



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS CFD DE FUEGOS EN NAVES  
INDUSTRIALES PARA EVALUAR DISTANCIAS DE  
INTERVENCIÓN Y EVACUACIÓN**

Autor: Beatriz Peci García

Director: Borja Rengel Darnaculleta

Madrid

Julio 2022



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“Análisis CFD de fuegos en naves industriales para evaluar distancias de intervención y  
evacuación”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/23 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.: Beatriz Peci García

Fecha: 11/7/2023



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Borja Rengel Darnaculleta

Fecha: 13/7/2023







**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS CFD DE FUEGOS EN NAVES  
INDUSTRIALES PARA EVALUAR DISTANCIAS DE  
INTERVENCIÓN Y EVACUACIÓN**

Autor: Beatriz Peci García

Director: Borja Rengel Darnaculleta

Madrid

Julio 2022



# **ANÁLISIS CFD DE FUEGOS EN NAVES INDUSTRIALES PARA EVALUAR DISTANCIAS DE INTERVENCIÓN Y EVACUACIÓN**

**Autor: Peci García, Beatriz.**

Director: Rengel Darnaculleta, Borja.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este proyecto se basa en el análisis de simulaciones de incendios en naves industriales para determinar unas distancias óptimas de los recorridos de evacuación de los ocupantes e intervención de los bomberos. Las simulaciones se llevarán a cabo mediante el software FDS (Fire Dynamics Simulator) y con ayuda de la herramienta computacional Pyrosim.

**Palabras clave:** naves industriales, incendios, FDS, recorridos de evacuación.

### **1. Introducción**

Las longitudes de los recorridos para la intervención y evacuación ante incendios en instalaciones industriales están determinadas por las prescripciones del reglamento. Sin embargo, debido a las características de las naves industriales frente a otro tipo de edificaciones, se pone en duda que las distancias que figuran en el reglamento sean las óptimas. Esto es debido principalmente a que las naves logísticas son instalaciones de grandes dimensiones y capacidad, por lo que presentan muchos desafíos a la hora de protegerlas ante incendios. En concreto, a pesar del objetivo común de almacenar, éstas pueden llegar a ser muy versátiles, pudiendo variar ampliamente en diseño, capacidad, altura de los techos, materiales utilizados en su construcción, configuración del almacenaje, medidas de prevención de incendios instaladas y otros muchos factores dependiendo de su función principal. Además, en las últimas décadas, ha habido numerosos cambios en el sector del almacenamiento, entre ellos el auge del comercio por internet, que han llevado a un aumento considerable en la construcción de grandes naves industriales. Todo esto tendrá un impacto directo en la forma de actuar frente a incendios en naves logísticas y en los factores que afectarán a las condiciones de seguridad en éstas. Además, esto lleva a replantearse si en verdad las medidas de seguridad que se adoptan ante incendios en naves logísticas, en concreto las distancias de evacuación e intervención establecidas, son las

adecuadas y si dichas medidas están evolucionando para adaptarse a las necesidades actuales de este tipo de instalaciones.

Como consecuencia, se han elaborado numerosas guías prestacionales, que utilizan criterios muy diversos para determinar cuáles son las distancias óptimas manteniendo la seguridad de las naves, existiendo también claras diferencias en las longitudes determinadas. Además, el origen de dichas longitudes y por qué se han utilizado métodos y criterios distintos para determinarlas se desconoce, lo que demuestra la importancia de evaluar el impacto que estos recorridos tienen en la seguridad tanto de los ocupantes como de los bomberos, y de calcular las distancias óptimas en cada caso, siguiendo unos criterios razonables. Esto lleva también a cuestionarse qué métodos y criterios son los adecuados y los que se deben tener en cuenta para determinar unas distancias de evacuación e intervención correctas.

## **2. Definición del proyecto**

Lo que se pretende conseguir con el proyecto es determinar, mediante el análisis de simulaciones de incendios en naves industriales, unas distancias óptimas de seguridad para los recorridos de evacuación e intervención, en función de parámetros como las dimensiones de la nave y el tipo de incendio. En concreto, al existir normativas que utilizan criterios diferentes y recomiendan longitudes de recorrido distintas, se pretende unificar todas las normativas en una, obteniendo una única distancia de seguridad en cada caso.

Para ello, en primer lugar se recopiló toda la información posible y existente, realizando un análisis detallado de la normativa vigente y de las medidas de seguridad ante incendios establecidas en naves logísticas. Así se determinaron los criterios de seguridad más importantes, que pueden afectar a las condiciones de la nave, que se han tenido en cuenta en las simulaciones. También se determinaron unos tiempos de evacuación e intervención razonables, a partir de los estudios realizados en varias guías prestacionales, que también se han utilizado en el análisis de los escenarios.

A continuación, se elaboraron unas hipótesis de partida y diferentes escenarios, variables en dimensión, tipo de incendio y combustible, para realizar las simulaciones. Éstas se llevaron a cabo mediante la utilización de FDS (Fire Dynamics Simulator), con ayuda de la herramienta computacional Pyrosim.

Para cada escenario, se ha estudiado en qué momento se perdían las condiciones de seguridad de visibilidad, temperatura, niveles de gases y radiación térmica, tanto para los ocupantes

que estaban evacuando el almacén, como para los equipos de intervención, y se han comparado dichos tiempos con unos representativos, calculados anteriormente. De esta forma, se han interpretado los resultados obtenidos, sacando conclusiones acerca de qué longitudes de recorrido son las óptimas en base a todos los criterios definidos anteriormente.

### 3. Resultados y conclusiones

Como se explicó anteriormente, mediante el análisis de los archivos, gráficas y planos de corte obtenidos a partir de las simulaciones, se han obtenido las distancias óptimas de los recorridos de evacuación e intervención. Para ello, se ha elaborado una tabla recopilatoria, Tabla A, con los resultados de las simulaciones, que ordena los escenarios de mayor a menor seguridad y recoge si, en cada caso, se cumplen o no los criterios de seguridad de temperatura, visibilidad, niveles de gases y radiación térmica en distintos momentos de la simulación y en base a la presencia de control de humos y salidas de emergencia.

En segundo lugar, en base a lo anterior, se ha elaborado la Tabla B, que muestra las distancias calculadas para los recorridos de evacuación e intervención, objetivo principal del proyecto.

Clasificación	0 - 600 s			600 - 1200 s				1200 - 1800 s			
	Sí	+ 1 salida	No	Sí	C.H.	+ 1 salida	No	Sí	C.H.	+ 1 salida	No
Escenario 9	x			x				x			
Escenario 10	x			x					x		
Escenario 5	x			x					x		
Escenario 11	x			x					x	x	
Escenario 12	x				x				x	x	
Escenario 6	x				x				x	x	
Escenario 7	x				x				x	x	
Escenario 1	x				x						x
Escenario 8	x				x	x					x
Escenario 2	x				x	x					x
Escenario 3	x				x	x					x
Escenario 4		x					x				x

Tabla A. Clasificación de escenarios.

	+ 1 salida	1 salida
Con control de humos	de 50 m a 71 m (*)	de 71 m a 100 m (**)
Sin control de humos	de 71 m a 100 m (***)	de 71 m a 100 m (***)

Tabla B. Distancias recomendadas de los recorridos de evacuación e intervención.

(\*) Si el incendio es ultrarrápido y a la vez posee alta tasa de hollín, se ampliará a 71-100 m.

(\*\*) Si el incendio es ultrarrápido, se ampliará a más de 100 m.

(\*\*\*) Si el incendio es ultrarrápido o posee alta tasa de hollín, se ampliará a más de 100 m.

# CFD ANALYSIS OF WAREHOUSE FIRES TO ASSESS INTERVENTION AND EVACUATION DISTANCES

**Author: Peci García, Beatriz.**

Supervisor: Rengel Darnaculleta, Borja.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

This project is based on the analysis of fire simulations in industrial buildings to determine optimal evacuation distances for occupants and firefighter intervention. The simulations will be carried out using the FDS (Fire Dynamics Simulator) software and the Pyrosim computational tool.

**Keywords:** warehouses, fires, FDS, evacuation distances.

## 1. Introduction

The lengths of the routes for fire intervention and evacuation in industrial facilities are determined by the requirements of the regulations. However, due to the characteristics of industrial warehouses compared to other types of buildings, it is questionable whether the distances given in the regulation are optimal. This is mainly due to the fact that warehouses are facilities of large dimensions and capacity, and therefore present many challenges when it comes to fire protection. In particular, despite the common purpose of storage, they can be very versatile, varying widely in design, capacity, ceiling height, materials used in their construction, storage configuration, fire prevention measures installed and many other factors depending on their main function. In addition, in recent decades, there have been numerous changes in the warehousing sector, including the rise of e-commerce, which have led to a considerable increase in the construction of large industrial warehouses. All this will have a direct impact on how to deal with fires in logistics and on the factors that will affect safety conditions in warehouses. In addition, this leads to the question of whether the safety measures adopted in the event of fire in warehouses, specifically the evacuation and intervention distances established, are in fact adequate and whether these measures are evolving to adapt to the current needs of this type of facility.

As a result, numerous performance guides have been prepared, which use very different criteria to determine the optimum distances while maintaining the safety of the warehouses, and there are also clear differences in the lengths determined. Moreover, the origin of these lengths and why different methods and criteria have been used to determine them is unknown, which demonstrates the importance of evaluating the impact that these routes have on the safety of both occupants and firefighters, and of calculating the optimal distances in each case, following reasonable criteria. This also raises the question of which methods and criteria are appropriate and which should be taken into account to determine the correct evacuation and intervention distances.

## **2. Project definition**

The aim of the project is to determine, through the analysis of fire simulations in industrial buildings, optimal safety distances for evacuation and intervention routes, depending on parameters such as the size of the building and the type of fire. Specifically, as there are regulations that use different criteria and recommend different route lengths, the aim is to unify all the regulations into one, obtaining a single safety distance in each case.

To this end, first of all, all possible and existing information was compiled, carrying out a detailed analysis of the current regulations and the fire safety measures established in logistics warehouses. Thus, the most important safety criteria were determined, which can affect the conditions of the warehouse, and which have been taken into account in the simulations. Reasonable evacuation and intervention times were also determined on the basis of studies carried out in various performance guides, which were also used in the analysis of the scenarios.

Next, initial hypotheses and different scenarios, varying in size, type of fire and fuel, were developed to carry out the simulations. These were carried out using FDS (Fire Dynamics Simulator) with the help of the Pyrosim computational tool.

For each scenario, we studied at what point the safety conditions of visibility, temperature, gas levels and thermal radiation were lost, both for the occupants evacuating the warehouse and for the intervention teams, and compared these times with previously calculated representative times. In this way, the results obtained have been

interpreted, drawing conclusions about which route lengths are optimal based on all the previously defined criteria.

### 3. Results and conclusions

As explained above, by analyzing the files, graphs and slice files obtained from the simulations, the optimal distances of the evacuation and intervention routes were obtained. For this purpose, a compilation table, Table A, has been prepared with the results of the simulations, which ranks the scenarios from highest to lowest safety and shows whether or not the safety criteria of temperature, visibility, gas levels and thermal radiation are met in each case at different times of the simulation and on the basis of the presence of smoke control and emergency exits.

Secondly, based on the above, Table B has been prepared, which shows the distances calculated for the evacuation and intervention routes, the main objective of the project.

Clasificación	0 - 600 s			600 - 1200 s				1200 - 1800 s			
	Sí	+ 1 salida	No	Sí	C.H.	+ 1 salida	No	Sí	C.H.	+ 1 salida	No
Escenario 9	x			x				x			
Escenario 10	x			x					x		
Escenario 5	x			x					x		
Escenario 11	x			x					x	x	
Escenario 12	x				x				x	x	
Escenario 6	x				x				x	x	
Escenario 7	x				x				x	x	
Escenario 1	x				x						x
Escenario 8	x				x	x					x
Escenario 2	x				x	x					x
Escenario 3	x				x	x					x
Escenario 4		x					x				x

Table A. Scenario classification.

	+ 1 salida	1 salida
<b>Con control de humos</b>	de 50 m a 71 m (*)	de 71 m a 100 m (**)
<b>Sin control de humos</b>	de 71 m a 100 m (***)	de 71 m a 100 m (***)

Table B. Recommended distances for evacuation and intervention routes.

(\*) If the fire is ultra-fast and at the same time has a high soot rate, it will be extended to 71-100 m.

(\*\*) If the fire is ultra-fast, it will be extended to more than 100m.

(\*\*\*) If the fire is ultra-fast or has a high soot rate, it will be extended to more than 100 m.

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

<b>1</b>	<b>Revisión literaria.....</b>	<b>8</b>
1.1	Evolución de las naves industriales .....	8
1.2	Principales medidas de prevención y protección ante incendios y descripción ....	13
1.3	Tipos de incendios en naves industriales .....	16
1.4	Datos estadísticos de incendios en naves industriales .....	22
<b>2</b>	<b>Recorridos de evacuación e intervención en naves industriales.....</b>	<b>27</b>
2.1	Requisitos del reglamento español (RSCIEI).....	27
2.2	Recomendaciones de las directrices nacionales .....	32
2.3	Distancias y tiempos de evacuación e intervención.....	35
2.4	Criterios prestacionales para evaluar la seguridad de las personas .....	40
<b>3</b>	<b>Escenarios de incendio.....</b>	<b>42</b>
3.1	Hipótesis de partida .....	42
3.2	Descripción de escenarios .....	43
3.3	Simulaciones con FDS .....	51
3.4	Escenarios de incendio en Pyrosim .....	54
<b>4</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>61</b>
4.1	Escenarios pequeños .....	62
4.1.1	Escenarios pequeños con velocidad de crecimiento media .....	62
4.1.2	Escenarios pequeños con velocidad de crecimiento ultrarrápida .....	73
4.2	Escenarios medianos.....	83
4.2.1	Escenarios medianos con velocidad de crecimiento media .....	83
4.2.2	Escenarios medianos con velocidad de crecimiento ultrarrápida.....	89
4.3	Escenarios grandes.....	95
4.3.1	Escenarios grandes con velocidad de crecimiento media .....	95
4.3.2	Escenarios grandes con velocidad de crecimiento ultrarrápida.....	99
<b>5</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>Anexo I: Objetivos de Desarrollo Sostenible.....</b>	<b>110</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Producción bruta del sector del almacenamiento estadounidense desde 2000 hasta 2020 (en millones de dólares). Fuente: Statista (2022).....	12
<b>Ilustración 2.</b> Ingresos del comercio electrónico minorista en Estados Unidos desde 2017 hasta 2022, con predicciones hasta 2025 (en billones de dólares). Fuente: Statista (2022).	12
<b>Ilustración 3.</b> Sistemas de control de humos. Fuente: NFPA Journal en Español (Febrero 2021) .....	15
<b>Ilustración 4.</b> Temperatura vs tiempo únicamente limitado por combustible. Fuente: NIST (Junio 2021).....	19
<b>Ilustración 5.</b> Temperatura vs tiempo con ventilación limitada. Fuente: NIST (Junio 2021) .....	20
<b>Ilustración 6.</b> Incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018) .....	23
<b>Ilustración 7.</b> Muertes de civiles en incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018).....	24
<b>Ilustración 8.</b> Civiles heridos en incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018).....	24
<b>Ilustración 9.</b> Daños materiales directos en incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018) .....	25
<b>Ilustración 10.</b> Naves tipo A. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).....	28
<b>Ilustración 11.</b> Naves tipo B. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).....	28
<b>Ilustración 12.</b> Naves tipo C. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).....	29
<b>Ilustración 13.</b> Naves tipo D. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).....	29
<b>Ilustración 14.</b> Naves tipo E. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019) .....	30
<b>Ilustración 15.</b> Parámetros a tener en cuenta para el análisis del proceso de evacuación. Fuente: Cottes Group (Septiembre 2016).....	37
<b>Ilustración 16.</b> Relación entre el número de personas evacuadas y el tiempo de evacuación. Fuente: NTP 436 (1997) .....	38

<b>Ilustración 17.</b> Curva t-cuadrado de la evolución de un incendio. Fuente: ISO/TS 16733 (2006).....	46
<b>Ilustración 18.</b> Ejemplo de archivo de entrada del FDS. Fuente: FDS Tutorial .....	52
<b>Ilustración 19.</b> Captura de pantalla de Smokeview. Fuente: FDS Tutorial .....	53
<b>Ilustración 20.</b> Vista 3D del escenario 1 en Pyrosim.....	54
<b>Ilustración 21.</b> Código de entrada del FDS generado en Pyrosim para el escenario 1.....	55
<b>Ilustración 22.</b> Vista de elementos de la simulación para el escenario 1 en Pyrosim.....	56
<b>Ilustración 23.</b> Vista de materiales y superficies del modelo en Pyrosim.....	58
<b>Ilustración 24.</b> Vista de dispositivos de medición y resultados del modelo en Pyrosim ....	60
<b>Ilustración 25.</b> Gráfica temporal de la potencia del incendio en el escenario 1. ....	62
<b>Ilustración 26.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 1 pasados 10 minutos.....	63
<b>Ilustración 27.</b> Planos de corte de temperatura en el escenario 1 pasados 10 minutos.....	64
<b>Ilustración 28.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 1 pasados 20 minutos.....	65
<b>Ilustración 29.</b> Planos de corte de temperatura en el escenario 1 pasados 20 minutos.....	65
<b>Ilustración 30.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1.....	66
<b>Ilustración 31.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1.....	67
<b>Ilustración 32.</b> Gráfica temporal de la radiación térmica (kW/m <sup>2</sup> ) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1.....	68
<b>Ilustración 33.</b> Gráfica temporal de la concentración de dióxido de carbono (mol/mol) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1. ....	68
<b>Ilustración 34.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 2 pasados 10 minutos.....	69
<b>Ilustración 35.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 2.....	70
<b>Ilustración 36.</b> Planos de corte de temperatura en el escenario 2 pasados 20 minutos.....	71
<b>Ilustración 37.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 2 pasados 20 minutos.....	72
<b>Ilustración 38.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 2.....	72

<b>Ilustración 39.</b> Gráfica temporal de la potencia del incendio en el escenario 3. ....	74
<b>Ilustración 40.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 3 pasados 10 minutos.....	75
<b>Ilustración 41.</b> Planos de corte de temperatura en el escenario 3 pasados 10 minutos.....	75
<b>Ilustración 42.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 3 pasados 20 minutos.....	76
<b>Ilustración 43.</b> Planos de corte de temperatura en el escenario 3 pasados 20 minutos.....	77
<b>Ilustración 44.</b> Plano de corte de temperatura horizontal en el escenario 3 pasados 32 minutos.....	77
<b>Ilustración 45.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.....	78
<b>Ilustración 46.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.....	78
<b>Ilustración 47.</b> Gráfica temporal de la radiación térmica (kW/m <sup>2</sup> ) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.....	79
<b>Ilustración 48.</b> Gráfica temporal de la concentración de dióxido de carbono (mol/mol) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.....	80
<b>Ilustración 49.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 4 pasados 10 minutos.....	81
<b>Ilustración 50.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 4 pasados 20 minutos.....	81
<b>Ilustración 51.</b> Plano de corte de temperatura horizontal en el escenario 4 pasados 30 minutos.....	82
<b>Ilustración 52.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 4.....	82
<b>Ilustración 53.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 4.....	83
<b>Ilustración 54.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 5 pasados 10 minutos.....	84
<b>Ilustración 55.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 5 pasados 30 minutos.....	85

<b>Ilustración 56.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 5.....	86
<b>Ilustración 57.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 5.....	86
<b>Ilustración 58.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 6 pasados 10 minutos.....	87
<b>Ilustración 59.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 6 pasados 20 minutos.....	88
<b>Ilustración 60.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 6.....	88
<b>Ilustración 61.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 6.....	89
<b>Ilustración 62.</b> Gráfica temporal de la potencia del incendio en el escenario 7. ....	90
<b>Ilustración 63.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 7 pasados 10 minutos.....	90
<b>Ilustración 64.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 7 pasados 30 minutos.....	91
<b>Ilustración 65.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 7.....	92
<b>Ilustración 66.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 7.....	92
<b>Ilustración 67.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 8 pasados 10 minutos.....	93
<b>Ilustración 68.</b> Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 8 pasados 20 minutos.....	94
<b>Ilustración 69.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 8.....	94
<b>Ilustración 70.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 8.....	95
<b>Ilustración 71.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 9 pasados 20 minutos.....	96
<b>Ilustración 72.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 9.....	97

<b>Ilustración 73.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 9.....	97
<b>Ilustración 74.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 10 pasados 20 minutos.....	98
<b>Ilustración 75.</b> Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 10.....	99
<b>Ilustración 76.</b> Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 10.....	99
<b>Ilustración 77.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 11 pasados 13 minutos.....	100
<b>Ilustración 78.</b> Planos de corte de visibilidad en el escenario 12 pasados 13 minutos.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cambios en las tendencias en almacenes industriales durante las últimas seis décadas. Fuente: Zurich Resilience Solutions (2022) .....	9
Tabla 2. Requisitos de las instalaciones de protección contra incendios de los establecimientos industriales (Tipos A, B, C, D, E). Fuente: Cottes Group (Noviembre 2021) .....	31
Tabla 3. Longitudes de recorrido de evacuación. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019) .....	32
Tabla 4. Escenarios de intervención. Fuente: Guía de Diseño Prestacional (PBD) para los sistemas de protección contra incendios en naves industriales (Febrero 2021).....	34
Tabla 5. Criterios prestacionales para evaluar la seguridad de las personas. Fuente: Guía de Diseño Prestacional (PBD) para los sistemas de protección contra incendios en naves industriales (Febrero 2021) .....	41
Tabla 6. Escenarios de incendio .....	44
Tabla 7. Superficies de los sectores de incendio según su configuración y nivel de riesgo intrínseco. Fuente: RSCIEI (Septiembre 2022) .....	45
Tabla 8. Categorías de incendios t-cuadrado. Fuente: Tabla 38.2 del SPFE Handbook of Fire Protection Engineering (2016).....	47
Tabla 9. Separación de rociadores ESFR. Fuente: Norma UNE-EN 12845 (Enero 2021) .....	48
Tabla 10. Altura de techo y almacenamiento máxima. Fuente: Norma UNE-EN 12845 (Enero 2021).....	49
Tabla 11. Cálculo del tiempo de activación de los rociadores automáticos .....	50
Tabla 12. Datos fisicoquímicos de los combustibles de los escenarios de incendio. Fuente: Tabla A.39 del SPFE Handbook of Fire Protection Engineering (2016) .....	51
Tabla 13. Cálculo del tamaño nominal de celda según la tasa de liberación de calor .....	57
Tabla 14. Características térmicas de los materiales constructivos en Pyrosim .....	58
Tabla 15. Clasificación final de escenarios .....	103
Tabla 16. Distancias recomendadas de los recorridos de evacuación e intervención .....	104

# 1 REVISIÓN LITERARIA

---

## 1.1 EVOLUCIÓN DE LAS NAVES INDUSTRIALES

Durante las últimas décadas, la evolución de las naves industriales ha sido considerable. El sector del almacenamiento es un componente vital en muchas industrias, por lo que tiene que evolucionar con ellas y seguir adaptándose a sus nuevas necesidades.

Entre los factores determinantes que han producido grandes cambios en el sector se encuentran: la evolución del mercado global y la internacionalización de las empresas, la adaptación a una mayor rapidez de producción, debida principalmente al auge del comercio online, y la creciente necesidad de los negocios a gestionarse por sí mismos.

A medida que la tecnología avanza, las empresas buscan almacenar cada vez más mercancía, existiendo una tendencia de construcción de almacenes industriales cada vez más extensos y de gran capacidad. Sin embargo, esta creciente popularidad de grandes naves logísticas está provocando un aumento del tamaño y gravedad de los incendios, poniendo en riesgo tanto las mercancías como la vida de quienes se involucran en este sector. Como se puede observar en la Tabla 1, en las últimas seis décadas las naves logísticas han cambiado completamente su estructura, ubicación y forma de operar en ellas<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> (Mishall, 2022).

Cambios en tendencias en almacenes industriales		
Características	Almacenes hace 60 años	Almacenes hoy
Tamaño	1-2 campos de fútbol	10-30 campos de fútbol o más
Altura de techo	6,1-7,6 m	13,7 m o más
Altura de almacenaje	4,6-6,1 m	12,2 m o más
Anchura de pasillo	2,4-3,6 m	1,5 m
Materias primas	Papel, metal, vidrio	Plásticos, aerosoles, baterías de litio
Localización	Zonas urbanas/suburbanas donde los bomberos están preparados ante un incendio	Áreas rurales donde los bomberos pueden no estar preparados ante un incendio
Manipulación de la mercancía	Carretillas elevadoras y operarios	Robots

Tabla 1. Cambios en las tendencias en almacenes industriales durante las últimas seis décadas.

Fuente: Zurich Resilience Solutions (2022).

Además, con la evolución del mercado, la gestión de almacenes industriales se ha convertido en un proceso más estratégico y complejo. Aunque las naves industriales siguen manteniendo su función principal de almacenamiento, se pueden distinguir numerosos tipos, cada uno orientado a unos objetivos. Entre los nuevos tipos de naves, según sus funciones principales, se encuentran: las naves multinivel, destinadas al almacenamiento y la distribución en grandes núcleos urbanos, y en los que cada planta funciona como un almacén independiente; edificios más flexibles y versátiles, con posibilidad de tener múltiples entradas, y altura de techo y espacio entre columnas y estanterías variable; e instalaciones de almacenamiento en frío, para productos más concretos que requieren unas condiciones de almacenaje especiales <sup>2</sup>. Asimismo, en función de los materiales y del tiempo empleado en su construcción, podemos también distinguir diferentes tipos: de estructura metálica, las de más rápida construcción y las más luminosas, aunque poco rígidas; de hormigón prefabricado, de menor altura e iluminación, pero con resistencia ante incendios sin necesidad de tratamiento<sup>3</sup> como en

<sup>2</sup> (Mancilla, 2022).

<sup>3</sup> (Masachs, 2020).

las metálicas; de hormigón “in situ”, las más económicas pero las menos rápidas en construirse; o mixtas, que permiten ahorrar costes en material y tener un forma variable según las necesidades de cada proyecto<sup>4</sup>.

Por otro lado, las naves han aumentado en versatilidad, para tener la capacidad de adaptarse a los rápidos cambios en la industria. Esto tiene principalmente que ver con la corta duración de de la subcontratación de la actividad, lo que exige que el equipamiento de las naves industriales deba ser lo suficientemente flexible como para adaptarse a las necesidades de cualquier empresa y así evitar tener que hacer extensas reformas con cada cambio de arrendatario.

Con respecto a la globalización económica, ésta ha dado pie a la internacionalización de las empresas, disminuyendo la utilidad de redes de distribución de productos basadas en la cercanía a los mercados locales de consumo. Por ello comenzaron a construirse grandes centros de distribución de mercancías en localizaciones próximas a extensas infraestructuras de transporte, para poder suministrar productos a un mayor número de localidades. Dichos centros requieren un amplio espacio para almacenar productos, además de una significativa superficie exterior para facilitar la movilidad del transporte, por lo que existe una creciente necesidad de construcción de grandes naves logísticas en la periferia<sup>5</sup>.

Además, unas décadas atrás, las naves industriales sólo estaban disponibles para grandes negocios con altos presupuestos, mientras que ahora tanto los grandes como los pequeños negocios pueden acceder a ellas. Esto es debido a la necesidad, cada vez más presente, de los negocios a gestionarse por sí mismos. Adicionalmente, cada vez más compañías cambian su estrategia logística pasando de operar en un marco local a hacerlo en un contexto global. Por ello, el número de actividades que se desarrollan en el interior de las empresas se ha reducido, contratando a otras empresas para la realización de actividades

---

<sup>4</sup> (Involucra S.L., n.d.).

<sup>5</sup> (Bernardos, 2007).

que se consideran auxiliares, como es el caso de la logística. Como consecuencia de esto, ha habido un gran aumento de la demanda de naves industriales.

Debido a la extensión de las nuevas tecnologías de la información, que permitió la realización de actividades comerciales por Internet, existe un creciente interés en este sector, que ha dado pie al auge del comercio electrónico, en el que el producto se desplaza directamente desde el almacén hasta el domicilio del comprador. Como consecuencia, el cliente demanda envíos cada vez más rápidos y al alcance de su mano. Por ello, las empresas buscan mejorar su red de infraestructuras y hacer crecer su capacidad comercial para reducir los tiempos de entrega al máximo.

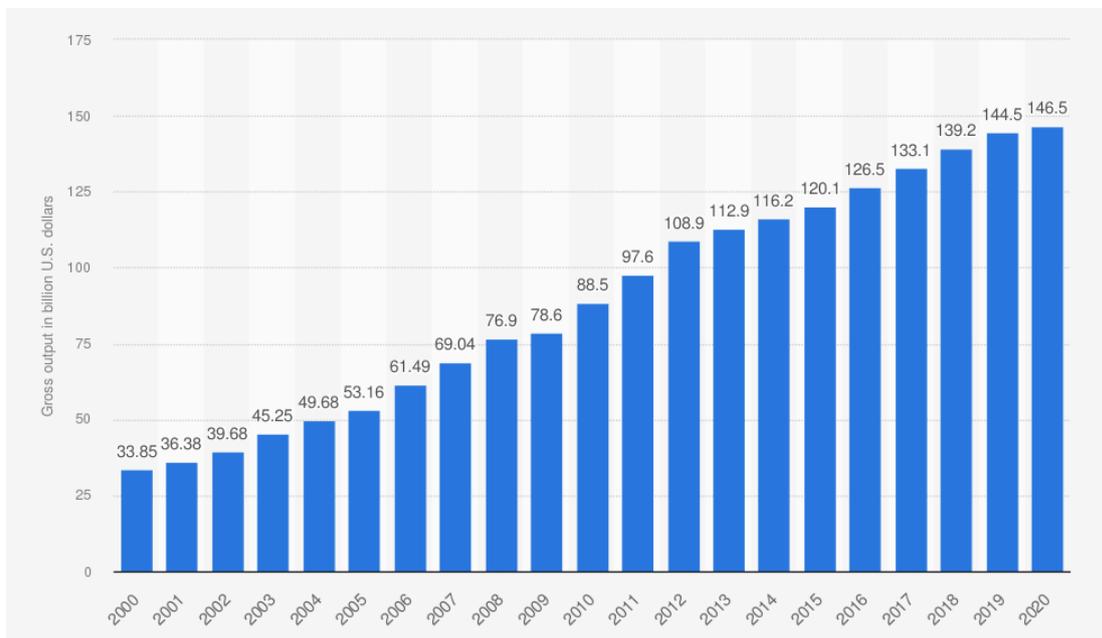
Desde 2020, y especialmente después de la pandemia, la venta online para muchas empresas se ha convertido en la única forma de supervivencia. El número de ventas online a nivel mundial en 2020, según los datos publicados por eMarketer, creció un 36%. Esto ha llevado a la necesidad en el sector de la logística de disponer de grandes naves que hagan frente al gran volumen de pedidos generado por el auge del comercio electrónico. Fuentes del sector inmobiliario aseguran que existe un aumento progresivo de la demanda de naves industriales en territorio nacional, sobre todo en zonas próximas a grandes capitales de provincia como Madrid y Barcelona<sup>6</sup>.

A pesar de ello, el comercio electrónico no se ha convertido en el principal factor impulsor de la demanda de naves industriales en España, siendo su repercusión inferior a la inicialmente esperada. Sin embargo, en países como Estados Unidos, el *e-commerce* tiene un papel esencial en la logística, como se puede comprobar en los ingresos obtenidos por esta actividad en las últimas dos décadas. Las Ilustraciones 1 y 2 muestran el crecimiento del comercio electrónico en Estados Unidos, tanto en producción como en ingresos<sup>7</sup>.

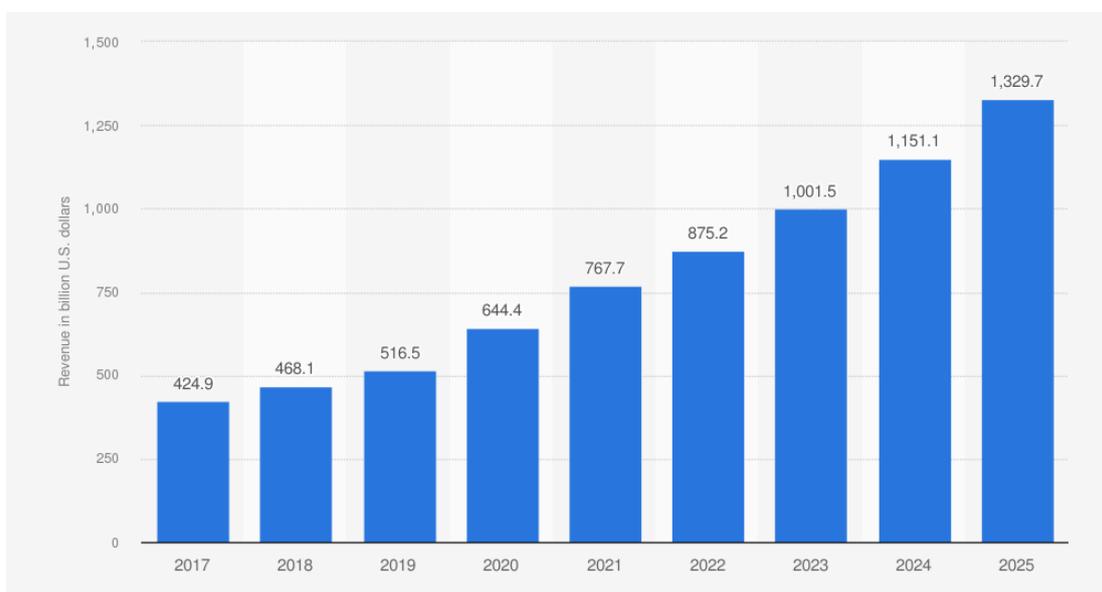
---

<sup>6</sup> (Medina, 2021).

<sup>7</sup> (Statista Research Department, 2023).



*Ilustración 1. Producción bruta del sector del almacenamiento estadounidense desde 2000 hasta 2020 (en millones de dólares). Fuente: Statista (2022).*



*Ilustración 2. Ingresos del comercio electrónico minorista en Estados Unidos desde 2017 hasta 2022, con predicciones hasta 2025 (en billones de dólares). Fuente: Statista (2022).*

El hecho de que el comercio online se haya convertido en un impulsor de la logística no solo trae beneficios. Esta tendencia está provocando un aumento de la densidad de existencias en la misma cantidad de espacio, lo que crea unas condiciones que favorecen la expansión de incendios que antes eran mucho menos destructivos. Por otro lado, la construcción de naves logísticas en zonas rurales y en la periferia tiene como consecuencia la lejanía de los equipos de intervención ante incendios, dificultando una actuación rápida y eficiente de los bomberos.

Es necesario tener en cuenta todo esto a la hora de proteger las naves logísticas ante incendios, ya que éstos ponen en riesgo la vida tanto de los ocupantes del edificio como de los bomberos, pueden ocasionar pérdidas millonarias e impactan negativamente en el medio ambiente.

## **1.2 PRINCIPALES MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN ANTE INCENDIOS Y DESCRIPCIÓN**

Las principales medidas de prevención y protección contra incendios (PCI) en naves industriales, deben garantizar tanto la seguridad de las personas como la protección de la nave, su maquinaria y material. La normativa impone medidas específicas para cada tipo de establecimiento según sus características principales y las actividades a las que se destina. Sin embargo, se puede realizar una clasificación general de las medidas más importantes e imprescindibles para la seguridad de las naves logísticas.

En primer lugar, se puede distinguir entre medidas de protección pasivas y activas<sup>8</sup>. Las pasivas se basan en la construcción y mantenimiento del edificio, teniendo en cuenta el CTE (Código Técnico de Edificación). De esta forma, se asegura la estabilidad de la estructura del edificio y se protegen los bienes inmuebles. Entre ellas, podemos encontrar las puertas cortafuegos, estructuras con materiales ignífugos y vías de evacuación. Las medidas activas, por otro lado, son aquellas que permiten detectar y extinguir el incendio

---

<sup>8</sup> (Firext, 2021).

en sus inicios de forma rápida y eficaz. Ambos tipos de medidas están regulados por el RSCIEI (Reglamento de Seguridad contra Incendios en Edificios Industriales).

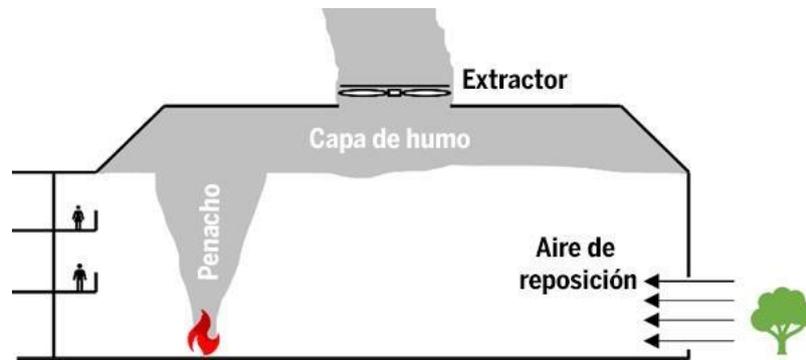
Las principales medidas de protección activas ante incendios para naves industriales son: sistemas de control de humo, rociadores, detectores y alarmas, y BIES (bocas de incendio equipadas).

Los sistemas de control de humo son capaces de controlar el movimiento del humo y del aire en el interior de un edificio. Además de su toxicidad y de sus altas temperaturas, capaces de quemar el interior de los pulmones, el humo obstruye la entrada de luz y disminuye la visibilidad, lo que provoca que el tiempo de evacuación de los ocupantes de la nave sea mucho mayor. Por ello, el principal objetivo de los sistemas de control de humo es permitir la evacuación de ocupantes de la nave, manteniendo los recorridos de acceso y de evacuación libres de humos, reduciendo los daños causados por los gases calientes en la estructura del edificio y los equipamientos y creando un ambiente lo suficientemente sostenible<sup>9</sup>.

En edificios de gran tamaño como almacenes industriales, los sistemas de control dirigen el humo a las zonas altas de la instalación, a niveles lo suficientemente inalcanzables por los ocupantes. Existen dos tipos de sistemas de control de humo, conocidos también como exutorios o aireadores, que permiten la ventilación de humo de forma natural o de forma mecánica. En el caso de la ventilación natural, ésta aprovecha la flotabilidad del aire para redirigir el humo fuera del edificio, mientras que la ventilación mecánica utiliza propulsores.

---

<sup>9</sup> (O'Connor, 2021).



*Ilustración 3. Sistemas de control de humos. Fuente: NFPA Journal en Español (Febrero 2021).*

Los sistemas de rociadores automáticos o sprinklers son la solución más utilizada para la protección de establecimientos industriales. Realizan dos tareas simultáneas: la de la detección de un incendio, en cuanto se perciben cambios de temperatura o humo, y su posterior control para contribuir a su extinción con ayuda de otros medios. Se trata de dispositivos totalmente independientes, que no requieren la activación de otros dispositivos para su actuación. En su mayoría, están compuestos de una red presurizada de agua y una boquilla que permite su liberación. Están preparados para casi cualquier tipo de riesgos, tanto si en el proceso de extinción sólo es necesaria agua, como en situaciones de líquidos inflamables o con necesidad de refrigeración, en los que se utiliza espuma o agua pulverizada<sup>10</sup>. Además, las características propias de las naves logísticas hacen que el uso de rociadores sea especialmente necesario, ya que éstas pueden llegar a almacenar grandes cantidades de mercancía, lo que aumenta el riesgo de que el incendio de expanda con rapidez. Por ello, se existen distintos tipos de rociadores, cada uno destinado a una función concreta. En primer lugar, según su localización, se puede distinguir entre los rociadores ubicados en el techo y los que se encuentran instalados directamente en las estanterías. Estos últimos consiguen que el agua llegue antes al foco del incendio para impedir que crezca más allá de las capacidades del sistema de rociadores convencional situado en el techo. Por último, cabe destacar la importancia de los

<sup>10</sup> (Cottes, n.d.).

rociadores *ESFR* (*Early Suppression Fast Response*). Éstos son muy comunes en naves logísticas ya que están diseñados para activarse y expulsar agua mucho antes y a una velocidad mayor que los rociadores normales<sup>11</sup>.

Los sistemas de alarma en una nave industrial están preparados para producir un sonido grave y potente con el fin de alertar a los ocupantes de la existencia de un incendio, para que puedan evacuar el edificio lo más rápido posible. Además, las alarmas disponen de un sistema de detección de incendios integrado, que es el que las activa si detecta unas condiciones de temperatura y humo determinadas. Adicionalmente, al ser las naves instalaciones de grandes dimensiones, es necesario colocar más de un dispositivo de alarma, para que la señal sonora de las alarmas, activadas al unísono, llegue a la planta completa. Por otro lado, también existen alarmas manuales para que en el caso de que un ocupante detecte un foco de incendio, sea capaz de activarlas con la mayor rapidez posible.

Por último, para poder extinguir el fuego con ayuda de una manguera, se deberá disponer de hidrantes y sistemas de abastecimiento de agua. Las bocas de incendio equipadas o BIES, suministran caudal de agua a los equipos de intervención y pueden ir ancladas tanto a la pared como al suelo. Los elementos principales que las componen son: un armario que contiene al conjunto; una manguera, de aproximadamente 20 metros, una válvula, que permite abrir y cerrar el paso de agua; una lanza, que permite controlar la intensidad de salida del agua a través de la manguera, y un manómetro para el control de la presión. Todos los tipos de bocas de incendio equipadas se pueden combinar con el uso de espumógenos, para incendios en los que intervengan líquidos inflamables<sup>12</sup>.

### **1.3 TIPOS DE INCENDIOS EN NAVES INDUSTRIALES**

Una vez definidas las principales medidas de protección ante incendios, es importante evaluar los tipos de incendios más comunes en naves logísticas, así como los diferentes

---

<sup>11</sup> (O'Connor, 2021).

<sup>12</sup> (Semamcoin S.L., 2015).

escenarios de incendio con mayor riesgo, con el fin de analizar su impacto en la seguridad de los ocupantes y equipos de intervención, y poder desarrollar las medidas de protección contra incendios (PCI) necesarias para minimizar dichos incendios.

Para poder comprender mejor la dinámica de los incendios, es necesario definir los parámetros más importantes que los caracterizan. Desde un punto de vista científico, el fuego es una reacción química de oxidación de tipo exotérmico, pero, a diferencia de otras reacciones de oxidación, ésta ocurre con gran rapidez, por lo que libera grandes cantidades de luz y calor. Para que pueda darse esta reacción, son necesarios cuatro elementos, los cuales deben estar presentes a la vez y en todo momento para poder iniciar o mantenerse dicho fenómeno. Estos elementos son: combustible, oxígeno, calor y reacción química en cadena<sup>13</sup>.

Por otro lado, los factores que determinan cómo es el proceso de combustión son principalmente dos: el material que actúe como combustible y la velocidad de liberación de la energía. En este último, se ha de distinguir entre el calor de combustión y la tasa de liberación de calor, o *heat release rate (HRR)* en inglés. El calor de combustión es aquel necesario para que el material que actúa como combustible comience a consumirse por las llamas, mientras que la tasa de liberación de calor tiene que ver con el calor que desprende el material al arder. En otras palabras, la tasa de liberación de calor es la velocidad a la que el fuego libera energía, también conocida como potencia. Ésta se mide en vatios (W), en unidades del Sistema Internacional, lo que equivale a un julio por segundo. Por otra parte, el flujo de calor se conoce como la tasa de energía térmica transferida por unidad de superficie ( $W/m^2$ ).

El fuego tiene tres formas de propagarse transfiriendo la energía térmica de sus llamas: por conducción, transfiriendo la energía térmica por contacto directo con un material; por convección, mediante el flujo de aire causado por el humo y los gases calientes; y por

---

<sup>13</sup> (NFPA, n.d.).

radiación, ya que el calor puede viajar en forma de ondas electromagnéticas, sin necesidad de sólidos o fluidos que lo transporten, siendo irradiado en todas direcciones.

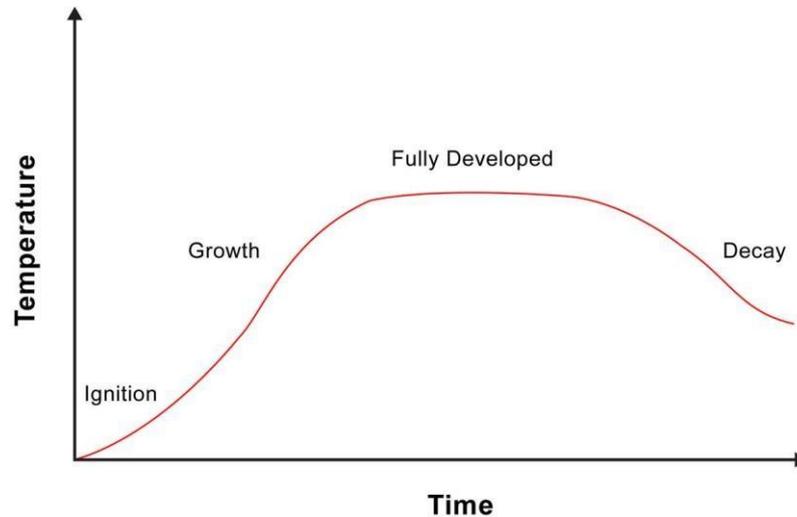
El desarrollo del incendio depende de muchos factores, entre ellos: las propiedades del combustible, la cantidad de combustible, la ventilación tanto natural como mecánica de la zona, la geometría del emplazamiento, la localización del foco del incendio y las condiciones ambientales, como la temperatura o el viento.

En cuanto a las fases de un incendio, se pueden distinguir cuatro: en primer lugar, la ignición, en la que el combustible, el oxígeno y el calor dan lugar a una reacción química que se estabiliza; en segundo lugar, la fase de crecimiento en la que, a partir de la llama inicial como fuente de calor, comienza a consumirse combustible adicional y, a través de convección y radiación, se transmite este calor a las superficies colindantes aumentando el tamaño de la llama; en tercer lugar, se llega al desarrollo completo del fuego, extendiéndose éste sobre gran parte, si no todo, del combustible disponible, alcanzando la temperatura máxima y consumiéndose el oxígeno rápidamente; y por último, está la etapa de decadencia, en la que el fuego ya consume todo el combustible disponible, las temperaturas disminuyen y el incendio se vuelve menos intenso.

Mediante una gráfica de temperatura o tasa de liberación de calor frente a tiempo, mostrada en la Ilustración 4, podemos ver la evolución de un incendio únicamente limitado por la cantidad de combustible, no teniendo en cuenta el factor de la cantidad de oxígeno disponible<sup>14</sup>. A medida que más combustible se incorpora al fuego, el nivel de energía sigue aumentando hasta que todo el combustible disponible arde y se alcanza el desarrollo completo (*fully developed*). A continuación, a medida que se quema el combustible, los niveles de energía comienzan a decaer. Para completar este ciclo es necesario que haya un nivel de oxígeno suficiente en todo momento.

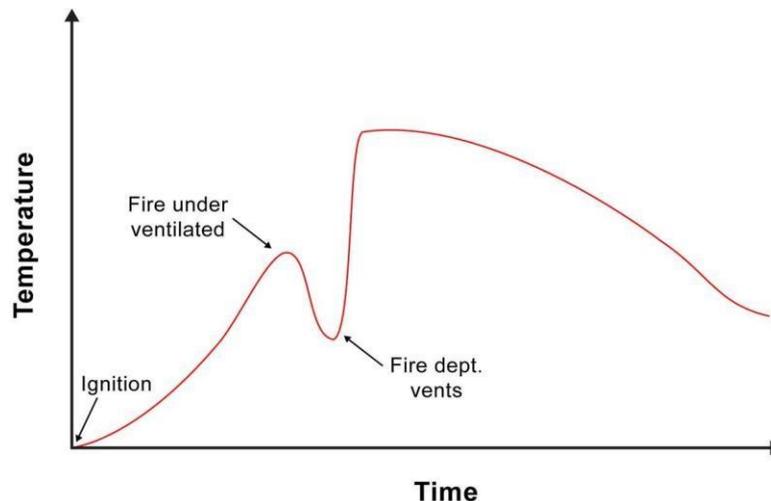
---

<sup>14</sup> (NIST, 2021).



*Ilustración 4. Temperatura vs tiempo únicamente limitado por combustible. Fuente: NIST (Junio 2021).*

La curva representada en la Ilustración 5 muestra la evolución temporal de la temperatura del incendio en una situación de ventilación limitada. En este caso sí se tiene en cuenta la cantidad de oxígeno en la estructura donde se ocasiona, iniciándose el proceso en una instalación con las puertas y ventanas cerradas, es decir, sin posibilidad de entrada de oxígeno. En la fase de crecimiento hay oxígeno suficiente para mezclarse con los gases calientes, por lo que se produce la combustión y la temperatura aumenta. Sin embargo, a medida que el nivel de oxígeno dentro de la estructura se agota, la liberación de calor y la temperatura disminuyen. De nuevo, se permite la entrada de oxígeno y la ventilación de la estructura. Esto equivale a abrir ventanas, a la evacuación de ocupantes o a la entrada de los equipos de intervención. El oxígeno se mezcla de nuevo con los gases calientes y el nivel de energía comienza a aumentar. Este cambio repentino en la ventilación puede dar lugar a aumentos muy rápidos de temperatura.



*Ilustración 5. Temperatura vs tiempo con ventilación limitada. Fuente: NIST (Junio 2021).*

Una vez definidas las formas de propagación de un incendio, se puede realizar una última clasificación a partir de los tipos de combustible<sup>15</sup>. Podemos distinguir cinco tipos de incendios según el combustible que los alimenta: clase A, B, C, D y K. Cada clase de incendio tiene un método distinto para ser apagado de la forma más segura y eficaz, ya que varían en rapidez de combustión y peligrosidad. La clase A son aquellos incendios alimentados por materiales ordinarios, como madera, tela, papel, caucho y la mayoría de plásticos, que dejan como residuo cenizas. La forma de extinguir los incendios de tipo A es mediante agua y otros agentes extintores que enfríen el combustible hasta una temperatura inferior a la de ignición. Los incendios de clase B son causados por líquidos inflamables, caracterizados por arder a temperatura ambiente, o líquidos combustibles, los cuales necesitan calor para encenderse. Estos son: aceites de petróleo, alquitranes, pinturas a base de aceite, disolventes, lacas, alcoholes y gases inflamables. Los combustibles de tipo B tienen un alto riesgo de incendiarse, por lo que el agua en muchas ocasiones puede no extinguirlos, siendo necesario crear una barrera entre el combustible y el oxígeno, como una capa de espuma. La clase C son aquellos incendios de tipo A o B que además implican equipos eléctricos. Se requieren técnicas y agentes especiales para su extinción, normalmente dióxido de carbono o agentes químicos secos, ya que el uso

<sup>15</sup> (Dickinson, 2021).

de agua puede ser muy peligroso debido a su conductividad. Los incendios de clase D son causados por combustibles metálicos, como magnesio, titanio, sodio, potasio, circonio y litio, típicamente encontrados en los coches. Debido a las temperaturas extremadamente altas de las llamas, el agua puede descomponerse en hidrógeno y oxígeno, potenciando la combustión e incluso explosiones. Para este tipo de incendios se deben utilizar polvos especiales a base de sales o también arena seca y limpia. Por último, los incendios de clase K se producen por combustibles utilizados en cocinas, como aceites y grasas vegetales o animales.

Desafortunadamente, las naves industriales suponen grandes peligros, ya que en ellas se pueden encontrar materiales de casi todo tipo. Esta situación se ha agravado desde que, con el auge del comercio online, ha aumentado considerablemente la renta de naves industriales para uso logístico y de última milla<sup>16</sup>. Este último tipo de naves tiene como objetivo agilizar la distribución, encontrándose próximas a los consumidores, por lo que los productos que se almacenan en ellas permanecen ahí únicamente unas pocas horas. Esto tiene como consecuencia un aumento de la variedad de productos almacenados y, por tanto, de los tipos de materiales o combustibles que alimentarán los posibles incendios. Esto dificulta enormemente la elección de agentes extintores según la clasificación de los materiales que se expuso anteriormente. Sin embargo, las principales causas de incendio en naves logísticas suelen ser siempre las mismas: explosiones causadas por polvo combustible, accidentes por trabajos en caliente, gases y líquidos inflamables, o equipos eléctricos. Además, cabe destacar que los rociadores ESFR antes mencionados suelen ser muy efectivos en cuanto a tolerar una amplia gama de cambios de clases de mercancías en los almacenes, minimizando los daños que puede causar el incendio mediante una pronta supresión, llegando a alcanzar el área de combustión.

---

<sup>16</sup> (Frontier Industrial, 2021).

## 1.4 DATOS ESTADÍSTICOS DE INCENDIOS EN NAVES INDUSTRIALES

En cuanto a las causas más comunes de incendios en naves logísticas, según un estudio publicado por IFSEC Global, están los provocados o intencionados, que son la causa de casi un tercio de todos los daños materiales relacionados con incendios y representan un 18% de los incendios en almacenes. Por otro lado, también son muy comunes los incendios debidos a problemas con la electricidad y la iluminación. Este tipo de incendios suelen ser menos dañinos para las propiedades que los intencionados, pero siguen representando un gran problema para los responsables de la seguridad en almacenes industriales. Entre otras causas también se encuentran los equipos de calefacción, que suponen alrededor de un 8% de los incendios en este entorno; los cigarrillos y encendedores, que representan un 5%; y por último la exposición, que es un término que hace referencia a aquellos materiales combustibles que en el momento del incendio no se encuentran ardiendo, pero que más adelante lo hacen al encontrarse expuestos a las llamas y al calor. Las exposiciones representan alrededor del 7% de los incendios en naves logísticas<sup>17</sup>.

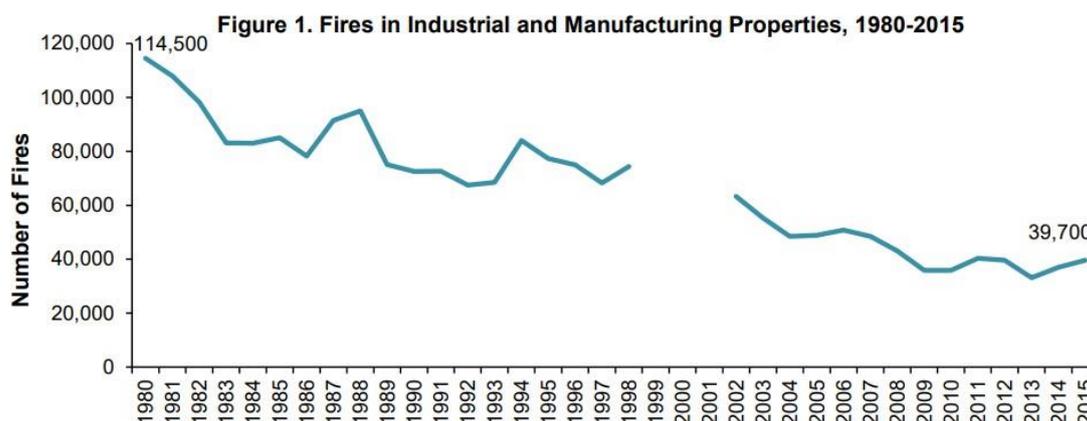
Según estudios de NFPA (National Fire Protection Association), se estima que entre 2011 y 2015 se reportaron una media 37.910 incendios en propiedades industriales, incluyendo servicios públicos, defensa, agricultura y minería, a departamentos de bomberos de Estados Unidos anualmente. Estos supusieron unas pérdidas anuales de 1,2 millones de dólares en daños materiales directos, además de 16 muertes y 273 heridos. La gran mayoría de estos incendios (71%) se produjeron en exteriores o no fueron clasificados, mientras que otro 20% tuvo lugar en estructuras y el 9% de los incendios en vehículos. El 20% de los incendios que tuvieron lugar en estructuras representaron la mayor parte de las pérdidas en todas las categorías: el 49% de las muertes, el 80% de los heridos y el

---

<sup>17</sup> (Marlowe fire & security, n.d.).

67% de los daños materiales directos. De los incendios en estructuras, un 65% se produjeron específicamente en propiedades manufactureras<sup>18</sup>.

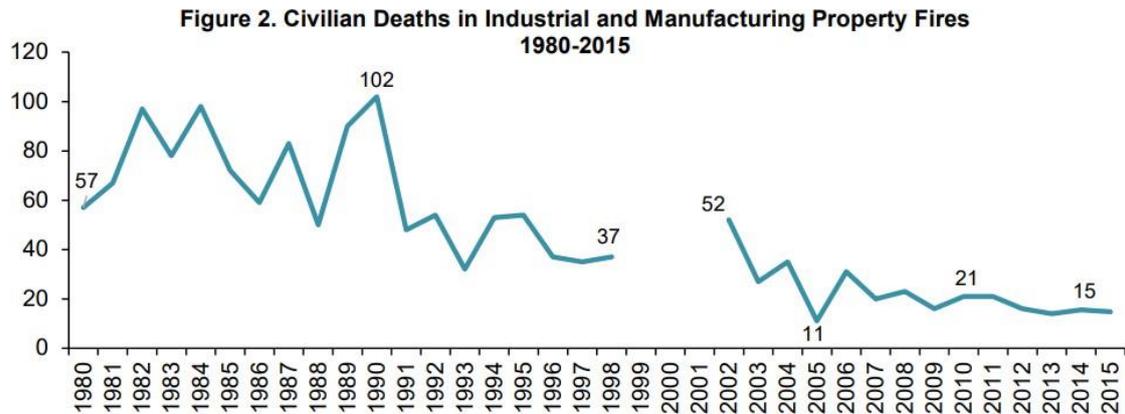
Como se puede ver en la Ilustración 6, los incendios en propiedades industriales se han reducido considerablemente en las últimas tres décadas, pasando de 114.500 incendios en 1980 a 39.700 en 2015, lo que supone un decrecimiento del 65%.



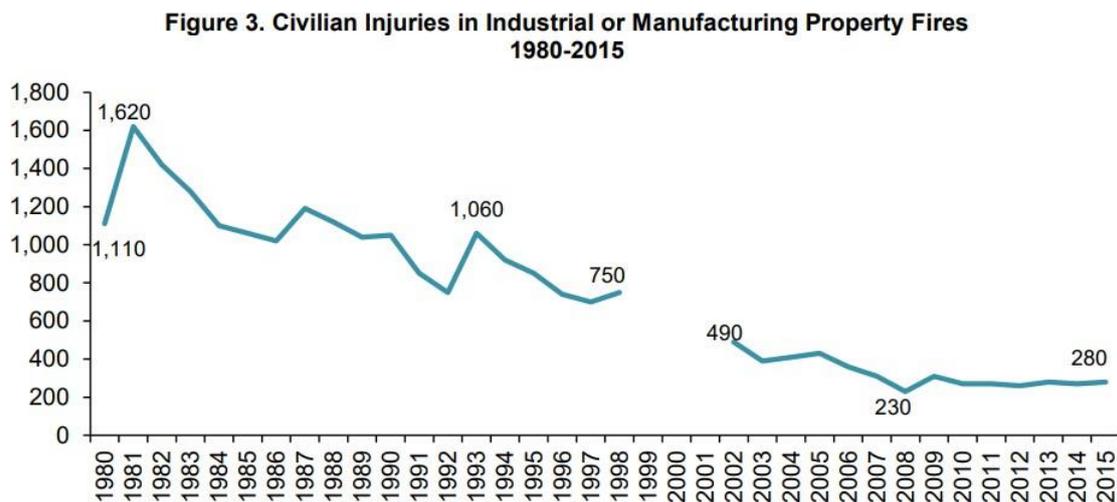
*Ilustración 6. Incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018).*

Por otro lado, en la Ilustración 7, se puede comprobar que se ha producido una reducción de muertes de civiles en incendios en propiedades industriales y que, aunque esta tendencia de decrecimiento no se mantuvo durante la década de los 80, existiendo picos significativos, a partir de la cifra más alta de 102 muertes en 1990, estas cifras se han mantenido bajas, con menos de 20 muertes anuales desde 2012. El número de heridos también ha sufrido una reducción substancial, como se muestra en la Ilustración 8, con un pico de 1620 heridos en 1981 que ha ido disminuyendo hasta mantenerse en menos de 300 heridos anuales desde 2010, además de mantenerse una línea de tendencia bastante plana desde 2009.

<sup>18</sup> (Campbell, 2018).



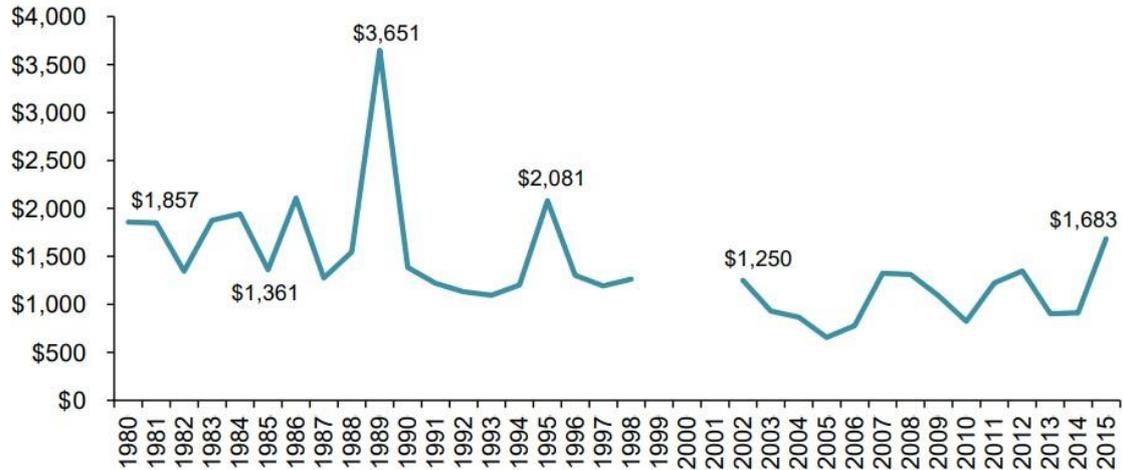
*Ilustración 7. Muertes de civiles en incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018).*



*Ilustración 8. Civiles heridos en incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018).*

Sin embargo, como se muestra en la Ilustración 9, los daños materiales directos, ajustados a la inflación, aunque actualmente son algo inferiores a los de 1980, no han sufrido una reducción consistente y existe una gran fluctuación entre años.

**Figure 4. Direct Property Damage (in Millions) in Industrial and Manufacturing Property Fires, (in 2015 Dollars), 1980-2015**



*Ilustración 9. Daños materiales directos en incendios en propiedades industriales, 1980-2015. Fuente: NFPA (Marzo 2018).*

A nivel nacional, concretamente en Cataluña, existen datos estadísticos que confirman que el sector industrial logístico continúa creciendo, siendo las naves de nueva construcción las que lideran el mercado logístico catalán, representando un 82% del total de metros cuadrados contratados. Según el informe del mercado industrial y logístico de Cataluña, elaborado por la consultora inmobiliaria Forcadell, el mercado logístico de Cataluña, durante el primer semestre de 2019, alcanzó una contratación de 341.243 m<sup>2</sup>. Esta cifra es un 44% superior a lo registrado en 2017 y un 31% superior a 2016. Sin embargo, supone un decrecimiento del 12% frente a 2018 debido a las grandes contrataciones a finales de año<sup>19</sup>.

Además, en 2020 se obtuvieron datos indicadores de que el mercado logístico catalán soportó bien la crisis provocada por la pandemia de Covid-19, manteniéndose en el tercer trimestre del año unas cifras similares a las de 2019 por las mismas fechas.

En cuanto a los incendios en España, cada año se producen alrededor de 42.000 incendios en empresas industriales, representando un 5,16% del total de los incendios anuales. El

<sup>19</sup> (Guía de Diseño Prestacional PBD, 2021).

coste agregado de estos incendios asciende a 378 millones de euros aproximadamente, y las aseguradoras españolas gastan 848 millones de euros anualmente en indemnizaciones de siniestros que se producen en empresas de carácter industrial<sup>20</sup>.

En 2016 se dispararon los siniestros en grandes industrias, aumentando el balance de incendios en un 6% según fuentes del sector del seguro. Además, según el último informe de UNESPA, en el primer semestre de 2022, se produjeron 7 incendios diarios de media en este tipo de establecimientos. Alrededor de una treintena de estos incendios han tenido un coste por daños superior al millón de euros<sup>21</sup>.

Como se puede ver, los incendios en naves industriales siguen suponiendo una amenaza contra la seguridad, y tanto las características de las nuevas naves en construcción como el aumento de la popularidad de éstas son factores que se han de tener en cuenta a la hora de protegerlas a éstas y a sus ocupantes, ya que presentan nuevos desafíos debido a su estructura y configuración

<sup>20</sup> (Redacción Interempresas, 2016).

<sup>21</sup> (Tecnifuego, 2022).

## 2 RECORRIDOS DE EVACUACIÓN E INTERVENCIÓN EN NAVES INDUSTRIALES

### 2.1 REQUISITOS DEL REGLAMENTO ESPAÑOL (RSCIEI)

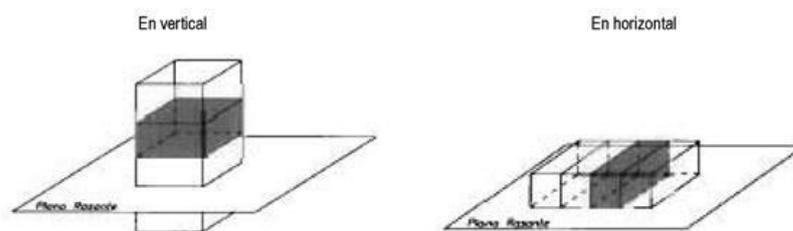
En primer lugar, con el fin de poder determinar unas distancias de evacuación e intervención óptimas en naves industriales, es importante conocer cuáles son los requisitos establecidos por el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales (RSCIEI) respecto a estas distancias, y cuáles son los criterios que se están teniendo en cuenta a la hora de evaluarlas. Además, también es importante conocer qué dice la normativa para poder instalar medidas de seguridad adecuadas que permitan actuar rápida y eficazmente ante un incendio. Cabe destacar que la información que se expondrá a continuación corresponde al RSCIEI que se encuentra actualmente en vigor [23], de 2004, con revisión en 2019, pero existe un proyecto de ley de 2022 [28] que se mencionará cuando sea correspondiente, tanto en este capítulo como en el siguiente.

En el reglamento se establecen unan condiciones mínimas, tanto constructivas como a nivel de instalaciones, que deben darse en el establecimiento para poder alcanzar un nivel de protección adecuado en caso de que se produzca un incendio, tanto para las personas involucradas como para los bienes que se almacenan en éste. Estas condiciones mínimas dependen de cada establecimiento y se determinan a partir de un nivel de riesgo calculado principalmente a partir de dos factores: el tipo de establecimiento según su estructura y según los materiales que contiene.

En primer lugar, el RSCIEI clasifica los establecimientos industriales en función del nivel de relación con los establecimientos de su entorno<sup>22</sup>. En caso de que el establecimiento esté ubicado en un edificio, podrá ser clasificado en:

<sup>22</sup> Ver RSCIEI, Anexo I, Sección 2.

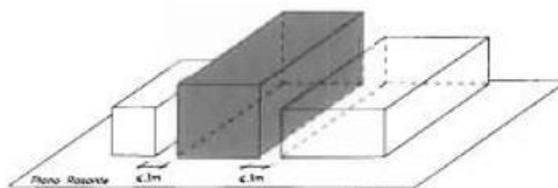
- Tipo A: engloba aquellos tipos de naves que forman parte de otro edificio de forma parcial, es decir que comparten estructura portante o están adosadas a éste. El edificio al que se adosa puede tener un uso industrial o no tenerlo.



*Ilustración 10. Naves tipo A. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).*

Cabe destacar una aclaración que aparece en el nuevo borrador del RSCIEI [28], en la que se diferencia en la nomenclatura entre tipo  $A_H$  y  $A_V$ , dependiendo de si la separación de la nave respecto al resto del edificio se hace en horizontal o en vertical, respectivamente. Además, se considerarán de tipo A vertical ( $A_V$ ) los casos en los que la separación mezcle características de ambos tipos  $A_H$  y  $A_V$ <sup>23</sup>.

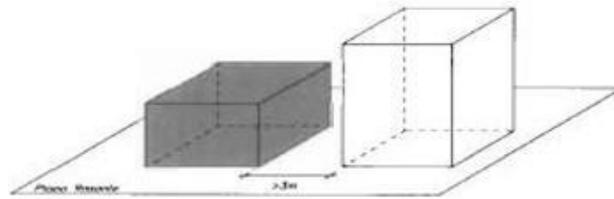
- Tipo B: la nave constituye la totalidad del edificio y, aunque no se comparte estructura portante, se encuentra adosada a otros edificios a una distancia inferior o igual a tres metros.



*Ilustración 11. Naves tipo B. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).*

<sup>23</sup> Ver nuevo borrador del RSCIEI, Anexo I, Sección 1.

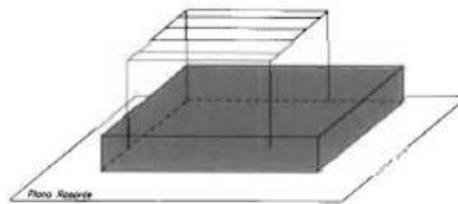
- Tipo C: la nave constituye la totalidad del edificio, pudiendo estar compuesta por varios edificios, con la condición de que se encuentre a una distancia mayor de tres metros de otros. No podrá haber mercancía combustible o elementos altamente inflamables en el camino que conecte establecimientos destinados a fines industriales.



*Ilustración 12. Naves tipo C. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).*

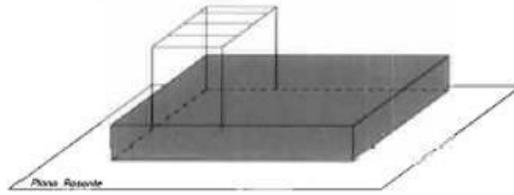
Por otro lado, si el establecimiento industrial se encuentra en espacios abiertos, siendo no estrictamente edificios, se pueden distinguir dos tipos:

- Tipo D: el espacio abierto que ocupa puede estar totalmente cubierto y alguna de las fachadas puede carecer de cerramiento lateral.



*Ilustración 13. Naves tipo D. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).*

- Tipo E: el espacio abierto que ocupa puede estar parcialmente cubierto, como máximo hasta la mitad, así como tener alguna de sus fachadas sin cerramiento lateral.



*Ilustración 14. Naves tipo E. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).*

En segundo lugar, se tendrán en cuenta todos los materiales combustibles que formen parte de la construcción del edificio, así como aquellos que se utilicen asiduamente en los procesos de fabricación, y todas las materias primas combustibles que se vayan a almacenar en la nave. A partir de esto, se calculará el nivel de riesgo intrínseco (NRI) de cada sector o establecimiento industrial, existiendo tres niveles dependiendo de la posibilidad de incendio: riesgo bajo (RB), medio (RM) y alto (RA)<sup>24</sup>.

Una vez que se ha clasificado la nave industrial en uno de los cinco tipos de configuraciones (A, B, C, D, E) y se le ha asignado un nivel de riesgo intrínseco a cada uno de sus diferentes sectores, teniendo en cuenta también la superficie de cada uno de estos sectores, el reglamento determina qué instalaciones serán necesarias para su protección<sup>25</sup>. Las instalaciones serán independientes para cada uno de los sectores del establecimiento, entendiéndose como sector un área que se separa del resto mediante una delimitación con resistencia al fuego.

<sup>24</sup> Ver RSCIEI, Anexo I, Sección 3.

<sup>25</sup> Ver RSCIEI, Anexo III.

<b>Sistema de comunicación de alarma</b>	Si la suma de la S de todos los sectores del establecimiento $\geq 10.000 \text{ m}^2$ . La señal acústica permitirá diferenciar entre "emergencia parcial" y "emergencia general", siendo preferente el uso de megafonía.
<b>Sistema de abastecimiento de agua</b>	Cuando lo exijan las disposiciones que regulan actividades industriales, sectoriales o específicas (art. 1 del Reglamento). Cuando sea necesario para dar servicio en las condiciones de caudal, presión y reserva calculados a uno o varios sistemas de lucha contra incendios.
<b>Columna seca</b>	Si la altura de evacuación $\geq 15 \text{ m}$ y existe RM o RA.
<b>Sistemas de agua pulverizada</b>	Cuando lo exijan las disposiciones que regulan actividades industriales, sectoriales o específicas (art. 1 del Reglamento). Cuando por la configuración, contenido, proceso y ubicación del riesgo sea necesario refrigerar partes de este para asegurar la estabilidad de su estructura y evitar los efectos del calor de radiación emitido por otro riesgo cercano.
<b>Sistemas de espuma física</b>	Cuando lo exijan las disposiciones que regulan actividades industriales, sectoriales o específicas (art. 1 del Reglamento). En general, cuando se manipulan líquidos inflamables que, en caso de incendios, puedan propagarse a otros sectores.
<b>Sistemas de extinción por polvo</b>	Cuando lo exijan las disposiciones que regulan actividades industriales sectoriales o específicas (art. 1 del Reglamento).
<b>Sistemas de extinción por agentes gaseosos</b>	Cuando lo exijan las disposiciones que regulan actividades industriales sectoriales o específicas (art. 1 del Reglamento). Cuando constituyan recintos donde se ubiquen equipos electrónicos, centros de cálculo, bancos de datos, de centros de control o medida y análogos y la protección con sistemas de agua pueda dañar dichos equipos.
<b>Sistemas de alumbrado de emergencia</b>	En planta bajo rasante. En planta sobre rasante si $P \geq 10$ personas y existe RA o RM. En cualquier caso cuando $P \geq 25$ personas. Donde estén instalados cuadros, centros de control o manos de instalaciones técnicas de servicios (Anexo II.B). Locales o espacios donde estén instalados los equipos centrales o los cuadros de control de los sistemas de protección contra incendios.
<b>Señalización</b>	Salidas de uso habitual o de emergencia. Medios de protección contra incendios de uso manual, cuando no sean fácilmente localizables. Teniendo en cuenta lo dispuesto por el RD 485/1997, de 14 de abril.

Tabla 2. Requisitos de las instalaciones de protección contra incendios de los establecimientos industriales (Tipos A, B, C, D, E). Fuente: Cottes Group (Noviembre 2021).

Por otro lado, el Anexo II establece los requisitos constructivos de los establecimientos industriales según su configuración, ubicación y nivel de riesgo intrínseco<sup>26</sup>. En dicho anexo, se define como recorrido de evacuación aquel que parte de un origen de evacuación hasta una salida de planta, estando ésta situada en la misma planta de origen o en otra, o aquel recorrido que, partiendo del origen de evacuación, conduce hasta una salida de edificio. Una vez alcanzada la salida de planta o edificio, el resto del recorrido posterior no se tiene en cuenta en la longitud límite establecida para el recorrido de evacuación. Las distancias máximas de los recorridos de evacuación de los sectores de incendio en un establecimiento industrial se muestran en la Tabla 3.

<sup>26</sup> Ver RSCIEI, Anexo II, Sección 6.

<b>Longitud del recorrido de evacuación según el número de salidas</b>		
Riesgo	1 salida recorrido único	2 salidas alternativas
Bajo(*)	35m(**)	50 m
Medio	25 m(***)	50 m
Alto	-----	25 m

Tabla 3. Longitudes de recorrido de evacuación. Fuente: RSCIEI (Febrero 2019).

Algunas aclaraciones de la tabla que realiza el Reglamento son:

- Respecto a las instalaciones clasificadas como riesgo bajo (RB), para actividades de producción o almacenamiento en las que solo haya materiales implicados de clase A, se podrá aumentar la distancia máxima de evacuación hasta 100 metros.
- En el caso de instalaciones con riesgo bajo y una única salida, la distancia de evacuación se podrá aumentar a 50 metros si la ocupación es inferior a 25 personas.
- En el caso de instalaciones con riesgo medio y una única salida, la distancia de evacuación se podrá aumentar a 35 metros si la ocupación es inferior a 25 personas.

## 2.2 RECOMENDACIONES DE LAS DIRECTRICES NACIONALES

Como es de esperar, la normativa debe someterse a un proceso de revisión muy lento, por lo que muchas veces no es capaz de seguir el alto ritmo de las novedades en cuanto a construcción y diseño de establecimientos industriales: alturas mayores, distancias mayores, grandes superficies y otras excepcionalidades. Además, como cualquier reglamento, el RSCIEI se caracteriza por un desconocimiento del origen técnico en el que se basa la adopción de los valores de las distancias expuestas en la normativa, así como la inexistencia de márgenes de seguridad en la adopción de estos valores. Por eso mismo, existen guías, como la que se expone en este apartado, que recomiendan distancias de seguridad teniendo en cuenta no solo la normativa, sino factores como las condiciones de

intervención y evacuación, estableciendo unos márgenes de seguridad que se adaptan más a la realidad.

La Guía de Diseño Prestacional (PBD) para los sistemas de protección contra incendios en naves industriales [24], es un documento llevado a cabo por CLUSIC (*Clúster de Seguretat contra Incendis de Catalunya*), y pretende clarificar los criterios y parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora de dimensionar y proteger una nave logística con características que se salen del diseño prescriptivo establecido en guías de diseño y normas técnicas. En concreto, la guía hace referencia a naves de tipo C y otras configuraciones excepcionales que permitan asimilarlas a tipo C.

El método seguido por esta guía prestacional se basa en analizar escenarios que representan “el peor de los casos” en cada situación. Teniéndose en cuenta las medidas de protección, tanto activas como pasivas, el crecimiento y la propagación del incendio, y el comportamiento estructural de las naves, se determina si se cumplen todos los requisitos que garantizan la seguridad de las personas y de la nave. El nivel de precisión de estas evaluaciones no es igual que los métodos analíticos y los supuestos de diseño establecidos en la normativa, pero proporcionan un entendimiento global para evaluar la seguridad del establecimiento.

En relación a distancias de seguridad, que es el objeto de estudio del trabajo, la guía establece dos apartados u objetivos, con sus respectivos criterios mínimos para conseguir garantizarlos: el objetivo de la evacuación de los ocupantes y el objetivo de la intervención de los bomberos. En el apartado posterior se definirán los tiempos mínimos de evacuación e intervención, que se tendrán en cuenta para determinar las características de los recorridos que se exponen a continuación.

En primer lugar, la guía prestacional define las características de los pasos de intervención para los bomberos. Estos están pensados para ayudar a los equipos de intervención a orientarse tanto por el exterior del edificio, identificando las entradas y salidas, como por el interior, permitiendo un acceso seguro al foco del incendio. Estos deben tener pasillos de anchura mínima de un metro y altura libre de dos metros, que permanezcan libres de

obstáculos en todo momento y sin ningún cambio de dirección. También se deben mantener unas condiciones de iluminación adecuadas y una comunicación de los pasillos por ambos extremos con entradas exteriores o salidas de emergencia.

Los factores que se tienen en cuenta para determinar estas dimensiones y características de los recorridos de intervención son, principalmente, las condiciones de visibilidad, la ausencia de impedimentos u obstáculos en el recorrido de intervención y los tiempos de intervención, definidos en el siguiente apartado. Se considera que no existen impedimentos para la intervención de los bomberos si se cumplen tres requisitos: que al menos el 75% del recorrido se haga a través de pasos de intervención como los definidos en el párrafo anterior y que existan unas condiciones de temperatura y radiación térmica aceptables. Para una explicación más detallada de los criterios prestacionales para evaluar la seguridad de las personas que se tendrán en cuenta, se deberá consultar el Apartado 4 de este capítulo. Como se puede observar en la Tabla 4, se distinguen tres tipos de escenarios según los factores presentes en el proceso de intervención, y a cada uno se le asigna una distancia máxima de recorrido de intervención, asumiendo un tiempo de 7 segundos para recorrerlo (ver siguiente apartado para mayor entendimiento de los tiempos de intervención), con márgenes de seguridad que cumplan en todo momento el RSCIEI. El escenario 1, caso más favorable, tiene como distancia máxima de recorrido 90 metros; el escenario 2, 70 metros; y el escenario 3, caso más desfavorable, tendrá una distancia que se ajustará a la directamente establecida por el RSCIEI.

		¿SE MANTIENEN LAS CONDICIONES DE VISIBILIDAD?	
		SÍ	NO
¿HAY IMPEDIMENTOS?	SÍ	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
	NO	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2

Tabla 4. Escenarios de intervención. Fuente: Guía de Diseño Prestacional (PBD) para los sistemas de protección contra incendios en naves industriales (Febrero 2021).

Por último, la guía también proporciona directrices para lograr el segundo objetivo, la evacuación de los ocupantes de la nave logística, estableciendo unos criterios de aceptación. Entre los criterios más importantes, que tienen que ver con los recorridos de evacuación, ha de cumplirse: que se disponga de procedimientos y medios adecuados para la evacuación de las personas, con rutas de evacuación bien definidas; que el tiempo requerido para la evacuación sea menor que el tiempo disponible para la evacuación; que existan niveles de visibilidad, gases, radiación térmica y temperatura adecuados, según los criterios prestacionales que se expondrán en el apartado 4 del capítulo; y que se cuente con iluminación suficiente, estabilidad estructural y con sistemas de protección (PCI) y seguridad instalados.

### **2.3 DISTANCIAS Y TIEMPOS DE EVACUACIÓN E INTERVENCIÓN**

En los incendios, como en cualquier otra emergencia, es fundamental la gestión del tiempo y cómo todos los sistemas y equipos mencionados actúan para favorecer los trabajos de evacuación e intervención con el objetivo de salvar la vida de las personas y minimizar las consecuencias del fuego.

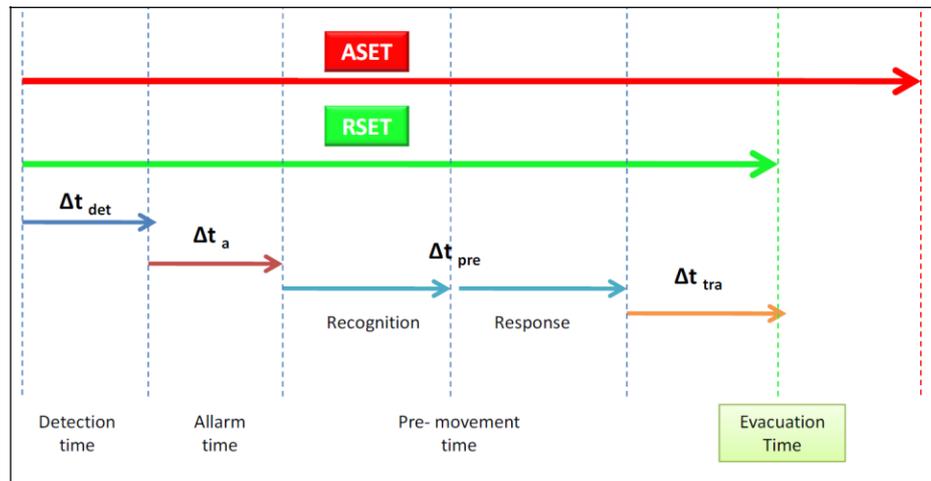
En primer lugar, para la evacuación de los ocupantes, es primordial mantener el recorrido de evacuación en unas condiciones adecuadas de temperatura, toxicidad, libre de obstáculos y con estabilidad estructural, durante el tiempo empleado en la evacuación. Esto es, el tiempo necesario para evacuar a los ocupantes de la nave es una de las variables más importantes que ha de tenerse en cuenta a la hora de diseñar recorridos de evacuación.

Son muchas guías las que plantean modelos de tiempo para asegurar la correcta evacuación de las personas, en buenas condiciones de las vías de evacuación. Tanto la *European Guideline CFPA-E n° 19 [25]* como la Guía de Diseño Prestacional (PBD) expuesta en el apartado anterior, utilizan el enfoque RSET/ASET, que estudia la relación entre el RSET (*Required Safe Escape Time*), que es el tiempo que se requiere, desde después de la ignición, para que los ocupantes puedan llegar a un lugar seguro evacuando la zona afectada por el incendio y que depende, entre otros, de las condiciones internas

del establecimiento, la ubicación de las puertas de salida, la longitud y características del recorrido de evacuación y los sistemas de seguridad como el sistema de detección y alarma; y el ASET (*Available Safe Escape Time*), que es el tiempo desde la ignición hasta que se producen condiciones intolerables por los ocupantes en el recorrido de evacuación por falta de visibilidad, altas temperaturas, altos niveles de radiación o toxicidad de los humos o disminución de la estabilidad de la estructura. El ASET, en otras palabras, es el tiempo disponible para una evacuación segura, y depende de las características del incendio y el sistema de control de humos, entre otros. Como es lógico, el tiempo requerido para la evacuación (RSET) debe ser menor que el tiempo disponible para evacuar de manera segura (ASET).

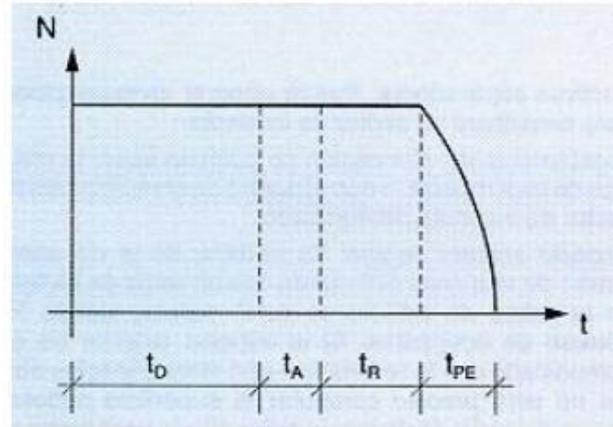
A través de programas de cálculo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) como el que se utilizará en este trabajo, se puede conocer el movimiento del humo que genera un determinado incendio y estudiarse su influencia en los parámetros, antes mencionados, de oxígeno, dióxido de carbono, toxicidad, radiación térmica o visibilidad. Acompañado de esto, se deben conocer los valores máximos que el ser humano es capaz de soportar en cuanto a estos parámetros en una situación de evacuación en caso de incendio. Por tanto, el ASET se extiende hasta el momento en el que uno de los parámetros del incendio rebasa un valor máximo sobre las vías de evacuación.

Por otro lado, de forma más algebraica, el RSET es la suma del tiempo de detección, el tiempo de alarma, el tiempo de pre-movimiento, el tiempo de movimiento y el tiempo de evacuación. El tiempo de detección es aquel que transcurre hasta que se detecta la presencia del incendio, normalmente por alcanzarse valores de temperatura y humo elevados que llegan hasta los sistemas de detección. Después, hasta iniciarse el proceso de evacuación transcurre un tiempo desde la detección hasta que se genera la señal de alarma, para dar pie así a la etapa de pre-movimiento. El resto de tiempos dependen de la rapidez humana, tanto de reacción ante la escucha de la señal de alarma como la de desplazamiento una vez se inicia el tiempo de movimiento.



*Ilustración 15. Parámetros a tener en cuenta para el análisis del proceso de evacuación.  
Fuente: Cottes Group (Septiembre 2016).*

Debido a la subjetividad de los tiempos y a su gran variabilidad, existen otros métodos de cálculo y nomenclaturas, como el presentado en la guía de buenas prácticas NTP 436 [26], pero todos parten de la misma base común. En la Ilustración 16, se muestra una gráfica que relaciona el número de personas evacuadas con el tiempo de evacuación. Según la NTP, el tiempo total de evacuación viene dado por la suma del tiempo de detección ( $t_D$ ), el de alarma ( $t_A$ ), el de retardo ( $t_R$ ) y el tiempo propio de evacuación o desplazamiento ( $t_{PE}$ ). Como se puede ver, estos tiempos son análogos a los expuestos por las guías anteriores, siendo el tiempo de retardo el equivalente al tiempo de pre- movimiento y el tiempo propio de evacuación análogo a los tiempos de movimiento y evacuación.



*Ilustración 16. Relación entre el número de personas evacuadas y el tiempo de evacuación.  
Fuente: NTP 436 (1997).*

Una vez conocida la definición de los tiempos, se puede realizar una estimación de éstos, tomando como referencia algunos supuestos y teniendo en cuenta la longitud de los recorridos de evacuación. Suponiendo que nos encontramos ante el caso de la evacuación de personas adultas sin impedimentos físicos, se puede tomar 1 m/s como la velocidad estándar de desplazamiento horizontal y 0,5 m/s en desplazamiento vertical (escaleras). De esta forma, el tiempo de desplazamiento ( $t_{PE}$ ) puede calcularse como:

$$t_{PE} = \frac{\text{longitud del recorrido de evacuación}}{\text{velocidad de avance}} \cong \frac{80m}{1m/s} + \frac{20m}{0,5m/s} \cong 2 \text{ minutos}$$

Una aproximación razonable y segura para el tiempo de evacuación será de alrededor de dos minutos si tomamos la distancia máxima (100 m) que el RSCIEI permite y un 25% de dicho recorrido son escaleras. Según el ejemplo que figura en la NTP antes mencionada, en el caso de existir un sistema automático de detección, se considera un  $t_D$  medio de 5 minutos. Por otro lado, el tiempo de alarma se considera de 1 minuto y el tiempo de retardo (también conocido como de pre-movimiento) será de 2 minutos, en el caso de situaciones con personal adiestrado en el plan de emergencia.

$$t_E = t_D + t_A + t_R + t_{PE} = 5 \text{ min} + 1 \text{ min} + 2 \text{ min} + 2 \text{ min} = 10 \text{ minutos}$$

En resumen, se podría considerar como tiempo total máximo de evacuación unos 10 minutos aproximadamente, siempre y cuando el edificio esté debidamente protegido y dotado de las medidas de seguridad necesarias.

En segundo lugar, es necesario garantizar la seguridad de los equipos de intervención, manteniéndose las condiciones de estabilidad de la estructura. Por ello, se define también un tiempo mínimo necesario para que los primeros equipos de intervención puedan alcanzar el lugar del incendio y realizar una valoración de la situación, decidiendo intervenir o retirarse en condiciones seguras. Partiendo de 60 minutos en los que el edificio industrial deberá mantenerse lo suficientemente estable, tiempo orientativo definido por la guía PBD siguiendo los requisitos aportados por Bomberos de la Generalitat de Catalunya, se puede dividir este tiempo en tres. En primer lugar, el tiempo  $t_1$ , que consta de 25 minutos, corresponde al tiempo mínimo de llegada del primer equipo de bomberos, incluyéndose también en él la identificación del punto de acceso más adecuado y la decisión de una estrategia de intervención y maniobras en el exterior del establecimiento. Seguidamente, el tiempo  $t_2$ , de 20 minutos, corresponde a la intervención en el edificio de esta primera dotación de bomberos. Por último, el tiempo  $t_3$ , de 15 minutos, corresponde a un margen de seguridad establecido en caso de imprevistos.

Si se evalúa por separado el tiempo  $t_2$ , se puede dividir en tres partes, cada una correspondiente a una acción: los primeros 7 minutos corresponderán al desarrollo y dinamización de la línea de agua y la llegada al punto de intervención; los siguientes 7 minutos se asignarán a las acciones de intervención en el punto de rescate; y los últimos 6 minutos corresponderán a la salida de los intervinientes.

Como se puede deducir de la definición de estos tiempos, el factor que limita las distancias de intervención en el interior de la nave logística es el primer tiempo de 7 minutos dentro de los 20 asignados a la intervención en el establecimiento.

Cabe recalcar, como conclusión, que estos tiempos de intervención determinados por la guía PBD pueden ser distintos en la realidad y son solo orientativos, ya que en cada caso

concreto pueden variar ampliamente tanto la distancia entre los bomberos y la nave como el tiempo de actuación de los bomberos, pudiendo éstos actuar con antelación o con retraso.

## 2.4 CRITERIOS PRESTACIONALES PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

En primer lugar, cabe realizar un resumen de los criterios prestacionales, es decir, aquellos que figuran en las guías y no en el reglamento como tal, para evaluar la seguridad tanto de los ocupantes como de los equipos de intervención. Es importante que se cumplan estos criterios para poder evaluar correctamente la validez de las distancias de los recorridos de evacuación.

En la Tabla 5 se muestran los criterios prestacionales más importantes, obtenidos de la Guía de Diseño Prestacional catalana PBD, ya mencionada en anteriores apartados.

Criterio	Recomendación de la guía
Radiación térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Radiación térmica inferior o igual a 3 kW/m<sup>2</sup>, a 1,8 metros de altura en los pasos de intervención.</li> <li>- En el tiempo estimado de evacuación, radiación térmica no superior a 1,7 kW/m<sup>2</sup> a 1,8 metros de altura en los recorridos de evacuación de los ocupantes y hasta un diámetro de 10 metros con origen en el foco del incendio.</li> </ul>
Visibilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantizar 10 metros de visibilidad a 1,8 metros de altura en todos los puntos del establecimiento después de 60 min desde el aviso a los bomberos.</li> <li>- Garantizar una visibilidad de 20 metros a 1,8 metros de altura del recorrido de evacuación.</li> </ul>

Niveles de gases	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En el tiempo estimado de evacuación, mantener una concentración de oxígeno no inferior al 18%, una concentración de dióxido de carbono inferior a 0,03 mol/mol y concentraciones de gases tóxicos inferiores al valor límite a 1,8 metros de altura en los recorridos de evacuación de los ocupantes y hasta un diámetro de 10 metros con origen en el foco del incendio.</li> </ul>
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura inferior o igual a 100°C a 1,8 metros de altura en los pasos de intervención.</li> </ul>

*Tabla 5. Criterios prestacionales para evaluar la seguridad de las personas. Fuente: Guía de Diseño Prestacional (PBD) para los sistemas de protección contra incendios en naves industriales (Febrero 2021).*

## 3 ESCENARIOS DE INCENDIO

### 3.1 HIPÓTESIS DE PARTIDA

Una vez definidos los tiempos de evacuación e intervención y los factores que se tienen en cuenta para una evaluación correcta de las distancias de los recorridos de emergencia, se definirán en este apartado los parámetros e hipótesis que se tendrán en cuenta en el análisis CFD que se llevará a cabo.

En primer lugar, se definirán las hipótesis de partida que se adoptarán para la realización de las simulaciones. Estas hipótesis afectarán principalmente a las características de la nave, al diseño del incendio y a las condiciones de la simulación.

- I. Se considerarán naves de tipo  $A_H$  (tipo A horizontal), B y C, definidos en el Anexo I del Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales (RSCIEI), expuesto en el apartado 1 del capítulo 2.
- II. Se considerará un nivel de riesgo intrínseco (RI) medio, también definido en el Anexo I del RSCIEI, expuesto en el apartado 1 capítulo 2 de este documento, ya que es el más frecuente para el tipo de establecimientos especificados en el punto anterior.
- III. La nave contará con un sistema fijo de extinción, es decir, con rociadores automáticos, ya que en la realidad la mayoría de las naves están equipadas con ellos.
- IV. El rango de longitudes de los recorridos de intervención se ha establecido a partir de la distancia más corta y la más larga posible.
- V. Se asume la máxima altura de cubierta y de almacenamiento conforme a la norma de rociadores UNE 12845 [27].
- VI. Por simplicidad del estudio, aunque las formas de planta de las naves pueden variar significativamente, se propone considerar una nave de planta cuadrada para todos los escenarios de incendio.

- VII. Se propone ubicar el incendio en el centro de la nave, al ser el punto más alejado de las vías de intervención.
- VIII. Dado que la ubicación de las puertas de acceso a la nave puede variar significativamente, no se considerará dicha ubicación en el análisis de la simulaciones.
- IX. Como simplificación, no habrá presencia en ningún caso de un sistema de control de humos.
- X. El diseño del incendio (crecimiento y potencia máxima) se caracterizará a partir del tiempo de activación de los rociadores automáticos.
- XI. Se propone emplear dos tipos de combustibles distintos para participar en la reacción de combustión, evaluando su impacto durante la intervención.
- XII. Se considerarán velocidades de crecimiento del incendio medias y ultrarrápidas, ya que en almacenes logísticos las velocidades de los incendios más severos se encuentran dentro de este abanico.
- XIII. Se han escogido como combustibles la madera *red oak* y la espuma de poliuretano GM37, ya que así se podrán analizar dos niveles de visibilidad. Esto se debe a que la espuma tiene una alta tasa de hollín (ver Tabla 12), con la que se alcanzarán niveles de visibilidad bajos, mientras que la madera tiene baja tasa de hollín y se alcanzarán niveles de visibilidad superiores que ante incendios con GM37.
- XIV. Se propone considerar en todos los escenarios que la temperatura interior y exterior del edificio es la misma, de 20°C, sin condiciones de viento exteriores, para que el estudio comparativo pueda realizarse en igualdad de circunstancias.

## 3.2 DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS

Se proponen 12 escenarios de incendio, expuestos en la Tabla 6, en los cuales se variará: la superficie de la nave, el rango de recorridos de intervención, la caracterización del incendio (rapidez y potencia máxima) y el material que participará en la combustión.

Escenario	Superficie nave	Rango recorridos	Caracterización incendio	Combustible
<b>1</b>	70 m x 70 m (5000 m <sup>2</sup> )	de 35 m a 50 m	medio (4822 kW)	madera
<b>2</b>	70 m x 70 m (5000 m <sup>2</sup> )	de 35 m a 50 m	medio (4822 kW)	GM37
<b>3</b>	70 m x 70 m (5000 m <sup>2</sup> )	de 35 m a 50 m	ultrarrápido (7768 kW)	madera
<b>4</b>	70 m x 70 m (5000 m <sup>2</sup> )	de 35 m a 50 m	ultrarrápido (7768 kW)	GM37
<b>5</b>	100 m x 100 m (10000 m <sup>2</sup> )	de 50 m a 71 m	medio (4822 kW)	madera
<b>6</b>	100 m x 100 m (10000 m <sup>2</sup> )	de 50 m a 71 m	medio (4822 kW)	GM37
<b>7</b>	100 m x 100 m (10000 m <sup>2</sup> )	de 50 m a 71 m	ultrarrápido (7768 kW)	madera
<b>8</b>	100 m x 100 m (10000 m <sup>2</sup> )	de 50 m a 71 m	ultrarrápido (7768 kW)	GM37
<b>9</b>	141 m x 141 m (20000 m <sup>2</sup> )	de 71 m a 100 m	medio (4822 kW)	madera
<b>10</b>	141 m x 141 m (20000 m <sup>2</sup> )	de 71 m a 100 m	medio (4822 kW)	GM37
<b>11</b>	141 m x 141 m (20000 m <sup>2</sup> )	de 71 m a 100 m	ultrarrápido (7768 kW)	madera
<b>12</b>	141 m x 141 m (20000 m <sup>2</sup> )	de 71 m a 100 m	ultrarrápido (7768 kW)	GM37

*Tabla 6. Escenarios de incendio.*

Conviene realizar aclaraciones acerca de los valores que se han elegido para los parámetros variables en cada escenario:

- En cuanto a la superficie del almacén logístico, se han elegido unos valores teniendo en cuenta las hipótesis I, II y III, y la Tabla 7, obtenida del Anexo II del nuevo borrador del RSCIEI [28], donde se muestran las superficies máximas permitidas para cada tipo de establecimiento ( $A_v$ ,  $A_H$ , B y C), dependiendo del nivel de riesgo intrínseco y teniendo en cuenta las cuatro notas del mencionado anexo, que permiten aumentar el tamaño del sector si se cumplen varios requisitos.

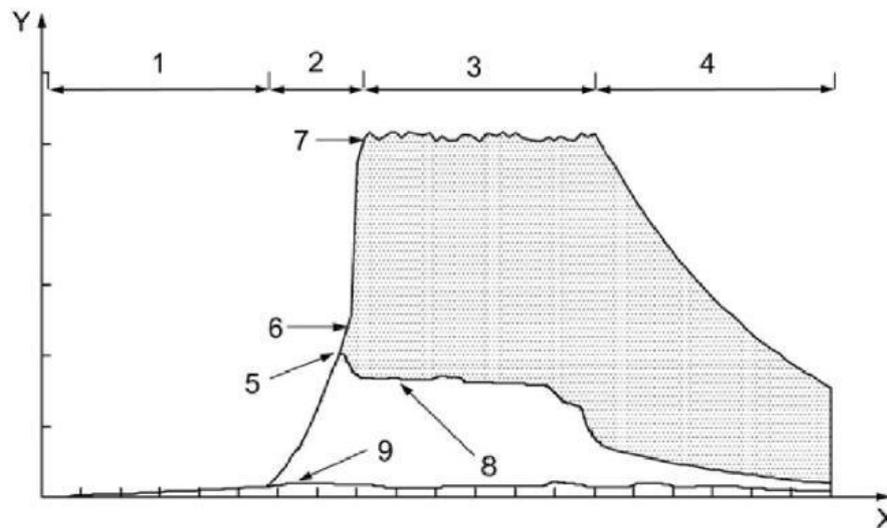
Nivel de riesgo intrínseco	Configuración			
	Tipo A <sub>V</sub> (m <sup>2</sup> )	Tipo A <sub>H</sub> (m <sup>2</sup> )	Tipo B (m <sup>2</sup> )	Tipo C (m <sup>2</sup> )
Bajo 1	2.000	6.000	12.000	SIN LÍMITE
Bajo 2 (Notas)	1.000 (1) (2) (3)	4.000 (2) (3)	8.000 (2) (3)	12.000 (2) (3) (4)
Medio 3	500	3.500	7.000	10.000
Medio 4	400	3.000	6.000	8.000
Medio 5 (Notas)	300 (2) (3)	2.500 (2) (3)	5.000 (2) (3)	7.000 (2) (3) (4)
Alto 6		2.000	4.000	6.000
Alto 7	NO	1.500	3.000	5.000
Alto 8 (Notas)	ADMITIDO	NO ADMITIDO (3)	NO ADMITIDO (3)	4.000 (3) (4)

Tabla 7. Superficies de los sectores de incendio según su configuración y nivel de riesgo intrínseco. Fuente: RSCIEI (Septiembre 2022).

Si se observa la Tabla 6, que recoge toda la información de cada escenario, se han escogido 3 tamaños de superficie representativos, basados en la información de la Tabla 7. Estos son: 5000 m<sup>2</sup>, 10000 m<sup>2</sup> y 20000 m<sup>2</sup>.

- En cuanto al rango de recorridos de intervención, se han escogido teniendo en cuenta que el foco del incendio se encuentra en el centro de la nave (hipótesis VII) y que la nave es de planta cuadrada (hipótesis VI); por lo que la distancia mínima a recorrer será la mitad de la longitud del lado de la planta (el recorrido será desde el punto intermedio de un lateral de la nave hasta el foco del incendio) y la distancia máxima a recorrer será la longitud de media diagonal de la planta (el recorrido será desde una esquina de la nave hasta el foco del incendio). Como ejemplo, si la nave es de 70 m x 70 m, la longitud mínima será de  $\frac{70\text{ m}}{2} = 35\text{ m}$ ; y la longitud máxima será de  $2\sqrt{35^2 + 35^2} = 35\sqrt{2} \cong 50\text{ m}$ .
- El ritmo de crecimiento de los incendios, en la mayoría de casos que ocurren en edificios, se caracteriza por medio de curvas exponenciales, denominadas t-cuadrado [29]. La Ilustración 17 muestra una curva de este tipo, con la evolución en el tiempo (eje X) de la producción de calor (eje Y) de un incendio. Los números del 1 al 4 indican las etapas de la evolución del incendio: inicio, crecimiento,

desarrollo total y decrecimiento. La curva señalada por los números 5 y 8 corresponde a un incendio controlado por rociadores, mientras que la curva señalada por los números 6 y 7 corresponde a un incendio controlado únicamente por ventilación, llegando a liberar una mayor cantidad de calor.



*Ilustración 17. Curva t-cuadrado de la evolución de un incendio. Fuente: ISO/TS 16733 (2006).*

El ritmo de crecimiento puede ser lento, medio, rápido o ultrarrápido, y depende principalmente de las características de los materiales combustibles y de cómo están colocados o almacenados. En la Tabla 8 se muestran algunos combustibles más típicos que provocan cada tipo de incendio según su velocidad de crecimiento [30].

<b>Crecimiento</b>	<b>Fuegos reales típicos</b>
<i>Lento</i>	Productos de madera altamente empaquetados
<i>Medio</i>	Productos de madera sólida Elementos de madera con pequeñas cantidades de plásticos
<i>Rápido</i>	Paletas de madera almacenadas en altura Productos almacenados en cajas de cartón sobre paletas
<i>Ultrarrápido</i>	Materiales plásticos almacenados en altura

Tabla 8. Categorías de incendios *t*-cuadrado. Fuente: Tabla 38.2 del SPFE Handbook of Fire Protection Engineering (2016).

Las velocidades de crecimiento más significativas de incendios de almacenes logísticos varían principalmente entre un crecimiento medio, que suele darse en zonas de almacenamiento cercanas al suelo junto a los muelles de carga, y un crecimiento ultrarrápido, que se podría alcanzar en zonas de mayor altura, donde se encontrasen productos plásticos. Los incendios de crecimiento medio también sirven para caracterizar las circunstancias en las que las estanterías no están totalmente ocupadas por productos combustibles. Debido a que se trata de las más comunes en establecimientos de tipo logístico, según la hipótesis XII, para los escenarios de incendio que se analizarán se han escogido velocidades de crecimiento medias y ultrarrápidas.

- En cuanto a la potencia de los incendios, se ha tenido en cuenta la hipótesis X, en la que el tiempo de activación de los rociadores automáticos es el que define el crecimiento y potencia máxima del incendio. Conforme al capítulo C.2.8 de UNE-EN ISO 16733-1 [31], de activación del sistema automático de supresión, se ha considerado que el incendio crece de manera exponencial hasta la activación de los rociadores, manteniéndose con la potencia máxima alcanzada a partir de ese instante, es decir, que se puede tomar la tasa de emisión de calor como constante una vez que se active el sistema de rociadores automáticos.

Para el cálculo de la potencia máxima, se ha considerado la situación más desfavorable, en la que el incendio está situado en el punto más alejado de los rociadores, y se ha utilizado la herramienta DETACT-T2 desarrollada por el

National Institute of Standards and Technology (NIST) para calcular el tiempo de activación de los rociadores en cubierta. Se ha considerado una altura de cubierta de 13,7 m y separación de 3 m entre rociadores, una temperatura ambiente de 20°C (ver hipótesis XIV), índice tiempo de respuesta (RTI) de 50, correspondiente a una respuesta rápida, que es el caso general, y una temperatura de activación para los éstos de 74°C, también representativa para rociadores en naves logísticas.

En las Tablas 9 y 10, conforme a la norma de rociadores UNE-EN 12845 [27], mencionada en la hipótesis V, se muestra tanto la separación máxima entre rociadores (3 m) como la altura de techo máxima (13,7 m), las cuales se han escogido para el cálculo del tiempo de activación de los rociadores.

Altura de techo m	Distancia entre rociadores		Área de cobertura por rociador	
	Mínima m	Máxima m	Mínima m <sup>2</sup>	Máxima m <sup>2</sup>
≤ 9	2,4	3,7	6,0	9
> 9 ≤ 13,7	2,4	3	6,0	9

*Tabla 9. Separación de rociadores ESFR. Fuente: Norma UNE-EN 12845 (Enero 2021).*

<b>Aplicaciones de almacenamiento:</b>				
ST2/ST3 Palés autoportantes				
ST4 Estantería paletizada				
<b>Mercancías:</b>				
Plásticos: No expandidos en cajas de cartón				
<b>Altura de almacenamiento máxima</b>	<b>Altura de techo máxima</b>			
	m			
m	9,1	10,7	12,2	13,7
<b>Presión de funcionamiento mínima de rociador</b>				
bar				
<b>Rociador colgante ESFR factor K nominal 200</b>				
7,6	3,5	5,2	5,2	6,2 + 1 nivel de en estantería
9,1	†	5,2	5,2	6,2 + 1 nivel de en estantería
10,7	†	†	5,2	6,2 + 1 nivel de en estantería
12,2	†	†	†	6,2 + 1 nivel de en estantería
<b>Rociador colgante ESFR factor K nominal 240</b>				
7,6	2,4	3,6	3,6	4,3 + 1 nivel de en estantería
9,1	†	3,6	3,6	4,3 + 1 nivel de en estantería
10,7	†	†	3,6	4,3 + 1 nivel de en estantería
12,2	†	†	†	4,3 + 1 nivel de en estantería
<b>Rociador montante ESFR factor K nominal 200</b>				
7,6	3,5	5,2	†	†
9,1	†	5,2	†	†
<b>Rociador montante ESFR factor K nominal 240</b>				
7,6	2,4	3,6	†	†
9,1	†	3,6	†	†
<b>Rociador colgante ESFR factor K nominal 320</b>				
7,6	1,7	2,4	3,1	3,5
9,1	†	2,4	3,1	3,5
10,7	†	†	3,1	3,5
12,2	†	†	†	3,5
<b>Rociador colgante ESFR factor K nominal 360</b>				
7,6	1,4	2,1	2,7	3,5
9,1	†	2,1	2,7	3,5
10,7	†	†	2,7	3,5
12,2	†	†	†	3,5
† No aplicable.				

Tabla 10. Altura de techo y almacenamiento máxima. Fuente: Norma UNE-EN 12845 (Enero 2021).

En la Tabla 11 se muestra el tiempo calculado de activación de los rociadores y con éste la tasa de liberación de calor del incendio en dicho instante, para el caso de velocidad media (velocidad de crecimiento de  $11,72 \text{ W/s}^2$ ) y ultrarrápida (velocidad de crecimiento de  $187,56 \text{ W/s}^2$ ). Esta tasa de liberación, según lo expuesto en el capítulo C.2.8. de UNE-EN ISO 16733-1 [31], se mantendrá en el tiempo y será la empleada como máxima en los escenarios de incendio que se analizarán. Por último, se muestra el tamaño máximo del área del incendio.

Factores	Velocidad de crecimiento	
	Media	Ultrarrápida
Temperatura ambiente	20°C	20°C
Índice tiempo de respuesta (RTI)	50	50
Temperatura de activación	74°C	74°C
Altura de cubierta	13,7 m	13,7 m
Velocidad de crecimiento	$11,72 \text{ W/s}^2$	$187,56 \text{ W/s}^2$
Separación entre rociadores	3 m	3 m
Tiempo de activación	<b>10,7 min</b>	<b>3,4 min</b>
Tasa de liberación de calor	<b>4822 kW</b>	<b>7768 kW</b>
Tamaño máximo	7,5 m <sup>2</sup> (2,5 m x 3 m)	12,5 m <sup>2</sup> (2,5 m x 5 m)

Tabla 11. Cálculo del tiempo de activación de los rociadores automáticos.

- Respecto a los tipos de material que participarán en la reacción de combustión, se ha escogido la madera *red oak* y la espuma de poliuretano GM37 (ver hipótesis XIII). Se considerará que el almacén industrial es de gran volumen y está suficientemente ventilado, por lo que se propone emplear el modelo de combustión de fracción de mezcla, ya que es el más adecuado para este tipo de estudios de ingeniería del fuego. En la Tabla 12 se muestran los datos fisicoquímicos de ambos combustibles, obtenidos del SPFE Handbook of Fire Protection Engineering [30].

Parámetro	Espuma de poliuretano GM37	Madera red oak
Formulación	$\text{CH}_{1,2}\text{O}_{0,2}\text{N}_{0,08}$	$\text{CH}_{1,7}\text{O}_{0,72}\text{N}_{0,01}$
Calor de combustión	28000 kJ/kg	17100 kJ/kg
Producción de CO	0,024 kg/kg	0,004 kg/kg
Producción de hollín	0,113 kg/kg	0,015 kg/kg

Tabla 12. Datos fisicoquímicos de los combustibles de los escenarios de incendio.  
Fuente: Tabla A.39 del SPFE Handbook of Fire Protection Engineering (2016).

### 3.3 SIMULACIONES CON FDS

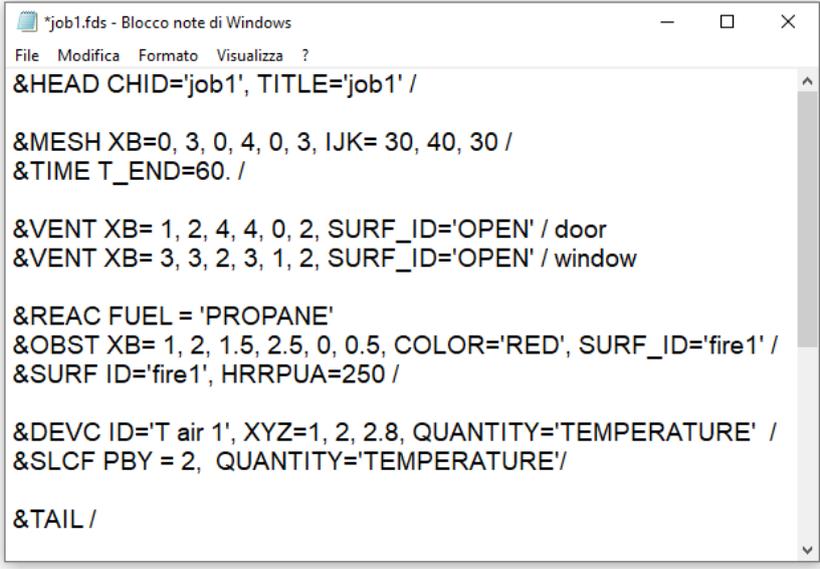
Las simulaciones con FDS de los escenarios de incendio descritos en el punto anterior se llevarán a cabo con ayuda de Pyrosim. PyroSim es una herramienta computacional, llevada a cabo por Thunderhead Engineering, para modelar incendios de una forma intuitiva para el usuario.

Existe una gran variedad de modelos para predecir fenómenos de incendio. Éstos pueden variar desde simples correlaciones algebraicas hasta modelos de dinámica de fluidos computacional, Computational Fluid Dynamics (CFD) en inglés, que aproximan un espacio como un gran número de volúmenes discretos. También conocidos como modelos de campo, éstos proporcionan un método para modelar el flujo de fluidos a través de un volumen utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes. Un modelo CFD se compone normalmente de cientos de miles de volúmenes de control, consiguiendo un alto nivel de resolución, pero requiriendo largos tiempos de simulación, prolongándose por días, semanas o incluso meses [32].

Tanto FDS (Fire Dynamics Simulator) como SMV (Smokeview) son herramientas de software gratuitas y de código abierto, proporcionadas por NIST (National Institute of Standards and Technology), del Departamento de Comercio de Estados Unidos. Fire Dynamics Simulator es un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) del flujo de fluidos provocado por el fuego, mientras que Smokeview es un programa de visualización utilizado para mostrar los resultados de las simulaciones FDS. El objetivo principal del software FDS es resolver problemas prácticos relacionados con el fuego en

el área de la ingeniería de protección contra incendios, como su propagación en edificios y otros espacios cerrados, favoreciendo el estudio de la dinámica fundamental del fuego y la combustión, y prediciendo sus efectos. El software FDS resuelve numéricamente una forma de las ecuaciones de Navier-Stokes, adaptada a condiciones de flujo térmico de baja velocidad, con énfasis en el transporte de humo y calor del incendio [33]. Estas ecuaciones son resueltas para cada una de las pequeñas celdas rectangulares en las que se divide el área tridimensional que representa el modelo que se quiere simular [34].

La forma de operar del FDS es mediante ficheros de texto, los cuales contienen los parámetros de entrada necesarios para ser interpretados y así calcular una solución numérica, escribiendo en archivos los datos de salida especificados por el usuario [33]. La Ilustración 18 muestra un ejemplo de un archivo de entrada del FDS.



```
*job1.fds - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?
&HEAD CHID='job1', TITLE='job1' /

&MESH XB=0, 3, 0, 4, 0, 3, IJK= 30, 40, 30 /
&TIME T_END=60. /

&VENT XB= 1, 2, 4, 4, 0, 2, SURF_ID='OPEN' / door
&VENT XB= 3, 3, 2, 3, 1, 2, SURF_ID='OPEN' / window

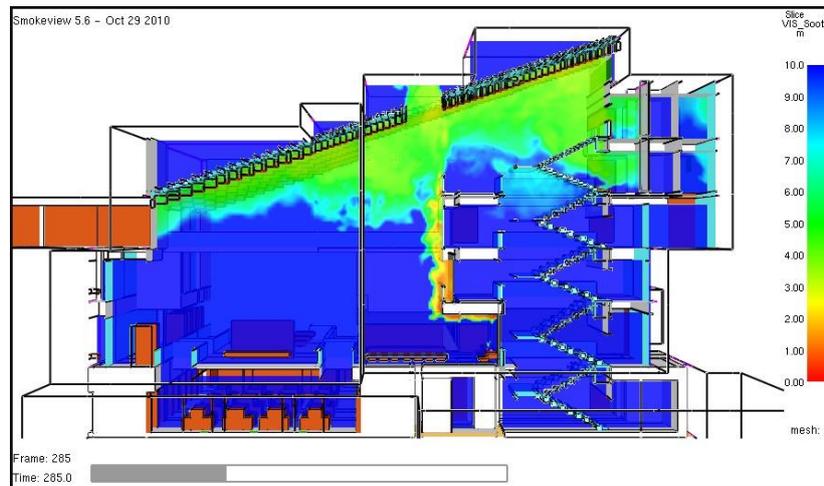
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1.5, 2.5, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /

&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&TAIL /
```

*Ilustración 18. Ejemplo de archivo de entrada del FDS. Fuente: FDS Tutorial.*

Los archivos de salida generados por el FDS son después leídos por el visualizador gráfico Smokeview, que genera una animación mostrando los resultados, como se puede observar en la Ilustración 19.



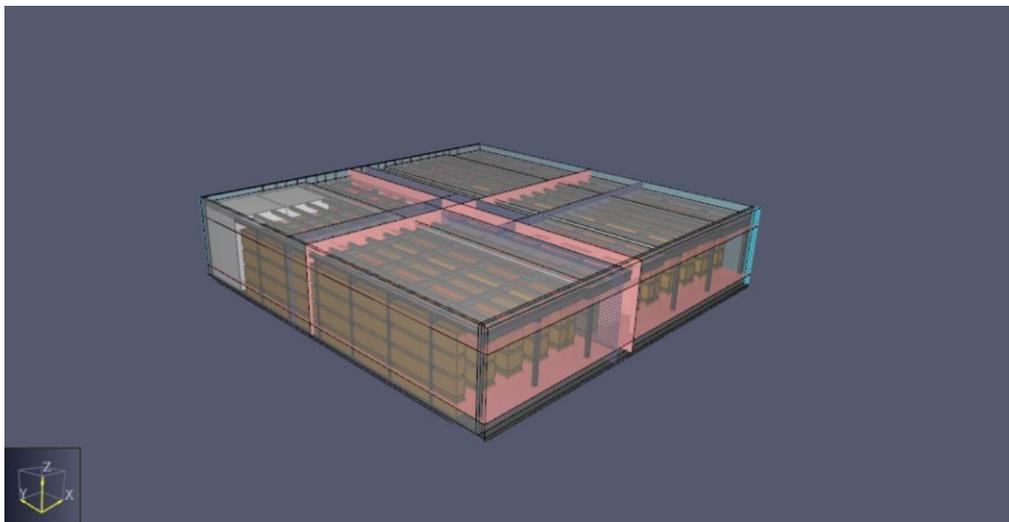
*Ilustración 19. Captura de pantalla de Smokeview. Fuente: FDS Tutorial.*

La creación de los ficheros de entrada requiere un conocimiento avanzado del lenguaje de programación utilizado por el FDS, por lo que la introducción de datos no es una tarea sencilla, pues ambas herramientas carecen de una interfaz gráfica para la incorporación de dichos datos. Por ello, existen varios programas de terceros, entre ellos Pyrosim, que generan fácilmente el archivo de texto que contiene los parámetros de entrada que requiere el FDS. Pyrosim proporciona herramientas gráficas que permiten al usuario generar el fichero de texto de entrada del FDS, introduciendo materiales combustibles y de superficies (tanto de una base de datos o creados por el usuario) con sus características fisicoquímicas, condiciones arquitectónicas del modelo, características del incendio, e incluso protección pasiva y activa, como detectores y rociadores. También deben especificarse las características de la simulación, como su duración, y qué resultados y parámetros se desea obtener. Además, permite importar CAD y diseñar edificios y elementos estructurales en los que se pueden definir numerosas características. El FDS calculará todos los valores, tanto escalares como vectoriales, de las variables especificadas, en cada una de las celdas en las que se divide el modelo. Los ficheros de resultados son visualizables mediante Smokeview, como gráficos historia-tiempo, concentración de especies químicas, distribuciones de temperatura y humos, visibilidad y flujos de viento, entre otros [35].

### 3.4 ESCENARIOS DE INCENDIO EN PYROSIM

A continuación, para facilitar la comprensión del funcionamiento de las simulaciones, se mostrará un escenario de incendio de los descritos anteriormente en Pyrosim, concretamente el escenario 1, con una explicación de los elementos principales que lo componen, así como las características principales de la simulación.

En la Ilustración 20 se muestra una vista 3D del escenario 1 en Pyrosim. Se puede ver, como se describió anteriormente, que se trata de una nave industrial de planta cuadrada.



*Ilustración 20. Vista 3D del escenario 1 en Pyrosim.*

Por otro lado, como se muestra en la Ilustración 21, también se puede visualizar el código de entrada del FDS generado, en el que se definen todas sus características.

```

Model Records (Read-Only):
1 BP01.fds
2 Generated by PyroSim - Version 2022.3.1208
3 28-may-2023 19:21:57
4
5 &HEAD CHID='BP01'/
6 &TIME T_END=2400.0/
7 &DUMP DT_PL3D=15.0, NFRAMES=1200, WRITE_XYZ=.TRUE., PLOT3D_QUANTITY='VOLUME FRACTION','VOLUME FRACTION','VOI
8
9 &MESH ID='Mesh01', IJK=34,72,62, XB=27.5,36.0,23.5,41.5,-0.5,15.0/
10 &MESH ID='Mesh02', IJK=55,85,31, XB=0.0,27.5,-1.0,41.5,-0.5,15.0/
11 &MESH ID='Mesh03', IJK=87,49,31, XB=27.5,71.0,-1.0,23.5,-0.5,15.0/
12 &MESH ID='Mesh04', IJK=70,94,31, XB=36.0,71.0,23.5,70.5,-0.5,15.0/
13 &MESH ID='Mesh05', IJK=72,58,31, XB=0.0,36.0,41.5,70.5,-0.5,15.0/
14
15
16 &REAC ID='WOOD_OAK',
17 FYI='SFPE Handbook, 5th Ed',
18 FUEL='REAC_FUEL',
19 C=1.0,
20 H=1.7,
21 O=0.72,
22 N=1.0E-3,
23 CO_YIELD=4.0E-3,
24 SOOT_YIELD=0.015/
25
26 &CTRL ID='invert', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='TIMER->OUT->OUT'/
27 &CTRL ID='invert-2', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='FALSE->OUT->OUT'/
28 &DEVC ID='Rad', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=31.5,26.5,1.5, ORIENTATION=0.0,1.0,0.0/
29 &DEVC ID='TIMER->OUT->OUT', QUANTITY='TIME', XYZ=27.5,23.5,-0.5, SETPOINT=3600.0/
30 &DEVC ID='FALSE->OUT->OUT', QUANTITY='TIME', XYZ=27.5,23.5,-0.5, SETPOINT=3601.0/
31
32

```

Ilustración 21. Código de entrada del FDS generado en Pyrosim para el escenario 1.

Como se explicó anteriormente, este código no es modificable directamente, sino que es generado al ir añadiendo elementos mediante la interfaz de Pyrosim. A la izquierda de la ventana principal, podemos encontrar una vista con los diferentes objetos del modelo. Cada objeto posee una serie de características y acciones que aparecen disponibles al seleccionar dicho objeto.

Como se puede ver en la Ilustración 22, lo primero que aparece en la ventana son las mallas, o meshes en inglés. Las mallas definen el dominio computacional tridimensional que el FDS utiliza para simular un modelo. Cada malla se encuentra dividida en celdas, cada una de las cuales es utilizada en una serie de cálculos, y que corresponden al número entre paréntesis al lado del nombre de la malla. Normalmente, a medida que aumenta el número de celdas de la malla, aumenta la precisión de la simulación. Sin embargo, cuanto más precisa sea una simulación, mayor será el tiempo necesario para completarse, por lo que es necesario encontrar un balance entre el tiempo de simulación y la precisión del modelo [36]. Como se puede observar en la Ilustración 22, hay 5 mallas en el escenario 1, siendo el número de mallas el mismo en el resto de escenarios.

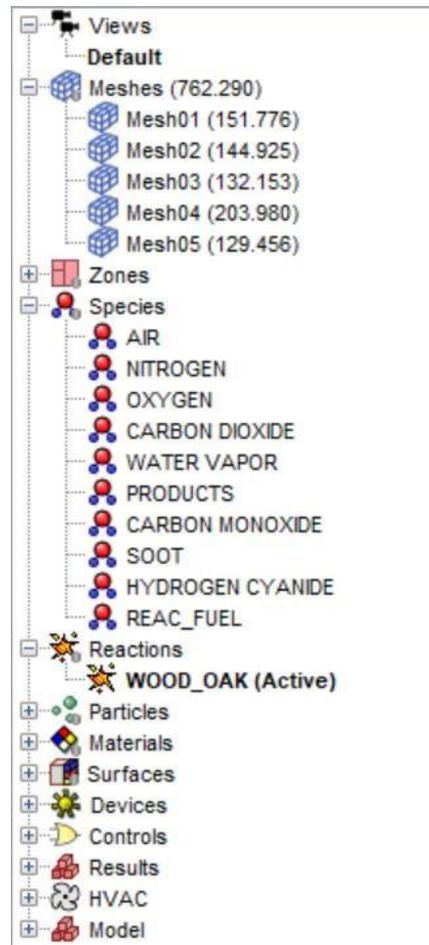


Ilustración 22. Vista de elementos de la simulación para el escenario 1 en Pyrosim.

Para determinar un tamaño adecuado de celda, en este caso se ha utilizado una estimación en función del tamaño del incendio, utilizando su diámetro característico. El diámetro característico del incendio ( $D^*$ ), se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$D^*(m) = \left( \frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{amb} \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Donde:

- $Q$  es la tasa de liberación de calor del incendio en kW.
- $\rho_{\infty} = 1,2 \text{ kg/m}^3$  es la densidad del aire a temperatura ambiente.
- $c_p = 1,012 \text{ kJ/kg/K}$  es el calor específico del aire.

- $T_{amb} = 293 K$  es la temperatura ambiente.
- $g = 9,81 m/s^2$  es la aceleración de la gravedad.

De acuerdo con los estudios de validación realizados por la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de los Estados Unidos [37], se recomienda que la proporción  $D^*/\delta_x$ , donde  $\delta_x$  es el tamaño nominal de las celdas (longitud del lado de una celda cuadrada en metros), varíe entre 4 y 16 para obtener un tamaño óptimo de celda. En la Tabla 13 se muestra el resultado del cálculo del diámetro característico del incendio para los dos casos que se tratan en los escenarios: una tasa de liberación de calor (HRR) de 4822 kW, para incendios de velocidad media, y de 7768 kW para incendios de velocidad ultrarrápida.

Además, según el valor recomendado de la proporción  $D^*/\delta_x$ , mencionado anteriormente, se muestra también el rango de tamaños nominales de celda en cada caso.

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2
<i>HRR máxima (kW)</i>	4.822 kW	7.768 kW
<i>Diámetro característico (m)</i>	1,80	2,17
<i>Tamaño nominal de celda (m)</i>	$0,11 \leq \delta_x \leq 0,45$	$0,14 \leq \delta_x \leq 0,54$

Tabla 13. Cálculo del tamaño nominal de celda según la tasa de liberación de calor

En base a estos resultados, se propone emplear celdas de  $0,25 m^3$  en la proximidad del incendio y de  $0,5 m^3$  en el resto del volumen computacional.

En la vista de los elementos del modelo, debajo de las especies gaseosas que intervienen en éste, visibles en la Ilustración 22, se encuentra la reacción de combustión. En este caso, al tratarse del escenario 1, el combustible es la madera de roble. En otros escenarios, como ya se especificó en la Tabla 6, el combustible es espuma de poliuretano GM37. Los átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno que componen el material han sido especificados, así como la producción de monóxido de carbono y hollín, todo esto indicado en la Tabla 12 de este capítulo. Además, se ha especificado la liberación de oxígeno por unidad de masa.

En la Ilustración 23, se muestra la vista de elementos con la lista tanto de materiales como de superficies del modelo. Estos son los mismos para todos los escenarios. Un resumen de las principales propiedades térmicas de los materiales constructivos del establecimiento, especificadas en el modelo, se encuentra en la Tabla 14.

Material	Densidad	Calor específico	Conductividad
Hormigón	2280 kg/m <sup>3</sup>	1,04 kJ/(kg·K)	1,8 W/(m·K)
Acero	7850 kg/m <sup>3</sup>	0,46 kJ/(kg·K)	45,8 W/(m·K)
Celulosa	640 kg/m <sup>3</sup>	2,85 kJ/(kg·K)	0,14 W/(m·K)
SBS	1200 kg/m <sup>3</sup>	1,8 kJ/(kg·K)	0,25 W/(m·K)
Ladrillos	750 kg/m <sup>3</sup>	1,04 kJ/(kg·K)	0,36 W/(m·K)
Aislamiento	150 kg/m <sup>3</sup>	0,8 kJ/(kg·K)	0,039 W/(m·K)

Tabla 14. Características térmicas de los materiales constructivos en Pyrosim.

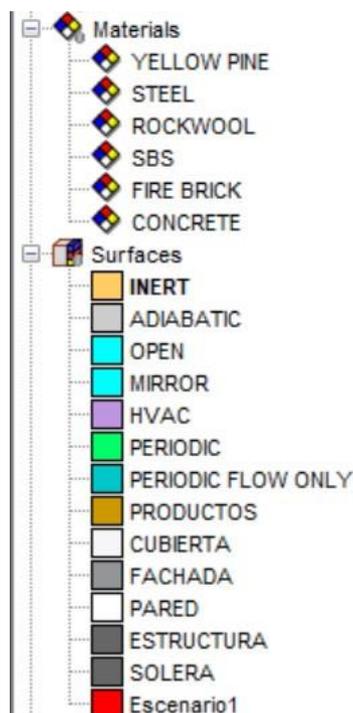


Ilustración 23. Vista de materiales y superficies del modelo en Pyrosim.

A continuación de los materiales, en la Ilustración 23, se encuentran las superficies del modelo. La superficie Escenario 1 representa el fuego, cuyas características (tasa de

liberación de calor y tamaño máximo) se encuentran en la Tabla 11 del apartado 3.2. En el caso del escenario 1, se ha especificado una tasa de liberación de calor por unidad de área (HRRPUA) de 642,9 kW/m<sup>2</sup> que, multiplicada por el área del incendio, de 7,5 m<sup>2</sup>, proporciona una tasa de liberación de calor (HRR) de 4822 kW, que es justamente la calculada en el apartado 3.2 para el escenario 1, al ser un incendio de crecimiento medio. Para otros escenarios con crecimiento ultrarrápido, el método de cálculo es el mismo y, como ya se indicó anteriormente, la potencia es de 7768 kW.

Entre las otras superficies, se encuentran las predeterminadas, que están presentes en todo modelo de Pyrosim: Inert, Adiabatic, Open, Mirror, HVAC y Periodic. Estas definen las características de las superficies del modelo. Por ejemplo, Adiabatic indica que, para este tipo de superficies, no habrá transferencia de calor por radiación o convección entre gases y el sólido [36]. Por otro lado, se encuentran las superficies que han sido definidas para la creación de la estructura tridimensional del modelo de nave industrial. Cada superficie tiene sus características propias, como el tipo de materiales de los que se compone, el grosor de cada material, temperatura, etc. Es en el apartado model, mostrado en la Ilustración 22, donde aparece cada elemento tridimensional, creado a partir de estas superficies.

En la Ilustración 23 se puede observar un elemento llamado HVAC. Éste hace referencia a las fugas, ya que en la realidad los edificios no son completamente herméticos y contienen pequeñas aberturas. A medida que la presión inducida por un incendio aumenta en el compartimento, se originan estas fugas de aire, que se han definido en el modelo a través de muelles de carga y portones de vehículos. Como referencia, se han considerado las áreas de fuga establecidas en la tabla A.3 de la norma UNE-EN 12101-6:2006 [38]: 0,06 m<sup>2</sup> para muelles de carga y portones de vehículos.

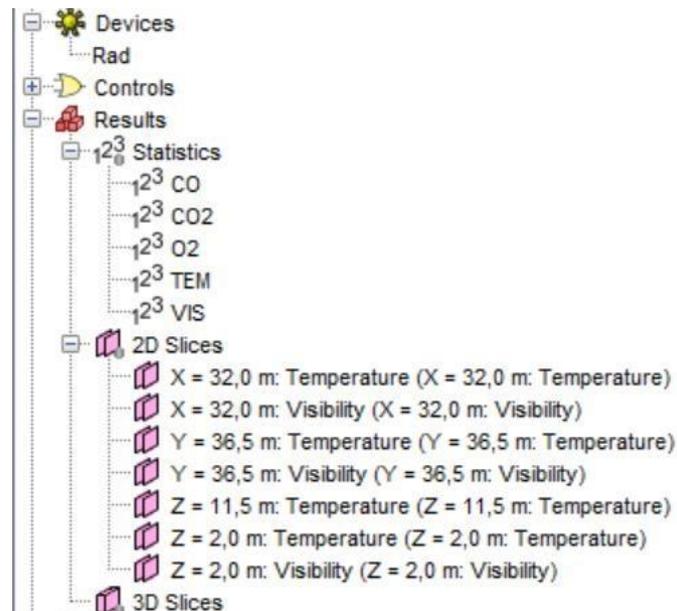


Ilustración 24. Vista de dispositivos de medición y resultados del modelo en Pyrosim.

Por último, en la Ilustración 24, se muestran tanto los dispositivos de medición instalados en el modelo (devices), como los resultados de la simulación, en forma de datos estadísticos (statistics) y planos de corte (2D slices). Una vez completada la simulación, se obtendrá lo siguiente:

- Mediciones de temperatura y visibilidad a partir de planos de corte verticales situados en las principales vías de aproximación al incendio (desde el centro de los cuatro laterales de la planta hasta el foco del incendio).
- Mediciones de temperatura y visibilidad en las rutas de evacuación e intervención a partir de planos de corte horizontales situados a 2 m de altura.
- Promedio de visibilidad, temperatura, radiación térmica y CO<sub>2</sub> a una distancia cercana al origen del incendio desde la cual los bomberos podrían intervenir.
- Curva de la tasa de liberación de calor del incendio.

Se ha definido un tiempo de simulación de 40 minutos (2400 segundos) en todos los escenarios para poder evaluar correctamente las condiciones de seguridad durante la intervención de los bomberos.

## 4 RESULTADOS

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos en las simulaciones de los 12 escenarios expuestos en el apartado anterior y, a partir de ellos, se estimarán unas distancias seguras para los recorridos de evacuación e intervención. Este apartado se encuentra dividido en tres subapartados, cada uno correspondiente a uno de los tres tamaños de nave que se ha analizado. Dentro de cada tamaño de nave, como se encuentra expuesto en la Tabla 6, se han simulado cuatro casos posibles, dos con velocidad de crecimiento media y dos con velocidad de crecimiento ultrarrápida, que alcanzarán una mayor potencia. Por último, dentro de cada velocidad, habrá un incendio con combustible de madera red oak, que posee una menor tasa de hollín, por lo que afectará menos a la visibilidad, y uno con espuma de poliuretano GM37, con mayor tasa de hollín.

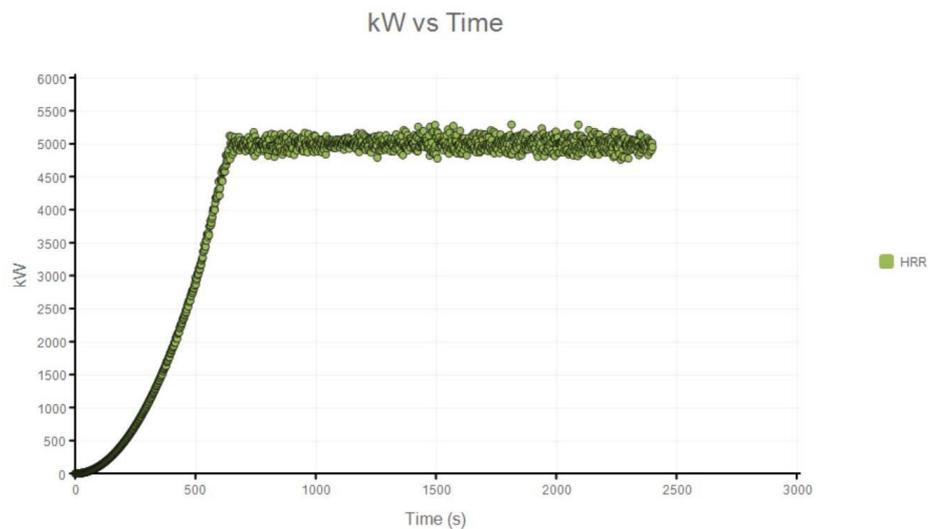
Para poder estimar la longitud de las principales vías de evacuación e intervención, se analizará en cuánto tiempo se pierden las condiciones de seguridad en dichas vías, es decir, cuándo dejan de cumplirse los criterios prestacionales de seguridad, y se comparará dicho tiempo con uno representativo. En el caso de la evacuación de los ocupantes, se tomará como un tiempo de evacuación razonable el estimado en el apartado 2.3, de 10 minutos. Por otro lado, se tomarán 40 minutos como un tiempo máximo de intervención razonable. Estos 40 minutos son la suma de un tiempo máximo de llegada desde que se da la señal de alarma de aproximadamente 20 minutos, según el documento elaborado por el Ministerio del Interior y de Ultramar de Francia sobre las estadísticas de intervención de los bomberos en este país en 2022 [39], y un tiempo máximo de intervención en el establecimiento de 20 minutos, según lo expuesto en el apartado 2.3 de este documento haciendo referencia a la guía PBD. Cabe destacar que estos tiempos son unos máximos establecidos según las guías prestacionales, y variarán tanto con el tamaño del sector como con las condiciones propias de cada caso, por lo que son únicamente orientativos.

## 4.1 ESCENARIOS PEQUEÑOS

En este apartado se analizarán los cuatro escenarios, cuyas características se exponen en la Tabla 6, de 5000 m<sup>2</sup>.

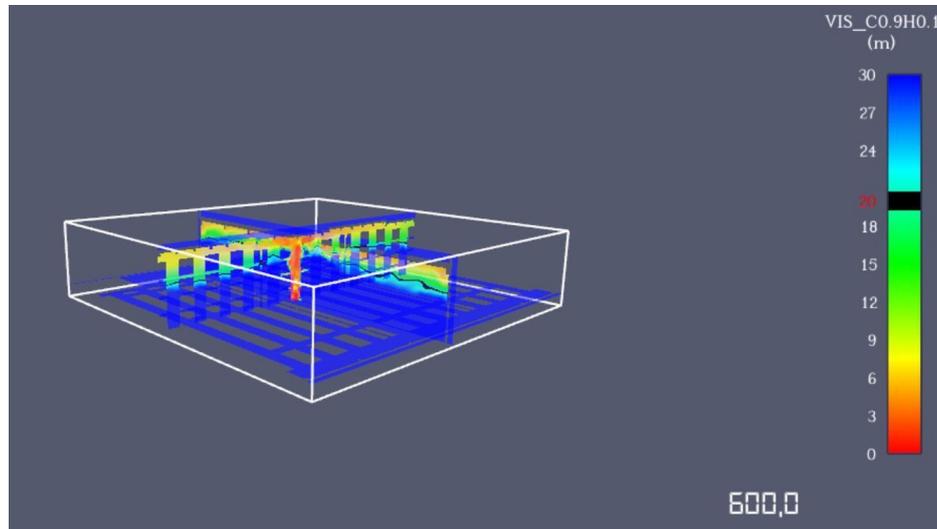
### 4.1.1 Escenarios pequeños con velocidad de crecimiento media

En primer lugar, se analizará el escenario 1 que, como se mencionó anteriormente, utiliza madera red oak como combustible. Se puede observar en la Ilustración 25 cómo el incendio crece exponencialmente hasta alcanzar una potencia de aproximadamente 5000 kW a los 650 segundos (aproximadamente 10,8 minutos). Esto coincide con las características definidas en el apartado 3 para incendios de crecimiento medio, ya que se calculó una potencia máxima de 4822 kW que se alcanzaría a los 10,7 minutos una vez activados los rociadores automáticos.



*Ilustración 25. Gráfica temporal de la potencia del incendio en el escenario 1.*

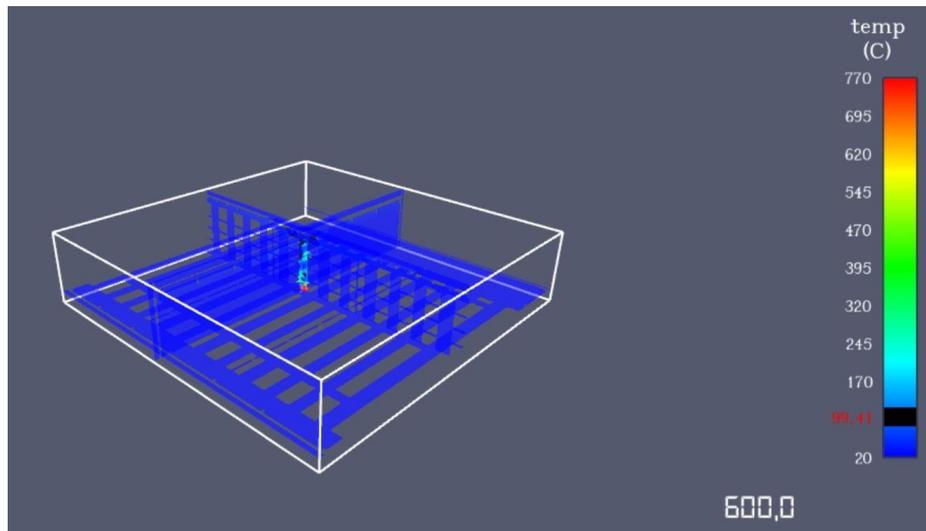
Las condiciones de visibilidad tras el proceso de evacuación, es decir, pasados los primeros 10 minutos, se pueden ver en la Ilustración 26, que muestra tanto la visibilidad, medida en metros, en planos de corte verticales situados en las principales vías de evacuación, como a 2 metros de altura en un plano de corte horizontal.



*Ilustración 26. Planos de corte de visibilidad en el escenario 1 pasados 10 minutos.*

Se puede observar que los criterios de seguridad en relación a la visibilidad se cumplen durante el proceso de evacuación de los ocupantes, ya que se mantiene una visibilidad bastante superior a 20 metros de distancia a 2 metros de altura en las principales vías de evacuación. Se puede ver cómo la visibilidad se ha perdido en zonas de mayor altura debido al humo, mostradas en tonos cálidos como indica la leyenda.

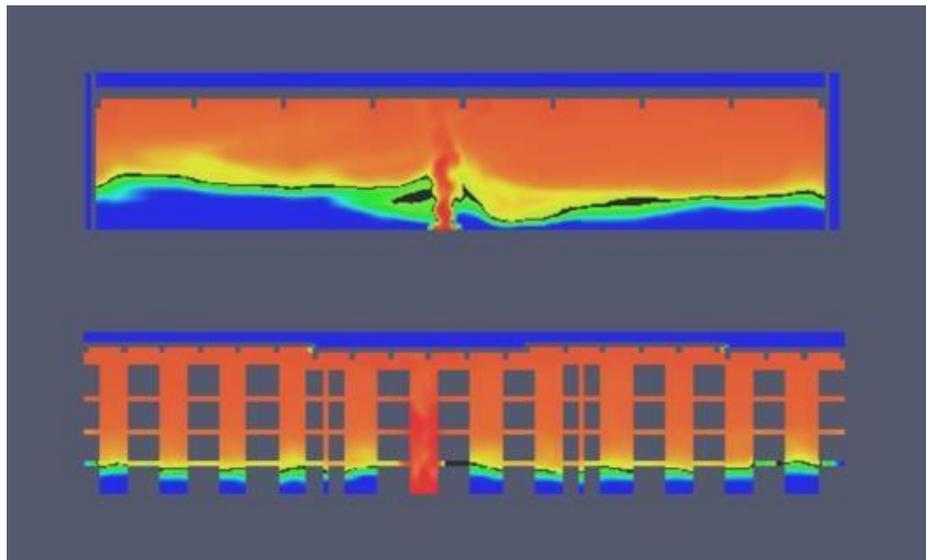
En cuanto a las condiciones de temperatura durante la evacuación, si se observa la Ilustración 27, que muestra los mismos planos de corte verticales y horizontal que en el caso de la visibilidad, se comprueba que no se superan los 100°C a 2 metros de altura en las vías de evacuación, manteniéndose éstas a una temperatura muy inferior, cercana a los 30°C.



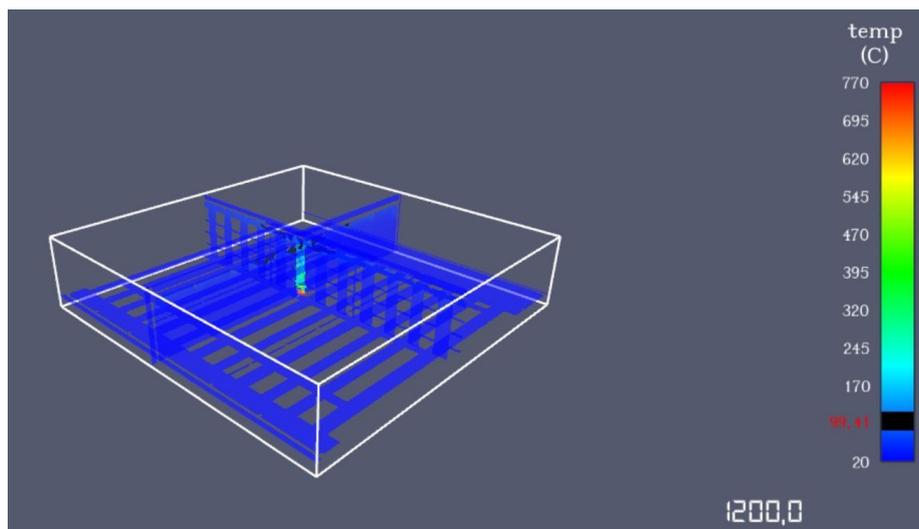
*Ilustración 27. Planos de corte de temperatura en el escenario 1 pasados 10 minutos.*

Para el análisis de las condiciones de visibilidad y temperatura durante la intervención de los bomberos, se ha utilizado el mismo procedimiento. Las Ilustraciones 28 y 29 muestran, respectivamente, las condiciones de visibilidad y temperatura pasados 20 minutos desde el inicio del incendio, coincidiendo aproximadamente con la llegada de los equipos de intervención. Para la temperatura, las condiciones no varían mucho respecto a los 10 minutos, por lo que se puede considerar que la intervención de los bomberos se realizaría bajo unas condiciones de temperatura seguras. Sin embargo, si se observa la Ilustración 28, que muestra únicamente los planos de corte verticales para un mayor entendimiento, la visibilidad ha disminuido considerablemente y, aunque en la mayor parte del recorrido de intervención existe una visibilidad superior a la recomendada, en algunos pequeños tramos no alcanza los 10 metros mínimos de seguridad. No obstante, si se considera la hipótesis IX expuesta en el apartado 3.1, al no existir un sistema automático de control de humos, es previsible que la visibilidad se pierda rápidamente y que no se mantengan en ningún caso las condiciones de seguridad, pudiéndose activar manualmente el sistema de control de humos si se considera oportuno. Tanto la norma de humos UNE 23585 [40] como la de rociadores UNE 12845 [27] obligan a que el sistema de control de humos sea de apertura exclusivamente manual, por lo que únicamente puede ser activado por los equipos de intervención cuando sea necesario. Sin embargo, los

rociadores ESFR en este tipo de naves están diseñados para extinguir el incendio, por lo que si se activa el sistema de control de humos se debe tener en cuenta que los rociadores pueden no funcionar como previsto. Dicho esto, y al no superarse en la mayor parte del recorrido el límite de visibilidad, las condiciones se pueden considerar aptas para una intervención segura.



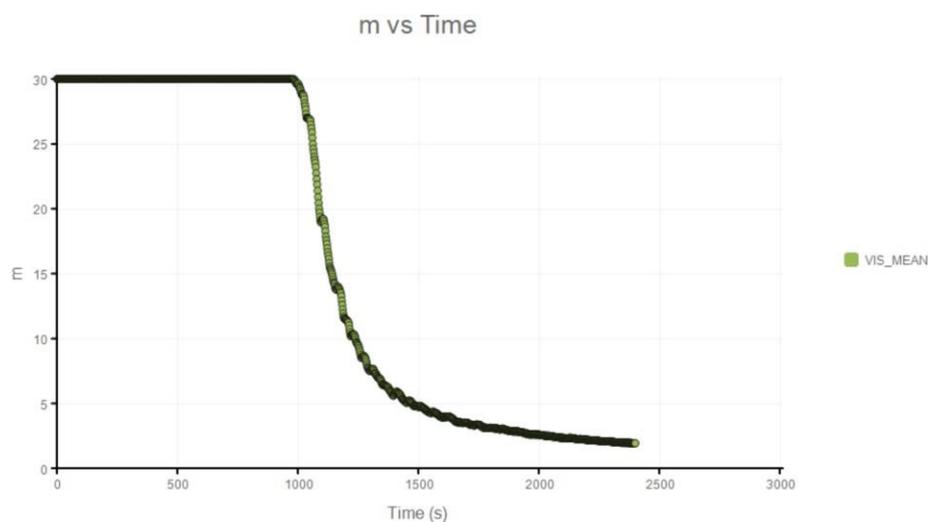
*Ilustración 28. Planos de corte de visibilidad en el escenario 1 pasados 20 minutos.*



*Ilustración 29. Planos de corte de temperatura en el escenario 1 pasados 20 minutos.*

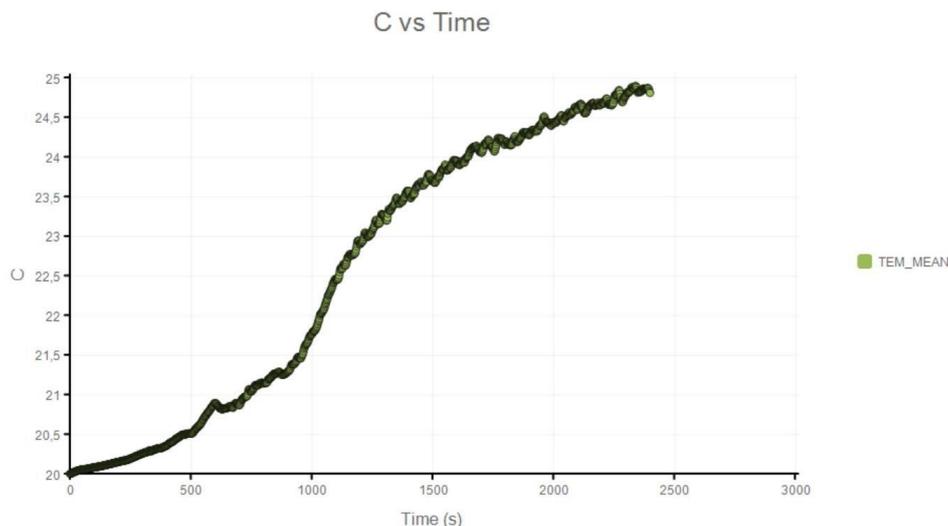
A los 1500 segundos de simulación, un único lateral de acceso queda con suficiente visibilidad para la actuación de los equipos de intervención, por lo que si su llegada supera los 25 minutos y no se hace uso del sistema de control de humos, aumentaría la dificultad para acceder al foco del incendio.

A continuación, en las Ilustraciones 30 y 31 se muestran respectivamente los promedios de visibilidad y temperatura a una distancia cercana al foco del incendio, desde la cual los bomberos podrían intervenir.



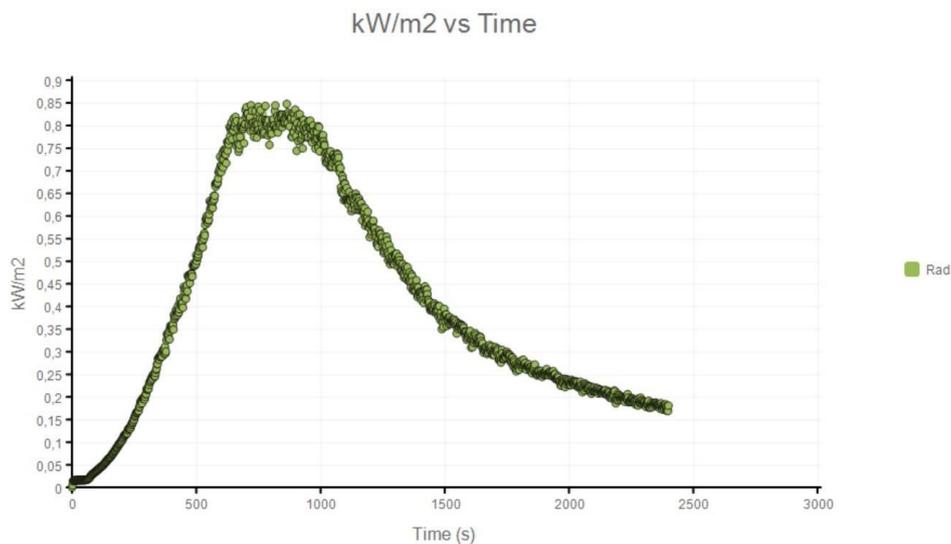
*Ilustración 30. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1.*

Se puede observar que la visibilidad se reduce muy rápidamente y que al transcurrir poco más de 20 minutos se alcanzan visibilidades inferiores a la distancia recomendada de 10 metros. En cuanto a la temperatura, se comprueba que no supone ningún tipo de dificultad al no superarse temperaturas mayores a los 25 grados durante 40 minutos.

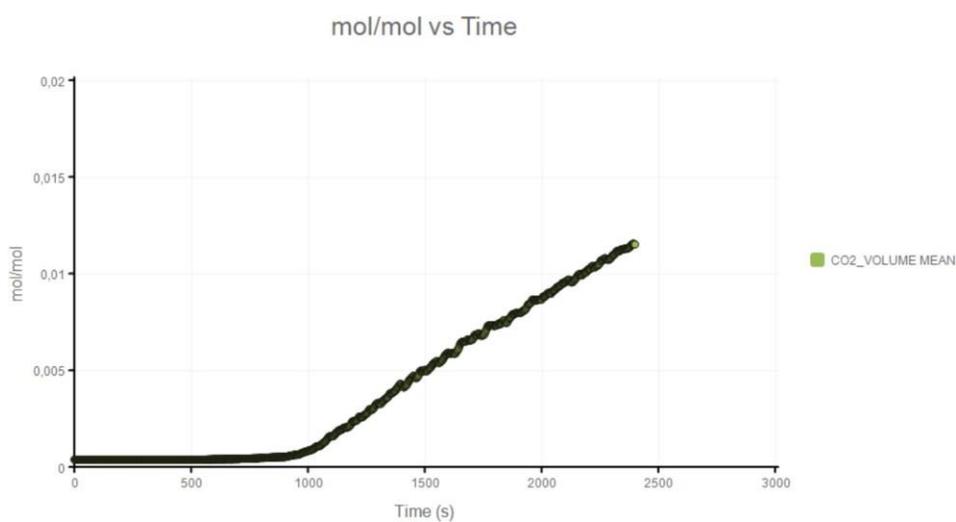


*Ilustración 31. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1.*

Por último, las Ilustraciones 32 y 33, de niveles de radiación térmica y dióxido de carbono a una distancia cercana al foco del incendio, confirman que los bomberos podrían intervenir de una forma segura desde una distancia próxima al incendio, ya que la radiación térmica es muy inferior a  $3 \text{ kW/m}^2$  y los niveles de  $\text{CO}_2$  se mantienen en todo momento por debajo de  $0,03 \text{ mol/mol}$ , niveles de seguridad recomendados por la guía PBD en el apartado 2.4.



*Ilustración 32. Gráfica temporal de la radiación térmica (kW/m<sup>2</sup>) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1.*

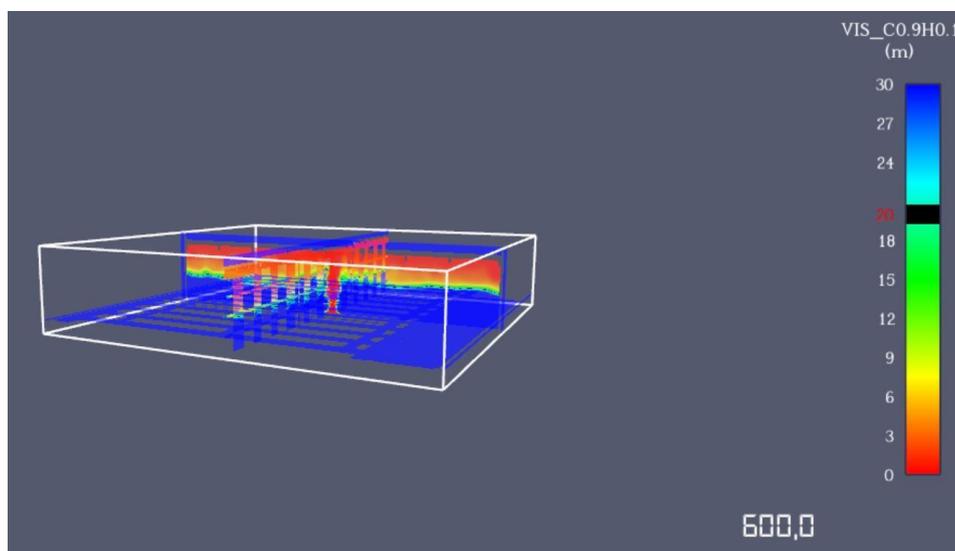


*Ilustración 33. Gráfica temporal de la concentración de dióxido de carbono (mol/mol) a una distancia cercana al incendio en el escenario 1.*

A continuación, en el escenario 2, se realizará el mismo análisis, teniendo en cuenta que el material implicado en la combustión es la espuma de poliuretano GM37 que, como se

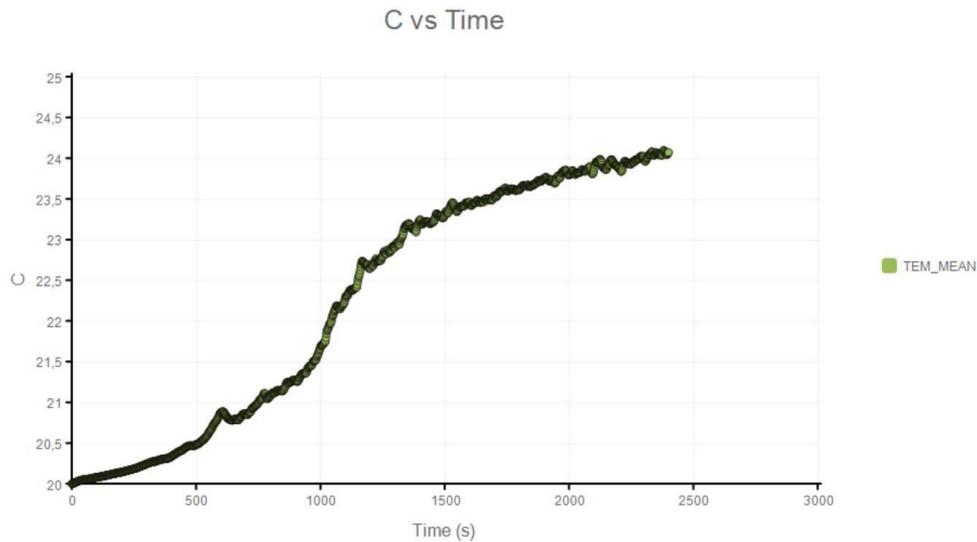
mencionó anteriormente, posee una mayor tasa de hollín, por lo que se espera que la visibilidad se pierda con mayor rapidez.

En primer lugar, durante los primeros 10 minutos de simulación, correspondientes a la evacuación, la visibilidad sigue manteniéndose por encima de los 20 metros a 2 metros de altura. Sin embargo, como es de esperar, se puede comprobar, comparando las Ilustraciones 26 y 34, que esta visibilidad ha disminuido debido a la mayor tasa de hollín del combustible.



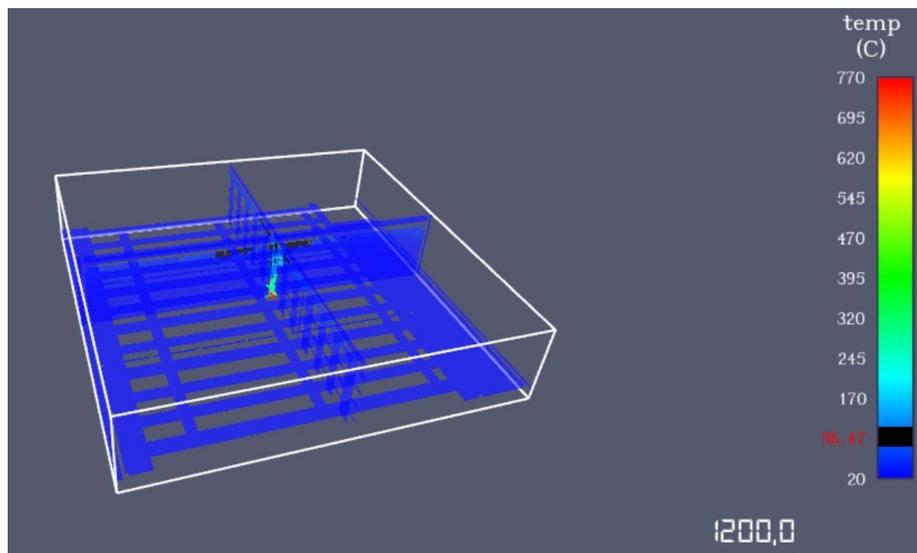
*Ilustración 34. Planos de corte de visibilidad en el escenario 2 pasados 10 minutos.*

La temperatura en la nave durante los primeros 10 minutos sigue manteniéndose muy baja, con valores muy similares a los del escenario 1, siendo éstos cada vez menores en comparación y cuanto más tiempo transcurre, como se puede observar en la Ilustración 35, que muestra la temperatura a una distancia cercana al foco del incendio.



*Ilustración 35. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 2.*

Pasados 20 minutos, cuando los equipos de intervención comienzan a dirigirse al foco del incendio, la temperatura de las vías de evacuación, mostrada en la Ilustración 36, se mantiene muy por debajo de los 100°C, siendo ésta levemente inferior a la del escenario 1. Esta tendencia de temperaturas bajas, como se mencionó anteriormente haciendo referencia a la Ilustración 35, se mantendrá en el tiempo, por lo que no afectará en ningún caso a las condiciones de seguridad de los equipos de intervención.



*Ilustración 36. Planos de corte de temperatura en el escenario 2 pasados 20 minutos.*

La Ilustración 37 muestra un plano de corte horizontal de visibilidad, realizado a 2 metros de altura en el escenario 2. Como se puede observar, en comparación con la visibilidad del escenario 1 a los 20 minutos de simulación, la visibilidad es mucho menor, quedando únicamente una vía de acceso con visibilidad mayor a 10 metros. Esto se debe a la mayor tasa de hollín del combustible GM37. En la Ilustración 38 se muestra una gráfica de visibilidad a una distancia cercana al foco del incendio que, en comparación con la Ilustración 30, comienza a disminuir aproximadamente 3,5 minutos antes y con mucha más rapidez, quedando por debajo de los 5 metros de visibilidad a los 18 minutos de simulación, frente a los 25 minutos en el escenario 1.

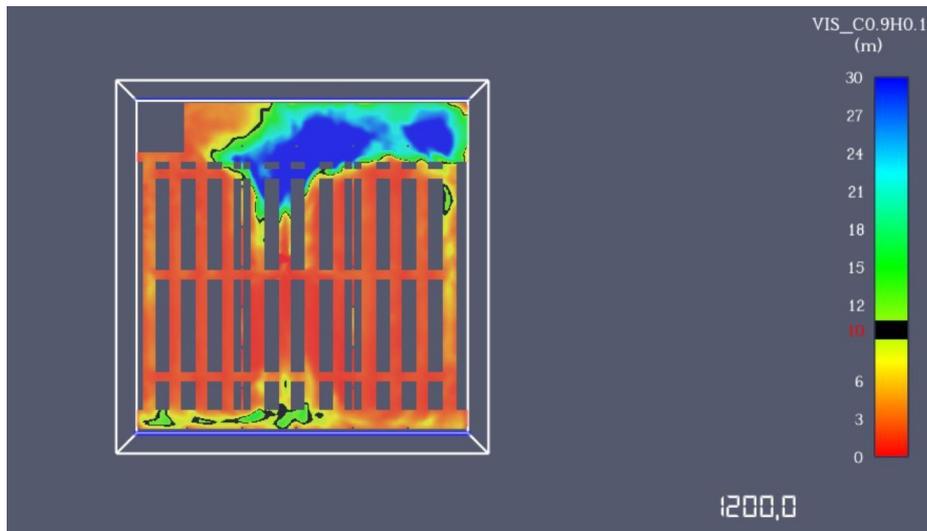


Ilustración 37. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 2 pasados 20 minutos.

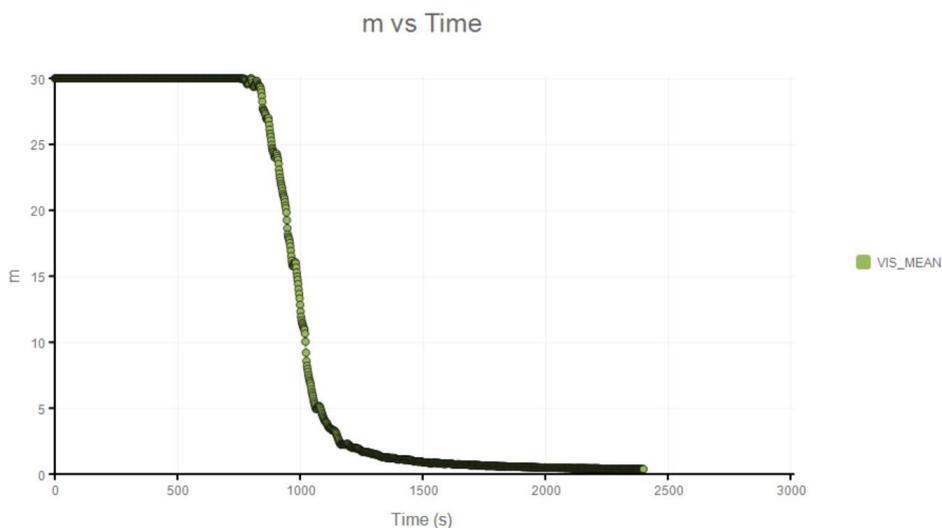


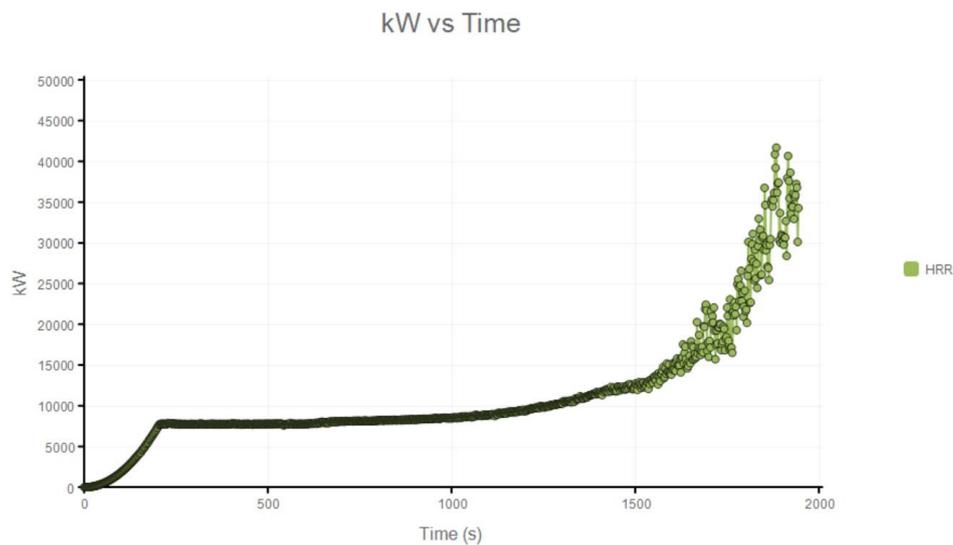
Ilustración 38. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 2.

El problema de la visibilidad reducida en el escenario 2 se podría solventar, si se considera necesario, con la activación del sistema de control de humos. Además, al quedar una de las vías cortas de acceso con visibilidad suficiente, todavía sería posible intervenir, si se hace con suficiente rapidez, ya que pasados los 25 minutos el humo cubriría dicha vía.

Para teminar, se comprueba que, efectivamente, los niveles tanto de radiación térmica como de concentración de dióxido de carbono no superan los valores críticos, alcanzando un máximo de  $0,76 \text{ kW/m}^2$  y  $0,0096 \text{ mol/mol}$ , respectivamente. Cabe destacar que estos niveles máximos son inferiores a los del escenario 1 debido al combustible utilizado.

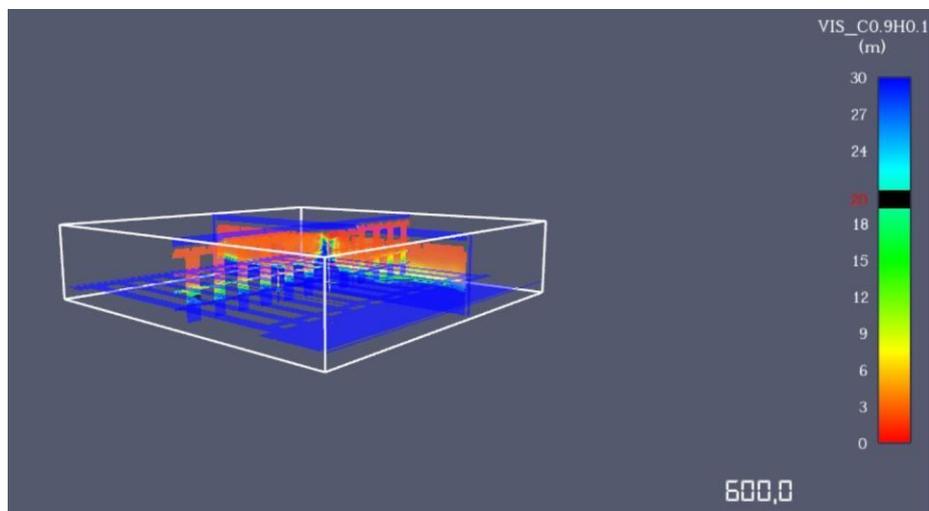
#### **4.1.2 Escenarios pequeños con velocidad de crecimiento ultrarrápida**

En este apartado se estudiarán los escenarios de  $5000 \text{ m}^2$  con incendios cuya velocidad de crecimiento es ultrarrápida. En la Ilustración 39 se puede ver una gráfica de la potencia del incendio para el escenario 3, con combustible madera y de crecimiento ultrarrápido. Teóricamente, para los incendios de velocidad ultrarrápida, se calculó una potencia máxima de  $7768 \text{ kW}$ , alcanzada tras la activación de los rociadores automáticos. Se puede observar en la gráfica cómo se alcanza una potencia de aproximadamente  $8000 \text{ kW}$  pasados los 200 segundos de simulación, lo que coincide con los 3,4 minutos calculados teóricamente en la Tabla 11 para alcanzar dicha potencia. Sin embargo, pasados los 1500 segundos de simulación, esta potencia crece descontroladamente, lo que causará, como se verá a continuación, la pérdida de las condiciones de seguridad para la intervención de los bomberos. Este crecimiento sucede como consecuencia de grandes gradientes de presión en el interior de la nave al ser un volumen cerrado que se estudia durante un largo tiempo. Sin embargo, en la realidad no se suelen originar, ya que la presión se libera al abrirse puertas o elementos estructurales.

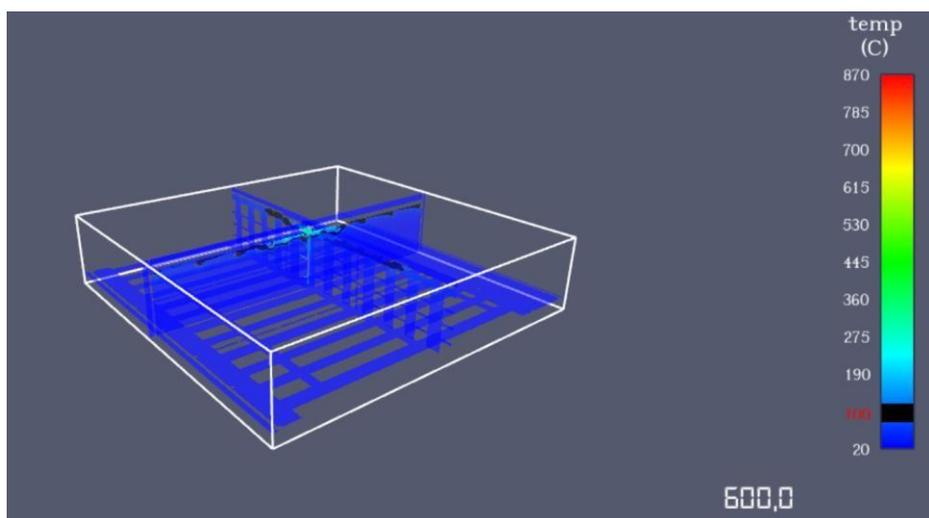


*Ilustración 39. Gráfica temporal de la potencia del incendio en el escenario 3.*

En primer lugar, en las Ilustraciones 40 y 41, se muestran los planos de corte de visibilidad y temperatura pasados 10 minutos, correspondientes al tiempo de evacuación de los ocupantes. Si se comparan estas ilustraciones con las correspondientes al escenario 1, Ilustraciones 26 y 27, podemos ver que estas últimas poseen una mayor visibilidad y menor temperatura. Esto es debido a la única diferencia entre ambos escenarios, de velocidad de crecimiento del incendio, que provoca que tanto las condiciones de visibilidad como de temperatura se pierdan con mayor rapidez en el escenario 3, con velocidad ultrarrápida. Sin embargo, en dicho escenario, a pesar de poseer unas condiciones de seguridad peores, se siguen manteniendo unos límites razonables, sin superar los 100°C o estar por debajo de 20 metros de visibilidad a 2 metros de altura.

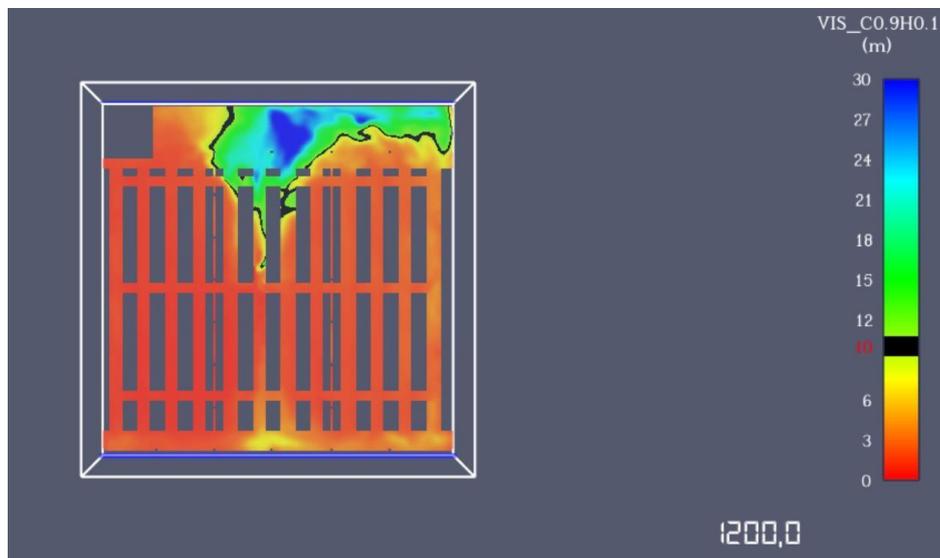


*Ilustración 40. Planos de corte de visibilidad en el escenario 3 pasados 10 minutos.*



*Ilustración 41. Planos de corte de temperatura en el escenario 3 pasados 10 minutos.*

Pasados 20 minutos de simulación, comienza a apreciarse un avance significativo en el deterioro de las condiciones de seguridad, especialmente en la visibilidad. La Ilustración 42 muestra un plano de corte horizontal de visibilidad realizado a 2 metros de altura, el cual demuestra una pérdida de visibilidad por debajo de los 10 metros en todas las vías de acceso al incendio excepto en una, el lateral derecho. A los 1400 segundos, se habrán perdido completamente los 10 metros límite de visibilidad en las vías de intervención si no se activa el sistema de control de humos.



*Ilustración 42. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 3 pasados 20 minutos.*

En cuanto a la temperatura, con la llegada de los equipos de intervención habrá aumentado significativamente, alcanzándose temperaturas superiores a los 100°C en la capa de humos, como se puede observar en la Ilustración 43. Al alcanzarse los 32 minutos de simulación aproximadamente, en consecuencia con lo analizado anteriormente en la curva de potencia del incendio, la temperatura habrá aumentado descontroladamente hasta niveles superiores a los 100°C en la mayor parte de las vías de acceso. Este fenómeno puede observarse en la Ilustración 44, que muestra la temperatura a los 32 minutos de simulación a una altura de 2 metros.

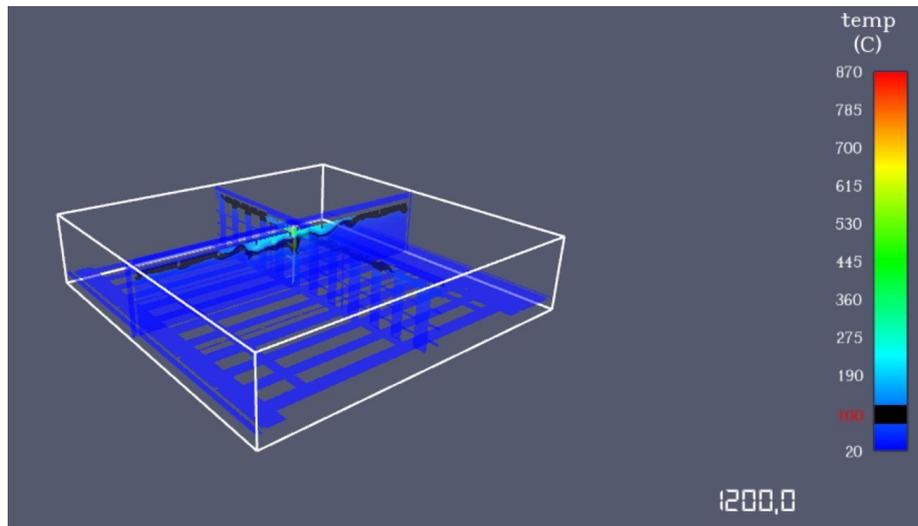


Ilustración 43. Planos de corte de temperatura en el escenario 3 pasados 20 minutos.

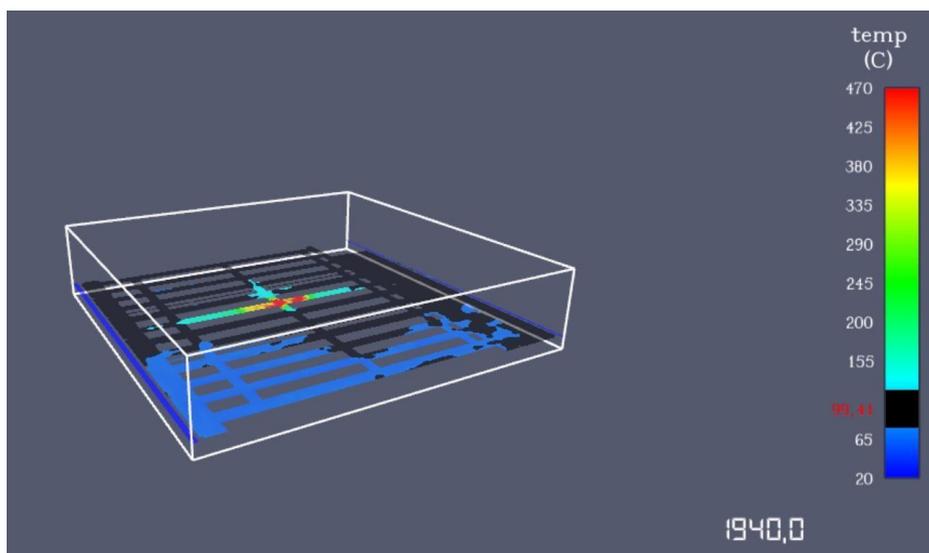


Ilustración 44. Plano de corte de temperatura horizontal en el escenario 3 pasados 32 minutos.

Pasados los 35 minutos, las temperaturas se encontrarán muy por encima del límite de seguridad en toda la nave, por lo que la intervención de los bomberos no se podrá realizar en condiciones de seguridad a partir de dicho momento.

Este fenómeno de aumento de temperaturas se puede observar también en la Ilustración 45, en la que, a una distancia cercana al foco del incendio, se alcanzan temperaturas cercanas a los 350°C, debido al crecimiento descontrolado de la potencia. Con la

visibilidad ocurre algo parecido, aunque en menor magnitud, obteniéndose una gráfica, Ilustración 46, similar a un incendio de crecimiento medio con un combustible con mayor tasa de hollín, escenario 2.

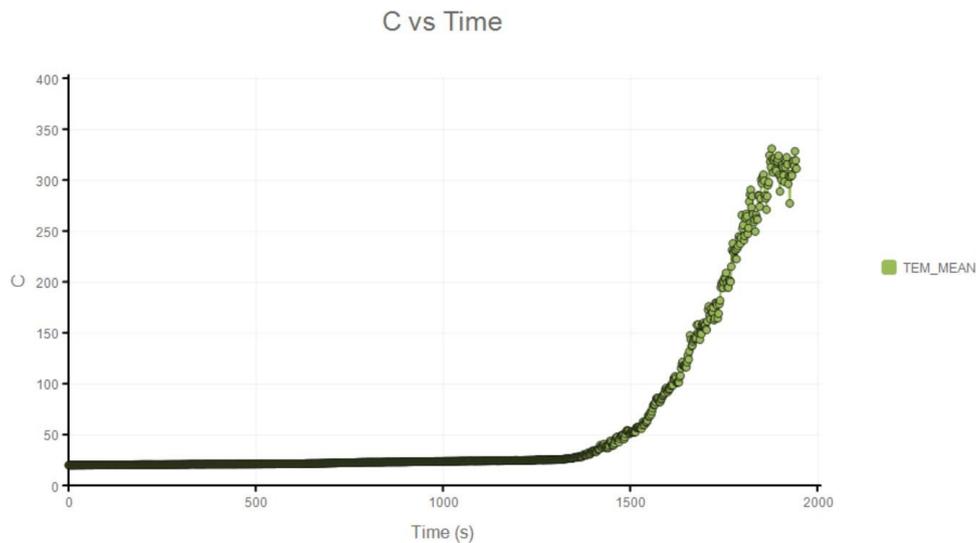


Ilustración 45. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.

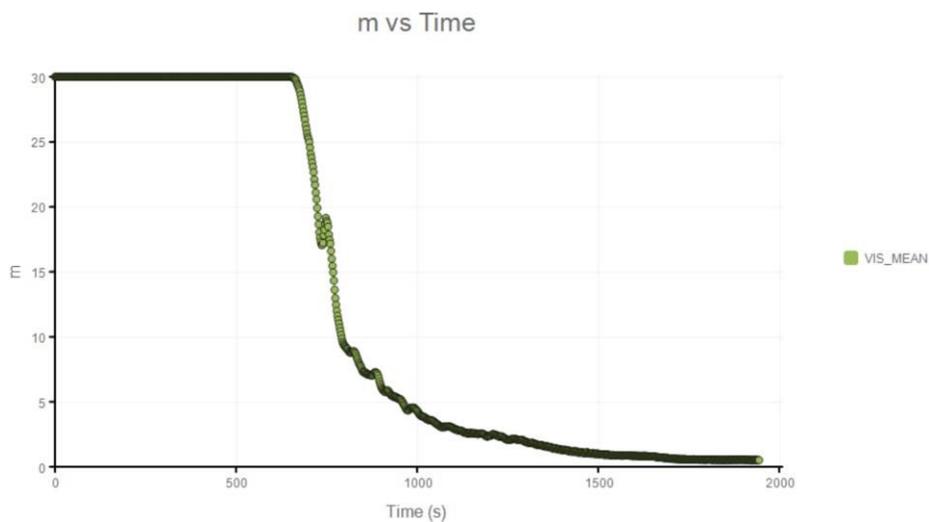
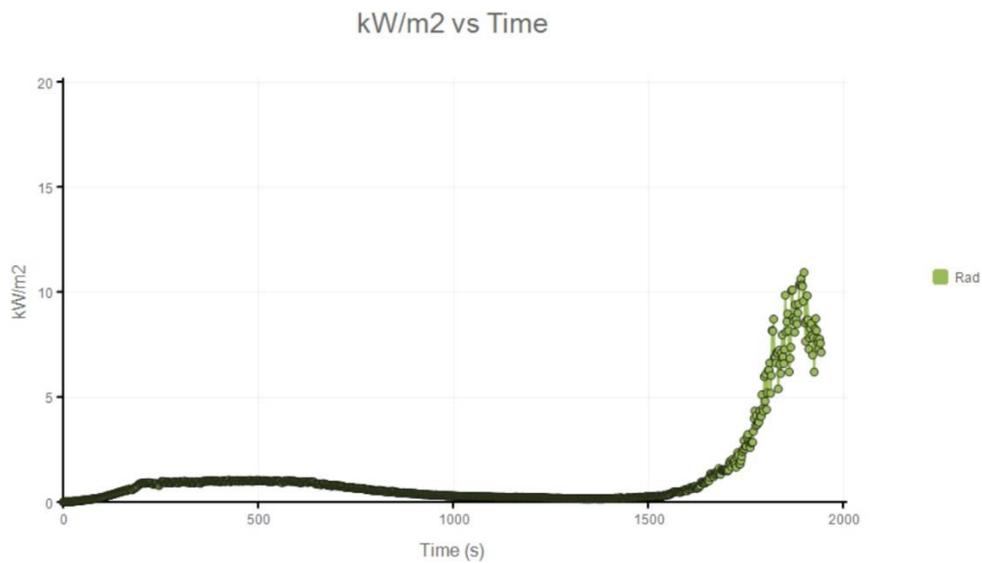
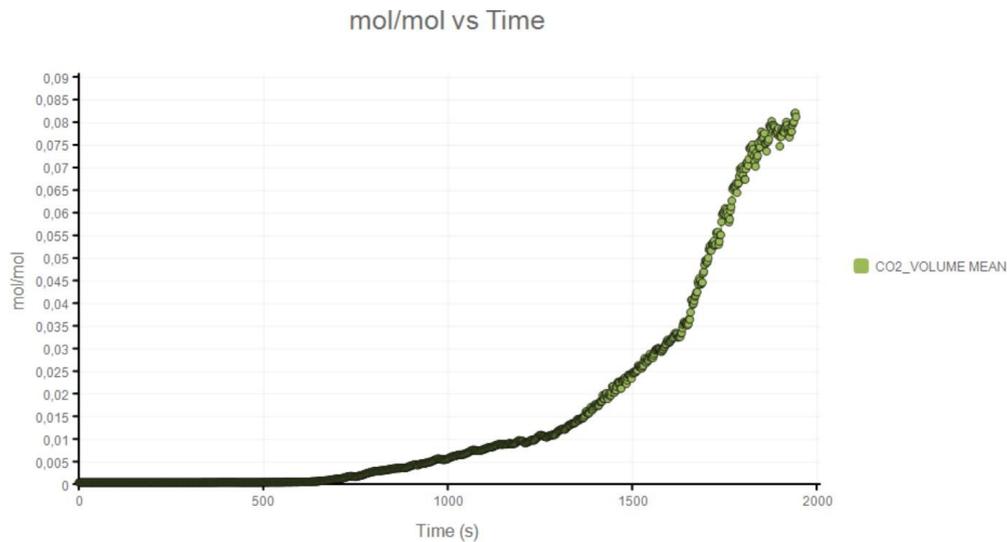


Ilustración 46. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.

Este crecimiento precipitado del incendio también se refleja en la pérdida de los niveles de seguridad de la radiación térmica, Ilustración 47, y de la concentración de CO<sub>2</sub>, Ilustración 48. Se puede comprobar que pasados los 1500 segundos de simulación, tiempo en el que la potencia comienza a aumentar por encima de 8000 kW, la radiación térmica comienza a aumentar drásticamente, al igual que el CO<sub>2</sub>, hasta alcanzar niveles superiores a 10 kW/m<sup>2</sup> y 0,085 mol/mol, que triplican el límite recomendado.



*Ilustración 47. Gráfica temporal de la radiación térmica (kW/m<sup>2</sup>) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.*



*Ilustración 48. Gráfica temporal de la concentración de dióxido de carbono (mol/mol) a una distancia cercana al incendio en el escenario 3.*

En el escenario 4, se utiliza, al igual que en el escenario 2, el combustible GM37. Las consecuencias de utilizar este combustible son las mismas que en el caso 2, con la diferencia de que, al ser además el incendio de crecimiento ultrarrápido, todavía se pierde más la visibilidad, siendo el caso más severo de todos los de 5000 m<sup>2</sup>. En cuanto a la temperatura, no se ve demasiado afectada por el cambio de combustible, y se mantiene con niveles similares a los del escenario 3, perdiéndose las condiciones de seguridad con mayor rapidez al existir un aumento repentino y pronunciado de la potencia del incendio, que es de crecimiento ultrarrápido.

Las Ilustraciones 49 y 50 muestran la visibilidad en un plano de corte horizontal a 2 metros de altura, a los 10 minutos y a los 20 minutos de simulación, respectivamente. Se puede comprobar, como se comentó anteriormente, que la visibilidad es mucho menor que en el resto de escenarios y que, ya durante la evacuación de los ocupantes, no supera el límite de seguridad de los 20 metros de visibilidad en algunas zonas de las vías de evacuación. Con la llegada de los equipos de intervención, la visibilidad se ha perdido totalmente, estando muy por debajo de los 10 metros a 2 metros de altura.

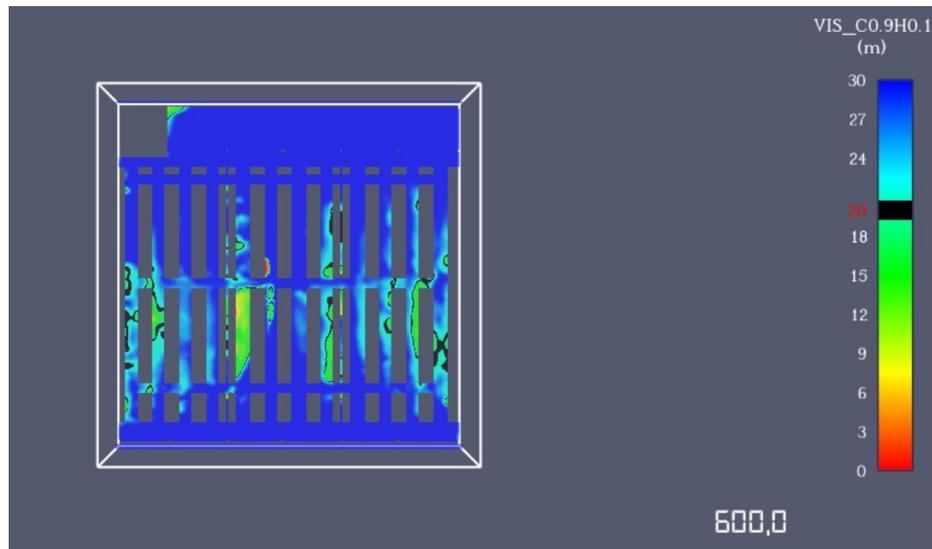


Ilustración 49. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 4 pasados 10 minutos.

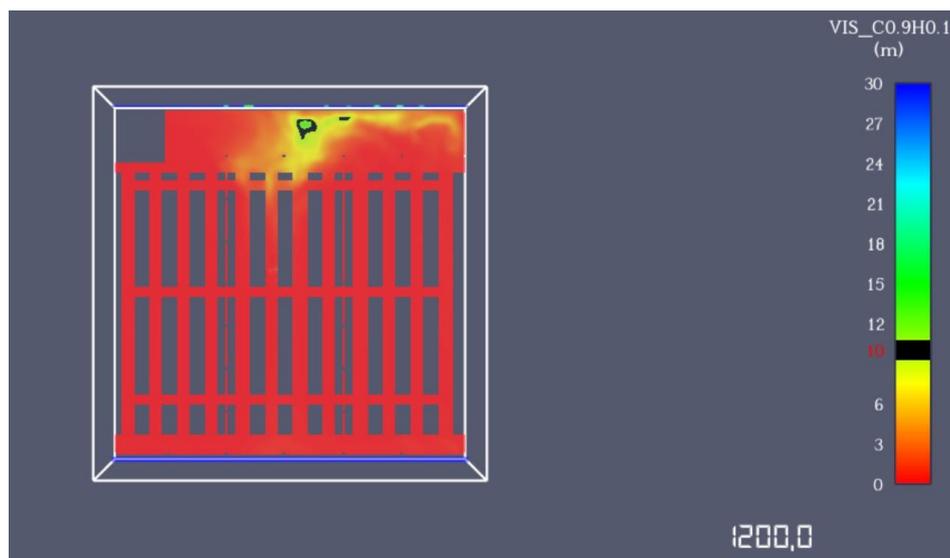


Ilustración 50. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 4 pasados 20 minutos.

Como se comentó anteriormente, la temperatura es muy similar a la del escenario 3, y se puede ver en la Ilustración 51 cómo supera los 100°C en la mayor parte de las vías de acceso pasados 30 minutos. La Ilustración 52 muestra cómo la temperatura, desde una distancia cercana al incendio y desde la cual los bomberos podrían intervenir, comienza a elevarse muy por encima de los 100°C pasados 25 minutos, alcanzando temperaturas de más de 350°C.

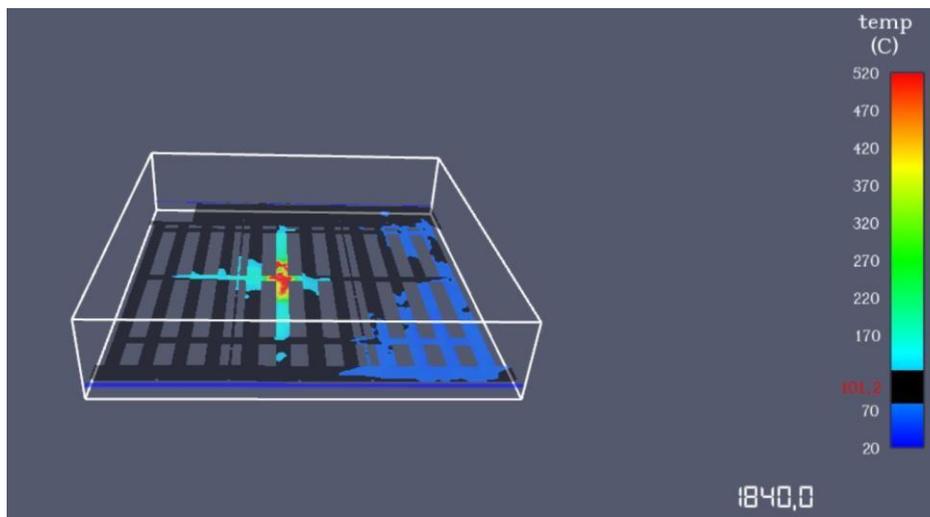


Ilustración 51. Plano de corte de temperatura horizontal en el escenario 4 pasados 30 minutos.

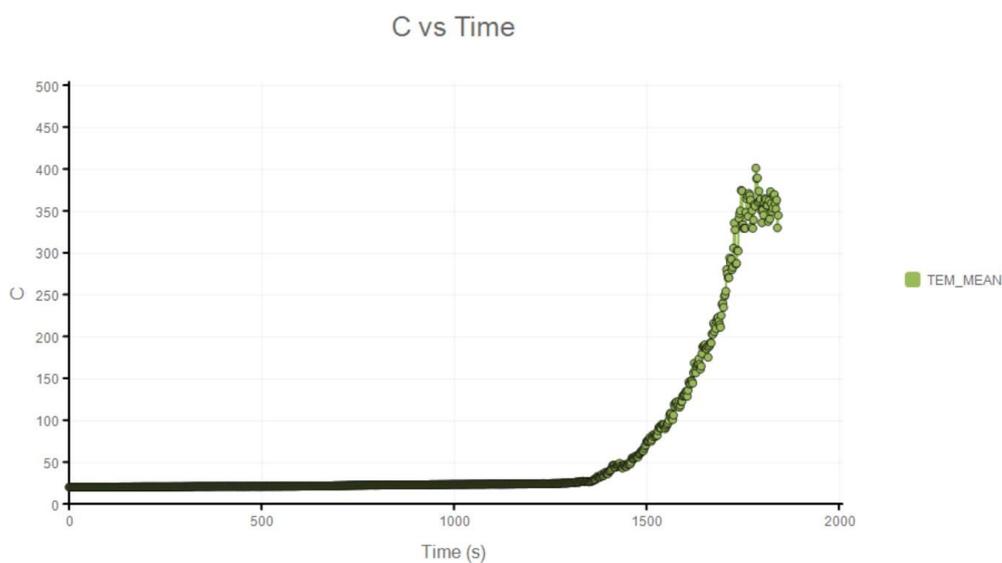
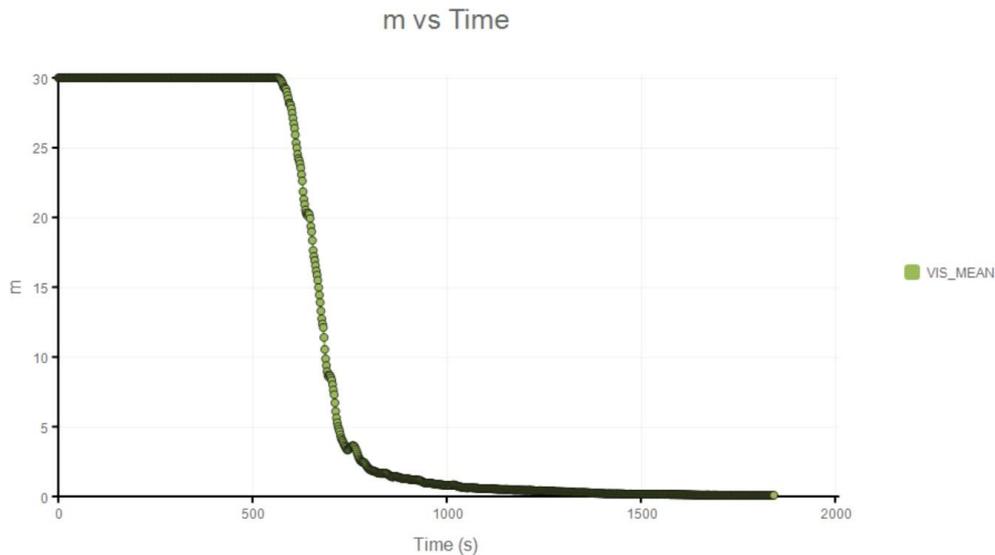


Ilustración 52. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 4.

La Ilustración 53 muestra un promedio de visibilidad a una distancia cercana al incendio y, al compararla con los tres escenarios anteriores, se puede ver que se alcanzan visibilidades inferiores a 5 metros en un tiempo mucho menor que el resto.



*Ilustración 53. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 4.*

Como es de esperar, al ser el caso más severo, tampoco se cumplen las condiciones mínimas de seguridad en cuanto al nivel de radiación térmica y de concentración de dióxido de carbono, que alcanzan valores de  $20 \text{ kW/m}^2$  y  $0,08 \text{ mol/mol}$  a una distancia cercana al incendio, a los 30 minutos de simulación.

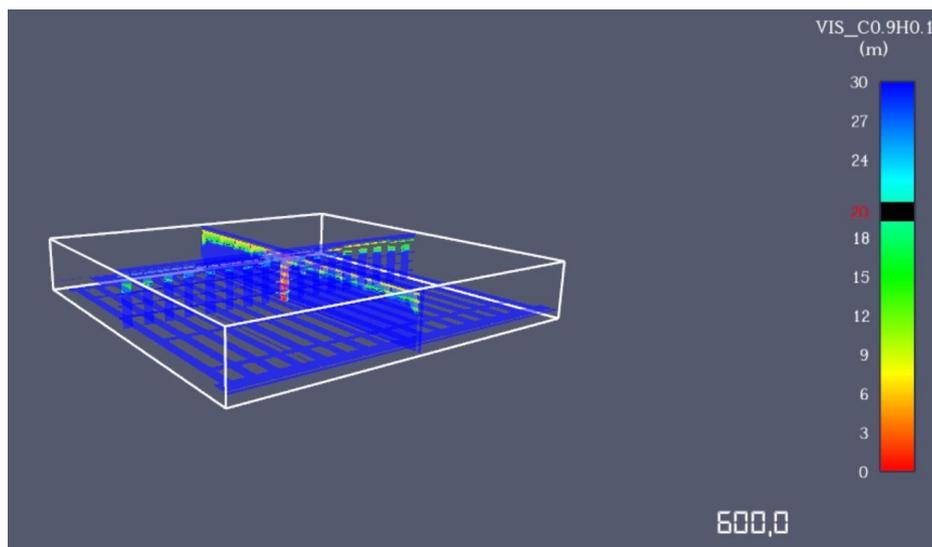
## 4.2 ESCENARIOS MEDIANOS

En este apartado se analizarán los cuatro escenarios, cuyas características se exponen en la Tabla 6, de  $10000 \text{ m}^2$ .

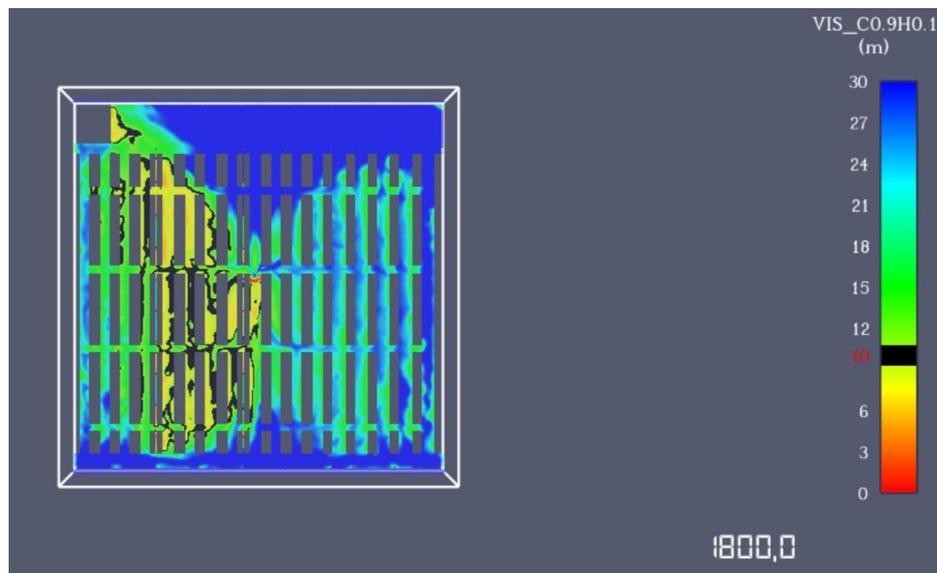
### 4.2.1 Escenarios medianos con velocidad de crecimiento media

En primer lugar, se analizará el escenario 5, cuyas condiciones de simulación son exactamente las mismas que las del escenario 1, excepto por el tamaño de la nave, que es el doble de grande. La curva de la tasa de liberación de calor es exactamente la misma que la del escenario 1, por lo que se esperaría que los resultados fuesen parecidos. Sin embargo, se observa que, generalmente, en el escenario 5 tardan más en perderse las condiciones de seguridad.

La Ilustración 54 muestra los planos de corte de visibilidad verticales, correspondientes a las vías principales de evacuación, y horizontal, correspondiente a una altura de dos metros, pasados 10 minutos desde el inicio del incendio. Se puede observar que existe una visibilidad que supera ampliamente el límite de 20 metros a 2 metros de altura en las vías de evacuación, por lo que los ocupantes podrían evacuar la zona sin correr ningún riesgo. Si se compara la Ilustración 54 con la Ilustración 26, del escenario 1, se comprueba que la visibilidad es levemente mayor en el escenario 5. Esto es debido a que, al tener un mayor tamaño de nave, el humo es capaz de distribuirse mejor por las zonas altas al poseer más espacio, mejorando la visibilidad. Esto mismo ocurre si comparamos la Ilustración 55, correspondiente a la visibilidad transcurridos 30 minutos, con lo que ocurriría en el escenario 1. En el escenario 5, con la llegada de los bomberos a los 20 minutos aproximadamente, la visibilidad no ha disminuido por debajo de los 10 metros a dos metros de altura, de hecho, es cuando se alcanzan los 30 minutos, tiempo para el cual los bomberos ya podrían haber intervenido, cuando se empiezan a perder estas condiciones de visibilidad. Sin embargo, en el escenario 1, a los 20 minutos ya comenzaba a perderse la visibilidad a 10 metros de distancia y, pasados los 25 minutos, quedaba una única entrada con visibilidad suficiente, por lo que se requería una posible activación del sistema de control de humos para conseguir unas condiciones óptimas de intervención.



*Ilustración 54. Planos de corte de visibilidad en el escenario 5 pasados 10 minutos.*



*Ilustración 55. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 5 pasados 30 minutos.*

La Ilustración 56 confirma lo analizado anteriormente. La visibilidad, a una distancia cercana al incendio desde la cual los bomberos podrían intervenir, comienza a perderse a los 1300 segundos, tiempo mucho menor frente a los 1000 segundos del escenario 1. Además, disminuye más lentamente, perdiéndose los 10 metros de visibilidad transcurridos más de 30 minutos.

En cuanto a la temperatura, se puede observar en la Ilustración 57 cómo no se superan en ningún momento los 100°C, alcanzándose a una distancia cercana al incendio una temperatura máxima de 21,8°C durante los 40 minutos de simulación. Estas temperaturas, levemente inferiores a las del escenario 1, no suponen ningún riesgo para la intervención segura de los bomberos.

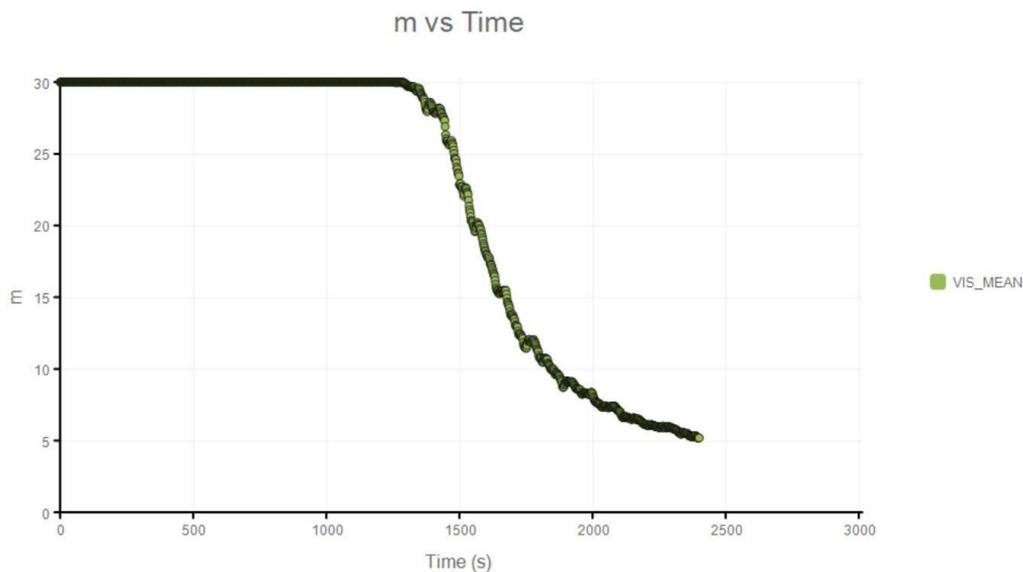


Ilustración 56. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 5.

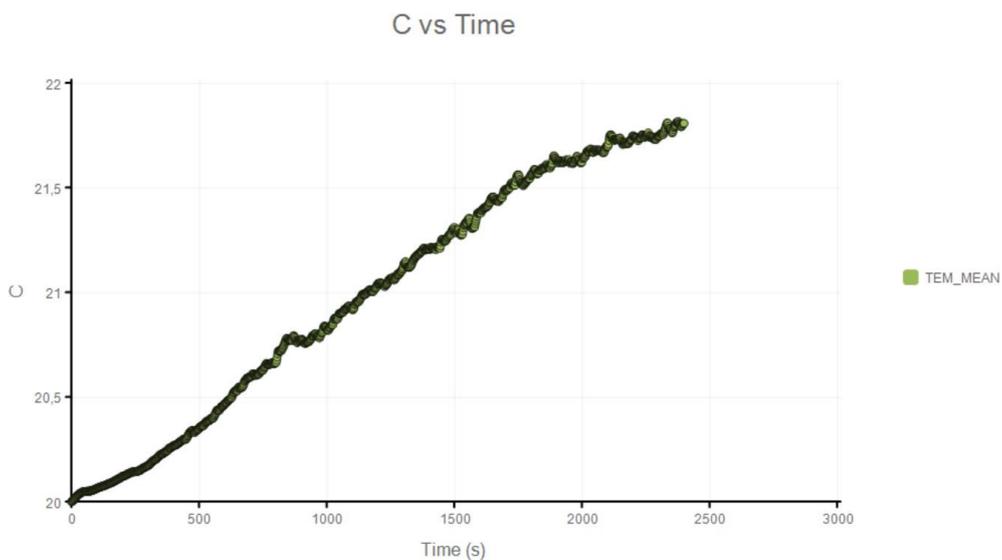
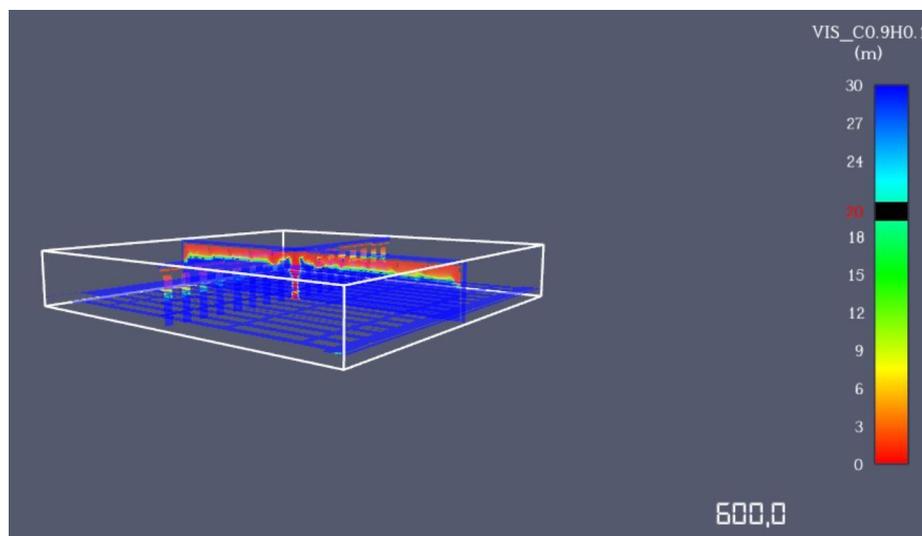


Ilustración 57. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 5.

Por último, según lo previsto, los niveles de radiación térmica y concentración de dióxido de carbono no se acercan en absoluto a los valores críticos, alcanzando un máximo de  $0,76 \text{ kW/m}^2$  y  $0,0046 \text{ mol/mol}$ , respectivamente.

El escenario 6, siguiendo la misma línea de análisis, posee las mismas condiciones que el escenario 2, excepto por el tamaño de la nave, que es mayor. Si se analiza lo ocurrido en las Ilustraciones 58 y 59, se puede comprobar que la visibilidad del escenario 6 es levemente mejor que la del escenario 2, pero peor que la del escenario 5. El hecho de que la visibilidad mejore respecto al escenario 2, de nuevo, se debe al mayor tamaño de la nave, que permite el almacenamiento del humo en su parte superior; sin embargo, la causa de que empeore la visibilidad respecto al escenario 5 es la mayor tasa de hollín de la espuma GM37, utilizada en este caso. La evacuación de los ocupantes puede realizarse de forma segura y, pasados 20 minutos, con la llegada de los equipos de intervención, todavía se mantiene una visibilidad aceptable, superior a 10 metros, en la mayor parte de la nave a 2 metros de altura. Esta visibilidad comienza a perderse en un lateral de la nave, llegándose a las mismas condiciones que en el escenario 2 a los 20 minutos con 10 minutos de diferencia, es decir a los 30 minutos aproximadamente. Esta diferencia de rapidez en la pérdida de la visibilidad también es apreciable si se comparan las Ilustraciones 60 y 38.



*Ilustración 58. Planos de corte de visibilidad en el escenario 6 pasados 10 minutos.*

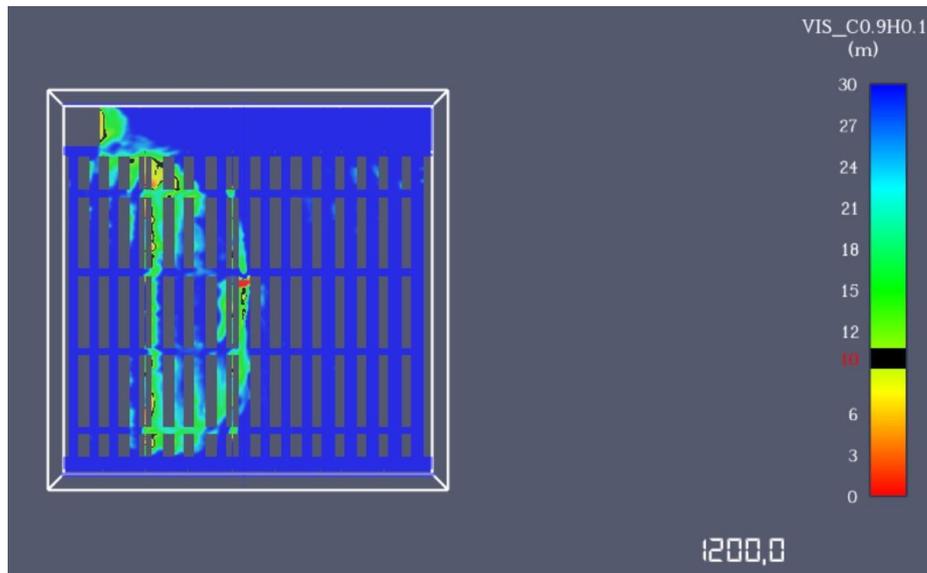


Ilustración 59. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 6 pasados 20 minutos.

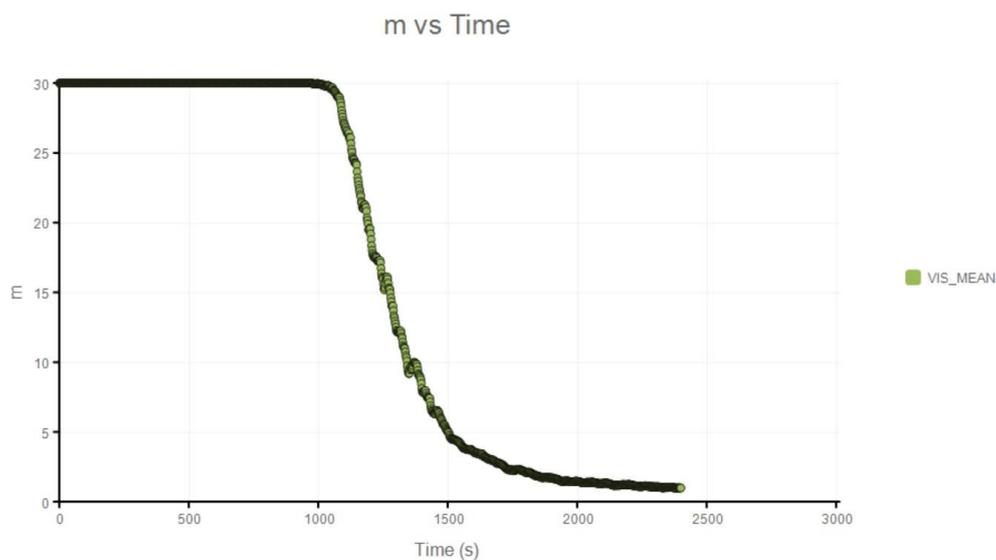
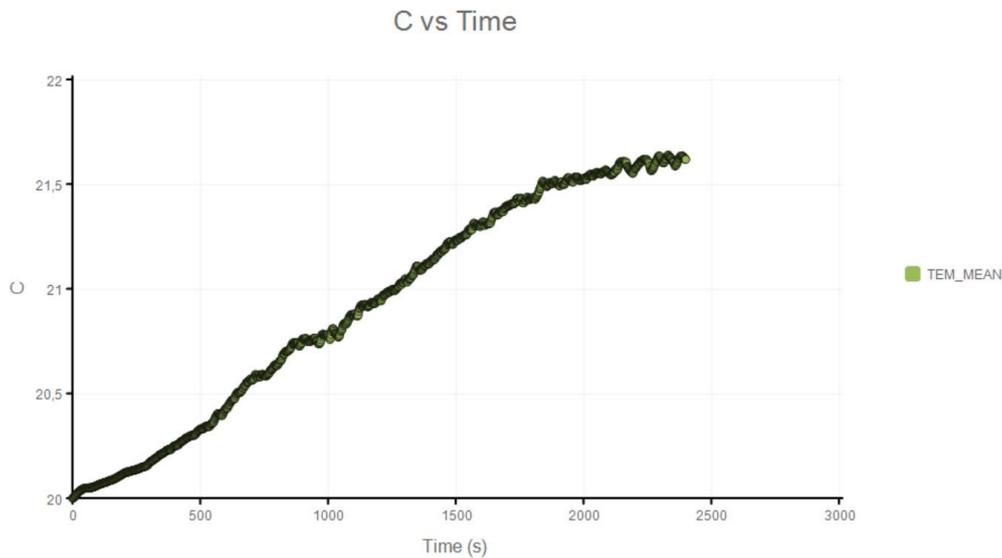


Ilustración 60. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 6.

Respecto a la temperatura, sigue manteniéndose en todo momento muy por debajo de los 100°C, como se puede observar en la Ilustración 61. Es levemente inferior a la del escenario 5, y varios grados inferior a la de los escenarios 1 y 2, por lo que se concluye que una nave más grande hace disminuir también la temperatura en ésta.

Los valores máximos de radiación térmica y concentración de CO<sub>2</sub> son de 0,7 kW/m<sup>2</sup> y 0,004 mol/mol, los más bajos de todos los escenarios analizados hasta el momento.



*Ilustración 61. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 6.*

#### 4.2.2 Escenarios medianos con velocidad de crecimiento ultrarrápida

La Ilustración 62 muestra la tasa de liberación de calor del incendio del escenario 7, de velocidad ultrarrápida y combustible madera red oak. A diferencia del escenario 3, no parece haber un aumento repentino de la potencia, que se mantiene alrededor de los 8000 kW.

Si se evalúa la visibilidad, puede concluirse que durante los primeros 10 minutos de evacuación, los valores de visibilidad son altos y superiores a 20 metros en todas las vías de evacuación a 2 metros de altura, como se muestra en la Ilustración 63. Sin embargo, estos valores de visibilidad son inferiores a los del escenario 5, que posee las mismas condiciones salvo por la velocidad de crecimiento del incendio. Lo mismo ocurre si se comparan las Ilustraciones 64 y 55, ambas correspondientes a la visibilidad a 2 metros de altura transcurridos 30 minutos. En la Ilustración 55, correspondiente al escenario 5, apenas comenzaban a perderse los 10 metros de visibilidad en algunas zonas, mientras

que en la Ilustración 64, escenario 7, la visibilidad se ha perdido por completo excepcionando la entrada de la vía de acceso izquierda. Esto requiere que, con la llegada de los bomberos, pueda ser necesaria la activación de los sistemas de control de humos para aumentar dicha visibilidad y poder intervenir con seguridad.

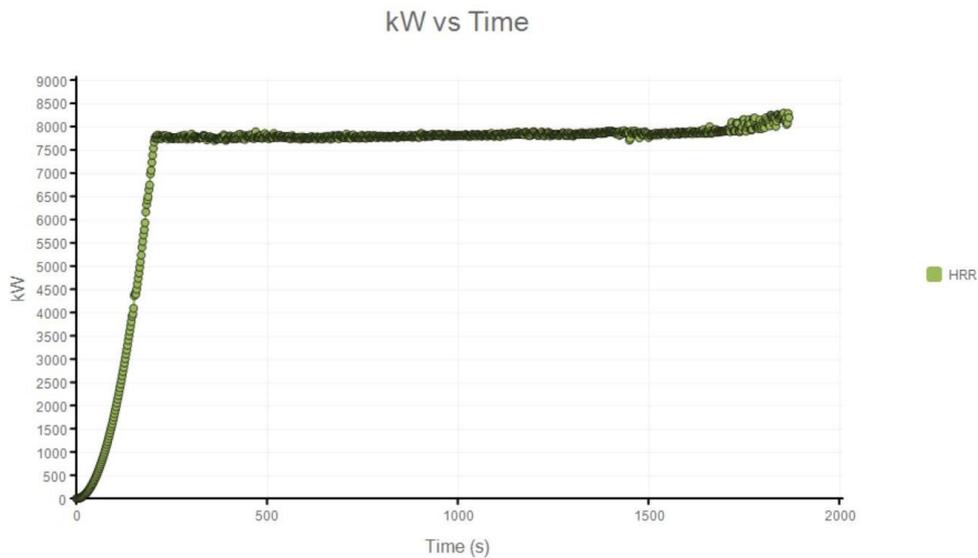


Ilustración 62. Gráfica temporal de la potencia del incendio en el escenario 7.

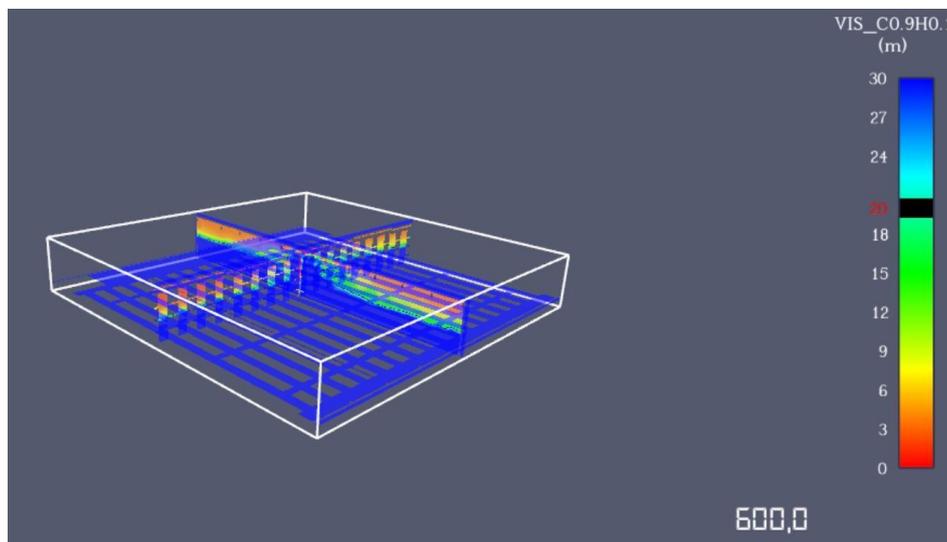
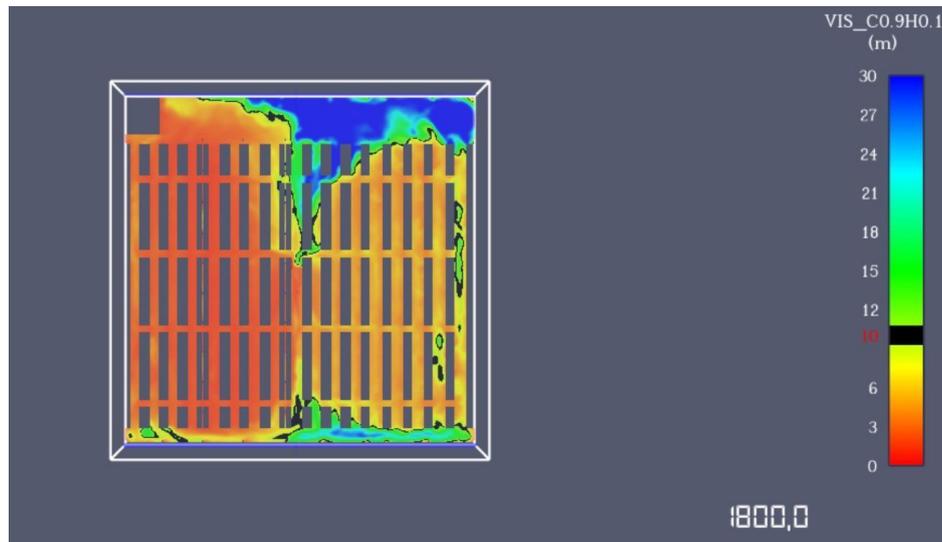


Ilustración 63. Planos de corte de visibilidad en el escenario 7 pasados 10 minutos.



*Ilustración 64. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 7 pasados 30 minutos.*

La Ilustración 65 resume lo analizado anteriormente. A diferencia del escenario 5, la visibilidad comienza a perderse un poco antes de alcanzar los 1000 segundos, mientras que en el escenario 5 es a los 1300 aproximadamente. Si comparamos el escenario 7 con su equivalente de 5000 m<sup>2</sup>, es decir, de la mitad de tamaño, se puede comprobar que el menor tamaño del escenario 3 de nuevo dificulta el almacenamiento del humo, empeorando la visibilidad, por lo que las condiciones de visibilidad del escenario 7 son mejores.

Respecto a la temperatura, se puede ver en la Ilustración 66 que, respecto al escenario 5, ésta crece levemente más rápido, alcanzando temperaturas un poco mayores pero siempre en un rango seguro, muy lejos de los 100°C. Esta es una de las diferencias más notables respecto al escenario 3 que, aun siendo todas sus condiciones iguales a las del escenario 7 exceptuando el tamaño de la nave, las temperaturas alcanzadas por éste son mucho mayores, llegando a los 350°C, debido a los aumentos de presión comentados anteriormente.

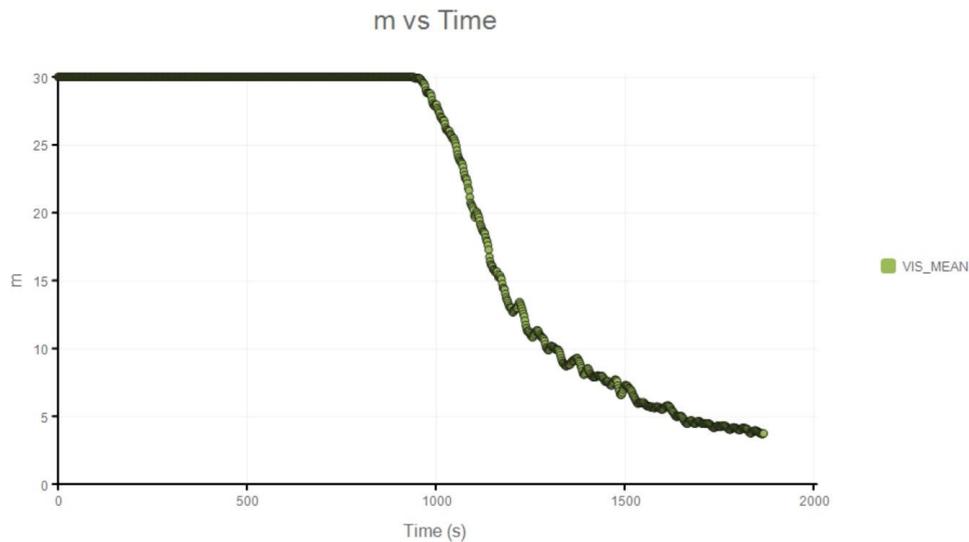


Ilustración 65. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 7.

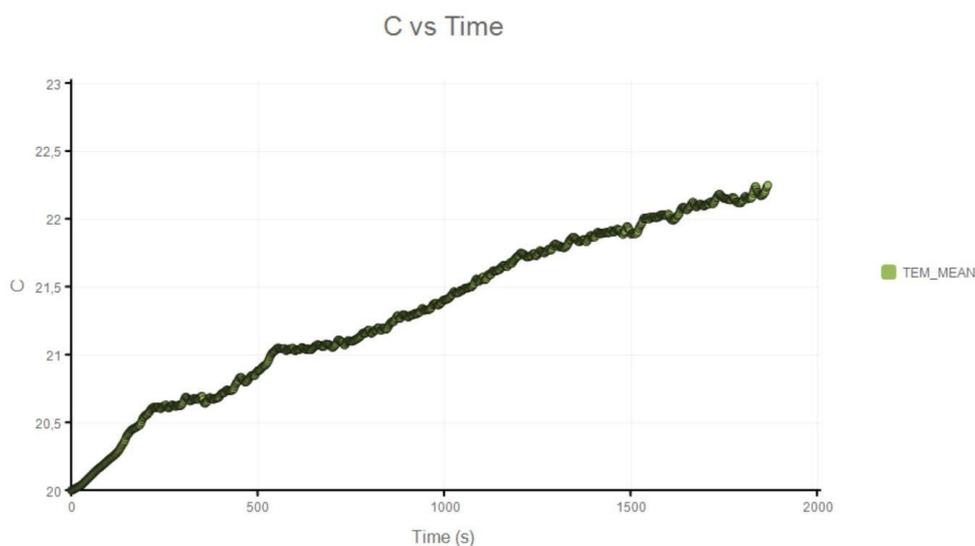


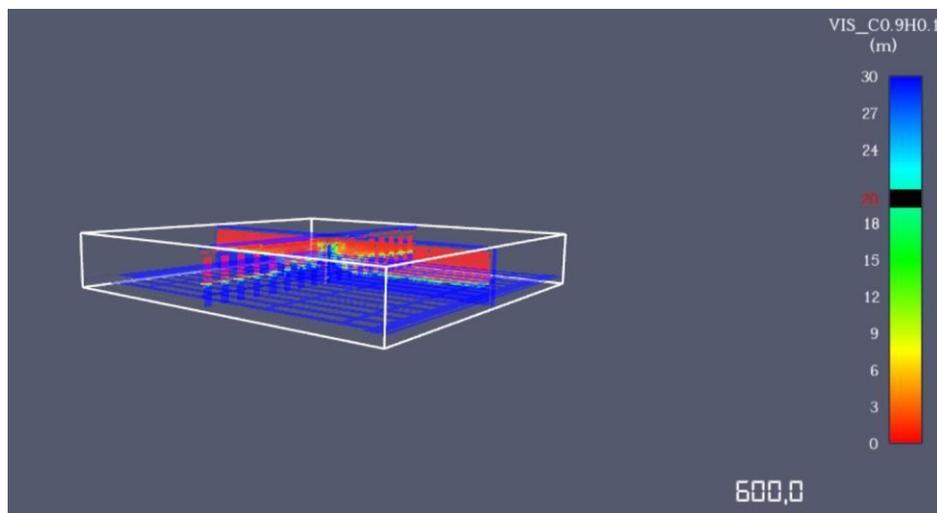
Ilustración 66. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 7.

Los valores de radiación térmica alcanzan máximos de  $1 \text{ kW/m}^2$  aproximadamente y los de dióxido de carbono de  $0,0065 \text{ mol/mol}$ , lo que no supone una amenaza para las condiciones de seguridad.

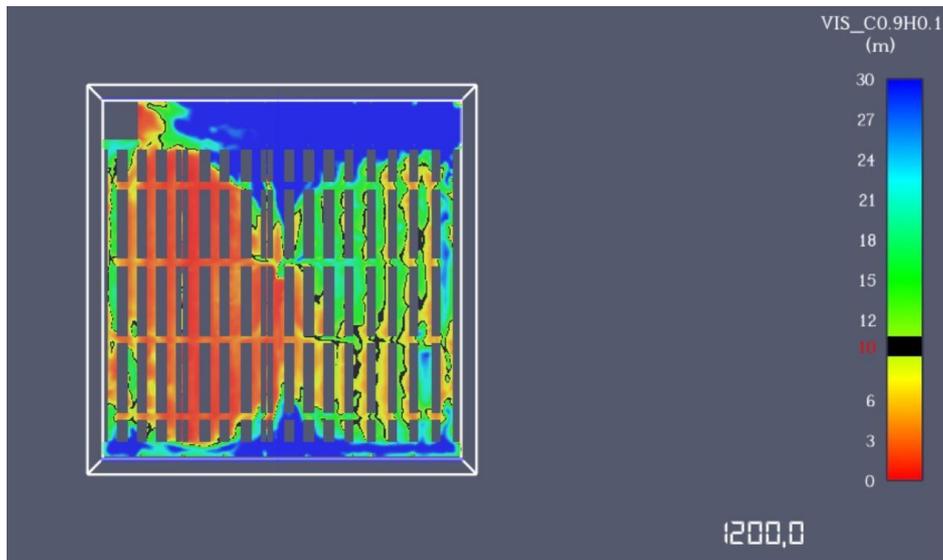
El escenario 8, como es de esperar, al igual que en el caso de los escenarios pequeños, es el que más riesgos presenta dentro de los escenarios medianos, al tener una mayor tasa de

hollín por el combustible GM37, que disminuye la visibilidad, y poseer un incendio de crecimiento ultrarrápido, lo que provoca que las condiciones tanto de visibilidad como de temperatura se pierdan con más rapidez.

La visibilidad se puede observar en las Ilustraciones 67 y 68. Pasados 10 minutos, la visibilidad se mantiene por encima de los 20 metros a 2 metros de altura; sin embargo, pasados 20 minutos, con la llegada de los equipos de intervención, la visibilidad disminuye por debajo de 10 metros de distancia en la mayor parte del recorrido de intervención, por lo que puede ser necesaria la activación del sistema de control de humos.

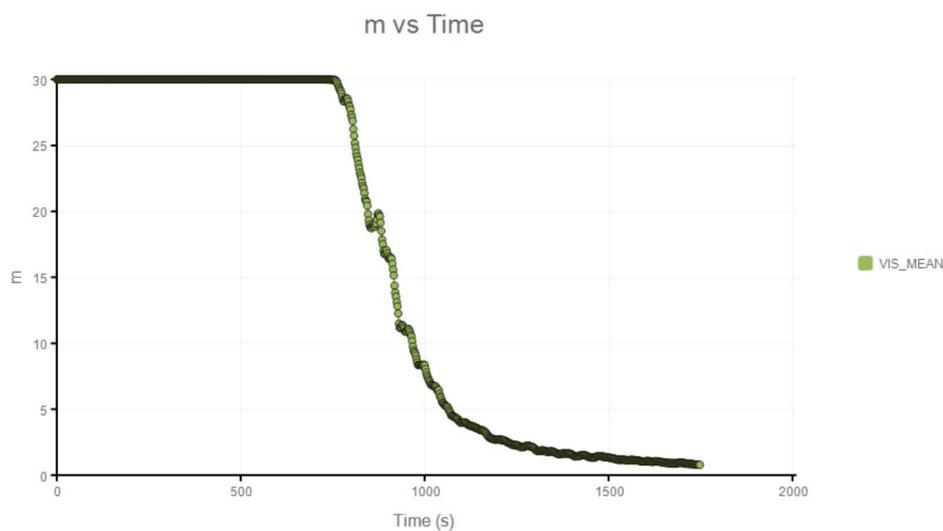


*Ilustración 67. Planos de corte de visibilidad en el escenario 8 pasados 10 minutos.*

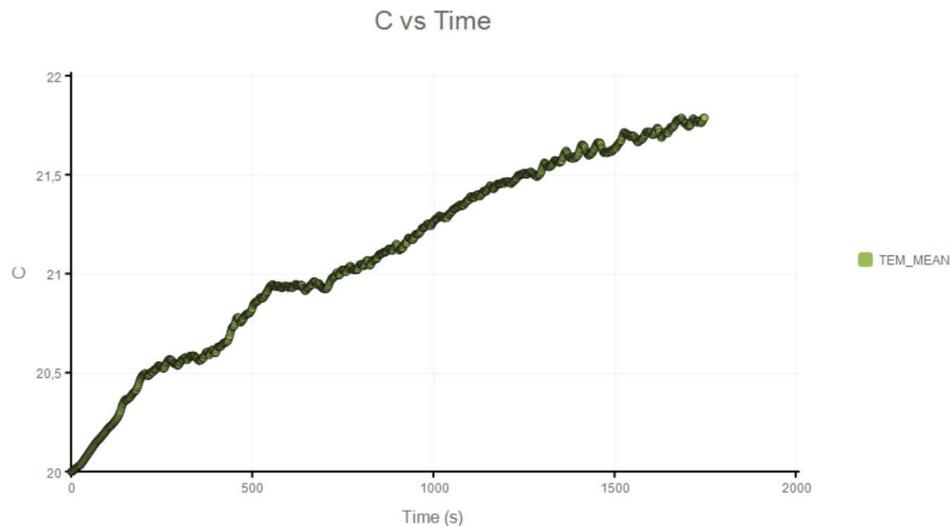


*Ilustración 68. Plano de corte de visibilidad horizontal en el escenario 8 pasados 20 minutos.*

Las Ilustraciones 69 y 70 muestran los promedios de visibilidad y temperatura a una distancia cercana al foco del incendio, respectivamente. Se ve que la visibilidad disminuye antes y con mayor rapidez que en el resto de escenarios medianos, así como la temperatura se mantiene con niveles levemente mayores, estando aún muy alejados del límite de seguridad.



*Ilustración 69. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 8.*



*Ilustración 70. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 8.*

Para terminar, los niveles de radiación térmica y CO<sub>2</sub> se mantienen muy por debajo de los límites de seguridad, alcanzando 0,91 kW/m<sup>2</sup> y 0,005 mol/mol.

## 4.3 ESCENARIOS GRANDES

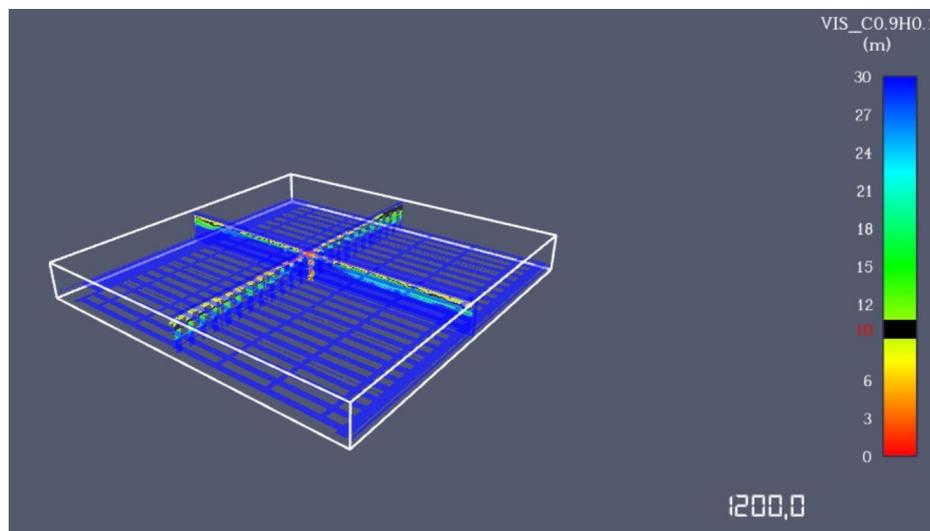
En este apartado se analizarán los escenarios de 20000 m<sup>2</sup>, cuyas características se exponen en la Tabla 6.

### 4.3.1 Escenarios grandes con velocidad de crecimiento media

Es predecible que el escenario 9 se trate del escenario con las condiciones más favorables para la evacuación e intervención. Esto es debido a que es el escenario más grande, por lo que permite una mejor distribución de los humos y de la temperatura; el combustible utilizado es la madera, que posee menor tasa de hollín, y la velocidad de crecimiento es media, por lo que el incendio crece más lentamente.

En las Ilustraciones 71 y 72 se muestran las condiciones de visibilidad que demuestran lo expuesto en el párrafo anterior. Pasados 20 minutos, con la llegada de los equipos de

intervención, todavía se mantiene una visibilidad máxima a 2 metros de altura, y ésta nunca es inferior a los 10 metros límite durante los primeros 30 minutos. Además, la visibilidad en un punto cercano al foco del incendio desde donde los bomberos podrían intervenir es máxima hasta transcurridos al menos 25 minutos. Si se añade al análisis la Ilustración 73, se confirma que no se superan los límites de seguridad para ninguno de los parámetros del incendio. Cabe destacar que los niveles de radiación térmica y dióxido de carbono se mantienen por debajo de los límites, con valores máximos de  $1,6 \text{ kW/m}^2$  y  $0,0006 \text{ mol/mol}$ .



*Ilustración 71. Planos de corte de visibilidad en el escenario 9 pasados 20 minutos.*

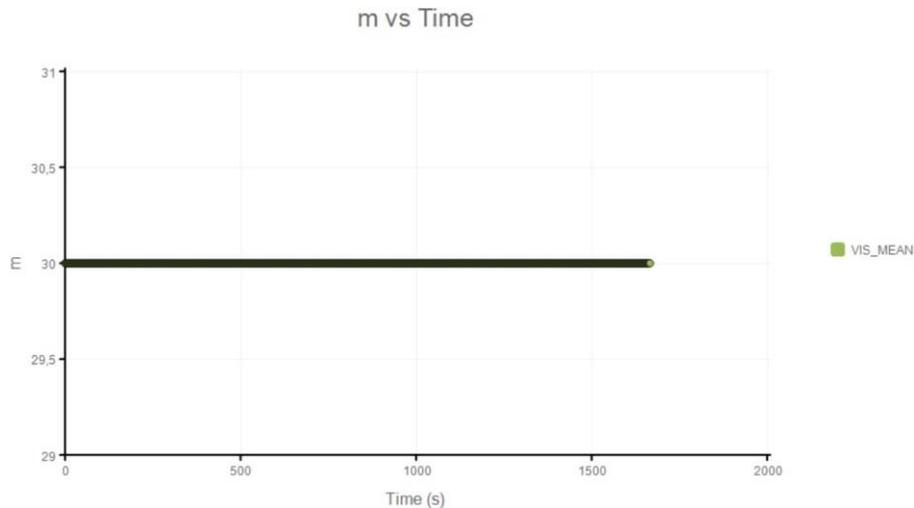


Ilustración 72. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 9.

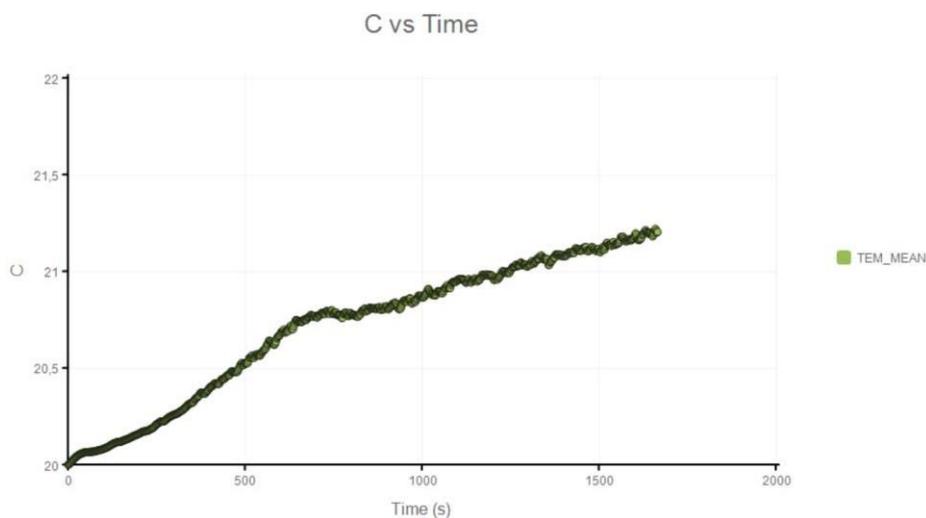
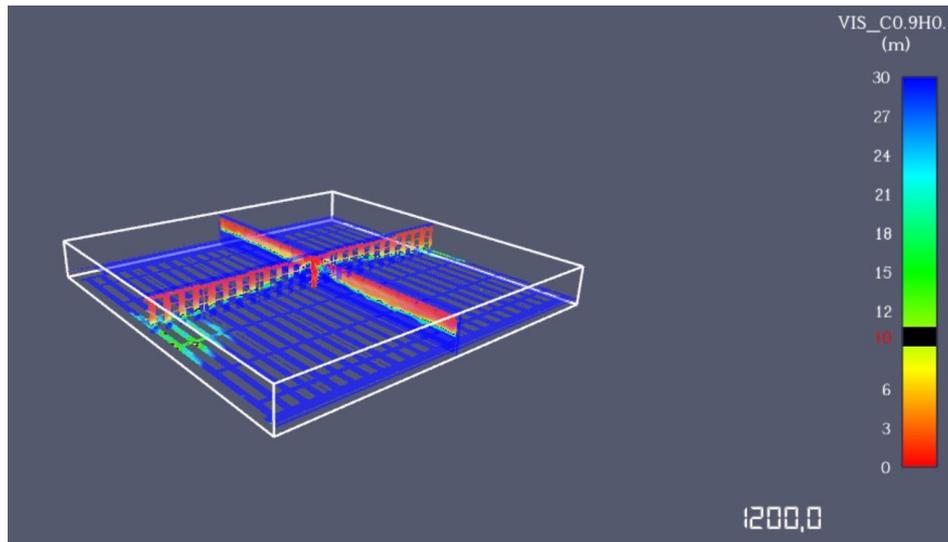


Ilustración 73. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 9.

El escenario 10 tiene unas condiciones muy similares a las del 9, con la diferencia de que las condiciones de visibilidad se pierden antes debido a la utilización de la espuma de poliuretano GM37, que posee una mayor tasa de hollín. La Ilustración 74 muestra la visibilidad en la nave transcurridos 20 minutos de simulación, lo que coincide con la llegada de los bomberos. Se observa que la visibilidad apenas disminuye por debajo de

los 10 metros de distancia a 2 metros de altura, por lo que la intervención se haría en perfectas condiciones de seguridad. Cuando se alcanzan los 30 minutos de simulación aproximadamente, se pierde la visibilidad completa en la nave, por lo que puede ser necesaria la activación del control de humos.



*Ilustración 74. Planos de corte de visibilidad en el escenario 10 pasados 20 minutos.*

En la Ilustración 75 se comprueba que a una distancia cercana al foco del incendio, se mantiene una visibilidad máxima pasados los 25 primeros minutos, condiciones favorables para una intervención segura.

Por último, cabe destacar que la temperatura en todo momento se mantiene muy por debajo del límite de 100°C, siendo ésta levemente menor a la del escenario 9, como en todos los casos con espuma GM37 frente a madera red oak. Además, los niveles de radiación térmica también son levemente inferiores al caso 9, con valores máximos de 1,4 kW/m<sup>2</sup> y 0,0005 mol/mol.

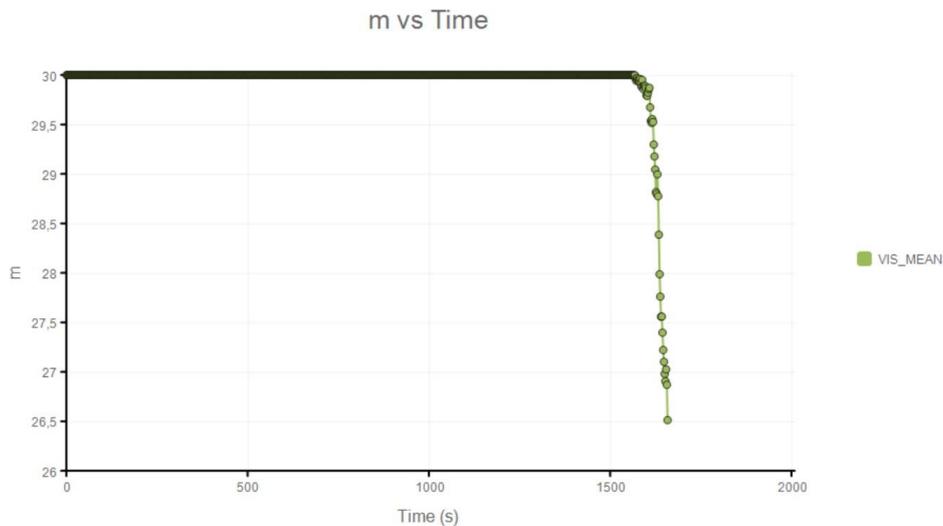


Ilustración 75. Gráfica temporal de la visibilidad (m) a una distancia cercana al incendio en el escenario 10.

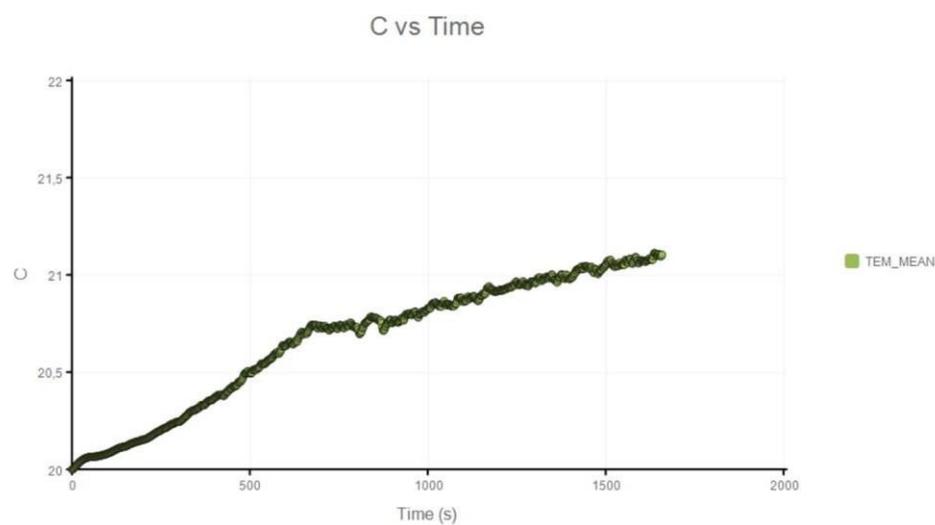


Ilustración 76. Gráfica temporal de la temperatura (C) a una distancia cercana al incendio en el escenario 10.

### 4.3.2 Escenarios grandes con velocidad de crecimiento ultrarrápida

Los escenarios 11 y 12 se caracterizan por tener un incendio de velocidad ultrarrápida, con la diferencia de que el escenario 11 posee como combustible la madera red oak, con menor tasa de hollín, y el escenario 12 posee la espuma de poliuretano GM37, que provocará que la visibilidad se reduzca en mayor medida. Las Ilustraciones 77 y 78 muestran las visibilidades de los escenarios 11 y del 12, respectivamente, al transcurrir

800 segundos de simulación. Se puede apreciar cómo en el caso 12 la visibilidad es menor, debido a lo comentado anteriormente. Si comparamos ambos escenarios con el resto de escenarios grandes, éstos disminuyen su visibilidad, incluso en el caso del incendio ultrarrápido con combustible madera, cuya visibilidad es menor a la del incendio de velocidad media con combustible GM37. Esto indica que el hecho de que el incendio sea ultrarrápido hace disminuir más la visibilidad que la tasa de hollín.

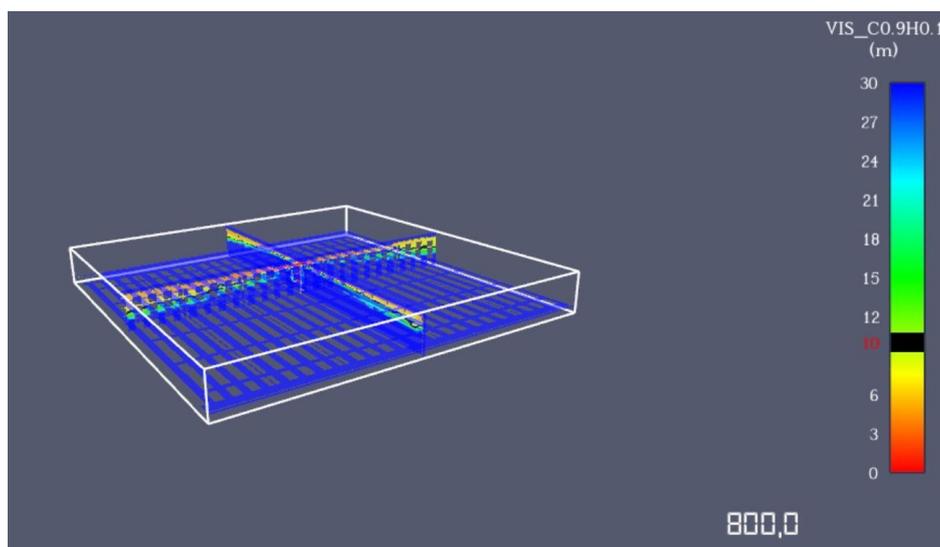


Ilustración 77. Planos de corte de visibilidad en el escenario 11 pasados 13 minutos.

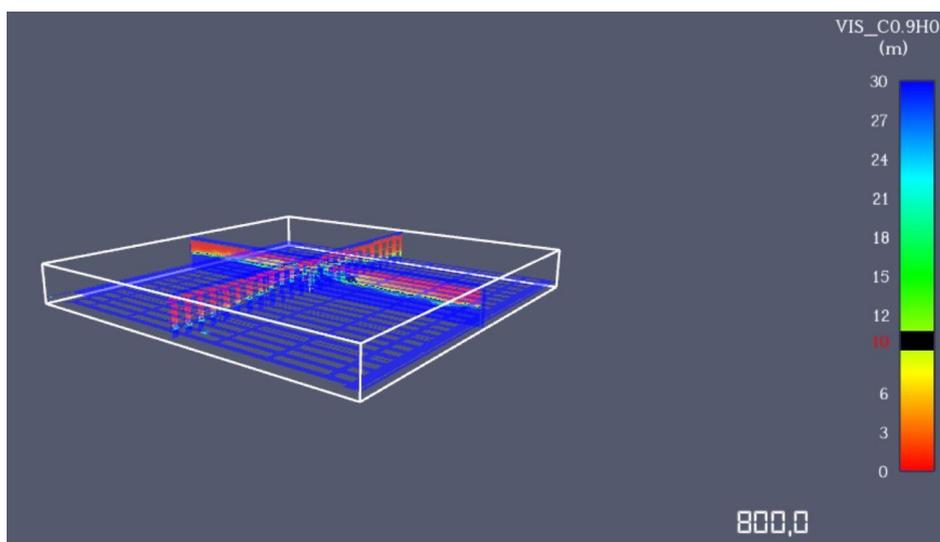


Ilustración 78. Planos de corte de visibilidad en el escenario 12 pasados 13 minutos.

Con la llegada de los equipos de intervención, en el escenario 11 apenas se habrá reducido la visibilidad por debajo de los 10 metros a 2 metros de altura, por lo que se podrá actuar con seguridad. En el caso del escenario 12, podrá requerirse de la activación del sistema de control de humos para aumentar la visibilidad, que es levemente peor que en el caso 11. En cuanto a la temperatura, radiación y niveles de CO<sub>2</sub>, en todos los escenarios se mantendrán por debajo de los límites de seguridad.

## 5 CONCLUSIONES

Una vez analizados todos los escenarios, se ha elaborado como resumen una tabla de clasificación de éstos. La Tabla 15 ordena los escenarios por orden de seguridad, de más a menos seguro, teniendo en cuenta sus condiciones de visibilidad, temperatura, radiación térmica y nivel de CO<sub>2</sub>, analizadas en el apartado anterior. Además, cada escenario se ha clasificado, para tres ventanas temporales, en un nivel de aptitud. Para la primera ventana temporal, que representa los 10 primeros minutos de simulación, tiempo de evacuación de los ocupantes, existen tres posibles clasificaciones: *sí*, que indica que el escenario es totalmente seguro para la evacuación; *+ 1 salida*, que indica que para poder evacuar de forma segura debe existir más de una salida, por el humo que pueda haber bloqueado parte de la nave; y *no*, que indica que el escenario no cumple todos o ningún requisito de seguridad. Para la segunda ventana temporal, correspondiente a la llegada de los bomberos, se ha realizado la misma clasificación, excepto que se ha incluido una columna más, de activación del control de humos, que representa la posibilidad de que se active el sistema para mejorar las condiciones de seguridad. Por último, la última ventana temporal corresponde al tiempo de actuación de los bomberos en el foco del incendio, con la misma clasificación y asumiéndose que, a medida que los bomberos intervienen, el incendio se va controlando, tanto por ellos como gracias a la actuación de los rociadores automáticos. Cabe destacar que los últimos 10 minutos de simulación, que completarían los 40 minutos, no se han incluido en esta tabla debido a que, por exceder el tiempo límite del servidor, no se han podido alcanzar los 40 minutos completos en todas las simulaciones. Sin embargo, se ha estimado a partir de la información y el tiempo que se posee lo que ocurriría y, con gran probabilidad, las condiciones del incendio durante la intervención de los bomberos se mantendrían controladas no solo por el equipo de intervención, sino también gracias a los rociadores automáticos.

Clasificación	0 - 600 s			600 - 1200 s				1200 - 1800 s			
	Sí	+ 1 salida	No	Sí	C.H.	+ 1 salida	No	Sí	C.H.	+ 1 salida	No
Escenario 9	x			x				x			
Escenario 10	x			x					x		
Escenario 5	x			x					x		
Escenario 11	x			x					x	x	
Escenario 12	x				x				x	x	
Escenario 6	x				x				x	x	
Escenario 7	x				x				x	x	
Escenario 1	x				x						x
Escenario 8	x				x	x					x
Escenario 2	x				x	x					x
Escenario 3	x				x	x					x
Escenario 4		x					x				x

Tabla 15. Clasificación final de escenarios.

Observando los resultados de la clasificación de la Tabla 15, se concluye que los escenarios más inseguros, por lo general, son aquellos de dimensiones menores, ya que, exceptuando el escenario 8, los únicos escenarios considerados no aptos para la seguridad en alguna ventana temporal son el 1, 2, 3 y 4. Es lógico que el escenario 8 tampoco se considere apto, ya que posee un incendio de carácter ultrarrápido y con combustible con alta tasa de hollín, ambos agravantes de las condiciones de visibilidad. Los escenarios de tamaño medio se localizan en la parte intermedia de la tabla, siendo el mejor de éstos el escenario 5, al ser de crecimiento medio y poseer un combustible con menor tasa de hollín. Lo mismo ocurre con los escenarios grandes, que aparecen en su mayoría en la parte superior de la tabla, siendo el primero el escenario 9, de nuevo de crecimiento medio y baja tasa de hollín.

En conclusión, el mayor tamaño de la nave es determinante en la seguridad de ésta, debido a que poseerá mayor capacidad de almacenamiento del humo en su parte superior, aumentando el tiempo que éste tarde en obstaculizar las vías de intervención y evacuación. Además, como se ha podido comprobar en los análisis realizados en el apartado 5, también son los escenarios de mayor tamaño los que poseen temperaturas más bajas, por lo que resultan los más seguros en ambos aspectos. Cabe destacar, como un punto en contra a los tamaños grandes de nave, que éstos poseerán mayor capacidad de almacenaje, por lo que el incendio podrá expandirse y afectar a una mayor cantidad de productos. Sin embargo, al ser los tiempos de evacuación e intervención los mismos para

una nave pequeña y una grande, la de mayor volumen será más segura independientemente de lo anterior, ya que mantendrán las condiciones de seguridad un tiempo mayor que las de menor tamaño.

Por último, teniendo en cuenta todo lo expuesto, se ha elaborado una segunda tabla, Tabla 16, que contiene unas recomendaciones de distancias de recorridos de evacuación e intervención, según si en la nave existen sistemas de evacuación de humos o más de una salida, ninguno de los dos, o ambos, teniendo además en cuenta la velocidad ultrarrápida o media del incendio, así como la tasa de hollín del combustible. Los rangos de distancias representan desde la distancia más corta hasta la más larga que se puede recorrer desde una salida de emergencia en la nave hasta el foco del incendio, y corresponden a las expuestas en la Tabla 6 para naves de tamaño pequeño, mediano o grande.

	<b>+ 1 salida</b>	<b>1 salida</b>
<b>Con control de humos</b>	de 50 m a 71 m (*)	de 71 m a 100 m (**)
<b>Sin control de humos</b>	de 71 m a 100 m (***)	de 71 m a 100 m (***)

*Tabla 16. Distancias recomendadas de los recorridos de evacuación e intervención.*

(\*) Si el incendio es ultrarrápido y a la vez posee alta tasa de hollín, se ampliará a 71-100 m.

(\*\*) Si el incendio es ultrarrápido, se ampliará a más de 100 m.

(\*\*\*) Si el incendio es ultrarrápido o posee alta tasa de hollín, se ampliará a más de 100 m.

Como se puede observar en la Tabla 16 y en las notas al pie, en el caso de que la nave posea un sistema de control de humos y más de una salida, podrá ser de tamaño mediano, a excepción de que los productos que almacene puedan ocasionar incendios ultrarrápidos y de alta tasa de hollín, caso en el que deberá ser de tamaño grande. En el resto de los casos, la nave deberá ser al menos de tamaño grande, y deberá sobredimensionarse en los casos descritos a pie de tabla.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Castelda, A. (17 de Abril, 2020). How warehousing has evolved over the years. *Global Trade*. <https://www.globaltrademag.com/how-warehousing-has-evolved-over-the-years/>
- [2] Bernardos Domínguez, G. (Abril, 2007). La evolución del mercado de naves industriales (I). *Directivos Construcción*, nº 199, pág. 47. <https://gonzalobernados.es/wp-content/uploads/2020/08/La-evoluci%C3%B3n-del-mercado-de-naves-industriales.pdf>
- [3] Medina, R. (5 de Abril, 2021). El auge del ecommerce dispara la demanda de naves logísticas. *IElektro*. <https://ielektro.es/2021/04/05/el-auge-del-e-commerce-dispara-la-demanda-de-naves-logisticas/>
- [4] Mancilla, S. (15 de Julio, 2022). *Las naves industriales y sus nuevas tendencias*. Brickbro. <https://blog.brickbro.com/las-naves-industriales-y-sus-nuevas-tendencias/>
- [5] (n.d.). *Construcción de naves industriales*. Involucra S.L. <https://www.involucrasl.es/construccion-de-naves-industriales/>
- [6] (n.d.). *Tipos de estructuras en naves industriales: características, ventajas y particularidades*. ASPOR Engineering. <https://aspor.es/tipos-de-estructuras-en-naves-industriales-caracteristicas-ventajas-y-particularidades/>
- [7] Masachs, P. (15 de Octubre, 2020). *Tipos de naves industriales según la estructura y la facilidad de propagación de incendios*. Masachs. <https://masachs.com/tipos-de-naves-industriales-segun-la-estructura-y-la-facilidad-de-propagacion-de-incendios>
- [8] Mishall, J. (28 de Julio, 2022). Storage trends and new technology ignite fire risks for commercial warehouses. *Zurich*. <https://www.zurichna.com/knowledge/articles/2022/07/storage-trends-and-new-technology-ignite-fire-risks-for-commercial-warehouses>

- [9] (18 de Marzo, 2021). *Sistemas de protección contra incendios en naves industriales*. Firext. <https://www.firext.es/proteccion-contra-incendios-naves-industriales/>
- [10] (20 de Enero, 2022). *Sistemas de protección contra incendios en naves industriales*. Tusocal. <https://www.tusocal.com/blog/proteccion-contra-incendios-naves-industriales/>
- [11] O'Connor, B. (5 de Febrero, 2021). *Smoke control systems*. NFPA. <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Blogs-Landing-Page/NFPA-Today/Blog-Posts/2021/02/05/Smoke-Control-Systems?icid=W483>
- [12] (n.d.). *Sistemas de rociadores automáticos*. Cottes. <https://www.cottesgroup.com/proteccion-contra-incendios/sistemas-rociadores-automaticos>
- [13] O'Connor, B. (12 de Noviembre, 2021). *Unique Fire Protection Challenges Found in Warehouse/Distribution Centers*. NFPA. <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Blogs-Landing-Page/NFPA-Today/Blog-Posts/2021/11/12/Unique-Fire-Protection-Challenges-Found-in-Warehouse-Distribution-Centers>
- [14] (n.d.). *¿Qué son y qué elementos componen una Boca de Incendio Equipada?* Semamcoin: protección contra incendios. <http://semamcoin.com/bocas-de-incendio-equipadas-bies-bie/>
- [15] (2 de Junio, 2021). *Fire Dynamics*. NIST. <https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/firegov-fire-service/fire-dynamics>
- [16] (n.d.). *Reporter's Guide: All about fire*. NFPA. <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Press-Room/Reporters-Guide-to-Fire-and-NFPA/All-about-fire>
- [17] Dickinson, M. (10 de Junio, 2021). *What Are the 5 Different Classes of Fires?* Vanguard. <https://vanguard-fire.com/what-are-the-5-different-classes-of-fires/>

- [18] (n.d.). *Common causes of warehouse fires*. Marlowe Fire & Security.  
<https://marlowefireandsecurity.com/solutions/compliance/the-most-common-causes-of-warehouse-fires/>
- [19] (23 de Febrero, 2021). *Así son los nuevos espacios industriales para e-retail y uso logístico*. Frontier Industrial. <https://blog.frontierindustrial.mx/naves-industriales-uso-logistico-ecommerce>
- [20] Campbell, R. (Marzo, 2022). *Fires in Industrial and Manufacturing Properties*. NFPA. <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/osIndustrial.pdf>
- [21] (20 de Julio, 2022). *El primer semestre de 2022\* se salda con graves incendios en la industria: Algunos datos y legislación vigente*. Tecnofuego.  
<https://www.tecnofuego.org/comunicacion/el-primer-semester-de-2022-se-salda-con-graves-incendios-en-la-industria-algunos-datos>
- [22] (27 de Agosto, 2016). *Aumenta en un 6% el balance de incendios en industrias en España con respecto al anterior periodo*. *Interempresas*.  
<https://www.interempresas.net/Seguridad/Articulos/160431-Aumenta-6-por-ciento-balance-incendios-industrias-Espana-respecto-al-anterior-periodo.html>
- [23] Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en los Establecimientos Industriales (RSCIEI). «BOE» núm. 303, de 17 de diciembre de 2004, páginas 41194 a 41255. Referencia: BOE-A-2004-21216. Versión 2, Febrero 2019.
- [24] Clúster de Seguretat Contra Incendis (Febrero 2021). *Guía de Diseño Prestacional (PBD) para los sistemas de protección contra incendios en naves industriales*. Primera edición.
- [25] CFPA Europe (Febrero 2023). *CFPA-E Guideline No 19: Fire safety engineering concerning evacuation from buildings*.
- [26] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (Año 1997). NTP 436: *Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación*.

- [27] Asociación Española de Normalización (Enero 2021). Norma UNE-EN 12845:2016+A1:2021. Sistemas fijos de lucha contra incendios. Sistemas de rociadores automáticos. Diseño, instalación y mantenimiento.
- [28] Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en los Establecimientos Industriales (RSCIED). «BOE» núm. 303, de 17 de diciembre de 2004, páginas 41194 a 41255. Referencia: BOE-A-2004-21216. 15 de Septiembre, 2022.
- [29] Technical Committee ISO/TC 92 (Año 2006). ISO/TS 16733: Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires.
- [30] (Año 2016). *SPFE Handbook of Fire Protection Engineering* (5ª ed.). SPFE.
- [31] Asociación Española de Normalización (Diciembre 2017). Norma UNE-ISO 16733-1:2017. Ingeniería de seguridad contra incendios - Selección de escenarios de fuego de diseño y fuegos de diseño. Parte 1: Selección de escenarios de fuego de diseño.
- [32] (n.d.). *An introduction to fire modelling*. Fireng. <http://www.fireng.org/p/introduction-to-fire-modelling.html>
- [33] (n.d.). *What is FDS?* FDS Tutorial. <https://fdstutorial.com/what-is-fds/>
- [34] (n.d.). *Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV) - Bringing fire analysis to life*. Harrington Group, Inc. <https://hgi-fire.com/fire-dynamics-simulator-fds-and-smokeview-smv-bringing-fire-analysis-to-life/>
- [35] (Año 2009). *Pyrosim*. U-Cursos. [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/CI57B/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=259082#:~:text=Herramienta%20computacional%20para%20el%20modelamiento%20de%20incendios.](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/CI57B/1/material_docente/bajar?id_material=259082#:~:text=Herramienta%20computacional%20para%20el%20modelamiento%20de%20incendios.)
- [36] *PyroSim User Manual* (Versión 2022-3). Thunderhead Engineering. <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2022-3/user-manual/>
- [37] Lin, C. H. (5 de Diciembre, 2008). Investigations on the Characteristics of Radiative Heat Transfer in Liquid Pool Fires. *Fire Technology*, tomo 46, nº 2. <https://doi.org/10.1007/s10694-008-0071-7>

- [38] Asociación Española de Normalización (Diciembre 2006). Norma UNE-EN 12101-6:2006. Sistemas para el control de humo y de calor. Parte 6: Especificaciones para los sistemas de diferencial de presión. Equipos.
- [39] (Noviembre 2022). Les statistiques des services d'incendie et de secours. Édition 2022. Ministère de l'intérieur et des outre mer. Pág. 62.
- [40] Asociación Española de Normalización (Noviembre 2017). Norma UNE-EN 23585:2017. Seguridad contra incendios. Sistemas de control de humo y calor. Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y de evacuación de humos (SCTEH) en caso de incendio estacionario.

## 7 ANEXO I: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Este proyecto se relaciona intrínsecamente con dos objetivos: el objetivo 9, de la construcción de infraestructuras resistentes, promoviendo la industrialización inclusiva y fomentando la innovación, y el objetivo 11, de la creación de ciudades inclusivas, seguras y sostenibles. El crecimiento y desarrollo de la industria es un objetivo común tanto en países desarrollados como no desarrollados, de ahí que la inversión global en investigación y desarrollo haya alcanzado cifras cercanas a los 2 trillones de dólares al año. Por ello, es de gran importancia que en la construcción de nuevas infraestructuras se utilicen criterios que garanticen la seguridad y la sostenibilidad. Este proyecto tiene en cuenta las características propias de las naves industriales, que se encuentran en constante crecimiento y evolución para adaptarse a las necesidades de la sociedad, y utiliza dichas características para encontrar la mejor forma de protegerlas ante incendios. Esto incluye que las distancias y recorridos de evacuación que se determinen favorezcan el acceso de los equipos de intervención, potenciando así la seguridad, y también que se optimicen estas distancias, es decir, que éstas sean lo más exactas y adecuadas posible y no sean demasiado peligrosas o excesivas, siendo así más sostenibles. Por último, se buscará fomentar la innovación buscando los métodos más inteligentes para determinar estas distancias, construyendo con los criterios más óptimos posibles y basándonos en los factores que más influyan y afecten a las condiciones de seguridad en las naves logísticas.

Por último, cabe destacar la alineación del proyecto con el objetivo 5 de salud y bienestar. Determinando unas distancias adecuadas para los recorridos de intervención y evacuación de naves industriales durante un incendio, se estará contribuyendo a la prevención de posibles accidentes, facilitando la evacuación de los ocupantes y favoreciendo la intervención de los bomberos de la forma más rápida y segura posible.