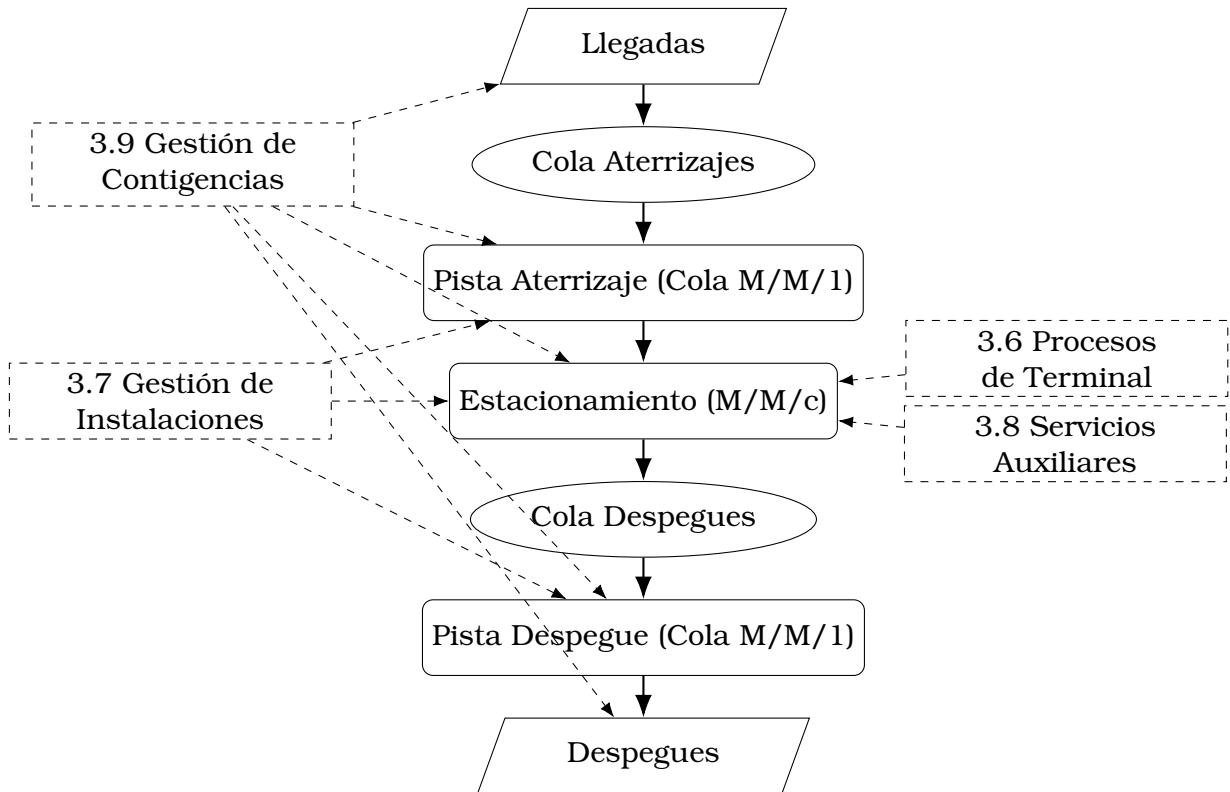


Figura 3.2: Diagrama del sistema físico del aeropuerto

Tal y como se observa en la figura 3.2, el Aeropuerto responde como sistema a la prestación de los servicios que demandan los vuelos programados, se planifica para garantizar: eficiencia, seguridad y capacidad.

Capítulo 4

Prototipo 1º

Este capítulo presenta el Prototipo 1º, la primera implementación funcional del simulador de eventos basado en tiempos discretos. El objetivo de este prototipo es validar la arquitectura básica del código y la gestión de recursos usando *Simpy*.

Como prototipo inicial, esta versión cuenta con una serie de simplificaciones. El propósito de este apartado es realizar un análisis crítico de su estado actual, identificando el alcance y sus limitaciones.

4.1. Definición de los límites del prototipo

Tras establecer en el capítulo anterior el modelo empírico descriptivo que describe el funcionamiento real de las operaciones aeroportuarias, resulta necesario delimitar que elementos serán incluidos y cuáles quedarán fuera del prototipo de simulación.

El objetivo de esta sección es acotar el alcance del modelo, indicando que procesos del sistema aeroportuario serán representados. Esta delimitación permite garantizar una coherencia con la realidad observada, evitando complejidades innecesarias y centrándose en los componentes básicos o esenciales de la simulación.

4.1.1. Componentes incluidos en el prototipo

Para este prototipo inicial, se han seleccionado los elementos más básicos del modelo empírico descriptivo. Estos componentes no representan al aeropuerto en su totalidad, más bien, representan sus características fundamentales para simular de forma realista los principales cuellos de botella del sistema.

Variables de Estado: Se ha implementado el conjunto completo de las variables de estado mencionadas anteriormente en el modelo empírico descriptivo

Aeronaves: Este prototipo se centra solo en aeronaves comerciales, ya que estas

Capítulo 4. Prototipo 1º

constituyen el 99.79% de las operaciones aéreas del aeropuerto

Pistas: Se ha modelado un sistema de pistas, compuesto por una pista dedicada al aterrizaje y otra al despegue. Ambos son recursos únicos con capacidad unitaria, ya que solo se puede realizar una operación en dicha pista a la vez. Ambas pistas tienen una cola finita para poder aterrizar, con una capacidad máxima de 10 aviones por pista.

Parking: Se ha implementado la zona de estacionamiento de aeronaves como un recurso central. Se modela como un almacén con capacidad máxima finita de 50 aeronaves.

Sistemas Auxiliares: No se han implementado como procesos independientes. Sin embargo, su impacto en la simulación si se ha modelado. Este efecto se ha implementado en una variable que afecta el retraso estocástico que se añade al tiempo de estacionamiento de la aeronave.

4.1.2. Componentes excluidos en el prototipo

Para mantener el enfoque de este prototipo inicial, varios sistemas complejos del modelo empírico han sido excluidos.

Procesos de Terminal: En línea con lo dicho anteriormente, todos los procesos internos de la terminal quedan fuera del alcance de este prototipo.

Gestión de instalaciones: En este prototipo se han excluido ciertas funciones de la gestión de instalaciones, como la avería de las instalaciones, la limpieza y el transporte de equipaje.

4.2. Modelo matemático

Para representar cuantitativamente las operaciones del aeropuerto y poder analizar su rendimiento, se ha desarrollado un modelo matemático basado en la **teoría de colas** [21]. Este enfoque permite describir el flujo aeroportuario a través del sistema.

4.2.1. Modelado temporal del flujo de llegada

Para ofrecer una visión más clara del modelo, en este apartado se presenta un diagrama que ilustra las variables y su interacción, mostrando de manera detallada cómo funciona la operación de aterrizaje dentro del modelo de simulación [22].

- l_i representa el momento exacto en el que la aeronave llega a la cola.
- r_i es el tiempo (retraso) que espera la aeronave en la cola antes de ser atendida.
- b_i es el momento en el que llega la aeronave, $b_i = l_i + r_i$.

- s_i es el tiempo que tarda el servicio, $s_i > 0$.
- e_i es el tiempo de espera total desde que la aeronave entra en la cola hasta que el avión aterriza, $e_i = r_i + s_i$.
- t_i es el tiempo exacto en el que la aeronave aterriza.

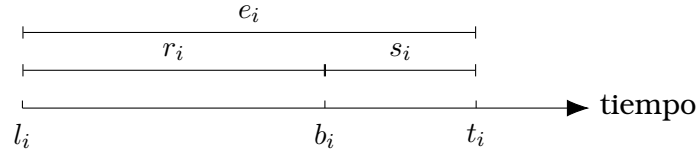


Figura 4.1: Diagrama del flujo de llegada

4.2.2. Modelado del proceso de llegadas

En el primer subsistema, las llegadas de aeronaves siguen un proceso de Poisson:

$N \sim$ número de llegadas en el tiempo T ,

$$P(N = n, T) = \frac{(\lambda T)^n e^{-\lambda T}}{n!}$$

donde λ es la tasa de llegada, que representa la aleatoriedad del tráfico aéreo entrante. Los tiempos de servicio se modelan mediante una distribución exponencial, considerando la pista de aterrizaje como un único servidor.

Una vez finalizado el aterrizaje, la aeronave pasa a una fase de estacionamiento, donde permanece un tiempo determinado (*Testacionamiento*) antes de generar una nueva solicitud de despegue.

4.2.3. Modelado temporal del flujo de salidas

El mismo modelo temporal descrito en la Figura 3.1 y las variables asociadas ($l_i, r_i, b_i, s_i, e_i, t_i$) se aplican análogamente al proceso de salida. En este caso l_i representa el instante en que la aeronave entra en la cola de despegue, r_i la espera en la cola, s_i la duración del despegue de la aeronave, y t_i el momento en el que la aeronave termina de despegar.

4.2.4. Modelado del sistema de salidas

En el segundo subsistema, la pista de despegue actúa como servidor único en este proceso y se modela con tiempos de servicio exponenciales:

$$T_{despegue} = T_{finDespegue} - T_{inicioDespegue}$$

Capítulo 4. Prototipo 1º

Este tiempo se modela mediante una distribución exponencial:

$$T_{despegue} \sim Exp(\mu_d)$$

Siendo μ_d la tasa de servicio de despegue.

4.2.5. Modelado de los tiempos de servicio

Los tiempos de servicio, tanto de aterrizaje como de despegue, se representarán mediante una distribución exponencial con parámetro μ , correspondiente a la tasa de servicio:

$$T_{servicio} = \mu e^{-\mu t}, t \geq 0$$

Este enfoque permite representar la interdependencia de las llegadas y salidas. También nos ayuda a analizar el tiempo medio de espera, la utilización de pistas y el flujo del aeropuerto.

El tiempo total de operación de una aeronave se obtiene como la suma de los tiempos aleatorios en cada fase:

$$T_{total} = T_{llegada} + T_{espera} + T_{servicio} + T_{estacionamiento} + T_{despegue}$$

Siendo el tiempo de espera:

$$T_{espera} = T_{inicio\ servicio} - T_{llegada\ sistema}$$

Y el tiempo de estacionamiento:

$$T_{estacionamiento} = T_{inicio\ despegue} - T_{fin\ aterrizaje}$$

O también se puede entender el tiempo total de operación de una aeronave como:

$$T_{total} = H_{despegue}(\text{minutos}) - H_{llegada}(\text{minutos})$$

El tiempo total de ciclo de cada aeronave nos ayudará a identificar si han existido cuellos de botella, según el tiempo que tarden las aeronaves en completar el ciclo completo.

4.2.6. Grafo de conexiones de aeropuertos

La operatividad del aeropuerto simulado se modela mediante un grafo de conexiones $G(V, E)$, siendo V los vértices que representan el conjunto de aeropuertos, compuesto por el nodo central y los nodos periféricos, y E las aristas que representan las rutas aéreas directas a esos vértices.

Como se observa en la Figura 4.2, el sistema sigue un modelo *Hub And Spoke*, donde todas las operaciones de llegada y salida tienen como origen o destino el aeropuerto principal de la simulación.

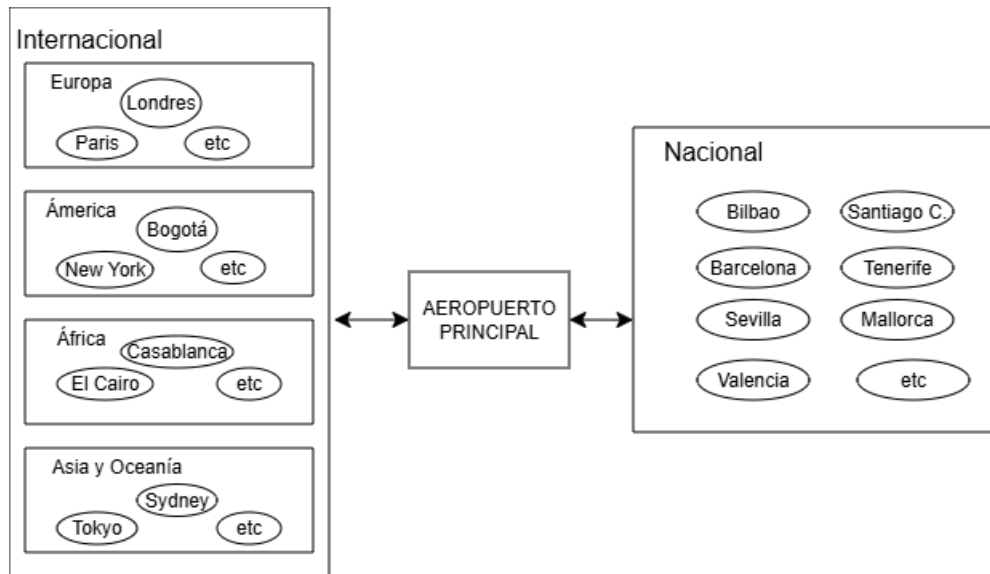


Figura 4.2: Grafo centralizado de conexiones

4.2.7. Influencia de factores externos

Hay que tener en cuenta los retrasos en las operaciones aeroportuarias, ya que el aterrizaje y el despegue están sujetos a la influencia de factores externos entre los que destacan:

- **Meteorología:**

El clima influye directamente en los tiempos de maniobra y flujo de las operaciones [23]. Este factor externo se modela no como un agente, sino como una variable de estado global que modifica los parámetros clave del modelo matemático.

Dado que las condiciones meteorológicas no son uniformes a lo largo del año, el modelo incorpora la estacionalidad como un factor determinante. Para representar esto, se han definido diferentes estados climáticos, cuya frecuencia varía según la estación del año.

- **Flujo de pasajeros:**

Influye la cantidad de pasajeros que hay en el aeropuerto, ya que puede provocar retrasos o no. Esta demanda no se considera un valor constante, sino que presenta una fuerte variabilidad temporal, como se puede observar en los datos empíricos de Aena [1]. En la teoría de colas, esta variabilidad se describe como un *Proceso de Poisson No Homogéneo*, donde la tasa media de llegadas λ no es fija, sino que varía en función del tiempo $\lambda(t)$.

- **Servicios auxiliares:**

Influye el manejo de las operaciones de apoyo, como puede ser el desembarque de pasajeros o la preparación de aeronaves para próximos vuelos. A diferencia de los tiempos de servicio en pista, los servicios auxiliares no pueden modelarse con una distribución Exponencial, ya que esta distribución asume que el tiempo de servicio más probable es cero.

Por este motivo, los tiempos de los servicios auxiliares se modelan siguiendo una distribución Normal, ya que a diferencia de otras fórmulas, la Normal es apropiada porque, al estar la media situada a más de tres desviaciones típicas de cero, la probabilidad de generar tiempos cercanos a cero es muy reducida. Este modelo también refleja adecuadamente que la mayoría de las operaciones tardarán un tiempo similar, agrupándose en torno a una media y a una variabilidad controlada simulando así de forma realista las desviaciones:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Donde t representa el tiempo de servicio, es decir, la duración aleatoria que se está calculando en el modelo. El parámetro μ corresponde a la media de distribución y refleja el tiempo medio esperado que duran los servicios auxiliares. Por su parte, σ representa la desviación estándar, que mide la variabilidad de los tiempos de servicio respecto a la media.

4.3. Modelo computacional

Para trasladar el modelo matemático y empírico a una simulación, se ha desarrollado un modelo computacional que define las entidades, parámetros y procesos necesarios para reproducir el funcionamiento del aeropuerto. Este modelo establece como avanzan los eventos en el tiempo y como interactúan los distintos elementos de la simulación.

4.3.1. Diseño del simulador

En esta sección se describe con detalle el diseño del simulador desarrollado para el prototipo, incluyendo la estructura general del sistema y los principales elementos que lo componen.

Entidades

El sistema está constituido por un conjunto de entidades que representan los componentes esenciales de las operaciones aeroportuarias.

En primer lugar, el *aeropuerto* actúa como entidad principal y engloba al resto. Todo lo que ocurre en la simulación sucede dentro de este entorno, por lo que constituye la estructura central del sistema.

La entidad *aeronave* es fundamental, ya que son las que dan sentido a la operación del aeropuerto. Cada aeronave contiene una serie de parámetros y estados, los cuales se detallan posteriormente en el apartado dedicado a las estructuras de datos.

También se incluyen las *pistas*, un componente esencial para el flujo de operaciones. En este prototipo se trabaja con dos, una destinada a los aterrizajes y otra a los despegues. En función de la media de aviones introducida en el sistema, estas pistas pueden congestionarse o funcionar con normalidad. Este comportamiento permite analizar el rendimiento del aeropuerto en situaciones de alta o baja demanda.

Asimismo, el simulador incluye la zona de *estacionamiento*, que conecta las operaciones de llegada con las de salida. Su capacidad es limitada y, en escenarios de alta ocupación, puede saturarse, lo que genera retrasos significativos. Además, en esta zona se llevan a cabo los servicios auxiliares mientras la aeronave permanece en tierra y se prepara su salida programada.

Por último, el sistema incorpora un *reloj de simulación* que controla el avance del tiempo discreto en los eventos y determina el orden cronológico de todas las operaciones. Es importante destacar que el reloj es esencial para el seguimiento temporal y la ejecución correcta de cada evento.

Eventos

Además del diseño estructural del simulador, es esencial describir también el comportamiento del sistema. Como se puede apreciar en el diagrama 3.2, el sistema se articula a través de un total de cinco eventos principales que determinan el comportamiento del simulador.

En el primer evento, las aeronaves solicitan su entrada en la cola de llegadas con el fin de obtener permiso para aterrizar. Cuando se concede dicho permiso, se inicia el segundo evento, en el cual la aeronave realiza el aterrizaje y avanza hacia el tercer estado, el estacionamiento.

Una vez en la zona de estacionamiento, la aeronave permanece allí durante el tiempo que necesite o que el sistema le permita, pudiendo producirse cuellos de botella asociados a la disponibilidad de plazas o al flujo de operaciones. Cuando la aeronave ha finalizado sus tareas en tierra y está lista para partir, se activa el cuarto evento, en el que se solicita autorización para iniciar la secuencia de salida.

Finalmente, cuando la pista de despegue se encuentra disponible y se le concede el permiso correspondiente, se ejecuta el quinto evento, el despegue. En este evento, la aeronave abandona el aeropuerto y concluye su tiempo de ciclo.

Capítulo 4. Prototipo 1º

Conexiones aeroportuarias

Para modelar las conexiones entre distintos aeropuertos, se ha construido un dataset que incluye ciudades de diferentes continentes, así como varias ciudades dentro de España.

4.3.2. Estructura de datos

Para la gestión eficiente del sistema durante la simulación, se han definido estructuras de datos que permiten el seguimiento de cada operación mientras transcurre la simulación.

Este modelo de datos se articula en torno a las entidades activas (aeronaves) y los recursos compartidos:

Aeronaves

Las entidades modeladas como objetos que guardan información importante mientras se mueven por el sistema están compuestas por (Tabla 4.1):

| Atributo | Tipo | Ejemplo |
|-------------------------|--------|--------------|
| ID | String | "L372" |
| IDVuelo | String | "IB936" |
| Estado | String | "Despegando" |
| Pasajeros | int | 197 |
| Origen | String | "Beijing" |
| Destino | String | "Madrid" |
| HoraSalidaOrigen | String | "07:05" |
| HoraProgrLlegadaDestino | String | "15:10" |
| HoraLlegadaDestino | String | "15:20" |
| HoraEstacionamiento | String | "15:27" |
| HoraProgramadaSalida | String | "17:45" |
| HoraDespegue | String | "17:58" |
| TiempoCicloAeronave | String | "03:38" |
| Mes | String | "FEBRERO" |
| Clima | String | "Soleado" |

Cuadro 4.1: Estructura de datos de las aeronaves

Recursos del aeropuerto

Las estructuras de datos proporcionadas por la librería *simpy* para gestionar la concurrencia y las colas (Tabla 4.2):

4.3. Modelo computacional

| Atributo | Tipo | Capacidad |
|------------------|----------------|-----------|
| PistaAterrizaje | simpy.Resource | 1 |
| PistaDespegue | simpy.Resource | 1 |
| Parking | simpy.Resource | 50 |
| ColaAterrizajes | simpy.Store | 10 |
| ColaDespegues | simpy.Store | 10 |
| ColaEstacionados | simpy.Store | 50 |
| ColaSalidas | simpy.Store | 1 |

Cuadro 4.2: Estructura de datos de los recursos

Los recursos creados con *simpy.Resource* funcionan como servidores que regulan el paso de las aeronaves por cada estado del proceso, cada una con una capacidad limitada. Por otro lado, los elementos definidos con *simpy.Store* actúan como colas FIFO donde se almacenan las aeronaves junto con sus atributos, garantizando así, que se atiendan en orden. Estas colas también cuentan con un límite de capacidad para evitar la formación de cuellos de botella.

4.3.3. Funciones principales de la simulación

En este apartado se describe la lógica del programa y las funciones principales que lo componen, es decir, aquellas que son clave para entender el funcionamiento del simulador.

generador(evento): Esta función selecciona un vuelo aleatorio del dataset *ciudades.csv*. A partir de esos datos genera un *ID* e *IDVuelo* aleatorios, obteniéndose así todos los parámetros necesarios de la aeronave. Se invoca siempre al inicio del bucle principal, siendo fundamental, ya que es la función encargada de crear las aeronaves (Ver código en A.10).

controlAereo(params): Esta función contiene el bucle principal de la simulación. En ella se calcula la tasa de llegadas según los parámetros introducidos por el usuario, se generan aviones mediante la función *generador(evento)* y se invoca el proceso *cicloAvion(params)*, que gestiona el ciclo completo de eventos que debe realizar cada aeronave (Ver código en A.11).

cicloAvion(params): Esta función gestiona la secuencia completa de eventos por los que pasa una aeronave. Los eventos se ejecutan de manera ordenada, un avión no puede avanzar al siguiente evento si no ha completado el anterior. No obstante, varias aeronaves pueden estar realizando su ciclo de manera simultánea, aportando concurrencia y aumentando el realismo de la simulación (Ver código en A.2).

Dentro de este ciclo se encuentran cinco funciones fundamentales que aseguran el correcto desarrollo de la simulación:

ControlLlegadas(params): Gestiona la llegada de una aeronave a la cola de ate-

Capítulo 4. Prototipo 1º

rrizaje. Si la cola está vacía, la aeronave continúa al siguiente evento. Si está llena, espera hasta que haya disponibilidad (Ver código en A.3).

ControlAterrizajes(params): Permite a la aeronave aterrizar cuando la pista está libre. En esta función se calcula el tiempo de aterrizaje y, dependiendo de las condiciones climáticas, pueden producirse retrasos. Una vez que aterriza la aeronave, se dirige al estacionamiento (Ver código en A.4).

ControlEstacionados(params): Gestiona el estacionamiento de las aeronaves. Si hay espacio disponible, la aeronave se estaciona y permanece allí mientras se realizan las operaciones en tierra. Al llegar la hora de salida, se solicita incorporarse a la cola de despegue (Ver código en A.5).

ControlSalidas(params): Maneja la espera en la cola de despegue. Si la cola está completa, la aeronave permanece en su lugar, lo que puede generar cuellos de botella. Si no está completa, espera hasta que haya disponibilidad en la pista para despegar (Ver código en A.6).

ControlDespegues(params): Gestiona el despegue de la aeronave. Una vez que la pista de despegue está libre, el avión despegue, completando así su ciclo en el aeropuerto (Ver código en A.7).

4.3.4. Parámetros del modelo

El comportamiento del sistema está regido por una serie de *inputs*. El simulador, así, permite configurar distintos escenarios mediante la modificación de estos parámetros.

Parámetros de entrada

El usuario del simulador puede definir diferentes parámetros de entrada, los cuales determinan el comportamiento del simulador y afectan en su desarrollo (Tabla 4.3):

| Parámetro | Valor | Descripción |
|---------------------|-----------------|--|
| Horas de Simulación | 0-420 (horas) | Las horas que se quieren simular |
| Tasa Media Vuelos | 100-500 | La tasa de vuelos que se quiere realizar |
| Mes | Enero-Diciembre | Mes en el que se realiza la simulación |
| Turno | Madrugada-Noche | Turno en el que comienza la simulación |

Cuadro 4.3: Parámetros de entrada

Coefficientes de estacionalidad

La tasa de llegadas de la aeronave λ no es constante, sino que varía en función de los coeficientes de estacionalidad correspondientes a cada mes. Estos coefi-

4.3. Modelo computacional

cientes permiten ajustar la tasa de llegadas según los cambios estacionales y son:

| Mes | Coficiente | Mes | Coficiente |
|---------|------------|------------|------------|
| Enero | 0.9 | Julio | 1.08 |
| Febrero | 0.88 | Agosto | 1.05 |
| Marzo | 0.98 | Septiembre | 1.04 |
| Abril | 0.99 | Octubre | 1.01 |
| Mayo | 1.04 | Noviembre | 0.98 |
| Junio | 1.04 | Diciembre | 1.02 |

Cuadro 4.4: Coeficientes enero-diciembre (Factores adimensionales de ponderación mensual)

Perfil horario de operaciones

El horario operativo se divide en cuatro turnos: madrugada, mañana, tarde y noche. Cada uno de ellos presenta distintos niveles de demanda tanto de aeronaves como de pasajeros, lo que permite identificar así determinadas horas pico. Para ello, con el objetivo de reproducir este comportamiento de manera realista, se ha modelado un sistema que refleja estas variaciones horarias (Tabla 4.5):

| Turno | Horario | % del Tráfico Aéreo Diario |
|-----------|-------------|----------------------------|
| Madrugada | 00:00-06:00 | 8.13 % |
| Mañana | 06:00-12:00 | 27.64 % |
| Tarde | 12:00-18:00 | 42.28 % |
| Noche | 18:00-24:00 | 21.95 % |

Cuadro 4.5: Perfil horario de operaciones

Parámetros ambientales

Las condiciones meteorológicas afectan a los tiempos de servicio. La probabilidad de cada estado climático depende de la estación asociada al mes seleccionado (Tabla 4.6):

| Estación | Soleado | Nublado | Lluvioso | Niebla | Tormenta |
|-----------|---------|---------|----------|--------|----------|
| Invierno | 0.30 | 0.40 | 0.20 | 0.05 | 0.05 |
| Primavera | 0.60 | 0.25 | 0.10 | 0.02 | 0.05 |
| Verano | 0.80 | 0.15 | 0.03 | 0.01 | 0.03 |
| Otoño | 0.50 | 0.3 | 0.15 | 0.02 | 0.05 |

Cuadro 4.6: Tabla de la meteorología por estación

4.3.5. Datos de la simulación

Para realizar el análisis estadístico posterior, se implementa un sistema de trazabilidad que registra cada evento en tiempo discreto en un archivo CSV (*log.csv*). A diferencia de las variables de estado teóricas descritas en el Modelo Empírico,

Capítulo 4. Prototipo 1º

este conjunto de datos representa la instancia física de la ejecución.

El registro se organiza de tal forma que cada fila representa un cambio de estado en una entidad del sistema. El registro de salida incluye las siguientes variables de estado. Hay tres categorías de datos:

- **Datos del Vuelo:** Datos que contienen la información que identifica a la aeronave y sus condiciones externas.
- **Datos de tiempo:** Datos que registran el momento exacto en el que ocurre cada evento y cuanto tarda el proceso en total.
- **Datos del Aeropuerto:** Datos que muestran la situación operativa en cada evento

A continuación se muestra una tabla (Tabla 4.7) con cada una de ellas:

| Categoría | Columnas del CSV |
|----------------------|---|
| Datos del Vuelo | ID, IDVuelo, Pasajeros, Origen, Destino, Mes, Clima |
| Datos de Tiempo | Reloj, HoraSalidaOrigen, HoraProgramadaLlegadaDestino, HoraLlegadaDestino, HoraEstacionamiento, HoraProgramadaSalida, HoraDespegue, TiempoCicloAeronave |
| Datos del Aeropuerto | Estado, AeronavesEnColaLlegada, AeronavesEnEstacionamiento, AeronavesEnColaSalida |

Cuadro 4.7: Clasificación de datos de la simulación

4.3.6. Evolución del código

El código fuente ha atravesado un proceso de evolución técnica. Se comenzó con una estructura básica y, posteriormente, se integraron reglas complejas.

Versión inicial del código

Para comenzar, antes de aplicar cualquier modelo matemático, se desarrolló un modelo base con el objetivo de establecer la estructura fundamental de la simulación. En este modelo, los aviones se generan de forma aleatoria mediante un generador que asigna a cada aeronave un número de identificación, un identificador de vuelo, un número aleatorio de pasajeros, el origen y destino de la aeronave, el estado de la aeronave y las horas de salida y llegada correspondientes [Listing A. 1].

Los aviones ingresan progresivamente al sistema y, durante la fase de simulación, su estado se actualiza dinámicamente. La aleatoriedad del proceso se

4.3. Modelo computacional

logró mediante el uso de la función *random.random()* de Python [24]. Además, se implementaron colas FIFO para las operaciones de aterrizaje, estacionamiento y despegue, garantizando un flujo ordenado en cada etapa.

También se incorporó un sistema de horarios, de modo que la simulación inicia a una hora determinada y progresa temporalmente desde ese punto. Todos los aviones comienzan su ciclo en la fase de aterrizaje, es decir, no existen aeronaves estacionadas al inicio, sino que estas van ingresando gradualmente al aeropuerto.

Las primeras clases desarrolladas fueron *TorreDeControl.py*, *GeneradorAeronaves.py* y *Aeronaves.py* [Se encuentra en A.1]. Esta última se encarga de imprimir la información en un archivo CSV, donde se registra la actividad de todos los vuelos simulados. Los datos generados se almacenan en un archivo *log.csv*, el cual puede visualizarse posteriormente en formato de tabla para su análisis.

| ID | IDVuelo | Estado | Pasajeros | Origen | Destino | HoraSalida | HoraLlegada |
|------|---------|-------------|-----------|------------|---------|------------|-------------|
| P437 | DL761 | Llegando | 187 | Nueva York | Madrid | 00:00 | 02:39 |
| P437 | DL761 | Aterrizaje | 187 | Nueva York | Madrid | 00:00 | 02:39 |
| P437 | DL761 | Estacionado | 187 | Nueva York | Madrid | 00:00 | 02:39 |
| P437 | DL761 | Estacionado | 187 | Nueva York | Madrid | 00:00 | 02:39 |
| E762 | BA715 | Llegando | 270 | Shanghai | Madrid | 22:57 | 02:45 |
| E762 | BA715 | Aterrizaje | 270 | Shanghai | Madrid | 22:57 | 02:45 |
| P437 | DL763 | Programado | 187 | Madrid | Londres | 22:02 | 03:12 |
| E762 | BA715 | Estacionado | 270 | Shanghai | Madrid | 22:57 | 02:45 |
| F964 | IB3 | Llegando | 286 | Nueva York | Madrid | 22:44 | 02:49 |
| F964 | IB3 | Aterrizaje | 286 | Nueva York | Madrid | 22:44 | 02:49 |
| P437 | DL768 | Programado | 187 | Madrid | Londres | 15:00 | 16:11 |
| F964 | IB3 | Estacionado | 286 | Nueva York | Madrid | 22:44 | 02:49 |
| W652 | AV389 | Llegando | 258 | Shanghai | Madrid | 22:19 | 02:53 |
| W652 | AV389 | Aterrizaje | 258 | Shanghai | Madrid | 22:19 | 02:53 |
| E762 | BA718 | Programado | 270 | Madrid | Londres | 08:01 | 13:10 |

Cuadro 4.8: Muestra de los eventos registrados en el log

En esta fase, la generación de horas programadas introduce inconsistencias, ya que estos tiempos no están vinculados al reloj de la simulación *evento.now*. Asimismo, faltaba implementar los tiempos de servicio aleatorios para simular realísimamente la ocupación de la pista.

Desarrollo del prototipo funcional

A diferencia del código inicial, esta fase del modelo computacional implementa la lógica central de la simulación. Se introduce la gestión temporal basada en el reloj por eventos de *Simpy evento.now*, asegurando que cada evento ocurra en un orden estrictamente cronológico. Para darle más realismo al modelo, se ha integrado un dataset de operaciones reales, que asigna ciudades y tiempos de vuelo verídicos entre aeropuertos. Esto se complementa con las fórmulas matemáticas discutidas previamente, como la distribución exponencial para las llegadas y la distribución normal para los servicios auxiliares. Además, se han añadido nuevas columnas de parámetros al *log.csv* [A.12], como el reloj o el cli-

Capítulo 4. Prototipo 1º

ma, para garantizar que todos los datos registrados sigan un orden cronológico y una lógica coherente.

La implementación computacional se basa, en parte, en el *ciclo completo del avión*, este proceso trata sobre el ciclo de vida completo de una aeronave en el aeropuerto. Se lanza una instancia de este proceso por cada avión en la función `controlAéreo` [Listing A.2].

El proceso *cicloAvion* gestiona el ciclo de vida completo de la aeronave, el cual se compone de cinco fases lógicas: la gestión de la cola de llegada, la operación de aterrizaje, el estacionamiento, la programación de salida y el despegue [Listings A.3-A.7].

Estas fases se ejecutan en un orden secuencial estricto, garantizado por el uso de `yield evento.process()` para cada etapa. Esta técnica de encadenamiento es fundamental, ya que asegura que cada proceso vaya en orden.

Al mismo tiempo, esta estructura permite que el proceso *cicloAvion* completo se ejecute de forma concurrente con los ciclos de las otras aeronaves. De este modo, la simulación puede gestionar múltiples aeronaves en diferentes fases sin que sus flujos lógicos interfieran entre sí.

Además, se incluyen factores que afectan cómo se llevan a cabo de los eventos y sus resultados. Como se mencionó antes, se consideran elementos externos (A.8) y horarios (A.9), de manera que, según distintas circunstancias, puedan ocurrir diferentes situaciones. Esto ayuda a crear varios escenarios y a hacer la simulación mucho más completa.

4.4. Experimentación del prototipo

El objetivo de esta sección es definir los escenarios bajo los cuales se evaluará el rendimiento del aeropuerto. Además, se define la metodología estadística necesaria para garantizar la validez de los resultados.

4.4.1. Diseño de escenarios

Se han propuesto tres escenarios distintos, cada uno diseñado con parámetros específicos que permiten simular situaciones realistas y destacar los cuellos de botella de manera diferenciada.

- **Escenario Base:** Representa el funcionamiento habitual del aeropuerto, con tráfico y condiciones meteorológicas normales y variables.
- **Escenario de Estrés:** Simula situaciones críticas en las que el aeropuerto recibe un alto volumen de aeronaves (más de 350). Dependiendo del mes y de las condiciones meteorológicas, la situación puede calmarse o agravarse, generando retrasos durante toda la simulación.

4.5. Análisis de los datos de la simulación

- **Escenario Adverso:** Corresponde a períodos con condiciones meteorológicas desfavorables, como los meses de invierno, que tienden a generar cuellos de botella y afectar a la operación normal del aeropuerto.

Para garantizar la validez estadística de la comparación entre escenarios y dado que el modelo incluye variables estocásticas, una única ejecución no proporciona resultados concluyentes. Por ello, para obtener una muestra representativa, se ejecuta cada escenario N veces, donde N varía entre 50 y 75 iteraciones según el input del usuario, y cada iteración utiliza una semilla distinta, asegurando así datos más representativos y confiables.

4.4.2. Parámetros de las simulaciones

En este apartado se presentarán los parámetros utilizados en cada uno de los escenarios (Tabla 4.9), con el fin de analizar posteriormente las diferencias entre ellos.

| Parámetros | Escenario Base | Escenario de Estrés | Escenario Adverso |
|-----------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| Mes | Julio | Julio | Enero |
| Clima | Soleado | Soleado | Nublado/Lluvioso |
| Tasa Tráfico | 200 operaciones | 400 operaciones | 300 operaciones |
| Horas Simuladas | 24h | 24h | 24h |
| Turno Comienzo | Madrugada | Madrugada | Madrugada |
| Iteraciones | 50 | 50 | 50 |

Cuadro 4.9: Parámetros de cada escenario

4.5. Análisis de los datos de la simulación

Tras la ejecución de la fase experimental definida en la sección anterior, se ha obtenido un conjunto de datos que registra el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas. El objetivo de esta sección es realizar el análisis estadístico de dicha información para evaluar el rendimiento del simulador.

4.5.1. Análisis descriptivo

La simulación de 50 iteraciones por escenario ha generado un registro de datos almacenado en *estadisticas.csv*, que revela diferencias significativas en el comportamiento del sistema de los distintos escenarios.

En cada simulación se han utilizado un conjunto idéntico de semillas. Concretamente, se ha empleado el rango de semillas secuenciales [1000,1049]:

Capítulo 4. Prototipo 1º

Escenario base

Al contar con condiciones favorables y un número normal de operaciones, la tabla permite comprobar la estabilidad operativa (Tabla 4.10):

| Métricas | Media | Mínimo | Máximo | Desviación Típica | Varianza |
|--------------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|
| Ops. Totales | 328,9 | 299,0 | 369,0 | 18,42 | 339,23 |
| Pasajeros Totales | 73.968,8 | 67.456,0 | 83.568,0 | 4.073,01 | – |
| Tiempo Ciclo (min) | 81,02 | 73,0 | 122,0 | 9,80 | 96,10 |
| Ops. Madrugada | 27,44 | 18,0 | 39,0 | 5,11 | 26,13 |
| Ops. Mañana | 88,68 | 62,0 | 116,0 | 11,50 | 132,26 |
| Ops. Tarde | 139,22 | 112,0 | 168,0 | 12,65 | 159,97 |
| Ops. Noche | 73,56 | 56,0 | 94,0 | 7,75 | 60,05 |

Cuadro 4.10: Estadísticas escenario base

En condiciones normales, el sistema muestra un comportamiento estable. La media de operaciones se ajusta a lo programado y el tiempo de ciclo de cada aeronave es óptimo. Se observan fluctuaciones en la cantidad de operaciones totales, tal como reflejan los valores máximos y mínimos registrados. Estas variaciones dependen de los sistemas auxiliares y la meteorología, pese al escenario base favorable.

Escenario de estrés

Al aumentar la carga de trabajo hasta 400 operaciones, el sistema aeroportuario comienza a operar cerca de sus límites físicos (Tabla 4.11):

| Métricas | Media | Mínimo | Máximo | Desviación Típica | Varianza |
|--------------------|------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Ops. Totales | 663,32 | 602,0 | 728,0 | 27,63 | 763,28 |
| Pasajeros Totales | 149.251,42 | 134.745,0 | 163.400,0 | 6.312,16 | – |
| Tiempo Ciclo (min) | 200,02 | 175,0 | 245,0 | 16,71 | 279,33 |
| Ops. Madrugada | 55,56 | 41,0 | 78,0 | 7,93 | 62,86 |
| Ops. Mañana | 179,7 | 147,0 | 206,0 | 14,43 | 208,34 |
| Ops. Tarde | 278,7 | 232,0 | 324,0 | 18,14 | 329,19 |
| Ops. Noche | 149,36 | 127,0 | 183,0 | 11,69 | 136,72 |

Cuadro 4.11: Estadísticas escenario de estrés

Bajo condiciones de estrés, el sistema muestra un comportamiento inestable caracterizado principalmente por un incremento significativo en la carga de trabajo. El tiempo medio de ciclo de cada aeronave sufre una dura degradación, pasando de los 82 minutos en un escenario favorable a 200 minutos. Este aumento se atribuye principalmente a la saturación de la capacidad de estaciona-

4.5. Análisis de los datos de la simulación

miento y al elevado flujo de llegadas. No obstante, a pesar de la congestión, el modelo mantiene la coherencia esperada de un escenario de alta intensidad.

Escenario de atasco

En este escenario, el sistema opera bajo una carga de trabajo moderadamente superior a la media y una meteorología menos favorable. Los resultados obtenidos muestran la respuesta del sistema durante dichas condiciones (Tabla 4.12):

| Métricas | Media | Mínimo | Máximo | Desviación Típica | Varianza |
|--------------------|-----------|----------|-----------|-------------------|----------|
| Ops. Totales | 417,26 | 374,0 | 460,0 | 17,92 | 321,14 |
| Pasajeros Totales | 93.712,28 | 84.231,0 | 103.873,0 | 4.241,35 | - |
| Tiempo Ciclo (min) | 171,04 | 114,0 | 225,0 | 25,52 | 651,43 |
| Ops. Madrugada | 34,42 | 23,0 | 51,0 | 5,36 | 28,78 |
| Ops. Mañana | 114,64 | 91,0 | 134,0 | 11,38 | 129,42 |
| Ops. Tarde | 176,82 | 150,0 | 209,0 | 12,11 | 146,72 |
| Ops. Noche | 91,38 | 74,0 | 119,0 | 8,33 | 69,42 |

Cuadro 4.12: Estadísticas escenario de atasco

En condiciones meteorológicas desfavorables, se observa un comportamiento más estable que en el caso de estrés, pero hay una diferencia clara, la desviación en los tiempos de ciclo.

Análisis comparativo

Para facilitar la interpretación de los resultados, se realizará una comparación de gráficas para poder contrastar el comportamiento de los turnos entre los distintos escenarios simulados.

Capítulo 4. Prototipo 1º

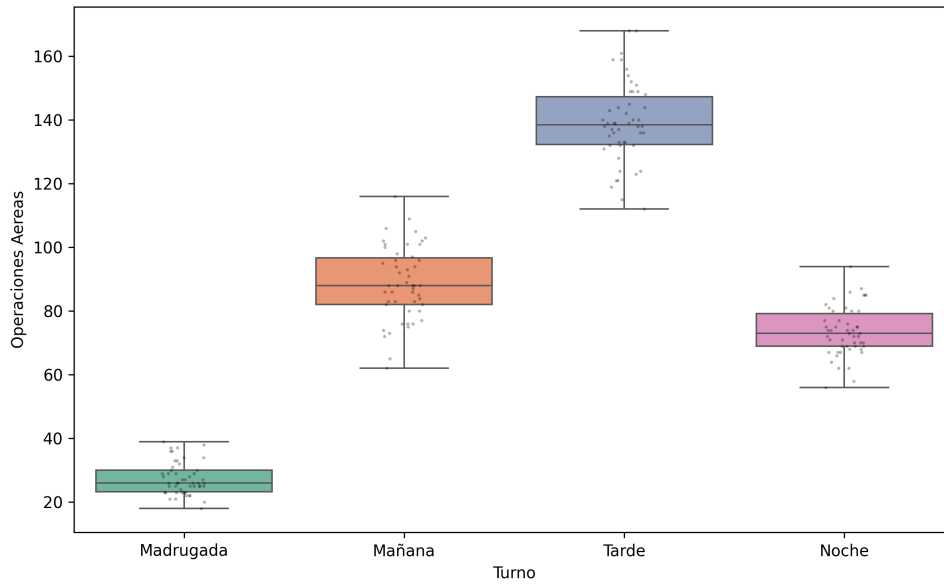


Figura 4.3: Ops. aéreas por turno escenario base prototipo 1

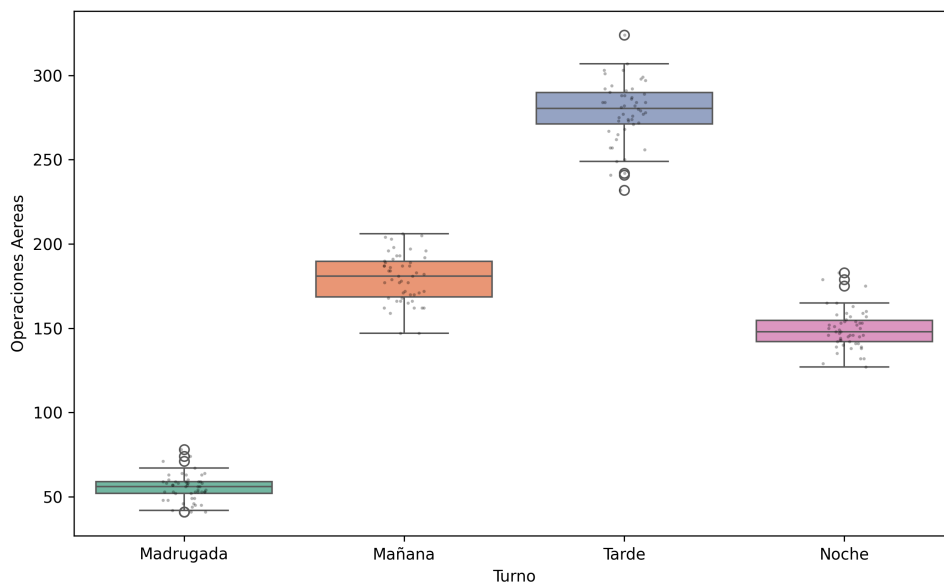


Figura 4.4: Ops. aéreas por turno escenario de estrés prototipo 1

4.5. Análisis de los datos de la simulación

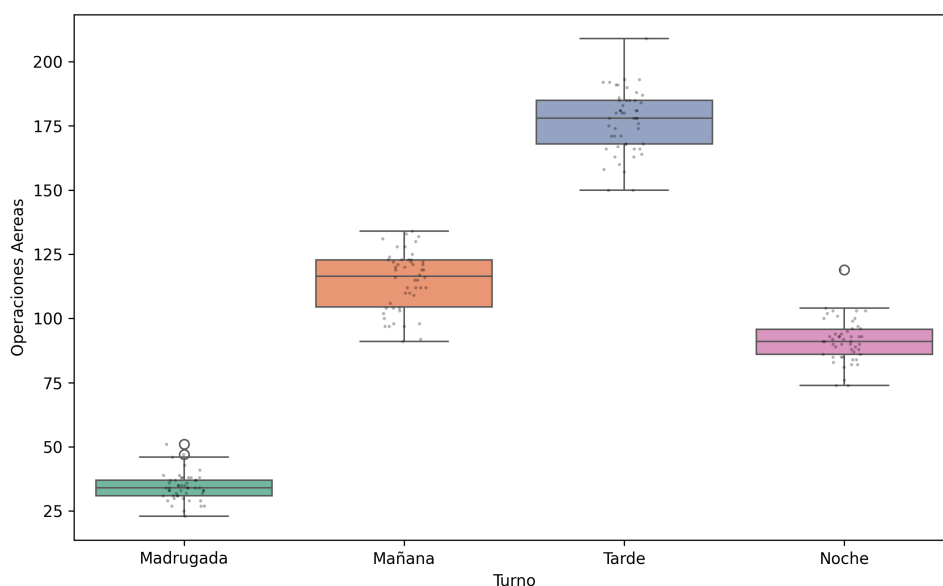


Figura 4.5: Ops. aéreas por turno escenario adverso prototipo 1

Al analizar los tres gráficos, se puede observar que todos mantienen el mismo patrón estructural: la madrugada tiene el menor número de operaciones, seguida por la noche y la mañana, mientras que la tarde alcanza el pico más alto. Esto confirma que la lógica de distribución horaria del simulador es consistente, sin importar la cantidad de datos.

Sin embargo, existen diferencias notables en la cantidad de operaciones por escenario. El escenario de estrés (Figura 4.4) es, sin ninguna duda, el que mayor actividad presenta. En este gráfico, la mediana supera las 280 operaciones, llegando a máximos por encima de 300. Por el contrario, la brecha entre el escenario base (Figura 4.3) y el adverso (Figura 4.5) es mucho menor. El escenario base muestra una mediana cercana a 140 operaciones, mientras que el escenario adverso se sitúa en torno a 175.

Además, la presencia de los outliers también aporta información clave. En el escenario de atasco, estos valores de la tarde ponen de manifiesto la inestabilidad del sistema. En el escenario adverso, los outliers se concentran en la madrugada y la noche, probablemente ligados a la variación meteorológica. Por el contrario, el escenario de enero destaca por ser mucho más compacto y predecible, sin presentar estas irregularidades.

Una vez identificado que el turno de tarde es el punto crítico, es interesante ver como reacciona el sistema ante la presión. Para ello, los gráficos (Figuras 4.6, 4.7 y 4.8) combinan el número de operaciones aéreas con el tiempo que tardan en completar el ciclo, permitiéndonos observar la resistencia del sistema aeroportuario en cada escenario.

Capítulo 4. Prototipo 1º

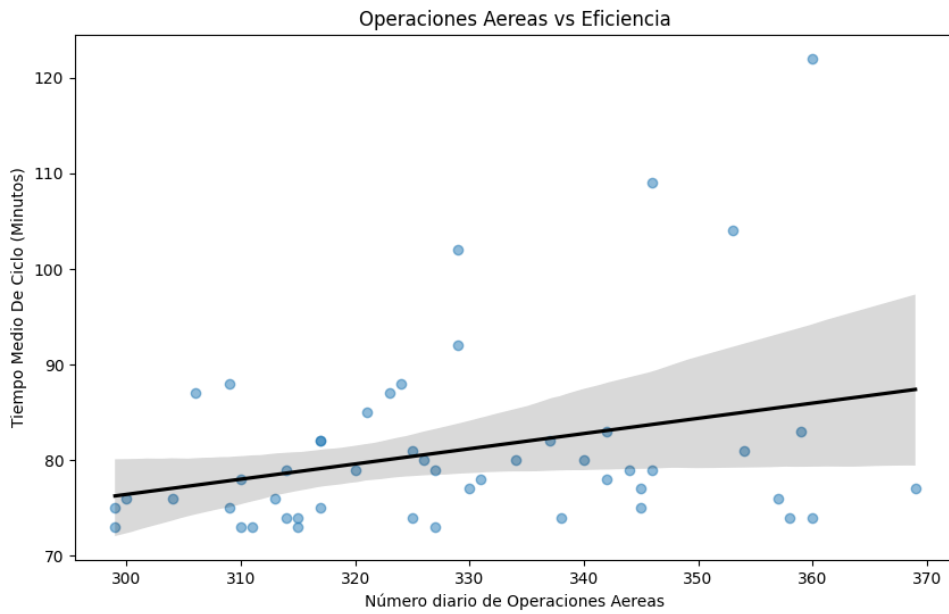


Figura 4.6: Regresión escenario base

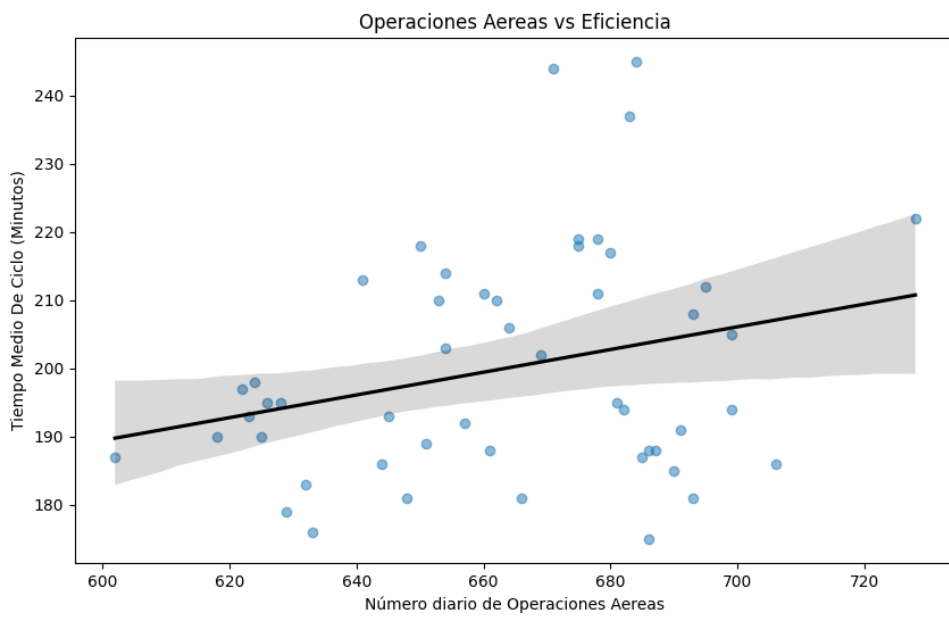


Figura 4.7: Regresión escenario de estrés

4.5. Análisis de los datos de la simulación

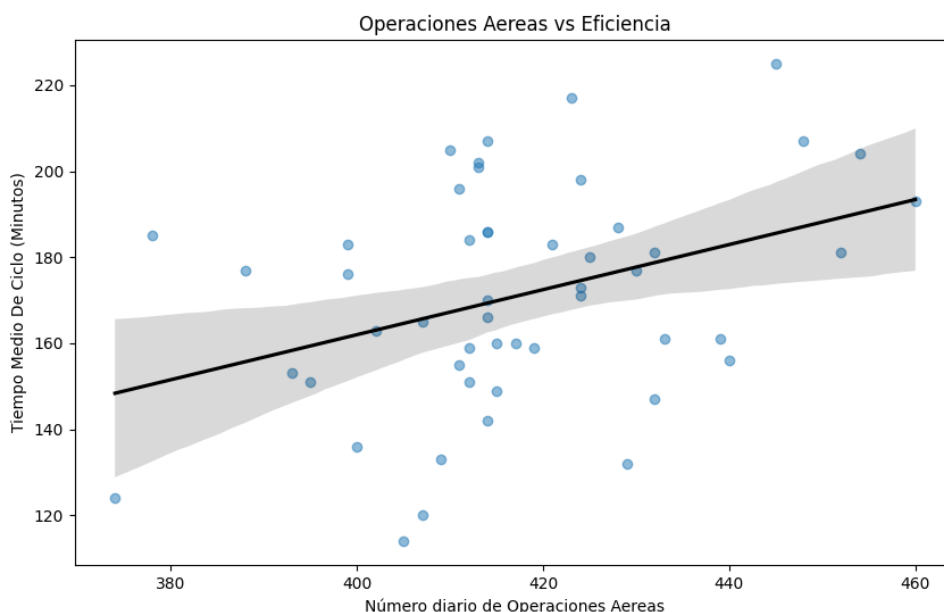


Figura 4.8: Regresión escenario adverso

En el Escenario Base (Figura 4.6), el sistema demuestra un comportamiento elástico y robusto. La nube de puntos alrededor de la línea de tendencia es compacta, lo que indica que es predecible. El sistema es capaz de absorber incrementos en la carga de operaciones sin que la penalización de tiempo afecte al flujo aeroportuario.

Por su parte, el Escenario de Estrés (Figura 4.7) muestra como el sistema opera en su región de saturación. Al aumentar la demanda, la pendiente de la recta se agudiza, por culpa de esto, añadir un solo vuelo adicional se vuelve altísimo en términos de demanda de espera.

Por otro lado, el Escenario Adverso (Figura 4.8) revela una degradación estructural del servicio que no depende de la cantidad de tráfico aéreo, sino del entorno. Lo más notorio en este caso es la gran dispersión de los puntos observados respecto a la línea de tendencia, que pone en evidencia cómo la meteorología introduce un factor de impredecibilidad.

4.5.2. Inferencia estadística

El análisis descriptivo de la sección anterior proporciona una caracterización detallada del sistema. Sin embargo, podemos completar la estimación puntual de los indicadores que obtenemos con la simulación, ya que, si volviéramos a repetir el experimento, ese valor podría cambiar, y necesitamos saber cuánto.

Por ello, en este apartado, aplicamos técnicas de Bootstrapping. El objetivo es

Capítulo 4. Prototipo 1º

construir un intervalo de confianza, ya que se quiere saber, con un 95% de certeza, dentro de que límites se moverá realmente el aeropuerto cuando las condiciones cambien.

Para comenzar, se calculará el intervalo de confianza del tiempo de ciclo de las aeronaves con el fin de establecer cuál es el tiempo resultante en cada escenario.

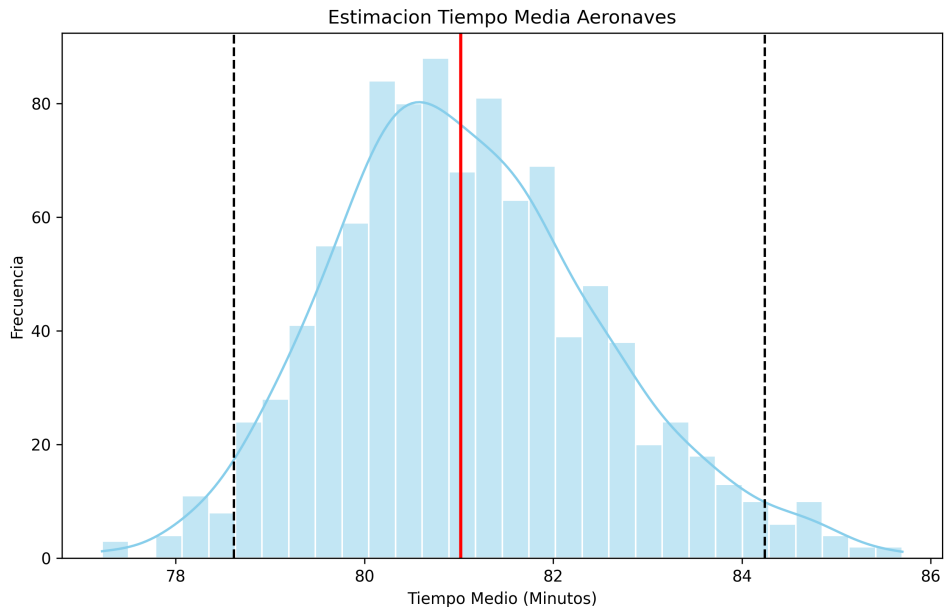


Figura 4.9: Intervalo escenario base

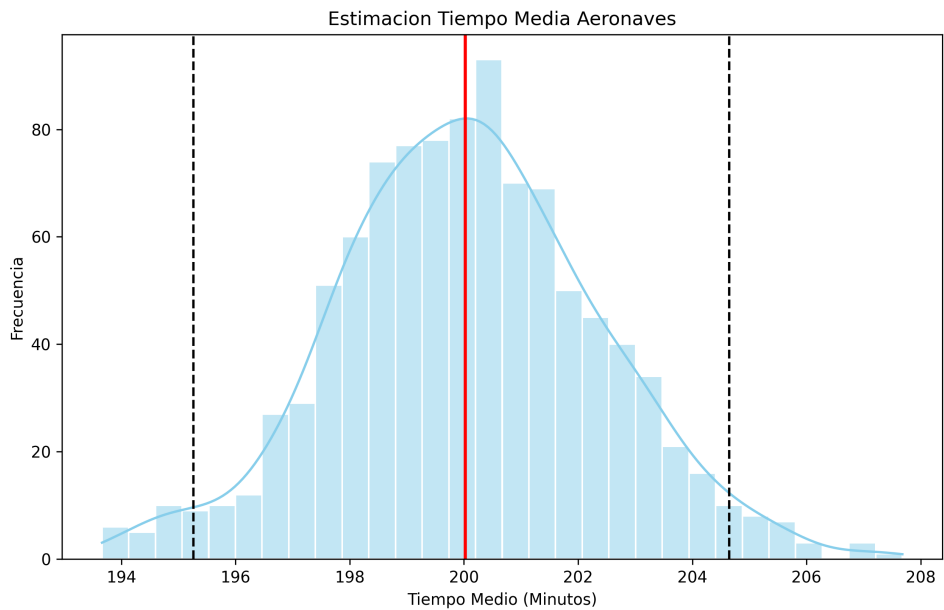


Figura 4.10: Intervalo escenario de estrés

4.5. Análisis de los datos de la simulación

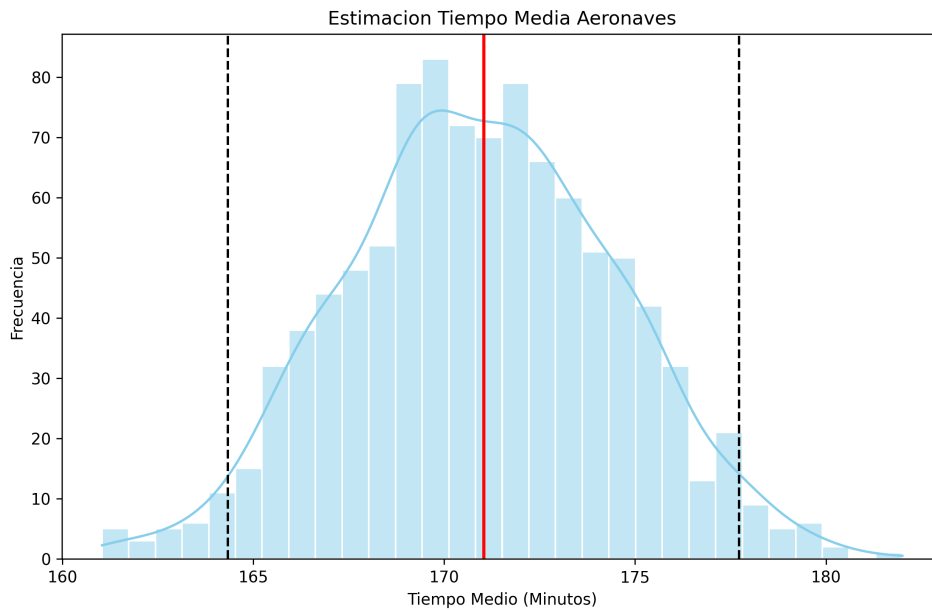


Figura 4.11: Intervalo escenario adverso

Al comparar las gráficas (Figuras 4.9, 4.10 y 4.11), se puede observar como se dispara el tiempo medio. Mientras que en el Escenario Base (Figura 4.9) los aviones entran y salen en un tiempo muy eficiente de entre 78 y 84 minutos, en cuanto las condiciones se complican, el servicio se deteriora de manera drástica. En el escenario de estrés (Figura 4.10) y meteorología adversa (Figura 4.11), los tiempos medios se duplican con creces, saltando hasta los 171 y 200 minutos.

Además, el problema no es que el proceso sea más lento, sino que también presenta mucha más dispersión. En el Escenario Adverso, si nos fijamos en el ancho del intervalo, se puede observar que con el mal tiempo la horquilla de incertidumbre es de 14 minutos, más del doble que un día normal. No solo eso, sino que la horquilla de incertidumbre del Escenario de Estrés es de 10 minutos. Esto nos confirma que tanto el mal tiempo como la gran carga de trabajo aumentan la dificultad de predecir cuándo completará el ciclo una aeronave.

Capítulo 5

Prototipo 2º

En este segundo prototipo se han incorporado cambios realistas que aportan un mayor nivel de autenticidad a la simulación. Además, se ha desarrollado un Dashboard que permite visualizar el registro completo de eventos, funcionando como un panel de control auxiliar de una torre de control.

5.1. Dashboard aeroportuario

Se ha diseñado un dashboard simple, pero lleno de información valiosa que permite ver como funciona el sistema aeroportuario a tiempo real, y, que muestra datos coherentes.

El dashboard está compuesto por un panel con varias opciones (Figura 5.1). En primer lugar, incluye un modo automático donde las vistas, tanto operativa como táctica, se alternan según un tiempo determinado. Por otro lado, están las ventanas de vista táctica y operativa que el usuario puede cambiar manualmente cuando lo desee. Además, se incluyen botones de *play*, *pausa* y *stop*, y es posible ajustar la velocidad de la simulación para visualizarla más rápido en tiempo real.

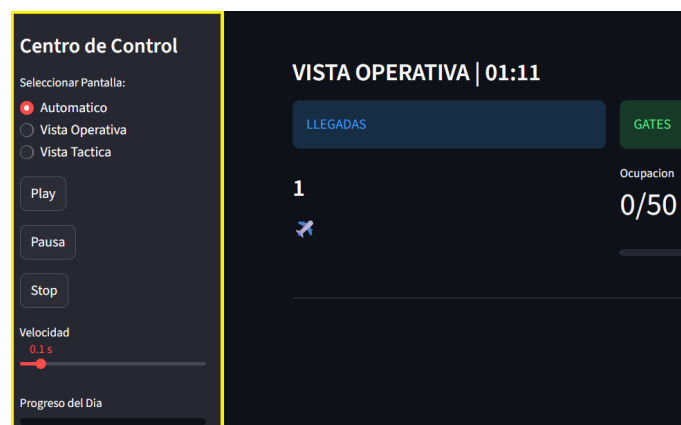


Figura 5.1: Centro de control dashboard

Al realizar la simulación, como se mencionó anteriormente, se pueden observar

Capítulo 5. Prototipo 2º

dos vistas principales.

La vista operativa (Figura 5.2), muestra las colas de llegadas y salidas de las aeronaves, mientras que la otra vista indica la ocupación del parking. Cuando estas colas alcanzan un número elevado de aeronaves (≥ 8) o hay muchas aeronaves estacionadas (≥ 50), se genera una alerta que se muestra directamente en el programa. Además, en la parte inferior se pueden ver las últimas aeronaves que están aterrizando, estacionadas o despegando.

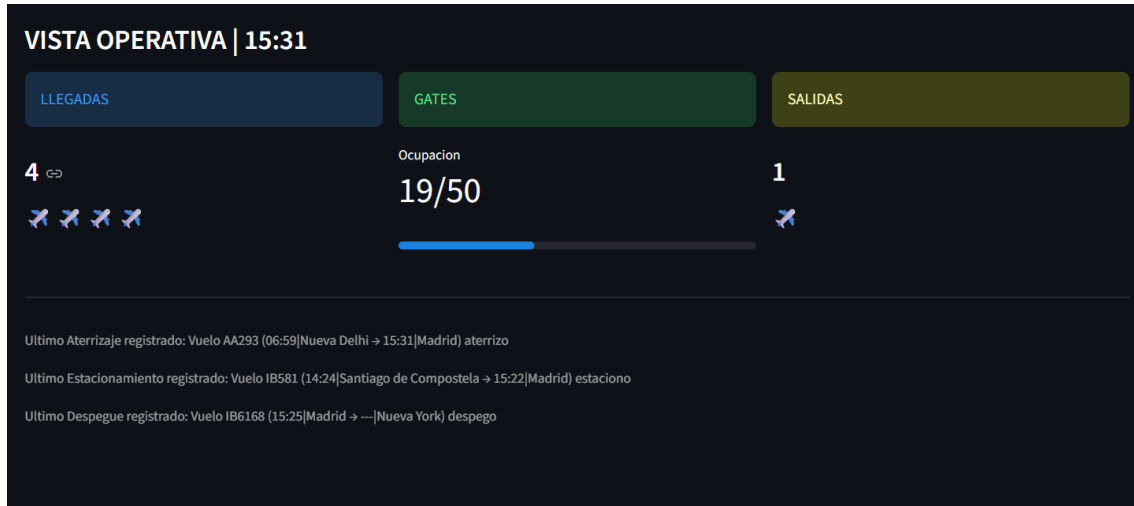


Figura 5.2: Vista operativa dashboard

La vista táctica (Figura 5.3), muestra información sobre el número de pasajeros que llega al aeropuerto y cuantos de ellos se están atendiendo. Además, presenta el clima actual, el estado de la simulación y un gráfico que refleja la cantidad de aeronaves en la cola de llegadas y salidas.

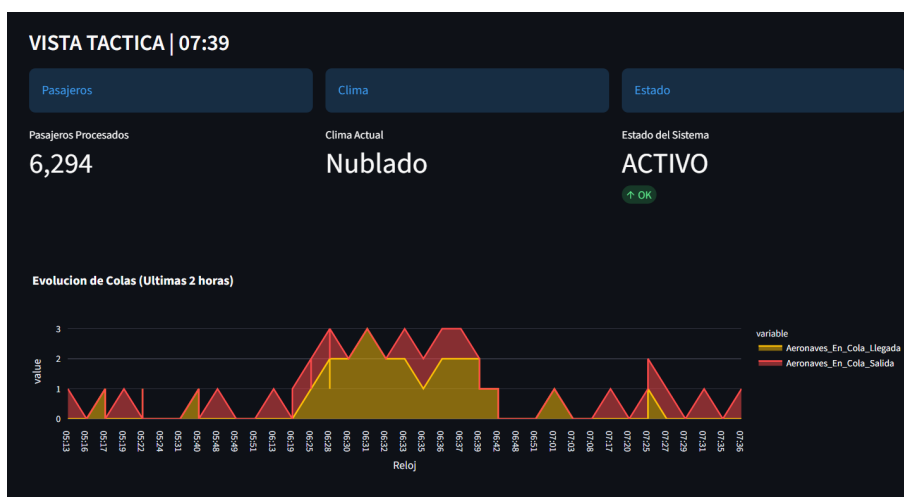


Figura 5.3: Vista táctica dashboard

Además, el dashboard incorpora un sistema de estados de alerta que se muestra

5.2. Evolución de la lógica de la simulación

tanto en la vista táctica como en la operativa. Cuando la cola de llegadas supera las 8 aeronaves, la ocupación del parking excede los 45 puestos, o se produce un cierre de pista, se activa una alerta crítica. Esta señalización indica que el sistema aeroportuario está alcanzado niveles de saturación, y que, por tanto, es un momento clave en el que deberían activarse medidas para mejorar la situación. A continuación, se presenta una imagen que ilustra cómo se visualiza esta alerta en la interfaz (Figura 5.4):

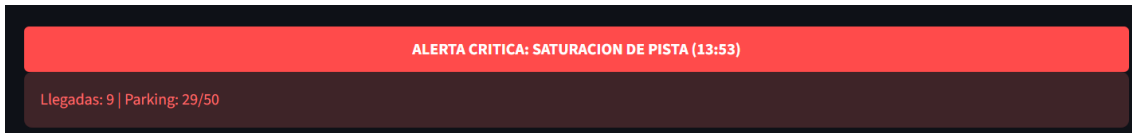


Figura 5.4: Alerta crítica dashboard

Asimismo en la interfaz se pueden identificar los vuelos de emergencia (Figura 5.5), los cuales aparecen resaltados en color rojo. Estos casos se producen, por ejemplo, cuando una aeronave tiene el nivel de combustible bajo o necesita aterrizar con urgencia por cualquier otro motivo operativo. Debido a esta prioridad, dichos vuelos se incorporan directamente al proceso de aterrizaje, adelantándose al resto de la cola para garantizar su llegada inmediata:

| Ultimos eventos registrados | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|----------|------------|-------------------------|-----------------------|-----------|---------|---------|--------------------|---------------------------------|
| Reloj | ID | ID_Vuelo | Estado | Estado_Pista_Aterrizaje | Estado_Pista_Despegue | Pasajeros | Origen | Destino | Hora_Salida_Origen | Hora_Programada_Llegada_Destino |
| 09:02 | R577 | UX7155 | Aterrizaje | Activa | Activa | 159 | Bilbao | Madrid | 08:10 | 09:00 |
| 08:59 | K693 | IB931 | Estacionad | Activa | Activa | 236 | Nueva Y | Madrid | 01:20 | 08:50 |
| 09:01 | G668 | IB702 | Despegand | Activa | Activa | 295 | Madrid | Bogota | 08:57 | 18:27 |

Figura 5.5: Vuelo de emergencia dashboard

5.2. Evolución de la lógica de la simulación

A partir del prototipo anterior, que ya presentaba un nivel de desarrollo para aumentar el realismo de la simulación. En esta nueva versión se han implementado elementos adicionales del sistema aeroportuario, como el cierre temporal de pistas, los diferentes tipos de parking y otras características operativas. Todo ello contribuye a que la simulación represente de forma más fiel el comportamiento real de un aeropuerto.

5.2.1. Gestión de pistas

Además de actuar como servidores en los que se gestionan las operaciones de aterrizaje y despegue, las pistas pueden presentar problemas que deben ser resueltas para evitar problemas y riesgos en las operaciones aéreas.

Por ello, se ha incluido un proceso que contempla el cierre temporal de una pista cuando pasa un cierto tiempo. Durante este período la pista permanece inactiva hasta que el equipo correspondiente completa la intervención en el tiempo establecido.

También se ha incluido un manejo de excepciones para aeronaves en estado de emergencia. Cuando se detecta un vuelo en estado de emergencia, se asume que presenta algún tipo de problema que requiere atención inmediata. Por ello, se le otorga prioridad absoluta en la cola de llegadas, permitiéndolo aterrizar antes que el resto de aeronaves. Esta situación se puede visualizar en el dashboard, tal y como se muestra en la figura 5.5.

5.2.2. Asignación de estacionamientos

Cuando el aeropuerto se queda sin posiciones de contacto disponibles, las aeronaves deben ubicarse en posiciones remotas, donde un autobús traslada a los pasajeros hasta la terminal. Esto ocurre cuando la demanda supera la capacidad disponible de posiciones de contacto.

Para reflejar esto en la simulación, se ha implementado un mecanismo el cual, cuando la cola del parking principal alcanza su límite, las aeronaves que van llegando a continuación se desvían automáticamente al parking secundario, que cuenta con una capacidad máxima de 10 posiciones. De esta manera el aeropuerto mantiene una mayor agilidad operativa y evita posibles saturaciones.

5.2.3. Procesamiento de procesos en paralelo

Una vez la aeronave está estacionada, se llevan a cabo diversos procesos necesarios para prepararlos para el siguiente vuelo.

En la simulación se han incluido los servicios de limpieza, catering y repostaje de combustible, los cuales se ejecutan de forma paralela. También se considera el tiempo correspondiente al embarque de los pasajeros. La duración total de estos procesos influye en la puntualidad, ya que, si uno de ellos se retrasa, el tiempo de salida del vuelo puede verse afectado, generando demoras en el sistema.

5.3. Análisis de los datos de la simulación

Para esta fase se ha mantenido la misma matriz de escenarios utilizada en la iteración anterior. Esta elección permite que podamos realizar una comparación directa entre ambas versiones y evaluar de manera más precisa las mejoras que han sido introducidas al simulador en este prototipo.

Sin embargo, ya que hemos incorporado nuevos atributos, como el cierre y apertura de pistas, es previsible que los resultados obtenidos difieran notablemente respecto al primer prototipo. Por ello, tomamos en cuenta diferentes parámetros para los escenarios (Tabla 5.1):

5.3. Análisis de los datos de la simulación

| Parámetros | Escenario Base | Escenario de Estrés | Escenario Adverso |
|------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| Mes | Julio | Julio | Enero |
| Clima | Soleado | Soleado | Nublado/Lluvioso |
| Disponibilidad Pistas | Dinámico | Dinámico | Dinámico |
| Tasa Tráfico | 200 operaciones | 400 operaciones | 300 operaciones |
| Gestión Parking | Mixta | Mixta | Mixta |
| Horas Simuladas | 24h | 24h | 24h |
| Incidencias | Activas | Activas | Activas |
| Turno Comienzo | Madrugada | Madrugada | Madrugada |
| Iteraciones | 75 | 75 | 75 |

Cuadro 5.1: Parámetros actualizados prototipo 2

Adicionalmente, se ha diseñado un cuarto escenario que, a diferencia de los anteriores, este nuevo escenario tiene como finalidad verificar la capacidad de respuesta y adaptación del sistema ante adversidades y cambios en el entorno operativo:

| Parámetros | Escenario Crítico |
|-----------------------|-------------------|
| Mes | Mayo |
| Clima | Soleado/Lluvioso |
| Disponibilidad Pistas | Dinámico |
| Tasa Tráfico | 500 operaciones |
| Gestión Parking | Mixta |
| Horas Simuladas | 168h |
| Incidencias | Activas |
| Turno Comienzo | Madrugada |
| Iteraciones | 75 |

Cuadro 5.2: Parámetros escenario crítico

Como se muestra en las tablas 5.1 y 5.2, los parámetros de simulación se mantienen prácticamente iguales a los del prototipo anterior, con la excepción de tres nuevos factores que ahora permanecen constantes en los cuatro escenarios. A continuación, se describe la lógica asociada a cada uno de ellos:

- **Disponibilidad de Pistas (Dinámica):** El sistema incorpora la posibilidad de que las pistas se cierren temporalmente para labores de mantenimiento u otros procedimientos, volviéndose a abrir una vez finalizados.
- **Gestión de Parking (Mixta):** Ahora, el modelo tiene dos tipos de estacionamiento: posiciones de contacto, que permiten una operación más rápida,

y posiciones remotas, que requieren el uso de autobús para el traslado de pasajeros. Cuando no quedan gates disponibles, las aeronaves se asignan a posiciones remotas.

- **Incidencias (Activas):** También, se incorpora la presencia de vuelos con estado de emergencia. Estas aeronaves reciben prioridad absoluta en la cola de llegadas, lo que les permite adelantar al resto de aeronaves.

5.4. Resultados de la experimentación del prototipo

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el segundo prototipo. Igual que en el apartado del primer prototipo, el objetivo es comparar cómo se comportan los distintos escenarios y comentar lo que se observa en las gráficas. Esto permite ver que ha cambiado con las nuevas funcionalidades y cómo afectan al sistema aeroportuario.

Para empezar, vamos a ver cómo evoluciona la cola de llegadas tras la incorporación de las nuevas funcionalidades, para ello miraremos el número medio de un día de la cola de llegada en condiciones normales (Figura 5.6):

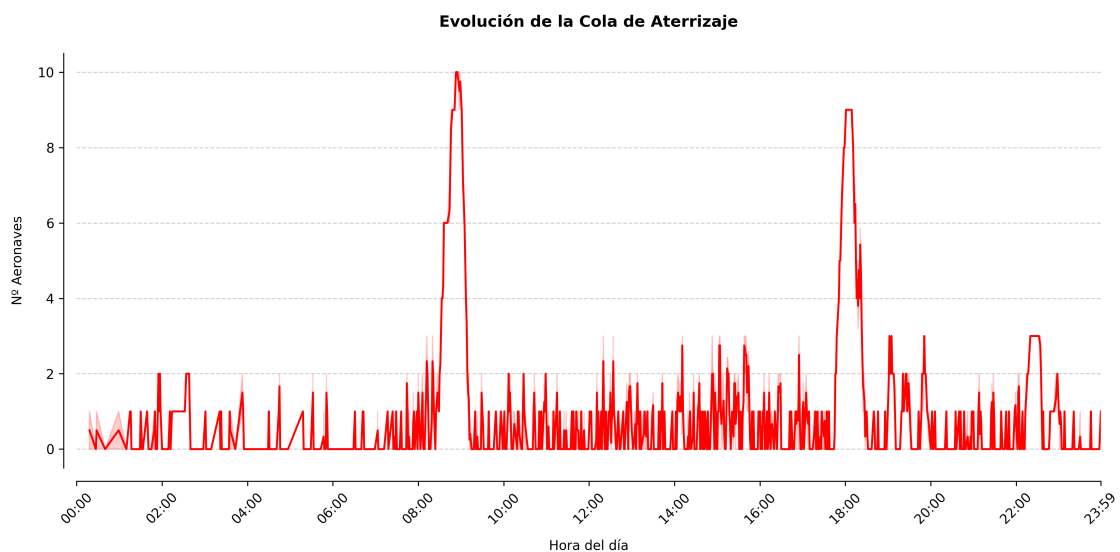


Figura 5.6: Evolución de la cola de aterrizaje

Se observa que cuando la pista se cierra por mantenimiento la cola de llegadas se satura rápidamente, llegando a su máximo de 10 aeronaves sobre las 8:30. Esto ocurre además en una franja horaria con mayor demanda (Turno de Mañana), lo que hace que la cola se llene aún más rápido. Más adelante, alrededor de las 18:00, aparece otro pico similar, lo que indica que estos dos periodos son críticos para la operación del aeropuerto.

5.4. Resultados de la experimentación del prototipo

Para continuar, vamos a seguir con el número total de operaciones aéreas por turno, para ver la cantidad que hay en cada turno y los posibles cuellos de botella (Figuras 5.7, 5.8 y 5.9):

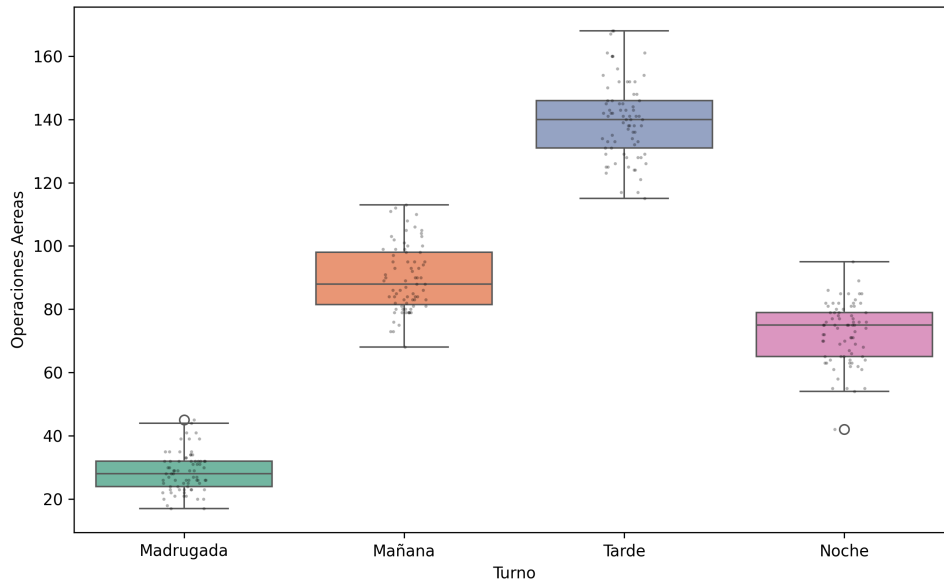


Figura 5.7: Ops. aéreas por turno escenario base prototipo 2

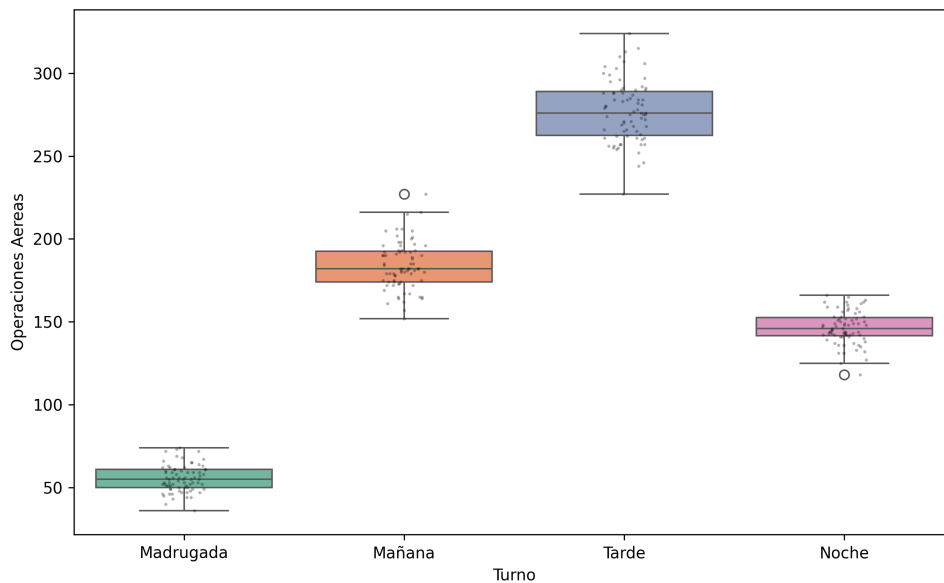


Figura 5.8: Ops. aéreas por turno escenario de estrés prototipo 2

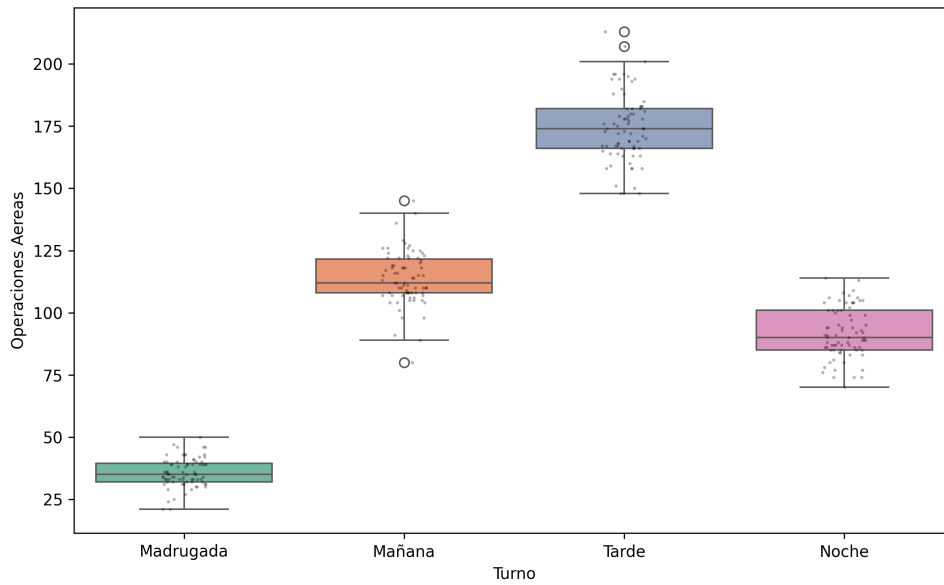


Figura 5.9: Ops. aéreas por turno escenario adverso prototipo 2

Después de ver los tres gráficos se puede observar que al igual que en el primer prototipo, los turnos de madrugada y noche son los de menor tráfico. El Escenario Adverso (Figura 5.9) actúa como un escalón intermedio, ya que eleva las operaciones levemente respecto al Escenario Base (Figura 5.7). En cambio, el Escenario de Estrés (Figura 5.8) es drástico, ya que duplica el tráfico de madrugada y hace que el de noche supere al pico máximo de una tarde en el Base.

En los turnos críticos de mañana y tarde, en el Escenario Adverso se aumentan tanto la carga como la dispersión de datos de sus operaciones. Por su parte, en el Escenario de Estrés el número de operaciones aéreas se dispara, duplicando en la tarde las operaciones del Escenario Base.

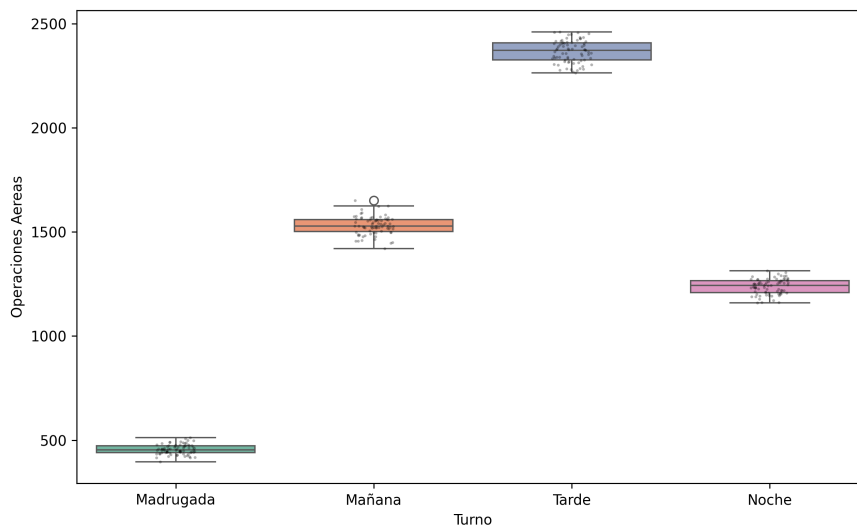


Figura 5.10: Ops. aéreas por turno escenario crítico

5.4. Resultados de la experimentación del prototipo

El gráfico del Escenario Crítico (Figura 5.10) ofrece una perspectiva de la cantidad de operaciones aéreas acumulada durante la simulación continua de una semana (168 horas). El eje vertical representa el volumen total de operaciones procesadas durante los 7 días.

Después de analizar el gráfico, se observa que el turno de tarde es el período crítico de la operación, ya que acumula una mediana superior a 2350 operaciones (336 operaciones cada día), lo que supone un 25% más de carga que el turno de tarde del Escenario de Estrés (Figura 5.8).

Sin embargo, el resultado más destacable de este análisis es la baja dispersión de datos, ya que a pesar de introducir factores críticos como el aumento de la tasa de tráfico, los resultados apenas varían entre iteraciones, lo que indica que el simulador muestra un sistema robusto a nivel de ejecución.

Para analizar cómo responde el sistema ante una acumulación alta de operaciones aéreas, en este prototipo se utilizan gráficos tipo *heatmap* (Figuras 5.11, 5.12 y 5.13). Aunque en el primer prototipo ya se representaban relaciones similares mediante gráficas de regresión lineal, el heatmap ofrece una visualización distinta y más intuitiva. En concreto, al igual que en el primer prototipo, permite ver simultáneamente el número de operaciones y el tiempo medio de ciclo de cada aeronave, destacando de forma más clara las zonas donde el sistema alcanza sus puntos críticos en cada escenario.

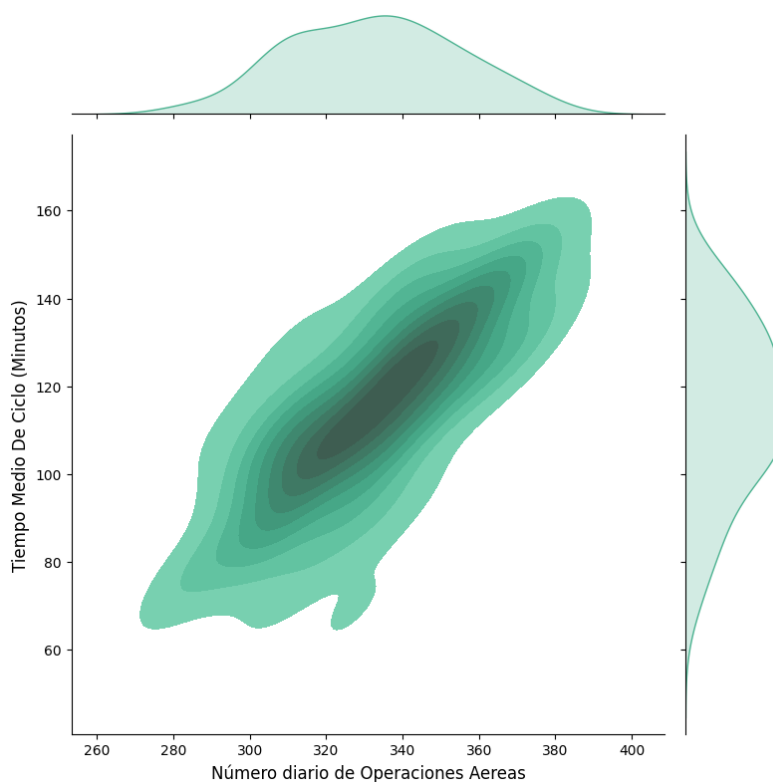


Figura 5.11: Heatmap escenario base

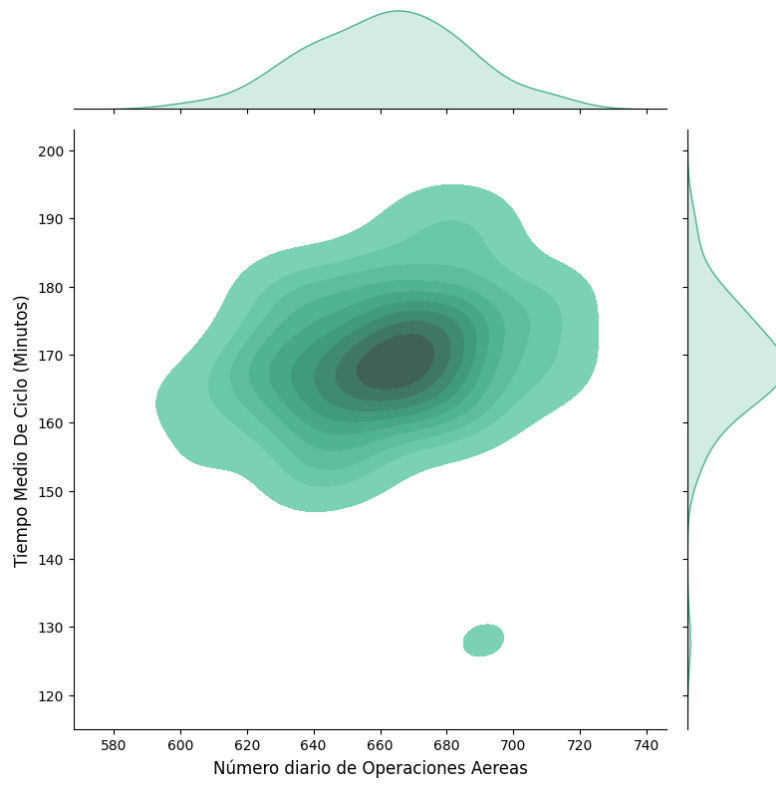


Figura 5.12: Heatmap escenario de estrés

5.4. Resultados de la experimentación del prototipo

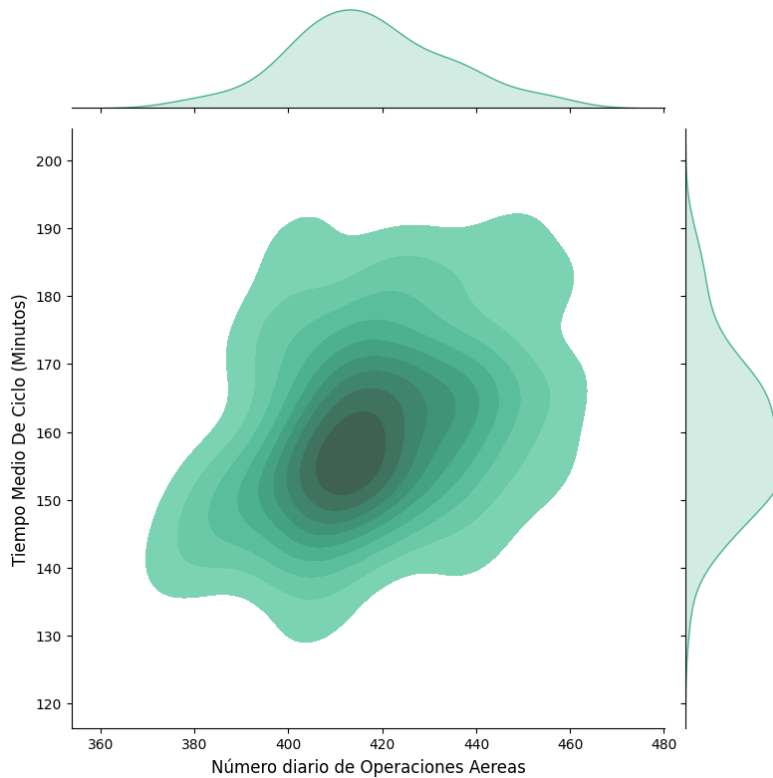


Figura 5.13: Heatmap escenario adverso

Comparando los tres escenarios, se observa que el Escenario Base (Figura 5.11) funciona de forma estable y bastante predecible. En su gráfico se muestra una diagonal clara y ascendente, lo que indica una correlación lineal, ya que el tiempo de ciclo aumenta proporcionalmente al tráfico, esto mantiene una dispersión baja y controlada.

En cambio, en el Escenario Adverso (Figura 5.13) se rompe esa estabilidad. La distribución se desplaza mucho más hacia tiempos mayores (190 minutos) y los datos comienzan a dispersarse. Esto refleja que, ante un aumento de carga, el sistema ofrece mayor resistencia, pero pierde eficiencia, costándole más procesar el flujo de aeronaves.

En el Escenario de Estrés (Figura 5.12), el comportamiento cambia por completo y se vuelve crítico. Ya que, a diferencia de la estabilidad anterior, la zona de densidad forma una mancha masiva situada en la parte superior del gráfico, con un núcleo de operación centrado en 165-175 minutos y alcanzando extremos de casi 200 minutos, similares a los peores momentos del adverso. Esto pone en evidencia que con cargas de 600 a 750 operaciones, el aeropuerto opera permanentemente en estado de saturación, sin capacidad para reducir los retrasos.

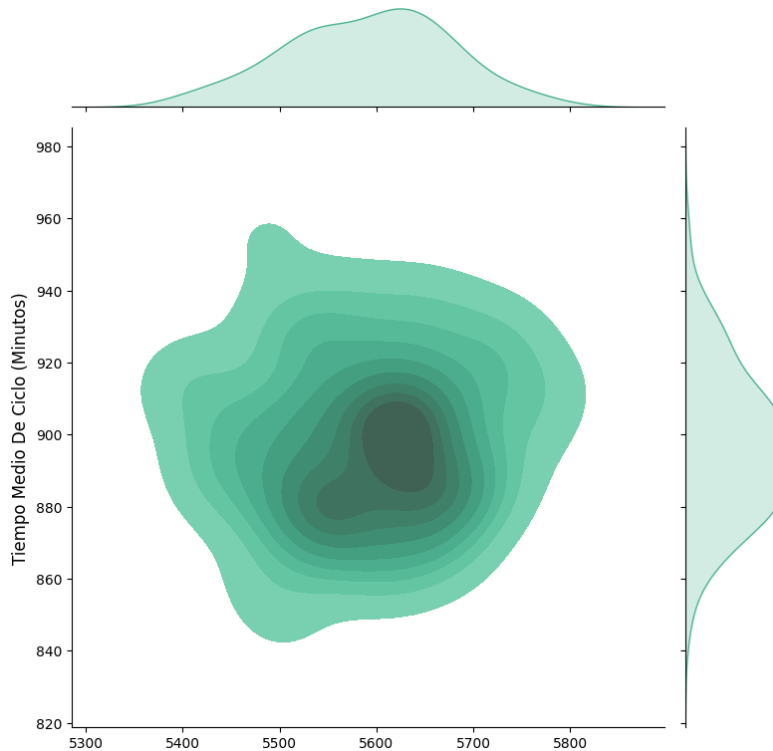


Figura 5.14: Heatmap escenario crítico

Tras analizar el resultado de la gráfica (Figura 5.14), a primera vista los datos resultan alarmantes. En este escenario, el número de operaciones es claramente superior al de los demás, y el tiempo de ciclo alcanza valores elevados. De primeras, el volumen total de operaciones, puede parecer una cifra alta, sin embargo, al ser una simulación de siete días, esto equivale a una media de 800 operaciones diarias.

Como consecuencia, se observan picos de hasta 960 minutos y una media cercana a los 900 minutos, lo que indica una saturación intensa a lo largo de los días. El sistema no tiene tiempo a recuperarse y supera su punto de retorno: incluso los períodos de menor actividad, como la madrugada, no logran absorber los retrasos acumulados, esto hace que la congestión continúe aumentando de forma progresiva.

Para este prototipo también se han generado varios gráficos en los que se representa el número de pasajeros por iteración, así como la media de pasajeros por aeronave en cada una de ellas (Figuras 5.15, 5.16 y 5.17). Estos resultados permiten analizar cómo evoluciona el flujo de pasajeros a lo largo de la simulación y comprender mejor su comportamiento en este prototipo. A continuación, se presentan los gráficos correspondientes:

Con el fin de mejorar la legibilidad y facilitar la interpretación, se muestran en esta sección únicamente 10 iteraciones representativas de las 75 totales. Los

5.4. Resultados de la experimentación del prototipo

gráficos completos, que incluyen todas las iteraciones, se presentan en A.3.

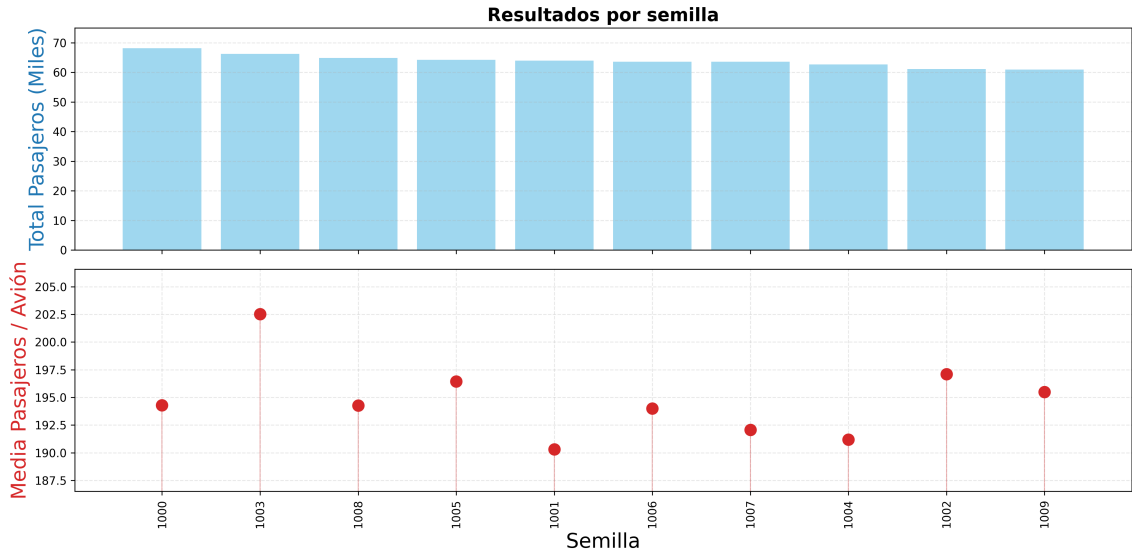


Figura 5.15: Gráfica pasajeros escenario base

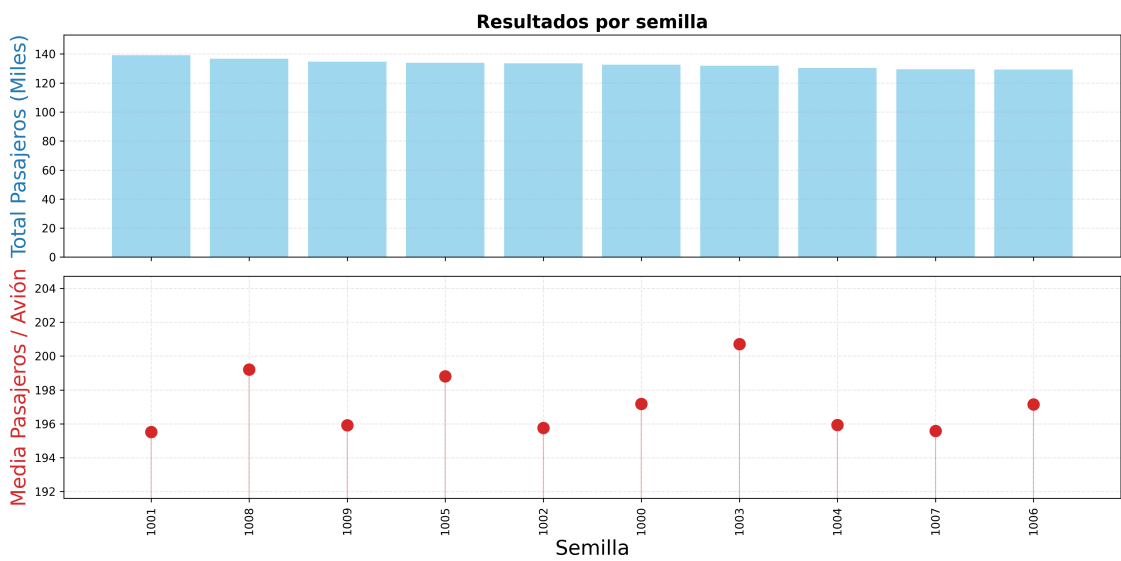


Figura 5.16: Gráfica pasajeros escenario de estrés

Capítulo 5. Prototipo 2º

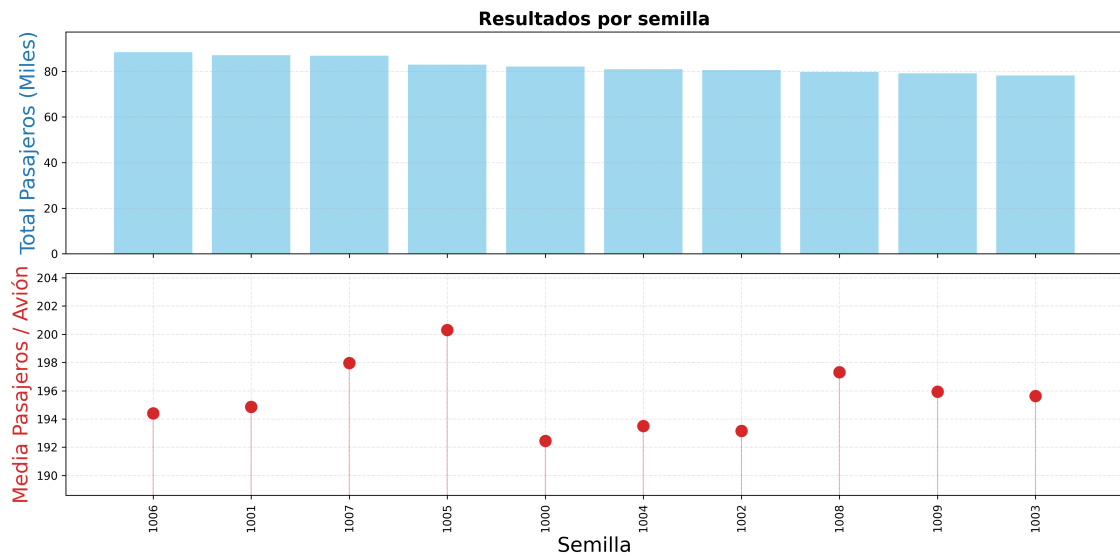


Figura 5.17: Gráfica pasajeros escenario adverso

Se puede observar como evoluciona el flujo de pasajeros en cada escenario en función de la carga de operaciones. En el Escenario Base 5.15, el sistema gestiona un volumen medio de aproximadamente 64.000 pasajeros diarios, lo que representa un nivel de operación estable y adecuado bajo condiciones normales.

En el Escenario Adverso (Figura 5.17), a pesar de las dificultades meteorológicas, el incremento en la tasa de tráfico eleva el flujo hasta unos 82.000 pasajeros diarios. Esto supone un aumento del 28 % respecto al Escenario Base, lo que incrementa la presión sobre el sistema aeroportuario y contribuye a una mayor saturación.

En el Escenario de Estrés (Figura 5.16), el salto es mucho más grande, ya que el volumen de pasajeros se dispara hasta alcanzar aproximadamente 135.000 pasajeros diarios. Este valor representa un incremento de más del 110% respecto a las condiciones normales, indicando que el sistema no solo se ve sometido a una carga extrema de aeronaves, sino también a un flujo masivo y continuo de pasajeros.

5.4. Resultados de la experimentación del prototipo

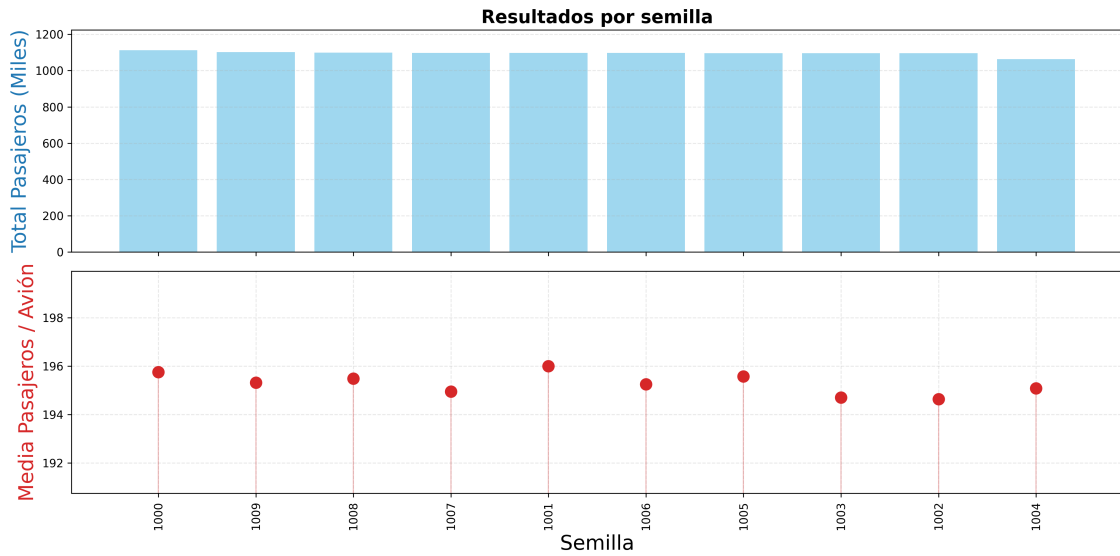


Figura 5.18: Gráfica pasajeros escenario crítico

Finalmente, el gráfico del Escenario Crítico (Figura 5.18) nos permite analizar la demanda total de pasajeros a lo largo de 168 horas de simulación (1 semana). En este caso se observa un cambio claro de escala, ya que el volumen acumulado de pasajeros alcanza valores cercanos a 1.100.000 pasajeros por iteración. Si esa cifra se reparte a lo largo de la semana equivale a una media de aproximadamente 157.000 pasajeros diarios, lo que supera el número registrado en el Escenario de Estrés.

Este nivel de demanda de pasajeros explica la saturación observada en los análisis anteriores, ya que el sistema se mantiene sometido a una carga muy elevada de forma continua durante varios días, sin tener casi margen para recuperarse.

En cuanto a la media de pasajeros por aeronave, se mantiene muy estable con valores cercanos a 196 pasajeros. Además, la similitud de resultados entre las distintas iteraciones confirma que el comportamiento del modelo es consistente.

Capítulo 6

Resultados y conclusiones

Una vez implementados y validados ambos prototipos, es necesario analizar los datos obtenidos. En este capítulo se comparan ambos prototipos con el objetivo de evaluar cuál de ellos ofrece un mayor grado de realismo y una representación fiel del flujo de operaciones y sistemas auxiliares. Por último, se presenta una síntesis de los resultados más relevantes del estudio y se proponen algunas ideas para mejorar y ampliar el modelo en trabajos futuros.

6.1. Análisis comparativo de los prototipos

El objetivo de esta sección es contrastar los resultados obtenidos en ambos prototipos para identificar las principales diferencias y los cambios más relevantes entre ellos. Mientras que el primer prototipo sirvió como una base inicial, pero muy completa, del modelo, mientras que el segundo se desarrolló con el objetivo de incorporar un mayor nivel de realismo con nuevas lógicas y funcionalidades.

A continuación, se presenta una comparativa mediante tablas en la que se analizan las diferencias entre los escenarios de cada prototipo. En ellas se comparan los aspectos clave de ambos modelos, con el objetivo de identificar en qué puntos difieren y cómo evolucionan entre una versión y otra.

Para comenzar se va a realizar una comparativa del Escenario Base de cada prototipo (Tabla 6.1):

Capítulo 6. Resultados y conclusiones

| Criterio | Prototipo 1 | Prototipo 2 |
|-------------------------------|-------------------|------------------------|
| Comportamiento General | Estable | Estocástico y Variable |
| Sensibilidad a la Carga | Baja | Alta |
| Saturación | Inexistente | Evidente |
| Tiempo Medio de Ciclo | ~81 minutos | ~115 minutos |
| Sesgo | Optimista | Conservador |
| Variabilidad del IC | Media (± 3) | Alta (± 5) |
| Presencia de Valores Atípicos | Nula | Evidente |
| Consistencia del Flujo | Alta | Alta |

Cuadro 6.1: Comparativa escenario base

Tal y como se observa en la Tabla 6.1, el paso del primer al segundo prototipo supone una clara mejora del modelo, ya que se pasa de un enfoque estable y fijo a uno complejo e inestable. El cambio más notable se observa en el Tiempo Medio de Ciclo, que aumenta de 81 minutos en el primer prototipo a aproximadamente 116 minutos en el segundo prototipo. Es importante destacar que este incremento del 42% no se debe a un peor funcionamiento, sino a que el primer modelo era demasiado optimista.

Mientras que en el Prototipo 1 la situación era ideal, ya que no había servicios auxiliares, cierres de pista, ni tiempos de espera entre aterrizajes, el Prototipo 2 tiene en cuenta más condiciones realistas del entorno aeroportuario, como la variabilidad en los tiempos de servicio y la llegada de vuelos en estado de emergencia. Además, el análisis de valores atípicos y del intervalo de confianza, que revela una diferencia importante entre ambos modelos. Mientras que el primer modelo presentaba un intervalo estrecho (± 3), lo que no era tan realista, el segundo modelo muestra un intervalo más amplio (± 5). De este modo, el sistema refleja de forma más honesta los problemas operativos y confirma que el modelo de simulación es representativo de un sistema real.

| Criterio | Prototipo 1 | Prototipo 2 |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Comportamiento General | Caótico e Inestable | Robusto y Predecible |
| Sensibilidad a la Carga | Crítica | Alta |
| Saturación | Colapso | Gestionada |
| Tiempo Medio de Ciclo | ~200 minutos | ~169 minutos |
| Sesgo | Ineficiente | Resiliente |
| Variabilidad del IC | Muy alta (± 7) | Media ($\pm 3,5$) |
| Presencia de Valores Atípicos | Descontrolada | Controlada |
| Consistencia del Flujo | Alta | Alta |

Cuadro 6.2: Comparativa escenario de estrés

6.2. Evaluación de los objetivos del TFG

Al poner ambos prototipos a prueba en un escenario de estrés, los resultados de la Tabla 6.2 son bastante claros. El Prototipo 1, que en situaciones normales parecía funcionar bastante bien, en este escenario se viene abajo, ya que el tiempo medio se dispara a 200 minutos y, además, la incertidumbre aumenta mucho (± 7), lo que indica que el modelo deja de ser estable y se vuelve difícil de predecir.

En cambio, el Prototipo 2 demuestra que está mejor preparado para este tipo de situaciones. Consigue un tiempo medio considerablemente menor (169 minutos) y, además, mantiene la variabilidad más controlada ($\pm 3,5$). Por tanto, esto confirma que, cuando el aeropuerto se satura, el segundo modelo es capaz de gestionar mejor las colas y organizar el tráfico.

| Criterio | Prototipo 1 | Prototipo 2 |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Comportamiento General | Inestable y Volátil | Resiliente y Estable |
| Sensibilidad a la Carga | Muy Alta | Alta |
| Saturación | Degradación Aleatoria | Degradación Lineal |
| Tiempo Medio de Ciclo | ~171 minutos | ~160 minutos |
| Sesgo | Impreciso | Preciso |
| Variabilidad del IC | Muy alta (± 7) | Baja ($\pm 2,5$) |
| Presencia de Valores Atípicos | Frecuente | Acotada |
| Consistencia del Flujo | Alta | Alta |

Cuadro 6.3: Comparativa escenario adverso

Por último, la Tabla 6.3 muestra claramente el comportamiento de ambos modelos en condiciones desfavorables. Se observa que el Prototipo 1 no es capaz de gestionar correctamente la incertidumbre (al igual que en el Escenario de Estrés), ya que su comportamiento se vuelve muy inestable, con un intervalo de confianza de ± 7 . En la práctica, implica que, ante condiciones adversas, se vuelve impredecible.

Por el contrario, el Prototipo 2 presenta un comportamiento más estable. No solo consigue mejorar los tiempos medios, reduciéndolos hasta 160 minutos, sino que además lo hace manteniendo una variabilidad muy baja ($\pm 2,5$). Por ello, esto indica que hasta en situaciones complicadas como restricciones meteorológicas o fallos operativos, el modelo sigue ofreciendo resultados coherentes.

6.2. Evaluación de los objetivos del TFG

En esta sección se evalúa si se han cumplido los objetivos definidos al principio de este trabajo correctamente. Para ello, se analizan de forma individual cada uno de los objetivos planteados:

- **Definir y modelar el sistema aeroportuario:** Se han identificado casi en su totalidad todos los elementos esenciales que forman parte del flujo ope-

Capítulo 6. Resultados y conclusiones

racional de un aeropuerto. A lo largo del trabajo se ha hablado tanto de la infraestructura como de los procesos clave en la gestión aeroportuaria, y se ha incluido un diagrama físico que recoge los aspectos más importantes para facilitar la comprensión del Modelo Empírico.

Como posibles mejoras, se podrían añadir más servicios auxiliares y otros factores que influyen en el funcionamiento de un aeropuerto, como por ejemplo controles adicionales o los sistemas de transporte utilizados para acceder al aeropuerto. No obstante, teniendo en cuenta el alcance de este proyecto, puede considerarse que este objetivo se ha cumplido de manera satisfactoria.

- **Formular la metodología matemática:** Dentro del Prototipo 1 se ha desarrollado un modelo matemático basado en la *Teoría de Colas*. En este modelo también se han explicado las diferentes fórmulas matemáticas utilizadas, las cuales introducen procesos aleatorios y estocásticos en la simulación.

Como mejora adicional, se podrían haber incorporado más factores aleatorios y más servicios, como por ejemplo pasajeros que llegan tarde al embarque y obligan a bajar su equipaje, o fallo técnicos del avión. Este último caso, en parte, ya se ha considerado mediante la simulación de aterrizajes de emergencia. Aun así, teniendo en cuenta el alcance del proyecto, puede afirmarse que este objetivo se ha cumplido de forma satisfactoria.

- **Implementar y validar un prototipo funcional:** Se ha desarrollado un prototipo que gestiona correctamente la concurrencia entre aeronaves y algunos servicios auxiliares. Cada aeronave cuenta con su propio ciclo, el cual se ejecuta de forma correcta y aleatoria, respetando los límites y horarios establecidos. Por ejemplo, una aeronave no puede aterrizar hasta que haya pasado al menos un minuto desde el aterrizaje de otra, y del mismo modo, no es posible que dos aeronaves ocupen simultáneamente el mismo puesto de estacionamiento.

No obstante, el modelo puede mejorarse mediante la inclusión de nuevos eventos o una gestión más precisa de la concurrencia con los servicios auxiliares. Aun así, en términos generales, puede considerarse que este objetivo también se ha cumplido satisfactoriamente.

- **Analizar e interpretar los resultados obtenidos:** Para cada prototipo se ha intentado realizar una evaluación similar en los escenarios, aunque variado ligeramente el tipo de gráficas utilizadas en cada caso para analizar resultados desde diferentes puntos de vista. Dado que un sistema aeroportuario se generan una gran cantidad de resultados, no ha sido posible abordar todos los aspectos de evaluación, pero sí se han considerado los más representativos, como el tiempo medio ciclo, el número de pasajeros y la carga de trabajo en los distintos turnos de un día.

Aun así, se podrían haber realizado más análisis para obtener conclusiones

más completas. De todas formas, los resultados principales han podido representarse de forma adecuada. Por tanto, este objetivo puede considerarse casi cumplido, aunque quedaría margen de mejora en este apartado.

6.3. Trabajo futuro

Aunque este Trabajo de Fin de Grado ha cumplido con la mayoría de objetivos planteados, es importante señalar que el modelo desarrollado representa solo una parte de la complejidad de un aeropuerto. Esta simplificación del proyecto está condicionada tanto por el tiempo disponible como por el alcance propio de un proyecto de dicha magnitud realizado de forma individual. Aun así, el prototipo final construido constituye una base sólida sobre la que se pueden plantear diversas mejoras y ampliación en trabajos futuros.

En primer lugar, una posible mejora sería la integración de datos reales en tiempo casi real. En lugar de generar las llegadas de forma aleatoria y estadística, el simulador podría alimentarse de programaciones de vuelos reales mediante bases de datos disponibles o APIs de tráfico aéreo. Esto permitiría que la simulación reflejara situaciones reales del día a día del aeropuerto y aumentará su utilidad práctica.

Otra mejora interesante estaría relacionada con la evolución del sistema. Por un lado, la visualización podría mejorarse utilizando motores gráficos como Unity, lo que permitiría mostrar el aeropuerto en un entorno 3D más claro y fácil de interpretar. Por otro lado, se podrían aplicar técnicas de Machine Learning a partir de los datos generados por la simulación. De esta forma, el sistema podría aprender a identificar situaciones de saturación y anticipar posibles problemas operativos con mayor antelación, ayudando así a mejorar la toma de decisiones.

También se podría aumentar el nivel de detalle del ciclo de cada aeronave. En lugar de tratar el servicio en tierra como un solo proceso (estacionamiento), sería posible modelar de forma más específica tareas como la limpieza, el catering o el embarque, es decir, que en el log aparezcan más estados para saber en cada momento en que proceso se encuentra la aeronave. Además, resultaría interesante incluir la simulación del flujo de los pasajeros dentro de la terminal, de forma que se pudiera relacionar el estado de pistas con posibles situaciones de congestión en puertas y zonas comunes.

Por último, otra mejora importante sería el análisis del impacto medioambiental. Teniendo en cuenta que el simulador ya calcula tiempos de espera y de rodaje con los motores en funcionamiento, se podrían añadir estimaciones del consumo de combustible y de las emisiones de CO₂. De esta manera, el modelo no solo permitiría analizar la eficiencia operativa del aeropuerto, sino que también estudiar posibles medidas para reducir su impacto medioambiental.

6.4. Análisis del impacto

6.4.1. Impacto general

El desarrollo de este sistema de simulación no se limita únicamente al ámbito académico, sino que tiene implicaciones en distintos aspectos, tanto a nivel personal como en la mejora de la gestión operativa y económica del aeropuerto.

- **Nivel personal:** A nivel personal, este trabajo me ha ayudado a comprender mejor el funcionamiento de un sistema aeroportuario y la complejidad que conlleva. Además, ha supuesto un reto importante sacar a delante el proyecto y poner en práctica mis conocimientos adquiridos durante la carrera. Durante el desarrollo del TFG he mejorado notablemente mi manejo de Python y he aprendido a utilizar Latex para la redacción de documentos técnicos. Asimismo, he podido profundizar en el uso de simulaciones de eventos y he descubierto que este tipo de trabajos pueden resultar especialmente interesantes y motivadores.
- **Nivel operativo:** En este ámbito, un simulador aeroportuario permite probar escenarios hipotéticos sin asumir riesgos reales. Esto supone un cambio en la gestión del aeropuerto, ya que permite pasar de un modelo reactivo a uno más preventivo, identificando cuellos de botella o situaciones de saturación antes de que ocurran. En un entorno real no es posible realizar este tipo de pruebas como cerrar una pista o duplicar el tráfico aéreo, ya que implicaría un riesgo elevado para la seguridad y la operatividad de un aeropuerto.
- **Nivel económico:** El tiempo es uno de los recursos más valiosos en este tipo de escenarios, ya que cualquier retraso puede suponer un coste económico elevado, tanto en servicios adicionales como en tasas aeroportuarias. Por este motivo, optimizar el tiempo de ciclo de las aeronaves y los tiempos asociados a los distintos procesos permite reducir estos costes y mejorar la eficiencia económica del sistema en general. Esto tiene un impacto positivo tanto para las aerolíneas como para el propio aeropuerto.

6.4.2. Impacto en los objetivos de desarrollo sostenible

La simulación de operaciones, flujo de aeronaves y sistemas auxiliares en un aeropuerto es clave para modernizar los aeropuertos. Por ello, el desarrollo de este trabajo contribuye a varios Objetos de Desarrollo Sostenible (ODS), que se exponen a continuación:

- **ODS 8: Trabajo decente y Crecimiento económico.** La simulación desarrollada tiene como objetivo mejorar la eficiencia de las operaciones del aeropuerto. Al reducir los tiempos de espera y los retrasos, se mejora la productividad del aeropuerto, y, por tanto, ayuda a disminuir costes. Además, contar con una herramienta que permite anticipar situaciones de saturación facilita una mejor planificación del trabajo.
- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.** Este proyecto muestra

6.4. Análisis del impacto

cómo el uso de herramientas de simulación puede ayudar a la mejor gestión de infraestructuras, como un aeropuerto, sin necesidad de realizar cambios físicos. Mediante un modelo software se puede probar varios escenarios y analizar su impacto antes de aplicarlos en la realidad, por lo que es más seguro e innovador.

Bibliografía

- [1] AENA. «Estadísticas tráfico aéreo», visitado 27 de oct. de 2025. dirección: <https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html>
- [2] Aertec, *Infographic Airport Simulation fly news*.
- [3] S. LLC. «¿Cuáles son las diferencias entre el software de simulación: ¿Discretos, continuos y basados en agentes?», visitado 28 de oct. de 2025. dirección: <https://www.simio.com/es/cuales-son-las-diferencias-entre-el-software-de-simulacion-discretos-continuos-y-basados-en-agentes/>
- [4] R. Automation. «Arena Simulation Software», visitado 27 de oct. de 2025. dirección: <http://rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>
- [5] Wikipedia. «GPSS», visitado 27 de oct. de 2025. dirección: <https://en.wikipedia.org/wiki/GPSS>
- [6] P. S. Foundation. «Simpy», visitado 27 de oct. de 2025. dirección: <https://pypi.org/project/simpy/>
- [7] S. R. I. y o. Antonio Jimenez Martin David Rios Insua, *Simulación. Métodos y aplicaciones*. Ra-Ma, 2008.
- [8] S. R. I. y otros, *Investigación operativa: modelos determinísticos y estocásticos*. Centro de Estudios Ramon Aceres, 2008.
- [9] D. y o. Gross, *Fundamentals of queueing theory*. Hoboken, NJ: Wiley, 2008.
- [10] L. Kleinrock, *Queueing systems*. Willy-Interscience, 2008.
- [11] A. O. Allen, *Probability, statistics, and queueing*. Academic Press, 1990.
- [12] J. A. Sokolowski y C. M. Banks, *principles of modeling and simulation a multidisciplinary approach compress*. John Wiley & Sons, 2009.
- [13] A. H. García, *SIMULACION DE OPERACIONES AEROPORTUARIAS. EL CASO DE DESPEGUES Y ATERRIZAJES EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MEXICO*. Instituto Mexicano de Transporte, 2001.
- [14] «Our Data», visitado 10 de nov. de 2025. dirección: <https://www.eurocontrol.int/our-data>
- [15] «SMART ATM», visitado 10 de nov. de 2025. dirección: <https://www.sesarju.eu/what-is-smart-atm>

BIBLIOGRAFÍA

- [16] «Air Traffic Management», visitado 10 de nov. de 2025. dirección: <https://electronics.leonardo.com/en/atm>
- [17] «Qué tipos de aviones hay y cómo identificarlos», visitado 19 de dic. de 2025. dirección: <https://www.aviationgroup.es/actualidad/tipos-aviones-como-identificarlos/>
- [18] «Pista Aterrizaje», visitado 19 de dic. de 2025. dirección: https://es.wikipedia.org/wiki/Pista_de_aterrizaje
- [19] «Procesos de Embarque», visitado 19 de dic. de 2025. dirección: <https://es.scribd.com/document/660781129/Procesos-de-Embarque>
- [20] «Gestion de Instalaciones», visitado 19 de dic. de 2025. dirección: <https://www.rodator.com/aeropuertos/>
- [21] J. Barceló, *Simulación de Sistemas Discretos*. Isdefe, 1996.
- [22] L. Leemis, *Discrete Event Simulation: A First Course*. The College of William y Mary, 2004.
- [23] «La Meteorología y su Impacto en la Navegación Aérea», visitado 14 de nov. de 2025. dirección: <https://aeromuseo.org/la-meteorologia-y-su-impacto-en-la-navegacion-aerea/>
- [24] P. S. Foundation. «random - Generate pseudo random numbers», visitado 29 de oct. de 2025. dirección: <https://docs.python.org/3/library/random.html>

Anexos

Apéndice A

Primer anexo

A.1. Módulos del programa

En esta sección se presentan los ficheros .py que forman parte del trabajo. Cada uno de ellos incluye un hipervínculo con una referencia a su correspondiente enlace en Github y se encarga de implementar funcionalidad específicas dentro del proyecto.

TorreDeControl.py
GeneradorAeronaves.py
Aeronaves.py
FactoresExternos.py
Graficas.py
Input.py
Main.py
ServiciosAuxiliares.py
Dashboard.py

A.2. Código fuente de la simulación

Para facilitar la comprensión del funcionamiento del simulador y mostrar de manera clara cómo se implementan los componentes, en esta sección se presentan los fragmentos de código más relevantes.

```
def generador(evento):  
    vueloRandom = random.choice(listaVuelos)  
    letra = random.choice("ABCDEFGHILKMNOPQRSTUVWXYZ")  
    id = f"{letra}{random.randint(0,999)}" # genera un id  
    idVuelo = vueloRandom["Vuelo_ID"]  
    estado = "Llegando" # estado de la aeronave  
    pasajeros = random.randint(150,300)
```

Capítulo A. Primer anexo

```
origen = vueloRandom["Ciudades"] # genera ciudades
destino = "Madrid"
duracion = vueloRandom["Duracion_Vuelo"]
horasAeronave = int(evento.now)
horasHastaSalida = ((horasAeronave - duracion)//60)%24
minsHastaSalida = (horasAeronave - duracion) % 60
horasHastaLlegada = (horasAeronave // 60) % 24
minsHastaLl = horasAeronave % 60
horaSalida = f"{horasHastaSalida:02d}:{minsHastaSalida:02d}"
horaLl = f"{(horasHastaLlegada)%24:02d}:{minsHastaLl:02d}"
```

Listing A.1: Generador de aeronaves

```
# Nos indica primero si esta llegando el avion
yield evento.process(controlLlegadas(evento, avion,
    colaAterrizajes, estadoClima, mes, aeronaves))
# Despues de seguido indica si efectivamente ha aterrizado
el avion
yield evento.process(controlAterrizajes(evento,
    pistaAterrizajes, colaAterrizajes, colaEstacionados,
    estadoClima, mes, aeronaves))
# Después nos indica cuando ha estacionado la aeronave
yield evento.process(controlEstacionados(evento, parking,
    colaEstacionados, colaSalidas, estadoClima, mes, aeronaves))
# Después de estacionar nos dice a que hora está programado
el vuelo
yield evento.process(controlSalidas(evento, anuncio,
    colaSalidas, colaDespegues, estadoClima, mes, aeronaves))
# Nos indica si el avion esta despegando
yield evento.process(controlDespegues(evento, parking,
    pistaDespegues, colaDespegues, estadoClima, mes, turnos,
    aeronaves))
```

Listing A.2: Ciclo completo aeronaves

```
# Una vez solicitan aterrizar los aviones se les anade a la
cola de llegadas
def controlLlegadas(evento, avion, colaAterrizajes, estadoClima
, mes, aeronaves):
    yield colaAterrizajes.put(avion)
    aeronaves["AeronavesEnColaLlegada"] += 1
    avion.infoColaAterrizaje(evento, estadoClima, mes,
    aeronaves)
```

Listing A.3: Gestión de la cola de llegada

A.2. Código fuente de la simulación

```
# Una vez llegan las aeronaves las retira de la otra cola y  
las anade a la de aterrizados  
def controlAterrizajes(evento, pista, colaAterrizajes,  
colaEstacionados, estadoClima, mes, aeronaves):  
    if colaAterrizajes:  
        with pista.request() as request: # si hay request  
de aterrizar en pista  
            yield request  
            tiempoHastaAterrizar = estadoClima['retraso']  
            yield evento.timeout(tiempoHastaAterrizar)  
            aterriza = yield colaAterrizajes.get()  
            aterriza.horaLlegadaReal = tiempoEvento(evento.  
now)  
            aterriza.tiempoLlegadaMinutos = int(evento.now)  
            aeronaves["AeronavesEnColaLlegada"] -= 1  
            aterriza.infoAterrizaje(evento, estadoClima, mes,  
aeronaves)  
            yield colaEstacionados.put(aterriza)  
    else:  
        yield evento.timeout(0.1)
```

Listing A.4: Operación de aterrizaje

```
# Una vez aterrizan las aeronaves te informa de si esta  
estacionado  
def controlEstacionados(evento, parking, colaEstacionados,  
colaSalidas, estadoClima, mes, aeronaves):  
    if colaEstacionados:  
        estacionado = yield colaEstacionados.get()  
        req = parking.request()  
        # si hay request de estacionar  
        yield req  
        tiempoHastaEstacionamiento = int(random.triangular  
        (5.0, 15.0, mode=10.0))  
        yield evento.timeout(tiempoHastaEstacionamiento)  
        estacionado.horaEstacionado = tiempoEvento(evento.  
now)  
        aeronaves["AeronavesEstacionados"] += 1  
        estacionado.infoEstacionado(evento, estadoClima, mes,  
aeronaves)  
        estacionado.ticketParking = req  
        yield colaSalidas.put(estacionado)  
    else:  
        yield evento.timeout(0.1)
```

Listing A.5: Operación de estacionamiento

Capítulo A. Primer anexo

```
# Una vez estan estacionadas las aeronaves se les asigna una
hora de salida para ser anunciado
def controlSalidas(evento, anuncio, colaSalidas, colaDespegues,
estadoClima, mes, aeronaves):
    if colaSalidas:
        salida = yield colaSalidas.get()
        avion = aeronaveSalida(evento, salida)
        with anuncio.request() as request:
            yield request
            avion.infoSalidas(evento, estadoClima, mes,
aeronaves)
            horaProgramada, minProgramado = funcSplit(avion.
horaProgramadaSalida)
            tiempoProgramado = horaProgramada*60 +
minProgramado
            tiempoActual = int(evento.now) % 1440
            tiempo = tiempoProgramado - tiempoActual
            if tiempo < -720: #en caso de que se resetee el
día
                tiempo += 1440
            tiempoEspera = max(0, tiempo)
            yield evento.timeout(tiempoEspera)
            yield colaDespegues.put(salida)
    else:
        yield evento.timeout(0.1)
```

Listing A.6: Programación de salida

```
# Una vez estan estacionadas las aeronaves se les asigna una
tarea de salir a pista
def controlDespegues(evento, parking, pista, colaDespegues,
estadoClima, mes, turnos, aeronaves):
    if colaDespegues:
        salida = yield colaDespegues.get()
        avion = salida
        with pista.request() as request: #hace request por
si no hay ningún avión en la pista
            yield request
            if(hasattr(avion, 'ticketParking')):
                parking.release(avion.ticketParking)
                del avion.ticketParking
            tiempoDespegando = random.uniform(1.0, 3.0)
            aeronaves["AeronavesEstacionados"] -= 1
            aeronaves["AeronavesEnColaSalida"] += 1
            avion.infoColaDespegues(evento, estadoClima, mes,
aeronaves)
            yield evento.timeout(tiempoDespegando +
estadoClima['retraso'])
```

A.2. Código fuente de la simulación

```
avion.horaDespegue = tiempoEvento(evento.now)
tiempoCiclo = int(evento.now) - avion.
    tiempoLlegadaMinutos
avion.tiempoCicloAvion = tiempoEvento(
    tiempoCiclo)
avion.horaLlegadaReal = "---"
aeronaves["AeronavesEnColaSalida"] -= 1
aeronaves["AeronavesCicloCompletoContadorTiempo"
] += int(tiempoCiclo)
aeronaves["AeronavesCicloCompletoContador"] += 1
horaDespegue = horaActual(evento.now)
controlTurnosSalidas(horaDespegue,turnos)
avion.infoDespegues(evento,estadoClima,mes,
    aeronaves)
else:
    yield evento.timeout(0.1)
```

Listing A.7: Operación de despegue

```
tasaHora = {0:0.1,1:0.1,2:0.08,3:0.07,4:0.07,5:0.08,
    6:0.1,7:0.2,8:0.3,9:0.3,10:0.4,11:0.4,
    12:0.4,13:0.45,14:0.4,15:0.5,16:0.45,17:0.4,
    18:0.35,19:0.3,20:0.25,21:0.2,22:0.15,23:0.1}
```

Listing A.8: Tasa horarios

```
Invierno = {"Soleado":0.3,"Nublado":0.4,"Lluvioso":0.2,"
    Niebla":0.05,"Tormenta":0.05}
Primavera = {"Soleado":0.6,"Nublado":0.25,"Lluvioso":0.1,"
    Niebla":0.02,"Tormenta":0.05}
Verano = {"Soleado":0.8,"Nublado":0.15,"Lluvioso":0.03,"
    Niebla":0.01,"Tormenta":0.03}
Otonio = {"Soleado":0.5,"Nublado":0.3,"Lluvioso":0.15,"
    Niebla":0.02,"Tormenta":0.05}

def climaRandom(estados):
    estado = list(estados.keys())
    prob = list(estados.values())
    return random.choices(estado,prob,k=1)[0]

def logicaClima(evento,estado,mes):
    while True:
        if mes in ["DICIEMBRE","ENERO","FEBRERO"]:
            estacionActual = Invierno
        elif mes in ["MARZO","ABRIL","MAYO"]:
            estacionActual = Primavera
        elif mes in ["JUNIO","JULIO","AGOSTO"]:
            estacionActual = Verano
```

Capítulo A. Primer anexo

```
else: estacionActual = Otonio
      clima = climaRandom(estacionActual)
if clima != estado['clima']:
    estado['clima'] = clima
    if clima == 'Nublado':
        estado['retraso'] = 1.5
    elif clima == 'Lluvioso':
        estado['retraso'] = 2
    elif clima == 'Niebla':
        estado['retraso'] = 2.5
    elif clima == 'Tormenta':
        estado['retraso'] = 3.5
    else: estado['retraso'] = 0

yield evento.timeout(60)
```

Listing A.9: Factores externos

```
def generador(evento):
    vueloRandom = random.choice(listaVuelos)
    letra = random.choice("ABCDEFGHILKMNOPQRSTUVWXYZ") # genera
    letra random
    id = f"{letra}{random.randint(0,999)}" # genera un id para
    un avion aleatorio
    idVuelo = vueloRandom["Vuelo_ID"] # genera un id para un
    avion aleatorio
    estado = "Llegando" # estado de la aeronave
    pasajeros = random.randint(150,300) # genera un numero
    random de pasajeros
    origen = vueloRandom["Ciudades"] # genera ciudades
    destino = "Madrid"
    duracion = vueloRandom["Duracion_Vuelo"]
    horasAeronave = int(evento.now) # Con el tiempo del reloj de
    simulacion calculamos los demas tiempos
    horasHastaSalida = ((horasAeronave - duracion)//60) %24
    minsHastaSalida = (horasAeronave - duracion) % 60
    horasHastaLlegada = (horasAeronave // 60) % 24
    minsHastaLlegada = horasAeronave % 60
    horaSalida = f"{horasHastaSalida:02d}:{minsHastaSalida:02d}"
    horaLlegada = f"{(horasHastaLlegada) %24:02d}:"
    minsHastaLlegada:02d}"
    return Aeronave(id, idVuelo, estado, pasajeros, origen, destino,
    horaSalida, horaLlegada, horaLlegadaReal="---",
    horaEstacionado="---", horaProgramadaSalida="---",
    horaDespegue="---", tiempoCicloAvion="---")
```

Listing A.10: Generador aeronaves

A.2. Código fuente de la simulación

```
def controlAereo(evento, anuncio, parking, pistaAterrizajes,
pistaDespegues, colaAterrizajes, colaEstacionados,
colaSalidas, colaDespegues, estadoClima, mes, turnos,
aeronaves, retraso):
while True:
    vuelosMedia = aeronaves["AeronavesDiarias"] #media
        de vuelos cada dia
    hora = horaActual(evento.now)
    controlHorario(evento, turnos, retraso)
    operaciones = operacionesMes(mes)
    vuelosDiarios = vuelosMedia * operaciones
    vuelosHora = vuelosDiarios * tasaHora[hora]
    lambdaVuelos = (vuelosHora/60)/4 #el aeropuerto
        madrid barajas usa 4 pistas como solol tenemos 1
        dividimos todo entre 4
    tiempoGeneracion = random.expovariate(lambdaVuelos)
    yield evento.timeout(tiempoGeneracion)
    avion = generador(evento) # se generan aviones
    controlTurnosLlegadas(hora, turnos)
    Aeronave.totalAeronaves += 1
    Aeronave.totalPasajeros += avion.pasajeros
    # Ciclo completo de cada avion
    evento.process(cicloAvion(evento, avion, parking,
        anuncio, pistaAterrizajes, pistaDespegues,
        colaAterrizajes, colaEstacionados, colaSalidas,
        colaDespegues, estadoClima, mes, turnos, aeronaves))
```

Listing A.11: Control aéreo

```
Reloj, ID, ID_Vuelo, Estado, Estado_Pista_Aterrizaje,
Estado_Pista_Despegue, Pasajeros, Origen, Destino,
Hora_Salida_Origen, Hora_Programada_Llegada_Destino,
Hora_Llegada_Destino, Hora_Estacionamiento,
Hora_Programada_Salida, Hora_Despegue, Tiempo_Ciclo_Aeronave, Mes,
Clima, Aeronaves_En_Cola_Llegada, Aeronaves_En_Estacionamiento,
Aeronaves_En_Cola_Salida, Gate, Tipo_Parking, Emergencia
00:07, X142, SK1505, Llegando, Activa, Activa, 130, Copenhague, Madrid
, 20:37, 00:07, ---, ---, ---, ---, ---, MAYO, Soleado, 1, 0, 0, ,, False
00:07, X142, SK1505, Aterrizaje, Activa, Activa, 130, Copenhague, Madrid
, 20:37, 00:07, 00:07, ---, ---, ---, ---, MAYO, Soleado, 0, 0, 0, ,, False

00:11, F467, IB6166, Llegando, Activa, Activa, 281, San Francisco, Madrid
, 12:11, 00:11, ---, ---, ---, ---, ---, MAYO, Soleado, 1, 0, 0, ,, False
00:11, F467, IB6166, Aterrizaje, Activa, Activa, 281, San Francisco, Madrid
, 12:11, 00:11, 00:11, ---, ---, ---, ---, MAYO, Soleado, 0, 0, 0, ,, False

00:14, U996, IB700, Llegando, Activa, Activa, 260, El Cairo, Madrid
, 19:44, 00:14, ---, ---, ---, ---, ---, MAYO, Soleado, 1, 0, 0, ,, False
00:14, U996, IB700, Aterrizaje, Activa, Activa, 260, El Cairo, Madrid
, 19:44, 00:14, 00:14, ---, ---, ---, ---, MAYO, Soleado, 0, 0, 0, ,, False
```


A.3. Gráficos completos

```
Chile,01:25,14:25,00:32,00:45,01:25,---,---, MAYO, Soleado
,0,5,0,5,Finger,False

00:55,S294,UX1048,Estacionado,Activa,Activa,147,Roma,Madrid
,22:29,00:44,00:44,00:55,---,---,---, MAYO, Soleado,0,6,0,6,
Finger,False

00:55,S294,UX1053,Programado,Activa,Activa,141,Madrid,Mumbai
,01:39,10:09,00:44,00:55,01:39,---,---, MAYO, Soleado,0,6,0,6,
Finger,False

00:56,C277,FR5454,Llegando,Activa,Activa,261,Bruselas,Madrid
,22:46,00:56,---,---,---,---,---, MAYO, Soleado,1,6,0,,False
00:56,C277,FR5454,Aterrizaje,Activa,Activa,261,Bruselas,Madrid
,22:46,00:56,00:56,---,---,---,---, MAYO, Soleado,0,6,0,,False

01:02,N655,IB6051,Llegando,Activa,Activa,181,Johannesburgo,Madrid
,15:02,01:02,---,---,---,---,---, MAYO, Soleado,1,6,0,,False
01:02,N655,IB6051,Aterrizaje,Activa,Activa,181,Johannesburgo,Madrid
,15:02,01:02,01:02,---,---,---,---, MAYO, Soleado,0,6,0,,False

01:04,O350,IB960,Llegando,Activa,Activa,115,Tenerife,Madrid
,22:24,01:04,---,---,---,---,---, MAYO, Soleado,1,6,0,,False
01:04,O350,IB960,Aterrizaje,Activa,Activa,115,Tenerife,Madrid
,22:24,01:04,01:04,---,---,---,---, MAYO, Soleado,0,6,0,,False

01:05,C277,FR5454,Estacionado,Activa,Activa,261,Bruselas,Madrid
,22:46,00:56,00:56,01:05,---,---,---, MAYO, Soleado,0,7,0,7,
Finger,False

01:05,C277,FR5456,Programado,Activa,Activa,263,Madrid,Tokyo
,01:43,16:13,00:56,01:05,01:43,---,---, MAYO, Soleado,0,7,0,7,
Finger,False

01:05,U996,IB702,ColaDespegues,Activa,Activa,259,Madrid,Chicago
,01:05,09:05,00:14,00:26,01:05,---,---, MAYO, Soleado,0,6,1,3,,
False

01:06,U996,IB702,Despegando,Activa,Activa,259,Madrid,Chicago
,01:05,09:05,---,00:26,01:05,01:06,00:52, MAYO, Soleado,0,6,0,, ,
False

01:06,X142,SK1510,ColaDespegues,Activa,Activa,149,Madrid,Munich
,01:05,03:45,00:07,00:16,01:05,---,---, MAYO, Soleado,0,5,1,1,,
False
```

Listing A.12: log.csv

A.3. Gráficos completos

Con el fin de representar los gráficos de manera completa y asegurar que se visualicen correctamente, en este apartado se muestran los gráficos completos

Capítulo A. Primer anexo

correspondientes a todas las iteraciones realizadas.

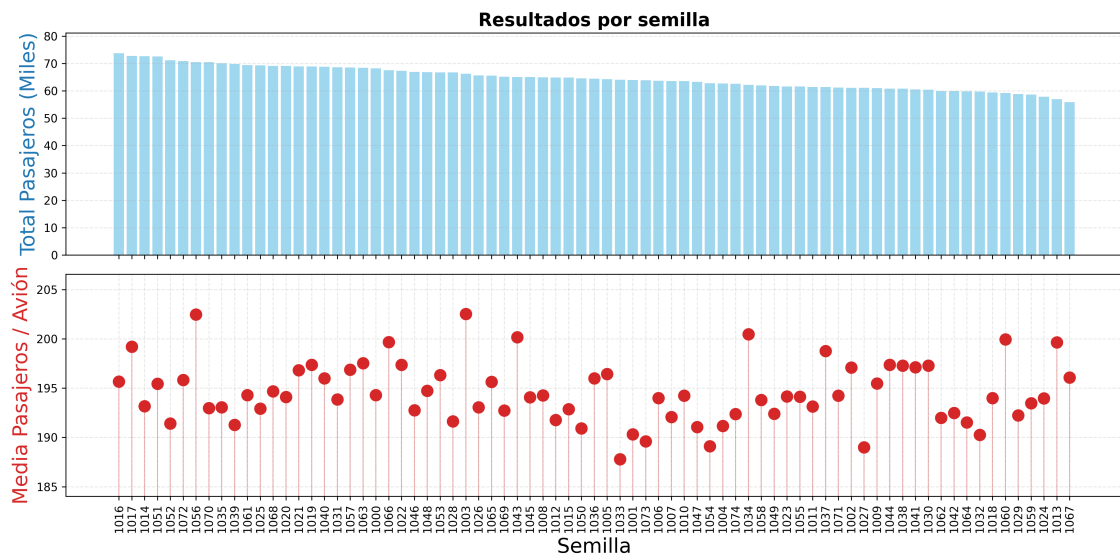


Figura A.1: Gráfica pasajeros volumen entero escenario base

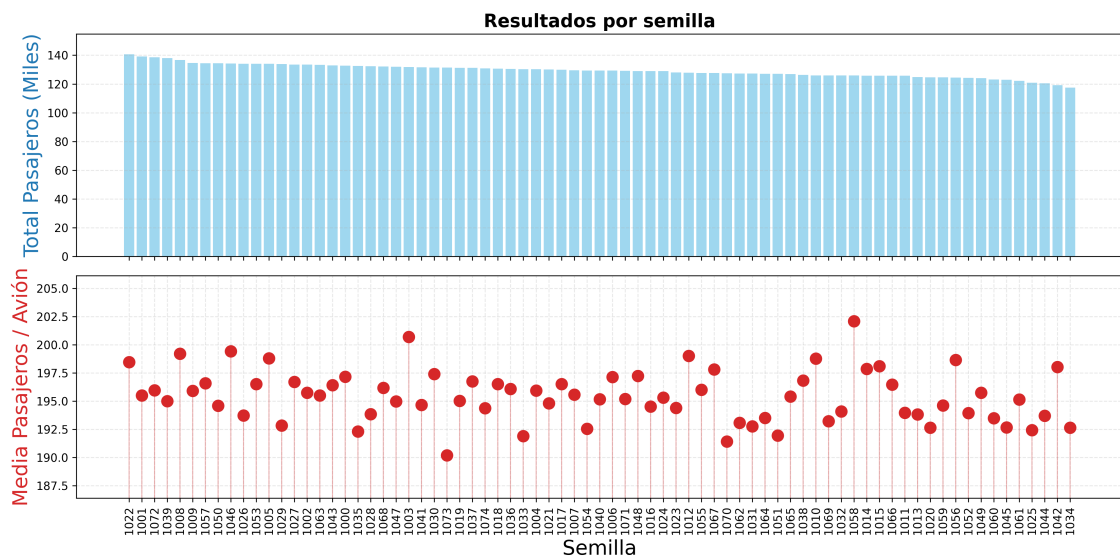


Figura A.2: Gráfica pasajeros volumen entero escenario de estrés

A.3. Gráficos completos

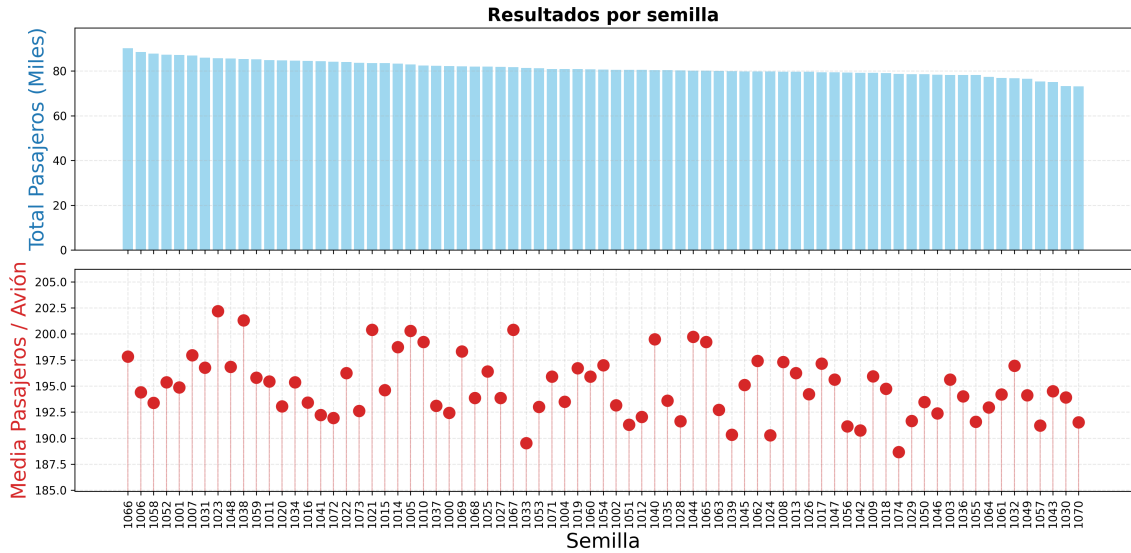


Figura A.3: Gráfica pasajeros volumen entero escenario adverso

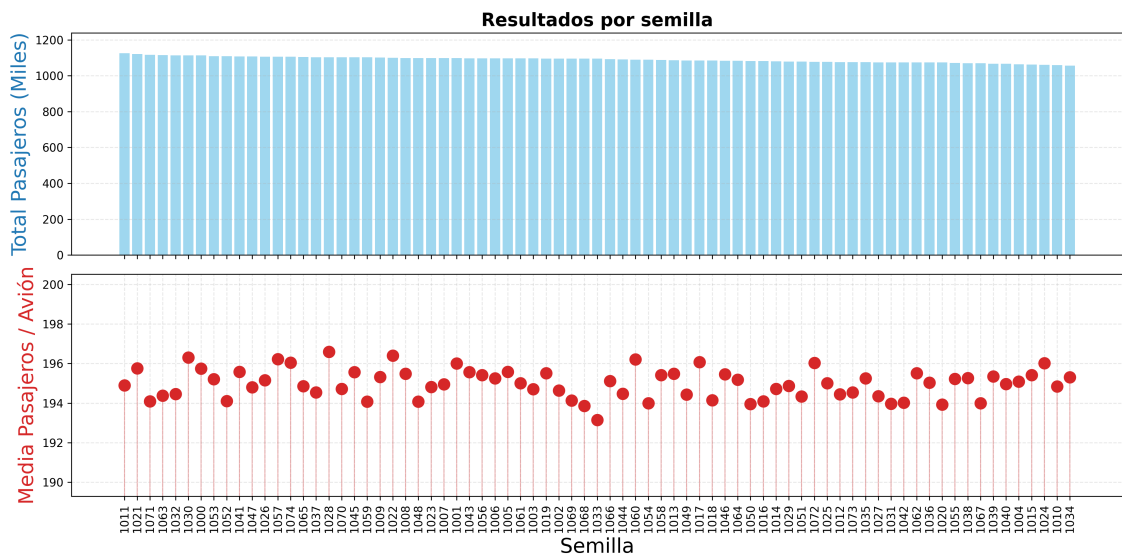



Figura A.4: Gráfica pasajeros volumen entero escenario crítico

Este documento esta firmado por



| | |
|-------------------------------|---|
| Firmante | CN=tfgm.fi.upm.es, OU=CCFI, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES |
| Fecha/Hora | Tue Jan 13 12:53:15 CET 2026 |
| Emisor del Certificado | EMAILADDRESS=camanager@etsiinf.upm.es, CN=CA ETS Ingenieros Informaticos, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES |
| Numero de Serie | 561 |
| Metodo | urn:adobe.com:Adobe.PPKLite:adbe.pkcs7.sha1 (Adobe Signature) |