Interfaz de usuario gráfica, Aplicación

Descripción generada automáticamente

MÉTODOS DE SIMULACIÓN

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Rubén González Velasco | [ruben.gonzalez.velasco@alumnos.upm.es](mailto:ruben.gonzalez.velasco@alumnos.upm.es) |  |
| Ainhoa Ruiz Vitte | [a.rvitte@alumnos.upm.es](mailto:a.rvitte@alumnos.upm.es) |  |
| Omar Teixeira González | [omar.teixeira.gonzalez@alumnos.upm.es](mailto:omar.teixeira.gonzalez@alumnos.upm.es) |  |

Simulación de Sucesos discretos. Aeropuerto

Curso 2024-2025

Parte 1

Grupo 7

Máster Universitario en Inteligencia Artificial

Indice

[1 Indice de figuras 3](#_Toc181318055)

[2 Indice de ecuaciones 3](#_Toc181318056)

[3 Indice de pseudocódigos 3](#_Toc181318057)

[4 Introducción 4](#_Toc181318058)

[5 Descripción del modelo de simulación 4](#_Toc181318059)

[5.1 Modelo del aeropuerto 4](#_Toc181318060)

[5.2 Parámetros de simulación 5](#_Toc181318061)

[5.3 Objetivos específicos de la simulación 5](#_Toc181318062)

[6 Validación de distribuciones 6](#_Toc181318063)

[6.1 Distribución de los tiempos de aterrizaje 7](#_Toc181318064)

[6.2 Distribución de los tiempos de desembarques 8](#_Toc181318065)

[7 Red de colas y eventos de la simulación 9](#_Toc181318066)

[8 Implementación técnica 10](#_Toc181318067)

[8.1 Distribuciones Temporales de los Eventos en el Sistema 11](#_Toc181318068)

[8.2 Rutinas de la simulación 12](#_Toc181318069)

[9 Resultados y Análisis 12](#_Toc181318070)

[10 Discusión y conclusiones 12](#_Toc181318071)

[11 Referencias 12](#_Toc181318072)

# Indice de figuras

[**Ilustración 5.1.** Tasa de llegada de los aviones 4](#_Toc181318051)

[**Ilustración 6.1.** Histograma de las muestras de los tiempos de aterrizajes 7](#_Toc181318052)

[**Ilustración 6.2.** Histograma de las muestras de los tiempos de desembarques 8](#_Toc181318053)

[**Ilustración 7.1.** Modelización del esquema de nodos y colas del sistema 9](#_Toc181318054)

# Indice de ecuaciones

[**Ecuación 6.1.** Parámetros de la distribución de aterrizajes 7](#_Toc181318775)

[**Ecuación 6.2.** Parámetros de la distribución de desembarques 9](#_Toc181318776)

# Indice de pseudocódigos

[**Pseudocódigo 8.1.** Método principal de la simulación 11](#_Toc181318769)

[**Pseudocódigo 8.2.** Método de la rutina de llegadas 12](#_Toc181318770)

[**Pseudocódigo 8.3.** Método de la rutina de aterrizajes 12](#_Toc181318771)

[**Pseudocódigo 8.4.** Método de la rutina de traslados 12](#_Toc181318772)

[**Pseudocódigo 8.5.** Método de la rutina de desembarques 13](#_Toc181318773)

[**Pseudocódigo 8.6.** Método de la rutina de salidas 13](#_Toc181318774)

# 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.

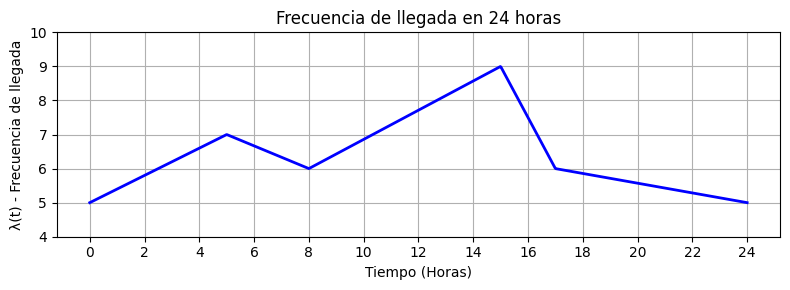
En este documento detalla el modelo de simulación y las distribuciones de tiempo de cada fase, así como los resultados obtenidos. También se analizan dos posibles mejoras: la adición de una nueva pista o el aumento del número de vehículos de guiado, evaluando su impacto en la reducción de tiempos de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

# Descripción del modelo de simulación

## 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 4.1.**



**Ilustración 5.1.** Tasa de llegada de los aviones

* **Asignación de pista:** Una vez llegan, 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.

## 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.

## 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:

* 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.

# 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 χ², 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.

## Distribución de los tiempos de aterrizaje

En primer lugar, se representa el histograma de la muestra, ilustrado en la **Ilustración 5.1**.

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

**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 5.1** :

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

## Distribución de los tiempos de desembarques

Comenzando con la representación del histograma de la muestra de desembarques, se genera la **Ilustración 5.2**.

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

**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 5.2**.

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

# 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.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

**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 6.1**). 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. 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.
   2. Este nodo incluye dos colas separadas:
      1. Una para los aviones que esperan aterrizar.
      2. Otra para aquellos que esperan despegar.

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

1. **N2: Guiado de aviones.**
   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. Aquí, los aviones forman una cola única y esperan en caso de que no haya vehículos guía disponibles.
2. **N3: Terminal de embarque y desembarque.**
   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.
   2. Este nodo también tiene una única cola en la que los aviones deben esperar si no hay puertas de embarque disponibles.

# 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.

## 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 5 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 4.1**).

1. **Aterrizajes.**

Se ajustan a una distribución normal con una media de y una desviación estándar de . Esta distribución permite representar el tiempo promedio de aterrizaje con una ligera variabilidad alrededor de este valor central.

1. **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.

1. **Desembarques.**

El tiempo de desembarque sigue una distribución exponencial con una tasa de , equivalente a un tiempo medio de desembarque de 45.89 minutos.

1. **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.

Con estas distribuciones en mente, se presenta el pseudocódigo general de la simulación, donde se llevará a cabo la gestión de los eventos y las colas.

PSEUDOCÓDIGO PENDIENTE

**Pseudocódigo 8.1.** Método principal de la simulación

## Rutinas de la simulación

### Llegadas

**Ecuación 8.1.** Distribución de Poisson no homogénea

PSEUDOCÓDIGO PENDIENTE

**Pseudocódigo 8.2.** Método de la rutina de llegadas

### Aterrizajes

PSEUDOCÓDIGO PENDIENTE

**Pseudocódigo 8.3.** Método de la rutina de aterrizajes

### Traslados

PSEUDOCÓDIGO PENDIENTE

**Pseudocódigo 8.4.** Método de la rutina de traslados

### Desembarques

PSEUDOCÓDIGO PENDIENTE

**Pseudocódigo 8.5.** Método de la rutina de desembarques

### Salidas

PSEUDOCÓDIGO PENDIENTE

**Pseudocódigo 8.6.** Método de la rutina de salidas

# Resultados y Análisis

# Discusión y conclusiones

# Referencias