



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis numérico de las salidas de emergencia de los  
aviones

Autor: Juan Artiaga Jordá

Director: Borja Rengel Darnacullea

Madrid

Junio de 2025



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Análisis numérico de las salidas de emergencia de los aviones  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2025 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Juan Artiaga Jordá

Fecha: ...08.../ ...08.../ ...2025...

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**



Fdo.: Borja Rengel Darnaculleta

Fecha: ...08.../ ...08.../ ...2025...





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis numérico de las salidas de emergencia de los  
aviones

Autor: Juan Artiaga Jordá

Director: Borja Rengel Darnacullea

Madrid

Junio de 2025



# **ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS SALIDAS DE EMERGENCIA DE LOS AVIONES**

**Autor: Artiaga Jordá, Juan.**

Director: Rengel Darnaculleta, Borja.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este Trabajo de Fin de Grado estudia la eficiencia de las salidas de emergencia en aviones comerciales mediante un análisis numérico basado en simulaciones con el software Pathfinder. Se abordan factores clave como el diseño de cabina, el comportamiento de los pasajeros y las condiciones del entorno, con el objetivo de identificar mejoras que aumenten la seguridad en evacuaciones de emergencia.

**Palabras clave:** Emergencia, Simulación, Comportamiento, Pasajeros.

### **1. Introducción**

La seguridad en la aviación comercial es una prioridad fundamental en el diseño y operación de aeronaves. Uno de los momentos más críticos durante una emergencia es la evacuación de los pasajeros, proceso que debe realizarse en menos de 90 segundos según la normativa vigente. Sin embargo, este tiempo puede verse afectado por múltiples factores como la distribución de las salidas de emergencia, la configuración de la cabina, el comportamiento de los pasajeros y las condiciones ambientales del incidente.

Este proyecto tiene como objetivo analizar numéricamente la eficiencia de la evacuación en aviones comerciales mediante el uso del software Pathfinder, una herramienta especializada en simulaciones de evacuación. A través del estudio de distintos escenarios y configuraciones, se busca identificar los elementos que más influyen en los tiempos de salida y proponer mejoras que puedan contribuir al diseño de aeronaves más seguras y a la optimización de los procedimientos de evacuación.

### **2. Definición del proyecto**

El presente proyecto consiste en un análisis numérico de la evacuación de pasajeros en aviones comerciales, centrado en la evaluación de la eficiencia de las salidas de emergencia. Para ello, se utilizará el software Pathfinder, con el que se modelarán distintos escenarios de evacuación que consideren variables como el diseño de la cabina, la ocupación del avión y el comportamiento de los pasajeros. El objetivo principal es identificar los factores que afectan significativamente los tiempos de evacuación y proponer recomendaciones que mejoren la seguridad y efectividad del proceso en situaciones reales de emergencia.

### **3. Descripción de la herramienta**

Para la realización de este proyecto se utilizará Pathfinder, un software especializado en simulaciones de evacuación desarrollado por Thunderhead Engineering. Esta herramienta permite modelar el movimiento de personas en espacios cerrados de manera precisa, considerando tanto aspectos físicos del entorno como variables relacionadas con el comportamiento humano. Pathfinder se basa en modelos de locomoción y en

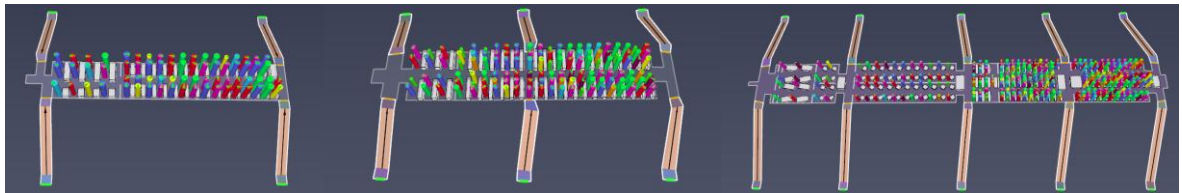
simulaciones en tiempo real que representan cómo se desplazan los individuos hacia las salidas disponibles en situaciones de emergencia.

El funcionamiento del software parte de la construcción de un modelo tridimensional del entorno, en este caso, el interior de una aeronave comercial. Este modelo incluye la disposición de los asientos, la ubicación y número de salidas de emergencia, los pasillos, y cualquier otro obstáculo que pueda influir en la evacuación. Posteriormente, se definen parámetros como el número de ocupantes, sus características (edad, movilidad, velocidad de reacción), condiciones ambientales (humo, visibilidad, iluminación), y posibles bloqueos de salidas.

Una vez establecidos todos los elementos del escenario, se ejecutan las simulaciones, las cuales permiten observar en tiempo real cómo se desarrolla la evacuación. Pathfinder proporciona resultados detallados como el tiempo total de evacuación, la evolución del flujo de personas, la detección de cuellos de botella y la distribución espacial de las densidades de ocupación. Estos datos permiten analizar la eficiencia del diseño y detectar puntos críticos que podrían comprometer la seguridad en una situación real.

Además, Pathfinder cuenta con una interfaz visual que facilita la interpretación de los resultados y la generación de vídeos o gráficos explicativos. Esta capacidad resulta especialmente útil para presentar los resultados de forma clara y comprensible, tanto para fines académicos como profesionales.

En este proyecto, Pathfinder será utilizado para simular distintos escenarios de evacuación aérea con variaciones en el diseño de cabina, distribución de salidas, niveles de ocupación y condiciones de emergencia. La comparación entre los distintos resultados obtenidos permitirá establecer relaciones entre las configuraciones analizadas y los tiempos de evacuación, aportando conclusiones relevantes sobre las mejores prácticas en el diseño y operación de aeronaves en lo que respecta a la seguridad de los pasajeros.



*Ilustración 1. Imagen de los tres modelos de avión simulados en el trabajo con Pathfinder.*

#### 4. Resultados

<b>Modelo de avión</b>	<b>Ocupación</b>	<b>Escenario</b>	<b>Tiempo evacuación (s)</b>
<b>Embraer 175</b>	70	Sin pre-movimiento	79,8
<b>Embraer 175</b>	70	Con pre-movimiento (30 s)	86,3

<b>Embraer 175</b>	70	Pre-mov. + 2 salidas bloqueadas (front.)	129,3
<b>Boeing 737-700</b>	126	Sin pre-movimiento	80,8
<b>Boeing 737-700</b>	126	Con pre-movimiento (30 s)	93,3
<b>Boeing 737-700</b>	126	Pre-mov. + 2 salidas bloqueadas (front.)	106,3
<b>Boeing 777-300</b>	310	Sin pre-movimiento	105,8
<b>Boeing 777-300</b>	310	Con pre-movimiento (30 s)	137,3
<b>Boeing 777-300</b>	310	Pre-mov. + 2 salidas bloqueadas (front.)	131,8

*Tabla 1. Resumen de los tiempos de evacuación simulados.*

Las simulaciones realizadas en Pathfinder permitieron analizar la evacuación de tres modelos representativos de aeronaves comerciales bajo diversos escenarios: evacuación directa, con pre-movimiento y con bloqueos parciales de salidas. La tabla anterior resume los tiempos de evacuación obtenidos para cada configuración.

Se observa que todos los modelos cumplen holgadamente con el límite normativo de 90 segundos en el escenario base (sin retardo ni bloqueos). Sin embargo, cuando se introduce un tiempo de pre-movimiento de 30 segundos —representando el retraso realista hasta que los ocupantes inician la evacuación—, los tiempos se incrementan de forma significativa, especialmente en aviones de mayor capacidad. Esta tendencia se acentúa en los escenarios con salidas bloqueadas, donde se genera una redistribución forzada del flujo que provoca congestiones y acumulaciones críticas.

El Embraer 175, con solo 70 ocupantes y un diseño más compacto, se mantiene en valores aceptables en los dos primeros escenarios (79,8 s y 86,3 s), pero supera ampliamente el umbral de 90 segundos cuando se bloquean salidas delanteras, alcanzando los 129,3 segundos. El Boeing 737-700, con 126 pasajeros, también mantiene buenos resultados en el caso base (80,8 s), pero supera los 90 s en los escenarios con pre-movimiento (93,3 s) y con bloqueos (106,3 s).

El Boeing 777-300, debido a su gran capacidad (310 ocupantes) y configuración de doble pasillo, presenta los tiempos más elevados en todos los escenarios. Llega hasta 137,3 segundos con pre-movimiento y 131,8 segundos cuando se simula el bloqueo de puertas frontales.

Estos resultados evidencian la importancia de incorporar factores dinámicos y realistas en los análisis de evacuación, así como la utilidad de herramientas avanzadas de

simulación frente a métodos analíticos simplificados que podrían subestimar la complejidad del proceso.

## 5. Conclusiones

El trabajo realizado pone de manifiesto la relevancia de realizar simulaciones detalladas para evaluar la seguridad de evacuación en aeronaves. Los principales hallazgos se resumen en los siguientes puntos:

- El número de ocupantes y la distribución de las salidas son los factores que más afectan al tiempo total de evacuación. Aeronaves con más pasajeros requieren una planificación más eficiente del flujo de salida.
- El tiempo de pre-movimiento representa una fase crítica que puede añadir entre 15 y 30 segundos al proceso, siendo un factor clave en situaciones reales.
- La simulación del bloqueo de salidas muestra cómo la redistribución del flujo puede generar congestiones significativas si no se han previsto rutas alternativas eficaces.
- La comparación entre modelos revela que, mientras que los cálculos analíticos son útiles para estimaciones preliminares, no reflejan con precisión las condiciones dinámicas reales. Por tanto, se recomienda el uso de simuladores como Pathfinder para estudios rigurosos.
- El modelo Boeing 777-300 presenta las mayores dificultades para evacuar dentro del tiempo normativo en condiciones degradadas, lo que evidencia la necesidad de reforzar la gestión del flujo en aeronaves de gran capacidad.

## 6. Referencias

- [1] Federal Aviation Administration (FAA). *Emergency Evacuation Demonstration Requirements*. <https://www.faa.gov/>
- [2] IMO. *MSC.1/Circ.1533 - Guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger ships*. International Maritime Organization, 2016.
- [3] Thunderhead Engineering. *Pathfinder User Manual*. <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>
- [4] New Zealand Building Code (C/VM2). *Amendment 4 – Protection from fire*. 2022. <https://www.building.govt.nz/>
- [5] National Transportation Safety Board (NTSB) y Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA). Informes de accidentes con evacuación completa (varios).
- [6] UNDP. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>



# NUMERICAL ANALYSIS OF AIRCRAFT EMERGENCY EXITS

**Author: Artiaga Jordá, Juan.**

Supervisor: Rengel Darnaculleta, Borja.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

This Final Degree Project analyzes the efficiency of emergency exits in commercial aircraft through a numerical study based on simulations using Pathfinder software. Key factors such as cabin design, passenger behavior, and environmental conditions are addressed, with the aim of identifying improvements to enhance safety during emergency evacuations.

**Keywords:** Emergency, Simulation, Behaviour, Passenger.

### 1. Introduction

Safety in commercial aviation is a fundamental priority in the design and operation of aircraft. One of the most critical moments during an emergency is the evacuation of passengers, a process that, according to current regulations, must be completed in under 90 seconds. However, this timeframe can be affected by various factors such as the distribution of emergency exits, cabin layout, passenger behavior, and the environmental conditions of the incident.

This project aims to numerically analyze the efficiency of evacuations in commercial aircraft using Pathfinder, a specialized evacuation simulation software. By studying different scenarios and configurations, the goal is to identify the key elements that most influence evacuation times and to propose improvements that contribute to safer aircraft design and optimized evacuation procedures.

### 2. Project definition

This project consists of a numerical analysis of passenger evacuation in commercial aircraft, focusing on the evaluation of emergency exit efficiency. To achieve this, Pathfinder software will be used to model various evacuation scenarios considering variables such as cabin design, aircraft occupancy, and passenger behavior. The main objective is to identify the factors that significantly impact evacuation times and to propose recommendations that enhance the safety and effectiveness of the process in real emergency situations.

### 3. Description of the tool

For the development of this project, Pathfinder will be used, a software tool specialized in evacuation simulations, developed by Thunderhead Engineering. This tool allows for precise modeling of human movement in enclosed spaces, considering both the physical aspects of the environment and variables related to human behavior. Pathfinder is based on locomotion models and real-time simulations that replicate how individuals move toward available exits during emergency situations.

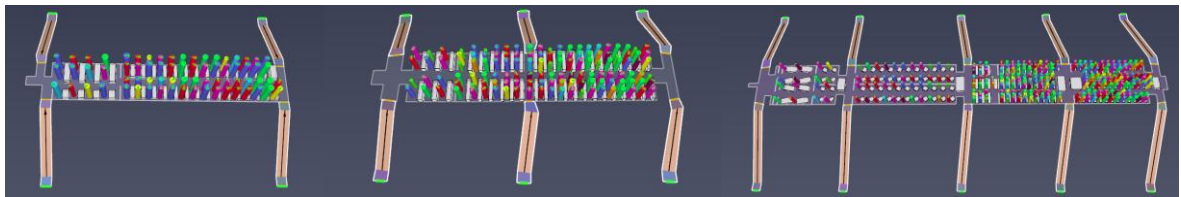
The software's workflow begins with the construction of a three-dimensional model of the environment, in this case, the interior of a commercial aircraft. This model includes seat layout, the location and number of emergency exits, aisles, and any obstacles that

may influence evacuation. Parameters are then defined, such as the number of occupants, their characteristics (age, mobility, reaction speed), environmental conditions (smoke, visibility, lighting), and possible exit blockages.

Once all scenario elements are established, the simulations are run, allowing real-time observation of the evacuation process. Pathfinder provides detailed results including total evacuation time, flow dynamics, detection of bottlenecks, and spatial distribution of crowd density. This data enables analysis of design efficiency and identification of critical points that could compromise safety in real situations.

In addition, Pathfinder includes a visual interface that facilitates result interpretation and the creation of explanatory videos or graphics. This feature is especially useful for presenting findings in a clear and accessible manner, whether for academic or professional purposes.

In this project, Pathfinder will be used to simulate various air evacuation scenarios with different cabin designs, exit distributions, occupancy levels, and emergency conditions. Comparing the results obtained will allow relationships to be established between different configurations and evacuation times, offering relevant conclusions on best practices for aircraft design and operation in terms of passenger safety.



*Ilustración 2. Image of the three aircraft models simulated in the project using Pathfinder.*

#### 4. Results

<b>Aircraft Model</b>	<b>Occupancy</b>	<b>Scenario</b>	<b>Evacuation Time (s)</b>
<b>Embraer 175</b>	70	Without pre-movement	79.8
<b>Embraer 175</b>	70	With pre-movement (30 s)	86.3
<b>Embraer 175</b>	70	Pre-mov. + 2 front exits blocked	129.3
<b>Boeing 737-700</b>	126	Without pre-movement	80.8
<b>Boeing 737-700</b>	126	With pre-movement (30 s)	93.3

<b>Boeing 737-700</b>	126	Pre-mov. + 2 front exits blocked	106.3
<b>Boeing 777-300</b>	310	Without pre-movement	105.8
<b>Boeing 777-300</b>	310	With pre-movement (30 s)	137.3
<b>Boeing 777-300</b>	310	Pre-mov. + 2 front exits blocked	131.8

*Tabla 2. Summary of simulated evacuation times*

The simulations carried out in Pathfinder allowed for the analysis of the evacuation process in three representative commercial aircraft models under various scenarios: direct evacuation, with pre-movement, and with partial exit blockages. The table above summarizes the evacuation times obtained for each configuration.

It is observed that all models comply comfortably with the regulatory limit of 90 seconds in the baseline scenario (without delay or blockages). However, when a 30-second pre-movement time is introduced—representing a realistic delay before occupants begin to evacuate—evacuation times increase significantly, especially in larger aircraft. This trend is further accentuated in scenarios involving blocked exits, where forced redistribution of passenger flow leads to congestion and critical crowding.

The Embraer 175, with only 70 occupants and a compact design, maintains acceptable results in the first two scenarios (79.8 s and 86.3 s), but significantly exceeds the 90-second threshold when front exits are blocked, reaching 129.3 seconds. The Boeing 737-700, carrying 126 passengers, also performs well in the base scenario (80.8 s), but exceeds the regulatory time under pre-movement conditions (93.3 s) and even more so with blocked exits (106.3 s).

The Boeing 777-300, due to its large capacity (310 occupants) and twin-aisle configuration, records the longest evacuation times across all scenarios. It reaches up to 137.3 seconds with pre-movement and 131.8 seconds when front exits are blocked.

These results highlight the need to incorporate dynamic and realistic factors into evacuation analyses, as well as the value of advanced simulation tools over simplified analytical approaches, which may underestimate the complexity of real-world evacuations.

## 5. Conclusions

The work carried out highlights the importance of conducting detailed simulations to assess evacuation safety in aircraft. The main findings are summarized as follows:

- The number of occupants and the distribution of exits are the most influential factors affecting total evacuation time. Aircraft with a higher passenger load require more efficient flow management.

- The pre-movement time represents a critical phase that can add between 15 and 30 seconds to the overall process, making it a key factor in real-life situations.
- Simulating exit blockages reveals how flow redistribution can lead to significant congestion if no effective alternative routes are available.
- The comparison between models shows that, while analytical calculations are useful for preliminary estimations, they do not accurately reflect real dynamic conditions. Therefore, the use of simulators like Pathfinder is recommended for rigorous studies.
- The Boeing 777-300 model shows the greatest difficulty in evacuating within the regulatory time limit under degraded conditions, underlining the need for enhanced flow management in high-capacity aircraft.

## 6. References

- [1] Federal Aviation Administration (FAA). *Emergency Evacuation Demonstration Requirements*. <https://www.faa.gov/>
- [2] IMO. *MSC.1/Circ.1533 - Guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger ships*. International Maritime Organization, 2016.
- [3] Thunderhead Engineering. *Pathfinder User Manual*. <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>
- [4] New Zealand Building Code (C/VM2). *Amendment 4 – Protection from fire*. 2022. <https://www.building.govt.nz/>
- [5] National Transportation Safety Board (NTSB) y Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA). Informes de accidentes con evacuación completa (varios).
- [6] UNDP. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>7</b>
1.1 Motivación del proyecto.....	8
1.2 Objetivos de desarrollo sostenible.....	9
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías</b> .....	<b>11</b>
2.1 Introducción al capítulo.....	11
2.2 Simulación de evacuaciones: fundamentos técnicos .....	11
2.3 Software de simulación de movimiento peatonal.....	13
2.4 Pathfinder: descripción funcional.....	17
2.4.1 Modos de simulación.....	17
2.4.2 Modelado geométrico del entorno.....	18
2.4.3 Definición de perfiles de ocupantes.....	18
2.4.4 Visualización y análisis de resultados.....	19
2.5 Aplicación de Pathfinder al entorno aeronáutico .....	20
2.5.1 Modelado geométrico a partir de seatmaps .....	20
2.5.2 Limitaciones y ajustes.....	22
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión</b> .....	<b>23</b>
3.1 Normativa y requisitos existentes.....	23
3.1.1 Distribución mínima de salidas de emergencia y recorridos de evacuación .....	25
3.1.2 Sistemas complementarios de protección contra incendios .....	27
3.2 Estudios e investigaciones previas .....	28
3.2.1 Simulaciones en aeronaves comerciales .....	28
3.2.2 Modelos avanzados de comportamiento.....	29
3.2.3 Aplicaciones en infraestructuras análogas .....	29
3.2.4 Balance y relevancia para este TFG.....	29
3.3 Casos de accidentes reales.....	30
3.3.1 Japan Airlines Flight 516 (Haneda, Tokio – enero 2024).....	31
3.3.2 British Airways Flight 2276 (Las Vegas – 2015) .....	32
3.3.3 Air France Flight 358 (Toronto – 2005) .....	33
3.3.4 Emirates Flight 521 (Dubái – 2016) .....	34
3.3.5 Thomsonfly Flight 253H (Manchester – 2007) .....	35

3.3.6 <i>Qantas Flight 32 (Singapur – 2010)</i> .....	37
3.4 Limitaciones de los trabajos existentes .....	38
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>40</b>
4.1 Justificación.....	40
4.2 Objetivos .....	41
4.3 Metodología.....	42
<b>Capítulo 5. Sistema de simulación y escenarios planteados .....</b>	<b>44</b>
5.1 Selección y análisis de modelos de aeronave .....	45
5.1.1 Selección de modelos de avión .....	45
5.1.2 Metodología del cálculo analítico.....	46
5.1.3 Resultados y comparación con normativa FAA .....	50
5.2 Etapas del proceso de simulación.....	51
5.3 Diseño geométrico en pathfinder.....	53
5.4 Caracterización de ocupantes .....	57
5.4.1 Clasificación por perfil físico y funcional .....	58
5.4.2 Origen de los ocupantes .....	64
5.4.3 Distribución y configuración de perfiles de ocupantes .....	65
5.4.4 Tiempos de pre-movimiento .....	67
<b>Capítulo 6. Análisis de Resultados.....</b>	<b>69</b>
6.1 Resultados globales sin tiempo de pre-movimiento .....	69
6.2 Análisis individual por modelo de aeronave sin tiempo de pre-movimiento .....	71
6.2.1 Embraer 175.....	72
6.2.2 Boeing 737-700 .....	76
6.2.3 Boeing 777-300.....	80
6.3 Análisis globales con tiempo de pre-movimiento .....	83
6.4 Análisis individual por modelo de aeronave con tiempo de pre-movimiento .....	84
6.4.1 Embraer 175.....	84
6.4.2 Boeing 737-700 .....	87
6.4.3 Boeing 777-300 .....	89
6.5 Análisis globales con tiempo de pre-movimiento y 2 salidas bloqueadas.....	92
6.6 Análisis individual por modelo de aeronave sin tiempo de pre-movimiento y 2 salidas bloqueadas .....	94

6.6.1 Embraer 175.....	94
6.6.2 Boeing 737-700 .....	96
6.6.3 Boeing 777-300 .....	98
<b>Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>	<b>102</b>
7.1 Síntesis general del trabajo realizado .....	102
7.2 Evaluación global y síntesis de resultados .....	103
7.3 Comparación entre estimaciones analíticas y simulaciones .....	105
7.4 Análisis de los factores que más influyen en el tiempo de evacuación.....	106
7.4.1 ods .....	106
7.4.2 Tiempo de pre-movimiento y comportamiento inicial.....	107
7.4.3 Disponibilidad de salidas y distribución espacial.....	108
<b>Capítulo 8. Bibliografía.....</b>	<b>111</b>

## *Índice de ilustraciones*

Ilustración 1. Imagen de los tres modelos de avión simulados en el trabajo con Pathfinder.	8
Ilustración 2. Image of the three aircraft models simulated in the project using Pathfinder. .....	13
Ilustración 3. Esquema de salidas de emergencia y rutas de evacuación en un avión comercial .....	26
Ilustración 4. Seatmap de referencia del modelo Boeing 777-300.....	54
Ilustración 5. Seatmap de referencia del modelo Boeing 737-700.....	54
Ilustración 6. Seatmap de referencia del modelo Embraer 175.....	54
Ilustración 7. Modelo geométrico del Boeing 777-300 en Pathfinder. ....	56
Ilustración 8. Modelo geométrico del Boeing 737-700 en Pathfinder. ....	56
Ilustración 9. Modelo geométrico del Embraer 175 en Pathfinder.....	57
Ilustración 10. Curva de relación velocidad-densidad (Speed-Density Profile) utilizada en la simulación.....	60
Ilustración 11. Tiempo acumulado de congestión al finalizar la simulación del Embraer 175. .....	73
Ilustración 12. Evolución del número de ocupantes del Embraer 175 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. ....	74
Ilustración 13. Distribución inicial de densidades del Embraer 175. ....	75
Ilustración 14. Distribución inicial de densidades del Boeing 737-700.....	77
Ilustración 15. Tiempo acumulado de congestión al finalizar la simulación del Boeing 737-700. ....	78
Ilustración 16. Evolución del número de ocupantes del Boeing 737-700 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. ....	79
Ilustración 17. Distribución inicial de densidades del Boeing 777-300.....	80
Ilustración 18. Tiempo acumulado de congestión al finalizar la simulación del Boeing 777-300. ....	81
Ilustración 19. Evolución del número de ocupantes del Boeing 777-300 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. ....	82

Ilustración 20. Tiempo acumulado de congestión del Embraer 175 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento.....	85
Ilustración 21. Evolución del número de ocupantes en Embraer 175 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento).....	86
Ilustración 22. Tiempo acumulado de congestión del Boeing 737-700 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento. ....	87
Ilustración 23. Evolución del número de ocupantes en Boeing737-700 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento).....	89
Ilustración 24. ....	90
Ilustración 25. ....	92
Ilustración 26. Tiempo acumulado de congestión del Embraer 175 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas. ....	95
Ilustración 27. Evolución del número de ocupantes en Embraer 175 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas).....	96
Ilustración 28. Tiempo acumulado de congestión del Boeing 737-700 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas.....	97
Ilustración 29. Evolución del número de ocupantes en Boeing 737-700 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas).....	98
Ilustración 30. Tiempo acumulado de congestión del Boeing 777-300 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas.....	99
Ilustración 31. Evolución del número de ocupantes en Boeing 777-300 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas).....	101

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Resumen de los tiempos de evacuación simulados. ....	9
Tabla 2. Summary of simulated evacuation times.....	14
Tabla 3. Comparativa de herramientas de simulación de evacuación peatonal .....	17
Tabla 4. Principales contribuciones de la literatura y su aplicación en el presente trabajo. 30	
Tabla 5. Cálculo del ancho total de evacuación según el número y tipo de salidas .....	46
Tabla 6. Anchura mínima de los pasillos según clase y modelo de aeronave.....	46
Tabla 7. Resultados de los cálculos analíticos.....	51
Tabla 8. Características de las rampas de evacuación .....	55
Tabla 9. Parámetros físicos y funcionales por perfil de ocupante .....	64
Tabla 10. Tiempo estimado de pre-movimiento de los ocupantes según su lugar de origen .....	65
Tabla 11. Tiempos de pre-movimiento según C/VM2 - Verification Method: Framework for Fire Safety Design. ....	68
Tabla 12. Evaluación comparativa de eficiencia de evacuación por modelo de avión. ....	70
Tabla 13. Comparativa de tiempos de evacuación con pre-movimiento.....	83
Tabla 14. Tiempos de evacuación con pre-movimiento y bloqueo de salidas delanteras. ..	94
Tabla 15. Tiempos de evacuación simulados según modelo de aeronave, configuración de salidas y pre-movimiento .....	104
Tabla 16. Comparación entre tiempos de evacuación estimados de manera analítica y mediante simulaciones.....	106

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

La seguridad es una piedra angular en el diseño y operación de aeronaves comerciales, así como en su regulación. A medida que el transporte aéreo ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, también lo ha hecho la necesidad de garantizar que, ante cualquier eventualidad, la integridad de los pasajeros y la tripulación esté salvaguardada. Una de las maniobras más críticas de los diversos escenarios que pueden ocurrir durante un vuelo es, sin duda, evacuar una aeronave en caso de emergencia. Tal eficiencia puede a menudo marcar la diferencia entre la vida y la muerte para muchos ocupantes.

Considerando este contexto, el presente Proyecto de Fin de Grado trata sobre el análisis numérico de las puertas de emergencia en aeronaves comerciales y su propósito es tener una percepción más profunda sobre los factores que afectarán un proceso de evacuación y proponer mejoras más asertivas basadas en datos reales. El estudio se basa en un discurso técnico/científico, con una naturaleza altamente práctica: a través de la aplicación de herramientas de simulación computacional como Pathfinder, se pueden modelar escenarios realistas con alta precisión para evaluar diferentes hipótesis dentro de entornos controlados.

El tema está marcado por su relevancia, con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la Administración Federal de Aviación (FAA) exigiendo como requisito que cada aeronave comercial sea capaz de ser evacuada al 100% en menos de 90 segundos, con más de la mitad de las salidas bloqueadas y en las peores condiciones. Los experimentos y accidentes han demostrado lo contrario en la práctica, debido a la disposición de las salidas de emergencia, obstáculos en la cabina o el comportamiento de los pasajeros bajo estrés.

Se parte de un examen exhaustivo de las principales regulaciones existentes y cientos de registros de investigaciones de accidentes aéreos para construir la acumulación teórica. Por lo tanto, se emplea Pathfinder para diseñar y llevar a cabo una serie de simulaciones de evacuación en las que se varían el modelo de la aeronave, la ubicación de las salidas, la demografía de los pasajeros, así como algunas condiciones ambientales (visibilidad, factor

de humo, etc.). Los resultados se analizan para identificar patrones dominantes en los tiempos de evacuación a partir de los cuales se pueden hacer recomendaciones para mejorar la seguridad de los procedimientos existentes.

Esta investigación no solo pretende proporcionar más información técnica sobre las evacuaciones aéreas y mejorar la industria aeronáutica para que no diseñen nuevas aeronaves solo para satisfacer razones económicas, sino que también puede usarse como un ejemplo informativo para la junta de revisión de seguridad al reevaluar sus protocolos de evacuación existentes.

En resumen, con este Proyecto de Fin de Grado presentamos un enfoque sólido y crítico a uno de los problemas más significativos que enfrenta la aviación actual: asegurar que cada pasajero tenga una oportunidad real de evacuación en esos pocos segundos que pueden cambiar las cosas.

## ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

La selección de este trabajo está motivada por la importancia de un problema muy desafiante en el contexto del diseño de aeronaves: la capacidad de evacuación de pasajeros en condiciones de emergencia. El transporte aéreo comercial tiene un historial de seguridad tan bueno y es tan poco probable que conduzca a accidentes que, cuando surge la necesidad de que los pasajeros de una aeronave evacúen rápidamente, probablemente será una decisión de vida o muerte para los que están a bordo. Como tal, la investigación sobre la dinámica de evacuación y el cumplimiento normativo no solo es de interés técnico, sino que también tiene importantes dimensiones éticas y humanas.

Las áreas que este proyecto tocaría en el sentido académico incluyen, pero no se limitan a: dinámica de fluidos humanos, modelado geométrico, análisis de datos, regulaciones aeronáuticas y simulación computacional a través de diversas disciplinas de ingeniería. El despliegue del software Pathfinder —que es reputado en la categoría de simulación de evacuación— ayuda a responder al problema con un enfoque profesional y metodológico.

La oportunidad de comparar con diferentes escenarios —por ejemplo, la introducción de tiempos de pre-movimiento o bloquear ciertas salidas— enriquece aún más su análisis, pudiendo también alinear la realidad de las situaciones de operación del sistema de evacuación.

A nivel más personal, el proyecto también es una respuesta a la necesidad de retribuir a la sociedad en forma de aumentar la seguridad para los pasajeros en el transporte aéreo y observar cómo el diseño y la planificación urbana pueden afectar nuestras vidas hoy en día de manera aún más fuerte. Además, un espacio cerrado y una ubicación distante restringen y complican la evacuación, lo cual es significativo cuando se trata de reflexionar sobre el papel del ingeniero en la sociedad.

Además, este trabajo se presenta con el auge de las tecnologías de simulación modernas que están revolucionando la validación en los procesos de ingeniería que ya sea sustituyen pruebas físicas costosas y complicadas o las apoyan con simulaciones virtuales precisas y fácilmente utilizables. Esto subraya a la vez la importancia de dominar herramientas como Pathfinder y aprender sobre las bases normativas subyacentes en las que se construyen sus modelos.

Al final, el objetivo de este proyecto es apoyar las herramientas actuales para el análisis y optimización de procedimientos de evacuación en la aviación comercial con una metodología sistemática que pueda generar resultados reproducibles y más prácticos utilizando prácticas reales del diseño aeronáutico.

## ***1.2 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

Este Trabajo de Fin de Grado se enmarca dentro de los compromisos internacionales establecidos por la Agenda 2030 y, en particular, guarda relación con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas. El análisis de la seguridad en evacuaciones aéreas no solo persigue una mejora técnica en el diseño de aeronaves, sino que también aporta beneficios sociales y estructurales que trascienden el ámbito de la aviación.

En primer lugar, se vincula con el ODS 3: Salud y Bienestar, ya que el estudio y la optimización de los procedimientos de evacuación tienen como finalidad principal la reducción del riesgo de lesiones y la protección de la vida de los pasajeros en situaciones de emergencia.

Asimismo, se conecta con el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura, puesto que fomenta la aplicación de metodologías innovadoras —como las simulaciones numéricas con herramientas de ingeniería— que permiten a la industria aeronáutica avanzar hacia infraestructuras más seguras, resilientes y adaptadas a escenarios críticos.

Por último, se relaciona con el ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, en tanto que los conocimientos generados sobre evacuación pueden extrapolarse a otros ámbitos del transporte y de la movilidad, como buques, trenes o grandes infraestructuras públicas, contribuyendo de forma transversal a entornos más seguros y sostenibles.

En conjunto, este proyecto se integra en la visión global de los ODS al aportar soluciones innovadoras que refuerzan la seguridad en el transporte, promueven el bienestar de las personas y apoyan el desarrollo de infraestructuras más responsables y sostenibles

## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

### ***2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO***

La simulación por computadora, se ha convertido en un recurso importante para estudios no empíricos sobre evacuación en transporte, edificios e infraestructuras complejas. Por ejemplo, en el caso de los aviones comerciales, donde el espacio es limitado, el número de ocupantes es alto y los márgenes de tiempo son muy pequeños, una parte importante de la evaluación y mejoras sólidas en los sistemas de evacuación es a través de tecnologías que permiten predecir el comportamiento de los pasajeros en situaciones de emergencia.

En este capítulo se presentan las tecnologías empleadas por este Proyecto Final de Grado, centrándose en el software Pathfinder para desarrollar simulaciones. Además, se introducirán los aspectos técnicos de las simulaciones de movimiento peatonal, se evaluarán varias opciones en entornos científicos y de ingeniería y se justificará la selección de Pathfinder como un enfoque apropiado para realizar análisis numéricos.

Adicionalmente, cómo se personalizó el entorno del simulador al contexto aeronáutico: modelado geométrico, definición de ocupantes y parametrización de condiciones de evacuación. Para finalizar el capítulo, se mencionaron otras herramientas de apoyo utilizadas durante el trabajo para procesar datos y graficar.

### ***2.2 SIMULACIÓN DE EVACUACIONES: FUNDAMENTOS TÉCNICOS***

Para el propósito de la ingeniería de seguridad, la simulación de evacuación es una técnica establecida que se utiliza para analizar el comportamiento de los ocupantes durante emergencias. Su objetivo principal es verificar que las condiciones de diseño de un espacio cerrado (como un edificio, tren o avión) permitan una evacuación segura en un tiempo aceptable bajo las condiciones establecidas por las regulaciones aplicables.

Las simulaciones son una excelente y la forma más preferida, porque es costoso realizar pruebas físicas, hay limitaciones en los escenarios para obtener datos de todos los escenarios posibles y es difícil replicar la prueba. Permite detectar cuellos de botella, probar diseños alternativos y medir los tiempos de evacuación sin personas reales.

Existen diferentes técnicas de modelado para simular el flujo de personas en un espacio confinado. Entre las más comunes están:

- **Modelos de flujo continuo:** Otros ven a los ocupantes moviéndose continuamente como parte de un flujo, como las propiedades de las distorsiones de fluidos acompañadas de pasajeros sin reconocer que consisten en personas reales; se aplican en modelos computacionales simplificados, como sugiere la SFPE (Sociedad de Ingenieros de Protección contra Incendios), para cálculos aproximados basados en valores como el ancho de paso y la densidad de ocupación.
- **Modelos basados en agentes:** Cada objeto que existe en el mundo modelado es una entidad por sí misma, por lo tanto, responde a los otros objetos y toma decisiones basadas de alguna manera en lo que sucede a su alrededor. Esto significa que es posible simular comportamientos mucho más complejos como colisiones y evitaciones, selección de diferentes caminos alrededor de obstáculos y respuesta en caso de retraso o bloqueo, etc.
- **Modelos híbridos o dinámicos:** Estos combinan partes de los modelos anteriores, y en los cuales se pueden incluir interacciones complejas (por ejemplo, las influencias del humo, la visibilidad reducida, los tiempos de reacción individuales). Estos se utilizan típicamente en simulaciones más complejas que acoplan el análisis de incendios (por ejemplo, mediante FDS) con la salida de personas.

Independientemente de la naturaleza del modelo utilizado, cada simulación de evacuación necesita comenzar con la definición geométrica de un espacio o edificio, la caracterización de los ocupantes (por ejemplo, tamaño, velocidad, nivel de movilidad y tiempo de respuesta), y la configuración del escenario (por ejemplo, estado de las salidas, obstáculos y condiciones). El software luego utiliza estos datos para ejecutar un cierto número de

iteraciones y calcular el tiempo que tomaría para que todos los individuos salgan de la instalación.

Este proceso ejecutará el Árbol de Comportamiento dentro de un hilo separado en Unity, que es principalmente responsable de la simulación del Cerebro, y como podemos esperar, la calidad de estos resultados depende en gran medida de cuán cercana a la verdad sea nuestra concepción del modelo. Por esta razón, sugieren trabajos utilizando herramientas personalizables, con la necesidad de una validación exhaustiva de los resultados contra datos empíricos o estudios revisados por pares. Esto es especialmente cierto en entornos más complejos como a bordo de aviones comerciales (donde las dimensiones son limitadas, los caminos son estrechos y los márgenes de maniobra están altamente restringidos), y el uso de simuladores altamente especializados como Pathfinder en este contexto.

### ***2.3 SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO PEATONAL***

Durante las últimas décadas, gracias a la escala de análisis de las acciones humanas en situaciones de emergencia como evacuaciones de espacios cerrados, las herramientas de simulación para el modelado de movimientos peatonales han dado un gran paso adelante. Están destinadas a evaluar configuraciones arquitectónicas, identificar posibles puntos críticos y validar intervenciones de diseño destinadas a mitigar el riesgo para los ocupantes.

Sin duda, hay numerosos programas tanto en el ámbito académico como en la industria que se han empleado con éxito para simulaciones de evacuaciones en aeronaves o infraestructuras de transporte. Aquí se explican y comparan brevemente los más importantes:

- **AirEXODUS:** Desarrollado por el grupo Fire Safety Engineering Group (FSEG) de la Universidad de Greenwich, AirEXODUS es uno de los primeros softwares diseñados específicamente para simular evacuaciones en aeronaves. Este programa se basa en un modelo de tipo *agent-based* en el que cada pasajero tiene un conjunto de atributos definidos (edad, movilidad, conocimiento del entorno, nivel de ansiedad, etc.), lo que permite representar de forma individualizada su comportamiento.

AirEXODUS, por un lado, es capaz de capturar la toma de decisiones complejas bajo estrés, y su compatibilidad con evacuaciones reales y datos de pruebas de evacuación física es una de sus características más importantes.

Los observadores también pueden analizar cómo reaccionan los ocupantes y cómo se ven afectados por el humo, el calor elevado y la visibilidad reducida. También añade modelos de comportamiento grupal (familias, amigos), así como reacciones a bloqueos o bloqueos de rutas.

Sin embargo, no está ampliamente disponible fuera del ámbito académico o de instituciones, y se necesitan licencias muy costosas para poder utilizarlo. La interfaz es menos amigable para el usuario que otras herramientas actuales, lo que ha limitado su adopción fuera de círculos especializados.

- **FDS+Evac:** FDS (Fire Dynamics Simulator), desarrollado por el NIST (National Institute of Standards and Technology), es un software de dinámica de fluidos computacional que simula la propagación de incendios en entornos cerrados. Su módulo complementario *Evac* permite integrar el movimiento de personas dentro del mismo entorno simulado, de forma que es posible evaluar cómo interactúan los ocupantes con el incendio en curso.

FDS+Evac se basa también en modelos agent-based, pero incorpora una fuerte dependencia con el entorno térmico y la generación de humo, lo que lo hace especialmente útil para simulaciones en condiciones críticas de incendio. Es ampliamente utilizado en análisis de seguridad en edificios, túneles o estaciones de metro, y se ha empleado en simulaciones aeroportuarias.

Entre sus limitaciones destaca el elevado tiempo de cálculo, especialmente si se simulan grandes volúmenes de geometría con alta resolución, y una curva de aprendizaje considerable, dado que su interfaz está basada en archivos de texto y scripts sin entorno gráfico amigable.

- **MassMotion y LEGION:** Estas herramientas son ampliamente utilizadas en el diseño de espacios públicos (aeropuertos, estaciones, centros comerciales) y destacan por su capacidad para modelar grandes multitudes y analizar flujos de tránsito en condiciones normales o de emergencia. MassMotion, desarrollado por Oasys (parte de Arup), y LEGION, desarrollado por Bentley Systems, ofrecen entornos 3D avanzados que permiten importar planos BIM, diseñar rutas, asignar perfiles de ocupantes y analizar niveles de servicio.

Ambos programas incorporan motores de simulación sofisticados, con algoritmos de evitación, toma de decisiones y congestión. Sin embargo, están más orientados al diseño de infraestructuras que al estudio detallado de evacuaciones bajo condiciones extremas (por ejemplo, con humo o propagación de fuego). Además, no están específicamente diseñados para interiores de aeronaves, por lo que su uso en este proyecto se considera menos adecuado.

- **Pathfinder:** es un simulador de evacuación desarrollado por Thunderhead Engineering, ampliamente aceptado en el ámbito de la ingeniería de incendios y en estudios académicos. Su motor de simulación se basa en un enfoque *agent-based*, en el que cada ocupante es una entidad independiente con parámetros asignables: velocidad, tamaño, reactividad, tipo de movimiento, prioridades de salida, etc.

Pathfinder ofrece dos modos principales de simulación:

- **Modo Steering:** simula trayectorias realistas mediante algoritmos de navegación continua, con evitación de obstáculos y adaptación fluida al entorno. Este modo es útil para representar evacuaciones complejas con movimientos naturales.
- **Modo SFPE:** implementa el modelo simplificado de la *Society of Fire Protection Engineers*, basado en flujos unidireccionales y velocidades estándar, útil para obtener estimaciones rápidas.

Una de sus principales ventajas es su interfaz visual e intuitiva, que permite construir geometrías complejas en 2D o 3D, importar archivos CAD, insertar objetos y rampas, y definir rutas de evacuación de forma gráfica. Además, es compatible con los

perfiles de ocupantes definidos por la IMO (MSC.1/Circ.1533), lo que resulta especialmente útil para este proyecto.

- Pathfinder permite obtener salidas detalladas, incluyendo:
- Tiempo total de evacuación.
- Tiempos individuales.
- Gráficos de congestión.
- Mapas de densidad.
- Animaciones en vídeo.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre los distintos programas:

<b>Herramienta</b>	<b>Enfoque principal</b>	<b>Nivel de detalle</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Soporte para entornos aeronáuticos</b>	<b>Soporte para humo/incendio</b>	<b>Licencia</b>
AirEXODUS	Aeronaves	Muy alto	Media	Alta	Medio	Privativa (académica)
FDS+Evac	Incendios y evacuación	Alto	Baja	Medio	Muy alta	Gratuita (FDS)
MassMotion / LEGION	Infraestructuras públicas	Alto	Alta	Baja	Baja	Privativa
Pathfinder	Seguridad en evacuación general	Alto	Alta	Alta	Media (sin FDS)	Gratuita (estudiante)

*Tabla 3. Comparativa de herramientas de simulación de evacuación peatonal*

Como también se observa en la comparación, en general Pathfinder ofrece una muy buena combinación de especificaciones técnicas y ajustes es amigable para el consumidor y compatible con entornos económicos de vuelo. También es valioso ya que tiene una versión educativa que lo convierte en una herramienta de elección para el trabajo académico sin ceder en el rigor técnico del análisis. Por estas razones, todas las simulaciones presentadas en este trabajo se han desarrollado con Pathfinder.

## **2.4 PATHFINDER: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL**

Pathfinder es una herramienta de simulación de evacuación de última generación desarrollada por Thunderhead Engineering que se utiliza en todo el mundo para el desarrollo de códigos, investigación y diseño de sistemas de edificios. Ha alcanzado popularidad debido a su buen equilibrio entre precisión, flexibilidad, usabilidad y complejidad computacional, siendo una de las soluciones más robustas disponibles para estudiar evacuaciones en espacios restringidos.

La primera diferencia es simplemente que, mientras que la mayoría de las herramientas de propósito general o especial tienen propósitos fijos y límites especializados en términos de vocabulario de representación de modelos (es decir, las cosas que se permiten incluir en su modelo, que también pueden estar vinculadas con un "Nivel de Detalle") [referencia-firesim], Pathfinder permite modelar una amplia gama de tipos de escenarios, desde edificios altos, estructuras subterráneas, barcos e incluso aviones, en diferentes niveles de detalle geométrico y de comportamiento.

### **2.4.1 MODOS DE SIMULACIÓN**

El motor de cálculo de Pathfinder ofrece dos enfoques principales:

- **Modo SFPE** (*Society of Fire Protection Engineers*): Se basa en principios simplificados, considerando a los ocupantes como flujos de personas y priorizando el cálculo de tiempos de evacuación mediante estimaciones de densidad y velocidad

promedio. Es útil para estimaciones iniciales o escenarios con menor complejidad geométrica.

- **Modo Steering (basado en agentes):** Es el enfoque más realista y detallado. Cada ocupante se modela como un agente individual con autonomía para moverse, evitar obstáculos, interactuar con otros individuos y tomar decisiones de ruta. Este modo permite simular dinámicas más complejas como cambios de trayectoria, colisiones suaves, congestión y adaptación a bloqueos imprevistos.

## 2.4.2 MODELADO GEOMÉTRICO DEL ENTORNO

Pathfinder permite importar geometría desde archivos vectoriales en 2D (.dxf, .svg) o imágenes de fondo, sobre las cuales se pueden definir manualmente los elementos del modelo:

- Paredes, puertas, pasillos y rampas.
- Obstáculos como asientos, baños, zonas de servicio o mobiliario.
- Zonas de inicio y destino (áreas de entrada/salida del modelo).

En el caso particular de este proyecto, se ha modelado el interior de varias aeronaves comerciales a partir de seatmaps reales, ajustados a escala y transformados mediante software gráfico externo (como Inkscape) para integrarlos en el entorno de trabajo de Pathfinder.

## 2.4.3 DEFINICIÓN DE PERFILES DE OCUPANTES

Una de las grandes fortalezas de Pathfinder es su capacidad para personalizar las características físicas y de comportamiento de los ocupantes. Entre los parámetros configurables se incluyen:

- Dimensiones (diámetro corporal, altura).
- Velocidad de desplazamiento en condiciones normales o alteradas.

- Tiempo de reacción o pre-movimiento antes de iniciar la evacuación.
- Tipo de movimiento (andar, correr, empujar).
- Prioridades y rutas preferentes (por ejemplo, preferencia por salidas delanteras).
- Relaciones entre agentes (seguir a otros, moverse en grupo, esperar a acompañantes).

Estos perfiles pueden definirse de forma manual o importarse directamente desde la guía IMO MSC.1/Circ.1533, la cual ofrece una caracterización estandarizada muy útil para modelar situaciones realistas de evacuación.

#### **2.4.4 VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez configurado el escenario y ejecutada la simulación, Pathfinder genera una gran cantidad de datos exportables:

- Tiempo total de evacuación.
- Tiempo de salida individual por ocupante.
- Mapas de densidad y congestión por zonas.
- Gráficos temporales de flujo y acumulación.
- Trayectorias individuales de movimiento.
- Animaciones 2D y 3D del proceso de evacuación, útiles para análisis visual o presentaciones.

Estos resultados permiten detectar cuellos de botella, zonas de acumulación excesiva, retrasos provocados por obstrucciones y evaluar la eficacia del diseño geométrico y del posicionamiento de las salidas.

En resumen, Pathfinder ofrece un entorno completo y flexible para modelar evacuaciones realistas en medios de transporte, combinando potencia de cálculo con facilidad de uso y

capacidad de personalización. Por estas razones, se ha utilizado como herramienta principal en el desarrollo de este trabajo, permitiendo simular distintos escenarios de evacuación aérea con un alto grado de fidelidad.

## **2.5 APLICACIÓN DE PATHFINDER AL ENTORNO AERONÁUTICO**

La implementación de Pathfinder en el contexto de la evacuación de aeronaves requiere una adaptación cuidadosa del entorno de simulación a las características particulares del interior de un avión. A diferencia de edificios u otros espacios más amplios, las aeronaves presentan geometrías alargadas y estrechas, pasillos únicos, densidades elevadas de ocupantes, y espacios muy acotados para la circulación, lo que condiciona tanto el diseño del modelo como el comportamiento de los agentes.

### **2.5.1 MODELADO GEOMÉTRICO A PARTIR DE SEATMAPS**

La actividad de modelado se realiza con plantillas de distribuciones reales de asientos (mapas de asientos) para las tres aeronaves consideradas en este trabajo: Boeing 777-300, Boeing 737-700 y Embraer 175. Las plantillas han sido escaladas y trabajadas en programas como Inkscape, para luego convertirse en bases vectoriales que se importan en Pathfinder como imágenes de fondo.

La configuración también se puede capturar utilizando imágenes tomadas desde diferentes perspectivas; estas imágenes se utilizan para construir el fuselaje, los pasillos, los servicios y las zonas de almacenamiento del fuselaje, así como los propios asientos que actúan como objetos de bloqueo, reflejando el espacio real para el movimiento de los ocupantes. Este enfoque se ilustra en la figura. También se ha determinado la posición exacta y el tamaño de las puertas de emergencia, respetando estrictamente sus proporciones originales y su ubicación en un tipo de aeronave dado.

Esto también incluye toboganes de evacuación como secciones inclinadas, seleccionados en función de su longitud, pero también de la pendiente para cada tipo de aeronave. Estas

características son intermedias entre el interior de la aeronave y el exterior de la misma en el modelo.

#### ***2.5.1.1 Asignación de zonas de inicio y salida***

En cada simulación, los ocupantes se colocan inicialmente en sus respectivos asientos mediante zonas de inicio (“start regions”) ajustadas a la posición de las filas. Las zonas de salida (“exit regions”) se han definido sobre las rampas de evacuación o más allá de estas, simulando el punto en el que se considera finalizado el proceso de evacuación (por ejemplo, una vez los pasajeros han alcanzado el suelo exterior).

En algunos escenarios, también se han considerado configuraciones en las que no todas las salidas están disponibles, para evaluar si el diseño cumple con la normativa de evacuación en 90 segundos usando solo la mitad de las salidas.

#### ***2.5.1.2 Adaptación de perfiles de ocupantes***

Para la caracterización de los ocupantes se han utilizado los perfiles definidos en la guía IMO MSC.1/Circ.1533, ampliamente reconocida en estudios de evacuación, especialmente en el ámbito marítimo, pero también aplicable a contextos con alta densidad de ocupación como el aeronáutico.

A partir de aquí, se crearon perfiles por género y edad (por ejemplo, hombres y mujeres menores de 30 años) con velocidad correspondiente, ancho de cuerpo, altura y factores de reducción en casos de aglomeración o paso por un espacio estrecho. Los triángulos contienen estos datos que permiten simular el tiempo de reacción, la capacidad de movimiento y la ocupación del espacio de cada agente de manera más realista.

Además, se han establecido algunos tiempos de pre-movimiento (tiempo entre el inicio de la evacuación y la realización de algo por cada ocupante), una variable muy importante en simulaciones realistas que se ha ajustado dependiendo del tipo de ocupante y las filas de puertas.

## **2.5.2 LIMITACIONES Y AJUSTES**

Aunque Pathfinder proporciona una base sólida para modelar evacuaciones, es importante tener en cuenta algunas limitaciones en su aplicación a aeronaves:

- No incorpora de forma nativa la propagación de humo o calor (para ello sería necesario acoplarlo con FDS).
- No modela comportamientos irracionales como pánico, retrocesos o bloqueos por equipaje, aunque es posible simular algunos efectos mediante parámetros de comportamiento o rutas forzadas.
- La geometría del modelo, aunque ajustada a escala, es una simplificación 2D del entorno tridimensional real del avión.

A pesar de estas limitaciones, la aplicación de Pathfinder al entorno aeronáutico permite obtener resultados representativos, identificar cuellos de botella, estimar tiempos de evacuación y realizar comparaciones entre distintas configuraciones de diseño y ocupación

## **Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

El presente proyecto aborda el análisis numérico de la evacuación de pasajeros en aeronaves comerciales, una cuestión de vital importancia en el campo de la seguridad aeronáutica. Antes de definir una propuesta concreta, es imprescindible revisar qué soluciones o trabajos existen ya en este ámbito, tanto a nivel normativo como tecnológico y metodológico.

### ***3.1 NORMATIVA Y REQUISITOS EXISTENTES***

La evacuación eficiente de pasajeros en situaciones de emergencia es uno de los pilares fundamentales en la seguridad de la aviación. Para los aviones comerciales, existen requisitos específicos de certificación para su capacidad de evacuación que pueden ser emitidos o exigidos por autoridades de aviación como la Administración Federal de Aviación (FAA), la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), Transport Canada, etc., para garantizar estándares mínimos de seguridad.

Además de factorizar la disposición de múltiples salidas, pasillos y rampas dentro del avión, identificaron cómo estos contribuyen a un proceso de certificación y protocolo de simulación requeridos para certificar su capacidad.

La Administración Federal de Aviación (FAA) es la organización que emite el estándar más popular y frecuentemente citado en este ámbito. Según sus reglas, cada avión comercial debe ser capaz de vaciar toda su capacidad en un máximo de 90 segundos sin que nadie lleve equipaje de mano. Este límite se estableció en pruebas experimentales realizadas bajo condiciones controladas, con ocupantes entrenados y sin la interferencia de humo, fuego u obstáculos imprevistos, un punto que generó debate entre los investigadores sobre hasta qué punto se pueden extender estos resultados.

Complementariamente, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la European Union Aviation Safety Agency (EASA) también recogen disposiciones similares

en sus respectivos marcos regulatorios. Todas ellas se alinean en la necesidad de establecer tiempos máximos de evacuación, aunque los procedimientos de validación pueden diferir entre regiones. En general, se exige a los fabricantes que realicen simulaciones físicas o numéricas (mock-ups o software de simulación) como parte del proceso de certificación de la aeronave.

En el ámbito marítimo, pero aplicable por analogía a evacuaciones de alta densidad, la Organización Marítima Internacional (IMO) publica directrices detalladas sobre análisis de evacuación, como el documento MSC.1/Circ.1533, que define perfiles de ocupantes, tiempos de pre-movimiento y metodologías simplificadas y avanzadas para modelar evacuaciones. Aunque está orientado a buques de pasajeros, muchas de las aproximaciones y parámetros que propone han sido adaptados en investigaciones académicas para evaluar escenarios en aeronaves, especialmente en lo que respecta a la caracterización de ocupantes y a los modelos de flujo peatonal.

Todos estos marcos regulatorios existen y vale la pena repetir que lo que se nos exige hacer hoy en día ha evolucionado en gran medida a partir de un consenso técnico más que de una evaluación científica exhaustiva. Las circunstancias en las que se certifica que un avión es seguro están lejos de lo que realmente sucede en la realidad, donde el miedo, el humo, la desorientación, la falta de visibilidad y las acciones espontáneas de los pasajeros pueden disminuir seriamente el impacto de una evacuación.

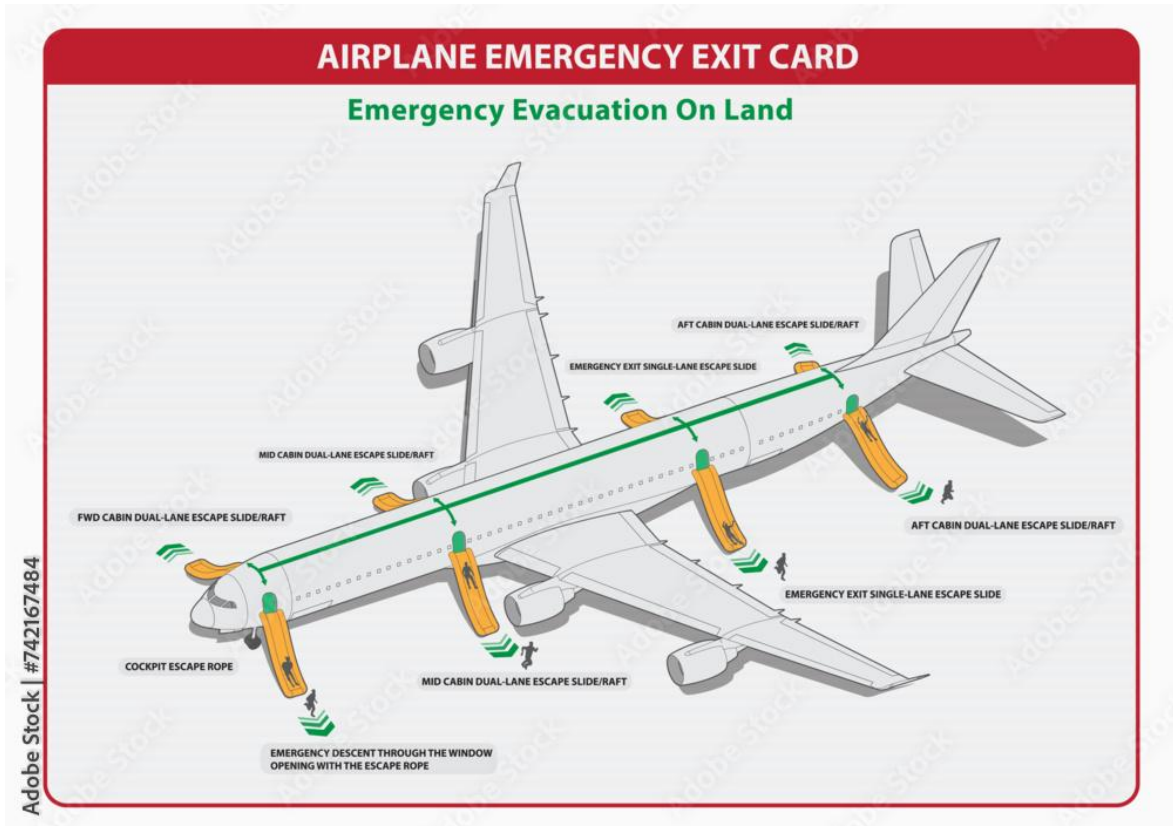
Por tanto, comprender en profundidad la normativa existente no solo es esencial para diseñar escenarios de evacuación realistas, sino también para cuestionar sus limitaciones y explorar posibles áreas de mejora desde un enfoque técnico y científico. Esta revisión normativa, junto con el análisis de accidentes reales y el uso de herramientas de simulación adecuadas, permitirá modelar escenarios de evacuación más ajustados a la realidad y obtener conclusiones aplicables a la mejora de la seguridad aérea.

### **3.1.1 DISTRIBUCIÓN MÍNIMA DE SALIDAS DE EMERGENCIA Y RECORRIDOS DE EVACUACIÓN**

El diseño de las salidas de emergencia en aeronaves comerciales está estrictamente regulado por normativas internacionales como las de la FAA (Federal Aviation Administration) y la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), con el objetivo de garantizar que todos los ocupantes puedan evacuar en un tiempo máximo de 90 segundos, incluso si solo la mitad de las salidas están disponibles. La cantidad mínima de salidas requeridas depende principalmente del número de ocupantes, la longitud del fuselaje y la configuración del avión.

Por ejemplo, la FAA exige al menos 4 salidas de emergencia en aviones que tienen más de 44 pasajeros, que comprenden puertas principales y salidas sobre el ala. Con un aumento en la capacidad, el número de salidas requeridas aumenta y deben estar distribuidas para minimizar la distancia de viaje desde cualquier asiento hasta una ruta de escape.

Para ilustrar este aspecto, la *Ilustración 3* muestra un esquema representativo de un avión tipo narrow-body con 2 salidas delanteras, 2 salidas traseras y 4 salidas sobre el ala, configuradas para cubrir eficientemente la longitud de la cabina y reducir los tiempos de acceso a las zonas de evacuación.



*Ilustración 3. Esquema de salidas de emergencia y rutas de evacuación en un avión comercial*

En cuanto a los recorridos de evacuación, estos suelen seguir un patrón común:

- Desde el asiento hasta el pasillo (movimiento lateral),
- Desplazamiento longitudinal por el pasillo hasta la salida más cercana,
- Cruce de la puerta de salida y descenso por la rampa de evacuación.

Este trayecto, aunque puede parecer corto en condiciones normales, puede verse notablemente ralentizado en situaciones de pánico, visibilidad reducida o bloqueo parcial de rutas. Por ello, la distribución eficiente de las salidas, junto con una correcta señalización y accesibilidad, resulta clave para evitar cuellos de botella y garantizar un flujo constante de evacuación.

### **3.1.2 SISTEMAS COMPLEMENTARIOS DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS**

Además de las medidas estructurales relacionadas con la evacuación, las aeronaves comerciales están equipadas con diversos sistemas de protección contra incendios cuyo objetivo es detectar, contener y mitigar el avance del fuego en sus primeras fases. Aunque por limitaciones de espacio y peso no se pueden instalar sistemas similares a los de grandes edificios, existen soluciones específicas adaptadas al entorno aeronáutico.

Entre los sistemas más comunes se encuentran:

- **Detectores de humo y temperatura:** instalados especialmente en los baños, compartimentos de carga y áreas de servicio. Permiten activar alertas tempranas en cabina y en el cockpit.
- **Sistemas automáticos de extinción:** en compartimentos de carga o cocinas, que liberan agentes extintores ante la detección de condiciones anómalas.
- **Extintores portátiles:** distribuidos estratégicamente en distintas zonas del avión y accesibles por la tripulación.
- **Sistemas de señalización luminosa:** instalados a lo largo de los pasillos, cerca del suelo, para guiar a los pasajeros hacia las salidas en condiciones de baja visibilidad.
- **Materiales ignífugos:** empleados en moquetas, paneles, asientos y cortinas para retardar la propagación del fuego.

Cabe destacar que, aunque no se dispone de sistemas activos de extracción o compartimentación de humos como los empleados en edificios, la configuración del avión busca minimizar la expansión del incendio, permitiendo ganar tiempo para una evacuación segura.

Estos sistemas, aunque no forman parte directa del proceso de evacuación, son determinantes para crear un entorno operativo seguro durante los primeros segundos de una emergencia,

favoreciendo la toma de decisiones por parte de la tripulación y reduciendo la exposición de los ocupantes a condiciones peligrosas.

### **3.2 ESTUDIOS E INVESTIGACIONES PREVIAS**

La literatura sobre evacuación de aeronaves ha adoptado ampliamente enfoques basados en modelos agent-based, con estudios que demuestran cómo variables geométricas, de comportamiento humano y de gestión de rutas afectan significativamente los tiempos de salida y seguridad. A continuación, se describen los trabajos más relevantes:

#### **3.2.1 SIMULACIONES EN AERONAVES COMERCIALES**

Gobbin, Khosravi y Bardenhagen (2021) realizaron una simulación de evacuación para un avión de fuselaje único con Pathfinder, explorando parámetros como velocidad de marcha, tamaño corporal, comportamiento ante colisiones y asignación de salidas. Encontraron que estos factores influyen notablemente en el tiempo de evacuación total.

Choochart & Thipyopas (2020) simularon la evacuación del Airbus A330-300 usando Pathfinder en cuatro formatos: evacuación libre, por zonas, por salida más cercana e igualdad de asignación. Los tiempos variaron entre 50,6 s y 79,4 s según el formato y la disponibilidad de salidas.

Estudio polaco sobre Boeing 787 Dreamliner analizó Evacuaciones con Pathfinder considerando equipos de a bordo y números mixtos de ocupación. Identificó que la distribución equilibrada de pasajeros y la adecuada organización por parte de la tripulación reducen congestión y velocidad excesiva.

Gobbin et al. (2021) contrastaron la simulación con datos experimentales de pruebas reales, encontrando diferencias menores a 2 s en evacuaciones de Boeing 737 y 767, comparando Pathfinder y AirEXODUS

### 3.2.2 MODELOS AVANZADOS DE COMPORTAMIENTO

En un estudio de Patterson (2010) se desarrolló un modelo AAMAS (multi-agent) que incluía factores emocionales (pánico) en cabinas de avión. Demostró que la ansiedad incrementa los tiempos de evacuación y es un factor clave a tener en cuenta.

Los modelos basados en teorías de juegos, como el de Wang et al. (2022), aplican el Equilibrio de Nash bayesiano a evacuaciones peatonales, demostrando que los agentes que anticipan congestión evacuan más rápido y con mayor confort.

Por otro lado, diversas reseñas como las de Templeton et al. (2023) subrayan la importancia de modelar la comunicación entre pasajeros, la influencia social y las dinámicas grupales (seguidores/liderazgo), que pueden alterar la ruta elegida y los tiempos de salida.

### 3.2.3 APLICACIONES EN INFRAESTRUCTURAS ANÁLOGAS

Aunque centrados en edificios y estaciones, numerosos modelos ofrecen lecciones extrapolables:

- Cimellaro et al. (2017) modelaron escenarios complejos (incluyendo fuego, terremoto y amenazas) en aeropuertos y cabinas de A380 usando Repast Symphony, evidenciando la importancia de simular roles (tripulación, personal de seguridad) y exploración del entorno.
- Liu & Li (2023) utilizaron Pathfinder en espacios comerciales grandes para optimizar distribución de salidas en función de perfiles poblacionales y densidades.

### 3.2.4 BALANCE Y RELEVANCIA PARA ESTE TFG

<b>Contribución principal</b>	<b>Relevancia en este proyecto</b>
Validación de utilidad y precisión de Pathfinder frente a ensayos reales	Justifica su uso como herramienta principal

Análisis de formatos de evacuación y asignación de salidas	Sirve de referencia para definir los escenarios
Inclusión de variables humanas: pánico, organización	Base para parametrizar tiempos de pre-movimiento
Lecciones de modelos aeroportuarios e infraestructurales	Permiten enriquecer diseño y perfiles simulados

*Tabla 4. Principales contribuciones de la literatura y su aplicación en el presente trabajo*

En conjunto, estos estudios demuestran que la simulación de evacuaciones combinando geometría realista, perfiles humanos detallados y formatos diversos permite analizar con rigor los tiempos y detectar oportunidades de mejora. El enfoque de este TFG se apoya en estas investigaciones para:

1. Utilizar Pathfinder con parámetros calibrados (velocidad, tamaño, pánico).
2. Definir escenarios variados, incluyendo diferentes formatos de uso de salidas.
3. Integrar la actuación de la tripulación y tiempos de pre-movimiento.
4. Comparar los resultados simulado-normativa para evaluar eficacia y proponer mejoras.

### **3.3 CASOS DE ACCIDENTES REALES**

Aunque las regulaciones estipulan condiciones bastante severas para la certificación de aeronaves en caso de evacuación, la vida parece tener sus propias reglas y los incidentes reales ocurren en escenarios muy diferentes.

En consecuencia, se requiere que los accidentes donde se llevó a cabo una evacuación completa sean analizados para comparar los tiempos logrados, las condiciones climáticas encontradas y los problemas enfrentados por los pasajeros y la tripulación.

### **3.3.1 JAPAN AIRLINES FLIGHT 516 (HANEDA, TOKIO – ENERO 2024)**

El 2 de enero de 2024, el vuelo JL516 de Japan Airlines, operado por un Airbus A350-900, protagonizó una de las evacuaciones más rápidas y eficaces documentadas en un entorno real de emergencia. La aeronave cubría la ruta entre Tokio y Sapporo y, durante el aterrizaje en el Aeropuerto Internacional de Haneda, colisionó con un avión de la Guardia Costera Japonesa que se encontraba cruzando la pista en ese momento. El impacto provocó un incendio inmediato en la parte delantera del fuselaje, extendiéndose rápidamente por el costado izquierdo de la cabina.

A bordo se encontraban 367 pasajeros y 12 tripulantes. A pesar de las llamas visibles y del humo denso que comenzaba a invadir la cabina, toda la tripulación y los pasajeros fueron evacuados con éxito en aproximadamente 90 segundos. Las imágenes difundidas por medios internacionales y grabaciones en tiempo real desde el interior del avión han servido como referencia para evaluar el procedimiento seguido. En ellas se observa una evacuación ordenada, sin pánico generalizado, y con una rápida activación de las rampas de evacuación.

Uno de los aspectos más destacados de este caso fue la actuación ejemplar del personal de cabina, que emitió instrucciones claras, impidió el uso de equipaje de mano y aceleró el flujo de ocupantes hacia las salidas habilitadas. Además, se ha señalado que la estructura del Airbus A350, con salidas amplias y cabina moderna, favoreció la evacuación eficiente. También influyó el hecho de que la colisión se produjo durante la fase de rodaje tras el aterrizaje, lo que permitió que muchas personas ya estuvieran mentalmente preparadas para moverse.

En cuanto al tiempo de reacción o pre-movimiento, se estima que fue especialmente corto, gracias a la visibilidad directa del incendio desde la cabina y a la rápida instrucción por parte de la tripulación. No se ha reportado obstrucción de pasillos ni intentos masivos de recoger equipaje, lo que contrasta con otros casos documentados.

### **3.3.2 BRITISH AIRWAYS FLIGHT 2276 (LAS VEGAS – 2015)**

El 8 de septiembre de 2015, el vuelo 2276 de British Airways, operado por un Boeing 777-200, sufrió un fallo catastrófico en el motor izquierdo mientras se encontraba en carrera de despegue en el Aeropuerto Internacional McCarran de Las Vegas. El incendio se produjo de forma súbita y obligó al piloto a abortar el despegue e iniciar una evacuación de emergencia en la pista.

A bordo viajaban 157 pasajeros y 13 miembros de la tripulación. La tripulación activó las rampas de evacuación y comenzó el procedimiento de salida por las puertas delanteras, ya que el fuego afectaba al costado izquierdo del avión. Aunque no se ha publicado una estimación oficial precisa del tiempo total de evacuación, los informes preliminares y los vídeos grabados desde la pista indican que el proceso superó claramente los 90 segundos establecidos por la normativa.

Uno de los elementos más controvertidos de este caso fue el comportamiento de algunos pasajeros, que abandonaron el avión portando su equipaje de mano. Este hecho provocó críticas por parte de las autoridades y expertos en seguridad aérea, ya que retrasó el flujo de salida y representó un riesgo añadido tanto para el resto de los ocupantes como para el personal de emergencia. Las imágenes captadas desde el exterior muestran cuellos de botella en las salidas, especialmente en la puerta delantera derecha, lo que sugiere que el tiempo de pre-movimiento fue también prolongado.

El informe posterior del NTSB (National Transportation Safety Board) destacó varios factores que complicaron la evacuación: la propagación rápida del fuego en un costado del fuselaje, la falta de claridad en las instrucciones iniciales, y el intento de algunos pasajeros de recuperar objetos personales. A pesar de estos contratiempos, no se registraron víctimas mortales, aunque hubo varios heridos leves durante la salida por las rampas.

Este incidente pone de relieve una de las principales limitaciones de las pruebas de certificación: la imposibilidad de replicar comportamientos humanos bajo condiciones de estrés real. A diferencia del caso anterior, en el que la evacuación fue fluida, este ejemplo

demuestra cómo factores impredecibles como la reacción del pasaje o el incumplimiento de instrucciones pueden tener un impacto considerable en el tiempo total de salida.

El caso del vuelo 2276 resulta especialmente útil para este proyecto, ya que permite introducir en las simulaciones variables relacionadas con la obstrucción de rutas por equipaje, la desobediencia parcial a la tripulación y la desigual distribución del flujo entre las salidas operativas.

### **3.3.3 AIR FRANCE FLIGHT 358 (TORONTO – 2005)**

El 2 de agosto de 2005, el vuelo 358 de Air France, operado por un Airbus A340-300, se salió de la pista durante el aterrizaje en el Aeropuerto Internacional de Toronto-Pearson bajo condiciones meteorológicas adversas. La aeronave aterrizó bajo una intensa lluvia, con viento cruzado y visibilidad reducida. Debido a un aterrizaje largo y a la imposibilidad de frenar a tiempo, el avión sobrepasó el final de la pista, descendió por un terraplén y se incendió tras detenerse.

En el momento del accidente viajaban a bordo 297 pasajeros y 12 miembros de la tripulación. A pesar del entorno hostil y del daño estructural sufrido por la aeronave, todos los ocupantes fueron evacuados con éxito. Según los informes oficiales del Transportation Safety Board of Canada, el proceso completo de evacuación duró entre 90 y 120 segundos, superando ligeramente el umbral regulatorio, aunque en condiciones muy distintas a las exigidas para la certificación.

La evacuación fue liderada eficazmente por la tripulación, que logró mantener el orden a pesar del humo, la inclinación del fuselaje y la confusión inicial. Sin embargo, algunos factores ralentizaron el proceso: el fuego comenzó en la zona del motor derecho, afectando parcialmente a las salidas traseras; la cabina se llenó rápidamente de humo denso, y varios pasajeros intentaron recuperar su equipaje, lo que generó obstrucciones puntuales en los pasillos.

El informe posterior señaló que el tiempo de pre-movimiento fue considerable, debido a la incertidumbre sobre la gravedad de la situación y a la tardanza en iniciar la orden de

evacuación. Además, se observó que la iluminación de emergencia no fue suficiente en algunas zonas, lo que dificultó la orientación de los pasajeros hacia las salidas disponibles.

A pesar de estas dificultades, la evacuación fue considerada un éxito, ya que no hubo víctimas mortales. Este caso aporta información relevante sobre cómo los factores ambientales (lluvia, lodo, baja visibilidad) y estructurales (daño al fuselaje, fuego localizado) afectan a la dinámica de evacuación. También evidencia que incluso en aeronaves de gran capacidad como el A340, el diseño del interior y la formación de la tripulación pueden mitigar el impacto de condiciones adversas.

Para este proyecto, el caso de Air France 358 permite explorar escenarios en los que el entorno físico se ve alterado de forma significativa, incorporando elementos como humo, salidas parcialmente inoperativas y evacuaciones con orientación reducida.

### **3.3.4 EMIRATES FLIGHT 521 (DUBÁI – 2016)**

El 3 de agosto de 2016, el vuelo 521 de Emirates, operado por un Boeing 777-300, sufrió un accidente durante el aterrizaje en el Aeropuerto Internacional de Dubái. La aeronave procedía de Trivandrum (India) y, tras abortar el aterrizaje por un problema con el tren de aterrizaje, acabó impactando violentamente contra la pista. El impacto provocó el colapso del tren principal y el inicio de un incendio de gran magnitud en la parte superior del fuselaje, que se extendió rápidamente.

A bordo se encontraban 282 pasajeros y 18 miembros de la tripulación. A pesar de la gravedad del incidente, todos los pasajeros fueron evacuados con vida. Sin embargo, un bombero del equipo de rescate perdió la vida mientras participaba en las labores de extinción. El proceso de evacuación estuvo marcado por una serie de dificultades operativas y humanas que afectaron de forma significativa a la eficacia del procedimiento.

Uno de los problemas más evidentes fue la demora en el inicio de la evacuación. Según el informe final de la General Civil Aviation Authority (GCAA) de Emiratos Árabes Unidos, hubo un intervalo considerable entre la detención del avión y la orden formal de evacuación, lo que incrementó el tiempo de pre-movimiento. Además, durante la evacuación se

observaron múltiples casos de pasajeros que intentaron recuperar su equipaje de mano, obstruyendo los pasillos y retrasando el flujo hacia las salidas.

Otro factor crítico fue la presencia de humo denso en varias zonas del avión, que redujo la visibilidad y desorientó a parte de los pasajeros. Las salidas traseras, inicialmente disponibles, quedaron pronto inutilizadas por el fuego, lo que obligó a redirigir el flujo de evacuación hacia las salidas delanteras y sobre las alas, generando cuellos de botella. La tripulación actuó de forma decisiva y logró mantener el control del proceso en condiciones extremas, pero varios informes destacaron que la acumulación de equipaje abandonado en los pasillos y las dudas iniciales en la toma de decisiones aumentaron el riesgo.

Este accidente fue ampliamente documentado mediante vídeos grabados por los propios pasajeros y medios locales, lo que permitió un análisis detallado de la evacuación. Las imágenes muestran una combinación de reacciones: algunos pasajeros actuaron con rapidez y siguieron las instrucciones, mientras que otros se detuvieron a grabar, recoger objetos personales o mirar a su alrededor sin avanzar.

El caso de Emirates 521 es especialmente relevante para este proyecto, ya que muestra con claridad cómo factores ajenos al diseño técnico, como el comportamiento espontáneo del pasaje o la falta de respuesta inmediata, pueden alterar de forma crítica el tiempo de evacuación. Su análisis permite incorporar en las simulaciones variables como la obstrucción dinámica de rutas, la reducción de visibilidad por humo y el retraso en la orden de evacuación.

### **3.3.5 THOMSONFLY FLIGHT 253H (MANCHESTER – 2007)**

El 29 de septiembre de 2007, un Boeing 757-200 operado por Thomsonfly, designado como vuelo 253H, se vio obligado a abortar el despegue en el Aeropuerto de Manchester tras detectar una alerta de incendio en el motor derecho. Durante la frenada de emergencia, el sistema de frenos se sobrecalentó y el motor afectado comenzó a arder, provocando un incendio en el ala derecha de la aeronave mientras esta aún se encontraba en pista.

A bordo viajaban 221 pasajeros y 8 tripulantes. La tripulación inició la evacuación poco después de la detención completa del avión, utilizando las salidas delanteras y sobre las alas. El informe de la Air Accidents Investigation Branch (AAIB) del Reino Unido indica que el proceso de evacuación se completó en un tiempo superior a los 90 segundos, aunque no se registraron víctimas mortales. Varios pasajeros sufrieron heridas leves al utilizar las rampas, y uno de los miembros de la tripulación sufrió quemaduras durante el cierre de una puerta que se había vuelto inestable por el calor.

El tiempo de pre-movimiento fue relativamente prolongado debido a la incertidumbre inicial sobre la naturaleza del incidente. Aunque la tripulación respondió con eficacia, el informe señala que hubo un breve retraso en la orden de evacuación mientras se confirmaba la situación. Durante la evacuación se detectaron obstáculos inesperados: equipaje en los pasillos, ocupantes bloqueando zonas de acceso por indecisión, y dificultades para coordinar el flujo entre las salidas disponibles.

Uno de los puntos más relevantes de este caso fue el comportamiento del fuego, que se extendió rápidamente por la estructura del ala, afectando la operatividad de las salidas sobre las alas en cuestión de segundos. Esto obligó a acelerar la evacuación desde la parte delantera del avión, generando un flujo desequilibrado y congestión en las rampas delanteras.

Este accidente también destacó la importancia del diseño del interior de la cabina en situaciones de evacuación. El estrechamiento de pasillos en ciertas zonas y la colocación de carritos de servicio en posiciones intermedias provocaron pequeños cuellos de botella que incrementaron el tiempo total necesario para desalojar el avión.

El caso de Thomsonfly 253H resulta útil como referencia en este trabajo para modelar escenarios donde existe una amenaza estructural localizada (como el fuego en un ala), tiempos de reacción inciertos, y una evacuación que, aunque exitosa, se aleja del rendimiento previsto en condiciones de certificación. En particular, permite estudiar el impacto del bloqueo parcial de salidas, la aparición repentina de humo, y la necesidad de redistribuir el flujo de ocupantes en tiempo real.

### **3.3.6 QANTAS FLIGHT 32 (SINGAPUR – 2010)**

El 4 de noviembre de 2010, el vuelo QF32 de Qantas, operado por un Airbus A380-800, sufrió una explosión en el motor número 2 poco después de despegar del Aeropuerto de Singapur-Changi con destino a Sídney. El fallo fue provocado por la ruptura de un disco en el motor Rolls-Royce Trent 900, lo que generó una pérdida múltiple de sistemas y provocó daños estructurales severos en el ala y el sistema hidráulico.

A bordo se encontraban 440 pasajeros y 29 miembros de la tripulación. A pesar de la gravedad de la avería, la aeronave pudo regresar a Singapur y realizar un aterrizaje de emergencia controlado tras aproximadamente 100 minutos en el aire. Durante este tiempo, la tripulación gestionó múltiples alertas de fallo en cascada, logrando mantener el control del avión en condiciones extremas. No se produjo un incendio a bordo ni se declaró una situación que requiriera evacuación inmediata tras el aterrizaje.

La evacuación no se ejecutó de forma automática al tocar tierra, sino que se optó por mantener a los pasajeros a bordo durante más de una hora tras el aterrizaje, siguiendo un protocolo conservador. La decisión fue tomada debido a la presencia de combustible aún no quemado, que podría haber supuesto un riesgo si se procedía a una evacuación rápida y masiva. Finalmente, los pasajeros desembarcaron de manera ordenada por pasarelas, sin utilizar rampas de emergencia.

Aunque no se trató de una evacuación de emergencia clásica, el caso de Qantas 32 es de gran interés para este trabajo por varias razones. En primer lugar, demuestra que no todas las situaciones críticas desembocan en evacuaciones inmediatas, y que en ciertos casos una evacuación precipitada podría incluso aumentar el riesgo. En segundo lugar, este incidente pone de manifiesto la complejidad de la toma de decisiones en cabina cuando existen múltiples amenazas potenciales, algunas visibles y otras no. Por último, permite reflexionar sobre el impacto del tamaño de la aeronave y la capacidad de la tripulación para mantener el control logístico de más de 450 personas en una situación prolongada de incertidumbre.

El análisis de este caso complementa los anteriores desde un ángulo distinto, centrado en la dimensión operativa y organizativa más que en la respuesta física del pasaje. Para las simulaciones, ofrece un marco para estudiar qué ocurre si se retrasa la orden de evacuación, si se opta por una evacuación parcial, o si los flujos se canalizan de forma muy controlada en lugar de rápida y masiva.

### ***3.4 LIMITACIONES DE LOS TRABAJOS EXISTENTES***

A pesar del volumen de investigaciones y herramientas disponibles en el ámbito de la evacuación de aeronaves, existen todavía importantes limitaciones que afectan tanto a la validez como a la aplicabilidad práctica de muchos de los estudios. Estas limitaciones pueden agruparse en tres grandes bloques: condiciones de simulación, simplificaciones del comportamiento humano y escasez de datos empíricos contrastados.

En primer lugar, las condiciones de simulación en las que se prueban las aeronaves para su certificación están muy lejos de representar escenarios reales de emergencia. Las pruebas impuestas por la FAA y otros organismos se realizan en entornos controlados, con voluntarios entrenados, sin humo, sin pánico ni obstáculos inesperados. Esto puede dar lugar a una falsa sensación de seguridad, ya que en condiciones reales los tiempos de evacuación suelen incrementarse de forma significativa.

Por otro lado, muchos estudios y modelos numéricos simplifican excesivamente el comportamiento humano, asumiendo reacciones racionales, ausencia de interferencias y cumplimiento estricto de las instrucciones. Sin embargo, la experiencia en accidentes reales ha demostrado que la realidad es muy distinta: los pasajeros pueden bloquear pasillos buscando sus pertenencias, desobedecer indicaciones, entrar en estado de shock o mostrar conductas impredecibles. Estas variables, aunque difíciles de cuantificar, son esenciales para comprender la dinámica real de una evacuación.

Además, la mayoría de las herramientas de simulación —incluyendo las más avanzadas como Pathfinder o AirEXODUS— se apoyan en parámetros extraídos de contextos civiles

o marítimos, como la normativa IMO, lo que puede no ser totalmente representativo del entorno aeronáutico. Aunque estas bases de datos permiten definir perfiles de ocupantes con cierto realismo (velocidades, dimensiones, tiempos de reacción), siguen sin incorporar adecuadamente aspectos como diferencias culturales, estados emocionales o interacción social durante una emergencia.

Otra limitación clave es la escasez de datos empíricos fiables. Los informes de evacuaciones reales son relativamente pocos y, en muchos casos, incompletos o no sistematizados. Esto dificulta la validación de modelos y la mejora de las hipótesis utilizadas en los cálculos. Además, existen pocos estudios que analicen la evacuación más allá del tiempo total, sin entrar en el detalle de cuellos de botella, fallos de coordinación o distribución del flujo entre salidas.

Por último, muchas investigaciones se centran exclusivamente en el diseño físico de la aeronave —número y ubicación de salidas, pasillos, rampas— sin considerar de forma integrada la actuación de la tripulación, los sistemas de señalización o los procedimientos de emergencia, elementos que también son determinantes en el éxito de una evacuación.

Estas limitaciones evidencian la necesidad de seguir avanzando en modelos más realistas, interdisciplinarios y validados empíricamente, que combinen datos técnicos con conocimiento del comportamiento humano. En este contexto, el presente trabajo propone un enfoque híbrido que parte de la normativa existente, incorpora perfiles de ocupantes basados en guías IMO, utiliza simulaciones detalladas con Pathfinder y contrasta los resultados con accidentes reales. Todo ello con el objetivo de aportar una visión más completa y rigurosa sobre la eficiencia de las evacuaciones en aviones comerciales.

En base a estas limitaciones identificadas, los capítulos siguientes profundizarán en la caracterización detallada de los ocupantes, la elección de los modelos de avión representativos y la definición de escenarios realistas de evacuación que permitan contrastar los resultados simulados con los criterios normativos actuales.

## **Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

### **4.1 JUSTIFICACIÓN**

El análisis del estado de la cuestión ha permitido constatar que, si bien existen herramientas avanzadas de simulación y una normativa clara en torno a la evacuación de aeronaves, la mayoría de los trabajos actuales se limitan a validar el cumplimiento de los requisitos reglamentarios en escenarios ideales. En particular, las simulaciones suelen centrarse en demostrar que el tiempo de evacuación es inferior a los 90 segundos exigidos por organismos como la FAA, asumiendo condiciones favorables y sin incorporar factores propios de situaciones reales de emergencia.

Este proyecto nace de la necesidad de explorar las limitaciones de ese enfoque. Para ello, se utilizarán modelos representativos de aeronaves comerciales ya certificadas, evaluando su comportamiento bajo condiciones de evacuación más exigentes y realistas. El objetivo es analizar si el cumplimiento normativo se mantiene cuando se introducen variables no contempladas habitualmente en los ensayos de certificación.

Entre los aspectos que se busca analizar se encuentran, por ejemplo, la influencia de obstáculos en pasillos y salidas, como maletas o carritos de servicio; el impacto del comportamiento humano ante el estrés, incluyendo el tiempo de reacción, el pánico o la recogida de equipaje; la presencia de pasajeros con movilidad reducida o necesidades especiales y su efecto sobre el flujo de evacuación; y la respuesta del sistema ante el bloqueo parcial de salidas o rutas de escape. Además, se contempla la comparación entre diferentes configuraciones de cabina y diseños estructurales para estudiar su influencia en la eficiencia de evacuación.

Estas cuestiones, aunque conocidas en el ámbito de la seguridad, no han sido suficientemente abordadas mediante simulación sistemática. El presente trabajo pretende llenar ese vacío, aportando un análisis detallado y proponiendo recomendaciones que puedan ser útiles para

la mejora del diseño interior de las aeronaves y la actualización de los protocolos de evacuación.

## **4.2 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este proyecto es analizar, mediante simulaciones numéricas, el proceso de evacuación en aeronaves comerciales, evaluando su comportamiento en escenarios que se alejan de las condiciones ideales contempladas en los ensayos de certificación. Se busca así comprobar hasta qué punto el cumplimiento del tiempo máximo establecido por la normativa internacional se mantiene cuando se introducen variables que imitan situaciones reales de emergencia.

Para lograr este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Revisar en profundidad la normativa vigente sobre evacuación de aeronaves, prestando especial atención a los requisitos establecidos por organismos como la FAA, la OACI y la EASA.
- Recopilar y analizar incidentes reales en los que se haya producido una evacuación completa, con el fin de identificar factores críticos que influyen en los tiempos de salida y en la eficacia del proceso.
- Seleccionar varios modelos de aeronaves representativos y construir sus respectivas geometrías en un entorno de simulación, respetando las características técnicas más relevantes de cada uno.
- Diseñar escenarios de evacuación con distintos perfiles de pasajeros, niveles de ocupación, bloqueos parciales de salidas, y presencia de obstáculos o condiciones adversas, introduciendo parámetros realistas como los tiempos de reacción, velocidades variables o limitaciones físicas.

- Ejecutar las simulaciones y comparar los resultados obtenidos con los valores establecidos por la normativa, analizando diferencias entre modelos, configuraciones y condiciones.
- Elaborar recomendaciones basadas en los resultados, orientadas a la mejora del diseño interior, la distribución de salidas o la gestión de la evacuación en situaciones no contempladas por los ensayos de certificación.

Este enfoque permite no solo validar la seguridad de aeronaves ya certificadas, sino también poner a prueba sus límites, proporcionando información útil para fabricantes, operadores y autoridades del sector aeronáutico.

### **4.3 METODOLOGÍA**

El desarrollo del proyecto se ha estructurado en una serie de fases que combinan la revisión documental, la modelización digital y el análisis numérico mediante simulación. Esta metodología busca asegurar un enfoque riguroso y progresivo que permita obtener resultados sólidos y comparables entre diferentes escenarios.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una revisión de la normativa internacional sobre evacuación de aeronaves, con especial atención a los criterios establecidos por la FAA, la OACI y la EASA. Paralelamente, se han analizado estudios técnicos e informes de accidentes reales que han derivado en evacuaciones completas, con el objetivo de identificar patrones de comportamiento y tiempos de respuesta verificados en situaciones reales.

A partir de esta base teórica, se han seleccionado varios modelos de aeronaves comerciales representativos. Para cada uno de ellos se ha desarrollado una geometría aproximada dentro del entorno de simulación del software Pathfinder, teniendo en cuenta dimensiones, distribución de salidas y capacidad de ocupación. Sobre estos modelos se han definido distintos escenarios de evacuación, combinando configuraciones estándar con situaciones más exigentes que incluyen bloqueos parciales de salidas, presencia de pasajeros con movilidad reducida, tiempos de reacción variables y obstáculos en las rutas de escape.

Las simulaciones han sido ejecutadas en Pathfinder, un software basado en modelos de agentes individuales que permite representar de forma realista el comportamiento de los ocupantes durante una evacuación. Este entorno facilita el ajuste de múltiples parámetros y permite analizar métricas como el tiempo total de evacuación, los cuellos de botella, la distribución de flujos y la influencia de cada variable introducida.

Finalmente, los resultados obtenidos se han comparado con los valores límite establecidos por la normativa, permitiendo identificar situaciones críticas, evaluar la robustez del diseño frente a condiciones adversas y plantear recomendaciones específicas para la mejora de los procedimientos o el diseño de cabina. Esta metodología ha sido diseñada para permitir la reproducción del estudio con otros modelos de aeronave o condiciones futuras, lo que refuerza su aplicabilidad dentro del sector aeronáutico.

## **Capítulo 5. SISTEMA DE SIMULACIÓN Y ESCENARIOS PLANTEADOS**

Una vez establecidos los fundamentos normativos, analíticos y estadísticos sobre los que se sustenta este trabajo, el siguiente paso ha consistido en trasladar esa base teórica a un entorno de simulación digital que permita analizar el comportamiento de evacuación de diferentes modelos de aeronaves comerciales bajo condiciones diversas.

Este capítulo describe el proceso de construcción del sistema de simulación, desde la selección de los modelos de avión utilizados hasta la definición detallada de los escenarios que serán objeto de estudio. El trabajo se ha desarrollado empleando el software Pathfinder, una herramienta ampliamente utilizada para el modelado de evacuaciones en entornos tridimensionales. Su enfoque basado en agentes individuales permite simular comportamientos complejos y observar la evolución de la evacuación en tiempo real.

Con el fin de evaluar el rendimiento de diferentes configuraciones, se han creado múltiples escenarios para cada modelo de aeronave, combinando condiciones ideales con situaciones más realistas o desfavorables. Estos escenarios incluyen, entre otros, bloqueos parciales de salidas, introducción de obstáculos en las rutas de evacuación, distribución heterogénea de los ocupantes y variabilidad en los tiempos de reacción.

Además, se han establecido criterios homogéneos de comparación entre simulaciones, lo que permite analizar de forma rigurosa el impacto de cada variable en los resultados. Los parámetros de configuración de los ocupantes, las propiedades de las geometrías y las características de cada modelo se detallan en los apartados siguientes.

## 5.1 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE MODELOS DE AERONAVE

### 5.1.1 SELECCIÓN DE MODELOS DE AVIÓN

En esta sección se detallan los modelos de avión escogidos para el estudio, seleccionados por representar diferentes configuraciones de evacuación:

- **Boeing 737-700:** avión de fuselaje estrecho con capacidad media, utilizado comúnmente en rutas de corto y medio radio.
- **Embraer 175:** avión regional bimotor, de capacidad reducida y configuración estrecha, utilizado principalmente en rutas cortas.
- **Boeing 777-300:** avión de largo radio y fuselaje ancho, con alta capacidad y múltiples salidas de evacuación.

Se han recopilado las siguientes características técnicas relevantes: número de salidas de emergencia, ancho de las mismas y ocupación máxima. Estos datos se presentan en la Tabla 4:

Modelo de avión	Nº pasajeros (N)	Nº salidas (S)	Ancho salida (m)	Ancho total de evacuación ( $A = \sum W_i$ ) (m)
<b>Boeing 737-700</b>	126	2 salidas de 0,61 m + 4 de 0,80 m	$(2 \times 0,61) + (4 \times 0,80)$	4,42
<b>Embraer 175</b>	70	4 salidas de 0,61 m	$4 \times 0,61$	2,44
<b>Boeing 777-300</b>	310	2 salidas de 0,61 m + 8 de 0,80 m	$(2 \times 0,61) + (8 \times 0,80)$	8,82

*Tabla 5. Cálculo del ancho total de evacuación según el número y tipo de salidas*

En el diseño de una aeronave, el ancho de los pasillos interiores también constituye un parámetro esencial para garantizar una evacuación eficiente en caso de emergencia. Esta dimensión influye directamente en la fluidez del movimiento de los ocupantes hacia las salidas de emergencia, especialmente en situaciones de alta densidad o congestión. A continuación, se presentan las anchuras mínimas de pasillo para las diferentes clases disponibles en los tres modelos analizados: el Boeing 777-300, el Boeing 737-700 y el Embraer 175. Estas medidas se corresponden con configuraciones habituales ofrecidas por los fabricantes o documentadas en manuales técnicos y de planificación aeroportuaria.

<b>Modelo de avión</b>	<b>Clase/Cabina</b>	<b>Ancho de pasillo mínimo (m)</b>
<b>Boeing 777-300</b>	First Class	0,92
	Business Class	0,90
	Economy Class	0,56
<b>Boeing 737-700</b>	Economy Plus	0,90
	Economy Class	0,66
<b>Embraer 175</b>	Economy Plus	0,66
	Economy Class	0,66

*Tabla 6. Anchura mínima de los pasillos según clase y modelo de aeronave*

### **5.1.2 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO ANALÍTICO**

Antes de llevar a cabo las simulaciones detalladas con el software Pathfinder, se ha realizado una primera estimación del tiempo total de evacuación mediante un enfoque analítico simplificado. Este tipo de cálculo, aunque menos preciso que una simulación computacional, permite obtener una aproximación inicial sobre si un determinado modelo de aeronave

cumple con los requisitos normativos de evacuación, especialmente el tiempo máximo de 90 segundos exigido por la FAA incluso en condiciones desfavorables.

El modelo analítico parte de la consideración de que la evacuación puede descomponerse en dos fases principales: el tiempo que tarda un pasajero en iniciar su movimiento tras una señal de evacuación (tiempo de pre-movimiento), y el tiempo que transcurre hasta que todos los ocupantes atraviesan las salidas de emergencia (flujo de evacuación). Esta aproximación permite evaluar de forma sencilla el efecto que tienen variables como el número de ocupantes, el ancho total disponible para la evacuación y la capacidad de flujo de las salidas.

No obstante, para mejorar la validez de esta estimación y aproximarla a las condiciones reales observadas en las simulaciones, se han introducido ciertos factores correctores que permiten tener en cuenta elementos como la congestión en los pasillos, la densidad de ocupación o la configuración geométrica del avión. A continuación, se detallan las ecuaciones empleadas y los ajustes realizados sobre los parámetros tradicionales del modelo.

La estimación del tiempo total de evacuación se ha realizado utilizando una expresión que combina de forma secuencial los principales componentes que intervienen en el proceso:

$$TET = Tpm + Tflow + penalizacion$$

Donde:

- TET representa el tiempo estimado total de evacuación, medido en segundos.
- Tpm es el tiempo de pre-movimiento, es decir, el lapso desde que se da la orden de evacuar hasta que los ocupantes inician su desplazamiento. Este parámetro puede variar en función de la naturaleza del incidente, la preparación de la tripulación o el comportamiento de los pasajeros.
- Tflow corresponde al tiempo necesario para que todos los ocupantes crucen las salidas de emergencia disponibles, considerando un flujo constante de paso por unidad de ancho.

- Penalización es un término corrector que se ha introducido para reflejar de forma aproximada los efectos de la acumulación de pasajeros, las distancias recorridas hasta las salidas y las limitaciones geométricas que no se contemplan explícitamente en un modelo puramente teórico.

Esta formulación permite obtener una estimación del rendimiento del sistema de evacuación sin necesidad de realizar simulaciones complejas, sirviendo como base de comparación con los resultados obtenidos posteriormente mediante Pathfinder. En los siguientes apartados se detalla cómo se ha definido cada uno de estos términos y qué valores se han adoptado para cada modelo de aeronave analizado.

El tiempo de flujo representa el periodo requerido para que todos los ocupantes atraviesen las salidas de emergencia disponibles, una vez iniciada la evacuación. Para su estimación se ha empleado la siguiente expresión:

$$T_{flow} = \frac{N}{A * Q}$$

Donde:

- **N** es el número total de ocupantes a evacuar,
- **Q** es el flujo efectivo de evacuación, expresado en personas por metro y segundo (pers/m·s),
- **A** es el ancho total de evacuación, es decir, la suma del ancho útil de todas las salidas operativas.

En versiones más simples de este modelo, se suele emplear un valor estándar de  $Q=1,33$  pers/m·s, correspondiente al máximo flujo teórico sin congestión. Sin embargo, este valor puede sobreestimar la capacidad real de evacuación en escenarios donde se producen acumulaciones o cuellos de botella. Para mejorar la fidelidad del cálculo, se ha optado por ajustar el valor de **Q** en función de la configuración y densidad de ocupación de cada aeronave, tal y como se resume a continuación:

- **Embraer 175:** flujo corregido de  $Q=1,30$  pers/m·s. Se asume un flujo próximo al ideal, dada la baja ocupación y la sencillez de la configuración interna.
- **Boeing 737-700:** flujo corregido de  $Q=1,20$  pers/m·s. Se reduce ligeramente el flujo por tratarse de un avión de mayor densidad y pasillos más largos.
- **Boeing 777-300:** flujo corregido de  $Q=1,00$  pers/m·s. En este caso, la elevada ocupación y la complejidad del diseño justifican una corrección más severa del flujo teórico.

Los valores del ancho total de evacuación  $A$  se han obtenido a partir de las dimensiones reales de las salidas de emergencia y su número en cada modelo, asumiendo que todas ellas son operativas en esta fase del análisis.

Este enfoque permite estimar con mayor realismo el tiempo necesario para que todos los pasajeros puedan atravesar las salidas, teniendo en cuenta limitaciones de densidad y geometría que suelen presentarse en evacuaciones reales.

El tiempo de pre-movimiento, representado por  $T_{pm}$ , corresponde al intervalo que transcurre entre el momento en que se emite la señal de evacuación y el inicio efectivo del desplazamiento por parte de los ocupantes. Este parámetro está influenciado por diversos factores, como el estado de alerta de los pasajeros, la presencia y actuación de la tripulación, el nivel de ruido o confusión en cabina, y la claridad de las instrucciones recibidas.

Una de las principales limitaciones del modelo analítico clásico es que no contempla de forma explícita el efecto de la congestión, la longitud de los pasillos, las zonas de acumulación de ocupantes ni la existencia de cuellos de botella a lo largo del recorrido. Tampoco incorpora diferencias en las rutas de evacuación ni en las posibles interacciones entre flujos provenientes de distintas zonas del avión.

Para corregir parcialmente estas carencias sin recurrir aún a simulaciones detalladas, se ha introducido un término de penalización adicional que pretende reflejar de forma empírica el retardo acumulado debido a estas condiciones. Esta penalización se ha modelado como

proporcional al número de pasajeros por salida operativa, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Penalización} = k \cdot \frac{N}{S}$$

Donde:

- N es el número total de ocupantes,
- S es el número de salidas de emergencia operativas consideradas en el modelo,
- k es un coeficiente empírico cuyo valor se ha fijado en 0,05 segundos por persona por salida, en base a estudios previos y comparaciones con resultados simulados.

Este término corrector permite aumentar ligeramente el tiempo total de evacuación en función de la carga de ocupación relativa que soporta cada salida, incorporando de forma indirecta la complejidad de la geometría y la distribución del flujo. Si bien no reemplaza a una simulación detallada, su inclusión mejora de forma notable la concordancia entre los valores estimados analíticamente y los obtenidos por medios numéricos.

### **5.1.3 RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON NORMATIVA FAA**

Para este cálculo analítico se ha considerado un tiempo de pre-movimiento medio de 30 segundos, que representa el intervalo de retardo que transcurre desde que se da la orden de evacuación hasta que los ocupantes inician su desplazamiento hacia las salidas. Esta decisión no es arbitraria: se ha adoptado como valor representativo de las condiciones reales de respuesta de los pasajeros ante una situación de emergencia, considerando tanto el tiempo de reacción individual como el tiempo que requiere el reconocimiento de la señal de evacuación o las instrucciones del personal de cabina.

Este valor medio de 30 segundos está alineado con los tiempos de pre-movimiento que se aplicarán posteriormente en las simulaciones numéricas, donde cada ocupante recibirá un

retardo individual asignado mediante una distribución de probabilidad de tipo log-normal, tal y como se explicará en los capítulos siguientes.

La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos tras aplicar la metodología descrita, incorporando ese tiempo de pre-movimiento junto con los factores de flujo ajustados y la penalización adicional por acumulación en salidas:

<b>Modelo de avión</b>	<b>Ocupantes (N)</b>	<b>Ancho total evacuación (m)</b>	<b>Salidas (S)</b>	<b>Flujo de evacuación (Q) [pers/m·s]</b>	<b>Tiempo estimado (s)</b>	<b>¿Cumple normativa FAA (<math>\leq 90</math>s)?</b>
<b>Embraer 175</b>	70	2,44	4	1,30	52,9	Sí
<b>Boeing 737-700</b>	126	4,42	6	1,20	54,8	Sí
<b>Boeing 777-300</b>	310	8,82	10	1,00	66,7	Sí

*Tabla 7. Resultados de los cálculos analíticos*

## **5.2 ETAPAS DEL PROCESO DE SIMULACIÓN**

Las simulaciones de evacuación se llevaron a cabo siguiendo una secuencia sistemática que garantizara la coherencia y comparabilidad de los resultados obtenidos entre los diferentes modelos de aeronave. A continuación, se describen las principales fases del proceso:

1. **Modelado geométrico:** Se construyó manualmente la geometría interna de cada avión a partir de seatmaps obtenidos de fuentes abiertas en internet. Este proceso se realizó directamente en Pathfinder, trazando los contornos del fuselaje y añadiendo

manualmente los elementos interiores: filas de asientos, zonas de servicio, baños y salidas de emergencia. Aunque inicialmente se intentó generar los modelos a partir de archivos CAD, las proporciones de los asientos y el espacio entre filas no resultaban realistas, por lo que se optó por el modelado manual para un mayor control sobre la disposición interna.

2. **Asignación de perfiles de ocupantes:** Para representar la población a bordo, se utilizaron los perfiles de ocupantes proporcionados por defecto en Pathfinder, basados en la guía IMO MSC.1/Circ.1533. Estos perfiles incluyen información relativa a la velocidad de desplazamiento, dimensiones físicas y comportamiento general. Se estableció una distribución mixta por sexo y edad, manteniendo una proporción razonable entre hombres, mujeres y pasajeros jóvenes, siguiendo criterios realistas inspirados en la documentación técnica.
3. **Configuración de parámetros de simulación:** Las simulaciones se realizaron en modo *Steering*, que permite un comportamiento más realista de los ocupantes, incluyendo la evitación de obstáculos y la adaptación dinámica a las condiciones del entorno. Se activaron todas las salidas disponibles en cada modelo y se distribuyeron los ocupantes de forma uniforme a lo largo de la cabina. No se incluyeron factores externos como humo, iluminación reducida ni bloqueos dinámicos de salidas.
4. **Ejecución de simulaciones:** Una vez definidos los escenarios, se procedió a ejecutar las simulaciones para cada modelo de avión: Embraer 175, Boeing 737-700 y Boeing 777-300. Se exportaron los resultados principales, incluyendo el tiempo total de evacuación, la evolución temporal del número de ocupantes evacuados y la ocupación por zonas.
5. **Validación preliminar de resultados:** Los tiempos de evacuación obtenidos fueron contrastados con el umbral de 90 segundos definido por la FAA. Esta comparación permitió identificar, en una primera instancia, qué modelos cumplían con los requisitos reglamentarios y cuáles requerirían un análisis más profundo de posibles puntos críticos.

El conjunto de estas etapas proporciona una base sólida para la evaluación cuantitativa de los resultados que se presenta en el siguiente capítulo.

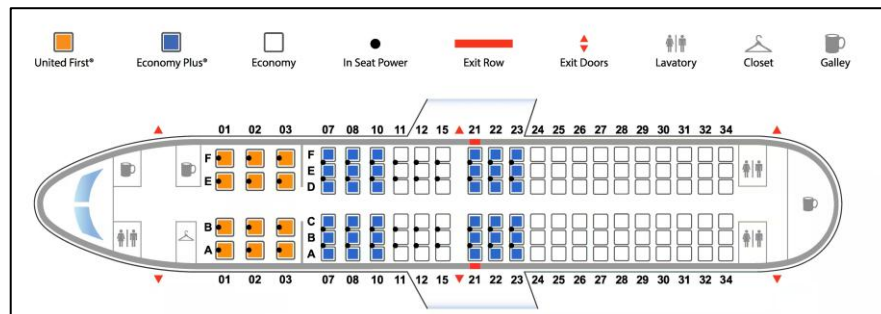
### **5.3 DISEÑO GEOMÉTRICO EN PATHFINDER**

Para la realización de las simulaciones de evacuación, se ha empleado el software Pathfinder, ampliamente utilizado en el ámbito de la seguridad en emergencias por su capacidad para modelar con precisión el movimiento de ocupantes en espacios cerrados. En este apartado se describe el proceso de construcción geométrica de los modelos de aeronave utilizados.

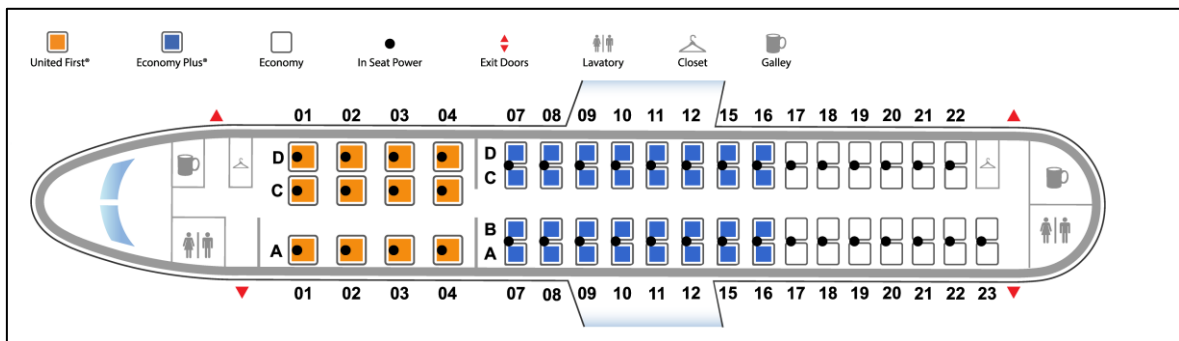
Los modelos seleccionados para el estudio han sido el Boeing 737-700, el Embraer 175 y el Boeing 777-300, todos ellos con configuraciones y dimensiones significativamente distintas que permiten analizar diferentes escenarios de evacuación. Para representar de forma realista el interior de estas aeronaves, se han utilizado como bases planos de distribución de asientos (seatmaps) obtenidos de fuentes oficiales y páginas especializadas en aviación. Estas imágenes fueron importadas en Pathfinder como geometría de referencia y ajustadas a escala dentro del plano de dibujo.



*Ilustración 4. Seatmap de referencia del modelo Boeing 777-300*



*Ilustración 5. Seatmap de referencia del modelo Boeing 737-700*



*Ilustración 6. Seatmap de referencia del modelo Embraer 175*

A partir de estas referencias, se ha procedido a trazar manualmente el contorno del fuselaje, definiendo el recinto donde se desarrolla la evacuación. Este contorno se ha modelado como una única “room” (habitación), según la nomenclatura de Pathfinder, que constituye la superficie transitable por los ocupantes. Dentro de este recinto se han definido los obstáculos fijos presentes en la cabina: filas de asientos, baños, compartimentos de servicio y almacenamiento. Estos se han modelado como “holes” (agujeros) u “obstructions”,

generando áreas de exclusión en las que el movimiento de los ocupantes está restringido, conforme al comportamiento predeterminado del motor de navegación del software.

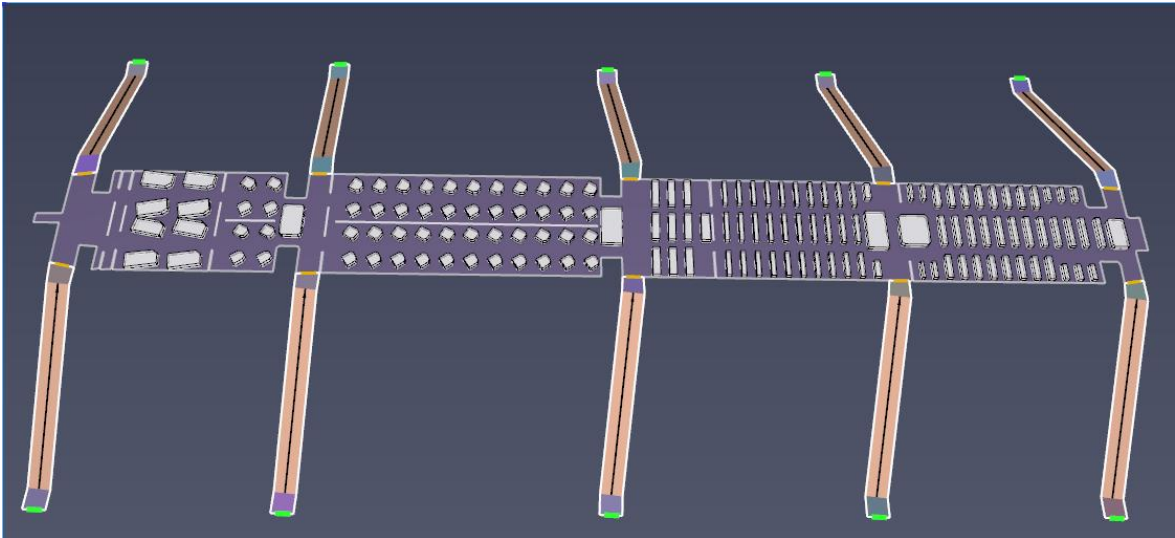
Las salidas de emergencia de cada modelo han sido igualmente representadas como “doors”, prestando especial atención a su ubicación y dimensiones, ya que son determinantes para el cálculo de tiempos de evacuación. Asimismo, se ha respetado la simetría típica de estos aviones comerciales, replicando los obstáculos y pasillos en ambas mitades del fuselaje.

Además del modelado interior de la cabina, en cada aeronave se han incorporado las rampas de evacuación que permiten el descenso de los ocupantes desde el fuselaje hasta el suelo. Estas rampas, fundamentales para garantizar una evacuación rápida y segura, han sido modeladas en Pathfinder como planos inclinados conectados directamente a las puertas de salida. Para cada avión se han definido dimensiones y pendientes específicas, representativas de las configuraciones reales de rampa utilizadas en aeronaves comerciales, respetando las limitaciones impuestas por normativa en cuanto a ángulos máximos de inclinación.

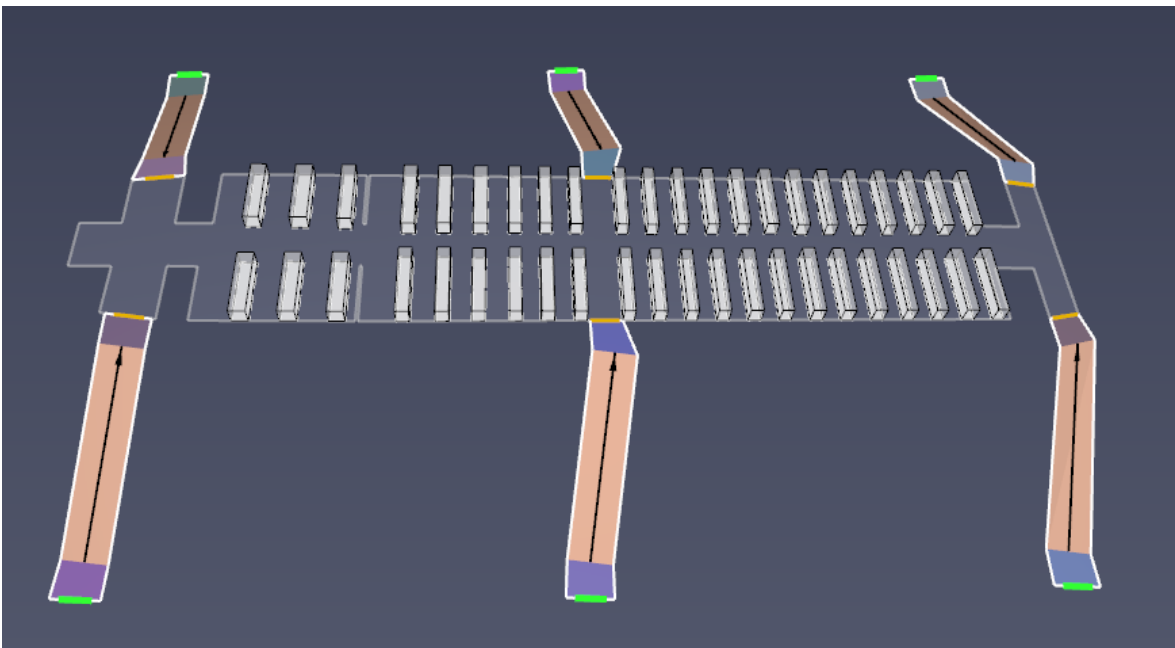
<b>Modelo de avión</b>	<b>Inclinación (°)</b>	<b>Longitud de la rampa (m)</b>
<b>Embraer 175</b>	27°	5,0 m
<b>Boeing 737-700</b>	28°	5,5 m
<b>Boeing 777-300</b>	30°	11,0 m

*Tabla 8. Características de las rampas de evacuación*

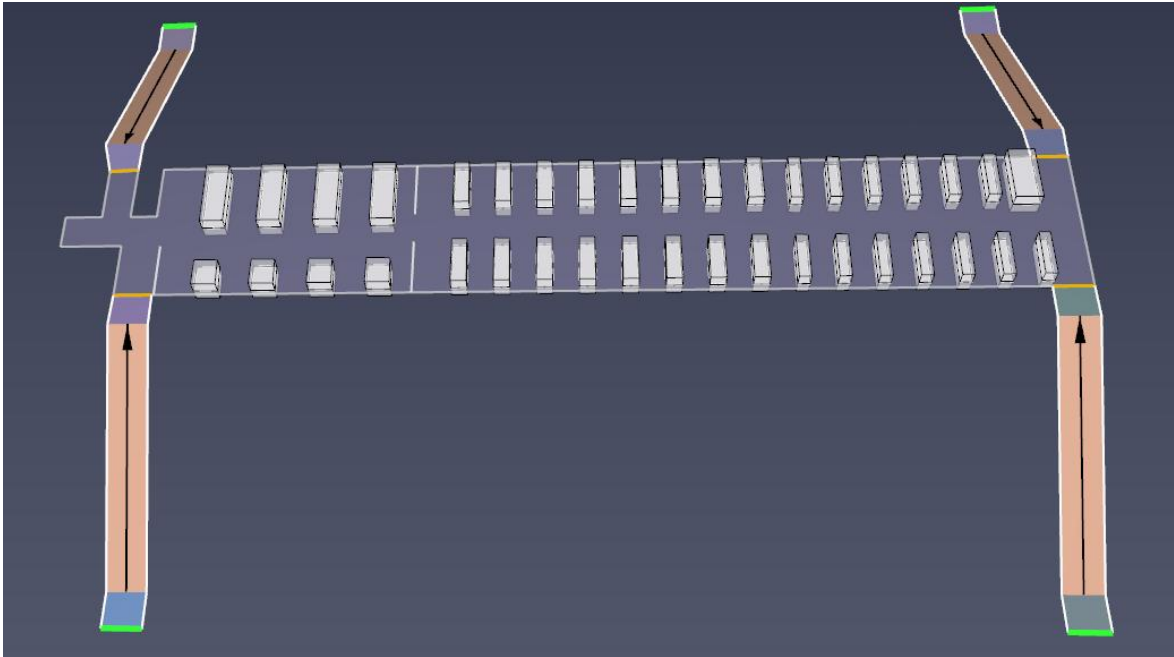
A continuación, se presentan las imágenes del modelado geométrico de cada una de las aeronaves en el entorno de Pathfinder. En ellas se puede observar la distribución interna de la cabina, incluyendo los obstáculos fijos, pasillos y salidas de emergencia, tal y como fueron implementados en las simulaciones.



*Ilustración 7. Modelo geométrico del Boeing 777-300 en Pathfinder.*



*Ilustración 8. Modelo geométrico del Boeing 737-700 en Pathfinder.*



*Ilustración 9. Modelo geométrico del Embraer 175 en Pathfinder.*

## **5.4 CARACTERIZACIÓN DE OCUPANTES**

Una de las limitaciones más relevantes de las simulaciones de evacuación empleadas en los procesos de certificación de aeronaves es la simplificación del comportamiento y las capacidades físicas de los ocupantes. En la mayoría de los ensayos y modelos computacionales, los pasajeros se representan como un conjunto homogéneo de agentes con velocidades y reacciones similares, lo cual no refleja con precisión la diversidad real de usuarios que viajan en vuelos comerciales.

En este trabajo se ha optado por construir una representación más realista y diversa de los ocupantes, incorporando múltiples perfiles con características físicas, funcionales y conductuales diferenciadas. Esta caracterización resulta esencial para analizar de forma rigurosa cómo influyen aspectos como la edad, el estado físico o la movilidad reducida en la eficacia del proceso de evacuación.

La definición de los perfiles se ha basado tanto en datos estadísticos disponibles sobre la composición demográfica del pasaje en rutas comerciales, como en parámetros técnicos extraídos de estudios previos y manuales de referencia sobre dinámica de evacuación. Se han considerado variables como la velocidad de desplazamiento, el tiempo de reacción y el espacio ocupado.

El presente apartado describe los criterios seguidos para clasificar a los ocupantes, la proporción estimada de cada perfil dentro del pasaje, y los parámetros específicos que se han utilizado para representar su comportamiento en las simulaciones. Esta caracterización será fundamental para evaluar con mayor precisión la robustez de las configuraciones planteadas en los escenarios de evacuación.

#### **5.4.1 CLASIFICACIÓN POR PERFIL FÍSICO Y FUNCIONAL**

En este apartado se definen los perfiles de ocupantes utilizados en las simulaciones, atendiendo a sus características físicas y funcionales. El objetivo es representar de forma realista la diversidad demográfica presente a bordo de una aeronave comercial y analizar cómo estas diferencias individuales afectan al comportamiento colectivo durante una evacuación.

Los perfiles empleados han sido seleccionados mayoritariamente a partir de la biblioteca predefinida del software Pathfinder, la cual se basa en las directrices técnicas de la guía IMO MSC.1/Circ.1533. Esta guía proporciona parámetros de referencia contrastados para distintos grupos poblacionales en función del sexo y del rango de edad. En concreto, se han utilizado los siguientes perfiles: mujeres menores de 30 años, mujeres entre 30 y 50 años, mujeres mayores de 50 años, hombres menores de 30 años, hombres entre 30 y 50 años, y hombres mayores de 50 años. Además, se ha creado manualmente un perfil infantil específico, denominado Children, con el fin de representar a los pasajeros más jóvenes, ya que no se encuentra disponible por defecto en la biblioteca del programa.

Cada uno de estos perfiles ha sido caracterizado mediante un conjunto de parámetros relevantes desde el punto de vista de la dinámica de evacuación: velocidad de movimiento,

anchura de los hombros, altura corporal, factor de reducción en situaciones de congestión y coeficiente de adaptación postural en zonas estrechas. Siempre que ha sido posible, los valores utilizados provienen de estudios empíricos, guías técnicas o publicaciones especializadas. Cuando la información disponible lo permite, los parámetros se han modelado mediante distribuciones normales, incluyendo su media, desviación estándar y rangos mínimos y máximos.

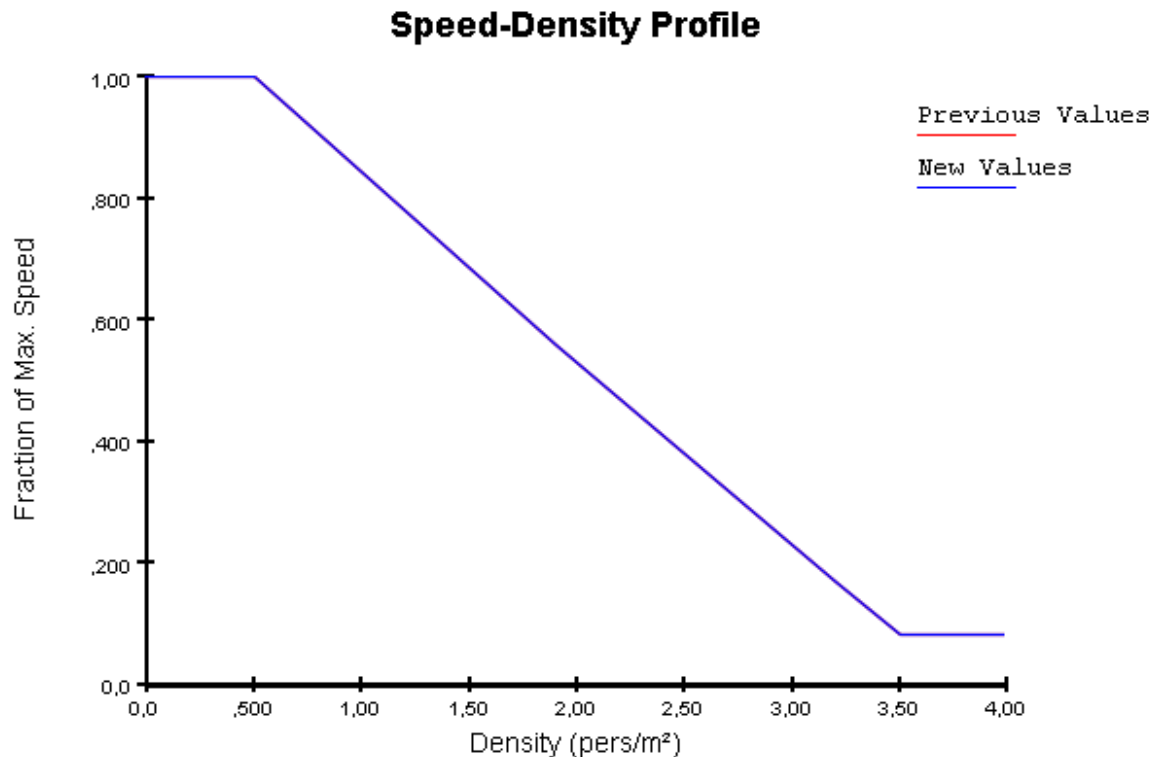
Para definir la velocidad de desplazamiento de los ocupantes, Pathfinder permite asignar diferentes tipos de distribución estadística. En este caso, se ha empleado una distribución uniforme, lo que significa que la velocidad de cada agente se selecciona aleatoriamente dentro de un rango predefinido, manteniendo igual probabilidad entre los valores mínimo y máximo.

Además de los parámetros individuales asignados a cada perfil, el comportamiento dinámico de los ocupantes en las simulaciones se ha modelado aplicando una relación entre velocidad y densidad basada en curvas empíricas. En situaciones reales de evacuación, la velocidad de desplazamiento de las personas no es constante, sino que disminuye progresivamente conforme aumenta la densidad de ocupantes en el entorno inmediato. Para representar este efecto en Pathfinder, se ha empleado una Speed-Density Profile como la que se muestra en la siguiente figura.

Como puede observarse en la siguiente gráfica, esta función define la fracción de velocidad máxima que puede alcanzar un ocupante en función de la densidad local (en personas por metro cuadrado). A bajas densidades ( $0,5 \text{ pers/m}^2$ ), los ocupantes pueden desplazarse al 100 % de su velocidad máxima. Sin embargo, cuando la densidad se incrementa —por ejemplo, a  $1,9 \text{ pers/m}^2$ — la velocidad se reduce al 55,8 %. A densidades críticas (superiores a  $3,2 \text{ pers/m}^2$ ), el desplazamiento se vuelve muy lento, alcanzando apenas un 8 % de la velocidad original.

Esta función, integrada en Pathfinder, permite simular con mayor realismo la formación de cuellos de botella y las limitaciones de movilidad en zonas congestionadas. Su aplicación resulta especialmente útil en pasillos estrechos, salidas o puntos de acumulación como las

puertas sobre las alas. La siguiente gráfica recoge los valores introducidos en el perfil de velocidad-density utilizado en este trabajo:



*Ilustración 10. Curva de relación velocidad-density (Speed-Density Profile) utilizada en la simulación.*

Esta caracterización diferenciada permite reflejar de forma más precisa el comportamiento de los ocupantes durante las simulaciones, aportando mayor realismo al análisis del sistema de evacuación. A continuación, se detallan los parámetros físicos y funcionales definidos para cada uno de los perfiles considerados.

#### **5.4.1.1 Hombres menores de 30 años**

- **Velocidad de movimiento en evacuación:** rango de 1,11 m/s hasta 1,85 m/s.
- **Anchura de hombros:** rango de 38 cm hasta 48 cm.
- **Altura:** 1,8288 m.
- **Factor de reducción por congestión:** se estima en 0,7 según normas de evacuación.

- **Factor de reducción para zonas estrechas:** 0,9 (reducción del 10 % por reorientación corporal).

#### *5.4.1.2 Mujeres menores de 30 años*

- **Velocidad de movimiento en evacuación:** rango de 0,93 m/s hasta 1,55 m/s.
- **Anchura de hombros:** rango de 32 cm hasta 42 cm.
- **Altura:** 1,6822 m.
- **Factor de reducción por congestión:** se estima en 0,7 según normas de evacuación.
- **Factor de reducción para zonas estrechas:** 0,9 (reducción del 10 % por reorientación corporal).

#### *5.4.1.3 Hombres entre 30 y 50 años*

- **Velocidad de movimiento en evacuación:** rango de 0,97 m/s hasta 1,62 m/s.
- **Anchura de hombros:** rango de 38 cm hasta 48 cm.
- **Altura:** 1,8288 m.
- **Factor de reducción por congestión:** se estima en 0,75 según normas de evacuación.
- **Factor de reducción para zonas estrechas:** 0,9 (reducción del 10 % por reorientación corporal).

#### ***5.4.1.4 Mujeres entre 30 y 50 años***

- **Velocidad de movimiento en evacuación:** rango de 0,71 m/s hasta 1,19 m/s.
- **Anchura de hombros:** rango de 32 cm hasta 42 cm.
- **Altura:** 1,6822 m.
- **Factor de reducción por congestión:** se estima en 0,75 según normas de evacuación.
- **Factor de reducción para zonas estrechas:** 0,9 (reducción del 10 % por reorientación corporal).

#### ***5.4.1.5 Hombres mayores de 50 años***

- **Velocidad de movimiento en evacuación:** rango de 0,84 m/s hasta 1,4 m/s.
- **Anchura de hombros:** rango de 38 cm hasta 48 cm.
- **Altura:** 1,8288 m.
- **Factor de reducción por congestión:** se estima en 0,8 según normas de evacuación.
- **Factor de reducción en paso estrecho:** 0,9 (reducción del 10 % por reorientación corporal).

#### ***5.4.1.6 Mujeres mayores de 50 años***

- **Velocidad de movimiento en evacuación:** rango de 0,56 m/s hasta 0,94 m/s.
- **Anchura de hombros:** rango de 32 cm hasta 42 cm.
- **Altura:** 1,6822 m.

- **Factor de reducción por congestión:** se estima en 0,8 según normas de evacuación.
- **Factor de reducción en paso estrecho:** 0,9 (reducción del 10 % por reorientación corporal).

#### 5.4.1.7 Niños

- **Velocidad de movimiento en evacuación:** rango de 0,8 m/s hasta 1,4 m/s.
- **Anchura de hombros:** rango de 28 cm hasta 35 cm.
- **Altura:** 1,3288 m.
- **Factor de reducción por congestión:** se estima en 0,65 según normas de evacuación.
- **Factor de reducción en paso estrecho:** 0,9 (reducción del 10 % por reorientación corporal).

#### 5.4.1.8 Tabla resumen

Perfil	Velocidad (m/s)	Anchura hombros (m)	Altura (m)	Reducción por congestión	Reducción por paso estrecho
<b>Hombres &lt;30 años</b>	1,11 – 1,85	0,38 – 0,48	1,83	0,7	0,9
<b>Mujeres &lt;30 años</b>	0,93 – 1,55	0,32 – 0,42	1,68	0,7	0,9

<b>Hombres 30–50 años</b>	0,97 – 1,62	0,38 – 0,48	1,83	0,75	0,9
<b>Mujeres 30–50 años</b>	0,71 – 1,19	0,32 – 0,42	1,68	0,75	0,9
<b>Hombres &gt;50 años</b>	0,84 – 1,40	0,38 – 0,48	1,83	0,8	0,9
<b>Mujeres &gt;50 años</b>	0,56 – 0,94	0,32 – 0,42	1,68	0,8	0,9
<b>Niños (aprox. 6 años)</b>	0,80 – 1,40	0,28 – 0,35	1,33	0,65	0,9

*Tabla 9. Parámetros físicos y funcionales por perfil de ocupante*

#### 5.4.2 ORIGEN DE LOS OCUPANTES

Diversos estudios en el ámbito de la psicología del comportamiento y la seguridad en emergencias sugieren que el origen cultural y geográfico de los ocupantes puede influir en su reacción ante una situación de evacuación. Estos factores no afectan tanto a las capacidades físicas, sino al tiempo de respuesta inicial, la predisposición a seguir instrucciones, y la forma de interactuar con otros pasajeros durante situaciones de estrés.

Se han identificado diferencias significativas entre grupos poblacionales en cuanto a:

- El tiempo de pre-movimiento, condicionado por factores como el grado de familiaridad con los procedimientos de evacuación, la confianza en la autoridad, o el nivel de concienciación en materia de seguridad.
- La obediencia a las indicaciones del personal de cabina, que puede variar entre culturas más colectivistas (mayor obediencia y coordinación) y más individualistas (tendencia a actuar por cuenta propia).

- El nivel de estrés visible y percepción del peligro, que puede influir en el orden, la cooperación y la aparición de conductas impulsivas como la recogida de equipaje.

Aunque no es posible cuantificar estos efectos con precisión para un pasajero en particular, decidimos incluir cierta variabilidad en el pre-movimiento basado en el origen simulado del pasaje, ya que revisamos estudios que comparan respuestas culturales en situaciones de emergencia. Basado en estudios comparativos de evacuaciones tanto reales como simuladas, una tabla que muestra rangos estimados de pre-movimiento para los ocupantes muestra lo que encontramos importante con respecto al origen cultural de esos ocupantes. Tales estimaciones permiten variabilidad en las simulaciones basadas en tendencias a nivel mundial.

<b>Región / Cultura aproximada</b>	<b>Tiempo de pre-movimiento estimado</b>
Asia Oriental (Japón, Corea, China)	15–30 segundos
Europa del Norte (Suecia, Noruega)	12–35 segundos
Europa Occidental (Alemania, Francia, Reino Unido)	15–45 segundos
América del Norte (EE.UU., Canadá)	15–50 segundos
Europa del Este (Polonia, R. Checa)	15–50 segundos
América Latina (México, Brasil, Argentina)	18–53 segundos
Sudeste Asiático (Filipinas, Tailandia)	18–60 segundos

*Tabla 10. Tiempo estimado de pre-movimiento de los ocupantes según su lugar de origen*

### **5.4.3 DISTRIBUCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE PERFILES DE OCUPANTES**

Además del diseño geométrico, en cada simulación se ha definido una distribución representativa de los perfiles de ocupantes a bordo. Para ello, se han utilizado perfiles preconfigurados incluidos en la biblioteca por defecto de Pathfinder, basada en las directrices de la guía IMO MSC.1/Circ.1533, un documento técnico de referencia internacional que establece los criterios para realizar análisis de evacuación en buques de pasaje. Esta guía proporciona parámetros estandarizados como diámetros corporales, velocidades de desplazamiento y tiempos de respuesta, ajustados a distintos grupos demográficos y comportamientos observados en escenarios reales de evacuación.

En concreto, los perfiles seleccionados en este estudio han sido:

- 20% males (<30 years)
- 20% females (<30 years)
- 15% males (30 years-50 years)
- 15% females (30 years-50 years)
- 10% males (>50 years)
- 10% females (>50 years)

Además, se ha creado un nuevo perfil personalizado llamado Niños (10%) para caracterizar a los pasajeros infantiles, ya que no había una opción específica predefinida para este grupo en la biblioteca del programa. Los ocupantes fueron colocados manualmente en los asientos representados en el modelo, respetando su distribución en las diferentes secciones de la cabina. Esta configuración permite una simulación más realista de los tiempos de evacuación y la observación de posibles cuellos de botella o áreas de acumulación dependiendo de la ubicación y características de los pasajeros.

La distribución porcentual de los perfiles se ha establecido tomando como referencia datos genéricos sobre la ocupación de vuelos comerciales en rutas internacionales. Se ha mantenido un equilibrio entre hombres y mujeres adultos, que en conjunto representan el 90% del total, distribuidos por franjas de edad para reflejar con mayor precisión la diversidad poblacional observada en los informes de la IATA y las estadísticas de EASA. En concreto, se ha asignado un 20% a mujeres menores de 30 años, un 15% a mujeres entre 30 y 50 años, y un 10% a mujeres mayores de 50 años; mientras que los hombres se han distribuido con un 20% para los menores de 30 años, un 15% entre 30 y 50 años, y un 10% mayores de 50 años. Además, se ha incluido un 10% de niños, mediante un perfil personalizado creado para esta simulación, con el objetivo de representar adecuadamente a los pasajeros infantiles que suelen encontrarse en vuelos familiares. Esta distribución busca equilibrar realismo y

exigencia en el análisis de seguridad, considerando la influencia que diferentes grupos demográficos pueden tener en los tiempos de evacuación.

#### **5.4.4 TIEMPOS DE PRE-MOVIMIENTO**

En las simulaciones de evacuación, además del tiempo de desplazamiento de los ocupantes, resulta esencial considerar el denominado *tiempo de pre-movimiento* o *pre-travel time*, que representa el intervalo que transcurre desde que se detecta la emergencia hasta que los individuos inician efectivamente su desplazamiento hacia una salida. Este retardo incluye la percepción de la alarma, el procesamiento de la información y la decisión de actuar, y puede estar influenciado por diversos factores como el nivel de familiaridad con el entorno, el estado de alerta o el grado de supervisión.

Para una justificación rigurosa del parámetro, se han tomado como referencia los valores propuestos en el documento normativo C/VM2 - Verification Method: Framework for Fire Safety Design (Amendment 4), publicado por el Ministerio de Negocios, Innovación y Empleo de Nueva Zelanda. En él se establecen rangos de tiempos de pre-movimiento en función del tipo de ocupantes y del contexto arquitectónico.

Dado que en un avión comercial se asume que los ocupantes están despiertos, bajo supervisión directa de la tripulación, y que el entorno es relativamente compacto, se han seleccionado los valores asociados a ocupantes despiertos, alertas y no familiarizados, que resultan representativos del comportamiento de la mayoría de los pasajeros durante un vuelo.

La tabla siguiente resume los valores empleados:

<b>Tipo de ocupantes</b>	<b>Tiempo en recinto de origen (s)</b>	<b>Tiempo en zona remota (s)</b>
Despiertos, alertas y familiarizados (ej. tripulación)	30	60

Despiertos, alertas y no familiarizados (pasajeros)	60	120
Durmiendo, familiarizados (descartado para este caso)	60	300

*Tabla 11. Tiempos de pre-movimiento según C/VM2 - Verification Method: Framework for Fire Safety Design.*

En el caso concreto de las simulaciones presentadas en este estudio, se ha optado por emplear valores dentro del rango de 0 a 60 segundos, aplicando una distribución estadística log-normal sobre el parámetro *Initial Delay* en la función de comportamiento (*behavior*) de Pathfinder, tal como se describe en el apartado 6.3. Esta elección permite reflejar de forma realista la variabilidad de respuesta de los pasajeros en un escenario de evacuación y está alineada con recomendaciones de organismos internacionales de seguridad.

## **Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez completadas las simulaciones de evacuación de los tres modelos de aeronave seleccionados —Embraer 175, Boeing 737-700 y Boeing 777-300—, este capítulo tiene como objetivo analizar los resultados obtenidos y evaluar el grado de cumplimiento de los criterios de seguridad establecidos por la normativa vigente. En particular, se toma como referencia el límite de 90 segundos exigido por la Federal Aviation Administration (FAA) para la evacuación completa de una aeronave comercial, incluso en condiciones adversas.

El análisis se centra en el tiempo total de evacuación registrado en cada simulación, así como en la identificación de posibles cuellos de botella, áreas de congestión y patrones de comportamiento de los ocupantes. Este estudio se complementará con la evaluación gráfica del flujo de evacuación y la densidad por zona en las siguientes versiones mediante visualizaciones y datos exportados de Pathfinder.

Los resultados permitirán la comparación del rendimiento de cada modelo en términos de eficiencia de evacuación y sentarán las bases para establecer recomendaciones destinadas a mejorar el diseño de la cabina y los procedimientos de seguridad en situaciones de emergencia.

### ***6.1 RESULTADOS GLOBALES SIN TIEMPO DE PRE-MOVIMIENTO***

Tras la ejecución de las simulaciones de evacuación para los tres modelos de avión seleccionados, se obtuvieron los tiempos totales requeridos para evacuar a la totalidad de los ocupantes desde el inicio del movimiento hasta la salida del modelo. Estos resultados permiten realizar una primera evaluación comparativa del rendimiento de cada aeronave en términos de eficiencia evacuatoria, tomando como referencia el umbral de 90 segundos establecido por la Federal Aviation Administration (FAA) como criterio para la certificación de seguridad.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los principales datos de cada modelo:

<b>Modelo de avión</b>	<b>Número de pasajeros</b>	<b>Número de salidas de emergencia</b>	<b>Tiempo de evacuación (s)</b>	<b>Tasa media de salida (pers/s)</b>	<b>Cumplimiento normativa FAA</b>
<b>Embraer 175</b>	70	4	79,8	0,88	Sí
<b>Boeing 737-700</b>	126	6	80,8	1,56	Sí
<b>Boeing 777-300</b>	310	10	105,8	2,93	No

*Tabla 12. Evaluación comparativa de eficiencia de evacuación por modelo de avión.*

Como se puede observar, los modelos Embraer 175 y Boeing 737-700 logran evacuar completamente a sus ocupantes en un tiempo inferior al límite reglamentario. En contraste, el Boeing 777-300 supera dicho umbral en más de 15 segundos, lo que sugiere la existencia de restricciones importantes en el flujo de evacuación que serán analizadas en detalle en los apartados siguientes.

La diferencia entre los tiempos obtenidos puede explicarse en primera instancia por la capacidad de pasajeros y la complejidad del diseño interior. Mientras que el Embraer 175, con su configuración simplificada y baja densidad de ocupación, presenta un proceso de evacuación rápido y sin interrupciones significativas, el Boeing 777-300 requiere una gestión más compleja del flujo de personas a través de una estructura más amplia, con múltiples zonas de salida y mayores distancias a recorrer.

Además del tiempo total de evacuación, resulta interesante analizar la tasa media de evacuación, entendida como el cociente entre el número total de pasajeros evacuados y el

tiempo necesario para completar la evacuación. Este parámetro, expresado en personas por segundo, proporciona una medida adicional del rendimiento general del proceso y permite observar tendencias complementarias. En la tabla anterior se aprecia que el Boeing 777-300, a pesar de no cumplir con el tiempo límite de 90 segundos, presenta la tasa media más alta (2,93 pers/s), lo cual sugiere que, una vez iniciado el movimiento, la evacuación progresa con fluidez. Sin embargo, este dato no garantiza el cumplimiento normativo, ya que el tiempo total depende también de otras variables críticas como la distribución inicial de los pasajeros, los tiempos de reacción, la congestión en zonas clave o la disponibilidad efectiva de las salidas. Esta aparente contradicción refuerza la necesidad de un análisis individualizado para cada modelo, que permita identificar cuellos de botella o retrasos iniciales que comprometen el resultado global.

Esta primera evaluación cuantitativa proporciona una visión general del comportamiento de cada modelo ante una situación de emergencia simulada, y establece las bases para un análisis más detallado en los apartados siguientes, donde se estudiará de forma individual cada aeronave.

## **6.2 ANÁLISIS INDIVIDUAL POR MODELO DE AERONAVE SIN TIEMPO DE PRE-MOVIMIENTO**

Para asegurar una representación más detallada del comportamiento de los ocupantes en las simulaciones, esta subsección incluye un conjunto de visualizaciones complementarias, que pueden analizar más completamente las dinámicas de evacuación de los modelos de aeronaves estudiados. Se han incorporado los siguientes gráficos para cada caso:

- Captura del modelado geométrico del avión en Pathfinder y la visualización de la congestión acumulativa al final de la simulación. Esta representación permite la identificación de áreas dentro del fuselaje donde los ocupantes experimentaron tiempos de permanencia más prolongados, facilitando la detección de cuellos de botella y áreas críticas en la circulación.

- Una gráfica que muestra la evolución temporal del número de ocupantes que se encuentran dentro del radio de influencia de 2 metros respecto a otros agentes. Este parámetro permite evaluar el grado de interacción entre individuos a lo largo del proceso de evacuación, ofreciendo una indicación del nivel de densidad relativa y de la aparición de aglomeraciones durante el desplazamiento.
- Una imagen inicial que representa la densidad espacial de ocupación, expresada en personas por metro cuadrado, en los primeros instantes de la simulación. Esta visualización proporciona una aproximación inmediata a la distribución del pasaje en el momento de activación de la evacuación, permitiendo identificar áreas potencialmente más expuestas a saturación.
- Una tabla con el número de ocupantes que han utilizado cada una de las salidas disponibles en el modelo simulado. Esta información es clave para entender la distribución de los flujos hacia las salidas y evaluar la utilización efectiva de los puntos de evacuación según su ubicación y accesibilidad.

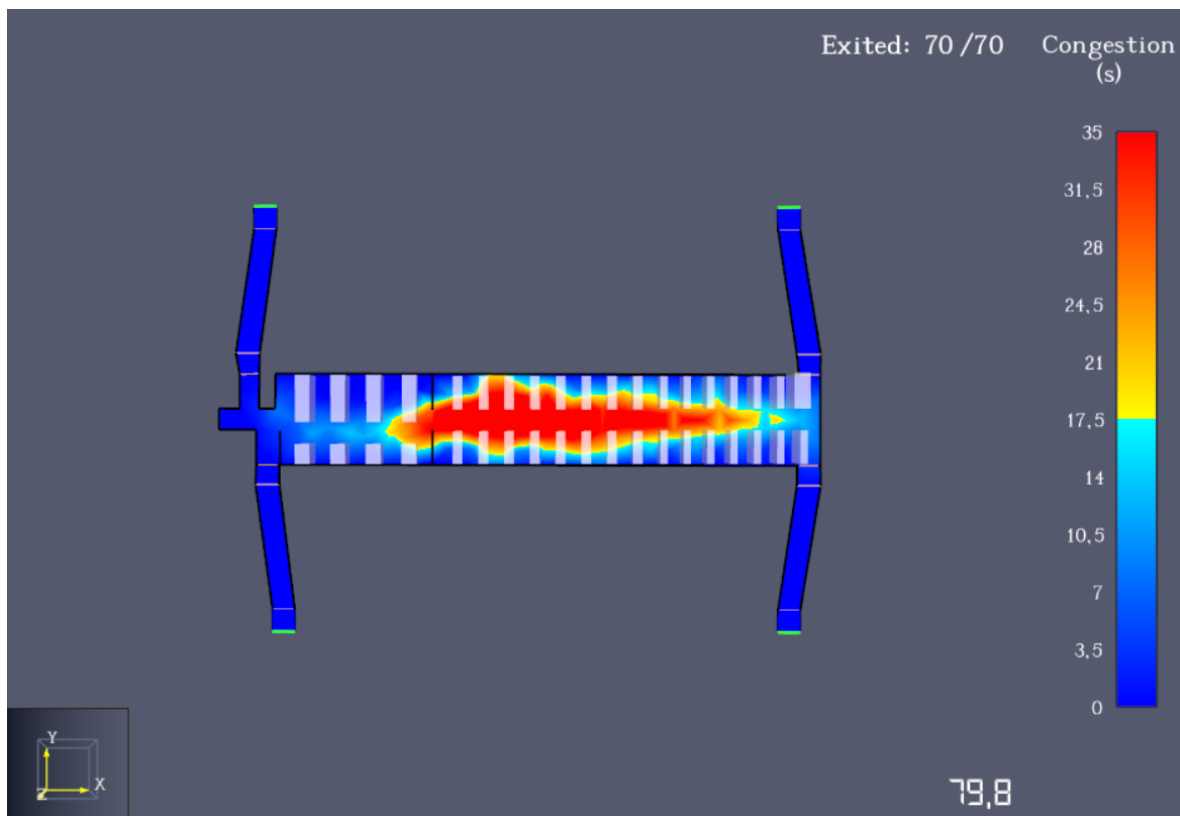
La integración de estos cuatro indicadores proporciona una visión espacial, temporal y cuantitativa del comportamiento colectivo de los ocupantes, complementando el análisis de los tiempos totales y permitiendo una interpretación más robusta del rendimiento del diseño geométrico en cada modelo de avión.

### **6.2.1 EMBRAER 175**

El Embraer 175 es el modelo con la capacidad mínima cuando se examina y utiliza una configuración de pasillo único donde acomoda a un total de 70 pasajeros. Cuenta con cuatro salidas de emergencia, dos a cada lado del fuselaje, lo que permite una evacuación simétrica y eficiente. Durante la simulación, se encontró que el tiempo de evacuación fue de 79.8 segundos, cumpliendo con el límite de 90 segundos establecido por las regulaciones de la FAA. Se observó un flujo de evacuación relativamente fluido durante la simulación, aunque con ciertas áreas de congestión localizadas situadas en el eje central del pasillo. Debido al reducido número de ocupantes y la geometría lineal, el modelo favoreció un movimiento

ordenado hacia las salidas. Tal acumulación fue mínima, especialmente en puntos intermedios donde los flujos de salida se encontraban, resultando en cierta retención pero sin comprometer la evacuación general. Ilustrativamente, la Ilustración 13 muestra una captura del modelo con la visualización del tiempo de congestión acumulado al final de la simulación.

A modo ilustrativo, en la Ilustración 11 se presenta una captura del modelo con la visualización del tiempo acumulado de congestión al finalizar la simulación. Se aprecia cómo la mayor concentración de tiempos se produce en la zona media del pasillo, mientras que las zonas cercanas a las salidas permanecen libres de acumulaciones prolongadas. Esto sugiere que, si bien hubo interacción continua entre los ocupantes, el flujo logró redistribuirse adecuadamente hacia las salidas.



*Ilustración 11. Tiempo acumulado de congestión al finalizar la simulación del Embraer 175.*

La ilustración 12 muestra la evolución temporal del número de ocupantes dentro del radio de influencia de 2 metros de cada agente. La curva verde representa el máximo valor observado en cada instante, mientras que la curva roja indica el promedio general. Se observa que, tras un inicio con proximidades elevadas debido a la distribución en asientos contiguos, la evacuación se desarrolla de forma progresiva y ordenada, con una disminución constante del número de personas cercanas a cada ocupante a medida que avanzan hacia las salidas.

k - Num. occupants within influence radius vs Time

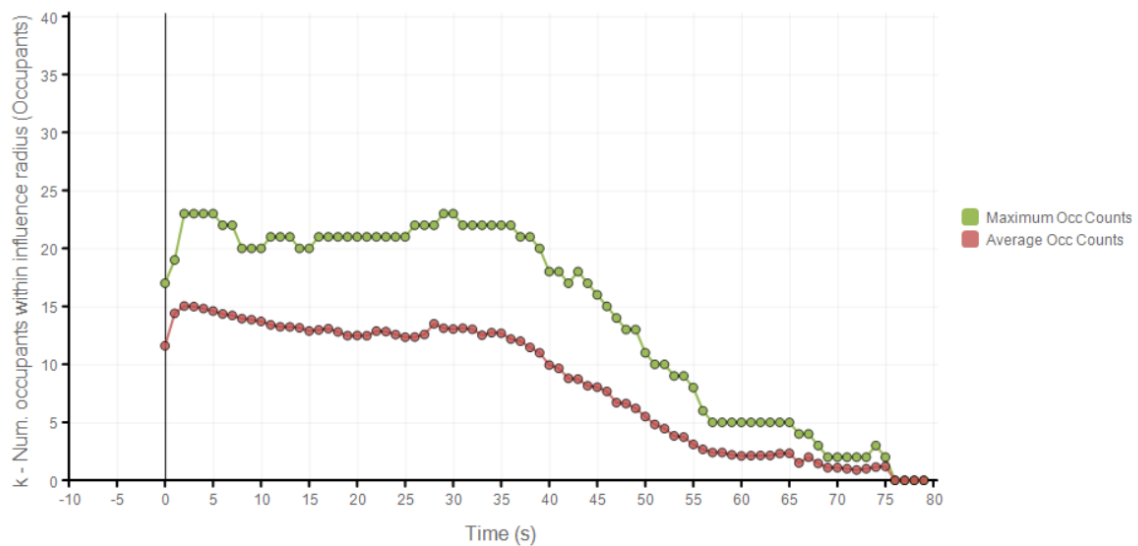
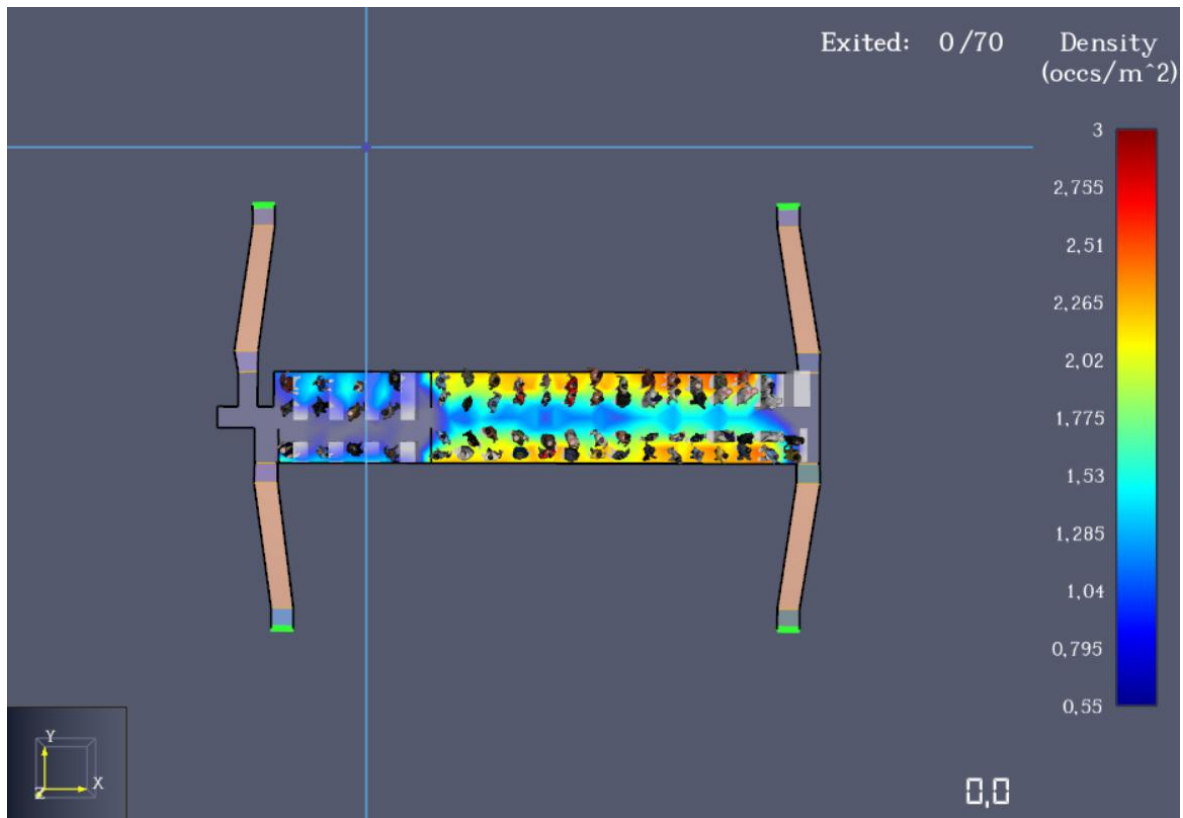


Ilustración 12. Evolución del número de ocupantes del Embraer 175 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo.

En la Ilustración 1 se muestra la distribución inicial de densidades (ocupantes por metro cuadrado) en el instante previo al inicio de la evacuación. Las zonas más congestionadas corresponden a la parte delantera derecha del avión, donde se alcanzan valores superiores a

2,5 ocupantes/m<sup>2</sup>. A pesar de ello, no se generaron bloqueos significativos, y el reparto del flujo permitió una evacuación ordenada y sin atascos duraderos.



*Ilustración 13. Distribución inicial de densidades del Embraer 175.*

Respecto al uso de las salidas de emergencia, el reparto de pasajeros fue el siguiente:

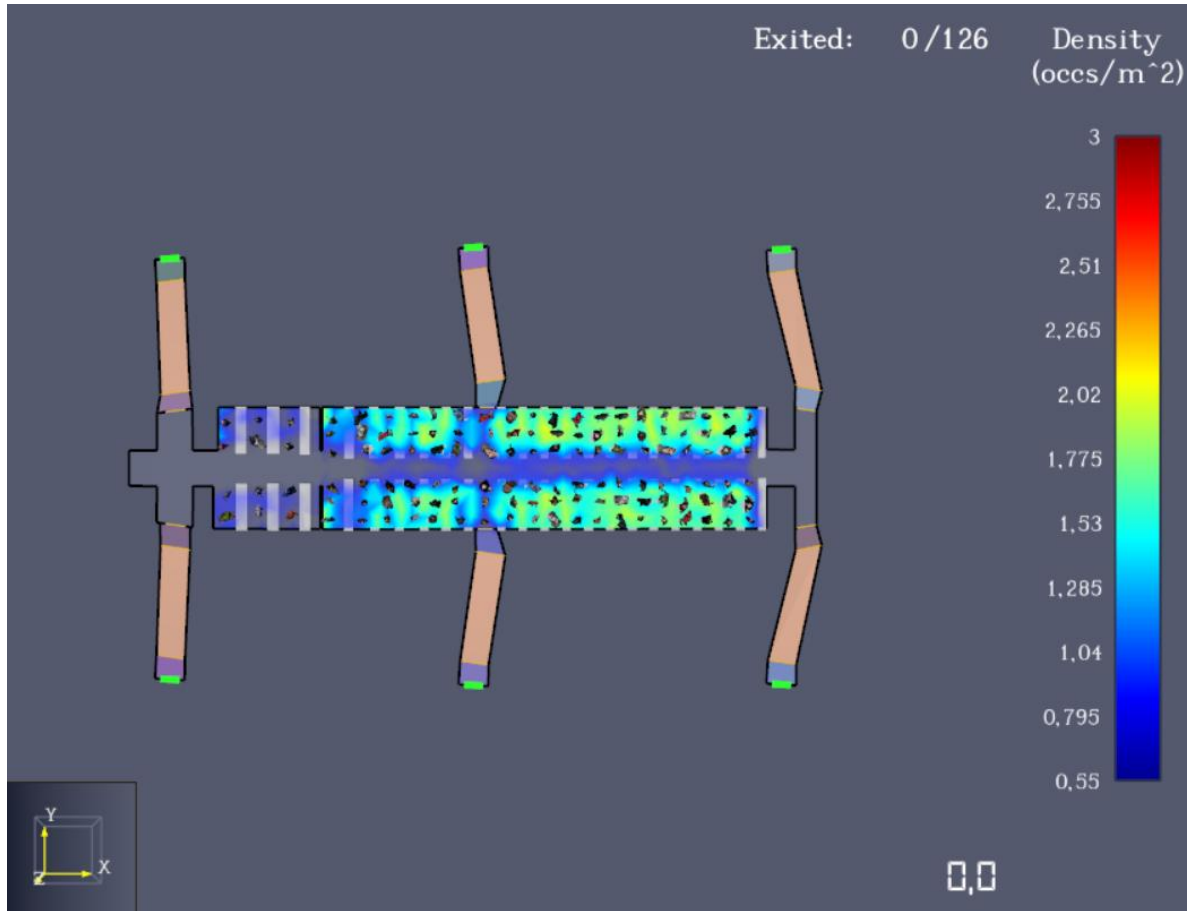
- **Salida 1** (frontal derecho): 8 ocupantes
- **Salida 2** (frontal izquierdo): 13 ocupantes
- **Salida 3** (trasera izquierda): 21 ocupantes
- **Salida 4** (trasera derecha): 28 ocupantes

Este patrón muestra una utilización más intensiva de las salidas traseras, que en conjunto fueron empleadas por 49 pasajeros, frente a los 21 que evacuaron por las salidas frontales.

Esta distribución puede explicarse por la disposición de los asientos y la mayor facilidad de acceso a la parte trasera del avión en el momento inicial de la evacuación.

### **6.2.2 BOEING 737-700**

En este caso, se ha evaluado el modelo Boeing 737-700 con una ocupación total de 126 pasajeros y las seis salidas de emergencia habilitadas. El tiempo total de evacuación registrado ha sido de 80,8 segundos, por lo tanto, dentro del umbral de 90 segundos exigido por la normativa FAA.



*Ilustración 14. Distribución inicial de densidades del Boeing 737-700.*

Desde el punto de vista del flujo de evacuación, la densidad inicial de ocupantes por metro cuadrado es uniforme y coherente con la configuración del avión, tal y como puede apreciarse en el mapa de densidades iniciales. El flujo general ha sido continuo y sin bloqueos totales, aunque se han detectado zonas localizadas de congestión en el tramo central del pasillo, donde se ha alcanzado un tiempo acumulado de retención cercano a los 28 segundos. Esta acumulación se debe principalmente a la convergencia simultánea de ocupantes provenientes de ambas alas y del sector delantero.

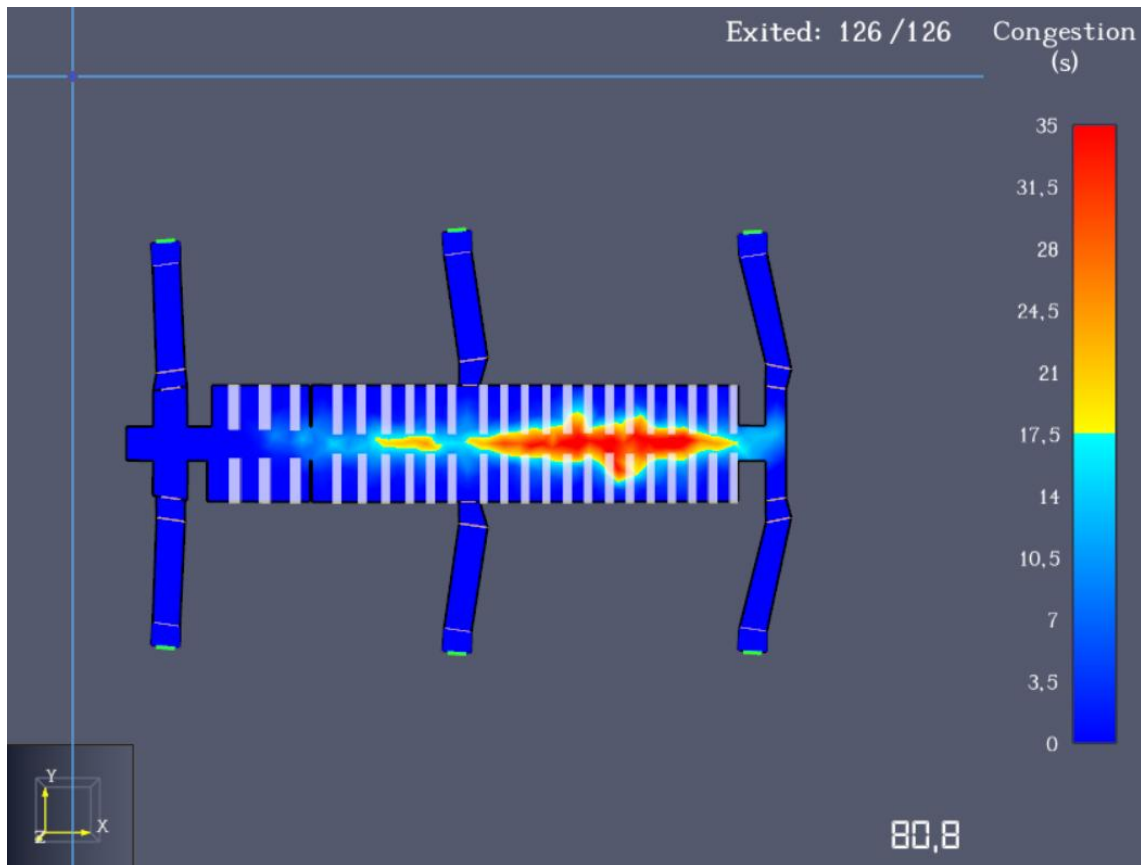


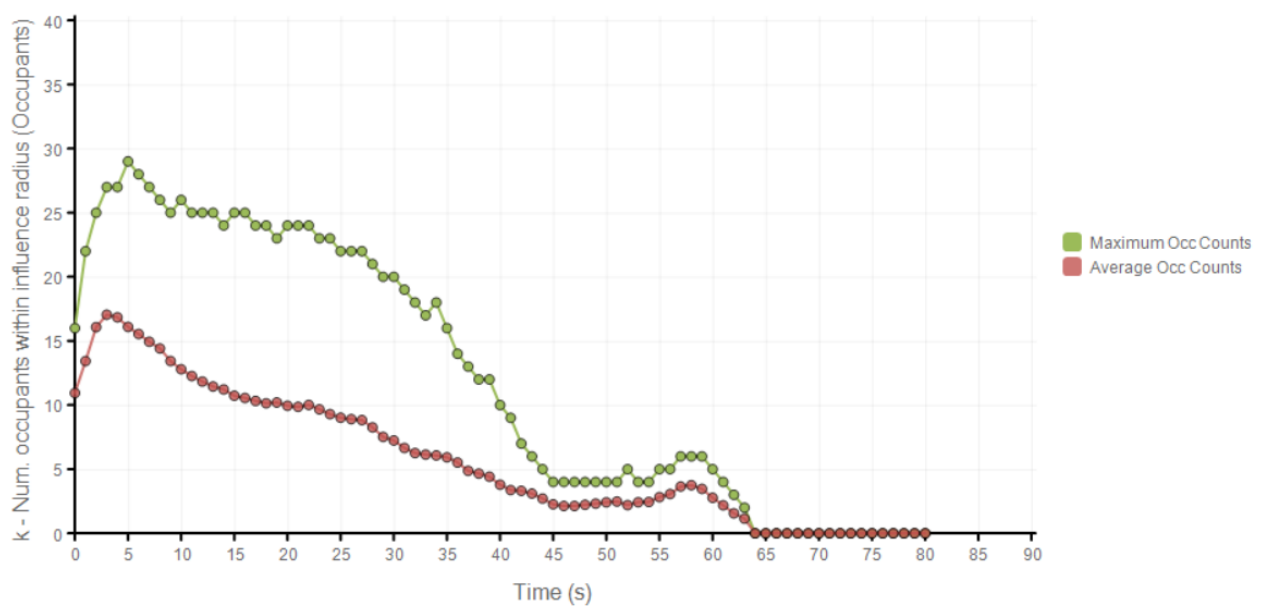
Ilustración 15. Tiempo acumulado de congestión al finalizar la simulación del Boeing 737-700.

La distribución de los pasajeros evacuados por cada salida ha sido la siguiente:

- **Puerta frontal izquierda:** 13 ocupantes evacuados
- **Puerta frontal derecha:** 17 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala izquierda:** 28 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala derecha:** 33 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera izquierda:** 18 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera derecha:** 17 ocupantes evacuados

Se observa una mayor utilización de las salidas sobre el ala, lo cual resulta coherente con su ubicación intermedia y accesibilidad desde los sectores central y trasero de la aeronave. Este reparto contribuye a descongestionar las zonas delanteras y posteriores, favoreciendo un flujo más equilibrado.

k - Num. occupants within influence radius vs Time



*Ilustración 16. Evolución del número de ocupantes del Boeing 737-700 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo.*

En el gráfico de evolución del número de ocupantes dentro del radio de influencia de 2 metros se detecta una tendencia similar a la del Embraer 175, con una curva de máximos estabilizada en torno a los 20-25 ocupantes durante los primeros 20 segundos, seguida de un descenso progresivo hasta la evacuación total. El comportamiento de esta curva sugiere una buena dispersión inicial y una evacuación constante, sin interrupciones significativas.

### 6.2.3 BOEING 777-300

Para este escenario se ha simulado la evacuación del modelo Boeing 777-300, con una ocupación total de 310 pasajeros y todas las diez salidas de emergencia habilitadas. El tiempo total registrado fue de 106,0 segundos, lo cual supera el umbral de 90 segundos establecido por la FAA. Este resultado no resulta sorprendente, teniendo en cuenta la elevada capacidad del modelo y la complejidad geométrica de su configuración interior.

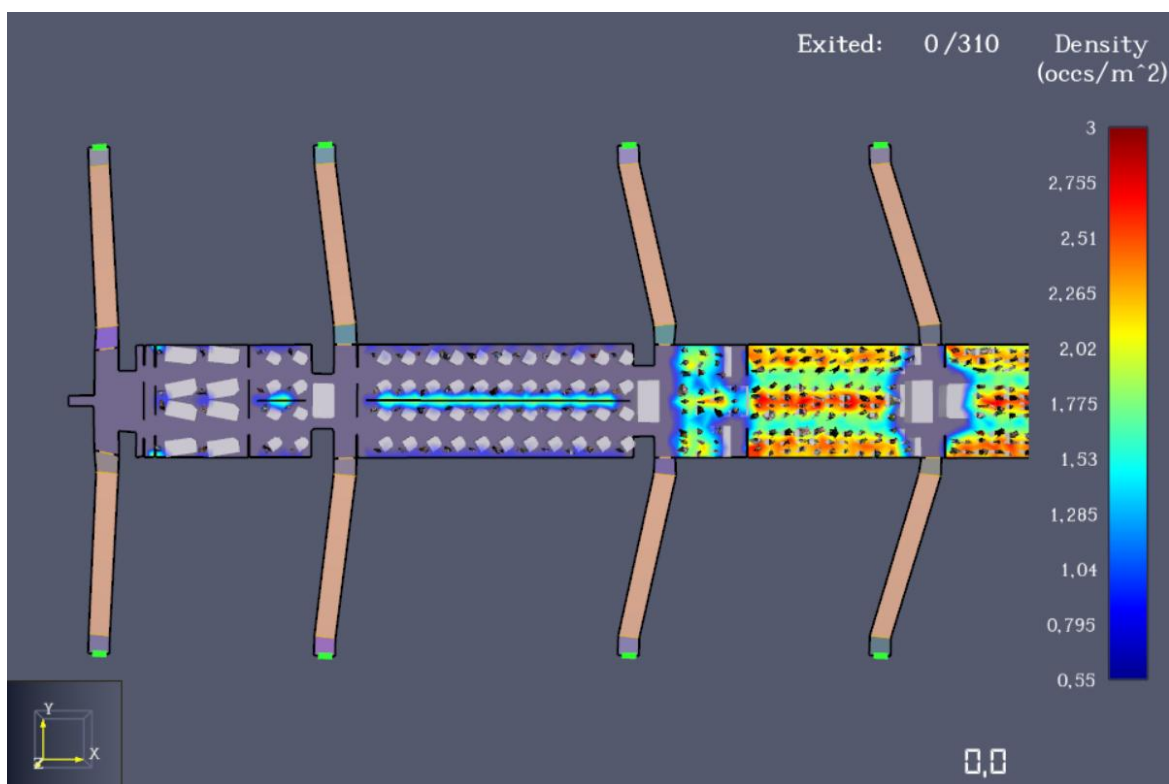
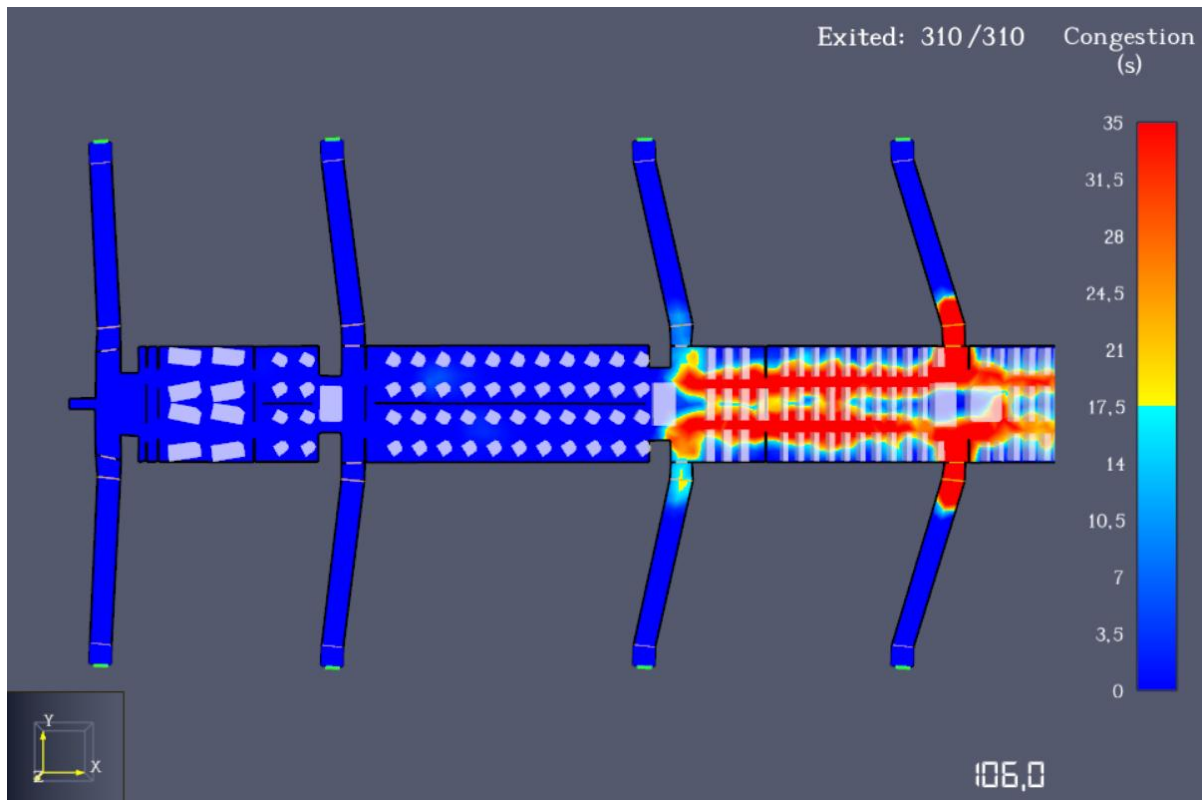


Ilustración 17. Distribución inicial de densidades del Boeing 777-300.

El mapa de densidad inicial muestra una distribución relativamente uniforme a lo largo de la cabina, con mayores concentraciones en la zona central, donde se ubican dos de las salidas más utilizadas. Durante la evacuación, las zonas de congestión se extendieron de forma casi continua por el eje longitudinal del avión, especialmente en los tramos adyacentes a las puertas centrales y traseras, donde se alcanzaron valores superiores a los 30 segundos de retención.



*Ilustración 18. Tiempo acumulado de congestión al finalizar la simulación del Boeing 777-300.*

La distribución del número de evacuados por cada salida fue la siguiente:

- **Puerta frontal izquierda:** 4 ocupantes evacuados
- **Puerta frontal derecha:** 4 ocupantes evacuados
- **Puerta semifrontal izquierda:** 24 ocupantes evacuados
- **Puerta semifrontal derecha:** 20 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala izquierda:** 44 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala derecha:** 42 ocupantes evacuados
- **Puerta semitrasera izquierda:** 45 ocupantes evacuados
- **Puerta semitrasera derecha:** 50 ocupantes evacuados

- **Puerta trasera izquierda:** 43 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera derecha:** 34 ocupantes evacuados

La evacuación se distribuyó de forma bastante equilibrada entre las ocho salidas centrales y traseras, mientras que las dos puertas frontales apenas fueron utilizadas. Este comportamiento podría explicarse por la mayor proximidad de los ocupantes a otras salidas más accesibles, así como por la geometría del avión, que dificulta el retroceso hacia el frente desde sectores intermedios.

k - Num. occupants within influence radius vs Time

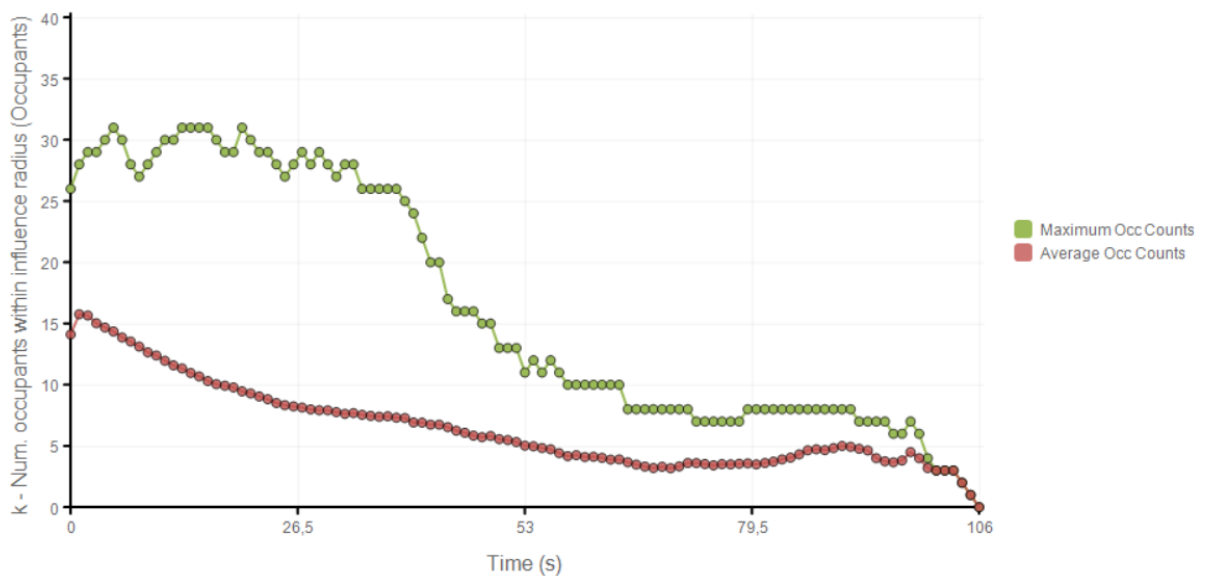


Ilustración 19. Evolución del número de ocupantes del Boeing 777-300 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo.

En el gráfico que representa la evolución del número de ocupantes dentro del radio de influencia, se observa un pico inicial de más de 30 personas que se mantiene estable durante más de 40 segundos. A partir de ahí, el número comienza a descender de forma escalonada, con pequeñas mesetas que reflejan ciertos puntos de congestión sostenida.

### **6.3 ANÁLISIS GLOBALES CON TIEMPO DE PRE-MOVIMIENTO**

Con el objetivo de analizar el impacto del pre-movimiento en distintos modelos de aeronave bajo condiciones estructurales constantes, se presenta a continuación la comparación exclusiva de las simulaciones en las que se ha introducido un retardo inicial en la respuesta de los ocupantes, sin que se hayan bloqueado salidas de emergencia. Esta aproximación permite evaluar cómo afecta la geometría interna, el número de salidas y la densidad de ocupación al rendimiento general del sistema de evacuación cuando se considera un comportamiento más realista por parte de los pasajeros.

En todos los casos se ha mantenido la ocupación máxima prevista y se han considerado operativas todas las salidas de emergencia disponibles en el modelo correspondiente. La única diferencia respecto a los escenarios base es la incorporación de un tiempo de pre-movimiento aleatorio para cada ocupante.

<b>Modelo de avión</b>	<b>Ocupación (N)</b>	<b>Nº de salidas</b>	<b>Tiempo de evacuación con pre-movimiento (s)</b>
<b>Embraer 175</b>	70	4	86,3
<b>Boeing 737-700</b>	126	6	93,3
<b>Boeing 777-300</b>	310	10	137,3

*Tabla 13. Comparativa de tiempos de evacuación con pre-movimiento.*

De los tres modelos analizados, el Embraer 175 es el que obtiene el menor tiempo de evacuación bajo condiciones de pre-movimiento, con 86,3 segundos, beneficiado por una baja ocupación y una distribución interna simple. A pesar de disponer únicamente de cuatro salidas, su tamaño reducido y la proximidad de los ocupantes a las puertas permiten una evacuación rápida y sin congestiones prolongadas.

El Boeing 737-700, con una capacidad intermedia y seis salidas operativas, alcanza un tiempo de 93,3 segundos, un valor muy ajustado al límite normativo, pero coherente con su equilibrio entre volumen de pasajeros, número de puertas y configuración de pasillo único. En este caso, la evacuación se desarrolla de manera fluida, aunque con zonas puntuales de congestión que elevan ligeramente el tiempo total.

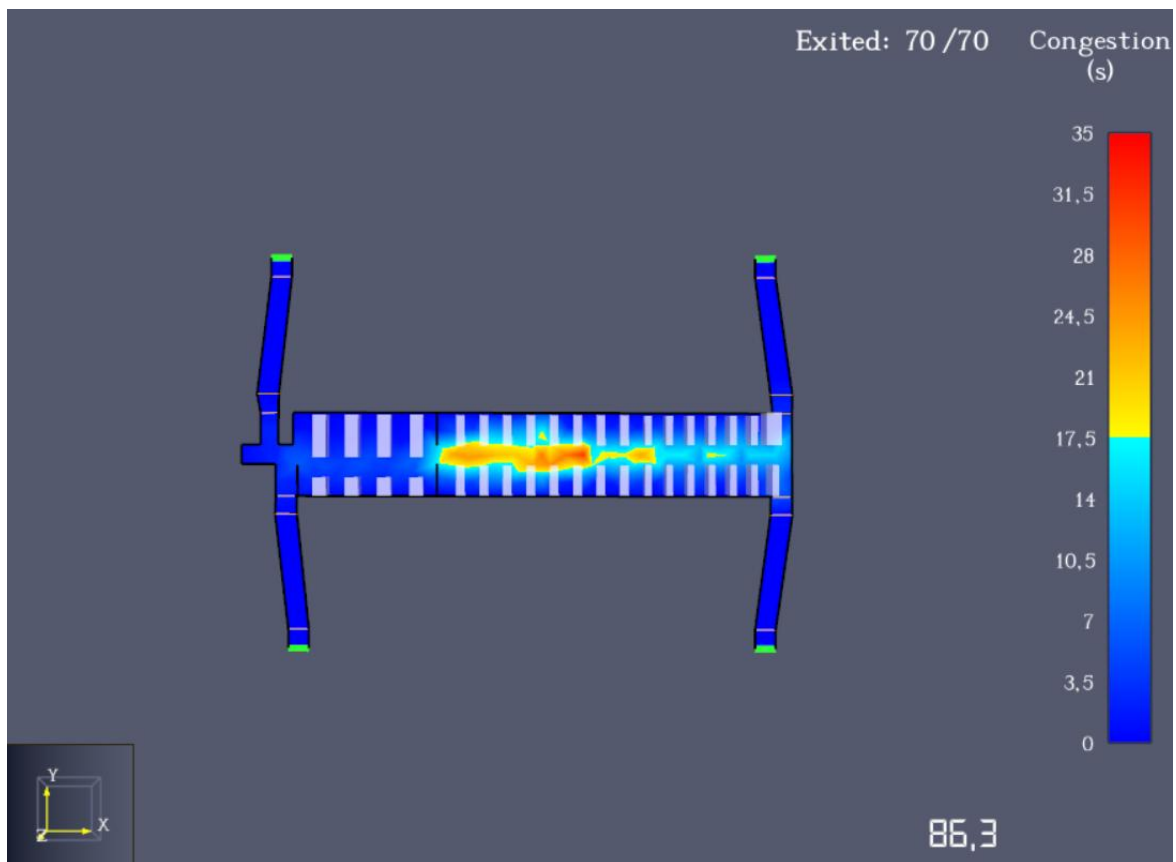
Por su parte, el Boeing 777-300, con más del triple de ocupantes que el Embraer y una configuración de cabina mucho más extensa, presenta el peor resultado con 137,3 segundos. A pesar de contar con diez salidas distribuidas a lo largo del fuselaje, la elevada densidad de ocupantes, junto con la distancia que deben recorrer para alcanzar las puertas, genera zonas críticas de acumulación, especialmente en los tramos central y trasero del avión.

En todos los modelos, el pre-movimiento ha sido implementado mediante una distribución log-normal entre 0 y 60 segundos, aplicada al parámetro *Initial Delay* en la función *behavior* de Pathfinder. Este enfoque reproduce de forma más realista la variabilidad individual en el tiempo de reacción ante una emergencia, alineándose con las recomendaciones recogidas en normativas como el C/VM2 Amendment 4.

## **6.4 ANÁLISIS INDIVIDUAL POR MODELO DE AERONAVE CON TIEMPO DE PRE-MOVIMIENTO**

### **6.4.1 EMBRAER 175**

En la simulación con tiempo de pre-movimiento, el modelo Embraer 175, con una ocupación de 70 pasajeros y cuatro salidas de emergencia habilitadas, alcanzó un tiempo total de evacuación de 86,3 segundos, frente a los 61,8 segundos registrados en el caso sin retardo inicial. A pesar del incremento temporal, la evacuación sigue cumpliendo con los requisitos exigidos por la normativa FAA.



*Ilustración 20. Tiempo acumulado de congestión del Embraer 175 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento*

Resulta llamativo que, a pesar del mayor tiempo total, el tiempo de congestión acumulado en la zona central del pasillo es sensiblemente inferior al observado en la simulación sin pre-movimiento. En la visualización de congestión, se aprecia cómo las acumulaciones puntuales de tráfico en el corredor principal no superan los 25 segundos, mientras que en el escenario anterior se alcanzaban zonas con más de 35 segundos de retención.

Este comportamiento puede explicarse por el hecho de que, al introducir un retardo aleatorio en el inicio de la evacuación de los ocupantes, se reduce la simultaneidad con la que estos acceden al pasillo central. Al no converger todos al mismo tiempo, se evita la formación inmediata de cuellos de botella, generando un flujo más escalonado y fluido durante los primeros compases de la evacuación.

En cuanto a la utilización de las salidas, se mantuvo una distribución equilibrada, siendo las traseras las más empleadas:

- **Puerta frontal derecha:** 7 ocupantes evacuados
- **Puerta frontal izquierda:** 18 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera derecha:** 21 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera izquierda:** 24 ocupantes evacuados

Por último, el gráfico de evolución del número de ocupantes dentro del radio de influencia (2 metros) muestra un patrón de descenso más progresivo en comparación con el caso sin pre-movimiento, reflejo del reparto más escalonado de los tiempos de reacción. Aun así, el comportamiento general de la curva se mantiene similar.

k - Num. occupants within influence radius vs Time

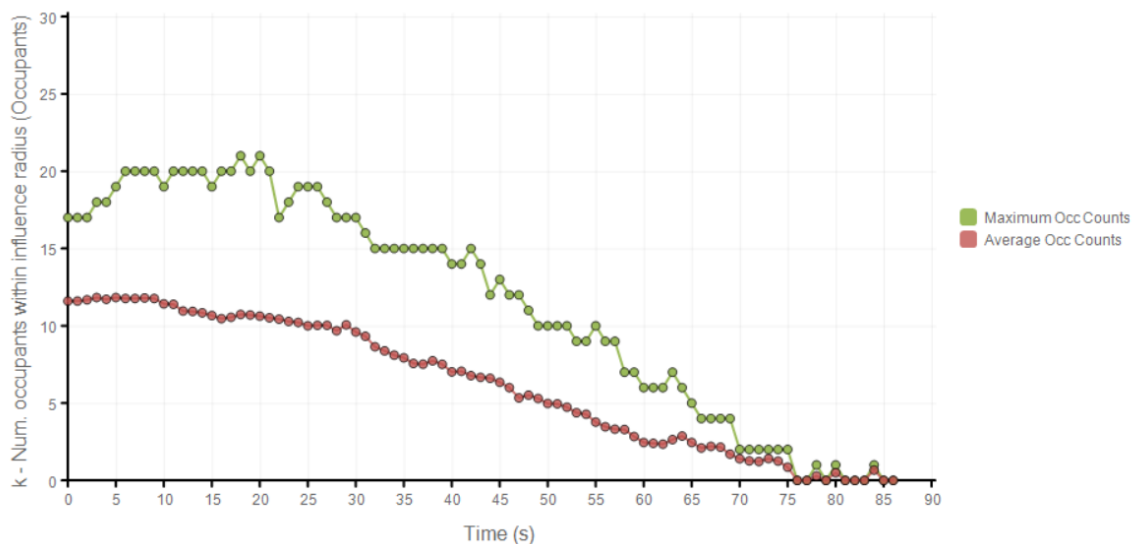
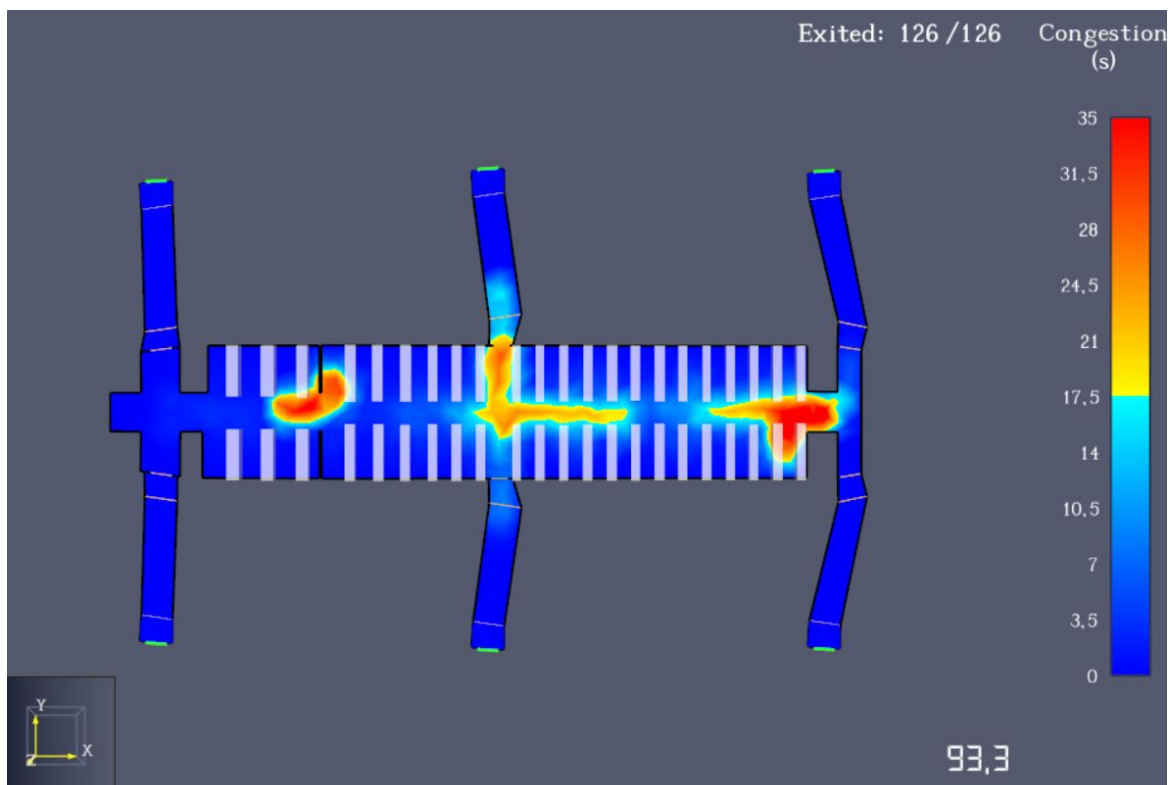


Ilustración 21. Evolución del número de ocupantes en Embraer 175 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento)

## 6.4.2 BOEING 737-700

En este escenario se ha simulado la evacuación del modelo Boeing 737-700 incluyendo un tiempo de pre-movimiento para los ocupantes. El número total de pasajeros es de 126, con las seis salidas de emergencia habilitadas. El tiempo de evacuación registrado en esta simulación ha sido de 93,3 segundos, superando levemente el límite de 90 segundos establecido por la FAA, lo que evidencia el impacto de los retardos iniciales introducidos en el comportamiento de los ocupantes.



*Ilustración 22. Tiempo acumulado de congestión del Boeing 737-700 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento.*

El análisis del mapa de congestión muestra una distribución más dispersa de las zonas de acumulación, con picos localizados en distintos tramos del pasillo, especialmente en la sección central y en las proximidades de la salida trasera derecha. Aunque las acumulaciones no son tan extensas como en otros modelos, sí se aprecian varios focos de retención prolongada, cercanos a los 25 segundos.

La distribución de evacuados por puerta ha sido la siguiente:

- **Puerta frontal izquierda:** 19 ocupantes evacuados
- **Puerta frontal derecha:** 9 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala izquierda:** 25 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala derecha:** 35 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera izquierda:** 16 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera derecha:** 22 ocupantes evacuados

Es interesante observar la fuerte correlación entre el uso intensivo de la puerta sobre el ala derecha (35 personas evacuadas) y la zona de congestión intensa detectada en su proximidad. Esto sugiere que, si bien esta salida fue altamente efectiva en cuanto a número de evacuados, también fue el origen de cuellos de botella relevantes que podrían haber afectado el flujo de ocupantes provenientes del sector posterior.

k - Num. occupants within influence radius vs Time

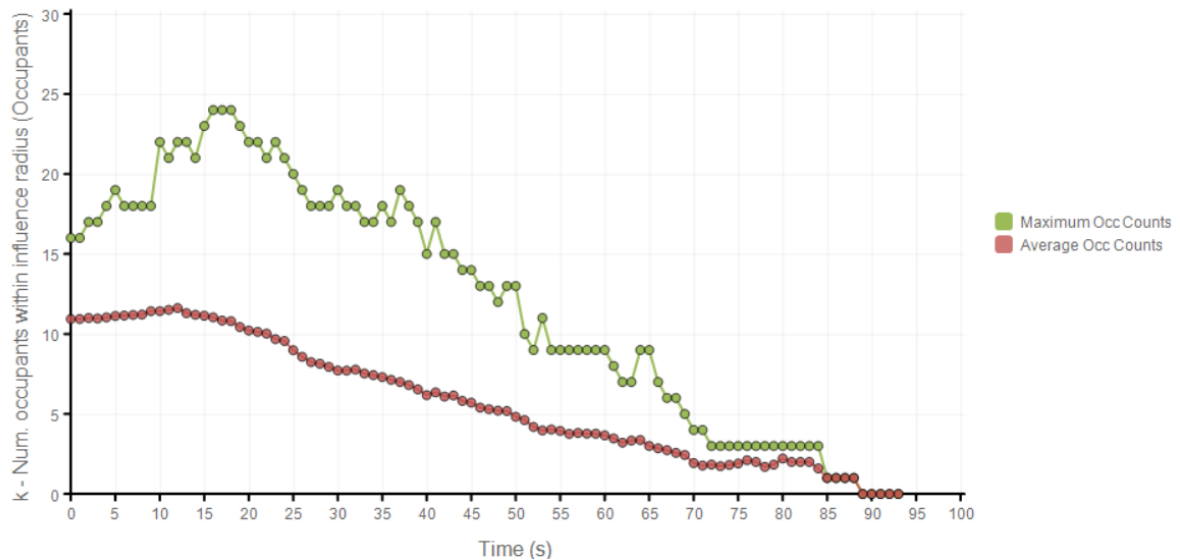
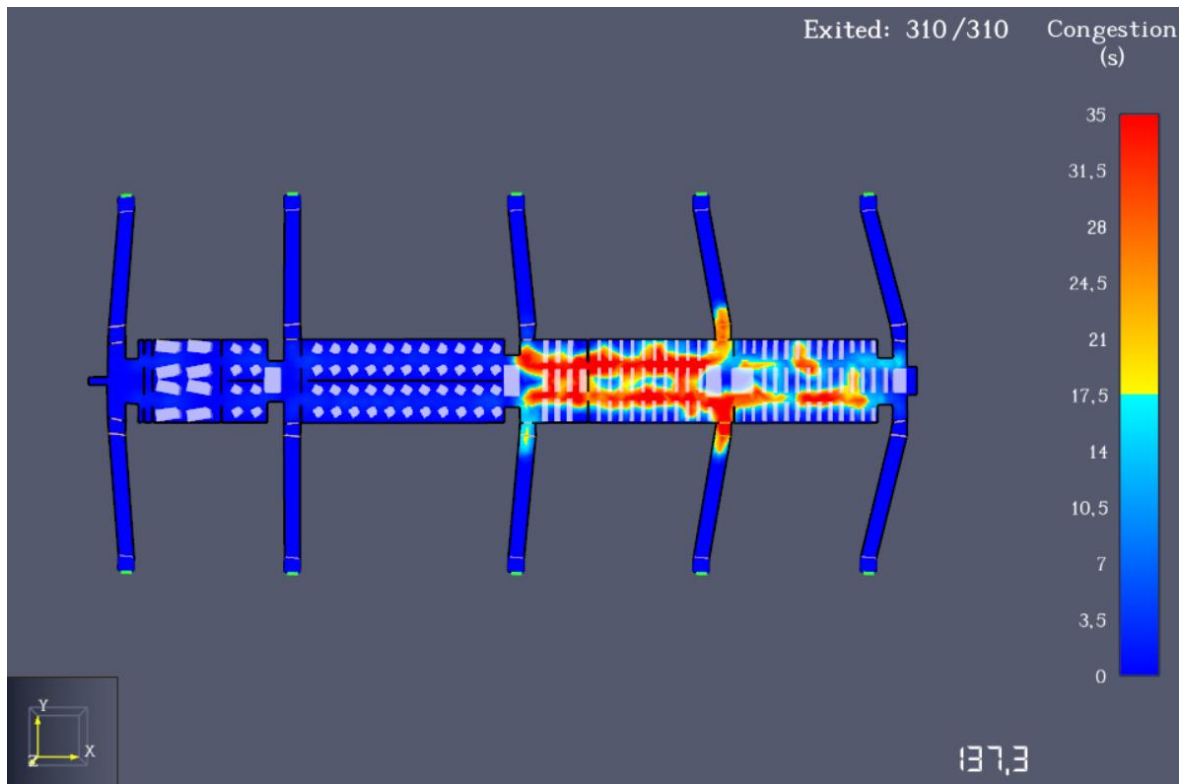


Ilustración 23. Evolución del número de ocupantes en Boeing737-700 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento)

El gráfico demuestra una pendiente relativamente más escalonada del número de ocupantes en el área de influencia en comparación con el caso sin movimiento previo. El pico de ocupación máxima es ligeramente más alto y dura más tiempo, lo que es consistente con la mayor dispersión temporal en la respuesta inicial de los pasajeros. Sin embargo, la evacuación progresa de manera constante una vez iniciada, sin interrupciones críticas.

### 6.4.3 BOEING 777-300

En esta simulación se ha evaluado el comportamiento del Boeing 777-300 considerando el mismo nivel de ocupación de 310 pasajeros y las diez salidas de emergencia operativas, pero introduciendo un tiempo de pre-movimiento aleatorio entre los ocupantes. El resultado ha sido un tiempo total de evacuación de 137,3 segundos, muy por encima del límite de 90 segundos establecido por la FAA.



*Ilustración 24.*

La adición de un pre-movimiento provoca una dispersión inicial en la respuesta de los ocupantes que afecta sustancialmente la dinámica general del flujo. Aunque esta dispersión ocurre, el tamaño total de la población y la longitud de las rutas continúan influyendo en la formación de áreas de congestión, particularmente en el tercio central y final del fuselaje. El mapa de congestión demuestra acumulaciones prolongadas, en algunas secciones superando los 30 segundos, como resultado del fuerte efecto de densidad junto con la limitada capacidad efectiva de las salidas.

La distribución de evacuados por puerta en esta simulación ha sido:

- **Puerta frontal izquierda:** 4 ocupantes evacuados
- **Puerta frontal derecha:** 4 ocupantes evacuados
- **Puerta semifrontal izquierda:** 24 ocupantes evacuados

- **Puerta semifrontal derecha:** 16 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala izquierda:** 43 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala derecha:** 42 ocupantes evacuados
- **Puerta semitrasera izquierda:** 50 ocupantes evacuados
- **Puerta semitrasera derecha:** 55 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera izquierda:** 43 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera derecha:** 29 ocupantes evacuados

En comparación con la simulación sin pre-movimiento (apartado 6.2.3), los patrones de uso de las salidas son similares, aunque se observan ligeras variaciones, como un mayor uso de la semitrasera derecha y una reducción en las semifrontales. Esto sugiere que el retardo inicial favorece que los primeros evacuados utilicen las salidas más cercanas sin interferencias, pero a medida que el resto del pasaje comienza a moverse, la acumulación en los pasillos se intensifica, ralentizando progresivamente la evacuación.

k - Num. occupants within influence radius vs Time

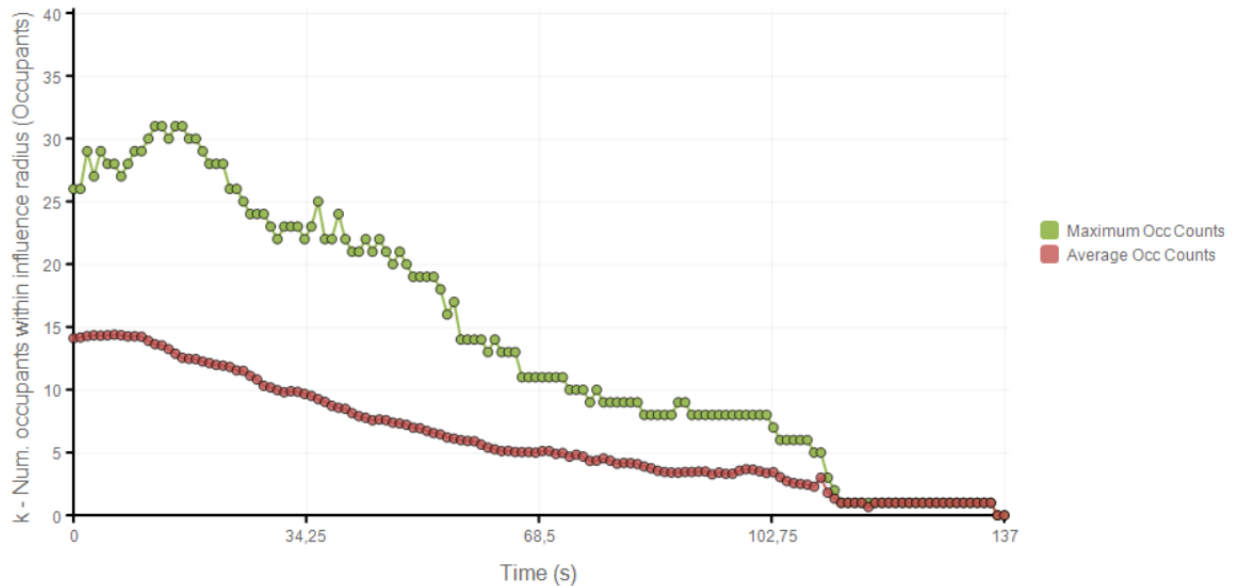


Ilustración 25.

El gráfico del número de ocupantes dentro del radio de influencia refleja esta evolución: se mantiene un valor alto y estable durante más de un minuto (superando los 30 ocupantes), seguido de un descenso escalonado con pequeños tramos de estancamiento, indicadores de congestiones parciales mantenidas.

## 6.5 ANÁLISIS GLOBALES CON TIEMPO DE PRE-MOVIMIENTO Y 2 SALIDAS BLOQUEADAS

Con el fin de analizar la resiliencia del sistema de evacuación ante condiciones adversas, se ha planteado un conjunto de simulaciones en las que se bloquean intencionadamente las salidas delanteras de emergencia de cada modelo de aeronave. Esta condición permite estudiar cómo se reorganiza el flujo de evacuación cuando los ocupantes no tienen acceso a las puertas situadas en la parte frontal del fuselaje, viéndose obligados a dirigirse hacia las zonas centrales y traseras del avión.

La hipótesis de trabajo responde a una situación realista en el ámbito de la seguridad aérea: la presencia de un incendio localizado en la cabina delantera, como puede ocurrir en el caso de una explosión en la zona de descanso de la tripulación, un fallo eléctrico en la cocina (galley) o un fuego originado en la zona de almacenaje. En estos escenarios, la generación de humo, calor o deformaciones estructurales puede impedir la apertura segura de las puertas frontales, bien por daños en los mecanismos o por condiciones de riesgo que contraindiquen su uso.

En las simulaciones desarrolladas para este estudio, el bloqueo de puertas se ha implementado directamente en Pathfinder, desactivando las zonas de salida correspondientes a las puertas delanteras, de manera que los ocupantes no las consideran como rutas disponibles durante la evacuación. Este cambio en la geometría funcional del modelo obliga a reorganizar por completo los patrones de movimiento, canalizando a los pasajeros hacia las salidas sobre las alas y en la parte trasera del fuselaje.

La comparación entre los resultados con y sin salidas bloqueadas ofrece información clave sobre la dependencia del sistema de ciertas salidas, la capacidad de absorción de las restantes, y la distribución espacial óptima del flujo de personas en condiciones degradadas. Asimismo, permite identificar puntos críticos de congestión y zonas de conflicto que podrían representar un riesgo en escenarios reales.

En los tres modelos analizados (Embraer 175, Boeing 737-700 y Boeing 777-300), se ha mantenido el número máximo de ocupantes y se ha considerado una condición de pre-movimiento idéntica a la empleada en el apartado 6.3. El único cambio entre escenarios ha sido la inactivación de las puertas delanteras, lo que permite aislar y evaluar con precisión el efecto de este factor sobre los tiempos de evacuación.

La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos en estas condiciones:

<b>Modelo de avión</b>	<b>Ocupación (N)</b>	<b>Nº de salidas activas</b>	<b>Tiempo de evacuación (s)</b>
<b>Embraer 175</b>	70	2	129,3

<b>Boeing 737-700</b>	126	4	106,3
<b>Boeing 777-300</b>	310	8	131,8

*Tabla 14. Tiempos de evacuación con pre-movimiento y bloqueo de salidas delanteras.*

## **6.6 ANÁLISIS INDIVIDUAL POR MODELO DE AERONAVE SIN TIEMPO DE PRE-MOVIMIENTO Y 2 SALIDAS BLOQUEADAS**

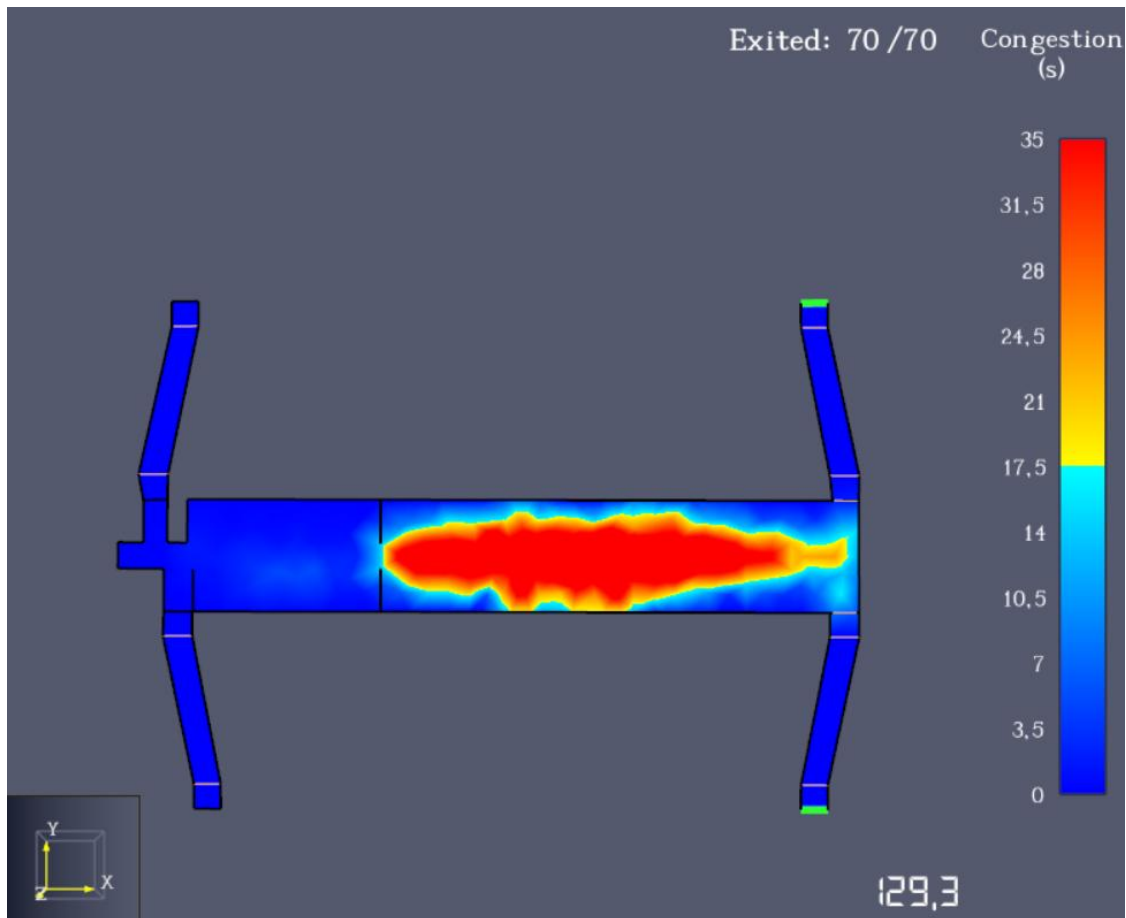
### **6.6.1 EMBRAER 175**

En este escenario se ha simulado la evacuación del modelo Embraer 175 con tiempo de pre-movimiento y bloqueo de las dos salidas delanteras, representando un escenario crítico en el que se produce una emergencia en la cabina (véase desarrollo completo en el apartado 6.5). En este caso, el tiempo total de evacuación alcanzó los 129,3 segundos, superando ampliamente el umbral de los 90 segundos marcado por la normativa.

A nivel de distribución, los 70 ocupantes evacuaron únicamente por las salidas traseras, con los siguientes resultados:

- **Puerta trasera derecha:** 30 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera izquierda:** 40 ocupantes evacuados

La concentración del flujo exclusivamente en las dos salidas posteriores provocó una acumulación significativa de personas en el tramo medio y final del pasillo. El mapa de congestión muestra zonas con retenciones superiores a 35 segundos, indicando cuellos de botella persistentes durante buena parte de la evacuación.



*Ilustración 26. Tiempo acumulado de congestión del Embraer 175 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas.*

En comparación con los resultados de los apartados 6.2.1 (sin pre-movimiento) y 6.4.1 (con pre-movimiento pero sin bloqueos), se observa un agravamiento notable en los niveles de congestión y en la duración del proceso. El gráfico del número de ocupantes dentro del radio de influencia evidencia esta diferencia: la curva de ocupación máxima no solo alcanza valores más altos (superiores a 25 personas), sino que también se mantiene estable durante un mayor periodo de tiempo, reflejando la saturación del espacio próximo a las salidas traseras.

k - Num. occupants within influence radius vs Time

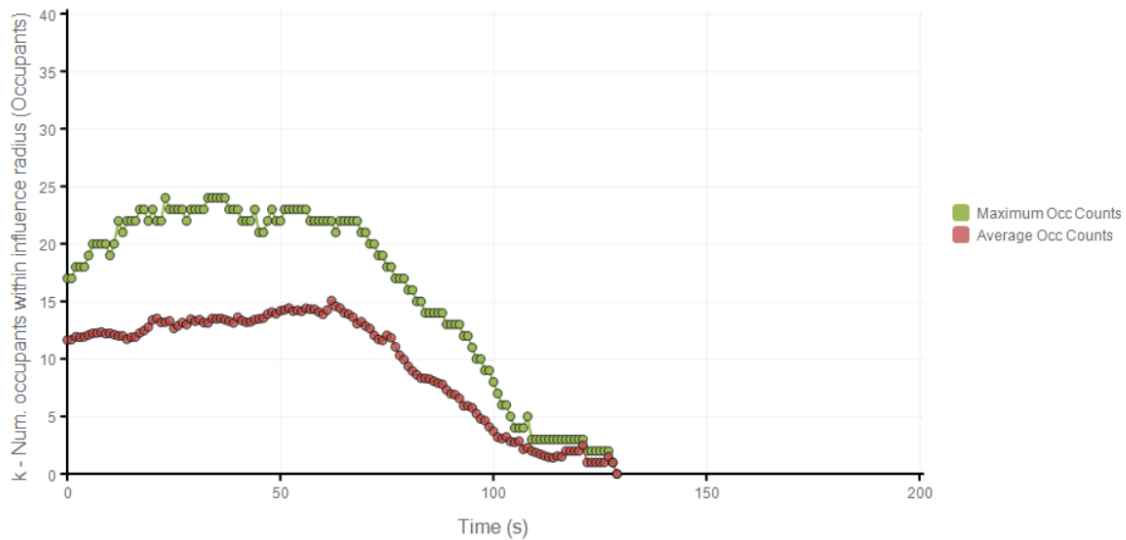


Ilustración 27. Evolución del número de ocupantes en Embraer 175 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas)

Este resultado pone de manifiesto la sensibilidad del sistema de evacuación a la disponibilidad efectiva de las salidas de emergencia, especialmente en configuraciones de pasillo único como la del Embraer 175.

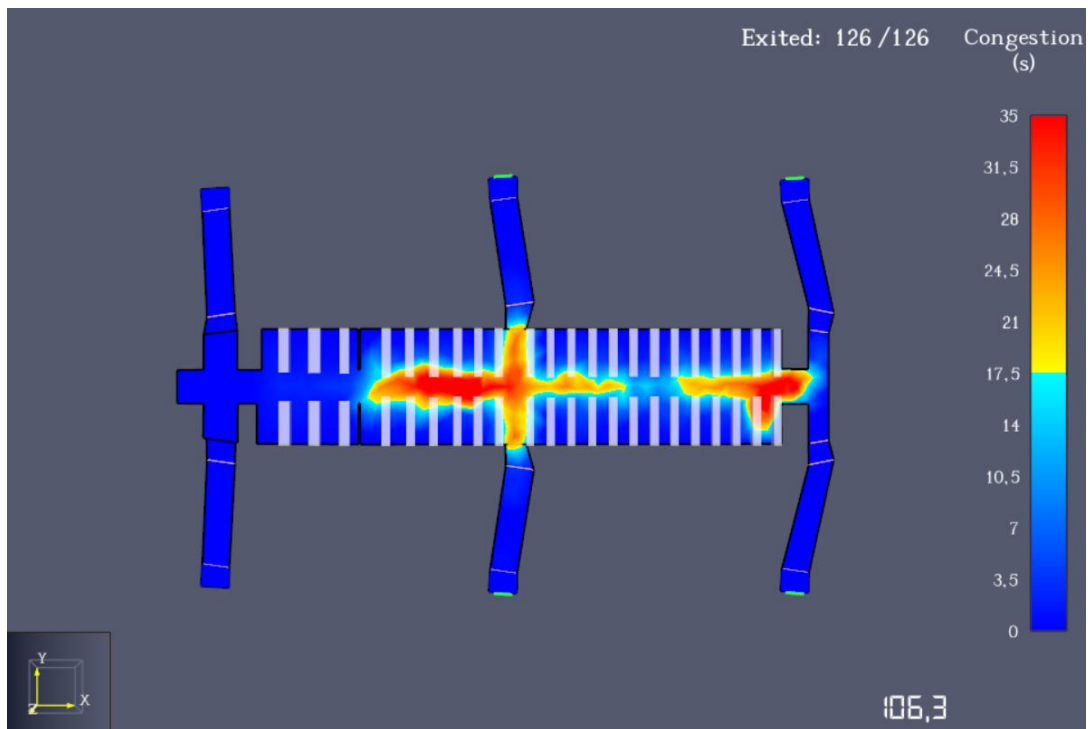
### 6.6.2 BOEING 737-700

En este escenario se ha simulado la evacuación del Boeing 737-700 considerando tiempo de pre-movimiento y bloqueo de ambas salidas delanteras, situación que representa una emergencia localizada en la cabina delantera, como se ha detallado en el apartado 6.5. La ocupación total es de 126 pasajeros y se mantienen operativas cuatro salidas: las dos sobre el ala y las dos traseras. El tiempo total de evacuación obtenido ha sido de 106,3 segundos, significativamente superior a los tiempos obtenidos en los escenarios anteriores.

La congestión se distribuye en varias zonas del pasillo, pero destaca con claridad el área central, justo en la intersección con las puertas de las alas. El uso intensivo de la puerta del ala derecha, por donde evacuaron 45 ocupantes, y de la izquierda con 37 evacuados, se

traduce en un foco de retención relevante que supera los 30 segundos. Las salidas traseras también fueron empleadas, aunque en menor medida:

- **Puerta sobre el ala izquierda:** 37 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala derecha:** 45 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera izquierda:** 18 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera derecha:** 26 ocupantes evacuados



*Ilustración 28. Tiempo acumulado de congestión del Boeing 737-700 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas.*

Comparado con el escenario 6.4.2 (con pre-movimiento pero sin bloqueos), el tiempo total ha aumentado en más de 13 segundos, y la concentración de tráfico se ha intensificado, especialmente en los puntos de cruce de flujo entre filas de asientos. Asimismo, en contraste con el escenario base (6.2.2), el bloqueo de salidas delanteras ha forzado a redistribuir

completamente el flujo hacia la parte posterior, lo que ha incrementado la saturación del espacio útil y reducido la eficacia del sistema de evacuación.

k - Num. occupants within influence radius vs Time

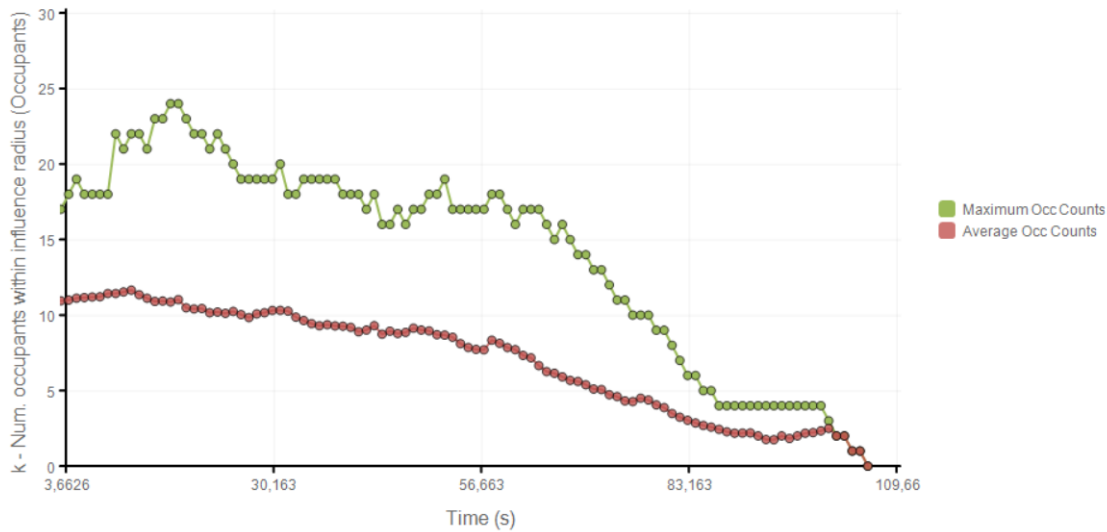


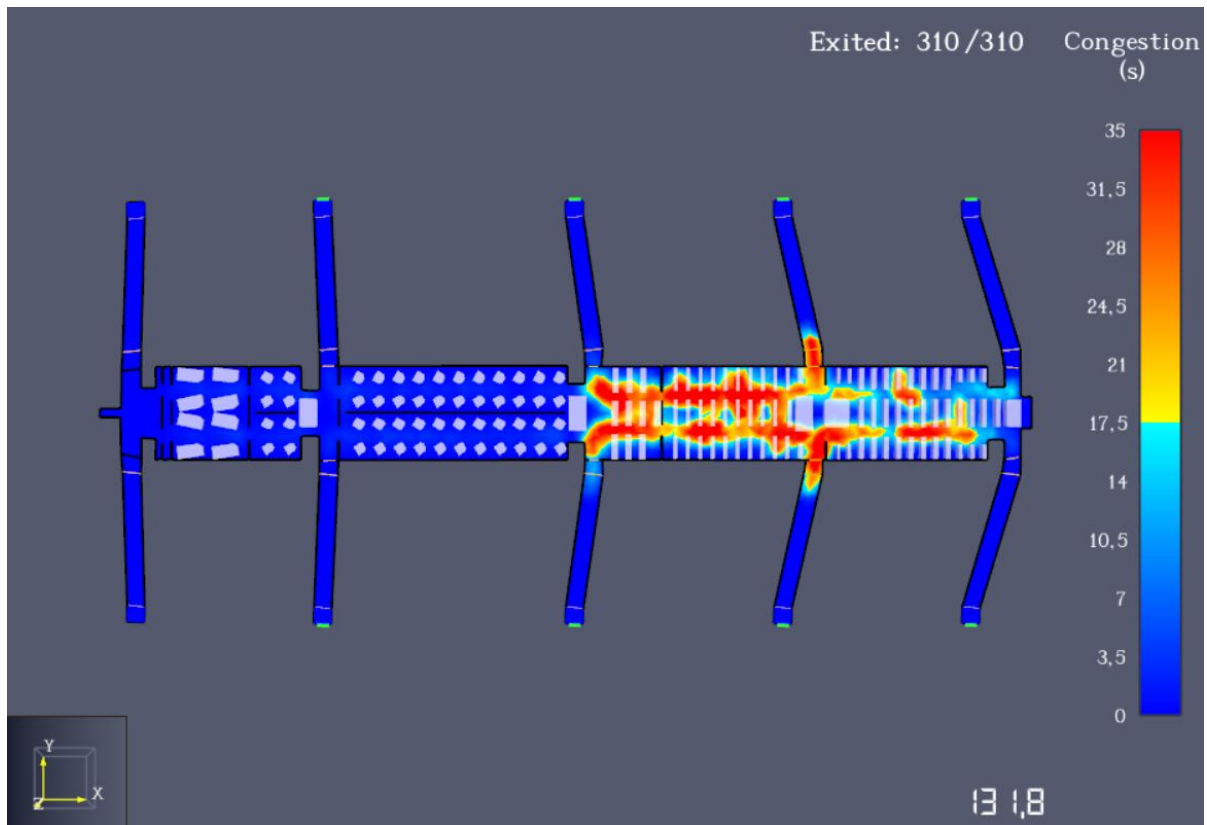
Ilustración 29. Evolución del número de ocupantes en Boeing 737-700 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas)

La gráfica del número de ocupantes dentro del radio de influencia muestra una meseta amplia en los valores máximos, manteniéndose alrededor de los 20-25 ocupantes durante más de 60 segundos. El descenso posterior es más lento y escalonado, reflejando la dificultad añadida al depender exclusivamente de salidas más alejadas y con mayor competencia de acceso.

### 6.6.3 BOEING 777-300

En este escenario se ha simulado la evacuación del Boeing 777-300 manteniendo la ocupación completa de 310 pasajeros, con introducción de pre-movimiento y el bloqueo de ambas salidas frontales, simulando una situación de incendio en la zona de cabina (ver apartado 6.5). Se han mantenido operativas ocho salidas: semifrontales, sobre las alas, semitraseras y traseras. El tiempo total de evacuación registrado ha sido de 131,8 segundos.

Resulta llamativo que este valor sea inferior al obtenido en el escenario con pre-movimiento pero sin bloqueos (137,3 s). Una primera explicación puede encontrarse en la redistribución del flujo hacia las salidas más eficientes, ya que la inhabilitación de las puertas delanteras canaliza el movimiento hacia zonas de evacuación más efectivas, evitando acumulaciones en la parte frontal. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que los parámetros de pre-movimiento se asignan de forma aleatoria, lo que introduce cierta variabilidad entre simulaciones. Además, el bloqueo de las puertas delanteras apenas altera el flujo general, ya que únicamente eran utilizadas por los primeros ocupantes situados en la zona de primera clase (8 personas), por lo que su impacto sobre el comportamiento global es limitado.



*Ilustración 30. Tiempo acumulado de congestión del Boeing 777-300 al finalizar la simulación con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas.*

El mapa de congestión muestra una acumulación más intensa en la zona central y posterior del fuselaje, con puntos localizados de retención, pero sin cuellos de botella críticos como

los que aparecen en escenarios de mayor dispersión de salidas. En cuanto a la distribución de evacuados, el uso de puertas vuelve a concentrarse en las zonas semitraseras y de ala:

- **Puerta semifrontal izquierda:** 27 ocupantes evacuados
- **Puerta semifrontal derecha:** 25 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala izquierda:** 41 ocupantes evacuados
- **Puerta sobre el ala derecha:** 42 ocupantes evacuados
- **Puerta semitraseras izquierda:** 51 ocupantes evacuados
- **Puerta semitraseras derecha:** 52 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera izquierda:** 40 ocupantes evacuados
- **Puerta trasera derecha:** 32 ocupantes evacuados

k - Num. occupants within influence radius vs Time

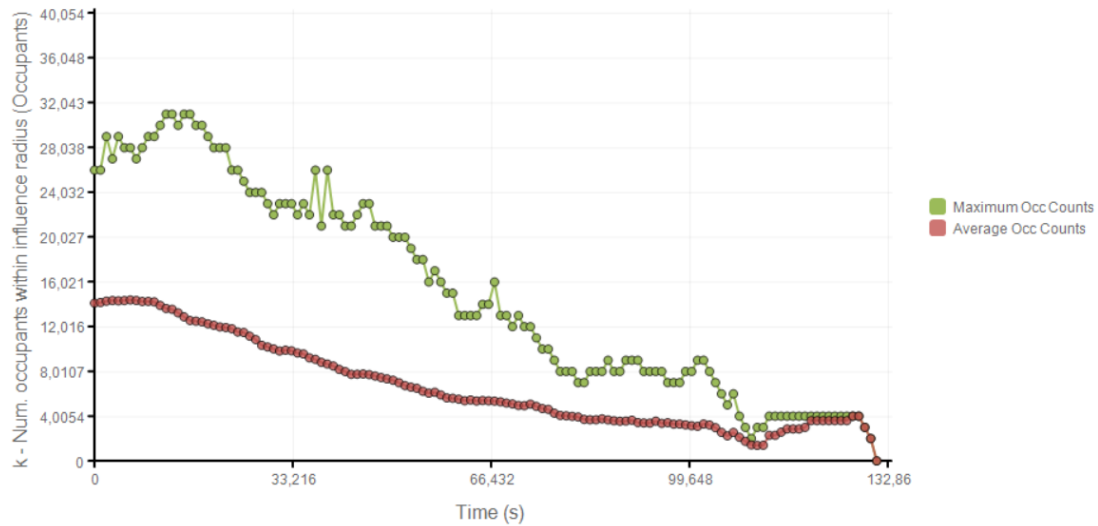


Ilustración 31. Evolución del número de ocupantes en Boeing 777-300 dentro del radio de influencia (2 m) a lo largo del tiempo. (con tiempo de pre-movimiento y puertas frontales bloqueadas)

El gráfico del número de ocupantes dentro del radio de influencia muestra un patrón similar al del escenario 6.4.3, aunque con una bajada más sostenida y sin pausas prolongadas, lo que confirma que el flujo general se mantuvo dinámico a pesar de la supresión de dos salidas.

## Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 7.1 SÍNTESIS GENERAL DEL TRABAJO REALIZADO

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado un análisis numérico del proceso de evacuación en aeronaves comerciales, centrado específicamente en la evaluación de la eficiencia de las salidas de emergencia bajo distintos escenarios. El estudio ha combinado dos enfoques complementarios: por un lado, el uso de fórmulas analíticas basadas en correlaciones empíricas para estimar los tiempos de evacuación en función del número de ocupantes y la geometría del avión; por otro, la realización de simulaciones detalladas mediante el software Pathfinder, una herramienta especializada en la modelización del movimiento peatonal en situaciones de emergencia.

La metodología seguida ha consistido en la selección de tres modelos de avión con características contrastadas —Embraer 175, Boeing 737-700 y Boeing 777-300— con el objetivo de abarcar distintos niveles de capacidad, configuración interna y número de salidas disponibles. Para cada uno de ellos se han desarrollado modelos geométricos simplificados en Pathfinder, respetando las proporciones reales del fuselaje y la disposición de los asientos y salidas, y se han definido perfiles de ocupantes siguiendo las recomendaciones de organismos internacionales.

Posteriormente, se han ejecutado múltiples simulaciones bajo diferentes condiciones: evacuación sin retardo inicial, con tiempos de pre-movimiento distribuidos según una función log-normal y, finalmente, escenarios en los que se han bloqueado algunas de las salidas de emergencia para simular situaciones de fallo o riesgo externo. Estos análisis han permitido comparar cómo varían los tiempos de evacuación y los patrones de comportamiento de los ocupantes según cada escenario, y han servido como base para identificar los factores más determinantes en el rendimiento del sistema de evacuación.

El conjunto del trabajo ha permitido contrastar los resultados obtenidos mediante estimaciones rápidas con los generados por simulaciones más detalladas, ofreciendo una visión crítica sobre la utilidad de cada método y aportando una base sólida para la discusión de mejoras en el diseño y validación de procedimientos de evacuación aérea.

## **7.2 EVALUACIÓN GLOBAL Y SÍNTESIS DE RESULTADOS**

Con el objetivo de integrar y visualizar de forma comparativa los resultados obtenidos en los distintos escenarios simulados, se ha elaborado la tabla resumen que se presenta a continuación. En ella se recogen los tiempos de evacuación para cada combinación de variables clave: modelo de aeronave, presencia o ausencia de tiempo de pre-movimiento, y número de salidas operativas.

<b>Modelo de avión</b>	<b>Escenario</b>	<b>Ocupantes</b>	<b>Pre-movimiento</b>	<b>Salidas disponibles</b>	<b>Tiempo de evacuación (s)</b>
<b>Embraer 175</b>	Sin pre-movimiento	70	No	4	79,8
<b>B737-700</b>	Sin pre-movimiento	126	No	6	80,8
<b>B777-300</b>	Sin pre-movimiento	310	No	10	105,8
<b>Embraer 175</b>	Con pre-movimiento	70	Sí	4	86,3
<b>B737-700</b>	Con pre-movimiento	126	Sí	6	93,3

<b>B777-300</b>	Con pre-movimiento	310	Sí	10	137,3
<b>Embraer 175</b>	Con pre-mov. y salidas bloqueadas	70	Sí	2	129,3
<b>B737-700</b>	Con pre-mov. y salidas bloqueadas	126	Sí	4	106,3
<b>B777-300</b>	Con pre-mov. y salidas bloqueadas	310	Sí	8	131,8

*Tabla 15. Tiempos de evacuación simulados según modelo de aeronave, configuración de salidas y pre-movimiento*

Los resultados permiten extraer las siguientes conclusiones generales:

- El tiempo de evacuación aumenta progresivamente con el número de ocupantes, incluso cuando se incrementa el número de salidas. Esto sugiere que el tamaño de la aeronave y su capacidad máxima son factores críticos que deben ser compensados con un diseño muy eficiente de las rutas de evacuación.
- El pre-movimiento introduce una penalización significativa, que puede añadir entre 15 y 20 segundos al tiempo total de evacuación. Este retardo representa una fase clave en la respuesta humana y no debe ser ignorado en análisis normativos.
- El bloqueo de salidas tiene un efecto acumulativo cuando se combina con tiempos de reacción, especialmente en aeronaves de gran capacidad. En estos casos, los tiempos superan con claridad el límite normativo de 90 segundos, lo que refuerza la necesidad de disponer de rutas alternativas bien distribuidas.

- Ninguno de los factores actúa de forma aislada, y su impacto combinado puede comprometer seriamente la seguridad si no se contemplan desde la fase de diseño del interior de cabina y procedimientos de evacuación.

Esta evaluación global permite, además de cuantificar los tiempos, valorar el comportamiento del sistema de evacuación bajo condiciones degradadas, aspecto esencial en situaciones reales donde los parámetros ideales no siempre se cumplen.

### ***7.3 COMPARACIÓN ENTRE ESTIMACIONES ANALÍTICAS Y SIMULACIONES***

Previo a la realización de simulaciones detalladas, se desarrolló un modelo analítico ajustado para estimar el tiempo total de evacuación en cada modelo de aeronave. Este modelo incluye tres componentes principales: un tiempo de pre-movimiento de 30 segundos, un flujo de evacuación adaptado al tipo de avión y una penalización por acumulación en salidas. A diferencia de otros enfoques que adoptan un valor estándar de caudal de paso, en este caso se emplearon flujos más conservadores y específicos: 1,30 pers/m·s para el Embraer 175, 1,20 pers/m·s para el Boeing 737-700 y 1,00 pers/m·s para el Boeing 777-300.

La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos con este modelo y los compara con los tiempos registrados en las simulaciones con Pathfinder que también incorporan el mismo valor de pre-movimiento (30 segundos), pero sin bloqueos de salidas:

<b>Modelo de avión</b>	<b>Tiempo estimado (modelo analítico) [s]</b>	<b>Tiempo simulado (con Tpm = 30 s) [s]</b>	<b>Diferencia [%]</b>
Embraer 175	52,9	86,3	+63,1 %

Boeing 737-700	54,8	93,3	+70,3 %
Boeing 777-300	66,7	137,3	+105,9 %

*Tabla 16. Comparación entre tiempos de evacuación estimados de manera analítica y mediante simulaciones.*

La comparación revela una tendencia clara: el modelo analítico subestima de forma considerable los tiempos reales de evacuación, incluso tras aplicar flujos reducidos y penalizaciones correctoras. Esta desviación es particularmente acentuada en aeronaves de mayor capacidad, donde la geometría compleja, la densidad de ocupantes y los efectos acumulativos generan retardos adicionales no contemplados en el modelo teórico.

Este resultado pone de manifiesto las limitaciones de las aproximaciones manuales cuando se desea evaluar con precisión el cumplimiento normativo, especialmente en escenarios realistas. Las simulaciones con Pathfinder permiten reflejar aspectos que el cálculo analítico no puede captar, como la interacción entre agentes, la formación dinámica de colas, la congestión localizada y la ocupación desigual de las salidas.

En definitiva, mientras que el modelo analítico puede servir como herramienta de validación inicial o estimación preliminar en fases tempranas de diseño, resulta claramente insuficiente como método único cuando se requiere una evaluación rigurosa del comportamiento evacuatorio bajo condiciones operativas complejas.

## ***7.4 ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE MÁS INFLUYEN EN EL TIEMPO DE EVACUACIÓN***

### **7.4.1 ODS**

Uno de los factores más determinantes en el tiempo total de evacuación es el número de ocupantes a bordo de la aeronave. Las simulaciones realizadas muestran una correlación

directa entre la cantidad de pasajeros y el tiempo necesario para completar la evacuación, incluso en condiciones óptimas de disponibilidad de salidas y ausencia de pre-movimiento.

El Embraer 175, con 70 ocupantes, presenta tiempos notablemente inferiores en todos los escenarios frente al Boeing 737-700 (126 ocupantes) y al Boeing 777-300 (310 ocupantes). En el escenario base, sin retardo inicial ni bloqueos, los tiempos registrados fueron de 79,8 s, 80,8 s y 105,8 s respectivamente. Esta progresión evidencia que, aunque las aeronaves de mayor capacidad disponen de más salidas de emergencia, el aumento del número de pasajeros genera flujos más densos, mayores niveles de congestión en los pasillos y tiempos de espera más prolongados en las inmediaciones de las salidas.

Asimismo, se ha comprobado que el ritmo de evacuación no escala de forma proporcional al número de puertas disponibles. Es decir, duplicar el número de salidas no conlleva necesariamente una reducción equivalente del tiempo de evacuación si no se acompaña de mejoras en la geometría interna que favorezcan una distribución más eficiente del flujo.

En los aviones de gran capacidad, la evacuación se caracteriza por una alta simultaneidad en la demanda de salida desde múltiples zonas del fuselaje, lo que genera interferencias entre flujos convergentes y una utilización desigual de las puertas. Esta situación se refleja en la distribución temporal del proceso: los últimos pasajeros tardan considerablemente más en iniciar su movimiento y alcanzar una salida, incluso cuando todas ellas están operativas desde el comienzo.

En definitiva, el número de ocupantes no solo influye en la duración total de la evacuación, sino que también altera la dinámica interna del flujo de pasajeros. Por ello, su impacto debe analizarse en conjunto con otros factores clave como el diseño de los pasillos, la ubicación y accesibilidad de las salidas, y la estrategia global de evacuación implementada.

#### **7.4.2 TIEMPO DE PRE-MOVIMIENTO Y COMPORTAMIENTO INICIAL**

La comparación entre los escenarios sin pre-movimiento y aquellos que incorporan este retardo muestra incrementos claros en los tiempos totales de evacuación. En el caso del Embraer 175, el tiempo de evacuación pasa de 79,8 segundos en el escenario base a 86,3

segundos cuando se introduce un tiempo de pre-movimiento de 30 segundos. En el Boeing 777-300, este efecto es aún más acusado: el tiempo asciende de 105,8 a 137,3 segundos. Esta diferencia no se explica únicamente por la suma directa del retardo individual, sino por el efecto acumulativo que provoca una activación asíncrona del movimiento, lo cual retrasa la formación de flujos constantes hacia las salidas.

Este comportamiento se aprecia con claridad en las curvas temporales que representan la evolución del número de ocupantes dentro de la zona de análisis (radio de 2 metros) a lo largo del tiempo. En los gráficos correspondientes a cada modelo, se observa cómo la pendiente inicial de la curva es menos pronunciada en presencia de pre-movimiento, reflejando una salida más escalonada y, por tanto, menos eficiente desde el punto de vista del aprovechamiento dinámico del espacio.

Además, esta activación progresiva genera una utilización subóptima de las salidas durante los primeros instantes de la evacuación, lo que reduce la capacidad efectiva del sistema en el momento en que más se necesita. El resultado final es un alargamiento del proceso global, incluso cuando la configuración geométrica es favorable.

En resumen, el tiempo de pre-movimiento introduce una penalización significativa en el rendimiento del sistema de evacuación. Aunque pueda parecer un aspecto menor en el planteamiento del modelo, su inclusión es imprescindible para obtener resultados realistas y coherentes con las condiciones que podrían presentarse en una situación de emergencia real.

### **7.4.3 DISPONIBILIDAD DE SALIDAS Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL**

La distribución y disponibilidad de las salidas de emergencia condiciona de forma crítica el comportamiento del sistema de evacuación. En los escenarios simulados, se ha evaluado el impacto de bloquear parcialmente las salidas situadas en la parte delantera del fuselaje, simulando una situación realista como un incendio externo o un fallo estructural localizado. Esta medida, combinada con el pre-movimiento, permite analizar configuraciones degradadas donde no todas las rutas de evacuación están accesibles.

Los resultados muestran un incremento sistemático y significativo del tiempo de evacuación en todos los modelos. En el Embraer 175, el tiempo asciende a 129,3 segundos, mientras que en el Boeing 737-700 y el Boeing 777-300 se alcanzan los 106,3 y 131,8 segundos respectivamente. En todos los casos, se supera ampliamente el umbral normativo de los 90 segundos, lo que pone de manifiesto que la pérdida parcial de salidas compromete gravemente la capacidad del sistema, independientemente del tamaño o la configuración de la aeronave.

El impacto no se limita únicamente a la duración total del proceso, sino que afecta también a la dinámica interna de la evacuación. El cierre de las puertas frontales provoca una concentración forzada de flujos hacia las salidas traseras, lo que genera acumulaciones más intensas, aumento de la densidad en zonas críticas y la aparición de cuellos de botella persistentes. Este fenómeno puede observarse con claridad en los mapas de utilización del espacio, donde se identifican áreas de ocupación sostenida, especialmente en torno a las puertas operativas.

Desde el punto de vista geométrico, los modelos de doble pasillo —como el Boeing 777-300— presentan una mayor capacidad teórica de flujo, pero esta ventaja se reduce considerablemente cuando una sección del avión pierde funcionalidad. En estas situaciones, los ocupantes del lateral afectado se ven obligados a cruzar transversalmente el fuselaje para acceder a una salida activa, lo que incrementa la complejidad de los movimientos y disminuye la eficiencia global. Por el contrario, en modelos de pasillo único, aunque el flujo es más lineal, la pérdida de salidas frontales deja al sistema con escasa capacidad de redistribución, agravando el problema por la falta de redundancia.

Además, se ha observado un comportamiento ineficiente por parte de los ocupantes, quienes tienden a dirigirse inicialmente hacia las salidas más próximas, incluso cuando estas están bloqueadas. Esta reacción, típica en los modelos de simulación basados en agentes, genera flujos mal distribuidos y esfuerzos inútiles que retrasan la evacuación del conjunto.

En definitiva, los resultados subrayan la importancia de diseñar configuraciones no solo conforme a los requisitos normativos mínimos, sino que además garanticen redundancia

funcional y permitan una redistribución efectiva del flujo ante situaciones imprevistas de bloqueo parcial de salidas.

## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IATA. (2023). *Passenger Forecast 2023-2040*. International Air Transport Association. Recuperado de: <https://www.iata.org/en/publications/store/passenger-forecast/>
- [2] EASA. (2022). *Annual Safety Review 2022*. European Union Aviation Safety Agency. Recuperado de: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/general-publications/annual-safety-review-2022>
- [3] Objetivos de Desarrollo Sostenible. (s. f.). UNDP. Recuperado el 19 de febrero de 2025, de: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- [4] Federal Aviation Administration. (s. f.). Normativas sobre evacuación en aeronaves. Recuperado de: <https://www.faa.gov/>
- [5] Crowd Movement Simulation and Egress Modeling Software: Pathfinder. (s. f.). Thunderhead Engineering. Recuperado de: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>
- [6] [6] Gwynne, S.M.V.; Rosenbaum, E.R. *Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement*. En: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 4ª edición, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 2008.
- [7] [7] Klüpfel, H.; Schreckenber, M.; Meyer-König, T. *Models for Crowd Movement and Egress Simulation*. *Annals of Solid and Structural Mechanics*, 2021. Disponible en: [https://www.academia.edu/66724449/Models\\_for\\_crowd\\_Movement\\_and\\_egress\\_Simulation](https://www.academia.edu/66724449/Models_for_crowd_Movement_and_egress_Simulation)
- [8] [8] Liu, X.; Wang, X.; Zhao, L. *Simulation and Optimization of Fire Safety Emergency Evacuation*. *AIP Advances*, vol. 11, no. 6, 2021. Disponible en: <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/11/6/065323/994819/>
- [9] [9] Ministry of Business, Innovation and Employment (New Zealand). *C/VM2 Verification Method: Framework for Fire Safety Design (Amendment 4)*. 2014. Disponible en: <https://www.building.govt.nz/assets/Uploads/building-code-compliance/c-protection-from-fire/asvm/cvm2-protection-from-fire-amendment-4.pdf>
- [10] [10] Moussaïd, M.; Kapadia, M.; Thrash, T.; Sumner, R.W.; Gross, M.; Helbing, D.; Hölscher, C. *Crowd Behaviour during High-Stress Evacuations in an Immersive Virtual Environment*. Springer, 2016. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-2921-4\\_41](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-2921-4_41)

- [11] [11] Moussaïd, M.; Helbing, D.; Theraulaz, G. *Pedestrian, Crowd, and Evacuation Dynamics*. arXiv preprint arXiv:1309.1609, 2013. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1309.1609>
- [12] [12] Nishida, R.; Sugimoto, M.; Kondo, K. *Crowd Simulation Incorporating a Route Choice Model and Similarity Evaluation Using Real Large-Scale Data*. arXiv preprint arXiv:2302.10421, 2023. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2302.10421>
- [13] [13] Schadschneider, A.; Klingsch, W.; Klüpfel, H.; Kretz, T.; Rogsch, C.; Seyfried, A. *Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications*. En: *Encyclopedia of Complexity and System Science*, 2008. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/0802.1620>
- [14] [14] von Sivers, I.; Templeton, A.; Philippides, A.; Köster, G.; Bungartz, H.J.; Drury, J. *Modelling Social Identification and Helping in Evacuation Simulation*. *Safety Science*, Vol. 89, 2016, pp. 219–228. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1602.00805>
- [15] [15] Wu, B.; Ma, Z.; Zhao, Y.; Wang, M.; Yang, Y. *Simulation Research on Fire Emergency Evacuation Based on Pathfinder*. En: *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 338, Springer, 2023. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003433644-46/>
- [16] [16] Thunderhead Engineering. *Pathfinder Technical Reference Manual, Version 2024.2*. Thunderhead Support, 2024. Disponible en: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2024-2/technical-reference-manual/>
- [17] [17] International Maritime Organization (IMO). Revised Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. MSC.1/Circ.1533, 2016.
- [18] [18] Society of Fire Protection Engineers (SFPE). *Engineering Guide: Human Behavior in Fire*, 2ª edición. Bethesda, MD: SFPE, 2019.
- [19] [19] FAA – Federal Aviation Administration. *Advisory Circular AC 25.803-1: Emergency Evacuation Demonstrations*. U.S. Department of Transportation, 2003. Disponible en: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_25.803-1.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_25.803-1.pdf)