

# MÉTODOS DE SIMULACIÓN

---

Simulación de Sucesos discretos. Aeropuerto

Parte 1



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID

Grupo 7

Máster Universitario en Inteligencia Artificial

Rubén González Velasco  
Ainhoa Ruiz Vitte  
Omar Teixeira González

[ruben.gonzalez.velasco@alumnos.upm.es](mailto:ruben.gonzalez.velasco@alumnos.upm.es)  
[a.rvitte@alumnos.upm.es](mailto:a.rvitte@alumnos.upm.es)  
[omar.teixeira.gonzalez@alumnos.upm.es](mailto:omar.teixeira.gonzalez@alumnos.upm.es)



Curso 2024-2025

## Índice

1	Índice de figuras .....	3
2	Índice de tablas .....	3
3	Índice de ecuaciones .....	3
4	Introducción .....	4
5	Descripción del modelo de simulación .....	4
5.1	Modelo del aeropuerto .....	4
5.2	Parámetros de simulación .....	5
5.3	Objetivos específicos de la simulación .....	5
6	Validación de distribuciones .....	6
6.1	Distribución de los tiempos de aterrizaje .....	7
6.2	Distribución de los tiempos de desembarques .....	8
7	Red de colas y eventos de la simulación .....	9
8	Implementación técnica .....	10
8.1	Distribuciones Temporales de los Eventos en el Sistema .....	11
8.2	Rutinas de la simulación .....	12
8.2.1	Aterrizajes .....	12
8.2.2	Traslados .....	13
8.2.3	Desembarques .....	14
8.2.4	Salidas .....	15
9	Resultados y Análisis .....	16
9.1	Comparación de los resultados obtenidos .....	17
9.1.1	Tiempo medio y máximo de espera (Aterrizaje) .....	17
9.1.2	Tiempo medio y máximo de espera (Despegue) .....	18
9.1.3	Porcentaje de tiempo con pistas ocupadas .....	18
9.1.4	Número medio de aviones en el aeropuerto .....	18
9.2	Análisis de las muestras de resultados .....	19
9.2.1	Primera configuración (3 pistas, 20 vehículos) .....	19
9.2.2	Segunda configuración (4 pistas, 20 vehículos) .....	21
9.2.3	Tercera configuración (3 pistas, 25 vehículos) .....	23
10	Conclusiones .....	25

## 1 Índice de figuras

<b>Ilustración 5.1.</b> Tasa de llegada de los aviones .....	4
<b>Ilustración 6.1.</b> Histograma de las muestras de los tiempos de aterrizajes .....	7
<b>Ilustración 6.2.</b> Histograma de las muestras de los tiempos de desembarques .....	8
<b>Ilustración 7.1.</b> Modelización del esquema de nodos y colas del sistema.....	9
<b>Ilustración 9.1.</b> Diagramas de cajas de las métricas de la configuración 1 .....	20
<b>Ilustración 9.2.</b> Diagramas de cajas de las métricas de la configuración 2 .....	22
<b>Ilustración 9.3.</b> Diagramas de cajas de las métricas de la configuración 3 .....	24

## 2 Índice de tablas

<b>Tabla 9.1.</b> Configuraciones de la simulaciones .....	16
<b>Tabla 9.2.</b> Resultados de las simulaciones .....	17
<b>Tabla 9.3.</b> Medias y desviaciones típicas de la configuración 1 .....	19
<b>Tabla 9.4.</b> Medias y desviaciones típicas de la configuración 2 .....	21
<b>Tabla 9.5.</b> Medias y desviaciones típicas de la configuración 3 .....	23

## 3 Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 6.1.</b> Parámetros de la distribución de aterrizajes .....	7
<b>Ecuación 6.2.</b> Parámetros de la distribución de desembarques .....	9

## 4 Introducción

Este proyecto tiene como objetivo simular el flujo de aviones en un aeropuerto, modelando las fases de llegada, aterrizaje, guiado hacia las puertas de embarque y despegue. La simulación permite obtener métricas clave, como tiempos de espera y utilización de recursos, para evaluar y optimizar la eficiencia aeroportuaria.

Gestionar el tráfico aéreo en aeropuertos de alta demanda requiere coordinar cada fase con recursos limitados. En este modelo, los aviones llegan siguiendo un proceso de Poisson no homogéneo, con una tasa de llegadas variable a lo largo del día, mientras que los tiempos para aterrizaje, guiado y despegue se modelan con distribuciones probabilísticas específicas, dando prioridad a los aterrizajes sobre los despegues, lo que añade un nivel de complejidad a la operativa.

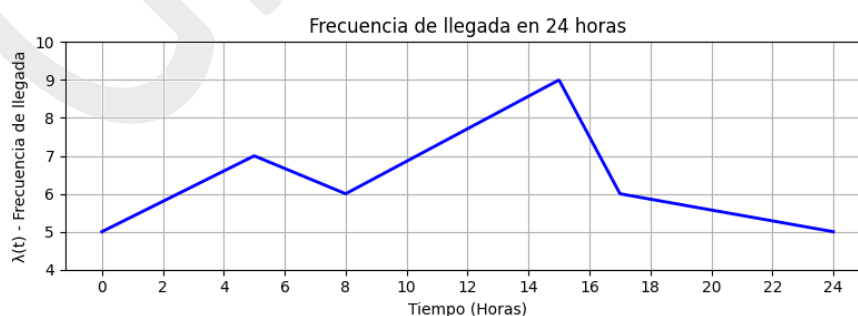
En este documento detalla el modelo de simulación y las distribuciones de tiempo de cada fase, así como los resultados obtenidos. También se analizan dos posibles mejoras: la adición de una nueva pista o el aumento del número de vehículos de guiado, evaluando su impacto en la reducción de tiempos de espera y en la capacidad del sistema para gestionar el tráfico aéreo.

## 5 Descripción del modelo de simulación

### 5.1 Modelo del aeropuerto

En el modelo de simulación, el aeropuerto se estructura como un sistema de sucesos discretos, con varias fases que representan el ciclo de operación de cada avión. Estas fases incluyen:

- **Llegada de aviones:** Los aviones llegan al aeropuerto siguiendo un proceso de Poisson no homogéneo, es decir, con una tasa de llegadas que varía según la hora del día, dicho proceso se ilustra en la **Ilustración 5.1**.



*Ilustración 5.1. Tasa de llegada de los aviones*

- **Asignación de pista:** Una vez llegán, los aviones se alinean para aterrizar, dando prioridad sobre aquellos que están en cola para despegar. Existen tres pistas que pueden utilizarse tanto para aterrizajes como para despegues.
- **Guía de vehículos:** Tras aterrizar, un vehículo guía transporta a cada avión a una puerta de embarque para el desembarque de pasajeros. Este traslado sigue una distribución exponencial y se realiza con una flota de **20 vehículos**, considerando tiempos de traslado en vacío como despreciables.
- **Terminal de embarque y desembarque:** En la terminal, el avión realiza el proceso de desembarque de pasajeros y equipaje y se prepara para embarcar nuevos pasajeros. El tiempo de permanencia en la terminal es probabilístico, y debe ajustarse a una distribución (normal, Weibull o exponencial).
- **Despegue:** Una vez en la cola de despegue, los aviones esperan hasta que haya una pista disponible. Este proceso está limitado por la capacidad de las pistas y la prioridad asignada a los aterrizajes.

## 5.2 Parámetros de simulación

Las condiciones iniciales y parámetros clave del sistema son:


- **Número de pistas:** El aeropuerto cuenta con tres pistas compartidas para aterrizajes y despegues, con prioridad para los aterrizajes.
- **Flota de vehículos guía:** Hay **20 vehículos** para el traslado de los aviones entre las pistas y las puertas de embarque. El tiempo de traslado sigue una distribución exponencial de tasa **30 aviones por hora**.
- **Puertas de embarque:** La terminal dispone de **50 puertas** para el embarque y desembarque, siendo este proceso aleatorio en duración y determinado mediante los datos proporcionados.
- **Distribución de llegadas:** Las llegadas de aviones varían a lo largo del día y siguen una distribución de Poisson no homogéneo.

## 5.3 Objetivos específicos de la simulación

Esta simulación tiene como objetivo evaluar la eficiencia operativa del aeropuerto y su capacidad para gestionar el tráfico aéreo durante un periodo de un mes. Las métricas de rendimiento que se medirán son:

- **Tiempos medios y máximos de espera** de los aviones, tanto para aterrizar como para despegar, lo que permite evaluar posibles congestiones.
- **Número medio de aviones en el aeropuerto**, que refleja la carga promedio del sistema y su capacidad para gestionar el flujo de aviones.
- **Porcentaje de tiempo de ocupación de las pistas**, lo cual da una idea de hasta qué punto las pistas se están utilizando y si se encuentran cerca de su capacidad máxima.

Además, una vez se hayan obtenido dichas métricas, se procederá a la evaluación del sistema tras la realización de una serie de cambios:

Autores	Rubén González Velasco, Ainhoa Ruiz Vitte y Omar Teixeira González	©2025
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos Universidad Politécnica de Madrid		
Métodos de Simulación (A3)		Hoja 5 de 25

- Construcción de una nueva pista de aterrizaje y/o despegue.
- Contratación de 5 vehículos guías adicionales.

Tras esto se volverán a obtener las métricas anteriormente mencionadas para evaluar si se ha mejorado el desempeño del sistema.

## 6 Validación de distribuciones

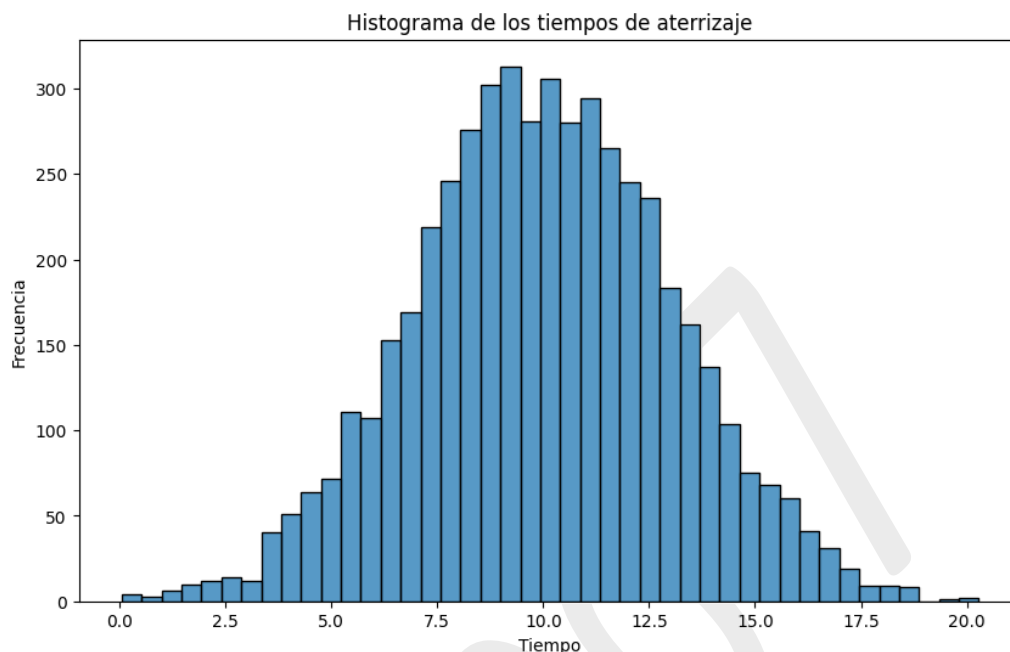
Con el objetivo de averiguar la distribución que siguen los aterrizajes y los desembarques, se estudian las muestras proporcionadas en los ficheros *aterrizajes.txt* y *desembarques.txt*.

Para ello, se han representado los histogramas de ambas muestras, como un estudio preliminar para obtener una representación visual de la distribución que se sigue. Tras esto, se ha procedido a realizar los contrastes de *Kolmogorov-Smirnov* (en adelante, K-S) para confirmar la distribución de cada muestra a estudiar.

Para validar las hipótesis sobre la distribución teórica de las muestras, se ha escogido el contraste K-S en lugar del de  $\chi^2$ , ya que el primero ofrece mayor potencia y, en el caso de distribuciones continuas como las que nos ocupan, permite contrastar la hipótesis de manera más precisa.

## 6.1 Distribución de los tiempos de aterrizaje

En primer lugar, se representa el histograma de la muestra, ilustrado en la **Ilustración 6.1**.



**Ilustración 6.1.** Histograma de las muestras de los tiempos de aterrizajes

Como se puede observar, los datos siguen una distribución normal con una media aproximada de 10, lo que permite establecer la hipótesis de que los tiempos que tardan los aviones en realizar sus maniobras siguen esta misma distribución.

A partir del histograma mostrado **anteriormente**, realizamos un contraste de *Kolmogorov-Smirnov* sobre la muestra para verificar si los tiempos de aterrizaje siguen una distribución normal.


En esta prueba de K-S para normalidad, se obtuvo un *p-valor* de 0.6541. Dado que este valor es superior al nivel de significación de 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Esto indica que existen evidencias suficientes para apoyar nuestra hipótesis inicial de que los tiempos de aterrizaje siguen una distribución normal, con un nivel de confianza del 95%.

```
Prueba KS para normalidad: p-value = 0.6541243104469792
Prueba KS para uniforme: p-value = 1.2771896112165645e-208
Prueba KS para exponencial: p-value = 0.0
Los datos siguen una distribución normal
Media (mu) = 10.007615178514001, Desviación estándar (sigma) = 3.0377002745229005
```

Además, el análisis nos proporciona los parámetros estimados de la distribución, mostrados en la **Ecuación 6.1** :

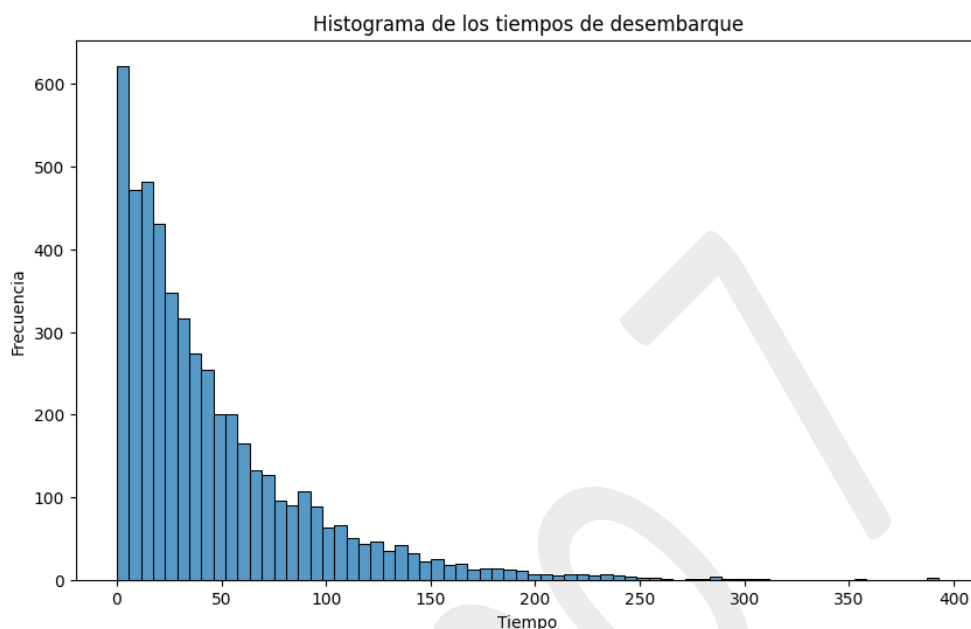
$$N(\mu = 10.007615, \sigma = 3.0377002)$$

**Ecuación 6.1.** Parámetros de la distribución de aterrizajes

Autores	Rubén González Velasco, Ainhoa Ruiz Vitte y Omar Teixeira González	©2025
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos Universidad Politécnica de Madrid		
Métodos de Simulación (A3)		Hoja 7 de 25

## 6.2 Distribución de los tiempos de desembarques

Comenzando con la representación del histograma de la muestra de desembarques, se genera la **Ilustración 6.2**.



**Ilustración 6.2.** Histograma de las muestras de los tiempos de desembarques

En dicho histograma, se puede observar que la muestra sigue una distribución exponencial. Se procede a comprobar su validez mediante la realización de un contraste K-S utilizando dicha hipótesis.


Los resultados obtenidos muestran un p-valor de 0.7397, que es superior al umbral de significación de 0.05. Esto indica que no se rechaza la hipótesis nula, permitiendo concluir, con un nivel de significación del 5%, que hay evidencias suficientes para considerar que los tiempos de desembarque siguen una distribución exponencial.

Además, el parámetro de forma obtenido en el contraste de Weibull es cercano a 1, lo cual refuerza esta conclusión.

```
Prueba KS para normalidad: p-value = 7.2563433161876315e-112
Prueba KS para Weibull: p-value = 0.8973065847205665
Parámetro shape de Weibull: 0.9897877896220677
La distribución Weibull tiene un shape cercano a 1, lo que sugiere una exponencial.
Prueba KS para exponencial: p-value = 0.739725165931107
Parámetro loc de la exponencial: 0.006979736

Los datos siguen una distribución exponencial
Parámetro de tasa (lambda) = 0.10044207713520997 (es el inverso de la media), Parámetro de escala
(theta) = 45.894205510651204
```

La distribución exponencial identificada tiene como parámetros los ilustrados en la **Ecuación 6.2**.

Autores	Rubén González Velasco, Ainhoa Ruiz Vitte y Omar Teixeira González	©2025
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos Universidad Politécnica de Madrid		
Métodos de Simulación (A3)		



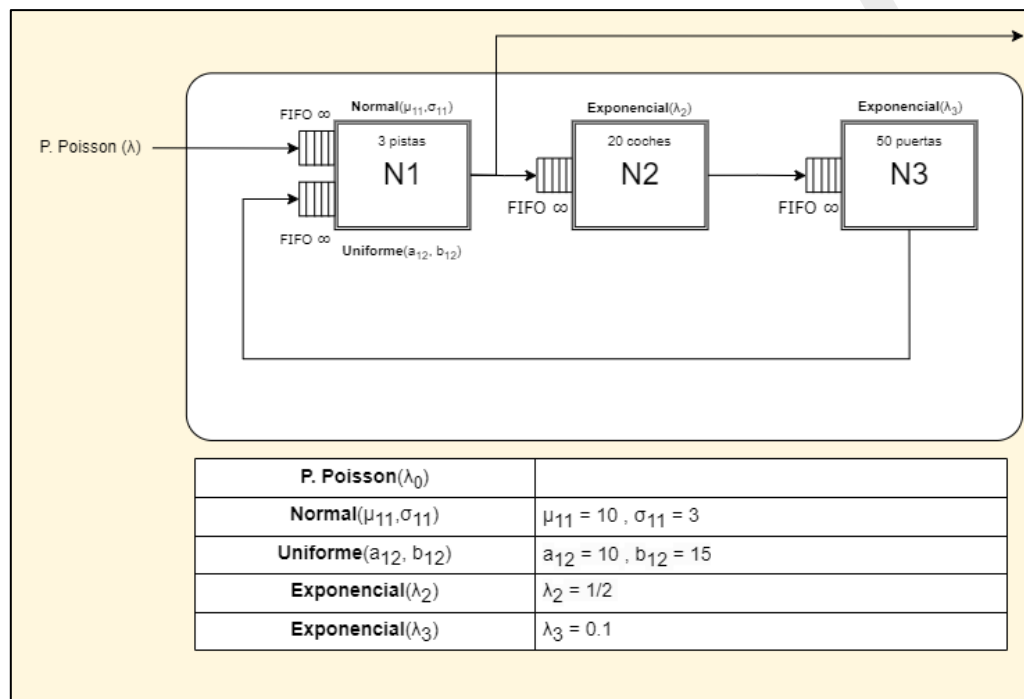
$$\exp(\lambda = 0.100442, \theta = 45.894205)$$

**Ecuación 6.2.** Parámetros de la distribución de desembarques

## 7 Red de colas y eventos de la simulación

En este trabajo, el aeropuerto se modela mediante una simulación de eventos discretos utilizando una estructura de red de colas, ideal para representar un sistema de espera complejo. La simulación del flujo de aviones se organiza en una serie de nodos, donde cada nodo representa un punto en el que se proporciona un servicio específico a los aviones, que actúan como "clientes" dentro de esta red.

Cada nodo tiene un tiempo de espera asociado, el cual varía según el tipo de servicio que se ofrece y el estado actual de la cola en dicho nodo. Durante la simulación, los eventos avanzan el tiempo del sistema, desde un punto inicial teórico hasta eventos específicos que definen las distintas fases del flujo de aviones. Estos eventos corresponden a las etapas del proceso descrito y permiten la entrada de los aviones en cada nodo.



**Ilustración 7.1.** Modelización del esquema de nodos y colas del sistema

El modelo de la red de colas se organiza en tres nodos principales (ver **Ilustración 7.1**). El proceso comienza con la llegada del avión al aeropuerto, que ingresa por el nodo 1 y sigue su recorrido hasta el nodo 3.

Según los servicios ofrecidos y la estructura del aeropuerto, los nodos se detallan a continuación:

**1. N1: Pistas de aterrizaje/despegue.**

- 1.1. Este nodo gestiona tanto la entrada como la salida de los aviones al sistema. Al ser un punto de entrada y salida, requiere un tiempo de servicio tanto para los aterrizajes como para los despegues. Cabe mencionar que los aviones que llegan al aeropuerto tienen prioridad sobre aquellos que esperan para despegar.
- 1.2. Este nodo incluye dos colas separadas:
  - 1.2.1. Una para los aviones que esperan aterrizar.
  - 1.2.2. Otra para aquellos que esperan despegar.

Aunque conceptualmente es un único nodo, la implementación separa estas colas para facilitar la gestión.

**2. N2: Guiado de aviones.**

- 2.1. En este nodo, los aviones que han aterrizado reciben el servicio de guiado proporcionado por vehículos, que los trasladan desde la pista hasta una puerta de embarque. Este proceso comienza tras la finalización de la maniobra de aterrizaje en el Nodo 1 y continúa hasta que el avión alcanza una puerta libre en el Nodo 3.
- 2.2. Aquí, los aviones forman una cola única y esperan en caso de que no haya vehículos guía disponibles.


**3. N3: Terminal de embarque y desembarque.**

- 3.1. Este nodo corresponde a la fase en la que el avión desembarca pasajeros y equipaje, embarca nuevos pasajeros y se prepara para dirigirse a la zona de despegue. Una vez completado este proceso, el avión entra en la cola de despegue en el Nodo 1 para salir del sistema.
- 3.2. Este nodo también tiene una única cola en la que los aviones deben esperar si no hay puertas de embarque disponibles.

## 8 Implementación técnica

Con el sistema ya modelado se procede a la implementación de éste con el objetivo de realizar la simulación. Para ello, se requieren los tiempos de servicio, mediante los cuales se representan los procesos que un avión realiza en cada nodo tras esperar en la cola, realizar su tarea y salir hacia la cola de otro nodo o del sistema.

A continuación, se detalla la simulación de estos tiempos para la obtención de valores realistas según el modelo del aeropuerto.

Autores	Rubén González Velasco, Ainhoa Ruiz Vitte y Omar Teixeira González	©2025
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos Universidad Politécnica de Madrid		
Métodos de Simulación (A3)		Hoja 10 de 25

## 8.1 Distribuciones Temporales de los Eventos en el Sistema

Como se ha explicado en secciones anteriores, se han identificado una serie de distribuciones presentes en el sistema, concretamente 5, correspondientes a la llegada, aterrizaje, guiado, desembarque y despegue de los aviones.

Dichas distribuciones han sido obtenidas mediante el análisis estadístico de los ficheros aportados (como ha sido explicado en la sección 6 para los aterrizajes y despegues) o mediante la propia mención en el enunciado del problema. De esta manera:

### 1. Llegadas.

Siguen una distribución de Poisson no homogénea, con una tasa de llegada variable a lo largo del día, ajustada para captar la variabilidad del tráfico aéreo (ver **Ilustración 5.1**).

### 2. Aterrizajes.

Se ajustan a una distribución normal con una media de  $\mu = 10.007615$  y una desviación estándar de  $\sigma = 3.0377002$ . Esta distribución permite representar el tiempo promedio de aterrizaje con una ligera variabilidad alrededor de este valor central.

### 3. Traslados.

Los tiempos de guiado, que representan el traslado de los aviones desde la pista hasta la puerta de embarque mediante un vehículo guía, siguen una distribución exponencial con una tasa de 2 aviones por minuto, modelando así el tiempo medio de servicio por vehículo.

### 4. Desembarques.

El tiempo de desembarque sigue una distribución exponencial con una tasa de  $\lambda = 0.100442$ , equivalente a un tiempo medio de desembarque de 45.89 minutos.

### 5. Salidas.

Los tiempos de despegue se modelan mediante una distribución uniforme, con valores entre 10 y 15 minutos. Esta distribución refleja la relativa constancia en el tiempo requerido para que un avión complete su maniobra de despegue.

## 8.2 Rutinas de la simulación

### 8.2.1 Aterrizajes

La rutina de aterrizaje se activa cada vez que un avión inicia su maniobra de aterrizaje en el sistema. Su función es gestionar tanto el proceso de ocupación de pistas como la administración de tiempos y colas de espera para los aviones que necesitan aterrizar. La rutina emplea variables globales que registran el estado del sistema, como el número de pistas ocupadas, el número de aviones esperando a aterrizar o el tiempo de simulación actual.

En detalle, la rutina de aterrizaje sigue los siguientes pasos:

#### 1. Actualización de Estados y Contadores:

- Se actualiza el número medio de clientes en cada estado multiplicando el tiempo transcurrido por el número de aviones en cada nodo.
- Si hay una pista libre (número de pistas ocupadas es menor que el total disponible), el avión procede a aterrizar.

#### 2. Ocupación de una Pista y Asignación de Tiempo de Maniobra:

- En caso de que haya una pista disponible, el avión ocupa la pista. Se incrementa el contador de aviones en el *nodo 1* y se registra la llegada del avión en la lista de llegadas.
- Se calcula el tiempo de aterrizaje y se actualiza el instante en que finaliza la maniobra en la lista de sucesos.

#### 3. Gestión de Aviones en Espera:

Si todas las pistas están ocupadas, el avión es añadido a una cola de espera, incrementando el contador de aviones esperando a aterrizar. Esto permite gestionar la prioridad y orden de aterrizaje en función de la disponibilidad de pistas.

#### 4. Generación de la Próxima Llegada:

- Se calcula el tiempo de la siguiente llegada. Si la próxima llegada ocurre dentro del tiempo límite de simulación, se programa su llegada; de lo contrario, el sistema no genera más llegadas, y se alcanza el horizonte de simulación.
- Esta rutina es crucial para mantener el flujo de aviones en el sistema y garantizar que la asignación de pistas y tiempos de espera se ajusten a la disponibilidad y prioridad de llegada de los aviones.

## 8.2.2 Traslados

Esta rutina gestiona el traslado de los aviones desde la pista de aterrizaje hacia el siguiente nodo en el sistema, una vez han aterrizado y completado su maniobra de llegada. Su propósito es organizar la asignación de coches guía y la administración de colas de espera para los aviones que necesitan ser trasladados a las puertas de desembarque.

Los pasos clave de la rutina son los siguientes:

### 1. Actualización del Estado y Tiempo de Simulación:

- Se actualiza el número medio de aviones en cada nodo, multiplicando el tiempo transcurrido por el número de aviones presentes en cada estado.
- También se ajusta el tiempo de simulación al instante actual en el que se está procesando el traslado.

### 2. Asignación de Coches para el Traslado:

- Si hay coches guía disponibles, el avión en cuestión ocupa un coche y se traslada al *nodo* 2. El tiempo de traslado se genera y se registra en la lista de eventos el momento en que finalizará el traslado.
- Si no hay coches disponibles, el avión se añade a una cola de espera para traslado, incrementando el contador de aviones esperando un coche.

### 3. Atención a la Cola de Aterrizaje:

- Si hay aviones en la cola de aterrizaje y pistas disponibles, se procesa la llegada del siguiente avión de la cola, generando su tiempo de aterrizaje y registrando el momento en que finalizará su maniobra.
- En caso de que no haya aviones en la cola de aterrizaje, la rutina atiende la cola de despegue.

### 4. Gestión de la Cola de Despegue:

- Si hay aviones esperando para despegar, se da salida al siguiente avión en la cola, generando su tiempo de despegue y actualizando la lista de eventos con el instante en que completará el despegue.

### 8.2.3 Desembarques

Esta rutina gestiona el proceso de desembarque de los aviones que han completado su servicio en el *nodo 3* y esperan para proceder al despegue o dejar el sistema. Es responsable de manejar la disponibilidad de puertas de desembarque y de pistas, además de administrar las colas de espera para estos recursos en caso de que estén ocupados.

La rutina realiza las siguientes acciones:

1. **Actualización del Estado y Tiempo de Simulación:**

- Calcula el número medio de aviones en cada nodo, multiplicando el tiempo transcurrido por la cantidad de aviones presentes en cada estado.
- Ajusta el tiempo de simulación al instante actual en el que se realiza el desembarque.

2. **Liberación de Puerta y Preparación para Despegue:**

- Cuando un avión sale del *nodo 3*, se libera una puerta de embarque para ser utilizada por otro avión en espera.
- Si hay pistas libres, el avión es dirigido hacia el nodo de despegue (*nodo 1*), ocupando una pista y generando el tiempo de despegue. Este tiempo es registrado en la lista de eventos con el instante en que finalizará la maniobra de despegue.
- Si no hay pistas libres, el avión es añadido a una cola de espera para despegue, incrementando el contador de aviones esperando una pista.

3. **Gestión de la Cola en el Nodo Anterior (Nodo 3):**

Si hay aviones esperando en la cola del *nodo 3*, se da entrada al siguiente avión de la cola a una puerta de embarque, liberando un puesto en la cola de espera y generando el tiempo de desembarque. Este tiempo se añade a la lista de eventos indicando el instante en que finalizará el proceso de desembarque.

## 8.2.4 Salidas

Esta rutina maneja la salida de los aviones que completan su servicio en el sistema. Una vez que un avión está listo para dejar el sistema, se libera la pista que estaba ocupando, permitiendo que otros aviones en espera puedan avanzar en el proceso de aterrizaje o despegue, según la disponibilidad de recursos y las prioridades establecidas.

La rutina sigue estos pasos clave:

### 1. Actualización del Estado y Tiempo de Simulación:

- Se calcula el número medio de aviones en cada nodo multiplicando el tiempo transcurrido por el número de aviones en cada estado.
- El tiempo de simulación se ajusta al instante actual para reflejar el momento en que ocurre la salida del sistema.

### 2. Liberación de la Pista:

- Al salir un avión del *nodo 1*, se libera una pista, reduciendo el contador de pistas ocupadas.
- Se imprime el estado actual si events está activado, mostrando el número de pistas ocupadas y el estado de las colas de espera.

### 3. Gestión de la Cola de Aterrizaje:

- Si hay aviones en la cola de aterrizaje, se programa el siguiente aterrizaje generando un tiempo de llegada y registrándolo en la lista de eventos.
- Los contadores se actualizan, liberando un puesto en la cola de aterrizaje y ocupando la pista liberada por el avión que acaba de salir.

### 4. Gestión de la Cola de Despegue:

- En caso de que no haya aviones esperando para aterrizar, se verifica si hay aviones en la cola de despegue.
- Si hay aviones en espera para despegar, el avión ocupa la pista y se genera su tiempo de despegue, el cual se registra en la lista de eventos.
- Este proceso garantiza que los aviones que esperan para despegar puedan utilizar las pistas cuando no hay aviones en cola de aterrizaje, manteniendo la fluidez del sistema.

## 9 Resultados y Análisis

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos para las diversas configuraciones de las simulaciones, mostradas en la **Tabla 9.1**.

	SIMULACIÓN		
	1	2	3
Número de pistas	3	4	3
Número de vehículos	20	20	25
Número de puertas	50	50	50

*Tabla 9.1. Configuraciones de la simulaciones*

Con esto en mente, el análisis de estos resultados se divide en 2 secciones, donde se ha realizado un estudio de la simulación desde dos puntos de vista. En primer lugar, una comparación de los resultados obtenidos tras la ejecución de una simulación y, en segundo lugar, un análisis de las muestras de resultados obtenidos tras mil ejecuciones de cada configuración.



## 9.1 Comparación de los resultados obtenidos

Estos resultados se ilustran en la **Tabla 9.2** (todos los tiempos mostrados están en minutos).

	RESULTADOS		
	1	2	3
Tiempo medio de espera (Aterrizaje)	12.98	7.88	12.50
Tiempo máximo de espera (Aterrizaje)	80.38	63.90	118.58
Tiempo medio de espera (Despegue)	20221.60	5801.02	19873.19
Tiempo máximo de espera (Despegue)	26426.26	10321.22	26426.99
Porcentaje de tiempo con pistas ocupadas	99.96%	99.97 %	99.96%
Número medio de aviones en el aeropuerto	2702.03	1038.82	2651.46
Número medio de aviones en cola de aterrizaje	1.73	1.40	1.66
Número medio de aviones en cola de despegue	2694.73	1029.85	2644.24
Número total de aviones	8724	8870	8737
Número máximo de coches ocupados a la vez	4	4	4
Tiempo total de la simulación	65458.42	49946.85	65641.72

**Tabla 9.2.** Resultados de las simulaciones


En las siguiente subsecciones se hará un análisis sobre los resultados obtenidos para cada simulación.

### 9.1.1 Tiempo medio y máximo de espera (Aterrizaje)

La *Simulación 2*, con un tiempo medio de espera de 7.88 minutos y un máximo de 63.90 minutos, ofrece los mejores resultados, lo que significa que los aviones esperan menos tiempo para aterrizar en esta configuración, probablemente debido a una mayor disponibilidad o eficiencia en el uso de las pistas.

Por otro lado, la *Simulación 1* tiene un tiempo de espera medio de 12.98 minutos y un máximo de 80.38 minutos, indicando que, aunque es aceptable, el sistema se congestiona un poco más.

Y por último, la *Simulación 3*, aunque reduce el tiempo medio de espera a 12.50 minutos, presenta el mayor tiempo máximo de espera con 118.58 minutos, lo que sugiere que en ciertos momentos se generan acumulaciones en la cola de aterrizaje.

Autores	Rubén González Velasco, Ainhoa Ruiz Vitte y Omar Teixeira González	©2025
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos Universidad Politécnica de Madrid		
Métodos de Simulación (A3)		Hoja 17 de 25

### 9.1.2 Tiempo medio y máximo de espera (Despegue)

En los tiempos de espera para despegue, la *Simulación 2* destaca de manera significativa, reduciendo el tiempo medio de espera a 5801.02 minutos y el máximo a 10321.22 minutos. Esto representa una mejora enorme en comparación con la *Simulación 1* (20221.60 de espera media y 26426.26 de máxima) y la *Simulación 3* (19873.19 de espera media y 26426.99 de máxima), donde los tiempos son mucho más elevados.

La menor espera en la *Simulación 2* indica que en esta configuración los recursos están mejor distribuidos o la cola de despegue se gestiona de manera más eficiente, evitando los grandes retrasos observados en las otras simulaciones, donde muestran una acumulación importante en el nodo de despegue, lo que sugiere un cuello de botella en el uso de las pistas para esta fase.

### 9.1.3 Porcentaje de tiempo con pistas ocupadas

El porcentaje de tiempo en el que las pistas están ocupadas sigue siendo extremadamente alto en todas las simulaciones, rondando el 100%. La *Simulación 2* tiene una ligera reducción al 99.97%, mientras que las Simulaciones 1 y 3 están al 99.96%. Aunque esta diferencia es mínima, sugiere que la *Simulación 2* consigue un uso ligeramente más balanceado de las pistas, pero en general, todas las configuraciones muestran que las pistas están operando al límite. Esto implica que el sistema está en constante uso y cualquier aumento en la demanda podría llevar a una saturación completa, generando aún más acumulaciones y tiempos de espera.

### 9.1.4 Número medio de aviones en el aeropuerto

El número promedio de aviones presentes en el aeropuerto también varía significativamente. La *Simulación 2* muestra una reducción notable con un promedio de 1038.82 aviones en el aeropuerto, en comparación con los 2702.03 de la *Simulación 1* y los 2651.46 de la *Simulación 3*.

Esto indica que en la *Simulación 2* el flujo de aviones es más eficiente, evitando acumulaciones y permitiendo que los aviones fluyan a través de los nodos sin esperar en exceso, mientras que en el resto, el número alto de aviones en el aeropuerto sugiere que el sistema se congestiona, posiblemente debido a un insuficiente manejo de los tiempos de espera y la distribución de los recursos en momentos de alta demanda.

## 9.2 Análisis de las muestras de resultados

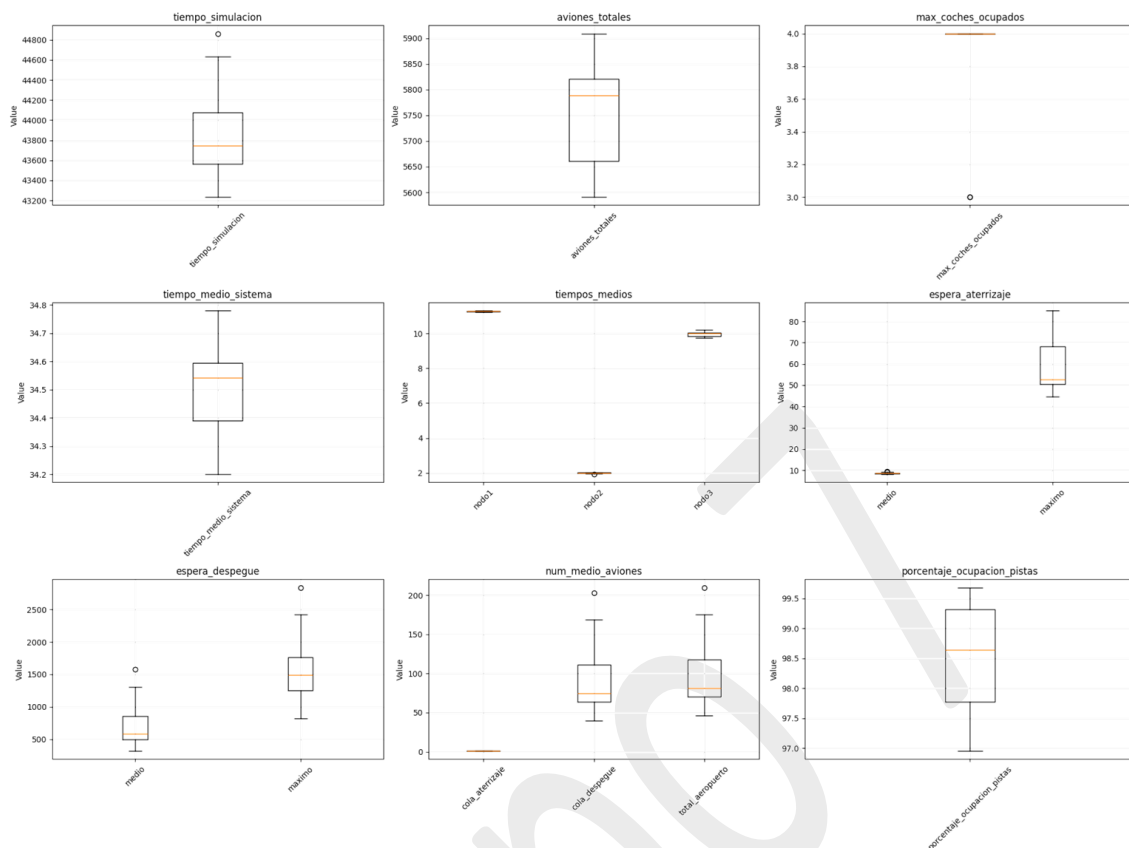
En la presente sección se ilustran las medias y desviaciones típicas obtenidas tras la ejecución de 1000 simulaciones en cada configuración, junto con sus respectivos diagramas de cajas y bigotes a modo complementario.

### 9.2.1 Primera configuración (3 pistas, 20 vehículos)

Las medias y desviaciones típicas se muestran en la **Tabla 9.3**, mientras que los diagramas correspondientes se ilustran en la **Ilustración 9.1**.

	Media	Desviación típica
Tiempo medio de espera (Aterrizaje)	8.73	0.29
Tiempo máximo de espera (Aterrizaje)	58.12	11.11
Tiempo medio de espera (Despegue)	719.83	341.82
Tiempo máximo de espera (Despegue)	1581.31	552.15
Porcentaje de tiempo con pistas ocupadas	98.60	0.84
Número medio de aviones en el aeropuerto	100.05	45.00
Número medio de aviones en cola de aterrizaje	1.13	0.05
Número medio de aviones en cola de despegue	93.39	44.95
Número total de aviones	5759.95	92.88
Número máximo de coches ocupados	3.90	0.30
Tiempo medio del sistema	34.49	0.15
Tiempo medio Nodo 1	11.26	0.02
Tiempo medio Nodo 2	2.00	0.03
Tiempo medio Nodo 3	9.96	0.14
Tiempo de simulación	43855.67	435.58

**Tabla 9.3.** Medias y desviaciones típicas de la configuración 1



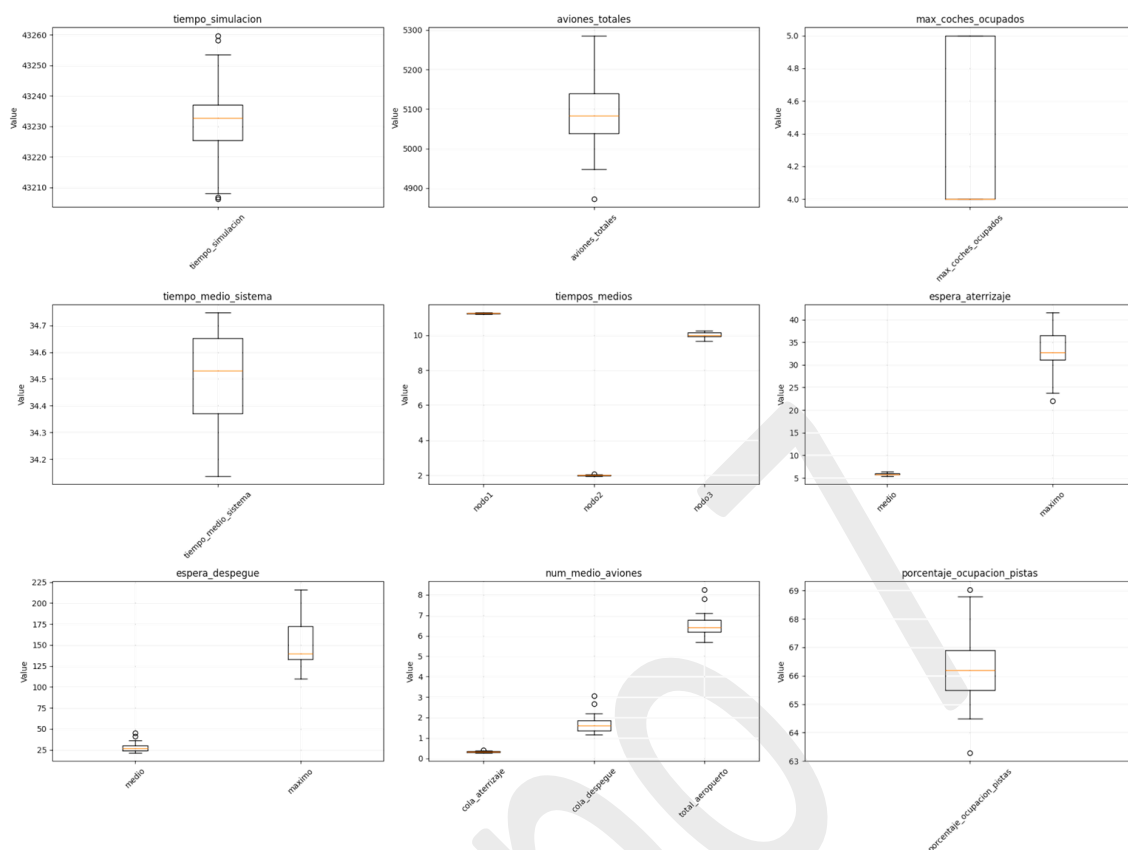
**Ilustración 9.1.** Diagramas de cajas de las métricas de la configuración 1

### 9.2.2 Segunda configuración (4 pistas, 20 vehículos)

Las medias y desviaciones estándar se presentan en la **Tabla 9.4**, y los gráficos correspondientes se pueden ver en la **Ilustración 9.2**.

	Media	Desviación típica
Tiempo medio de espera (Aterrizaje)	5.88	0.22
Tiempo máximo de espera (Aterrizaje)	33.26	5.25
Tiempo medio de espera (Despegue)	28.74	6.21
Tiempo máximo de espera (Despegue)	150.59	28.98
Porcentaje de tiempo con pistas ocupadas	66.35	1.39
Número medio de aviones en el aeropuerto	6.55	0.61
Número medio de aviones en cola de aterrizaje	0.33	0.03
Número medio de aviones en cola de despegue	1.69	0.48
Número total de aviones	5098.60	105.08
Número máximo de coches ocupados	4.30	0.46
Tiempo medio del sistema	34.51	0.19
Tiempo medio Nodo 1	11.25	0.02
Tiempo medio Nodo 2	2.00	0.03
Tiempo medio Nodo 3	10.01	0.17
Tiempo de simulación	43855.67	435.58

**Tabla 9.4.** Medias y desviaciones típicas de la configuración 2



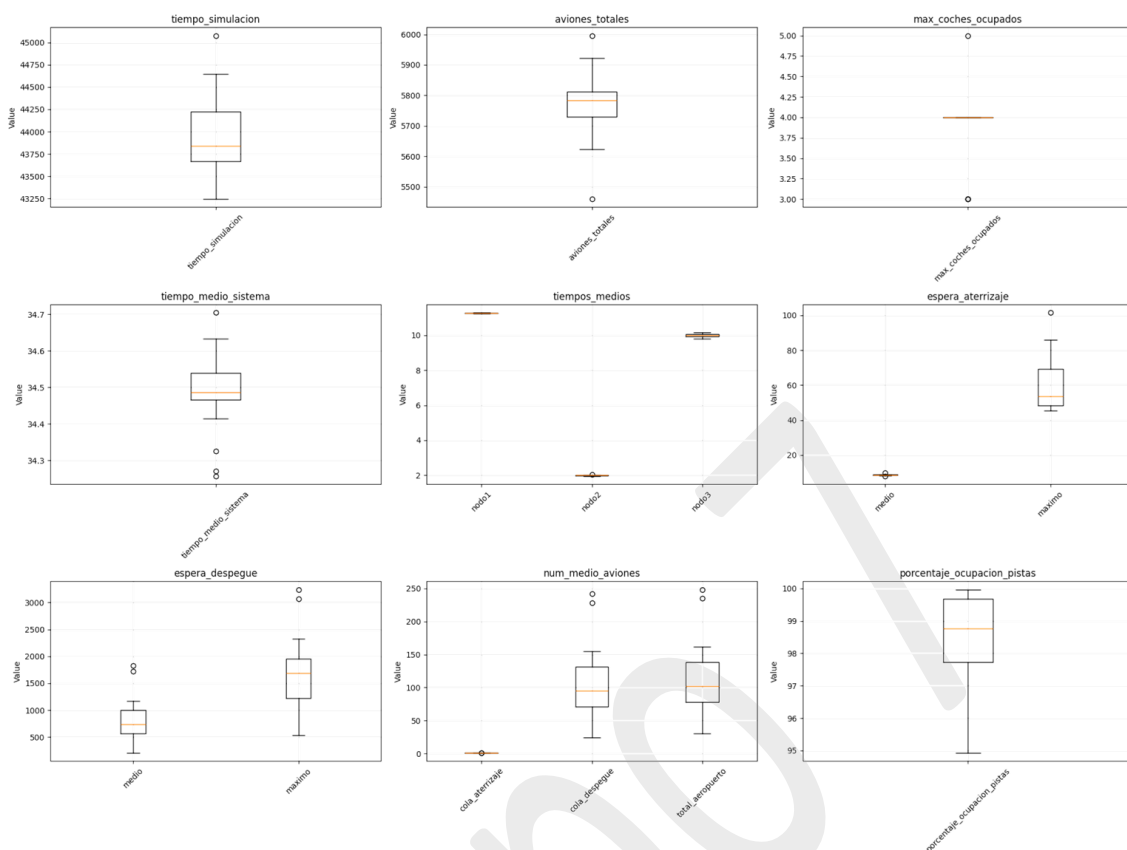
**Ilustración 9.2.** Diagramas de cajas de las métricas de la configuración 2

### 9.2.3 Tercera configuración (3 pistas, 25 vehículos)

En la **Tabla 9.5** se muestran las medias y las desviaciones típicas, mientras que los gráficos relacionados están ilustrados en la **Ilustración 9.3**.

	Media	Desviación típica
Tiempo medio de espera (Aterrizaje)	8.73	0.33
Tiempo máximo de espera (Aterrizaje)	59.75	15.10
Tiempo medio de espera (Despegue)	822.40	400.76
Tiempo máximo de espera (Despegue)	1706.53	643.84
Porcentaje de tiempo con pistas ocupadas	98.52	1.33
Número medio de aviones en el aeropuerto	113.86	54.07
Número medio de aviones en cola de aterrizaje	1.12	0.07
Número medio de aviones en cola de despegue	107.21	53.96
Número total de aviones	5770.10	113.23
Número máximo de coches ocupados	3.90	0.44
Tiempo medio del sistema	34.39	0.11
Tiempo medio Nodo 1	11.26	0.02
Tiempo medio Nodo 2	2.00	0.02
Tiempo medio Nodo 3	9.98	0.09
Tiempo de simulación	43945.25	446.14

**Tabla 9.5.** Medias y desviaciones típicas de la configuración 3



**Ilustración 9.3.** Diagramas de cajas de las métricas de la configuración 3



## 10 Conclusiones

Con este análisis, se ha comprobado y demostrado que la configuración de la *Simulación 2* es la más eficiente en términos de reducción de tiempos de espera, tanto para aterrizaje como para despegue, puesto que esta configuración logra tiempos de espera significativamente menores en comparación con las otras simulaciones, mostrando una evidente mejor distribución de recursos y una menor congestión en momentos clave. Por el contrario, las *Simulaciones 1 y 3* presentan mayores tiempos de espera, sugiriendo que el sistema tiende a saturarse en estas configuraciones.

Además, aunque todas las simulaciones mantienen las pistas ocupadas prácticamente todo el tiempo, la *Simulación 2* muestra una ligera mejora en el uso de las pistas, lo que refleja una operación algo más equilibrada. Sin embargo, la alta ocupación en todas las configuraciones sugiere que el sistema está al límite de su capacidad, y cualquier aumento en la demanda podría provocar aún más acumulaciones y tiempos de espera elevados.

Por último, observamos que el número promedio de aviones en el aeropuerto es considerablemente menor en la *Simulación 2*, lo cual indica un flujo más eficiente y menor congestión en los distintos nodos del sistema. Las *Simulaciones 1 y 3*, por otro lado, muestran una acumulación mayor de aviones, evidenciando una falta de capacidad para manejar eficazmente el tráfico aéreo en esas configuraciones. En resumen, los resultados sugieren que aumentar la capacidad de pistas y optimizar la gestión del sistema serían pasos efectivos para mejorar la eficiencia aeroportuaria y reducir los tiempos de espera.