



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE LAS CAPACIDADES PREDICTIVAS DE CFAST PARA PREDECIR LOS RIESGOS DE INCENDIO EN COMPARTIMENTOS GRANDES

Autor: Ignacio de Vicente-Tutor Vázquez
Director: Borja Rengel Darnaculleta

Madrid
Julio 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis de las capacidades predictivas de CFAST para predecir los
riesgos de incendio en compartimentos grandes
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/2023 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.: Ignacio de Vicente-Tutor Vázquez

Fecha: 17/07/2023

Handwritten signature in black ink, appearing to read 'I. de Vicente' with a stylized 'V-I' at the end.

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Borja Rengel Darnaculleta

Fecha: 17/07/2023

Handwritten signature in blue ink, appearing to read 'B. Rengel' with a stylized flourish.



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE LAS CAPACIDADES PREDICTIVAS DE CFAST PARA PREDECIR LOS RIESGOS DE INCENDIO EN COMPARTIMENTOS GRANDES

Autor: Ignacio de Vicente-Tutor Vázquez
Director: Borja Rengel Darnaculleta

Madrid
Julio 2022

Análisis de las capacidades predictivas de CFAST para predecir los riesgos de incendio en compartimentos grandes

Autor: Ignacio de Vicente-Tutor Vázquez

Director: Borja Rengel Darnaculleta

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

Resumen del proyecto

CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) es un modelo de zona que predice el entorno térmico causado por un incendio dentro de un compartimento dividido en una capa superior e inferior de gases. La evolución de las temperaturas, uniformes en cada capa, se determina resolviendo las leyes fundamentales de conservación de masa y energía, mientras que la transferencia de humo y calor se obtiene mediante correlaciones empíricas. Debido a la simplicidad de las ecuaciones principales resueltas, CFAST no se considera adecuado para el análisis de riesgos de incendio en compartimentos grandes.

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de validación del modelo de zona CFAST para determinar sus capacidades predictivas en la evaluación de incendios en compartimentos grandes. Para llevar a cabo este análisis, se realizará una simulación de dos escenarios, ya diseñados previamente, para más tarde comparar estos resultados con los obtenidos a partir de las simulaciones del FDS (Fire Dynamics Simulator).

Es importante notar que este trabajo no tiene ninguna validez a nivel técnico, el objetivo del trabajo es realizar una comparación, no se busca cumplir con la reglamentación o con las guías de buenas prácticas. Las asunciones al crear los escenarios se han hecho desde un punto de vista académico sin entrar mucho en el detalle.

Palabras Claves: incendio, simulación, calor, capa de humos

1. Introducción

CFAST es un modelo de simulación desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST), utilizado para simular el crecimiento del fuego y el movimiento del humo en un edificio durante un incendio, pero al ser un modelo de zona que asume

que los gases dentro de una zona específica (un compartimento o habitación en un edificio) están a la misma temperatura y composición. Esto simplifica los cálculos y permite que CFAST sea relativamente rápido y fácil de usar. Debido a su simplicidad y rapidez, CFAST es a menudo más adecuado para edificios más pequeños o para análisis de seguridad contra incendios de alto nivel en edificios más grandes. FDS, por otro lado, es un modelo de campo que resuelve las ecuaciones de fluidos en tres dimensiones para determinar cómo varían la temperatura y la composición del gas en diferentes ubicaciones dentro de una zona. Esto proporciona un nivel de detalle mucho mayor, pero a costa de requerir mucho más tiempo de cálculo y ser más complejo de configurar. Debido a su mayor detalle y precisión, FDS se usa a menudo para modelar escenarios de incendios más complicados, como incendios en edificios grandes o muy complejos, o para investigar fenómenos de incendios específicos en detalle. Para comprobar como de bien CFAST realiza sus predicciones en compartimentos grandes, primero habrá que definir que es un compartimento grande. Para esto nos basamos en la guía de validación de CFAST, donde en el apartado de “large compartments” dan un ejemplo de un hangar de aeronaves de 60000 m^3 [1]. Como veremos más en detalle a continuación, ambas simulaciones son de una nave industrial de dimensiones $50 \times 50 \times 14 \text{ m}$, que da lugar a un espacio de 35000 m^3 , por lo que se encuentra dentro del rango de valores para poder clasificarse como un compartimento grande.

2. Definición del Proyecto

El proyecto se divide en seis partes fundamentales. La primera parte es una breve introducción a CFAST. La segunda parte proporciona la base teórica del modelo CFAST. La tercera parte explica en detalle cómo utilizar CFAST. La cuarta parte se centra en las simulaciones. La quinta parte presenta las conclusiones obtenidas al comparar los resultados de las simulaciones. Por último, la sexta parte incluye la bibliografía utilizada en el trabajo.

Se dará una visión más detallada de la cuarta parte, ya que aquí es donde se encuentra el núcleo del proyecto. Esta sección comienza con una breve introducción a FDS y una explicación de las diferencias entre FDS y CFAST. Luego se describen los dos escenarios de simulación utilizados en FDS. El siguiente subpunto aborda cómo se crearon estos escenarios y cómo se configuraron las simulaciones en CFAST. En el cuarto subpunto se explican en detalle los resultados obtenidos a partir de CFAST. Para cerrar esta sección,

se realiza una comparación de los resultados y se extraen conclusiones en la siguiente parte del proyecto.

Estos dos escenarios representan una nave industrial de dimensiones 50 x 50 x 14 m, dividida por una cortina de humo en dos partes iguales, ambos escenarios tienen exutorios ubicados en la cubierta. La diferencia entre las simulaciones radica en la forma de los incendios y en que uno de los escenarios incluye muelles de carga en la fachada anterior y posterior de la nave.

3. Resultados

El estudio que se ha realizado ha sido una comparación de dos simulaciones de incendios en una nave industrial utilizando los modelos de simulación FDS y CFAST. Estos incendios fueron en dos escenarios: uno donde los muelles de carga estaban operativos durante toda la simulación y otro sin ellos. En ambos casos, se examinaron varias variables para ver cómo se comportaban en cada escenario y en cada modelo de simulación.

En el primer escenario, nave sin muelles de carga, los resultados mostraron que las tendencias generales en la altura de la capa de humo eran similares en ambos modelos, aunque la exactitud y los detalles varían. El principal problema surgió en CFAST con la apertura de los exutorios en el segundo 434, donde el humo no fue evacuado eficientemente, en comparación con FDS. Este problema impactó significativamente la representación de la temperatura y la dispersión del humo en el modelo CFAST.

Por otro lado, en el segundo escenario, nave con muelles de carga operativos, se observaron similitudes en las predicciones de temperatura en un punto específico y la dispersión del humo entre ambos modelos. Sin embargo, existen ligeras diferencias en la representación de la temperatura en el plano $y=25$ y las isosuperficies de 60°C , siendo FDS más preciso y CFAST más simplificado, pero los resultados obtenidos por CFAST son muy similares a los recogidos por FDS.

4. Conclusiones

Este estudio comparó la eficacia de los modelos de simulación CFAST y FDS en compartimentos grandes, utilizando dos escenarios en una nave industrial. En el primer

escenario, los muelles de carga estaban cerrados y en el segundo, operativos. Los resultados fueron similares en ambos modelos en cuanto a varias variables examinadas, pero hubo diferencias significativas en la evacuación del humo en el primer escenario. El modelo FDS pudo evacuar todo el humo mientras que CFAST no. Esto puede deberse a cálculos erróneos en CFAST o a la configuración de la apertura de los exutorios. Sin embargo, en el segundo escenario, CFAST presentó predicciones más cercanas a las de FDS, posiblemente debido a la ayuda en la dispersión del humo por los muelles de carga operativos. FDS demostró ser más preciso, pero CFAST sigue siendo útil para simulaciones rápidas en grandes compartimentos, proporcionando un buen análisis inicial de la evolución de un incendio, aunque con ciertas limitaciones en precisión.

5. Referencias

- [1] R. D. Peacock and P. A. Reneke. CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 3: Software Development and Model Evaluation Guide. Technical Note 1889v3, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2015. 4
- [2] H.W. Emmons and T. Tanaka. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Vent Flows. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 28
- [3] J. P. Holman. Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company, 1990. 33
- [4] R.L. Alpert. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Ceiling Jet Flows. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 33
- [5] W. F. Moss and G. P. Forney. Implicitly coupling heat conduction into a zone fire model. NISTIR 4886, National Institute of Standards and Technology, 1992. 35
- [6] R.L.P. Custer, B.J. Meacham, and R.P. Schifiliti. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Design of Detection Systems. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 37, 38
- [7] G.W. Mulholland. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 38
- [8] J. A. Milke, F W. Mowrer, and P. Gandhi. Validation of a Smoke Detection Performance Methodology, Volume 3. Evaluation of Smoke Detector Performance. Technical report, The Fire Protection Research Foundation, Quincy, Massachusetts, October 2008. 39

- [9] R.W. Bukowski and J.D. Averill. Methods for Predicting Smoke Detector Activation. In Proceedings of the Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Research and Practice, Bridging the Gap, pages 64–72, Orlando, Florida, February 1998. National Fire Protection Research Foundation, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts. 39
- [10] D. Madrzykowski and R. Vettori. A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. NISTIR 4833, National Institute of Standards and Technology, 1992. 39
- [11] D. D. Evans. Sprinkler Fire Suppression for HAZARD. NISTIR 5254, National Institute of Standards and Technology, 1993. 39
- [12] International Organization for Standardization, CP 401 - 1214 Vernier, Geneva, Switzerland. Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires, iso 13571:2012(e) edition, September 2012. 39, 40
- [13] R. D. Peacock, P. A. Reneke, and G. P. Forney. CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User’s Guide. Technical Note 1889v2, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2015. 41
- [14] J. H. Klote, J. A. Milke, P. G. Turnbull, A. Kashef, and M. J. Ferreira. Handbook of Smoke Control Engineering. ASHRAE, Atlanta, GA, 2012. 47

Analysis of the Predictive Capabilities of CFAST for Predicting Fire Risks in Large Compartments

Author: Ignacio de Vicente-Tutor Vázquez

Supervisor: Borja Rengel Darnaculleta

Collaborating Institution: ICAI - Universidad Pontificia de Comillas

Abstract

CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) is a zone model that predicts the thermal environment caused by a fire within a compartment divided into an upper and lower gas layer. The evolution of temperatures, which are uniform in each layer, is determined by solving the fundamental laws of mass and energy conservation, while the transfer of smoke and heat is obtained through empirical correlations. Due to the simplicity of the solved governing equations, CFAST is not considered suitable for fire hazard analysis in large compartments.

The main objective of this work is to perform a validation analysis of the CFAST zone model to determine its predictive capabilities in evaluating fires in large compartments. To carry out this analysis, simulations of two previously designed scenarios will be conducted, and later these results will be compared with those obtained from simulations using the Fire Dynamics Simulator (FDS). It is important to note that this work has no technical validity. The aim of this work is to make a comparison, not to comply with regulations or best practice guidelines. The assumptions made when creating the scenarios have been made from an academic perspective without going into much detail.

Keywords: fire, simulation, heat, smoke layer

1. Introduction

CFAST is a simulation model developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST) used to simulate fire growth and smoke movement in a building during a fire. It is a zone model that assumes that the gases within a specific zone (a compartment or room in a building) are at the same temperature and composition. This simplifies calculations and allows CFAST to be relatively fast and easy to use. Due to its

simplicity and speed, CFAST is often more suitable for smaller buildings or for high-level fire safety analysis in larger buildings. On the other hand, FDS is a field model that solves fluid equations in three dimensions to determine how gas temperature and composition vary at different locations within a zone. This provides a much higher level of detail but requires more computation time and is more complex to set up. Due to its greater detail and accuracy, FDS is often used to model more complex fire scenarios, such as fires in large or highly complex buildings, or to investigate specific fire phenomena in detail. To assess how well CFAST predicts fire behavior in large compartments, it is necessary to define what constitutes a large compartment. In this regard, we refer to the CFAST validation guide, where an example of an aircraft hangar with a volume of 60,000 m³ is provided as an example of a large compartment. As we will see in more detail below, both simulations involve an industrial hangar with dimensions of 50 x 50 x 14 m, resulting in a volume of 35,000 m³, which falls within the range to be classified as a large compartment.

2. Project Definition

The project is divided into six fundamental parts. The first part provides a brief introduction to CFAST. The second part presents the theoretical basis of the CFAST model. The third part provides detailed explanations on how to use CFAST. The fourth part focuses on the simulations. The fifth part presents the conclusions obtained from comparing the results of the simulations. Finally, the sixth part includes the bibliography used in the work.

We will provide a more detailed overview of the fourth part, as it is the core of the project. This section begins with a brief introduction to FDS and an explanation of the differences between FDS and CFAST. It then describes the two simulation scenarios used in FDS. The following sub-section addresses how these scenarios were created and how the simulations were configured in CFAST. The fourth sub-section provides a detailed explanation of the results obtained from CFAST. To conclude this section, a comparison of the results is made, and conclusions are drawn in the subsequent part of the project.

These two scenarios represent an industrial hangar with dimensions of 50 x 50 x 14 m, divided by a smoke curtain into two equal parts. Both scenarios have roof vents. The

difference between the simulations lies in the fire shape and the inclusion of loading docks on the front and rear facades of one of the hangars.

3. Results

The study conducted was a comparison of two fire simulations in an industrial warehouse using the FDS and CFAST simulation models. These fires occurred in two scenarios: one where the loading docks were operational throughout the entire simulation and another without them. In both cases, several variables were examined to see how they behaved in each scenario and in each simulation model.

In the first scenario, the warehouse without loading docks, the results showed that the general trends in the height of the smoke layer were similar in both models, although the accuracy and details vary. The main problem arose in CFAST with the opening of the vents at second 434, where the smoke was not efficiently evacuated, compared to FDS. This problem significantly impacted the representation of temperature and smoke dispersion in the CFAST model.

On the other hand, in the second scenario, the warehouse with operational loading docks, similarities were observed in temperature predictions at a specific point and smoke dispersion between both models. However, there are slight differences in the representation of the temperature in the plane $y=25$ and the 60°C isosurfaces, with FDS being more precise and CFAST being more simplified, but the results obtained by CFAST are very similar to those collected by FDS.

4. Conclusions

This study compared the effectiveness of the CFAST and FDS simulation models in large compartments, using two scenarios in an industrial warehouse. In the first scenario, the loading docks were closed, and in the second, operational. The results were similar in both models in terms of various variables examined, but there were significant differences in smoke evacuation in the first scenario. The FDS model was able to evacuate all the smoke while CFAST could not. This could be due to erroneous calculations in CFAST or to the configuration of the exhaust openings. However, in the second scenario, CFAST presented predictions closer to those of FDS, possibly due to the aid in smoke dispersion by the operational loading docks. FDS proved to be more accurate, but CFAST remains useful for quick simulations in large

compartments, providing a good initial analysis of the evolution of a fire, albeit with certain limitations in accuracy.

5. References

- [1] R. D. Peacock and P. A. Reneke. CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 3: Software Development and Model Evaluation Guide. Technical Note 1889v3, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2015. 4
- [2] H.W. Emmons and T. Tanaka. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Vent Flows. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 28
- [3] J. P. Holman. Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company, 1990. 33
- [4] R.L. Alpert. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Ceiling Jet Flows. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 33
- [5] W. F. Moss and G. P. Forney. Implicitly coupling heat conduction into a zone fire model. NISTIR 4886, National Institute of Standards and Technology, 1992. 35
- [6] R.L.P. Custer, B.J. Meacham, and R.P. Schifiliti. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Design of Detection Systems. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 37, 38
- [7] G.W. Mulholland. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 38
- [8] J. A. Milke, F W. Mowrer, and P. Gandhi. Validation of a Smoke Detection Performance Methodology, Volume 3. Evaluation of Smoke Detector Performance. Technical report, The Fire Protection Research Foundation, Quincy, Massachusetts, October 2008. 39
- [9] R.W. Bukowski and J.D. Averill. Methods for Predicting Smoke Detector Activation. In Proceedings of the Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Research and Practice, Bridging the Gap, pages 64–72, Orlando, Florida, February 1998. National Fire Protection Research Foundation, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts. 39
- [10] D. Madrzykowski and R. Vettori. A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. NISTIR 4833, National Institute of Standards and Technology, 1992. 39
- [11] D. D. Evans. Sprinkler Fire Suppression for HAZARD. NISTIR 5254, National Institute of Standards and Technology, 1993. 39

- [12] International Organization for Standardization, CP 401 - 1214 Vernier, Geneva, Switzerland. Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires, ISO 13571:2012(e) edition, September 2012. 39, 40
- [13] R. D. Peacock, P. A. Reneke, and G. P. Forney. CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide. Technical Note 1889v2, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2015. 41
- [14] J. H. Korte, J. A. Milke, P. G. Turnbull, A. Kashef, and M. J. Ferreira. Handbook of Smoke Control Engineering. ASHRAE, Atlanta, GA, 2012. 47

Índice de la memoria

1.	<i>Introducción a CFAST</i>	24
1.1.	Historia y Contextualización	24
1.2.	Visión General	25
2.	<i>Aspectos Fundamentales en la Dinámica del Fuego y Protección contra Incendios</i>	26
2.1.	Ecuaciones Básicas de Transporte	26
2.2.	El Penacho	30
2.3.	Ventilación	31
2.4.	Transferencia de calor	33
2.4.1.	Radiación	33
2.4.2.	Convección	36
2.4.2.1.	Paredes-Suelo	36
2.4.2.2.	Techo	36
2.4.3.	Conducción	37
2.5.	Cálculos de Protección Contra Incendios	40
2.5.1.	Detectores de Calor y Rociadores	40
2.5.2.	Visibilidad	41
2.5.3.	Detectores de Humo	42
2.5.4.	Extinción de Incendios	42
2.5.5.	Sostenibilidad (Habitabilidad)	43
3.	<i>Uso de CFAST</i>	44
3.1.	Introducción al uso de CFAST	44
3.2.	Variables de Entrada	44
3.2.1.	Entorno de Simulación	45
3.2.2.	Propiedades Térmicas Materiales	47
3.2.3.	Geometría de los Compartimentos	48
3.2.4.	Ventilación Natural	52
3.2.5.	Ventilación Mecánica	55
3.2.6.	Incendios	56
3.2.7.	Medidas y Sistemas anti-incendios	60
3.2.8.	Conexión entre Superficies	62
3.3.	Salidas	63
3.3.1.	Visualización	64

4. Simulación	65
4.1. Introducción a FDS	66
4.2. Simulación del FDS	68
4.2.1. Simulación FDS Nave Industrial	68
4.2.2. Simulación FDS Nave Industrial con Muelles de Carga	70
4.3. Simulación CFAST Nave Industrial	72
4.3.1. Parámetros de entrada en la simulación CFAST	72
4.3.1.1. Geometría	72
4.3.1.2. Cortina de Humos	76
4.3.1.3. Exutorios	77
4.3.1.4. Incendio	85
4.3.1.5. Rociadores	88
4.3.2. Resultados de la simulación CFAST	90
4.4.2.1. Tiempo Inicial (T = 0 s)	92
4.4.2.2. Curva de Crecimiento (T = 240 s)	94
4.4.2.3. Pico HRR previo a Apertura de Exutorios (T = 420 s)	97
4.4.2.4. Previo a Finalizar el Incendio (T = 900 s)	102
4.4.2.5. Tiempo Tras el Incendio (T = 2000 s)	107
4.3.3. Comparación de Resultados	111
4.3.3.1. Altura Capa de Humos	111
4.3.3.2. Plano Longitudinal de Temperatura	115
4.3.3.3. Isosuperficie de 60°C	119
4.3.3.4. Tiempo Activación Rociador	123
4.3.3.5. Expansión del Humo	124
4.3.3.6. Resumen	127
4.4. Simulación CFAST Nave Industrial con Muelles de Carga	129
4.4.1. Parámetros de entrada en la simulación CFAST	129
4.4.1.1. Muelles de Carga y Columna de Humos	130
4.4.1.2. Incendio	133
4.4.2. Resultados de la simulación CFAST	134
4.4.2.1. Tiempo Inicial (T = 0 s)	135
4.4.2.2. Curva de Crecimiento (T = 240 s)	136
4.4.2.3. Pico HRR previo a Apertura de Exutorios (T = 420 s)	140
4.4.2.4. Previo a Finalizar el Incendio (T = 900 s)	144
4.4.2.5. Tiempo Tras el Incendio (T = 2000 s)	148
4.4.3. Comparación de Resultados	152
4.4.3.1. Plano Longitudinal de Temperatura	152
4.4.3.2. Temperatura en P (20, 25, 13)	156
4.4.3.3. Isosuperficie de 60°C	158
4.4.3.4. Expansión del Humo	162
4.4.3.5. Resumen	165
5. Conclusiones	166
6. Bibliografía	168

Índice de figuras

<i>Figura 1: Esquema de los volúmenes de control en un modelo de zona de dos capas.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2: Patrones de flujo para el flujo horizontal a través de una abertura vertical.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3: Entorno de Simulación</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4: Propiedades Térmicas de los Materiales</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5: Posición del Compartimento</i>	<i>48</i>
<i>Figura 6: Tamaño del Compartimento.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 7: Geometría de los Compartimentos</i>	<i>52</i>
<i>Figura 8: Ventilación en Superficies Horizontales</i>	<i>53</i>
<i>Figura 9: Ventilación en Superficies Verticales.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 10: Ventilación Mecánica</i>	<i>56</i>
<i>Figura 11: Pestaña de Incendios</i>	<i>58</i>
<i>Figura 12: Incendios expresión t-cuadrado</i>	<i>59</i>
<i>Figura 13: Pestaña de “Targets”</i>	<i>61</i>
<i>Figura 14: Sistemas anti-incendios.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 15: Conexión entre Superficies</i>	<i>63</i>
<i>Figura 16: Representación Simulación Nave Industrial con Smokeview.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 17: Representación Simulación Nave con Muelles de carga con Smokeview.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 18: Geometría parte izquierda Nave.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 19: Geometría parte derecha Nave</i>	<i>73</i>
<i>Figura 20: Propiedades de los materiales escogidos.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 21: Materiales de techo, paredes, suelo y sus espesores</i>	<i>75</i>
<i>Figura 22: Geometría de Nave Industrial.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 23: Nave Industrial separada en 2 compartimentos</i>	<i>76</i>
<i>Figura 24: Conexión entre compartimentos a través de paredes.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 25: Nave Industrial con Cortina de Humos de 4 m</i>	<i>77</i>
<i>Figura 26: Explicación gráfica de ecuación de distribución de exutorios.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 27: Introducción variables de entrada para segundo exutorio de la primera fila</i>	<i>82</i>
<i>Figura 28: Variables Temporales Exutorios</i>	<i>83</i>
<i>Figura 29: Pestaña de Exutorios</i>	<i>83</i>
<i>Figura 30: Nave Industrial con 81 exutorios de forma cuadrada</i>	<i>84</i>
<i>Figura 31: Exutorios Cerrados en el segundo 390.....</i>	<i>84</i>

<i>Figura 32: Exutorios Abiertos en el segundo 450</i>	<i>85</i>
<i>Figura 33: Definir expresión del Incendio Nave Industrial</i>	<i>85</i>
<i>Figura 34: Expresión del incendio Nave Industrial</i>	<i>86</i>
<i>Figura 35: Propiedades del incendio Nave Industrial.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 36: Pestaña de Incendios</i>	<i>87</i>
<i>Figura 37: Evolución del Incendio</i>	<i>87</i>
<i>Figura 38: Pestaña de Rociadores</i>	<i>89</i>
<i>Figura 39: Rociador posicionado en la Nave Industrial</i>	<i>89</i>
<i>Figura 40: Pestaña de Simulación Completada</i>	<i>90</i>
<i>Figura 41: Nave Industrial sin haber cargado la Simulación</i>	<i>91</i>
<i>Figura 42: Nave Industrial en el segundo 390</i>	<i>91</i>
<i>Figura 43: Puntos a analizar los resultados Nave Industrial</i>	<i>92</i>
<i>Figura 44: Nave Industrial en T = 240 s.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 45: Nave Industrial en T = 420 s.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 46: Nave Industrial en T = 900 s.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 47: Flujo a través de los Exutorios y su Temperatura</i>	<i>107</i>
<i>Figura 48: Nave Industrial en T = 2000 s</i>	<i>110</i>
<i>Figura 49: FDS - Altura de la Capa de Humos (Izq)</i>	<i>112</i>
<i>Figura 50: CFAST - Altura de la Capa de Humos (Izq)</i>	<i>114</i>
<i>Figura 51: Creación Plano 2D --> y = 25</i>	<i>115</i>
<i>Figura 52: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 240 s</i>	<i>116</i>
<i>Figura 53: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 240 s</i>	<i>116</i>
<i>Figura 54: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 420 s</i>	<i>117</i>
<i>Figura 55: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 420 s</i>	<i>117</i>
<i>Figura 56: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 900 s</i>	<i>118</i>
<i>Figura 57: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 900 s</i>	<i>119</i>
<i>Figura 58: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 240 s.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 59: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 240 s.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 60: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 420 s.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 61: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 420 s.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 62: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 900 s.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 63: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 900 s.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 64: CFAST - Tiempos Activación Rociador</i>	<i>123</i>
<i>Figura 65: FDS - Dispersión del Humo en T = 240 s.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 66: CFAST - Dispersión del Humo en T = 240 s.....</i>	<i>125</i>

<i>Figura 67: FDS - Dispersión del Humo en T = 420 s.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 68: CFAST - Dispersión del Humo en T = 420 s.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 69: FDS - Dispersión del Humo en T = 900 s.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 70: CFAST - Dispersión del Humo en T = 900 s.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 71: Parámetros a introducir para los Muelles de Carga.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 72: Cortina de Humos Nave Industrial con Muelles de Carga.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 73: Pestaña Muelles de Carga y Cortina de Humos</i>	<i>132</i>
<i>Figura 74: Nave Industrial con 14 Muelles de Carga.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 75: Definir expresión del Incendio Nave Industrial con Muelles de Carga.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 76: Expresión del incendio Nave Industrial con Muelles de Carga.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 77: Puntos a analizar los resultados Nave Industrial con Muelles de Carga.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 78: Nave Industrial con Muelles de Carga en T = 240 s.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 79: Nave Industrial con Muelles de Carga en T = 420 s.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 80: Nave Industrial con Muelles de Carga en T = 900 s.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 81: Nave Industrial con Muelles de Carga en T = 2000 s.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 82: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 120 s - Muelles</i>	<i>153</i>
<i>Figura 83: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 120 s - Muelles.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 84: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 360 s - Muelles</i>	<i>154</i>
<i>Figura 85: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 360 s - Muelles</i>	<i>154</i>
<i>Figura 86: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 540 s - Muelles</i>	<i>155</i>
<i>Figura 87: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en T = 540 s - Muelles</i>	<i>155</i>
<i>Figura 88: FDS - Temperatura en P (20, 25, 13) - Muelles</i>	<i>156</i>
<i>Figura 89: Configuración de Alarma de Incendios</i>	<i>157</i>
<i>Figura 90: CFAST - Temperatura en P (20, 25, 13) - Muelles.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 91: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 120 s - Muelles.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 92: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 120 s - Muelles</i>	<i>159</i>
<i>Figura 93: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 360 s - Muelles.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 94: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 360 s - Muelles</i>	<i>160</i>
<i>Figura 95: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 540 s - Muelles.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 96: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en T = 540 s - Muelles</i>	<i>161</i>
<i>Figura 97: FDS - Dispersión del Humo en T = 120 s - Muelles.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 98: CFAST - Dispersión del Humo en T = 120 s - Muelles</i>	<i>163</i>
<i>Figura 99: FDS - Dispersión del Humo en T = 360 s - Muelles.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 100: CFAST - Dispersión del Humo en T = 360 s - Muelles</i>	<i>164</i>
<i>Figura 101: FDS - Dispersión del Humo en T = 540 s - Muelles.....</i>	<i>164</i>

Figura 102: CFAST - Dispersión del Humo en $T = 540$ s - Muelles165

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Flujos de Área a través de Paredes y Suelos en Edificios Comerciales</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 2: Temperatura media y altura de la zona de humos en $T = 0$ s</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 3: Resultados del Incendio en $T = 0$ s</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 4: Resultados del Rociador en $T = 0$ s</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 5: Resultados de la Composición en % en $T = 0$ s</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 6: Resultados del Flujo a través de los Exutorios en $T = 0$ s</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 7: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 240$ s</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 8: Resultados del Incendio en $T = 240$ s</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 9: Resultados del Rociador en $T = 240$ s</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 10: Resultados de la Composición en % en $T = 240$ s</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 11: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 240$ s</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 12: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 420$ s</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 13: Resultados del Incendio en $T = 420$ s</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 14: Resultados del Rociador en $T = 420$ s</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 15: Resultados de la Composición en % en $T = 420$ s</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 16: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 420$ s</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 17: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 900$ s</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 18: Resultados del Incendio en $T = 900$ s</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 19: Resultados del Rociador en $T = 900$ s</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 20: Resultados de la Composición en % en $T = 900$ s</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 21: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 900$ s</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 22: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 2000$ s</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 23: Resultados del Incendio en $T = 2000$ s</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 24: Resultados del Rociador en $T = 2000$ s</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 25: Resultados de la Composición en % en $T = 2000$ s</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 26: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 2000$ s</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 27: FDS - Tiempos Activación Rociadores</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 28: Temperatura media y altura de la zona de humos en $T = 0$ s</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 29: Resultados del Incendio en $T = 0$ s</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 30: Resultados de la Composición en % en $T = 0$ s</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 31: Resultados del Flujo a través de los Exutorios y Muelles de Carga en $T = 0$ s</i>	<i>136</i>

Tabla 32: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 240$ s.....	136
Tabla 33: Resultados del Incendio en $T = 240$ s.....	137
Tabla 34: Resultados de la Composición en % en $T = 240$ s	137
Tabla 35: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 240$ s	139
Tabla 36: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 420$ s.....	140
Tabla 37: Resultados del Incendio en $T = 420$ s.....	141
Tabla 38: Resultados de la Composición en % en $T = 420$ s	142
Tabla 39: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 420$ s	143
Tabla 40: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 420$ s.....	145
Tabla 41: Resultados del Incendio en $T = 900$ s.....	146
Tabla 42: Resultados de la Composición en % en $T = 900$ s	146
Tabla 43: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 900$ s	147
Tabla 44: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 2000$ s.....	149
Tabla 45: Resultados del Incendio en $T = 2000$ s.....	150
Tabla 46: Resultados de la Composición en % en $T = 2000$ s.....	150
Tabla 47: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 2000$ s	151

1. Introducción a CFAST

Primero de todo se dará una introducción al modelo CFAST, cuál es su origen, quienes lo desarrollaron y posteriormente le seguirá una visión general del modelo, sus aplicaciones y limitaciones, y en qué conjunto de ecuaciones y algoritmos está construido.

1.1. Historia y Contextualización

El software CFAST (Consolidated Fire and Smoke Transport) fue desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST) en colaboración con la U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) y el U.S. Department of Energy (DOE). La idea de crear el software CFAST surgió en la década de 1980, cuando el NIST y la NRC estaban trabajando en la evaluación de la seguridad de los edificios nucleares. En ese momento, se dieron cuenta de que no había herramientas adecuadas para predecir la propagación del fuego y el humo en edificios en caso de incendio. Para abordar esta necesidad, el NIST comenzó a desarrollar el software CFAST en la década de 1990. El objetivo principal era proporcionar una herramienta de modelado computacional para predecir la propagación del fuego y el humo además de proporcionar a los usuarios una plataforma confiable para evaluar los riesgos y las medidas de seguridad relacionadas con los incendios en edificios y estructuras.

Los desarrolladores que han realizado contribuciones significativas en el campo de la investigación de incendios y han trabajado arduamente para desarrollar y mejorar continuamente el modelo CFAST son los presentados a continuación:

- Richard Peacock: ha sido fundamental en la investigación, desarrollo y validación de modelos de incendios, y ha desempeñado un papel clave en la creación y mejora del modelo CFAST.
- Glenn Forney: destaca por el desarrollo de herramientas avanzadas utilizadas en el análisis y la visualización de datos de simulación de incendios, como Smokeview.

- Paul Reneke: ha sido parte del equipo de desarrollo de CFAST y ha contribuido al diseño de interfaces de usuario intuitivas y mejoras numéricas para optimizar la funcionalidad y la precisión del modelo.
- Kevin McGrattan: su experiencia en simulaciones de dinámica de incendios ha sido fundamental para el desarrollo y la validación del FDS.
- Walter Jones: reconocido como el desarrollador original del modelo CFAST, sentó las bases para el desarrollo de este modelo.

Estos destacados desarrolladores han desempeñado un papel clave en la evolución y el éxito del modelo CFAST, aportando su experiencia y conocimientos para mejorar la comprensión y la predicción de los fenómenos de incendios. Su trabajo continúa siendo una referencia importante en el campo de la investigación y la seguridad contra incendios.

1.2. Visión General

CFAST es un modelo de incendio de dos zonas (en inglés, “two-zone fire model”) utilizado para calcular la evolución de la distribución de humo, los gases de incendio y las temperaturas a las que se encuentran los diferentes compartimentos que conforman la estructura donde se desarrolla el incendio que estamos estudiando. Este modelo divide el espacio en dos zonas: una primera zona de fuego y otra distinta que no se ve afectada por el fuego. Esta primera zona representa el área donde se produce la combustión y la emisión de calor y gases tóxicos provocados por el incendio. Esta zona se caracteriza por una alta temperatura y una gran cantidad de gases calientes. Sin embargo, la zona que no se ve afectada por el fuego es el espacio sobrante, donde la temperatura y la concentración de gases son significativamente más bajas que en la zona del fuego.

El modelo de dos zonas se basa en la hipótesis de que el flujo de calor y gases entre las dos zonas es el principal factor que rige la propagación del fuego y del humo en un espacio cerrado. Esta hipótesis permite una descripción simplificada del incendio, que puede ser útil para la evaluación de la seguridad contra incendios, su éxito se debe a la rapidez a la vez que la obtención de buenos resultados. Como es lógico, CFAST tiene sus limitaciones como, por ejemplo, no tener en cuenta la complejidad de los flujos de aire y gases en un

espacio real y puede no ser adecuado para predecir la propagación de fuego en situaciones muy complejas o en compartimentos que se encuentren en edificios de gran altura.

El modelo CFAST se basa en una serie de ecuaciones y algoritmos que tienen en cuenta una amplia gama de factores, como la geometría del compartimento, las características del fuego, los mecanismos de transferencia de calor, el flujo de gases y el movimiento del humo, así como la activación de los sistemas de rociadores y detectores de humo. Estos aspectos se abordarán en detalle en los apartados sucesivos.

Es importante tener en cuenta que el modelo CFAST es una simplificación de la realidad y, por lo tanto, sus resultados deben interpretarse con precaución. Si bien proporciona una representación razonable del comportamiento del fuego, no reemplaza la necesidad de considerar otros modelos más avanzados y detallados en ciertos escenarios.

Es importante destacar las limitaciones y suposiciones inherentes al modelo CFAST. Por ejemplo, el modelo no tiene en cuenta ciertos fenómenos complejos, como la propagación del fuego a través de aberturas, la interacción de múltiples incendios en un mismo compartimento o el efecto de un segundo rociador. Estas limitaciones deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados del modelo.

2. Aspectos Fundamentales en la Dinámica del Fuego y Protección contra Incendios

2.1. Ecuaciones Básicas de Transporte

En este apartado se describirá en detalle las ecuaciones que son esenciales para comprender cómo se simulan y se representan los diferentes fenómenos físicos en el modelo. A continuación, se explicarán las ecuaciones de conservación de masa, energía y especies químicas, que son los pilares fundamentales del modelo CFAST. Estas ecuaciones describen cómo se conserva la masa, la energía y las diferentes especies químicas en un compartimento en función de las condiciones de entrada y las interacciones dentro del sistema.

Lo primero que tiene que quedar explicado es que el compartimento se divide en 2 zonas o volúmenes de control, estas son, la zona superior y la zona inferior. La temperatura y densidad del gas se asumen constantes en cada zona. Se supone que el compartimento en su conjunto tiene un único valor de presión, P . Se considera que todos los parámetros termodinámicos son constantes. El calor específico a volumen constante y a presión constante, c_v y c_p , la constante específica de los gases, R , y la relación de los calores específicos, γ , están relacionados por $\gamma = c_p/c_v$ y $R = c_p - c_v$. Independientemente de la composición de la mezcla de gases, $c_p = 1012 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ y $\gamma = 1.4$, por lo tanto:

$$R = \frac{\gamma - 1}{\gamma} c_p \approx 289.14 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1)$$

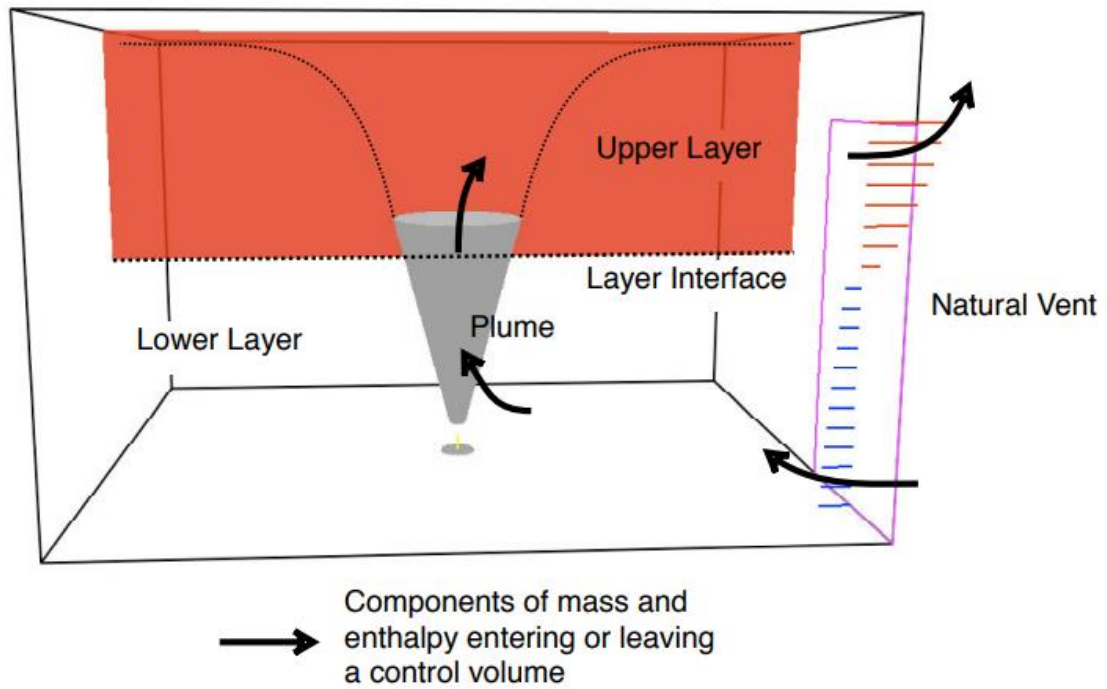


Figura 1: Esquema de los volúmenes de control en un modelo de zona de dos capas

La ecuación de conservación de masa establece que la tasa de cambio de masa en el compartimento es igual a la suma de las tasas de flujo de entrada y salida de masa, teniendo en cuenta la generación o consumo interno de masa debido a la combustión u otros procesos químicos. Esta ecuación permite modelar la variación de la densidad del gas en el compartimento a lo largo del tiempo:

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i \quad (2)$$

La ecuación de conservación de energía es crucial para predecir la transferencia de calor en el compartimento. Toma en cuenta los flujos de calor por radiación, convección y conducción, así como la generación o consumo interno de energía debido a la combustión. Esta ecuación permite simular cómo varía la temperatura en el compartimento y cómo se distribuye el flujo de calor en su interior. Los términos de origen de masa incluyen la entrada de masa del penacho y la ventilación de suministro/extracción. A continuación, la primera ley de la termodinámica establece que la tasa de cambio en la energía interna de la capa, $c_v m_i T_i$, es igual a la suma de los términos de origen de calor, $\dot{q}_i$, menos el trabajo asociado con la expansión o contracción de la capa, $P dV_i/dt$:

$$\frac{d}{dt}(c_v m_i T_i) = \dot{q}_i - P \frac{dV_i}{dt} \quad (3)$$

Incluidos en $\dot{q}_i$ se encuentran la tasa de liberación de calor del fuego, las pérdidas convectivas hacia las paredes y el intercambio de radiación. La temperatura, masa y volumen de la capa están relacionados con la presión del compartimento mediante la ley de los gases ideales:

$$PV_i = m_i RT_i \quad (4)$$

Se puede derivar un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para la presión del compartimento, el volumen de la capa superior y las temperaturas de la capa superior e inferior utilizando las ecuaciones 2 a 4.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{q}_l + \dot{q}_u) \quad (5)$$

$$\frac{dV_u}{dt} = \frac{1}{P\gamma} \left((\gamma - 1)\dot{q}_u - V_u \frac{dP}{dt} \right) \quad (6)$$

$$\frac{dT_u}{dt} = \frac{1}{c_p m_u} \left(\dot{q}_u - c_p \dot{m}_u T_u + V_u \frac{dP}{dt} \right) \quad (7)$$

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{1}{c_p m_l} \left(\dot{q}_l - c_p \dot{m}_l T_l + V_l \frac{dP}{dt} \right) \quad (8)$$

También se resuelve una ecuación algebraica para la temperatura de cada superficie de la pared (techo, pared superior, pared inferior y suelo):

$$\dot{q}'' + k \frac{\partial T_w(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

Donde $\partial T_w(0, t)/\partial x$ es el gradiente de temperatura de la superficie de la pared, $\dot{q}$ es el flujo de calor radiactivo y convectivo neto desde la capa de gas adyacente, y para mayor concisión, los perfiles de temperatura de las paredes se denominan colectivamente como $T_w(x, t)$. La coordenada espacial x se refiere a la profundidad dentro de la pared; $x = 0$ es la superficie de la pared. El gradiente de temperatura en la ecuación se evalúa avanzando un perfil de temperatura conocido desde $t_{antigua}$ hasta t utilizando la ecuación de conducción de calor:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{k}{c_p \rho} \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (10)$$

con la siguiente condición de contorno de temperatura constante:

$$T_w(0, t) = T_w \quad (11)$$

donde ρ , c_p y k son la densidad, el calor específico y la conductividad térmica del material de la pared.

Además de las ecuaciones de conservación de masa y energía, el modelo CFAST también incorpora ecuaciones de conservación para las especies químicas relevantes, como el oxígeno, el dióxido de carbono y los productos de la combustión. Estas ecuaciones permiten predecir cómo varían las concentraciones de las especies químicas en el compartimento a medida que se produce la combustión y se producen reacciones químicas.

Para resolver estas ecuaciones, se realiza una discretización espacial y temporal de estas ecuaciones, se tendrá en cuenta el tiempo en una malla discreta para permitir la resolución numérica de las ecuaciones. Por último, se terminan de resolver estas ecuaciones a partir del uso de algoritmos numéricos eficientes.

Es importante destacar que las ecuaciones de transporte básicas se complementan con otras ecuaciones y algoritmos en el modelo CFAST para tener en cuenta factores adicionales, como la radiación, la convección, la absorción de calor por los objetos y las

interacciones entre los compartimentos. Estos aspectos se explorarán en apartados posteriores.

2.2. El Penacho

El penacho es un componente fundamental para comprender y predecir la propagación del calor, los flujos de humo y otros aspectos relacionados con la dinámica del fuego en un compartimento.

El penacho es una corriente ascendente de gases calientes y humo generada por la combustión en un incendio. Está compuesta por una columna de aire caliente que se eleva desde la fuente de calor hacia la parte superior del compartimento, impulsada por la diferencia de densidad entre los gases calientes y el aire circundante. La altura y la forma del penacho están influenciadas por varios factores, como la tasa de liberación de calor, la geometría del compartimento y la ventilación presente.

Para capturar adecuadamente el comportamiento del penacho en el modelo CFAST, se emplean ecuaciones y modelos específicos. Estas ecuaciones de conservación de masa, energía y especies químicas permiten predecir la temperatura, la velocidad y las concentraciones de gases y humo en diferentes alturas dentro del penacho. A través de estas ecuaciones, se puede evaluar el impacto del fuego en el ambiente circundante y obtener información clave sobre los flujos de calor y los riesgos asociados.

La ventilación juega un papel crucial en el penacho, ya que puede modificar su altura, velocidad y dirección. Se deben tener en cuenta, tanto la ventilación natural como la forzada, y cómo estas influencias externas afectan la dinámica del penacho. Otro aspecto importante es la radiación térmica en el penacho. La radiación emitida por el penacho puede tener un impacto significativo en la propagación del fuego y en la generación de calor en el compartimento.

2.3. Ventilación

Este apartado se centrará en uno de los aspectos más relevantes en la simulación de incendios: la ventilación. La ventilación juega un papel crucial en la propagación del fuego, la distribución de gases tóxicos y la evacuación de humo en un compartimento. Esta parte se adentrará en los conceptos fundamentales de la ventilación y describe los modelos y ecuaciones utilizados en el marco del modelo CFAST para simular su efecto en un escenario de incendio.

La ventilación se refiere al movimiento de aire dentro y fuera de un compartimento, y puede ser natural o forzada. La ventilación natural se produce a través de aberturas como ventanas, puertas y grietas, impulsada por diferencias de presión causadas por la temperatura y el viento exterior [2]. Por otro lado, la ventilación forzada implica el uso de sistemas mecánicos, como extractores de aire, para controlar el flujo de aire dentro del compartimento.

En el caso de la ventilación natural, los conceptos de caudal de aire y coeficiente de flujo de aire son parámetros clave para determinar la cantidad de aire que ingresa o sale del compartimento y cómo afecta la dinámica del fuego. Además, a la hora del diseño de CFAST se han tenido en cuenta los efectos del viento exterior en la ventilación natural y se han podido modelar utilizando correlaciones y coeficientes apropiados.

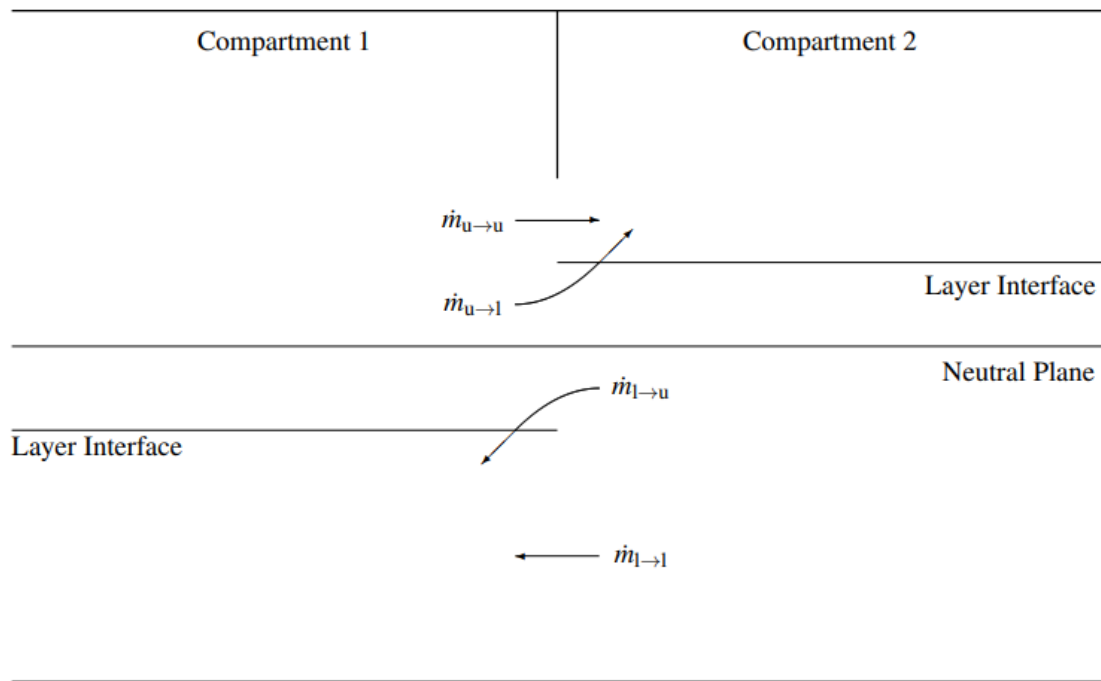


Figura 2: Patrones de flujo para el flujo horizontal a través de una abertura vertical

Por otro lado, la ventilación forzada se estudia en términos de caudal de aire y presión del sistema de ventilación. Los modelos utilizados en CFAST permiten simular el comportamiento de los sistemas de ventilación mecánica, como los extractores de aire, y cómo influyen en el flujo de aire dentro del compartimento. Son también importantes los factores como la distribución del flujo de aire, la presión en el compartimento y la interacción con otras variables, como la temperatura y la propagación del fuego.

Además de la entrada y salida de aire, también se tienen en cuenta la ventilación de gases y humo. La forma en que los gases y el humo se desplazan dentro y fuera del compartimento es esencial para comprender la propagación de los productos de combustión y su impacto en la seguridad. Se han tenido en cuenta modelos para representar la dispersión de gases y humo, considerando factores como la densidad y la temperatura de los gases, la geometría del compartimento y las condiciones de ventilación. Estos modelos permiten evaluar la distribución espacial de los gases tóxicos y el humo, lo cual es fundamental para la evaluación de la seguridad y la planificación de medidas de mitigación.

Además de los aspectos técnicos de la ventilación, hay que destacar la importancia de la ventilación en la evacuación de humo y la protección de las personas en un escenario de

incendio. La capacidad de evacuación de humo de un compartimento es esencial para garantizar la seguridad de las personas y permitir una evacuación segura. Por lo tanto, comprender cómo la ventilación afecta la propagación del humo y su extracción es crucial para diseñar estrategias de evacuación efectivas y sistemas de protección adecuados. Comprender y simular correctamente la ventilación es esencial para evaluar la propagación del fuego, la distribución de gases tóxicos y la evacuación de humo en un escenario de incendio.

2.4. Transferencia de calor

A continuación, abordaremos un aspecto fundamental en la simulación de incendios: la transferencia de calor. La transferencia de calor juega un papel crucial en la propagación y el comportamiento del fuego, así como en la interacción entre el fuego y los objetos circundantes.

La transferencia de calor se produce a través de tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación. Estos mecanismos desempeñan un papel clave en la propagación del calor desde el fuego hacia las superficies circundantes y en la transferencia de calor entre los diferentes elementos presentes en el compartimento.

En el contexto del modelo CFAST, se presentarán las ecuaciones que gobiernan cada mecanismo de transferencia de calor.

2.4.1. Radiación

Comenzando con la radiación, las siguientes suposiciones se aplican:

- Se asume que cada capa de gas y cada segmento de pared están a una temperatura uniforme.
- Se asume que las temperaturas de las paredes y las capas de gas cambian lentamente durante la duración del paso de tiempo de las ecuaciones gobernantes.
- Se asume que el fuego irradia de manera uniforme en todas las direcciones emitiendo una fracción, χ_r , de la tasa total de liberación de calor. Se asume que

esta radiación proviene de un único punto. No se modela la retroalimentación de radiación al fuego ni la radiación proveniente de la columna de humo en el algoritmo de intercambio de radiación.

- Se asume que la radiación emitida es difusa y de color gris. En otras palabras, los flujos radiantes emitidos son independientes de la dirección y la longitud de onda. En una superficie sólida, la emisividad, ε , la absorptividad, α , y la reflectividad, ρ , están relacionadas mediante $\varepsilon = \alpha = 1 - \rho$. En la fase gaseosa, la emisividad, ε , la absorptancia, α , y la transmisividad, τ , están relacionadas mediante $\varepsilon = \alpha = 1 - \tau$.

- Se asume que las habitaciones o compartimentos son cajas rectangulares. Cada pared es perpendicular o paralela a todas las demás paredes. La transferencia de radiación a través de aberturas de ventilación se pierde fuera de la habitación.

La cubierta del compartimento se divide en cuatro superficies: el techo, el suelo y las secciones de pared por encima y por debajo de la interfaz de capa. El flujo radiante saliente en la superficie i consiste en un término de potencia de emisión y reflectancia dado por:

$$q''_{saliente,i} = \sigma \varepsilon_i T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) q''_{entrante,i} \quad (12)$$

donde $\ddot{q}_{entrante,i}$ es la media ponderada de todos los flujos radiantes salientes de fuentes como segmentos de pared, capas de gas e incendios. Este flujo radiante entrante está dado por:

$$q''_{entrante,i} = \left(\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^4 A_j q''_{entrante,j} F_{j-i} \tau_{j-i} \right) + c''_i \quad (13)$$

Que después de notar que $A_i F_{i-j} = A_j F_{j-i}$, se simplifica a la siguiente expresión:

$$q''_{entrante,i} = \left(\sum_{j=1}^4 q''_{entrante,j} F_{i-j} \tau_{j-i} \right) + c''_i \quad (14)$$

El término F_{j-i} representa el factor de configuración, que es la fracción de energía radiante emitida por la superficie j que es interceptada por la superficie i . Por otro lado, τ_{j-i} es la transmitancia, σ es la constante de Stefan-Boltzman, ε_i es la emisividad, T_i es

la temperatura, y c_i'' es el flujo radiante proveniente de las capas de gas y el fuego en la superficie i .

El problema ahora consiste en determinar el flujo radiante neto, $\ddot{q}_{r,i}$, en cada una de estas superficies. Este flujo se define como la diferencia entre el flujo radiante entrante y saliente:

$$\dot{q}_{r,i}'' = q_{entrante,i}'' - q_{saliente,i}'' \quad (15)$$

Combinando las ecuaciones anteriormente presentadas podemos llegar a la siguiente expresión:

$$-\frac{\dot{q}_{r,i}''}{\varepsilon_i} + \sum_{j=1}^4 \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} F_{i-j} \tau_{j-i} \dot{q}_{r,j}'' = \sigma T_i^4 - \sum_{j=1}^4 (F_{i-j} \tau_{j-i} \sigma T_i^4) - c_i'' \quad (16)$$

La radiación de los gases en las capas superior e inferior y del fuego se incluye en el último término:

$$c_i'' = \sum_{j=1}^2 \varepsilon_j F_{i-j} \sigma T_i^4 + \frac{\omega_{i-j} \chi_r \dot{Q}}{A_i 4\pi} \quad (17)$$

donde ε_j es la emisividad (absortividad) de la capa, F_{i-j} es el factor de visión entre la capa y la superficie sólida, ω_{i-j} es el ángulo sólido normalizado entre el fuego y la pared, y $\dot{Q}$ es la tasa de liberación de calor del fuego. Si la superficie sólida, i , es el suelo o la pared inferior y la capa de gas, j , es la capa superior, el factor de visión, F_{i-j} , se refiere a la interfaz de capas. Si la superficie sólida es la pared superior o el techo, el factor de visión es igual a 1.

El flujo radiante neto encontrado en la ecuación 16, al eliminar $q_{entrante,i}''$ en las ecuaciones 12 y 15, se expresa como:

$$q_{saliente,i}'' = \sigma T_i^4 + \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} \dot{q}_{r,i}'' \quad (18)$$

Los modelos que resolverán estas ecuaciones consideran la emisividad de las superficies, el ángulo de visión y la distancia para calcular el flujo de calor radiante, entre otros factores. También le dan especial importancia a la interacción entre la radiación y los gases de combustión, como el hollín y los productos gaseosos, y cómo esto puede influir

en la propagación del fuego y la transferencia de calor. Las ecuaciones tienen en cuenta los coeficientes de absorción y transmitancia para calcular la fracción de energía radiante que se transmite a través de un medio absorbente.

2.4.2. Convección

En cuanto a la convección, se exploran los procesos de transferencia de calor asociados al movimiento del aire. La convección puede ser natural, impulsada por las diferencias de densidad causadas por la variación de la temperatura, o forzada, impulsada por sistemas de ventilación mecánica. Distinguiremos dos casos, paredes-suelo y techo.

2.4.2.1. Paredes-Suelo

En general, el flujo de calor convectivo hacia una superficie sólida se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q_c'' = h(T_g - T_s) \quad (19)$$

El coeficiente de transferencia de calor convectivo, h , es una función de las propiedades del gas, la temperatura y la velocidad. En CFAST, se utilizan correlaciones simples para la convección natural, ya que la velocidad del gas es desconocida:

$$h = C|T_g - T_s|^{1/3} \quad (20)$$

donde C es un coeficiente empírico (1.52 para el suelo y el techo, en ausencia de una corriente ascendente, y 1.31 para las paredes [3]), T_g es la temperatura promedio de la capa de gas adyacente a la superficie, y T_s es la temperatura de la superficie.

2.4.2.2. Techo

Durante la etapa inicial de un incendio antes de que se forme una capa de gas caliente, la transferencia de calor convectivo al techo está gobernada por la temperatura y la velocidad de la corriente ascendente en el techo. El capítulo de Alpert en el Manual SFPE

[4] presenta una correlación empírica para el flujo de calor convectivo desde la corriente ascendente en el techo hacia una superficie relativamente fría:

$$q_c'' = 1.323f \frac{\dot{Q}_c}{H^2} \left(\frac{r}{H}\right)^{-1.36} \quad (21)$$

donde f es un factor de fricción estimado en 0,03, r es la distancia radial al eje central de la corriente ascendente, H es la altura del techo, y $\dot{Q}_c$ es la fracción convectiva de la tasa de liberación de calor. El flujo de calor convectivo medio hacia el techo se puede obtener integrando esta expresión sobre todo el techo:

$$\dot{q}_{c,medio}'' = \frac{1}{LW} \int_0^{2\pi} \int_0^R \dot{q}_c'' r dr d\theta = \frac{0.27\dot{Q}_c}{(LW)^{0.68}H^{0.64}} \quad (22)$$

Cabe destacar que la integración se realiza sobre un círculo cuya área es πr^2 , y se considera igual al área del techo, LW .

La Ecuación 22 se aplica a la etapa temprana del incendio; por lo tanto, se utiliza un coeficiente de transferencia de calor modificado para lograr una transición de la etapa temprana a las etapas posteriores cuando se ha formado una capa:

$$h = \max\left(\frac{\dot{q}_{c,medio}''}{T_u - T_s}, C|T_u - T_s|^{1/3}\right) \quad (23)$$

donde, T_u es la temperatura media de la capa superior y T_s es la temperatura superficial del techo. Observa que el término más a la derecha es simplemente la correlación utilizada para las paredes y el suelo.

2.4.3. Conducción

Para entender como calcula CFAST la conducción, habrá que describir los conceptos básicos de la conducción de calor a través de sólidos y presentar las ecuaciones que modelan la transferencia de calor en paredes y objetos sólidos. Los modelos para el cálculo de dichas ecuaciones tienen en cuenta la conductividad térmica del material, la diferencia de temperatura y el área de contacto para calcular el flujo de calor a través de las superficies.

La conducción en CFAST se calcula para paredes sólidas y “targets” (sensores de temperatura).

La ecuación de conducción de calor se resuelve en la dirección perpendicular a objetivos sólidos o superficies de pared utilizando nodos espaciados de manera no uniforme y un esquema de diferencia central de segundo orden para las derivadas espaciales.

Se actualizan las temperaturas de la superficie de la pared en el tiempo de manera implícita mediante el solucionador DASSL, que vincula las temperaturas de la superficie de la pared con las variables de la solución de gas (presiones, volúmenes de capa y temperaturas). Por otro lado, las temperaturas objetivo se actualizan en el tiempo utilizando un esquema de avance de tiempo semi-implícito. Dado que no afectan significativamente las condiciones del compartimento, no es necesario vincularlas con otras variables de solución como se hace con las temperaturas de la pared.

En cada paso de tiempo, los perfiles de temperatura de la pared se actualizan en el tiempo hasta que el flujo de calor convectivo y radiante que golpea la pared es igual al flujo de calor hacia el sólido [5].

$$\dot{q}'' = \dot{q}_r'' + \dot{q}_c'' = -k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad (24)$$

Donde k es la conductividad térmica del material de la pared. Esta estrategia de solución requiere un solucionador de ecuaciones algebraicas diferenciales (DAE) que pueda resolver simultáneamente ecuaciones diferenciales y algebraicas. Con este método, solo se requieren una o dos ecuaciones adicionales por segmento de pared (dos si se calculan tanto las temperaturas de la superficie del segmento de pared interior como exterior). Esta estrategia de solución es más eficiente que el método de líneas, ya que se necesitan resolver menos ecuaciones. Luego, la conducción se acopla al intercambio de energía de la fase de gas.

Los perfiles de temperatura de la pared y del objetivo avanzan en el tiempo utilizando la ecuación del calor. La ecuación de conducción de calor normal a la superficie sólida es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (25)$$

donde k , ρ y c_p son la conductividad térmica, la densidad y la capacidad de calor del objetivo o material de la pared. La condición de contorno utilizada en la superficie de la pared frontal es:

$$T_w(0, t) = T_w \quad (26)$$

La condición de contorno utilizada en la superficie del objetivo es:

$$\dot{q}'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (27)$$

donde $\dot{q}''$ es el flujo de calor neto convectivo y radiativo.

Se utiliza una matriz no uniforme de nodos internos para capturar gradientes pronunciados de temperatura cerca de la superficie. Definimos una profundidad de penetración de:

$$x_p = 2\sqrt{\alpha t_{final}} \operatorname{erfc}^{-1}(0.05) \quad (28)$$

donde erfc^{-1} denota la inversa de la función de error complementaria. El valor de x_p es la ubicación en una pared semi-infinita donde el aumento de la temperatura es del 5% después de t_{end} segundos. El 80% de los nodos se colocan en el lado interior de x_p y el 20% restante se coloca en el lado exterior.

La ecuación de conducción de calor en 1-D puede resolverse en coordenadas cartesianas o cilíndricas. La metodología de solución se presentará para coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (29)$$

Dividiendo el cilindro en N volúmenes de control concéntricos espaciados de manera uniforme, esta ecuación puede ser escrita en forma discretizada:

$$\begin{aligned} T_i^{n+1} - T_i^n &= \frac{\Delta t}{\Delta r} \frac{k}{\rho c_p} \left[\left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta r} \right) \frac{r_i}{r_{i-1/2}} - \left(\frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta r} \right) \frac{r_{i-1}}{r_{i-1/2}} \right] \\ &= \frac{\Delta t \alpha}{\Delta r^2} \left[(T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) \left(\frac{i}{i-0.5} \right) - (T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}) \left(\frac{i-1}{i-0.5} \right) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

Donde $\alpha = k/(\rho c_p)$, C_i y D_i son:

$$C_i = \frac{\Delta t \alpha}{\Delta r^2} \left(\frac{i-1}{i-0.5} \right) \quad ; \quad D_i = \frac{\Delta t \alpha}{\Delta r^2} \left(\frac{i}{i-0.5} \right) \quad (31)$$

La ecuación 30 se puede reescribir:

$$-C_i T_{i-1}^{n+1} + \left(1 + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}\right) T_i^{n+1} - D_i T_{i+1}^{n+1} = T_i^n \quad i = 1 \dots N - 1 \quad (32)$$

La condición de contorno aplicada al volumen de control N es:

$$T_N^{n+1} - T_N^n = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \left[\frac{\Delta r \dot{q}''}{k} \frac{N}{N - 0.5} - (T_N^{n+1} - T_{N-1}^n) \frac{N - 1}{N - 0.5} \right] \quad (33)$$

o:

$$-C_N T_{N-1}^{n+1} + (1 + C_N) T_N^{n+1} = T_N^n + D_N \frac{\Delta r}{k} \dot{q}'' \quad (34)$$

El perfil de temperatura interna, T_i , se obtiene entonces con una resolución lineal tridiagonal.

2.5. Cálculos de Protección Contra Incendios

En este apartado se presentarán diferentes métodos y ecuaciones utilizadas para calcular la activación de detectores, la supresión de incendios y la evaluación de la sostenibilidad (habitabilidad) en un escenario de incendio.

2.5.1. Detectores de Calor y Rociadores

Una de las áreas clave en los cálculos de protección contra incendios es la activación de detectores, tanto de humo como de calor. Se presentan ecuaciones y modelos que permiten estimar la temperatura y la concentración de humo necesarias para activar los detectores. Estos modelos se basan en la velocidad del gas, la temperatura ambiente y las características específicas de los detectores utilizados. Al comprender cómo funcionan estos detectores, se pueden tomar decisiones informadas sobre su ubicación y diseño en un edificio para garantizar una detección eficaz de incendios.

La temperatura de enlace de un rociador o detector de calor se modela utilizando la ecuación diferencial [6]:

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{\sqrt{v}}{RTI} (T_g - T_L) \quad (35)$$

donde T_L y T_g son las temperaturas de enlace y de gas, v es la velocidad del gas, y RTI (Índice de Tiempo de Respuesta) es una medida de la inercia térmica del sensor. La temperatura y la velocidad del gas se obtienen del algoritmo del penacho y el algoritmo de chorro del techo, descrito a continuación. Las habitaciones sin incendios no tienen chorros de techo, en cuyo caso se utiliza la temperatura de la capa superior, junto con una velocidad fija de $0,1 \text{ m/s}$. Este valor es simplemente una estimación de orden de magnitud. Las temperaturas de enlace y de gas y la velocidad son funciones del tiempo; el RTI es una constante para un tipo de detector dado.

La ecuación del detector se resuelve numéricamente utilizando el esquema de actualización semi-implícito:

$$\frac{T_L^{n+1} - T_L^n}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{v^n}}{RTI} (T_g^n - T_L^n) + \frac{\sqrt{v^{n+1}}}{RTI} (T_g^{n+1} - T_L^{n+1}) \right) \quad (36)$$

2.5.2. Visibilidad

El cálculo de la visibilidad depende únicamente de la concentración de hollín. La producción de hollín es especificada por el usuario en términos de rendimiento. El hollín se transporta como todas las demás especies de gas y su concentración se utiliza en el cálculo de la densidad óptica. La densidad óptica por unidad de distancia, D_u , está dada por la expresión:

$$D_u = \frac{K_m m_s'''}{\ln 10} \quad (37)$$

donde m_s''' es la masa de hollín por unidad de volumen y K_m es el coeficiente de extinción específico. El valor predeterminado es $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ basado en la recomendación de Mulholland [7]. A partir de la densidad óptica, la obstrucción porcentual por unidad de distancia, O_u , se puede calcular a partir de las definiciones de densidad óptica y obstrucción porcentual como una función de la atenuación de luz [6] como:

$$D_u = \frac{1}{d} \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right), O_u = 100 \left(1 - \left(\frac{I_0}{I} \right)^{\frac{1}{d}} \right) \rightarrow O_u = 100 \frac{10^{D_u} - 1}{10^{D_u}} \quad (38)$$

lo cual se utiliza para determinar la activación del detector de humo, como se detalla a continuación.

2.5.3. Detectores de Humo

CFAST estima la activación de los detectores de humo basándose en la concentración de humo o la temperatura en la ubicación del detector.

- Para la respuesta del detector de humo basada en la obstrucción del humo, se compara el porcentaje de obstrucción calculado en la capa donde se encuentra el detector con un valor especificado por el usuario. Se asume un valor de activación predeterminado del 24 %/m (8 %/ft) de obstrucción para ambos detectores de humo, de ionización y fotoeléctricos [8]. CFAST no contiene un algoritmo que tenga en cuenta el retraso temporal debido al transporte de humo desde el fuego hasta la ubicación del detector, ni la penetración de humo en la cámara del detector en sí.
- CFAST también puede considerar un detector de humo como un detector de calor muy sensible con un aumento de temperatura de activación de 5°C y un RTI de $5\sqrt{ms}$. La estimación del aumento de temperatura se basa en un estudio realizado por Bukowski y Averill [9]. El RTI no se basa en experimentos, es sumamente importante puesto que determina en gran medida el tiempo de activación del detector.

2.5.4. Extinción de Incendios

La supresión de incendios por agua se predice utilizando un modelo empírico simple desarrollado por Madrzykowski [10] y Evans [11]. Después de la activación del rociador, $t > t_{activación}$, se supone que la tasa de liberación de calor disminuye exponencialmente:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}(t_{activación})e^{-(t-t_{activación})/\tau} \quad ; \quad \tau = 3u_w^{-1.8} \quad (39)$$

donde u_w es la densidad de la pulverización de agua, expresada en unidades de mm/s . Las tasas de producción de masa de las especies de productos se reducen en la misma cantidad que la tasa de liberación de calor.

2.5.5. Sostenibilidad (Habitabilidad)

La norma 13571 de la Organización Internacional de Normalización (ISO) [12] proporciona métodos para estimar el tiempo hasta condiciones insostenibles que pueden resultar de un incendio. Se utilizan métricas como la dosis efectiva fraccionada (FED, por sus siglas en inglés) para estimar la exposición acumulada a condiciones insalubres durante un incendio. Estos cálculos se basan en modelos que consideran la concentración de gases tóxicos, el flujo de calor radiante y las temperaturas en el entorno del incendio. Estos cálculos permiten evaluar los riesgos para la vida humana y tomar medidas adecuadas para garantizar la seguridad de las personas en caso de un incendio [12].

Para los gases asfixiantes, esto es una función de la concentración de CO y HCN ,

$$\chi_{FED} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\varphi_{CO} \cdot v_{CO_2}}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{(\varphi_{HCN} \cdot v_{CO_2})^{2.36}}{1,2 \times 10^6} \Delta t \quad (40)$$

donde φ_{CO} es la concentración promedio de CO durante el incremento de tiempo Δt en $\mu L/L$, φ_{HCN} es la concentración promedio de HCN durante el incremento de tiempo Δt en $\mu L/L$, y $v_{CO_2} = e^{\varphi_{CO_2}/5}$ se utiliza para tener en cuenta un aumento de la tasa de gases asfixiantes debido a la hiperventilación donde φ_{CO_2} es la concentración molar promedio de CO_2 durante el incremento de tiempo Δt .

Para el calor radiante y convectivo, el FED se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\chi_{FED} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{1}{4.2 \dot{q}''^{-1.9}} \Delta t + \frac{1}{4,1 \times 10^8 T^{-3.61}} \Delta t \quad (41)$$

Donde $\dot{q}''$ es el flujo de calor radiante en kW/m^2 y T es la temperatura en $^{\circ}C$. Para ubicaciones de destino donde el flujo radiante es inferior a $2.5 kW/m^2$, el término de calor radiante se considera cero, de acuerdo con ISO 13571.

Este apartado es de gran importancia puesto que, mediante el uso de ecuaciones y modelos específicos, se pueden tomar decisiones informadas sobre la ubicación y el diseño de los sistemas de protección contra incendios, lo que contribuye a la seguridad de las personas y la protección de los bienes en caso de un incendio.

3. Uso de CFAST

3.1. Introducción al uso de CFAST

Esta sección se dedicará a una introducción con un ejemplo de cómo utilizar CFAST. Una vez se tenga el programa instalado a partir de la página web de NIST, habrá que abrir la carpeta Windows (C:) desde Este equipo para encontrar Program Files donde se buscará otra carpeta bajo el nombre de firemodels. Dentro de esta carpeta habrá dos más y tendremos que abrir la que tiene el nombre de cfast7, la otra carpeta se llama SMV6, que viene de smokeview el cual es el programa responsable de la visualización. Antes de ponerse a diseñar el modelo, se simulará uno de los ejemplos que viene incluido por defecto cuando nos descargamos CFAST. Lo primero que me parece importante nombrar es el archivo térmico y que, por lo tanto, contiene las propiedades térmicas para diversos materiales. Se mostrará a continuación su ubicación y cómo agregarlos al modelo de manera rápida y fácil. Este archivo técnico es un archivo de valores separado por comas (CSV) que tiene el nombre de termal y se encuentra dentro de la carpeta de cfast7 que se ha nombrado anteriormente. A continuación, abriremos la aplicación del simulador que se encuentra bajo el nombre de CEdit, en la figura 3 se enseña lo que debería de mostrar la pantalla.

3.2. Variables de Entrada

En este apartado se verán las variables que se pueden introducir en nuestro modelo de simulación CFAST [13].

3.2.1. Entorno de Simulación

Procederemos a abrir nuestra primera simulación que como ya hemos dicho anteriormente, nos encontramos con varias por defecto una vez instalamos CFAST. Elegimos el ejemplo nombrado como Users_Guide_Example puesto que es el más básico de todos y esto al fin y al cabo es un tutorial/introducción para entender el funcionamiento de este modelo. En la parte inferior de la pantalla, por debajo de las cinco casillas/botones (Open, Save, Geometry, Run and View) se muestra la pantalla de los mensajes de error, por lo que mostraremos como a medida que avanzamos si nuestro archivo de entrada contiene algún error, aparecerán aquí. No es para nada una manera infalible de saber si nuestro modelo es correcto, pero los errores obvios aparecen lo cual resulta bastante útil. Una vez abierto el archivo de ejemplo, habremos podido notar como algunas cosas han cambiado en esta primera página, en la pestaña de simulación, que es la pestaña actual y la que se abre por defecto, pero no es ningún problema puesto que esto es simplemente porque el ejemplo venía con unos parámetros de simulación ya definido como son los parámetros térmicos de simulación (temperatura, humedad, presión). Los parámetros que se definen en esta primera pestaña son los siguientes:

1. **Tiempo de simulación:** la longitud de tiempo que dura la simulación. El valor máximo para esta entrada es de 86400s que si les suena la cifra es porque son los segundos existentes en un día. [s] → En nuestro ejemplo es de
2. **Intervalo Impresión Datos de Salida:** el tiempo entre cada impresión de los datos de salida. [s]
3. **Intervalo Informe:** CFAST puede generar los resultados de la simulación (datos de salida) en un archivo de valores delimitado por comas (CSV), este parámetro define el intervalo de tiempo entre dichas salidas. [s]
4. **Intervalo Smokeview:** CFAST puede generar un subconjunto de los resultados en un formato compatible con el programa de visualización Smokeview, este parámetro (entrada) define el intervalo de tiempo entre las salidas de estos resultados. [s]
5. **Máximo Intervalo de Tiempo:** CFAST resuelve ecuaciones diferenciales para llegar a los resultados y por lo tanto, ajusta automáticamente el intervalo de tiempo para que la solución de la ecuación diferencial sea lo más eficiente posible dentro de las tolerancias de error predefinidas. Este parámetro define un valor máximo

para el solucionador de ecuaciones y normalmente se suele dejar con el predeterminado (2s) pero puede darse el caso en el que nuestro modelo no logre converger en una solución, por lo que habrá que reducir este parámetro. [s]

6. **Temperatura Interior:** temperatura ambiente inicial dentro de nuestra estructura. [°C]
7. **Temperatura Exterior:** temperatura ambiente inicia en el exterior (medio). [°C]
8. **Humedad:** la humedad relativa inicial en el sistema (solo se especifica la del interior de la estructura). [%RH]
9. **Presión:** presión atmosférica ambiente inicial, solo se introduce un valor porque es el mismo número tanto en el interior como en el exterior. [Pa]
10. **Superficies Adiabáticas de Compartimentos:** cuando esta casilla está seleccionada, el modelo asume que todas las superficies son perfectos aisladores. Este parámetro es útil cuando no existe transferencia de calor entre las paredes de los compartimentos.
11. **Límite Inferior del Oxígeno:** CFAST aplica un límite en su modelo limitando la velocidad de combustión a medida que el nivel de oxígeno disminuye hasta alcanzarlo (LOL: Lower Oxygen Limit). Este límite se incorpora mediante una suave disminución de la velocidad de combustión cerca del límite. [%]

En las siguientes capturas de pantalla que iremos introduciendo se muestra la configuración de los parámetros de cada pestaña de nuestra simulación de ejemplo.

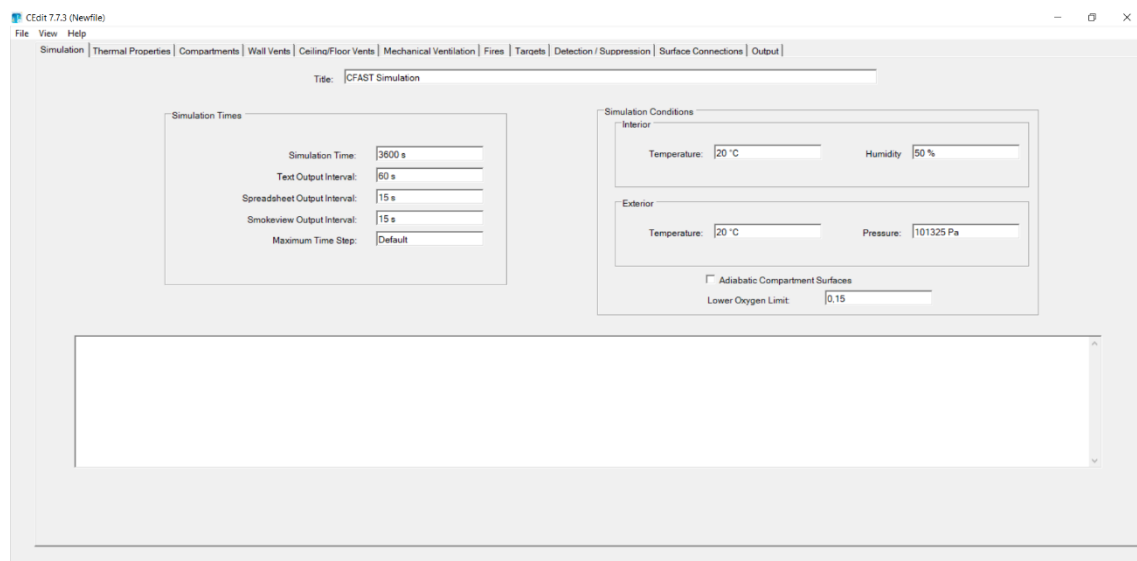


Figura 3: Entorno de Simulación

3.2.2. Propiedades Térmicas Materiales

Podemos ver cómo hay una variedad de pestañas y que la siguiente después de la de simulación es la de propiedades térmicas en la que inicialmente nos aparecen solo las características del siguiente material: Concrete Normal Weight (6 in), pero para poder diseñar edificios con distintos materiales (que es lo normal y lo más realista) tendremos que añadir el archivo térmico del que hemos hablado antes para tener las características de un mayor número de materiales (como observación este archivo almacena un total de 45 materiales distintos). Las características de los materiales son:

1. **Conductividad Térmica** (Thermal Conductivity) [kW/(m·K)]
2. **Calor Específico** (Specific Heat) [kJ/(kg·K)]
3. **Densidad** (Density) [kg/m3]
4. **Espesor** (Thickness) [m]
5. **Emisividad** (Emissivity): la fracción de radiación absorbida por el material.

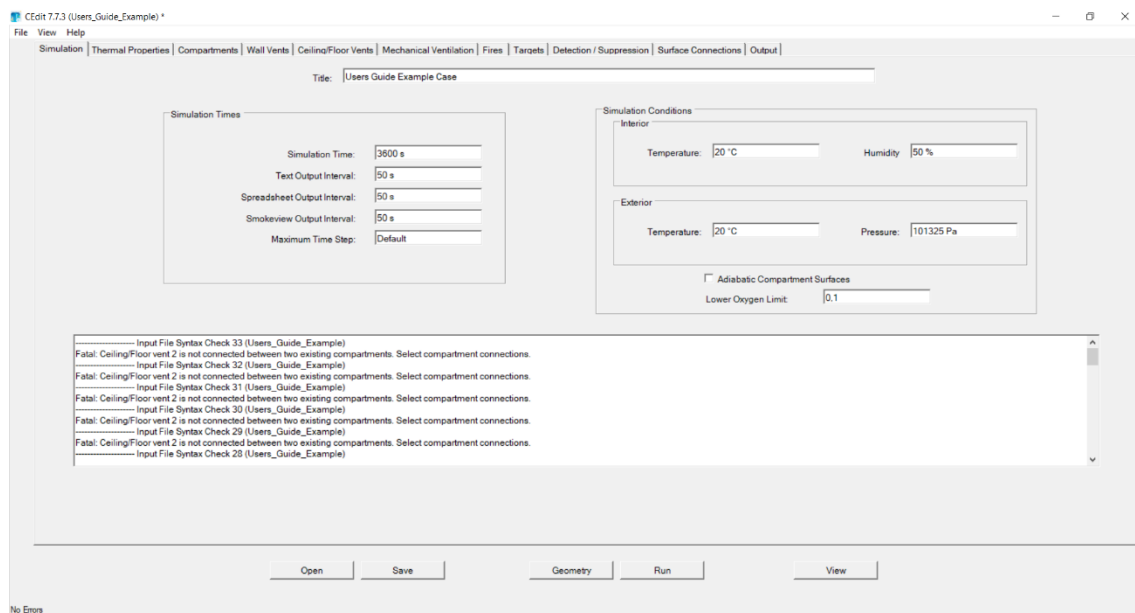


Figura 4: Propiedades Térmicas de los Materiales

3.2.3. Geometría de los Compartimentos

La tercera pestaña es la relacionada al diseño de compartimentos (Compartments) en la que encontramos la manera de diseñar cuantos compartimentos tendrá nuestro edificio y su estructura, en este ejemplo existen un total de 3 compartimentos. Los parámetros más importantes en esta pestaña son las coordenadas que ocupan cada compartimento en nuestro sistema de referencia, estas indican la posición del compartimento y serán X, Y, Z como se muestra en la figura a continuación. Las coordenadas cartesianas que generan estos 3 puntos marcan la esquina inferior izquierda respecto del plano XZ como se muestra en la siguiente imagen.

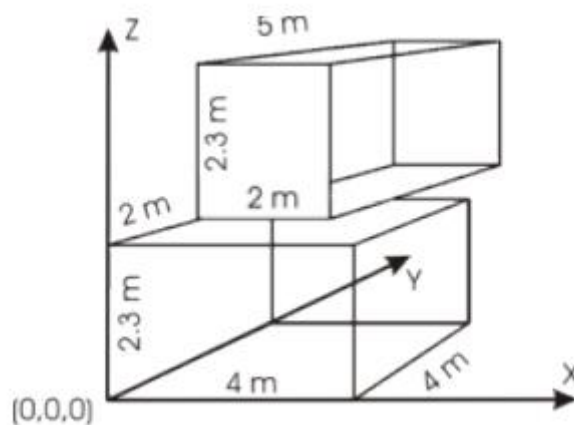


Figura 5: Posición del Compartimento

Esta pestaña se podría resumir en el diseño general de nuestro edificio y sus materiales. Por ejemplo, cómo podemos ver en la imagen a continuación el primer compartimento ocupa las siguientes coordenadas cartesianas (0, 0, 0) por lo que tomaremos como nuestro origen como es lógico. Mientras que el segundo compartimento tiene las coordenadas (5, 0, 0) y el tercero (5, 0, 3), es decir, que nuestro segundo compartimento está 5 metros separado del primero y el tercero está sentado encima del segundo, pero 3 metros por encima. Es importante acordarse de que las posiciones no admiten valores negativos, es decir, no puede haber un compartimento diseñado con coordenadas negativas. También observamos como todos los materiales (tanto techo, como paredes, como suelo) son del hormigón predeterminado por CFAST que hemos nombrado anteriormente, Concrete Normal Weight (6 in).

También hay que definir los siguientes 3 parámetros que nos indican las dimensiones de los compartimentos:

1. **Ancho** (Width): este parámetro especifica el ancho del compartimento medido a lo largo del eje X desde el origen (0,0,0).
2. **Profundidad** (Depth): este parámetro especifica el ancho del compartimento medido a lo largo del eje Y desde el origen (0,0,0).
3. **Altura** (Height): este parámetro especifica el ancho del compartimento medido a lo largo del eje Z desde el origen (0,0,0).

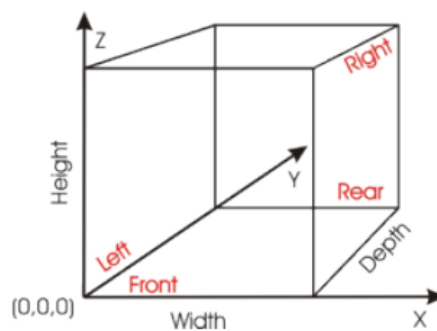


Figura 6: Tamaño del Compartimento

En esta pestaña también se definen unos parámetros que se ven afectados por la elección de los materiales de nuestra construcción:

1. **Material Techo:** se pueden seleccionar hasta 3 materiales (que estén incluidos en la pestaña de Propiedades Térmicas ya vista anteriormente).
2. **Espesor Techo:** espesor de cada capa de la superficie del techo, es importante saber que si no se introduce ningún valor CFAST cogerá por defecto el definido en las propiedades del material.
3. **Material Pared:** se pueden seleccionar hasta 3 materiales (que estén incluidos en la pestaña de Propiedades Térmicas ya vista anteriormente).
4. **Espesor Pared:** espesor de cada capa de la superficie del techo, es importante saber que si no se introduce ningún valor CFAST cogerá por defecto el definido en las propiedades del material.

5. **Material Suelo:** se pueden seleccionar hasta 3 materiales (que estén incluidos en la pestaña de Propiedades Térmicas ya vista anteriormente).
6. **Espesor Suelo:** espesor de cada capa de la superficie del techo, es importante saber que si no se introduce ningún valor CFAST cogerá por defecto el definido en las propiedades del material.

Considero importante saber también que, si no se incluyen las propiedades termo físicas de las superficies incluidas, CFAST las tratará como adiabáticas (sin transferencia de calor).

Para compartimentos altos o alejados de la sala de origen del incendio, el compartimento puede ser modelado como “single, well-mixed zone” en lugar del supuesto predeterminado de dos zonas. Esto se debe a que la estratificación de las dos zonas es menos pronunciada que en los compartimentos más próximos al fuego o en situaciones donde no se produce la estratificación. Un ejemplo es un ascensor. Al especificar el compartimento como un pasillo de emergencia (Corridor), la temperatura de fuego en el techo (“ceiling jet”) se calcula con una correlación empírica distinta que resulta que se obtiene una temperatura más alta cerca del techo. Esto genera un impacto importante en nuestro simulador como por ejemplo puede ser en detectores cerca del techo en los pasillos de emergencia.

1. **Normal** (“Two-zone model”): las condiciones del compartimento se calculan como siempre (por defecto).
2. **“Single-zone model”**: las condiciones del compartimento se calculan como un modelo de una sola zona.
3. **Pasillos de Emergencia** (Corridor): las condiciones del compartimento se calculan con el enfoque normal, con un modelo de dos zonas. Como se ha explicado antes, la temperatura de fuego en el techo “ceiling jet” se calcula con una correlación empírica específica de los pasillos de emergencia.

Lo último que habrá que modelar en la pestaña del diseño de compartimentos será las fugas a través de paredes y suelos:

1. **Fugas Paredes:** ratio de área en la que está el área de fuga en el numerador y el área de la pared en el denominador.

2. **Fugas Suelos:** ratio de área en la que está el área de fuga en el numerador y el área del suelo en el denominador.

A continuación, veremos una tabla con ejemplos de diferentes situaciones con los valores de ratios de áreas de fugas que se utilizan en cada caso [14]:

Construction Element	Leakage	Leakage Area (m^2/m^2) Leakage Area per Unit Wall Area
Exterior building walls (includes construction cracks and cracks around windows and doors)	Tight	5.0×10^{-5}
	Average	1.7×10^{-4}
	Loose	3.5×10^{-4}
	Very Loose	1.2×10^{-3}
Stairwell walls (includes construction cracks but not cracks around windows and doors)	Tight	1.4×10^{-5}
	Average	1.1×10^{-4}
	Loose	3.5×10^{-4}
Elevator shaft walls (includes construction cracks but not cracks around doors)	Tight	1.8×10^{-4}
	Average	8.4×10^{-4}
	Loose	1.8×10^{-3}
Construction Element	Leakage	Leakage Area (m^2/m^2) Leakage Area per Unit Floor Area
Floors (includes construction cracks and gaps around penetrations)	Tight	6.6×10^{-6}
	Average	5.2×10^{-5}
	Loose	1.7×10^{-4}

Tabla 1: Flujos de Área a través de Paredes y Suelos en Edificios Comerciales

La geometría de los compartimentos admite dos entradas más, estas son:

1. **Valor Altura:** altura del suelo del compartimento. [m]
2. **Valor Área:** sección transversal para la altura definida en la anterior variable. [m²]

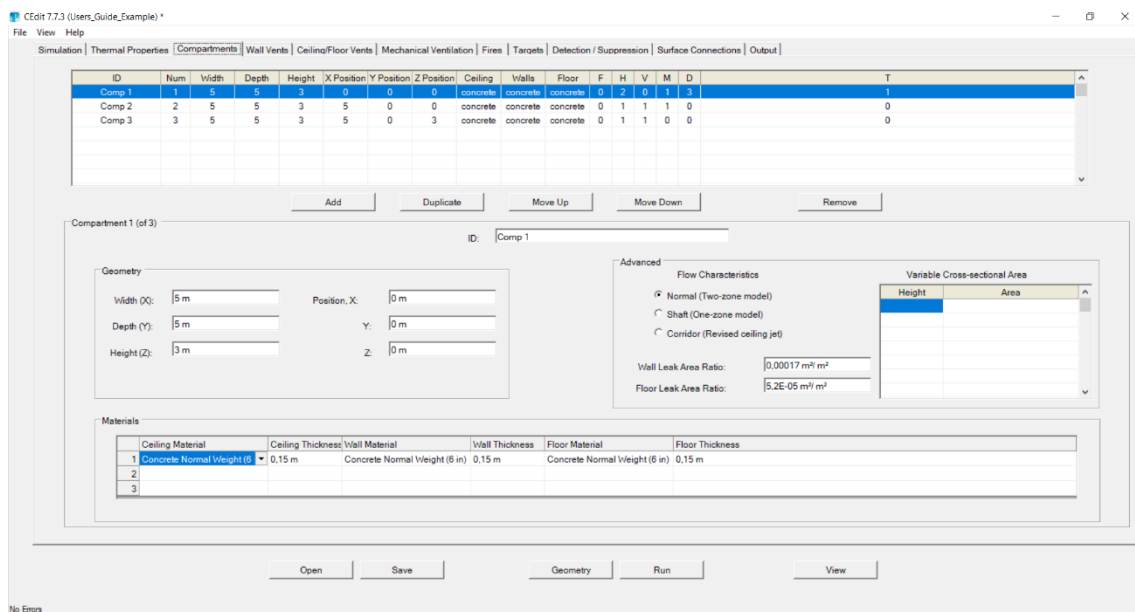


Figura 7: Geometría de los Compartimentos

3.2.4. Ventilación Natural

Las dos siguientes pestañas son las que definen los parámetros para la ventilación natural, sus nombres son: Wall Vents, Ceiling/Floor Vents. Las Wall Vents pueden ser puertas o ventanas que conectan los distintos compartimentos entre sí o por supuesto, con el exterior también. Los parámetros que se pueden definir en esta pestaña son los siguientes:

1. **Primer Compartimento:** el primer compartimento unido mediante una puerta o una ventana.
2. **Segundo Compartimento:** el segundo compartimento unido mediante una puerta o una ventana.
3. **Umbral (Sill):** altura de la parte inferior de la abertura con respecto al piso del primer compartimento. [m]
4. **Sofito (Soffit):** altura de la parte superior de la abertura con respecto al piso del primer compartimento. [m]
5. **Ancho (Width):** la anchura de la abertura. [m]
6. **Fracción de abertura inicial:** fracción entre 0 y 1 que indica si la puerta o la ventana esta parcialmente abierta al inicio de la simulación (1 totalmente abierto).
7. **Criterio abierto/cerrado:** en este parámetro se define el criterio según el cual nuestras aberturas están abiertas o cerradas (variable continua), estos criterios

pueden ser 3 distintos: Tiempo [s], Temperatura o Flujo de calor. Esta variable nos puede resultar útil para definir si durante el tiempo de nuestra simulación se abrió una puerta o ventana, por ejemplo.

8. **Fracción de abertura final:** fracción entre 0 y 1 que indica si la puerta o la ventana esta parcialmente abierta al final de la simulación (1 totalmente abierto).
9. **Ajuste de la abertura (Vent offset):** solo afecta a la visualización, pero es la distancia horizontal del borde cercano de la ventilación y el origen definido por la cara (siguiente variable más abajo Face) seleccionada en el primer compartimento. Delante (Front) y Trasero (Rear) están a lo largo del eje X y Derecho y Izquierdo están a lo largo del eje Y.
10. **Cara (Face):** la pared en la cual está posicionada la abertura. Las elecciones son como hemos visto antes: Delante, Trasero, Derecho e Izquierdo y son relativas al plano XZ.

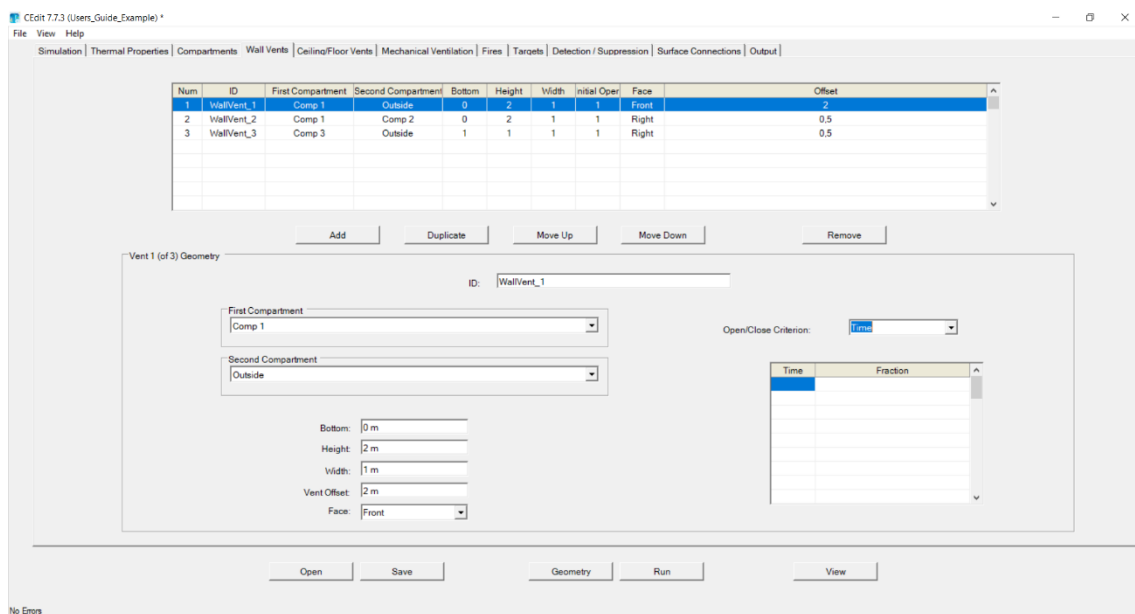


Figura 8: Ventilación en Superficies Horizontales

La siguiente pestaña es la nombrada anteriormente: Ceiling/Floor Vents. Como nos podemos imaginar es muy parecida a la pestaña de Wall Vents pero ahora en el suelo y techo en vez de en las paredes. Los parámetros que hay que definir son los siguientes:

1. **Compartimento superior:** la abertura se encuentra en el suelo del compartimento definido.
2. **Compartimento inferior:** la abertura se encuentra en el techo del compartimento definido.
3. **Área de la sección transversal:** [m2]
4. **Forma:** el parámetro de forma cambia los cálculos del diámetro efectivo de la abertura y los coeficientes de flujo a través de la abertura.
5. **Fracción de abertura inicial:** fracción entre 0 y 1 que indica si la puerta o la ventana esta parcialmente abierta al inicio de la simulación (1 totalmente abierto).
6. **Criterio abierto/cerrado:** en este parámetro se define el criterio según el cual nuestras aberturas están abiertas o cerradas (variable continua), estos criterios pueden ser 3 distintos: Tiempo, Temperatura o Flujo de calor. Esta variable nos puede resultar útil para definir si durante el tiempo de nuestra simulación se abrió una puerta o ventana, por ejemplo.
7. **Fracción de abertura final:** fracción entre 0 y 1 que indica si la puerta o la ventana esta parcialmente abierta al final de la simulación (1 totalmente abierto).

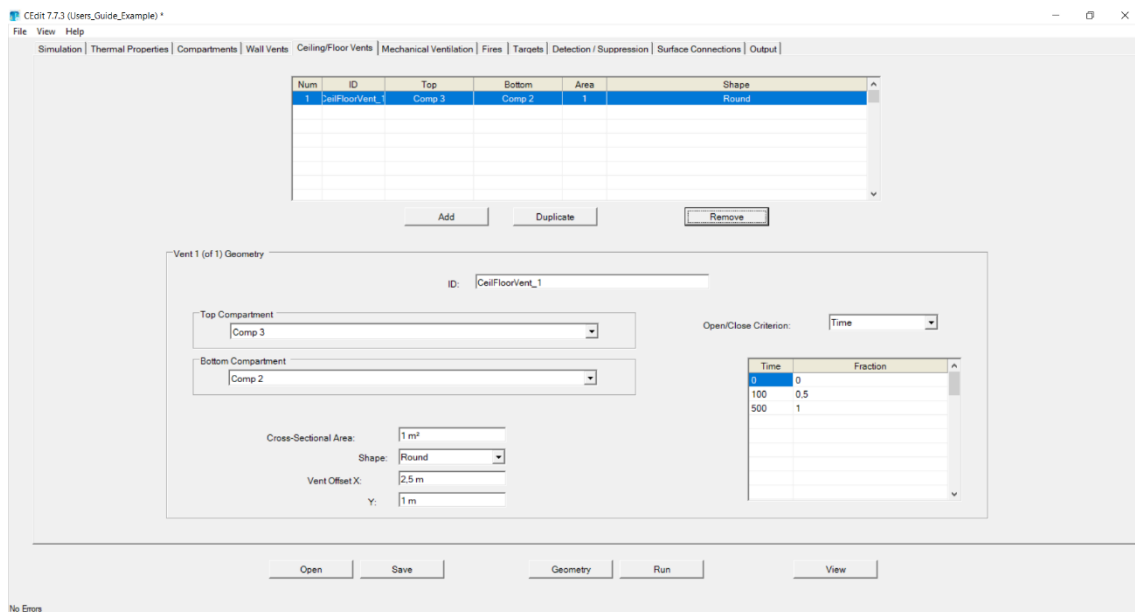


Figura 9: Ventilación en Superficies Verticales

3.2.5. Ventilación Mecánica

Esta pestaña trata la ventilación mecánica y son conductos de ventilación utilizados en los edificios para la calefacción, aire acondicionado, presurización y extracción. Generalmente, sistemas que se mantienen en condiciones aceptables tienen 1 o 2 ventiladores. Los parámetros por definir en esta sección son los siguientes:

1. **Primer compartimento:** el compartimento desde el que el flujo del ventilador se origina.
2. **Segundo compartimento:** el compartimento desde el que el flujo del ventilador termina.
3. **Área:** sección transversal de la apertura. [m²]
4. **Altura Centro:** altura del punto medio del conducto por encima del suelo. [m]
5. **Orientación:** un difusor horizontal implica un flujo vertical y de igual manera en viceversa. (por defecto se la orientación del difusor será horizontal).
6. **Ajuste Salida:** solo afecta a la visualización, pero es la distancia horizontal entre el centro de la salida del conducto al origen de los ejes X e Y en el primer compartimento. [m]
7. **Tiempo:** tiempo en el que durante la simulación se abre o se cierra el conducto. [s]
8. **Fracción:** número que oscila entre 0 y 1 que determina la abertura del conducto (1 indica que está totalmente abierto el conducto).
9. **Criterio abierto/cerrado:** en este parámetro se define el criterio según el cual nuestros difusores están abiertos o cerrados (variable continua), estos criterios pueden ser 3 distintos: Tiempo [s], Temperatura o Flujo de calor.
10. **Punto Clave (Set point):** el valor crítico a partir del cual la apertura del conducto ocurrirá.
11. **Punto de Desencadenamiento (Trigger Target):** el valor escogido por el usuario utilizado para calcular la temperatura de superficie o el flujo de calor incidente que desencadene la acción de que el conducto se abra o se cierre.
12. **Fracción Pre-Activación:** fracción entre 0 y 1 que indica la situación de apertura del conducto previo a la simulación (1 indica totalmente abierto).
13. **Fracción Post-Activación:** fracción entre 0 y 1 que indica la situación de apertura del conducto posterior a la simulación (1 indica totalmente abierto).

14. **Tasa de Flujo:** la tasa de flujo constante proveniente del ventilador. [m³/2]
15. **Presión 0 Flujo:** la presión a partir de la cual el flujo es 0. [Pa]
16. **Eficiencia del Filtro:** muchas veces el flujo a través de conductos mecánicos incluye filtraje y eso reduce la eficiencia de los ventiladores. [%]
17. **Inicio Filtraje:** momento de tiempo en el que el filtraje comienza. [s]

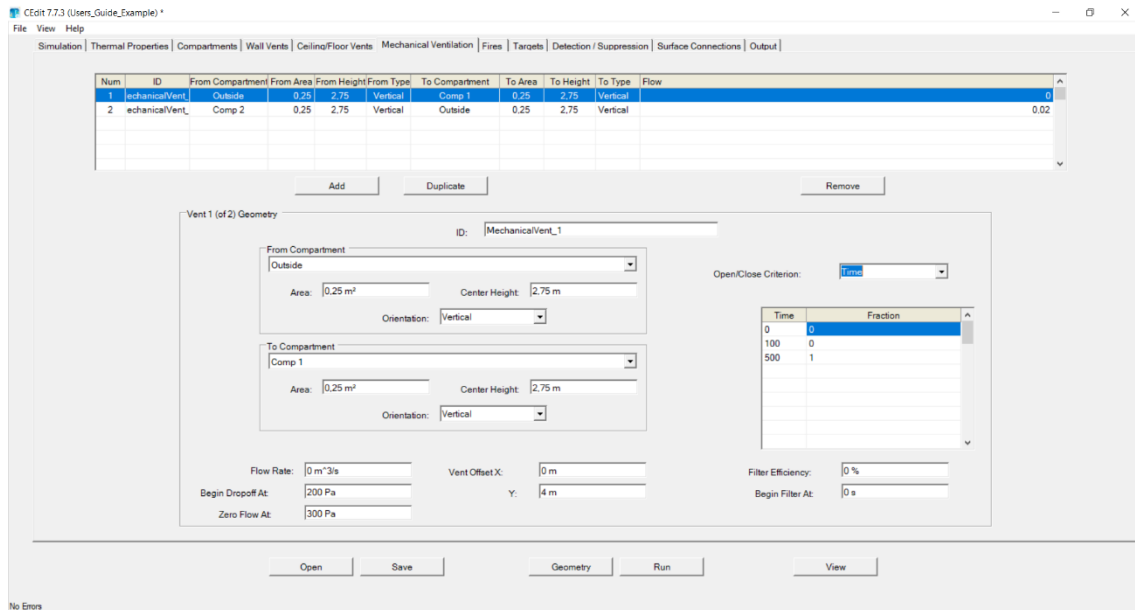
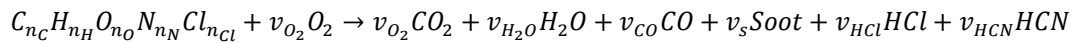


Figura 10: Ventilación Mecánica

3.2.6. Incendios

Entramos a explicar el funcionamiento de la pestaña de incendios ahora, lo primero que hay que saber es que un incendio en CFAST se especifica a través de una tasa de liberación de calor que depende del tiempo o “time-dependent heat release rate” (HRR). El calor específico de combustión se utiliza para calcular la tasa de pérdida de masa de combustible, de la cual la tasa de producción de los productos de combustión se puede calcular utilizando rendimientos de productos específicos. La liberación de calor y las tasas de generación de producto correspondientes van a cero cuando se alcanza el límite inferior de oxígeno, y son reemplazadas por la tasa apropiada de producción de gas combustible sin quemar que es transportado de zona a zona hasta que haya suficiente oxígeno y una temperatura suficientemente alta para soportar la combustión. El modelo puede simular múltiples incendios en uno o más compartimentos. Estos incendios son

tratados como entidades totalmente separadas, sin interacción de las columnas de gases creadas por la reacción de combustión provocadas por el incendio (plumes). Estos fuegos pueden encenderse en un tiempo prescrito, o cuando se diseña el modelo con un objetivo concreto como puede ser alcanzar una temperatura o alcanzar un flujo de calor específico. El modelo de combustión se define por la siguiente reacción de un solo paso:



Como nota me parece importante añadir que se asume que todo el nitrógeno y todo el cloro en el combustible se convierten en HCN y HCl.

Los parámetros que habrá que definir en esta pestaña serán los siguientes:

1. **Compartimento:** nombrar los compartimentos donde el incendio se origina.
2. **Posición X, Y:** posición del centro de la base del fuego relativo a la esquina en la cara frontal inferior izquierda del compartimento. [m]
3. **Criterio Encendido:** el momento de comienzo del incendio que puede definirlo el usuario según 3 variables, la primera es el tiempo [s], la segunda la temperatura superficial y la última el flujo de calor incidente.
4. **Punto Clave (Set point):** el valor crítico a partir del cual el incendio comienza.
5. **Punto de Desencadenamiento (Trigger Target):** el valor escogido por el usuario utilizado para calcular la temperatura de superficie o el flujo de calor incidente que desencadene la acción de que el incendio comience.
6. **Incendio Referenciado:** el nombre asociado a cada incendio, esto es necesario puesto que cada incendio puede ser distinto y tener diferentes propiedades como las que veremos a continuación.
7. **C, H, O, N, Cl:** el número de cada átomo en la molécula de combustible.
8. **Calor de Combustión:** la energía liberada por unidad de masa de combustible consumido. [kJ/kg]
9. **Fracción Radioactiva:** la fracción de la energía de combustión que es emitida en forma de radiación térmica.
10. **Tiempo:** tiempo desde el comienzo del incendio. [s]
11. **HRR (Heat Release Rate):** cantidad de calor liberado en el incendio. [kW]
12. **Altura:** altura de la base del incendio. [m]
13. **Área:** área de la base del incendio. [m²]

14. **CO Producido:** masa de CO producido por unidad de masa de combustible consumido. [kg/kg]
15. **Hollín Producido:** masa de hollín producido por unidad de masa de combustible consumido. [kg/kg]
16. **HCN Producido:** masa de HCN producido por unidad de masa de combustible consumido. [kg/kg]
17. **TS Producido:** masa de TS producido por unidad de masa de combustible consumido. [kg/kg]

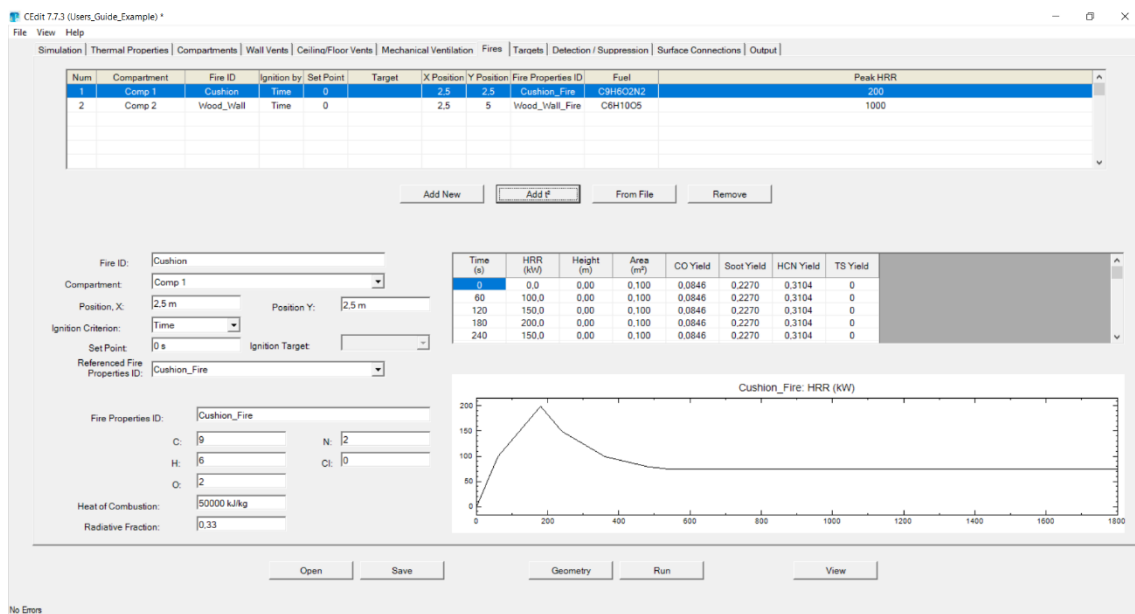


Figura 11: Pestaña de Incendios

Si queremos crear un nuevo incendio, cuya función de calor liberado creciese como un tiempo al cuadrado, tendremos que definir los siguientes parámetros:

1. **Velocidad Crecimiento Incendio:** dentro de esta entrada habrá que definir una categoría de velocidad, esta será despacio, medio, rápido o ultra-rápido. Estas categorías responden a la siguiente relación, se alcanza 1054kW (1000 BTU/s) en 600s, 300s, 150s, 75s.
2. **Tiempo Pico:** el tiempo que tarda el incendio en alcanzar el pico HRR. [s]
3. **Pico HRR:** el pico de calor liberado por el incendio t-cuadrado.

4. **Periodo Encendido Estable:** duración de tiempo que el incendio continúa encendido al ritmo especificado por el pico HRR. [s]
5. **Tiempo Caída (Decay Time):** duración de tiempo para que el incendio caiga hasta el valor de cero. [s]

La expresión sería la siguiente:¹

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{peak} \left(\frac{t}{t_{peak}} \right)^2$$

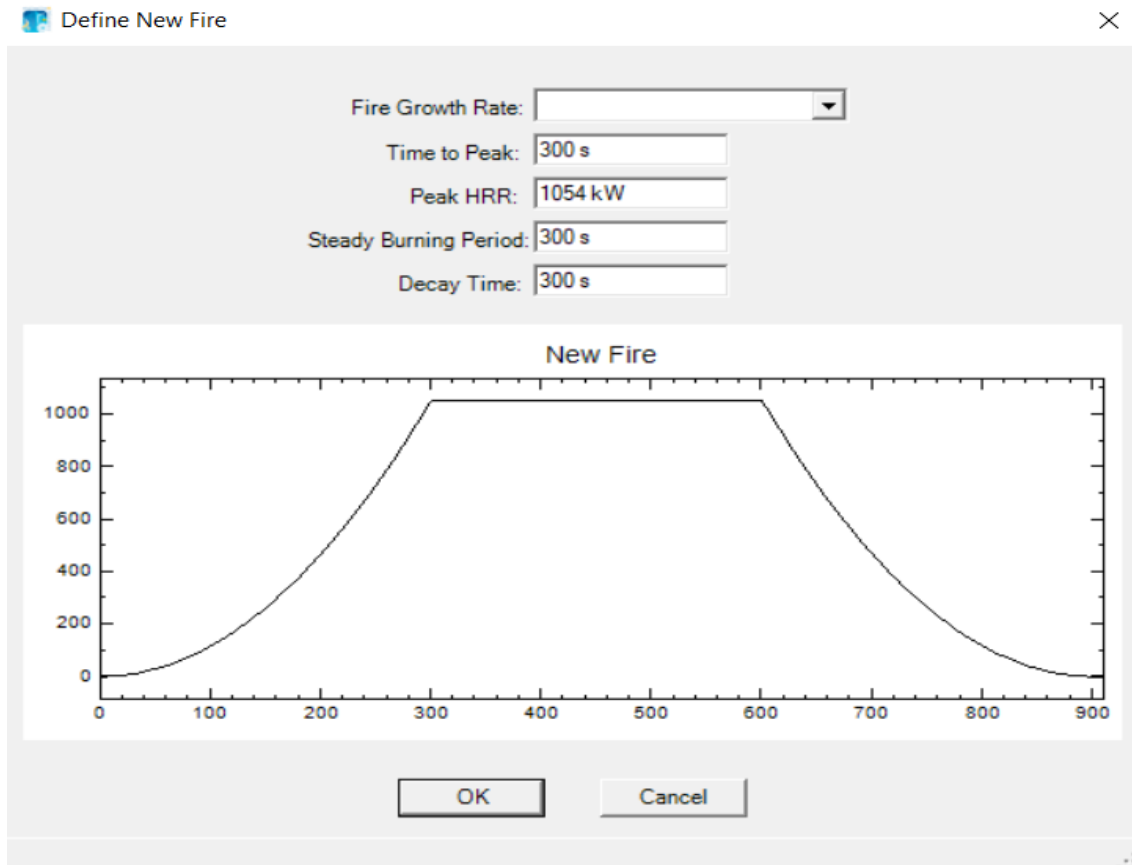


Figura 12: Incendios expresión t-cuadrado

¹ Número Froude de Fuego es un parámetro adimensional utilizado para caracterizar el comportamiento de las llamas y los penachos de fuego. Se define como la relación entre la velocidad de advección de la llama y la tasa de producción de gases calientes por flotabilidad. Cuando el Número Froude de Fuego es menor que uno, la flotabilidad domina y las llamas tienden a ser impulsadas por la flotabilidad, mientras que cuando el Número Froude de Fuego es mayor que uno, la advección domina y las llamas tienden a ser arrastradas por el flujo circundante.

3.2.7. Medidas y Sistemas anti-incendios

A continuación, entramos en los dispositivos de medida y protección contra incendios, un “target” (sensor de temperatura) es cualquier objeto en la simulación que pueda calentarse a través de la transferencia de calor por radiación y convección. La conducción de calor hacia el objetivo se realiza a través de un cálculo unidimensional en coordenadas cartesianas o cilíndricas.

Los parámetros que hay que definir dentro de la pestaña de objetivos son los que se presentan a continuación:

1. **Compartimento:** compartimento en el que se encuentra localizado nuestro objetivo.
2. **Tipo Objetivo:** existen 2 tipos, tipo lámina o tipo cilíndrico. CFAST resuelve una ecuación diferencial en coordenadas cartesianas si es tipo lámina, y en coordenadas cilíndricas si es tipo cilíndrico.
3. **Ancho (X):** distancia respecto a la pared de la izquierda del compartimento seleccionado. [m]
4. **Profundidad (Y):** distancia respecto a la pared frontal del compartimento seleccionado. [m]
5. **Altura (Z):** altura del objetivo respecto del suelo. [m]
6. **Vector Normal (X, Y, Z):** especifica un vector de una unidad de longitud que está en la dirección y sentido (apunta) de la superficie expuesta del objetivo.
7. **Material:** el material del que está hecho el objetivo, cualquier material dentro de la lista definida en la pestaña de propiedades térmicas puede utilizarse.
8. **Temperatura Interna:** para cada objetivo, CFAST calcula la temperatura interna en distintos puntos dentro del objetivo.

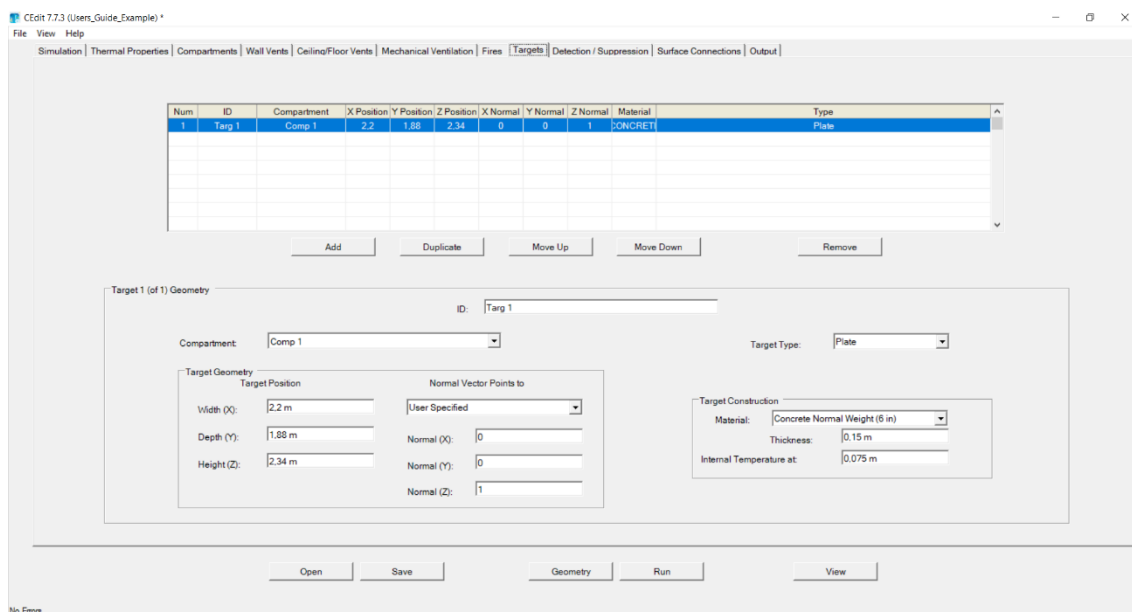


Figura 13: Pestaña de “Targets”

Ahora entramos con la pestaña de Detección y Supresión donde entran en juego dispositivos como los aspersores y detectores que son considerados como dispositivos de detección por el modelo de CFAST y utilizan los mismos parámetros que son los enumerados a continuación:

1. **Tipo:** existen 3 tipos de detectores, detector de humos, detector de calor o aspersor.
2. **Compartimento:** el compartimento en el que el detector o aspersor se encuentra ubicado.
3. **Temperatura de Activación:** la temperatura a partir de la cual el enlace al detector se activa. [°C]
4. **Opacidad de Activación (Activation Obscuration):** la opacidad/no visibilidad a partir de la cual el detector se activa. A mayor valor de la opacidad, mayor será la concentración de niveles de humo y menor será la visibilidad. [%]
5. **Ancho (X):** posición del objeto respecto de la pared de la izquierda del compartimento seleccionado. [m]
6. **Profundidad (Y):** posición del objeto respecto de la pared frontal del compartimento seleccionado. [m]

7. **Altura (Z):** posición del objeto como distancia respecto del suelo del compartimento. [m]
8. **RTI (Response Time Index):** el índice del tiempo de respuesta del aspersor o dispositivo detector. [(ms)^{1/2}]
9. **Densidad Pulverización:** la cantidad de agua disparada por el aspersor. [m/s]

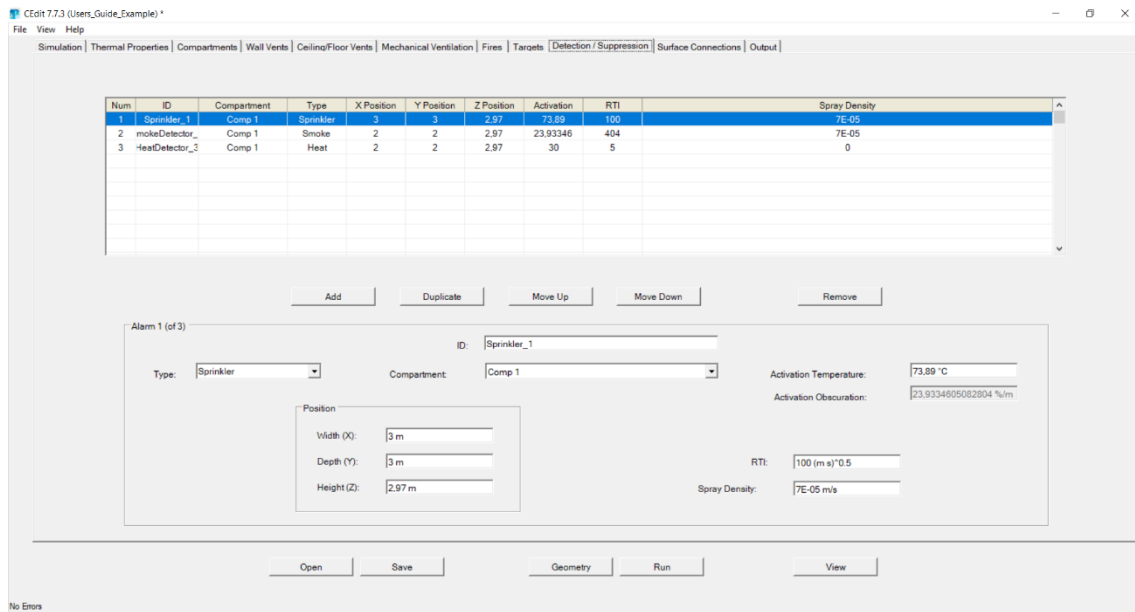


Figura 14: Sistemas anti-incendios

3.2.8. Conexión entre Superficies

La penúltima pestaña es la llamada Conexiones de Superficies y permite definir la transferencia de calor entre compartimentos durante la simulación. La energía puede ser transferida de compartimento a compartimento a través de límites sólidos (paredes, techos y suelos) mediante medios de conducción. Los parámetros para definir en esta pestaña son los mostrados seguidamente:

- 3.1.**Primer Compartimento:** el primer compartimento cuyas paredes está conectadas para la transferencia de calor horizontal.
- 3.2.**Segundo Compartimento:** el segundo compartimento cuyas paredes están conectadas para la transferencia de calor horizontal.

3.3.**Fracción:** especifica la fracción de las superficies verticales de los compartimentos que están conectados. La fracción especifica la fracción del área de superficie vertical del primer compartimento que conecta el primer y segundo par de compartimentos.

3.4.**Compartimento Superior:** el compartimento superior que será conectado por la transferencia de calor vertical. Esta conexión será a través del suelo de este compartimento.

3.5.**Compartimento Inferior:** el compartimento inferior que será conectado por la transferencia de calor vertical. Esta conexión será a través del techo de este compartimento.

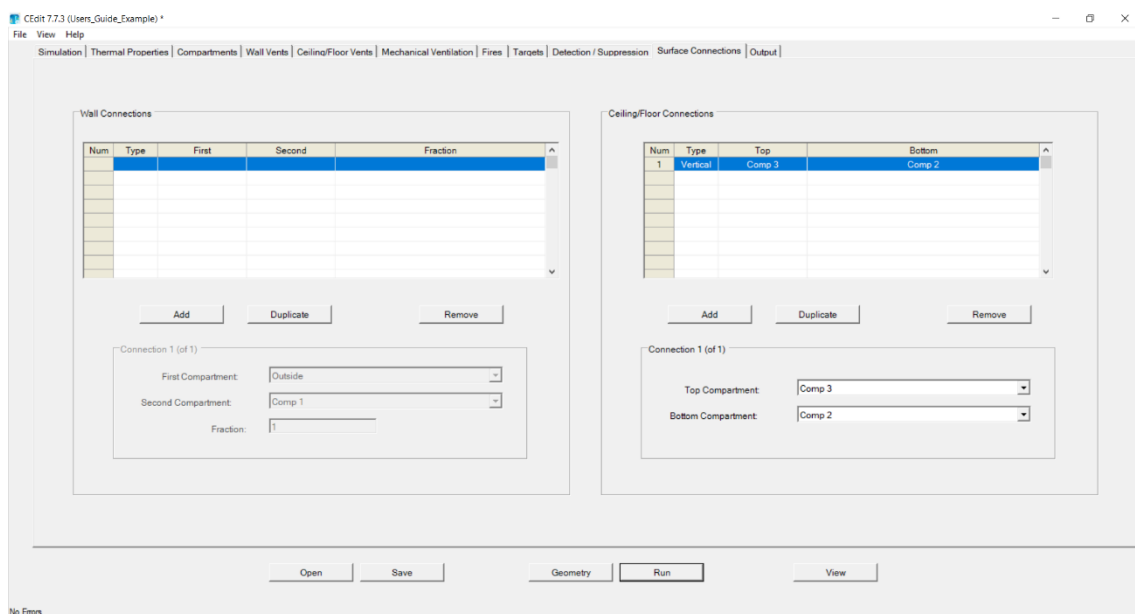


Figura 15: Conexión entre Superficies

3.3 Salidas

En este apartado, nos centraremos en las salidas, principalmente en la visualización y que variables habrá que introducir para la variar la visualización.

3.3.1. Visualización

Entramos ahora en la última pestaña, la de Visualización donde podemos ver los resultados calculados de una simulación CFAST se pueden visualizar utilizando el programa Smokeview, nombrado anteriormente. Esto permite al usuario ver la geometría de la estructura a partir de los distintos compartimentos diseñados, también se podrán ver las conexiones entre los mismos o ver los resultados de la simulación visualmente. Además de una vista simplificada de las temperaturas de las capas y los flujos de ventilación, se tendrá acceso con bastante detalle de estimaciones de la temperatura del gas, la velocidad del gas, la velocidad de los flujos de ventilación, la temperatura de los objetivos y el estado de los detectores pueden visualizarse. Las entradas que podrá especificar el usuario son las siguientes:

1. **Tipo de Visualización:** esta entrada define el tipo de visualización que se desea, desde un plano 2-D mostrando la temperatura en una posición y eje especificado, un plano 3-D en el que la posición es variable o también otro plano 3-D en el que muestra una isosuperficie, esta isosuperficie vendrá dada por una temperatura ya definida.
2. **Compartimento:** el valor por defecto es que el programa muestre todos los compartimentos incluidos en el modelo, pero en el caso de que se pretenda hacer un estudio más concreto de lo ocurrido en un compartimento solo, también se puede conseguir mediante el uso de esta entrada.
3. **Valor:** posición a lo largo de los ejes donde se desea ver la visualización, las coordenadas se miden desde la esquina inferior izquierda del compartimento. [m]
4. **Eje:** el eje perpendicular al plano creado donde se quiere representar la visualización, por ejemplo, el eje X para el plano Y-Z.
5. **Temperatura:** la temperatura específica a la que se quiere representar la isosuperficie. [°C]

Además de estos parámetros se pueden definir unas condiciones más concretas para la visualización como los que se presentan a continuación:

1. **Ancho de la cuadrícula (X):** número de puntos que se quieren representar a lo largo del eje X para la visualización.

2. **Ancho de la cuadrícula (Y):** número de puntos que se quieren representar a lo largo del eje Y para la visualización.
3. **Ancho de la cuadrícula (Z):** número de puntos que se quieren representar a lo largo del eje Z para la visualización.

Lo único que queda por explicar sobre el uso de CFAST para nuestros modelos son las salidas, pero esto lo dejaremos para más adelante y lo iremos explicando junto con nuestros ejemplos, puesto que varía mucho el objetivo de cada modelo.

4. Simulación

En el marco de este trabajo titulado "Análisis de las capacidades predictivas de CFAST para predecir los riesgos de incendio en compartimentos grandes", se ha llevado a cabo una parte fundamental de investigación que involucra la realización de simulaciones de incendios mediante el uso de CFAST. Estas simulaciones se han desarrollado con el objetivo de representar un escenario previamente modelado por FDS (Fire Dynamics Simulator) y así poder realizar una comparación detallada entre los resultados obtenidos. Esto implica la introducción de los parámetros y condiciones específicas del incendio en el modelo de CFAST, como la geometría del edificio, el diseño del incendio o el número de exutorios y rociadores y sus respectivas distribuciones. A través de estas simulaciones, se obtendrán resultados como pueden ser la altura de la capa de humos, las temperaturas de la capa de humos, la composición de los gases presentes en el compartimento y flujos de masa de humos que salen o entran del compartimento.

El objetivo principal de estas simulaciones es llevar a cabo una comparación exhaustiva entre los resultados obtenidos mediante CFAST y los previamente obtenidos por la herramienta CFD (Computational Fluid Dynamics) que es el modelo FDS. Al analizar y contrastar la altura de la capa de humos, las temperaturas, la composición de los gases presentes en el compartimento y flujos de masa de humos que salen o entran del compartimento, se podrá evaluar la capacidad predictiva de CFAST en la simulación de incendios en compartimentos grandes. Asimismo, esta comparación permitirá identificar posibles diferencias y desviaciones entre los dos modelos, lo que podría indicar áreas de

mejora para el modelo de CFAST y su precisión en la predicción de los riesgos de incendio en grandes compartimentos.

Es importante tener en cuenta que este trabajo no busca cumplir con la reglamentación o las guías de buenas prácticas, se trata de realizar una comparativa para analizar las capacidades predictivas del modelo CFAST en compartimentos de gran tamaño.

4.1. Introducción a FDS

Fire Dynamics Simulator (FDS) es una herramienta de modelado computacional desarrollada por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) en los Estados Unidos. Como su propio nombre indica, está diseñado para simular la dinámica de los incendios, ofreciendo información valiosa a los ingenieros de seguridad contra incendios, investigadores y otros profesionales en el campo. FDS resuelve ecuaciones que describen el flujo de fluidos y el transporte de calor, lo que permite modelar el crecimiento y la propagación del fuego, el movimiento del humo y la transferencia de calor en una variedad de escenarios. Su enfoque detallado y su sólida base teórica han hecho del FDS una herramienta popular en la industria de la seguridad contra incendios.

FDS emplea una técnica conocida como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para resolver estas ecuaciones. CFD es un enfoque potente y flexible que utiliza métodos numéricos y algoritmos para analizar y resolver problemas de flujos de fluidos. En el caso de FDS, esto permite simular la interacción compleja entre el fuego, el aire y la estructura del edificio en un incendio. La ventaja de la aproximación CFD es que puede capturar fenómenos complejos y detallados que pueden no ser evidentes en los modelos más simples. Sin embargo, también es computacionalmente intensivo, lo que puede limitar su aplicación en escenarios de gran escala o en situaciones donde se requiere una respuesta rápida. Para superar estas limitaciones, FDS ha sido diseñado para ser menos intensivo en términos computacionales que algunos otros modelos de CFD, como pueden ser ANSYS Fluent o COMSOL Multiphysics. FDS logra esto a través de varias aproximaciones y simplificaciones que reducen la complejidad del problema sin sacrificar demasiado la precisión. Aunque esto significa que FDS puede no capturar todos los detalles que un modelo de CFD más detallado podría, también

permite que FDS ejecute simulaciones más rápidamente y con menos recursos de computadora.

Además de modelar la dinámica del fuego, FDS también puede modelar el comportamiento de las personas durante un incendio. Esto se hace a través de una herramienta adicional llamada "Evacuation", que puede simular cómo se moverían las personas en un edificio durante un incendio, teniendo en cuenta factores como la densidad de la multitud, la visibilidad y la presencia de humo.

Una vez que se ha ejecutado una simulación, los resultados pueden visualizarse utilizando varias herramientas de visualización. Estas herramientas permiten a los usuarios ver cómo se desarrollaría un incendio en su modelo, ayudándoles a entender mejor los resultados y a extraer información útil. Las visualizaciones pueden incluir la propagación de las llamas, la formación y movimiento del humo, la evolución de las temperaturas, y otros factores importantes. Para facilitar el uso de FDS, existen varias interfaces gráficas de usuario (GUI) disponibles. Estas GUI permiten a los usuarios configurar y ejecutar sus simulaciones sin tener que trabajar directamente con los archivos de entrada de texto plano. Una de estas GUI es PyroSim, desarrollada por Thunderhead Engineering, que proporciona un entorno visual intuitivo para el diseño y la configuración de las simulaciones, de hecho, es la que se ha utilizado en la simulación FDS que compararemos con nuestros outputs que obtengamos de CFAST.

Aunque tanto CFAST como FDS son herramientas valiosas para la modelización de incendios, tienen algunas diferencias clave en términos de enfoque, nivel de detalle y aplicabilidad que se exponen a continuación:

- **Enfoque de Modelado:** la principal diferencia entre CFAST y FDS radica en su enfoque de modelado. CFAST es un modelo de dos zonas que divide un espacio en dos regiones: una zona superior y una zona inferior, y modela el fuego y el humo en base a estas dos zonas. Por otro lado, FDS utiliza la CFD para modelar el flujo de fluidos y el transporte de calor en un espacio tridimensional.
- **Nivel de detalle:** FDS puede capturar fenómenos más complejos y detalles más finos que CFAST debido a su enfoque CFD. Puede modelar la propagación de las llamas, el transporte de especies de humo, la interacción del fuego con los

sistemas de ventilación y muchos otros detalles que son más difíciles de capturar con un modelo de dos zonas como CFAST.

- **Aplicabilidad y Recursos Computacionales:** Debido a su menor nivel de detalle, CFAST requiere menos recursos computacionales que FDS y puede ejecutar simulaciones más rápidamente. Esto puede hacer de CFAST una opción más adecuada para análisis preliminares, para edificios o espacios más sencillos, o cuando los recursos de computación son limitados. Por otro lado, FDS, a pesar de requerir más recursos de computación, puede proporcionar una imagen más detallada y precisa de la dinámica del fuego en escenarios más complejos.

4.2. Simulación del FDS

Se tienen dos simulaciones, la primera se trata de una nave industrial de 50 x 50 x 14 m, es decir, de un área en planta de 2500 m² y la segunda es muy similar al ser la misma nave industrial pero esta vez con muelles de carga para facilitar la carga y descarga de mercancías desde y hacia vehículos de transporte, como pueden ser camiones, por ejemplo.

4.2.1. Simulación FDS Nave Industrial

Se comenzará con una descripción en detalle del escenario que se ha representado:

- **Geometría:** nave industrial de 50 x 50 x 14 m, área en planta de 2500 m².
- **Materiales:** tanto las paredes como el suelo están hechas de hormigón y tienen un grosor de 20 cm, mientras que el techo está hecho de paneles sándwich compuestos por dos capas externas de aluminio y un núcleo aislante hecho de poliuretano, el grosor del techo es de 2 mm.
- **Cortina de humos:** son estructuras físicas que se despliegan en el evento de un incendio como sistema para limitar o controlar el movimiento del humo dado que suele representar un riesgo significativo para la seguridad de las personas en el edificio. En nuestro escenario la cortina conecta la fachada anterior con la

posterior dividiendo la nave en dos partes iguales, la altura de esta cortina de humos es de 4 m.

- **Exutorios:** dispositivos de seguridad instalados en el techo de los edificios para permitir que el humo y el calor se disipen en caso de incendio. En nuestra simulación, se encuentran desplegados 160 exutorios por toda la cubierta, tienen forma rectangular y sus dimensiones son de 1 x 3 m, es decir, 3 m². Estos exutorios se abrirán totalmente tras haber transcurrido 1 minuto tras la puesta en marcha de los rociadores. Este tiempo es cercano al segundo 450 desde el comienzo del incendio.
- **Rociadores:** dispositivos diseñados para dispersar agua (u otros agentes supresores) cuando detectan un cierto nivel de calor, lo que suele ser un indicador de un incendio. Los rociadores utilizados en la simulación son K200 (liberan una gran cantidad de agua) y como cubren 9 m², se disponen 16 a lo largo de cada eje por toda la nave industrial que da lugar a un total de 256 rociadores.
- **Incendio:** su origen son las coordenadas (12.5, 25) m, es decir, en el centro de la parte izquierda de la nave separada por la cortina de humo. Nuestro combustible es metano (CH₄) que se combina con el oxígeno (O₂) para producir dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). El calor de combustión es de 16400 kJ/kg y la fracción radiante es de 0.537. Es un fuego que tiene una relación cuadrática (t²), que tarda 380 s en alcanzar su pico de $HRR = 6.5 MW$ y se mantiene constante en ese valor durante los siguientes 540 s hasta que cae repentinamente. El área del fuego es de 20 m² y su estantería es de 2 m, su CO Yield es 0.042, su Soot Yield es 0.198 (valor mucho más elevado de lo común, se generará mucho hollín y por lo tanto un humo muy denso).

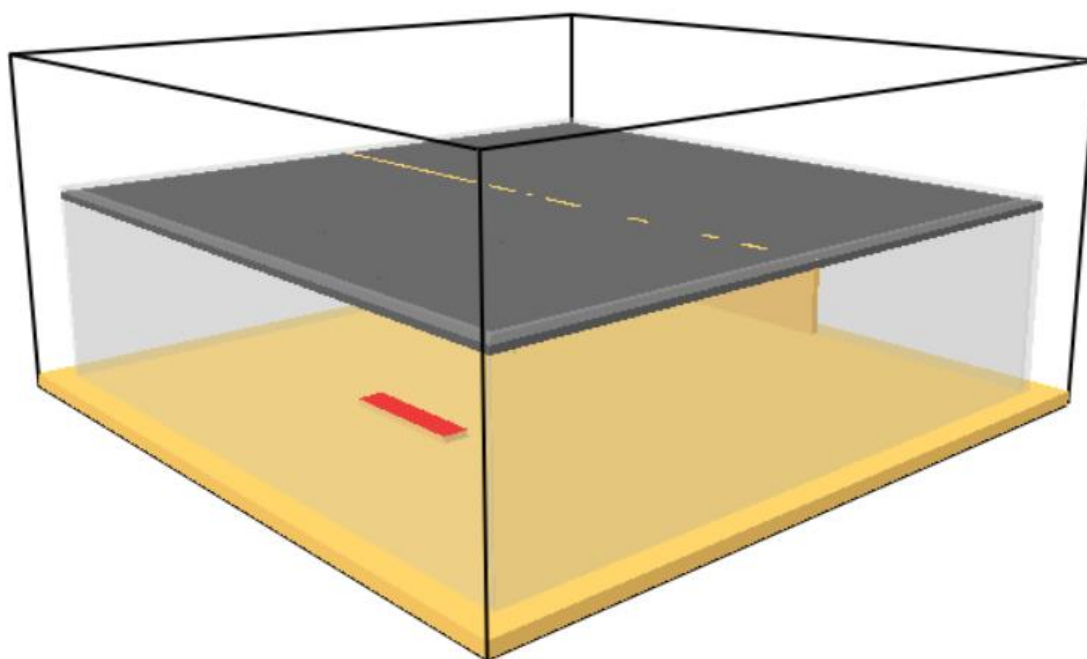


Figura 16: Representación Simulación Nave Industrial con Smokeview

4.2.2. Simulación FDS Nave Industrial con Muelles de Carga

Descripción detallada del escenario representado:

- **Geometría:** nave industrial de 50 x 50 x 14 m, área en planta de 2500 m². A diferencia del anterior escenario, esta nave posee unos muelles de carga distribuidos de la siguiente manera, 7 muelles tanto en la fachada anterior como en la posterior y unas dimensiones de 2 m de ancho, 3 m de altura y 1 m por encima del nivel de la calle (esto se debe a que el compartimento de carga de los camiones se encuentra a una altura aproximada de 1 m de altura y de esta manera se facilita la carga y descarga de las mercancías).
- **Materiales:** tanto las paredes como el suelo están hechas de hormigón y tienen un grosor de 20 cm, mientras que el techo está hecho de paneles sándwich compuestos por dos capas externas de aluminio y un núcleo aislante hecho de poliuretano, el grosor del techo es de 2 mm.

- **Cortina de humos:** en nuestro escenario la cortina conecta la fachada anterior con la posterior dividiendo la nave en dos partes iguales, la altura de esta cortina de humos es de 4.5 m.
- **Exutorios:** en nuestra simulación, se encuentran desplegados 160 exutorios por toda la cubierta, tienen forma rectangular y sus dimensiones son de 1 x 3 m, es decir, 3 m². Estos exutorios estarán abiertos al completo desde el inicio del incendio.
- **Incendio:** su origen son las coordenadas (12.5, 25) m, es decir, en el centro de la parte izquierda de la nave separada por la cortina de humo. Nuestro combustible es metano (CH₄) que se combina con el oxígeno (O₂) para producir dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). El calor de combustión es de 16400 kJ/kg y la fracción radiante es de 0.537. Es un fuego que tiene una relación cuadrática (t²), que tarda 335 s en alcanzar su pico de $HRR = 5\text{ MW}$ y se mantiene constante en ese valor durante los siguientes 600 s hasta que cae repentinamente. El área del fuego es de 20 m² y su estantería es de 2 m, su CO Yield es 0.042, su Soot Yield es 0.198 (igual que en la anterior simulación, es un valor mucho más elevado de lo común, se generará mucho hollín y por lo tanto un humo muy denso).

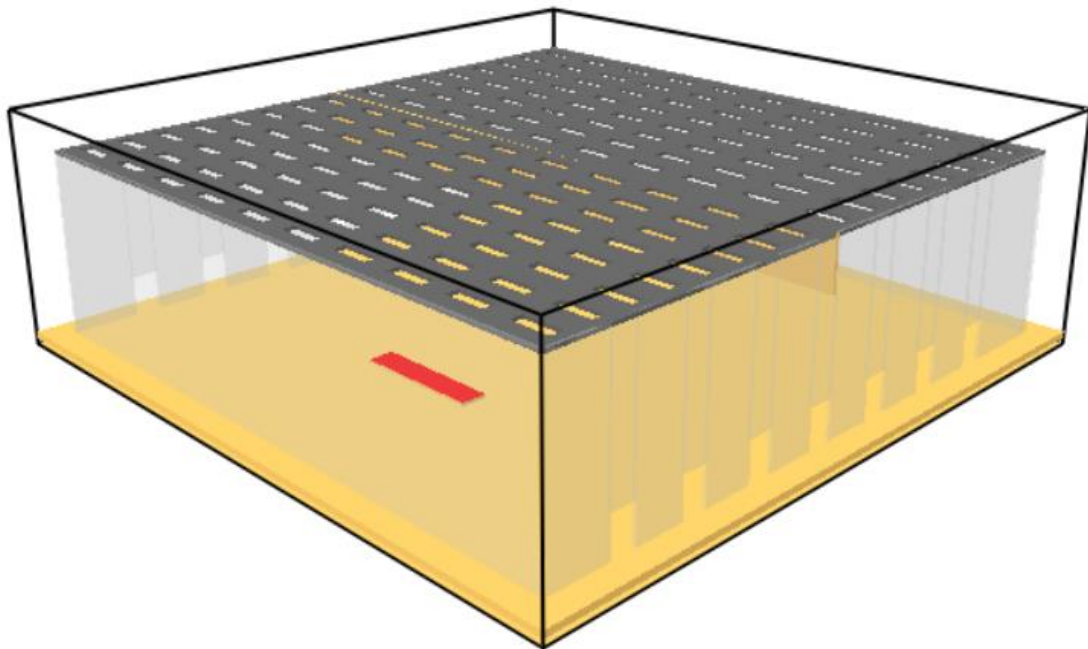


Figura 17: Representación Simulación Nave con Muelles de carga con Smokeview

4.3. Simulación CFAST Nave Industrial

Este punto se enfoca en la simulación específica de una nave industrial y se divide en tres subpuntos clave: parámetros de entrada en la simulación CFAST, resultados de la simulación CFAST y comparación de resultados obtenidos por CFAST con la simulación FDS.

El primer apartado se centra en los parámetros de entrada utilizados en la simulación CFAST de la nave industrial. Aquí se describirá detalladamente qué variables de entrada se han considerado y cómo se han introducido en el modelo de CFAST. Estos parámetros incluyen aspectos como la geometría de la nave, las características del fuego, las propiedades de los materiales y otros factores relevantes para la simulación. Se proporcionará una explicación clara y precisa sobre cómo se han definido y configurado estos parámetros en CFAST.

En el segundo apartado, se presentarán los resultados obtenidos de la simulación CFAST en la nave industrial. Esto incluirá la altura de la capa de humo, las temperaturas en diferentes ubicaciones, la concentración de gases y otros datos relevantes obtenidos del análisis. Estos resultados permitirán comprender el comportamiento del fuego y el transporte de humo en la nave industrial simulada utilizando CFAST. Se destacarán los aspectos más significativos y relevantes de estos resultados.

El último apartado se centrará en la comparación de los resultados obtenidos por CFAST con los resultados de la simulación FDS. Aquí se realizará una evaluación exhaustiva de las similitudes y diferencias entre ambos conjuntos de resultados. Se analizarán aspectos como la altura de la capa de humo y las temperaturas, para determinar la concordancia entre las predicciones de CFAST y FDS. Esta comparación permitirá evaluar la capacidad de CFAST para predecir los riesgos de incendio en la nave industrial y proporcionará información valiosa sobre las fortalezas y limitaciones de este programa de simulación.

4.3.1. Parámetros de entrada en la simulación CFAST

4.3.1.1. Geometría

Como se tiene una cortina de humos de 4 m de altura dividiendo la nave en dos, se crearán dos compartimentos separados idénticos de dimensiones 25 x 50 x 14 m, lo que cambiará de estos dos compartimentos será la posición que ocupan en el espacio, donde la esquina inferior izquierda del frente del compartimento se puede configurar en el origen (0, 0, 0) mientras que la esquina inferior izquierda del frente del segundo compartimento ocupará las siguientes coordenadas en el espacio (25, 0, 0) m.

Compartment 1 (of 2)

ID: Nave_Izq

Geometry

Width (X): 25 m Position, X: 0 m

Depth (Y): 50 m Y: 0 m

Height (Z): 14 m Z: 0 m

Advanced

Flow Characteristics

☒ Normal (Two-zone model)

☐ Shaft (One-zone model)

☐ Corridor (Revised ceiling jet)

Wall Leak Area Ratio: 0 m²/m²

Floor Leak Area Ratio: 0 m²/m²

Variable Cross-sectional Area

Height	Area

Figura 18: Geometría parte izquierda Nave

Compartment 2 (of 2)

ID: Nave_Dcha

Geometry

Width (X): 25 m Position, X: 25 m

Depth (Y): 50 m Y: 0 m

Height (Z): 14 m Z: 0 m

Advanced

Flow Characteristics

☒ Normal (Two-zone model)

☐ Shaft (One-zone model)

☐ Corridor (Revised ceiling jet)

Wall Leak Area Ratio: 0 m²/m²

Floor Leak Area Ratio: 0 m²/m²

Variable Cross-sectional Area

Height	Area

Figura 19: Geometría parte derecha Nave

Como se ha explicado previamente en los detalles del escenario que hay que representar, los materiales para el suelo y paredes es hormigón (“concrete en inglés”) y para el techo el material eran paneles sándwich compuestos por dos capas externas de aluminio y un núcleo aislante hecho de poliuretano (también conocido como “urethane”). Por ello, lo primero que hay que hacer es seleccionar estos materiales dentro de la pestaña de “Thermal Properties”:

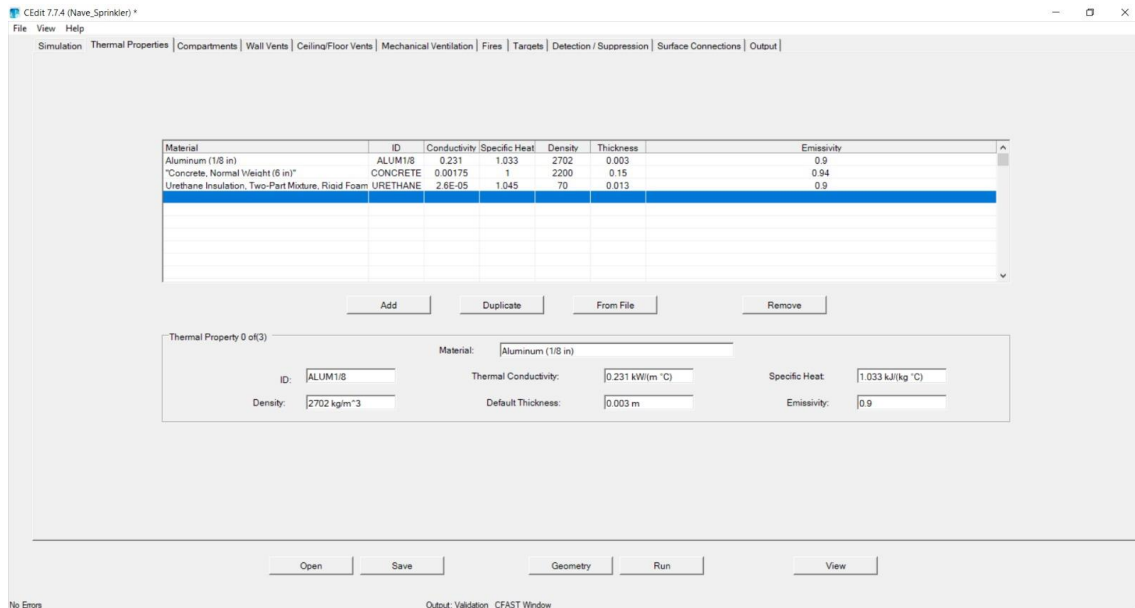


Figura 20: Propiedades de los materiales escogidos

Como se puede apreciar en la figura anterior, los materiales y sus propiedades son las siguientes:

- Aluminio:
 - $\lambda = 0.231 \text{ kW}/(\text{m } ^\circ\text{C})$
 - $c = 1.033 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$
 - $\rho = 2702 \text{ kg}/\text{m}^3$
 - $\varepsilon = 0.9$
- Aislamiento de Uretano, mezcla de dos componentes, espuma rígida:
 - $\lambda = 2.6 \cdot 10^{-5} \text{ kW}/(\text{m } ^\circ\text{C})$
 - $c = 1.045 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$
 - $\rho = 70 \text{ kg}/\text{m}^3$
 - $\varepsilon = 0.9$
- Hormigón, peso normal:
 - $\lambda = 0.00175 \text{ kW}/(\text{m } ^\circ\text{C})$
 - $c = 1 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$
 - $\rho = 2200 \text{ kg}/\text{m}^3$
 - $\varepsilon = 0.94$

Materials						
	Ceiling Material	Ceiling Thickness	Wall Material	Wall Thickness	Floor Material	Floor Thickness
1	Aluminum (1/8 in)	0.0005 m	Concrete, Normal Weight (6 in 0.2 m		Concrete, Normal Weight (6 in 0.2 m	
2	Urethane Insulation, Two-Part†	0.0001 m				
3	Aluminum (1/8 in)	0.0005 m				

Figura 21: Materiales de techo, paredes, suelo y sus espesores

Una vez se ha terminado de definir la geometría y los materiales de los que estará hecho la nave, tendremos en nuestra pantalla en la ventana de “Compartments” lo presentado a continuación:

CEdit 7.7.4 (Nave_Sprinkler) *

File View Help

Simulation Thermal Properties Compartments Wall Vents Ceiling/Floor Vents Mechanical Ventilation Fires Targets Detection / Suppression Surface Connections Output

ID	Num	Width	Depth	Height	X Position	Y Position	Z Position	Ceiling	Walls	Floor	F	H	V	M	O	T
Nave_Izq	1	25	50	14	0	0	0	alum1/8	concrete	concrete	0	1	45	0	1	0
Nave_Dcha	2	25	50	14	25	0	0	3 Layers	concrete	concrete	0	1	38	0	0	0

Add Duplicate Move Up Move Down Remove

Compartment 2 (of 2) ID: Nave_Dcha

Geometry

Width (X): 25 m Position, X: 25 m

Depth (Y): 50 m Y: 0 m

Height (Z): 14 m Z: 0 m

Advanced

Flow Characteristics

☒ Normal (Two-zone model)

☐ Shaft (One-zone model)

☐ Corridor (Revised ceiling jet)

Wall Leak Area Ratio: 0 m²/m²

Floor Leak Area Ratio: 0 m²/m²

Variable Cross-sectional Area

Height	Area

Materials

	Ceiling Material	Ceiling Thickness	Wall Material	Wall Thickness	Floor Material	Floor Thickness
1	Aluminum (1/8 in)	0.0005 m	Concrete, Normal Weight (6 in 0.2 m		Concrete, Normal Weight (6 in 0.2 m	
2	Urethane Insulation, Two-Part†	0.0001 m				
3	Aluminum (1/8 in)	0.0005 m				

Open Save Geometry Run View

No Errors Output: Validation CFAST Window

Figura 22: Geometría de Nave Industrial

Que generará el siguiente output:

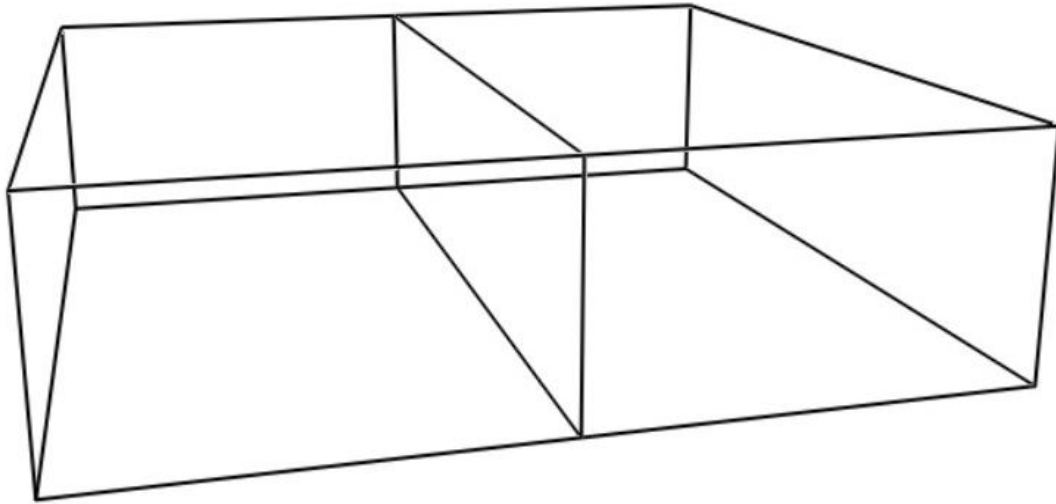


Figura 23: Nave Industrial separada en 2 compartimentos

4.3.1.2. Cortina de Humos

Como no existe como tal una opción para crear una cortina de humos en CFAST, lo que se ha simulado es un hueco que conecte ambos compartimentos que tenga unas dimensiones de 50 m de ancho y 10 m de alto, para que así quede una pared entre las dos partes de la nave de 4 m de altura (recordemos que la altura total de nuestra nave es de 14 m). Aunque esto no sea exactamente una cortina de humos, realiza su función que es, impedir el libre traspaso y movimiento de humo. Para ello habrá que definir las siguientes variables de entrada en la pestaña de “Wall Vents”:

- Compartimentos que unir: en nuestro caso, Nave_Izq con Nave_Dcha
- Bottom: 0 m (empieza desde $z = 0$ m el hueco)
- Height: 10 m (termina cuando queremos que comience la cortina de humos)
- Width: 50 m (queremos que la cortina de humos cruce desde la fachada anterior hasta la posterior)
- Vent Offset: 0 m (queremos que la cortina de humos cruce desde la fachada anterior hasta la posterior)
- Face: Right (el plano de la cortina y del hueco que estamos generando entre los compartimentos es paralelo al eje Y).

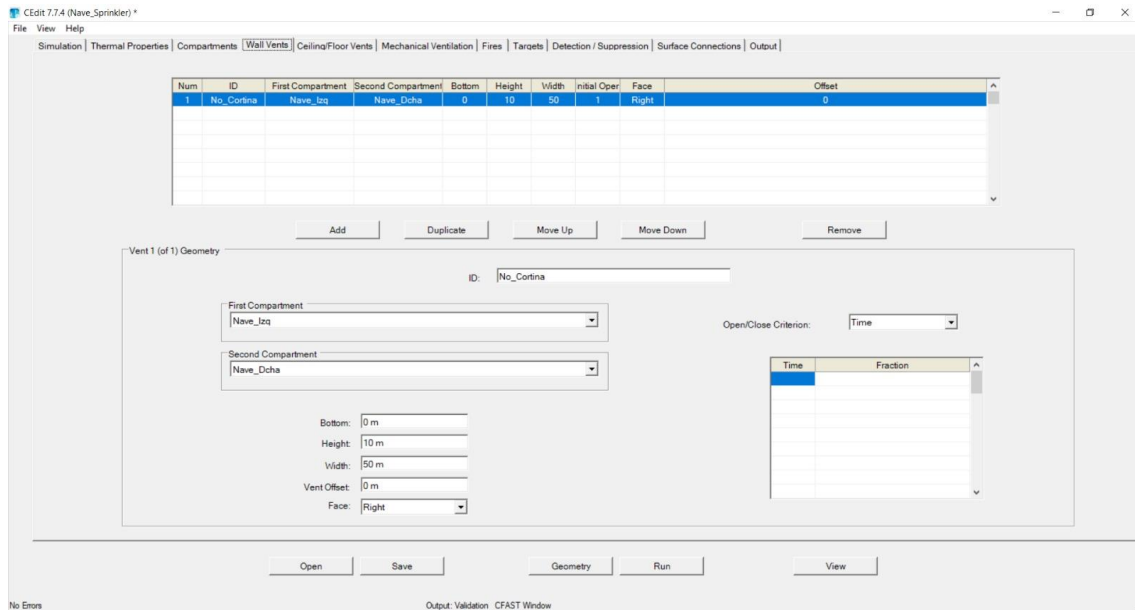


Figura 24: Conexión entre compartimentos a través de paredes

Una vez se han introducido todos estos parámetros a CFAST, se obtendrá la siguiente salida:

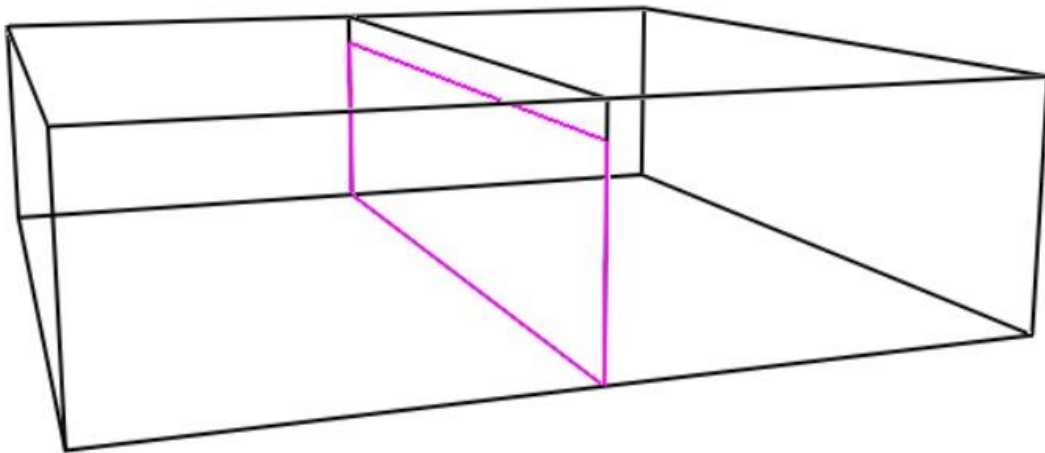


Figura 25: Nave Industrial con Cortina de Humos de 4 m

4.3.1.3. Exutorios

Como se ha explicado previamente, hay que crear 160 exutorios de forma rectangular de 3 m², para ello habrá que entrar en la pestaña “Ceiling/Floor Vents”. Una vez dentro de la misma, se ve como solo se pueden crear exutorios de forma cuadrada o circular, por lo

que no se tendrá la opción de representar exactamente el escenario de la simulación del FDS. Al ser el área por exutorio de 3 m^2 y existen un total de 160 exutorios en el techo, el área total de los exutorios será de 480 m^2 , aproximadamente un 19.2% de la cubierta de la nave industrial. Se ha escogido la forma cuadrada porque es la más similar a la forma rectangular, es la que se comportará lo más parecido posible. Además, hay varias razones más por las que se ha preferido escoger la forma cuadrada frente a la circular:

- Eficiencia de espacio: un exutorio cuadrado puede proporcionar una mayor área de superficie para un tamaño dado en comparación con un exutorio circular, lo que podría permitir una mayor cantidad de aire y humo para ser evacuado.
- Instalación: un exutorio cuadrado será más fácil de instalar, al ajustarse a las esquinas y bordes rectos de la nave industrial.
- Mantenimiento: la forma cuadrada puede facilitar la limpieza y el mantenimiento, ya que puede ser más fácil acceder a todas las áreas de la superficie interna en comparación con un exutorio circular.
- Compatibilidad con las rejillas: las rejillas de ventilación y otros accesorios suelen ser más compatibles con los exutorios cuadrados que con los circulares.

Como habrá que cubrir los 480 m^2 que ocupan los exutorios, se escogerá la siguiente alternativa:

$$A = 6 \text{ m}^2/\text{exutorio} = l^2 \rightarrow l = \sqrt{6} = 2.449 \text{ m} \approx 2.45 \text{ m}$$

$$N \cdot A = 480 \text{ m}^2 \rightarrow N = 80 \text{ exutorios}$$

Como la nave es simétrica $50 \times 50 \text{ m}$, el número de exutorios tanto en el ancho como en el largo, deben ser el mismo:

$$n = \sqrt{N} = 8.94 \text{ exutorios}$$

Se redondea al siguiente número entero por encima, en este caso, el 9. Por lo que se tendrá 9 exutorios en el ancho y otros 9 en el largo, distribuidos uniformemente a lo largo de toda la cubierta:

$$N = n \cdot n = n^2 = 81 \text{ exutorios}$$

A continuación, se calculará el área que cubren todos estos exutorios:

$$A = N \cdot 6 \text{ m}^2/\text{exutorio} = 486 \text{ m}^2$$

Es cierto que se tiene 6 m² más de área del total de exutorios que la simulación de FDS, pero al ser tan solo un 0.24% del total de la cubierta, se considera despreciable. Se podría haber tomado la decisión de que cada exutorio cuadrado tuviese un área de 3 m² para no tener una mayor área total, pero habría que haber introducido 160 exutorios en CFAST en vez de los 81 actuales. Como se ha visto anteriormente en el tercer segmento del trabajo denominado como “Uso de CFAST”, en el apartado de “Ventilación Mecánica”, se requiere la inserción de todas las coordenadas correspondientes a cada exutorio. No obstante, al considerar que hay una diferencia de tan solo 6 m² entre ambas alternativas, resulta evidente que la introducción de 79 coordenadas adicionales se convierte en una tarea innecesaria y poco eficiente.

Una vez que tenemos el número de exutorios y el área que ocupa cada uno, se podrá calcular la distribución exacta a lo largo de la cubierta, se calcularán las coordenadas exactas de cada exutorio para introducirlas posteriormente en CFAST.

Se sabe que el lado de cada exutorio es de 2.449 m y teniendo en cuenta que tanto el ancho como el largo de nuestra nave es de 50 m, se obtuvo el espacio de separación entre los exutorios a partir de la siguiente ecuación:

$$10 \cdot d + 9 \cdot l = 50 \text{ m} \rightarrow d = 2.796 \text{ m}$$

Esta ecuación se explica de manera gráfica gracias a la siguiente figura:

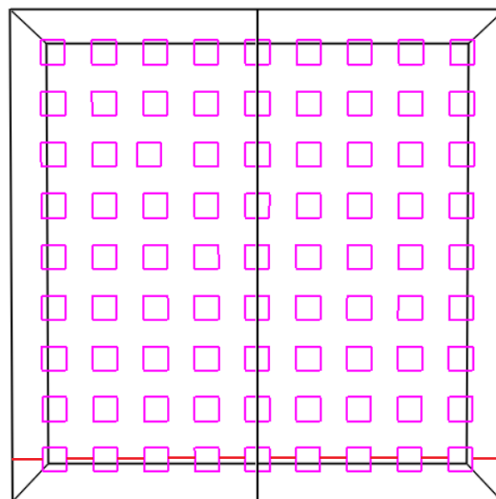


Figura 26: Explicación gráfica de ecuación de distribución de exutorios

Como se puede ver, las líneas rojas marcan la misma dimensión siempre y es la distancia entre exutorios, mientras que las líneas moradas-rosas marcan el lado de cada exutorio.

En la fila de exutorios más inferior de la cubierta de la nave, para llegar a los 50 m de largo son necesarias 10 líneas rojas y 9 líneas moradas, por lo que esa igualdad se debe cumplir para todas las filas de exutorios del techo.

Una vez se ha obtenido también la distribución de los exutorios, se tendrá que calcular las coordenadas del centro de cada exutorio, que serán en total 81 coordenadas. Estas coordenadas están en el sistema de referencia marcado el origen en la esquina inferior izquierda del compartimento, por lo que las coordenadas del primer exutorio (el más cercano a la esquina inferior izquierda) vendrán determinadas por la siguiente ecuación:

$$d + \frac{1}{2} \cdot l = 4.021 \text{ m} \rightarrow (4.021, 4.021) \text{ m}$$

Las coordenadas del siguiente exutorio (moviéndonos a lo largo del eje X, por lo tanto, la coordenada en el eje Y será la misma que la del exutorio anterior), seguirá la siguiente ecuación:

$$2 \cdot d + \frac{3}{2} \cdot l = 9.266 \text{ m} \rightarrow (9.266, 4.021) \text{ m}$$

Se puede observar como existe una relación y por lo tanto las coordenadas de los exutorios se puede generalizar a la siguiente expresión:

$$n \cdot d + \frac{2 \cdot n - 1}{2} \cdot l, \text{ siendo } n \text{ el número de exutorio en la fila}$$

Por lo tanto, se calcularon las coordenadas de los exutorios que se encuentran ubicados sobre el primer compartimento y mostrarlos de manera ordenada según la siguiente matriz. Estará ligada al sistema de referencia del primer compartimento y por lo tanto de los exutorios ubicados en la cubierta de este compartimento, que serán los primeros 5 de las 9 filas que hay:

$$\begin{pmatrix} 4.021/4.021 & 9.266/4.021 & 14.511/4.021 & 19.756/4.021 & 25.001/4.021 \\ 4.021/9.266 & 9.266/9.266 & 14.511/9.266 & 19.756/9.266 & 25.001/9.266 \\ 4.021/14.511 & 9.266/14.511 & 14.511/14.511 & 19.756/14.511 & 25.001/14.511 \\ 4.021/19.756 & 9.266/19.756 & 14.511/19.756 & 19.756/19.756 & 25.001/19.756 \\ 4.021/25.001 & 9.266/25.001 & 14.511/25.001 & 19.756/25.001 & 25.001/25.001 \\ 4.021/30.246 & 9.266/30.246 & 14.511/30.246 & 19.756/30.246 & 25.001/30.246 \\ 4.021/35.491 & 9.266/35.491 & 14.511/35.491 & 19.756/35.491 & 25.001/35.491 \\ 4.021/40.736 & 9.266/40.736 & 14.511/40.736 & 19.756/40.736 & 25.001/40.736 \\ 4.021/45.981 & 9.266/45.981 & 14.511/45.981 & 19.756/45.981 & 25.001/45.981 \end{pmatrix}$$

Los números que se encuentran en el elemento (1, 1) de la matriz se corresponden a las coordenadas de exutorio más cercano a la esquina inferior izquierda del primer compartimento, el primer número se corresponde con la posición en el eje X y el segundo con la posición en el eje Y. Las filas representan las filas de exutorios que se forman al ver la nave industrial desde la vista de pájaro y lo mismo ocurre con las columnas.

Se hizo una segunda matriz para los 4 exutorios restantes de las 9 filas, estas coordenadas se mostrarán en respecto al sistema de coordenadas del segundo compartimento, que es donde se encuentran ubicados, por lo que habrá que realizar un cambio a la expresión genérica que se ha desarrollado anteriormente. La expresión genérica para las coordenadas en el eje X del centro de cada exutorio ubicados en la cubierta del segundo compartimento es:

$$\left(n \cdot d + \frac{2 \cdot n - 1}{2} \cdot l \right) - 25$$

Esta resta se debe a que el sistema de referencia para estos exutorios se encuentra desplazado 25 m a lo largo del eje X. Finalmente, la matriz de estos exutorios sería la presentada a continuación:

$$\begin{pmatrix} 5.246/4.021 & 10.491/4.021 & 15.736/4.021 & 20.981/4.021 \\ 5.246/9.266 & 10.491/9.266 & 15.736/9.266 & 20.981/9.266 \\ 5.246/14.511 & 10.491/14.511 & 15.736/14.511 & 20.981/14.511 \\ 5.246/19.756 & 10.491/19.756 & 15.736/19.756 & 20.981/19.756 \\ 5.246/25.001 & 10.491/25.001 & 15.736/25.001 & 20.981/25.001 \\ 5.246/30.246 & 10.491/30.246 & 15.736/30.246 & 20.981/30.246 \\ 5.246/35.491 & 10.491/35.491 & 15.736/35.491 & 20.981/35.491 \\ 5.246/40.736 & 10.491/40.736 & 15.736/40.736 & 20.981/40.736 \\ 5.246/45.981 & 10.491/45.981 & 15.736/45.981 & 20.981/45.981 \end{pmatrix}$$

Donde el primer número coincide con la posición en el eje X y el segundo con la posición en el eje Y, recordemos que la coordenada X sigue la expresión genérica y la coordenada Y sigue la expresión genérica tras haberle aplicado el cambio.

Una vez realizados los anteriores cálculos, se pasará a la parte de la introducción de todas estas variables de entrada en nuestra simulación de CFAST.

Lo primero de todo, será determinar cuál es el compartimento superior e inferior que va a unir nuestro exutorio, en todos nuestros casos se unirá el exterior con la nave, dependiendo de que número de exutorio hablemos uniremos la parte izquierda de la nave o la parte derecha, en el ejemplo que se va a mostrar, al ser el segundo exutorio de la

primera fila, uniremos el exterior con la parte izquierda. También habrá que definir el área de los exutorios y sus respectivas formas, 6 m² y forma cuadrada. Por último, solo queda determinar las coordenadas del centro del exutorio, para nuestro caso, habrá que navegar a través de la primera matriz, al estar ubicado en el primer compartimento, e ir al elemento (1,2), en el que nos encontramos con las siguientes coordenadas: (9.266, 4.021) m.

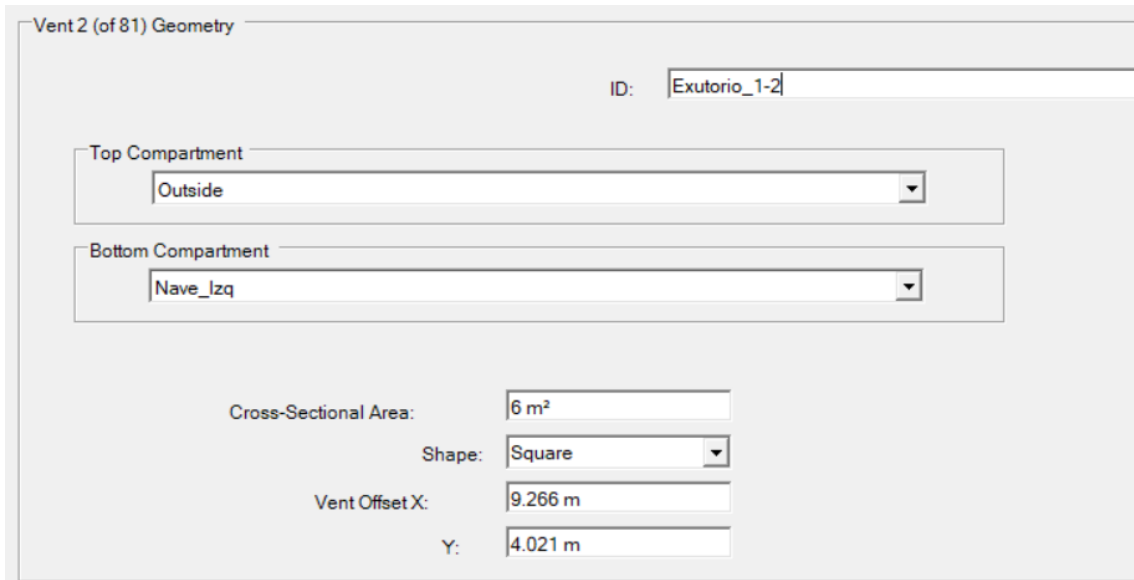


Figura 27: Introducción variables de entrada para segundo exutorio de la primera fila

Una vez se haya realizado lo anterior, solo quedará por configurar cuando se abren y se cierran los exutorios. Esto se configura dentro de la misma pestaña, en la parte derecha. Inicialmente los exutorios se encuentran cerrados, pero que pasado 1 minuto desde que los rociadores se activan, estos exutorios se abrirán. Para averiguar en que segundo exacto los rociadores se activan, se pondrán todos los exutorios cerrados todo el tiempo y averiguaremos en que segundo se activan los rociadores. Una vez simulado este escenario, se vio como el rociador se activa alrededor al segundo 374 desde el comienzo de la simulación (y del comienzo del fuego), por lo que 1 minuto más tarde, y por lo tanto alrededor del segundo 434 de la simulación se abrirán los exutorios. Para configurar esto habrá que introducir los siguientes parámetros:

Open/Close Criterion: Time

Time	Fraction
0	0
433	0
434	1

Figura 28: Variables Temporales Exutorios

Se necesitó configurar inicialmente el exutorio en estado cerrado, ya que su valor por defecto es 1, indicativo de que está completamente abierto. Es evidente que se requerirá ajustarlo para que se abra completamente en el segundo 434. Sin embargo, es crucial especificar que en el segundo 433 permanece cerrado. De lo contrario, CFAST podría interpretar una apertura gradual desde el segundo 0 hasta el 434.

Una vez se haya realizado el mismo proceso para los 81 exutorios, la pestaña quedará de la siguiente manera:

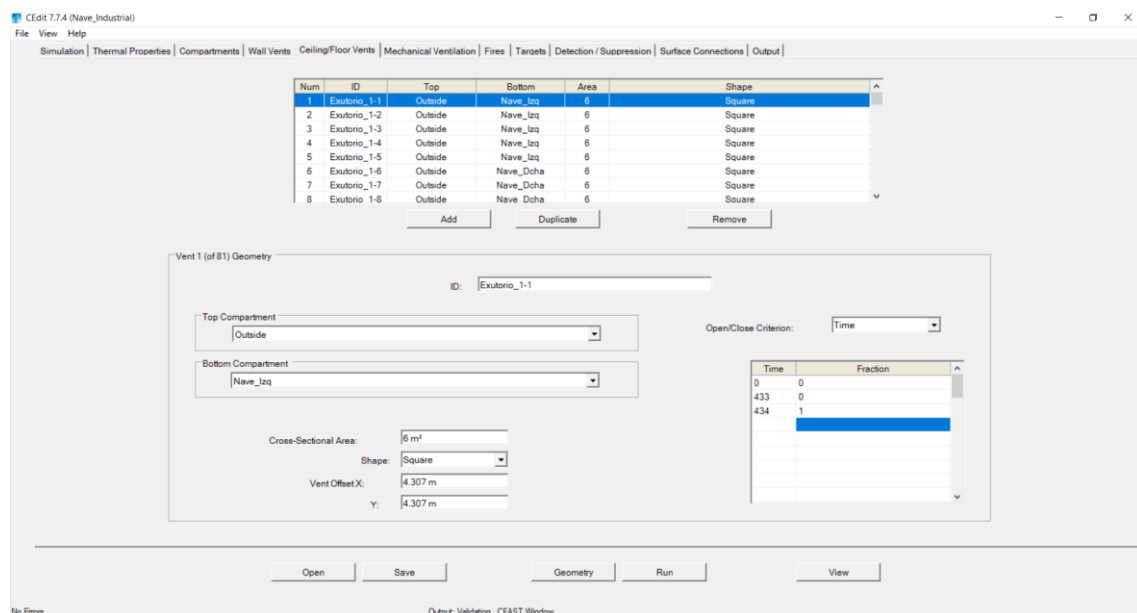


Figura 29: Pestaña de Exutorios

Se obtendrá la siguiente salida:

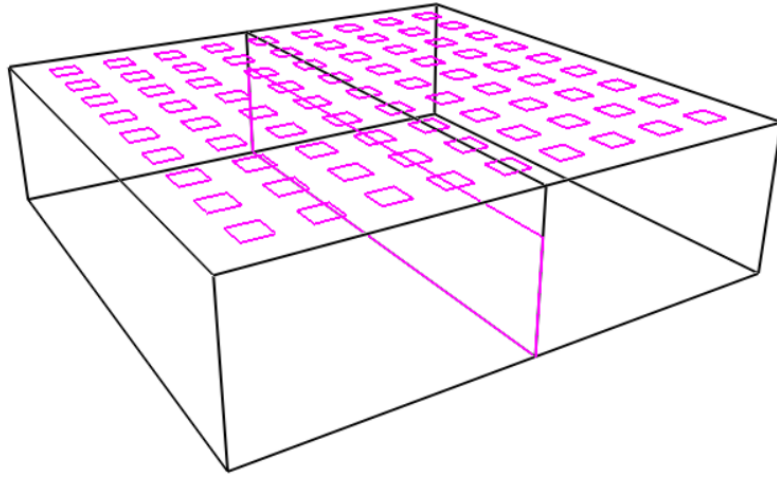


Figura 30: Nave Industrial con 81 exutorios de forma cuadrada

Donde sí se simula el escenario que se lleva configurado, se podrá ver los cambios entre los tiempos de simulación anteriores al segundo 434 y los posteriores. En los segundos previos al 434, los exutorios están marcadas con una X, esto indica que no hay flujo que atraviese esa superficie, pero en los segundos posteriores al 434, estas cruces desaparecerán indicando que los exutorios se encuentran abiertos.

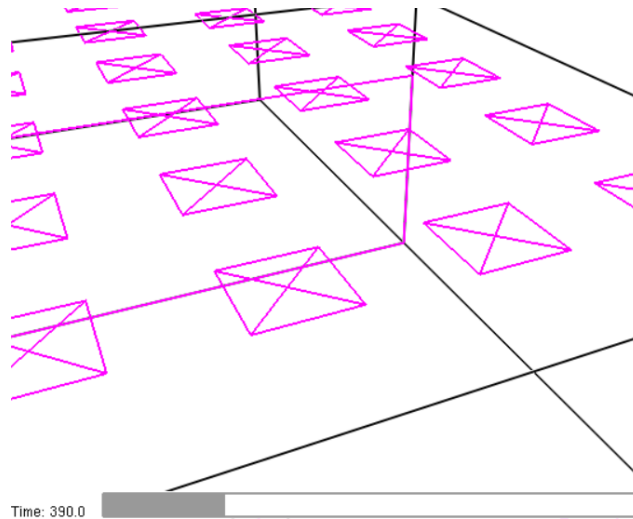


Figura 31: Exutorios Cerrados en el segundo 390

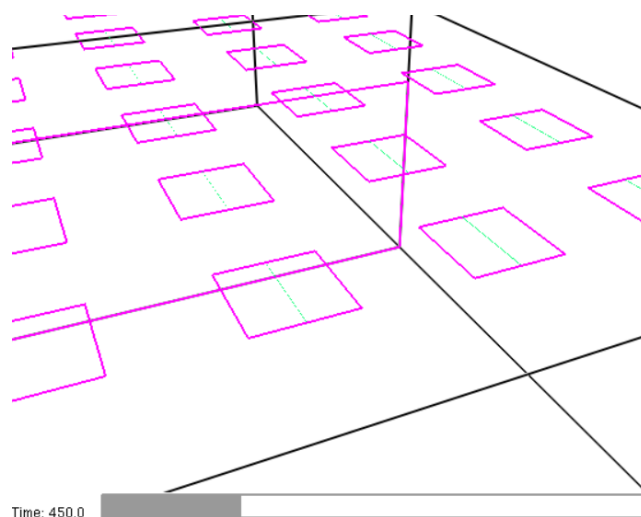


Figura 32: Exutorios Abiertos en el segundo 450

4.3.1.4. Incendio

Habrá que introducir los parámetros necesarios para simular el incendio y esto se hará desde la pestaña “Fires”. Lo primero de todo será definir la expresión que seguirá la evolución de nuestro incendio, en este caso sigue una relación cuadrática por lo que se pulsar  el botón “Add t^2 ” que conducirá a la siguiente ventana donde habrá que introducir los siguientes valores:

Parameter	Value
Fire Growth Rate	Custom
Time to Peak	380 s
Peak HRR	6500 kW
Steady Burning Period	540 s
Decay Time	0.01 s

Figura 33: Definir expresión del Incendio Nave Industrial

Como se puede ver en la anterior figura, la evolución será una personalizada por el usuario, que viene determinada por la simulación FDS. El pico de HRR (tasa de liberación de calor) es de 6.5 MW, tardará 380 segundos en alcanzar este valor y se mantendrá constante en este valor durante los siguientes 540 segundos para terminar inmediatamente en cuanto hayan pasado 920 segundos desde el comienzo del incendio. Una vez

introducidos todos estos parámetros, el incendio sigue una expresión que se puede visualizar mejor en la siguiente figura:

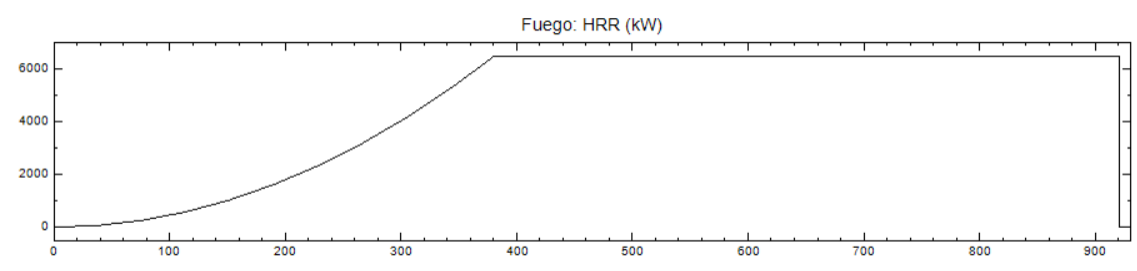


Figura 34: Expresión del incendio Nave Industrial

Habría que introducir el lugar donde se localiza el incendio, que será en el centro de la parte izquierda de la nave (primer compartimento), es decir, respecto de la esquina inferior izquierda de la fachada anterior (que es donde el origen se encuentra ubicado) el origen del incendio sería en las coordenadas (12.5, 25) m. Por último, queda definir las propiedades del incendio que son:

- Metano: CH₄
- Poder Calorífico: 16400 KJ/kg
- Fracción Radiante: 0.537
- Área: 20 m² (estantería de 2 m, esto último no se podrá definir al no haber ninguna variable de entrada con este significado).
- CO Yield: 0.042
- Soot Yield: 0.198

Time (s)	HRR (kW)	Height (m)	Area (m ²)	CO Yield	Soot Yield	HCN Yield	TS Yield
0	0.0	0.00	20.000	0.0420	0.1980	0.0000	0
38	65.0	0.00	20.000	0.0420	0.1980	0.0000	0
76	260.0	0.00	20.000	0.0420	0.1980	0.0000	0
114	585.0	0.00	20.000	0.0420	0.1980	0.0000	0
152	1040.0	0.00	20.000	0.0420	0.1980	0.0000	0

Figura 35: Propiedades del incendio Nave Industrial

Una vez se haya introducido todos estos inputs, se podrá visualizar en la pestaña de “Fires” lo mostrado a continuación:

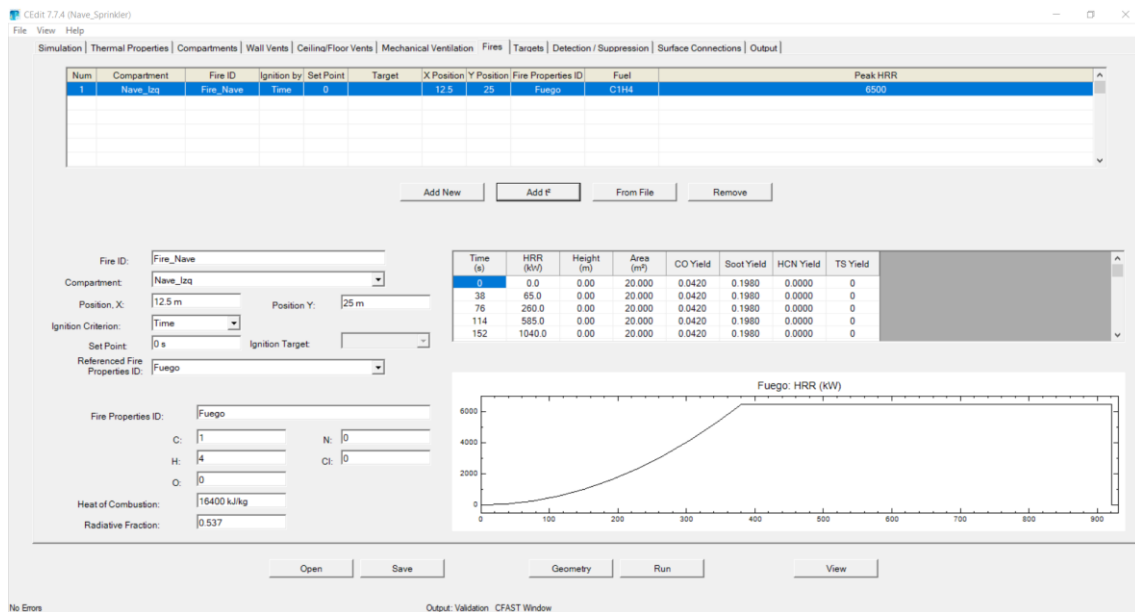


Figura 36: Pestaña de Incendios

En la siguiente figura se puede ver la evolución del incendio que se acaba de programar dividido en 3 momentos, el inicio del incendio, cuando se encuentre en su pico de tasa de liberación de calor y por último una vez hayan pasado los 935 segundos (final del incendio).

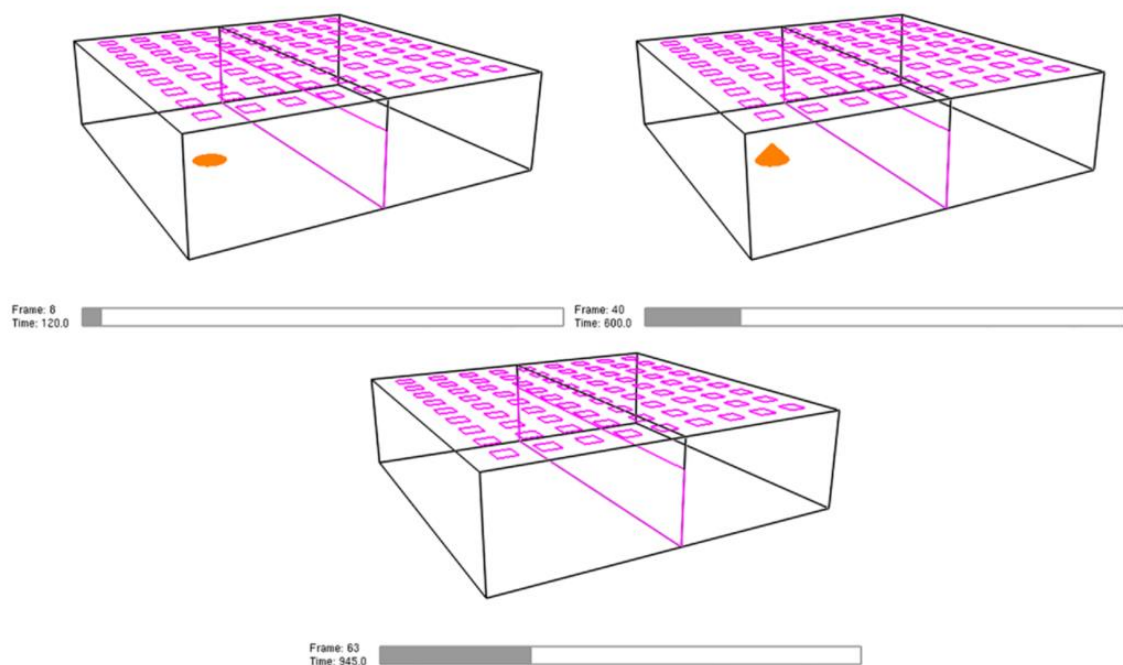


Figura 37: Evolución del Incendio

4.3.1.5. Rociadores

En este apartado se definirán los rociadores que deben de tener las siguientes características:

- K200
- Cubrir 9 m²
- Temperatura de Activación: 74 °C
- RTI (Response Time Index): 30 $\sqrt{(\text{ms})}$
- Densidad del “Spray”: $7 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Colgantes: a 35 cm del techo

Como se ha dicho anteriormente, al cubrir 9 m² cada rociador, tendrá que haber 256 rociadores a lo largo de toda la nave, pasa exactamente lo mismo que con los exutorios, habrá que introducir la posición de cada uno de los rociadores por separado y por lo tanto un total de 256 coordenadas. Por esta razón, se ha tomado la decisión de introducir únicamente 1 rociador, el que se encuentra situado justo encima del incendio. Como cada rociador cubre su área, por mucho que se introdujesen más rociadores, los cambios en los resultados de la simulación no serían relevantes, por lo que sería algo innecesario y poco eficiente.

Para introducir el rociador en la simulación, habrá que ir a la pestaña de “Detection/Supression” y añadir un dispositivo al que lo primero que haremos será definir qué tipo de dispositivo es, en este caso es un “Sprinkler” (rociador). Se introduce en que compartimento y posición se sitúa, que sería en la parte izquierda de la nave (primer compartimento), coordenadas en X e Y (12.5, 25) m y en el eje Z se encontraría a una altura de 13.65 m, puesto que es un rociador colgante que debe de estar a 35 cm del techo que recordemos que tiene una altura de 14 m. Por último, se introducen las propiedades del rociador como la temperatura de activación, el RTI y la densidad del “spray”. Una vez se haya realizado todo este proceso, se tendrá la siguiente figura en pantalla:

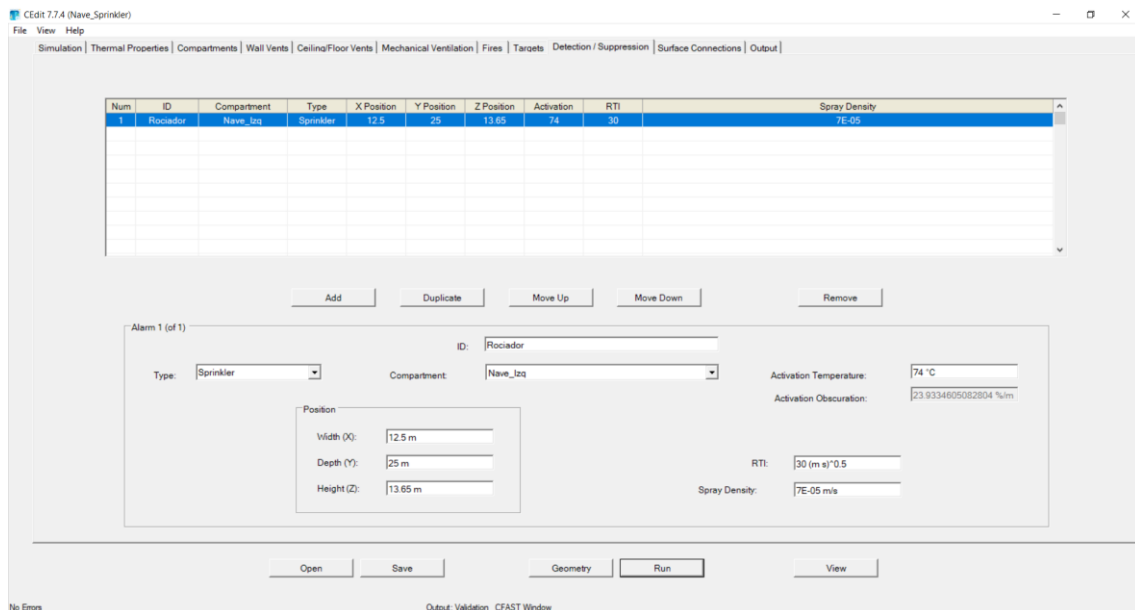


Figura 38: Pestaña de Rociadores

Y se obtendrá el siguiente output, donde se ve que el rociador ha sido incluido en la simulación:

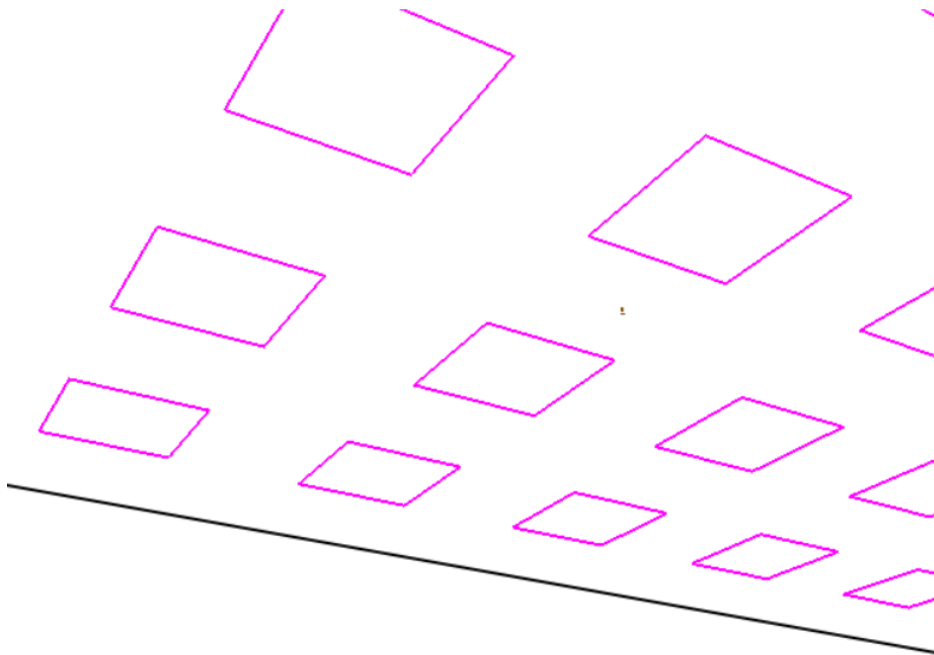


Figura 39: Rociador posicionado en la Nave Industrial

Una vez se hayan configurado todas estas variables de entrada ya estaría todo listo con lo necesario para poder realizar la simulación en CFAST, por lo que se pulsará el botón de “Run” y se obtendrá la siguiente pestaña al completarse la simulación:

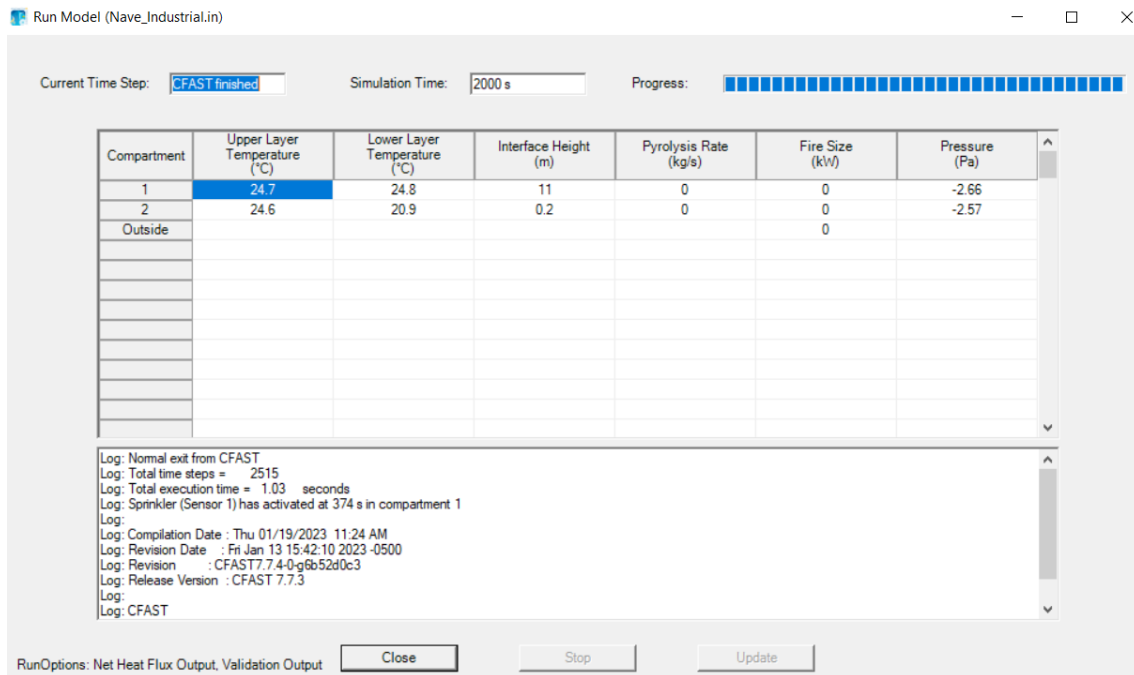


Figura 40: Pestaña de Simulación Completada

En el siguiente apartado se analizarán los resultados obtenidos.

4.3.2. Resultados de la simulación CFAST

Una vez terminada la simulación, aparecen en la carpeta donde teníamos guardado nuestro proyecto muchos archivos nuevos, varios csv y otros más, únicamente nos importan dos, el archivo .smv y el archivo .out. El primero es el archivo que se abrirá con Smokeview y se podrá visualizar nuestra simulación (también se puede escoger Pyrosim), el segundo será el archivo que almacena los resultados (almacena parte de la información de los archivos .csv).

Se abre el primero y se encuentra nuestra estructura con toda su geometría, el fuego no aparecerá y tampoco lo harán los demás parámetros de la simulación (parámetros dependientes del tiempo).

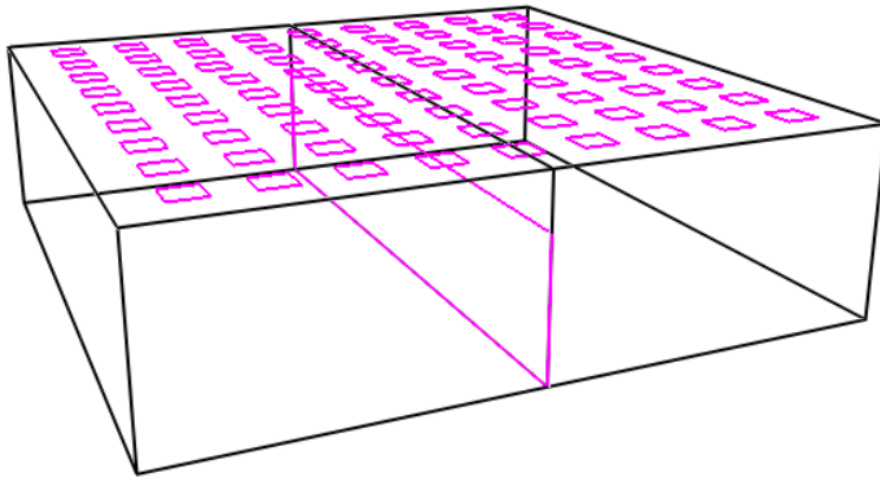


Figura 41: Nave Industrial sin haber cargado la Simulación

Tras haber cargado la simulación a la estructura, se obtendrá algo parecido a la siguiente figura:

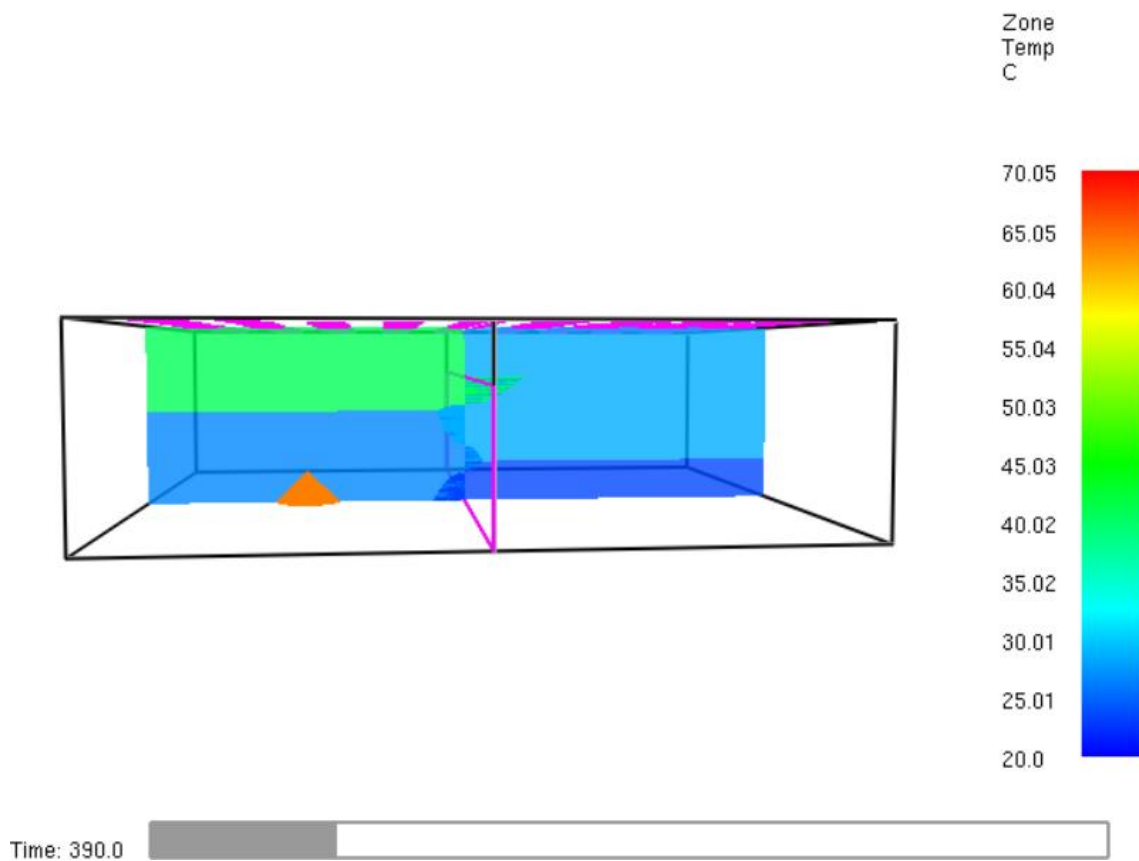


Figura 42: Nave Industrial en el segundo 390

Se puede ver como cada compartimento se divide en 2 zonas claramente separadas. Se explicará más en detalle a continuación todos los resultados que hemos obtenido.

Al abrir el segundo archivo, el tipo de archivo .smv, se verá como en su comienzo se describen todos los parámetros que se han ido introduciendo en la simulación (geometría, temperatura y presión exterior, materiales utilizados y sus propiedades, los 81 exutorios que hemos configurado en la cubierta de la nave y los tiempos de apertura, ...). Una vez aparezca un recuadro indicando el tiempo igual a 0, ahí es donde se empiezan a presentar los resultados cada “step size” que se halla definido previamente, en este caso será 60 segundos.

En la presentación de los resultados se dividirá entre 5 puntos, de los cuales se han marcado 4 de ellos en la curva de evolución del incendio:

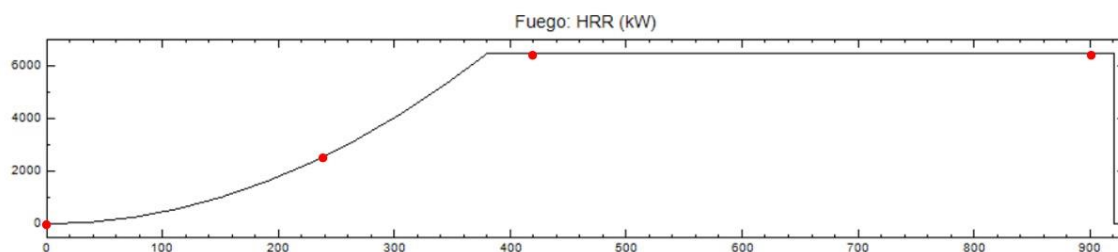


Figura 43: Puntos a analizar los resultados Nave Industrial

Los 5 puntos para analizar serán los siguientes:

1. Tiempo Inicial ($T = 0$ segundos)
2. Mitad en la curva de crecimiento ($T = 240$ segundos)
3. En pico previamente a que los exutorios se abran ($T = 420$ segundos)
4. Antes de finalizar el incendio ($T = 900$ segundos)
5. Tiempo tras haber finalizado el incendio ($T = 2000$ segundos)

4.4.2.1. Tiempo Inicial ($T = 0$ s)

Los primeros resultados que se obtienen son los siguientes:

 * Time = 0.0 seconds. *

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)		Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	20.00	20.00	14.00	1.0	(0%)	22.5	2.179E-02	0.00
Nave_Dcha	20.00	20.00	14.00	1.0	(0%)	22.5	2.184E-02	0.00

Tabla 2: Temperatura media y altura de la zona de humos en $T = 0$ s

Como no ha comenzado el incendio, tanto las temperaturas, como la presión, como la altura de las capas de humos siguen siendo las configuradas previamente.

FIRES

Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (w)	Flame Height (m)	Fire in Upper (w)	Fire in Lower (w)	Vent Fire (w)	Convec. (w)	Radiat. (w)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
Incendio_Nav	Y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 3: Resultados del Incendio en $T = 0$ s

Al no haberse iniciado el incendio, todos sus parámetros valen 0.

DETECTORS/ALARMS/SPRINKLERS

Number	Compartment	Type	Sensor	Smoke		Obs (1/m)	Activated
			Temp (C)	Temp (C)	Vel (m/s)		
1	Nave_Izq	SPRINK	2.000E+01	2.000E+01	1.000E-01		NO

Tabla 4: Resultados del Rociador en $T = 0$ s

Como es evidente, las temperaturas siguen siendo 20 °C y el rociador no se ha activado, puesto que está configurado para que se active cuando mida una Temperatura de 74 °C.

UPPER LAYER SPECIES

Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.4	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

LOWER LAYER SPECIES

Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.4	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5: Resultados de la Composición en % en $T = 0$ s

Como se puede ver, la composición de gases de las 4 zonas es idéntica y la misma que en el aire ambiente (78% N₂, 21% de O₂ y por último vapor de agua H₂O de 1%).

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)

Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer	
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000								
V 1	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 2	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 3	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 4	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 5	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 6	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 7	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 8	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 9	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 10	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 11	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 12	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 13	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 14	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 15	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 16	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 17	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 18	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 19	Nave_Izq	Outside	0.000								

Tabla 6: Resultados del Flujo a través de los Exutorios en $T = 0$ s

Estos son todos los resultados que se obtienen en el tiempo de simulación inicial a partir del archivo .out.

4.4.2.2. Curva de Crecimiento ($T = 240$ s)

Se ha escogido el tiempo de simulación igual a 240 segundos, porque es un valor medio dentro de la curva, se analizarán los cambios que han ocurrido en los resultados respecto al tiempo inicial.

Primero de todo, se observan las temperaturas de las capas y la altura de la capa de humos.

* Time = 240.0 seconds. *

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)

Nave_Izq	26.97	21.66	8.593	6.76E+03 (39%)	0.105	2.739E-02	872.
Nave_Dcha	21.95	20.71	8.640	6.70E+03 (38%)	4.616E-02	2.746E-02	872.

Tabla 7: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 240$ s

Se puede ver como las temperaturas de las 4 zonas se han calentado al ser mayores a 20°C todas, pero sin lugar a duda, la que más se ha calentado es la superior de la zona izquierda de la nave. Esto tiene todo el sentido del mundo puesto que es en la parte izquierda de la nave donde se ha originado el incendio y el calor se eleva, haciendo que

las partes superiores sean las más calientes. Además, debido a que el calor tiende a moverse de áreas de mayor a menor temperatura, se puede propagar hacia las áreas adyacentes, afectando así a otras partes de la nave.

Se analizará ahora la evolución del incendio.

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Nav	Y	48.7	0.159	2.607E+06	0.317				1.207E+06	1.400E+06	12.9	0.00
Nave_Izq			48.7	0.159	2.607E+06		0.00	2.607E+06	0.00				

Tabla 8: Resultados del Incendio en $T = 240$ s

Cuando el incendio ha comenzado hace 4 minutos, el flujo del penacho (Plume Flow) es de 48.7 kg/s, lo que indica la cantidad de humo que está siendo liberada por el incendio. La tasa de pirolisis (Pyrol Rate) es de 0.159 kg/s, que es la tasa a la que el material se está descomponiendo debido al calor del incendio. El tamaño del incendio es de 2.607 MW, lo que indica la cantidad de calor que está liberando el incendio (tiene que llegar a 6.5 MW para alcanzar su pico). La altura de la llama es de 0.317 m. La radiación es de 1.4 MW, que es la cantidad de calor que se está irradiando desde el incendio. La convección es de 1.207 MW, lo que indica la cantidad de calor que se está transfiriendo por convección. Finalmente, la cantidad de material pirolizado (Pyrolysate) es de 12.9 kg.

DETECTORS/ALARMS/SPRINKLERS						
Number	Compartment	Type	Sensor		Smoke	
			Temp (C)	Temp (C)	Vel (m/s)	Obs (1/m)
1	Nave_Izq	SPRINK	4.486E+01	4.732E+01	4.276E+00	NO

Tabla 9: Resultados del Rociador en $T = 240$ s

Se puede ver como el rociador no se ha activado aún, puesto que su sensor de temperatura aún no ha medido los 74 °C. Sí que se observa una clara subida de temperatura en el segundo 240, en la parte izquierda de la nave en la misma posición del incendio a 13.65 m de altura, la temperatura alcanza los 45 °C en ese punto. Es mucho más elevada que la de la zona en la que se encuentra ese punto, puesto que la zona tiene en cuenta todos los puntos que generan ese plano y el punto donde se ubica situado el rociador será de los más calientes.

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.1	20.0	0.175	5.904E-03	0.00	0.00	0.00	1.64	1.21	1.21	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.4	20.3	2.858E-02	9.662E-04	0.00	0.00	0.00	1.23	0.201	0.201	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.3	20.5	3.870E-14	1.309E-15	0.00	0.00	0.00	1.16	2.725E-13	2.725E-13	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	1.592E-13	5.383E-15	0.00	0.00	0.00	1.16	1.125E-12	1.125E-12	0.00	0.00

Tabla 10: Resultados de la Composición en % en $T = 240$ s

En la parte izquierda de la nave, la cantidad de nitrógeno disminuye ligeramente a 78.1% y la de oxígeno a 20.0%. Hay un aumento notable en el dióxido de carbono (CO_2) a 0.175% y monóxido de carbono (CO) a 5.904E-03%. También hay un aumento en la cantidad de agua (H_2O) a 1.64% y se detecta densidad óptica (OD, OD_F) de 1.21 1/m, indicando la presencia de humo. En la capa inferior, los cambios son muy pequeños y solo son perceptibles en valores muy pequeños de CO_2 y CO.

En la parte derecha de la nave, la cantidad de nitrógeno se mantiene casi constante, mientras que la de oxígeno disminuye levemente a 20.3%. Hay un pequeño aumento en el dióxido de carbono (CO_2) a 2.858E-02% y monóxido de carbono (CO) a 9.662E-04%. La cantidad de agua (H_2O) aumenta ligeramente a 1.23%, y la densidad óptica (OD, OD_F) es de 0.201 1/m, mucho menor que en la parte izquierda de la nave. En la capa inferior, al igual que en la parte izquierda, los cambios son muy pequeños y solo perceptibles en valores muy pequeños de CO_2 y CO.

A continuación, se pueden ver los flujos a través de las aberturas, al estar todos los exutorios cerrados en el segundo 240, el flujo a través de ellos es nulo. El único flujo existente es a través de la superficie entre las dos partes de la nave el creado por el plano de la cortina de humos.

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)												
Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer		
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.3126E-01	0.3882E+02	0.8269E+02	0.4455E+02	0.7592E+02		0.7449E+01	0.8273E+02	
V 1	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 2	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 3	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 4	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 5	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 6	Nave_Dcha	Outside	0.000									
V 7	Nave_Dcha	Outside	0.000									
V 8	Nave_Dcha	Outside	0.000									
V 9	Nave_Dcha	Outside	0.000									
V 10	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 11	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 12	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 13	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 14	Nave_Izq	Outside	0.000									
V 15	Nave_Dcha	Outside	0.000									
V 16	Nave_Dcha	Outside	0.000									
V 17	Nave_Dcha	Outside	0.000									
V 18	Nave_Dcha	Outside	0.000									

Tabla 11: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 240$ s

Como estos datos indican, existe un movimiento significativo de aire a través de la ventilación entre estos dos compartimentos. Específicamente, parece que hay un flujo neto de aire desde la capa inferior de la parte derecha hacia la capa inferior de la parte izquierda, y desde la capa superior de la parte izquierda hacia la capa superior de la parte derecha. Esto se debe a las diferencias de presión y temperatura entre las dos partes de la nave, al fin y al cabo, en la parte izquierda es donde se ha originado el incendio.

A continuación, se puede ver una visualización de todo lo que se ha explicado con números anteriormente. Vemos las temperaturas de cada zona, las alturas de la capa de humos de cada parte de la nave, el tamaño y evolución del fuego y, por último, el flujo a través de la parte debajo de la cortina de humos.

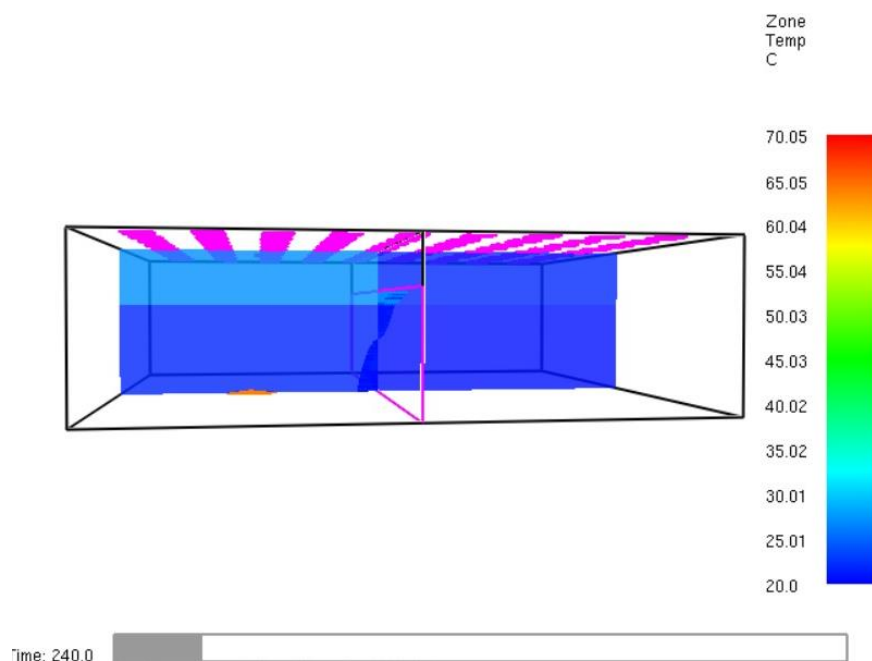


Figura 44: Nave Industrial en $T = 240$ s

4.4.2.3. Pico HRR previo a Apertura de Exutorios ($T = 420$ s)

Como los exutorios se abrirán 1 minuto después de que se active el rociador (en el 374 s), se ha escogido el tiempo igual a 420 segundos para estar en la tasa de liberación de calor máxima y ser un momento previo a dicha apertura.

Se mantendrá la misma estructura que con los dos anteriores puntos, se empezará con un análisis de las temperaturas de cada zona y sus alturas de la capa de humos respectivas.

* Time = 420.0 seconds. *							

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	42.76	28.37	7.059	8.68E+03(50%)	0.210	4.892E-02	4.428E+03
Nave_Dcha	30.56	24.30	2.557	1.43E+04(82%)	0.100	6.005E-02	4.428E+03

Tabla 12: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 420$ s

En la parte izquierda de la nave:

- La temperatura de la capa superior aumenta de 26.97°C a 42.76°C , mientras que la de la capa inferior aumenta de 21.66°C a 28.37°C .
- La altura de la capa de humos disminuye de 8.593 m a 7.059 m.
- El volumen de la capa superior aumenta del 39% al 50%.
- La tasa de absorción en la capa superior aumenta de 0.105 a 0.210 1/m, y en la capa inferior aumenta de $2.739\text{E}-02$ a $4.892\text{E}-02$ 1/m.
- La presión aumenta de 872 Pa a $4.428\text{E}+03$ Pa.

En la parte derecha de la nave:

- La temperatura de la capa superior aumenta de 21.95°C a 30.56°C , y la de la capa inferior de 20.71°C a 24.30°C .
- La altura de la capa de humos disminuye considerablemente de 8.640 m a 2.557 m.
- El volumen de la capa superior aumenta del 38% al 82%.
- La tasa de absorción en la capa superior disminuye de $4.616\text{E}-02$ a 0.100 1/m, y en la capa inferior aumenta de $2.746\text{E}-02$ a $6.005\text{E}-02$ 1/m.
- La presión aumenta de 872 Pa a $4.428\text{E}+03$ Pa.

Tiene sentido que tanto las temperaturas como la presión hayan seguido aumentando, puesto que el incendio ha crecido considerablemente respecto al segundo 240.

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Nav	Y	47.2	0.338	5.548E+06	2.24				2.569E+06	2.979E+06	64.9	0.00
Nave_Izg			47.2	0.338	5.548E+06		0.00	5.548E+06	0.00				

Tabla 13: Resultados del Incendio en $T = 420$ s

Comparando el incendio entre los segundos 240 y 420, se pueden observar diferencias notables:

- El flujo del penacho disminuye ligeramente de 48.7 kg/s a 47.2 kg/s.
- La tasa de pirolisis se duplica aproximadamente de 0.159 kg/s a 0.338 kg/s.
- El tamaño del fuego aumenta más del doble de 2.607 MW a 5.548 MW.
- La altura de la llama aumenta significativamente de 0.317 m a 2.24 m.
- El poder de fuego convectivo aumenta de 1.207 MW a 2.569 MW.
- El poder de fuego radiante también aumenta de 1.400 MW a 2.979 MW.
- La cantidad de material pirolizado aumenta de 12.9 kg a 64.9 kg.

Estas diferencias indican que el incendio se ha intensificado significativamente entre $T = 240$ s y $T = 420$ s, con un aumento en el tamaño del fuego, la altura de la llama, el poder de fuego convectivo y radiante, así como la cantidad de pirolisis.

Se está en un tiempo mayor al segundo 374, que es cuando se activa el rociador, por lo que, en la posición en la que se encuentra el rociador (12.5, 25, 13.65) m ya se ha alcanzado la temperatura de 74 °C, como se verá a continuación:

DETECTORS/ALARMS/SPRINKLERS							
Number	Compartment	Type	Sensor	Smoke	Vel (m/s)	Obs (1/m)	Activated
			Temp (°C)	Temp (°C)			
1	Nave_Izq	SPRINK	7.589E+01	7.558E+01	5.614E+00		YES

Tabla 14: Resultados del Rociador en $T = 420$ s

El sensor de temperatura del rociador marca una temperatura de 76 °C, pero se verá cómo esta comienza a bajar a partir de ahora puesto que no solo el rociador estará activado, sino que en pocos segundos se abrirán todos los exutorios de la nave para que el humo pueda ir saliendo.

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	77.7	19.3	0.443	1.499E-02	0.00	0.00	0.00	2.40	3.03	3.03	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.1	20.0	0.185	6.268E-03	0.00	0.00	0.00	1.67	1.31	1.31	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.3	20.4	4.500E-02	1.522E-03	0.00	0.00	0.00	1.28	0.321	0.321	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.4	20.4	1.747E-02	5.905E-04	0.00	0.00	0.00	1.21	0.126	0.126	0.00	0.00

Tabla 15: Resultados de la Composición en % en $T = 420$ s

Parte izquierda de la nave:

- En la capa superior, a $T = 420$ s se observa un aumento de la concentración de CO_2 (de 0.175% a 0.443%), CO (de 0.005904% a 0.01499%), y H_2O (de 1.64% a 2.4%) en comparación con $T = 240$ s. El nitrógeno y el oxígeno disminuyeron ligeramente. La densidad óptica aumentó (de 1.21 1/m a 3.03 1/m).
- En la capa inferior, a $T = 420$ s la concentración de CO_2 y CO aumentó, aunque el incremento es muy pequeño. El nitrógeno y el oxígeno se mantuvieron aproximadamente iguales y la concentración de H_2O aumentó ligeramente. La densidad óptica también aumentó, aunque la cantidad es muy pequeña.

Parte derecha de la nave:

- En la capa superior, a $T = 420$ s la concentración de CO_2 disminuyó (de 0.02858% a 0.0185%), mientras que CO aumentó (de 0.0009662% a 0.006268%). La concentración de H_2O aumentó (de 1.23% a 1.67%) y el nitrógeno y el oxígeno disminuyeron ligeramente. La densidad óptica también aumentó (de 0.201 1/m a 1.31 1/m).
- En la capa inferior, a $T = 420$ s las concentraciones de CO_2 y CO aumentaron ligeramente. El nitrógeno, el oxígeno y el H_2O se mantuvieron aproximadamente iguales. La densidad óptica aumentó, pero el incremento es muy pequeño.

Esto indica que, debido a la progresión del fuego, se ha provocado un aumento en las concentraciones de algunos gases y densidad óptica.

Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer	
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.5340E+00	0.8644E+02	0.1089E+03	0.2317E+02	0.1064E+03	0.7162E+02	0.3208E+01	0.3786E+02
V 1	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 2	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 3	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 4	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 5	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 6	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 7	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 8	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 9	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 10	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 11	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 12	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 13	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 14	Nave_Izq	Outside	0.000								
V 15	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 16	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 17	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 18	Nave_Dcha	Outside	0.000								
V 19	Nave_Izq	Outside	0.000								

Tabla 16: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 420$ s

Los exutorios se mantienen cerrados aún por lo que el flujo a través de ellos seguirá manteniéndose en 0. Respecto al flujo entre las dos partes de la nave:

Para el tiempo $T = 240$ s:

- Flujo de entrada a la capa superior desde la parte izquierda: 0.03126 kg/s
- Flujo de salida de la capa superior a la parte derecha: 38.82 kg/s
- Flujo de entrada a la capa inferior desde la parte izquierda: 82.69 kg/s
- Flujo de salida de la capa inferior a la parte derecha: 44.55 kg/s

Para el tiempo $T = 420$ s:

- Flujo de entrada a la capa superior desde la parte izquierda: 0.5340 kg/s, que es significativamente mayor que en $T = 240$ s.
- Flujo de salida de la capa superior a la parte derecha: 86.44 kg/s, también mayor que en $T = 240$ s.
- Flujo de entrada a la capa inferior desde la parte izquierda: 108.9 kg/s, de nuevo, un aumento significativo en comparación con $T = 240$ s.
- Flujo de salida de la capa inferior a la parte derecha: 23.17 kg/s, que es casi la mitad de lo que era en $T = 240$ s.

Los flujos de entrada a las capas superior e inferior desde la parte izquierda y el flujo de salida de la capa superior a la parte derecha han aumentado. Sin embargo, el flujo de salida de la capa inferior a la parte derecha ha disminuido significativamente.

A continuación, se verá una imagen con lo explicado anteriormente.

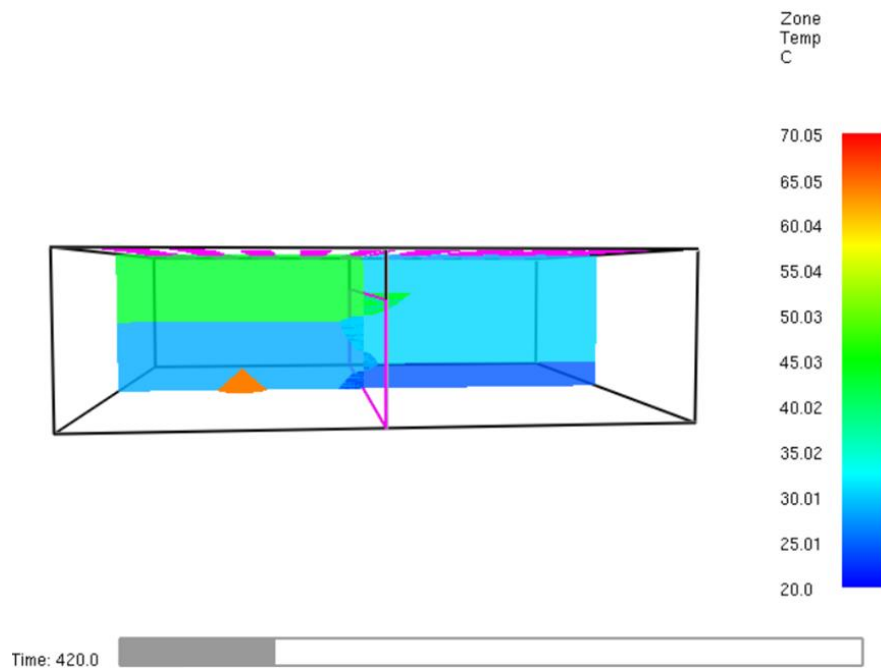


Figura 45: Nave Industrial en $T = 420$ s

Se puede ver como la altura de la capa de humos en toda la nave se ha reducido, que las temperaturas en las 4 zonas han subido, sobre todo la zona superior de la parte izquierda de la nave (entre 40°C y 45°C). Se puede ver también, como el tamaño del fuego es mucho mayor, lo destacable a nivel visual es su altura. Se ve también como los flujos que atraviesan esta superficie coinciden con los explicados anteriormente, tanto en módulo como en dirección y sentido.

4.4.2.4. Previo a Finalizar el Incendio ($T = 900$ s)

Se ha escogido el segundo 900, puesto que es un instante previo a que finalice el incendio, la tasa de liberación está en su máximo (6.5 MW) y los exutorios se encuentran ya abiertos.

* Time = 900.0 seconds. *

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	42.72	35.42	8.936	6.33E+03(36%)	0.256	0.148	-9.52
Nave_Dcha	33.97	20.94	0.3948	1.70E+04(97%)	0.175	0.155	-9.04

Tabla 17: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 900$ s

Para la parte izquierda:

- La temperatura superior disminuye ligeramente de 42.76°C a 42.72°C.
- La temperatura inferior aumenta de 28.37°C a 35.42°C.
- La altura de la capa de humos aumenta de 7.059 m a 8.936 m.
- El volumen superior disminuye de 8680 m³ (50% del total) a 6330 m³ (36% del total).
- El factor de absorción superior aumenta de 0.210 (1/m) a 0.256 (1/m).
- El factor de absorción inferior aumenta de 4.892E-02 (1/m) a 0.148 (1/m).
- La presión disminuye de 4428 Pa a -9.52 Pa.

Para la parte derecha:

- La temperatura superior aumenta de 30.56°C a 33.97°C.
- La temperatura inferior disminuye de 24.30°C a 20.94°C.
- La altura de la capa de humos disminuye de 2.557 m a 0.3948 m.
- El volumen superior aumenta de 14300 m³ (82% del total) a 17000 m³ (97% del total).
- El factor de absorción superior aumenta de 0.100 (1/m) a 0.175 (1/m).
- El factor de absorción inferior aumenta de 6.005E-02 (1/m) a 0.155 (1/m).
- La presión disminuye de 4428 Pa a -9.04 Pa.

Estos resultados tienen sentido, puesto que en la altura de la capa de humos de la parte izquierda de la nave ha subido, indicando que el humo se está acumulando en el techo debido a que está saliendo por los exutorios abiertos de la cubierta. La temperatura inferior de la parte izquierda aumenta, indicando que el incendio sigue activo, por último, la presión disminuye en ambos compartimentos, lo cual será resultado de la apertura de los exutorios que permiten que el aire salga de los compartimentos.

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Nav	Y	43.6	8.908E-02	1.461E+06	0.00				6.764E+05	7.845E+05	154.	0.00
Nave_Izq			43.6	8.908E-02	1.461E+06		0.00	1.461E+06	0.00				

Tabla 18: Resultados del Incendio en $T = 900$ s

- Flujo del penacho: disminuye de 47.2 kg/s a 43.6 kg/s. Esto puede ser debido a la disminución en la intensidad del incendio o a la mejora en la ventilación después de abrir los exutorios.
- Tasa de pirólisis: disminuye de 0.338 kg/s a 0.08908 kg/s, indicando que la cantidad de material que se está descomponiendo por el calor del fuego se ha reducido significativamente. Esto podría ser porque gran parte del material combustible ya ha sido consumido o porque la intensidad del incendio ha disminuido.
- Tamaño del fuego: medido en vatios (W), ha disminuido aproximadamente a la mitad, pasando de 5.548 MW a 1.461 MW. Esto sugiere que el incendio ha perdido intensidad durante este periodo.
- Altura de la llama: ha disminuido de 2.24 m a 0 m. Esto puede sugerir que el incendio ya no está produciendo llamas visibles, lo cual podría ser un indicativo de que la cantidad de combustible disponible ha disminuido considerablemente o que el fuego está siendo sofocado de manera efectiva.
- Potencia del fuego en convección y radiación: ambos parámetros han disminuido considerablemente, indicando una disminución en la transferencia de calor desde el incendio al ambiente circundante.
- Cantidad de material pirolizado: ha aumentado de 64.9 kg a 154 kg. Esto indica que, aunque la tasa de pirólisis ha disminuido, la cantidad total de material que ha sido descompuesto por el calor del fuego ha aumentado.

DETECTORS/ALARMS/SPRINKLERS							
Number	Compartment	Type	Sensor	Smoke	Vel (m/s)	Obs (1/m)	Activated
			Temp (C)	Temp (C)			
1	Nave_Izq	SPRINK	5.355E+01	5.298E+01	3.501E+00		YES

Tabla 19: Resultados del Rociador en $T = 900$ s

Se ve como la temperatura en la posición del rociador ha disminuido considerablemente a 54 °C, por mucho que la temperatura no sea igual o mayor a 74 °C el rociador se mantendrá activo durante el resto de la simulación, puesto que esa temperatura es la de activación no la de funcionamiento. Esa disminución tan grande en la temperatura seguramente se deba en una gran parte a la apertura de los exutorios de la cubierta de la nave.

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	77.5	18.9	0.564	1.906E-02	0.00	0.00	0.00	2.73	3.69	3.69	0.00	0.00
Nave_Dcha	77.8	19.4	0.398	1.346E-02	0.00	0.00	0.00	2.27	2.68	2.68	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	77.9	19.7	0.311	1.051E-02	0.00	0.00	0.00	2.03	2.08	2.08	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.2	20.6	1.825E-03	6.169E-05	0.00	0.00	0.00	1.17	1.277E-02	1.277E-02	0.00	0.00

Tabla 20: Resultados de la Composición en % en $T = 900$ s

Se observa un aumento en la densidad óptica (OD) de la capa superior en ambos compartimentos de $T = 420$ s a $T = 900$ s, lo que indica un aumento en la concentración de partículas de humo. Esto tiene sentido si se ha producido un incendio, ya que se espera que la cantidad de humo aumente con el tiempo. Además, la concentración de CO_2 y CO también aumenta en la capa superior en ambos compartimentos, esto también tiene sentido en el contexto de un incendio, ya que el CO_2 y el CO son subproductos comunes de la combustión. La concentración de CO_2 y CO también aumenta en la capa inferior de la parte izquierda de la nave, lo que podría indicar que el humo y los gases de la combustión están empezando a llenar el compartimento desde arriba. Sin embargo, en la capa inferior de la parte derecha de la nave, la concentración de CO_2 y CO en $T = 900$ s es notablemente menor que en $T = 420$ s. Esto podría ser el resultado de una ventilación adecuada en la parte derecha, que estaría ayudando a eliminar el humo y los gases de la combustión de la capa inferior.

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)												
Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer		
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.1358E-01	0.3280E+02	0.1008E+03	0.5591E+02	0.8870E+02	0.8793E+02	0.1160E-01	0.1287E+02	
V 1	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 2	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 3	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 4	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 5	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 6	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00
V 7	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00
V 8	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00
V 9	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00
V 10	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 11	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 12	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 13	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 14	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2627E+00		0.1456E-05	0.2627E+00				
V 15	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00
V 16	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00
V 17	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00
V 18	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.3369E+00						0.3369E+00

Tabla 21: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 900$ s

Se ve como los exutorios están a 1, por lo que están abiertos, además se observa principalmente flujos de salida, lo que indica que los gases están siendo efectivamente ventilados hacia el exterior. En la imagen se muestran únicamente las dos primeras filas

de exutorios, esto se debe a que existe un patrón entre el flujo que atraviesa los exutorios, por lo que se ve innecesario y poco eficiente mostrar las 7 filas de exutorios restantes.

Como en los tiempos anteriores, se mostrará a continuación todo lo explicado de manera visual y más gráfica:

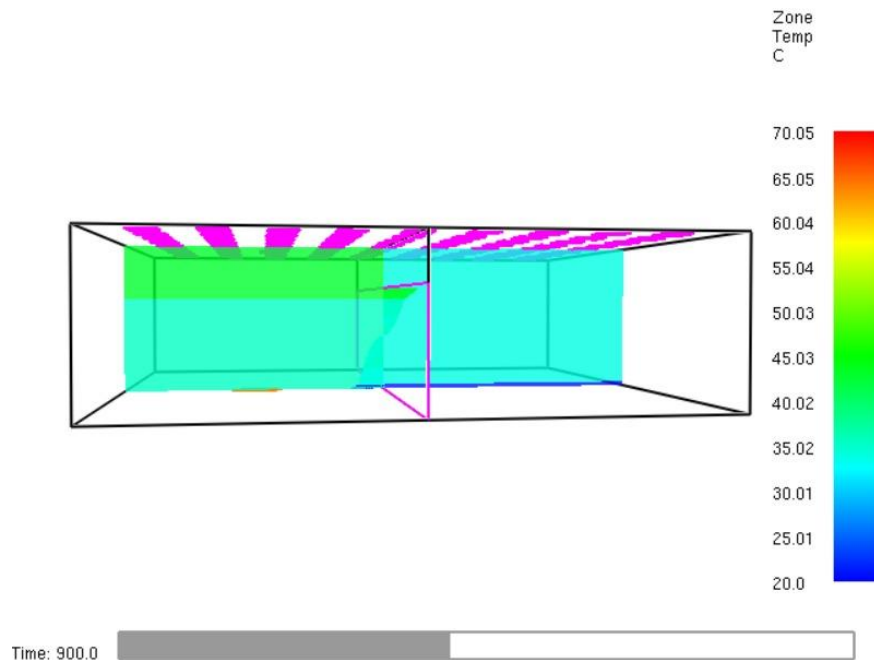


Figura 46: Nave Industrial en $T = 900\text{ s}$

Se puede ver como las descripciones que se han dado antes coinciden con esta representación, las temperaturas de las zonas de la parte izquierda de la nave, se mantienen constantes, mientras que la zona superior de la parte derecha se calienta algo más, también se ve como la altura de la capa de humos en la parte izquierda ha subido ligeramente. También se puede observar como la altura del fuego es casi inexistente. Si se quieren visualizar los flujos que atraviesan los exutorios de la cubierta habrá que cambiar de vista y acercarse más a la estructura, puesto que, al ser 81 exutorios, el flujo que pasa por cada uno es muy pequeño en comparación con el que se intercambian cada parte de la nave.

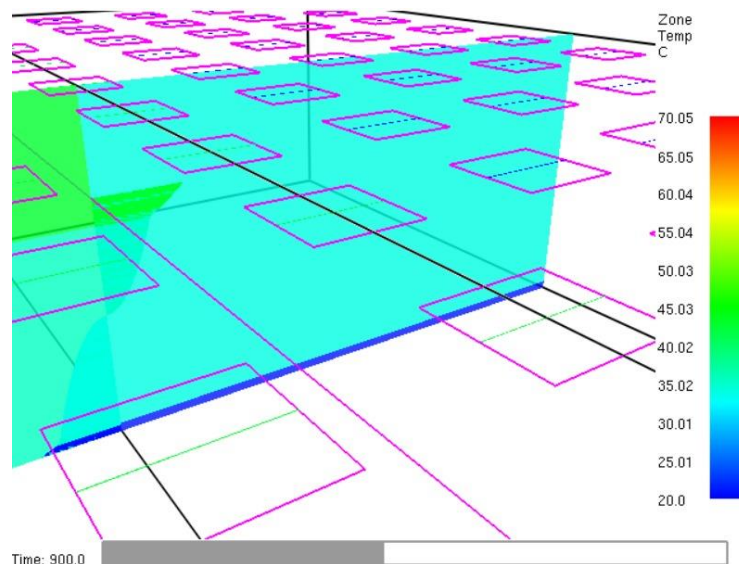


Figura 47: Flujo a través de los Exutorios y su Temperatura

Se puede observar como el valor en sí es mínimo comparado con el que atraviesa la nave de lado a lado, por eso es una lámina tan fina que parece una línea. El color de esta lámina es a la temperatura a la que están saliendo estos gases, se ve como los gases de la parte izquierda salen a una mayor temperatura que los de la parte derecha de la nave, esto es un resultado lógico puesto que las zonas de la parte izquierda están a mayor temperatura al haberse originado el incendio en ella.

4.4.2.5. Tiempo Tras el Incendio (T = 2000 s)

El tiempo que se ha escogido es el de 2000 segundos, puesto que es el final de la simulación y es más de 1000 segundos tras haber finalizado el incendio, por lo que puede llegar a considerarse un tiempo con resultados muy cercanos al régimen permanente.

Las temperaturas y la capa de humos de cada parte de la nave serán las siguientes:

* Time = 2000.0 seconds. *							

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	24.74	24.84	11.49	3.13E+03(18%)	0.238	0.142	-2.66
Nave_Dcha	24.55	20.93	0.2011	1.72E+04(99%)	0.145	0.234	-2.57

Tabla 22: Temperatura media y Altura de la capa de humos en T = 2000 s

Para la parte izquierda:

- Temperatura: comienza con una gran diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior (42.72°C vs 35.42°C). Esta diferencia disminuye considerablemente en el segundo tiempo, casi igualándose las temperaturas (24.74°C vs 24.84°C).
- Altura de la interfaz: aumenta de 8.936m a 11.49m, indicando que la interfaz entre las zonas superior e inferior se ha desplazado hacia arriba.
- Volumen de la parte superior: disminuye del 36% al 18% del volumen total, lo que sugiere que el aire caliente se ha movido hacia abajo o se ha enfriado.
- Absorbancia: la superior disminuye ligeramente (0.256 a 0.238 1/m) mientras que la absorbancia inferior disminuye más notablemente (0.148 a 0.142 1/m).
- Presión: la presión negativa se reduce de -9.52 Pa a -2.66 Pa, indicando que la diferencia de presión ha disminuido.

Para la parte derecha:

- Temperatura: la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior también disminuye (33.97°C vs 20.94°C al inicio, y 24.55°C vs 20.93°C en el segundo momento).
- Altura de la capa de humos: disminuye de 0.3948m a 0.2011m, sugiriendo que la interfaz entre las zonas superior e inferior se ha desplazado hacia abajo.
- Volumen de la parte superior: aumenta ligeramente, del 97% al 99% del volumen total, lo que puede indicar que el aire caliente se ha movido hacia arriba o se ha enfriado menos que en la parte izquierda de la nave.
- Absorbancia: la superior disminuye (0.175 a 0.145 1/m) mientras que la absorbancia inferior aumenta (0.155 a 0.234 1/m).
- Presión: al igual que en la parte izquierda, la presión negativa se reduce, en este caso de -9.04 Pa a -2.57 Pa.

Analizando los valores de la altura de la capa de humo y las temperaturas en las cuatro zonas, se observa que toda la sección izquierda de la nave presenta una temperatura prácticamente homogénea, muy similar a la de la zona superior de la sección derecha. Aunque la altura de la interfaz entre las zonas superior e inferior de la sección izquierda de la nave continúa incrementándose, esto no necesariamente implica que la capa de humo, y por ende el humo mismo, esté ascendiendo.

En un escenario donde la diferencia entre las temperaturas de las zonas superior e inferior es mínima, no podemos asumir directamente que la altura de la interfaz sea equivalente a la altura de la capa de humos. De hecho, en este caso específico, lo que la simulación sugiere es que la capa de humo se encuentra a un nivel más bajo. Esto evidencia que, aunque la altura de la interfaz aumente, esta no está correlacionada directamente con un ascenso en la capa de humos.

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Nav	Y	0.00	0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	156.	0.00

Tabla 23: Resultados del Incendio en $T = 2000$ s

Como es evidente, si el incendio finalizó en el segundo 920, en el segundo 2000, todos sus parámetros serán nulos.

DETECTORS/ALARMS/SPRINKLERS							
Number	Compartment	Type	Sensor	Smoke			
			Temp (C)	Temp (C)	Vel (m/s)	Obs (1/m)	Activated
1	Nave_Izq	SPRINK	2.522E+01	2.474E+01	1.000E-01		YES

Tabla 24: Resultados del Rociador en $T = 2000$ s

Se ve como la temperatura que marca el rociador es prácticamente idéntica a la temperatura de las zonas de la parte izquierda de la nave, también podemos ver como la velocidad de los gases es muy pequeña, esto indica que ya no está habiendo extracción de humo, lo cual resulta un problema puesto que sigue habiendo humo en el interior de la nave.

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	77.7	19.2	0.453	1.533E-02	0.00	0.00	0.00	2.42	3.15	3.15	0.00	0.00
Nave_Dcha	77.9	19.7	0.319	1.079E-02	0.00	0.00	0.00	2.05	2.21	2.21	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	77.9	19.7	0.303	1.026E-02	0.00	0.00	0.00	2.01	2.10	2.10	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.2	20.6	9.542E-03	3.226E-04	0.00	0.00	0.00	1.19	6.678E-02	6.678E-02	0.00	0.00

Tabla 25: Resultados de la Composición en % en $T = 2000$ s

A medida que pasa el tiempo, parece que la concentración de los diferentes gases en ambos compartimentos se acerca a la uniformidad, con las concentraciones de CO₂ y CO

disminuyendo significativamente en la parte derecha de la nave. Esto puede sugerir que la ventilación y la eliminación del humo es algo más efectiva en la parte derecha que la izquierda.

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)

Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer	
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.7555E+01		0.3596E+02	0.4106E+02	0.4095E+02	0.4066E+02	0.1048E+00	0.2859E+01
V 1	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 2	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 3	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 4	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 5	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 6	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01
V 7	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01
V 8	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01
V 9	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01
V 10	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 11	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 12	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 13	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 14	Nave_Izq	Outside	1.000		0.4856E-01		0.1320E-05	0.4856E-01			
V 15	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01
V 16	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01
V 17	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01
V 18	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7571E-01					0.7571E-01

Tabla 26: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 2000\text{ s}$

Se puede ver como efectivamente, el flujo a través de los exutorios ha ido disminuyendo hasta este punto en el que es tan mínimo que es imperceptible, el humo ya no sale de la nave.

A continuación, se visualiza nuestra estructura con todos estos detalles que hemos comentado:

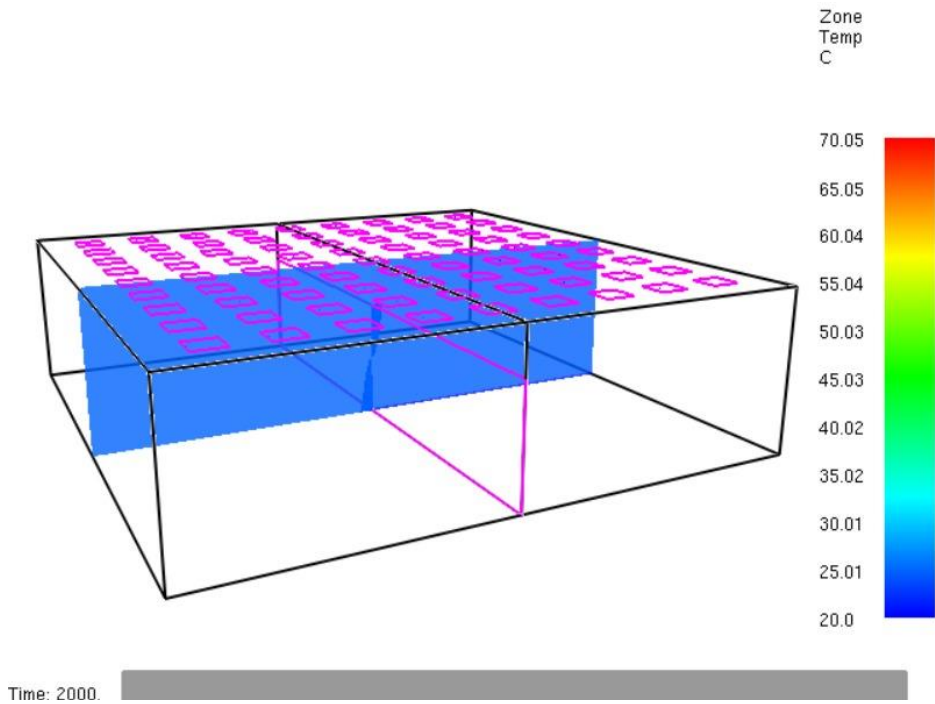


Figura 48: Nave Industrial en $T = 2000\text{ s}$

Se puede ver como se han enfriado las zonas y que la capa de humos de la parte derecha de la nave es casi inexistente y que ambas están muy cerca del suelo, indicando que la nave está repleta de humo.

4.3.3. Comparación de Resultados

Se podrían comparar todos los anteriores resultados que hemos ido explicando, pero estamos dentro de los límites de la simulación previamente hecha en FDS. Se tienen unos resultados del FDS y únicamente se podrá comparar con ellos. Por lo tanto, los parámetros que se compararán serán los siguientes:

- Altura de la capa de humos en la parte izquierda de la nave
- Plano Longitudinal de Temperatura
- Comparación de Isosuperficie de 60°C
- Instante en el que salta el rociador (muy correlacionado con la variable temperatura)
- Expansión del Humo a través de la nave

4.3.3.1. Altura Capa de Humos

De los resultados de la simulación FDS se tiene la siguiente altura media de la capa de humos de la parte izquierda de la nave:

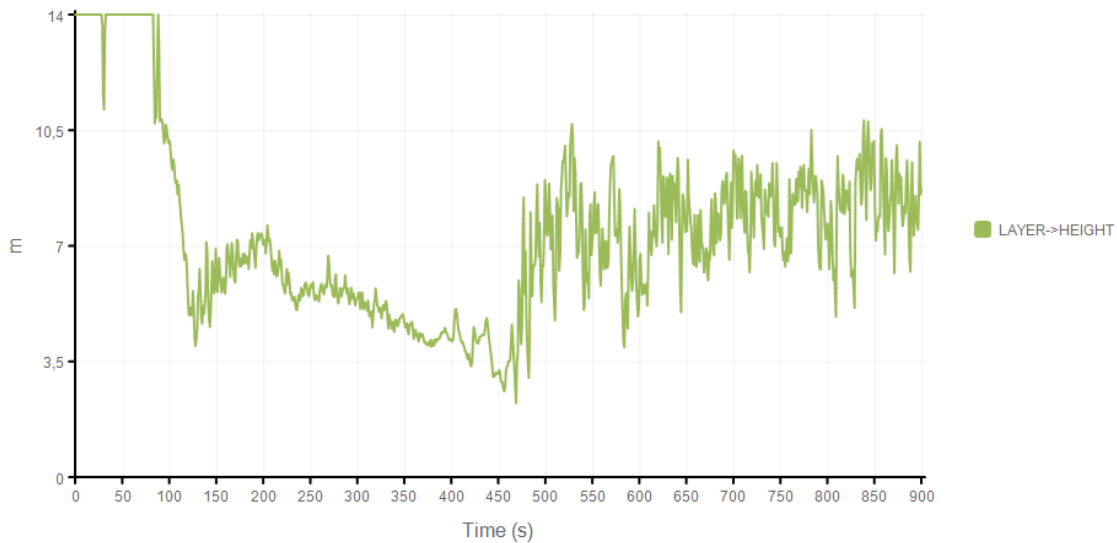


Figura 49: FDS - Altura de la Capa de Humos (Izq)

Para comparar realmente esta gráfica con otra cosa, lo mejor sería tener otra gráfica en la misma base de tiempo, para ello habrá que utilizar uno de los archivos que se has creado al simular nuestro escenario, este archivo es: Nave_Industrial_compartments.csv. Para abrirlo y visualizarlo correctamente, se utilizará la herramienta de Jupyter Notebook y ejecutaremos nuestros códigos en el lenguaje de programación Python.

Lo primero que se hará será importar las librerías necesarias:

```
In [1]: 1 import pandas as pd
        2 import matplotlib.pyplot as plt
```

Pandas se utilizará para la manipulación y análisis de datos y matplotlib para poder graficar nuestras variables.

```
In [2]: 1 datos_compartments = pd.read_csv('Nave_Industrial_compartments.csv', sep=',', low_memory=False, index_col=0)

In [3]: 1 altura = datos_compartments['HGT_1']
        2 indice_actual = datos_compartments.index
        3 indice_numeros = indice_actual.to_list().index(' 0.0000000000E+00')
        4 altura = altura.iloc[indice_numeros:]
        5 altura.head()

Out[3]: Time
0.0000000000E+00    0.13999200000E+02
0.1500000000E+02    0.13939111541E+02
0.3000000000E+02    0.13756906361E+02
0.4500000000E+02    0.13463746791E+02
0.6000000000E+02    0.13101598221E+02
Name: HGT_1, dtype: object
```

Se carga el archivo .csv y se verá cómo está todo en notación científica por lo que habrá que cambiar esto con el siguiente código:

```
In [4]: 1 altura = altura.astype(float).apply(lambda x: '{:.2f}'.format(x))
2 altura.index = altura.index.map(lambda x: '{:.2f}'.format(float(x)))
3 print(altura.head())
```

Time
0.00 14.00
15.00 13.94
30.00 13.76
45.00 13.46
60.00 13.10
Name: HGT_1, dtype: object

De esta manera, los datos son más fáciles de interpretar. Lo único que queda ahora es filtrar nuestra muestra a 950 segundos, que es alrededor del valor en el que se corta la gráfica que se tiene del FDS, y graficar la altura de la capa de humos contra el tiempo.

```
In [5]: 1 altura.index = altura.index.astype(float)
2 altura_filtrada = altura.loc[altura.index <= 950]
3
4 altura_filtrada = altura_filtrada.astype(float)
5 x = altura_filtrada.index
6 y = altura_filtrada.values
7
8 plt.figure(figsize=(10, 6))
9 plt.plot(x, y)
10 plt.xticks(rotation=45)
11
12 plt.xlabel('Tiempo')
13 plt.ylabel('Altura Capa Humos')
14 plt.title('Altura de la Capa de Humos')
15 plt.show()
```

Este código genera como output la siguiente gráfica:



Figura 50: CFAST - Altura de la Capa de Humos (Izq)

Comparando estas gráficas se podrá ver que la tendencia general es la misma, un comienzo de caída repentina (cuando se inicia el incendio), una estabilización alrededor de los 7 m, para acabar subiendo de manera poco pronunciada alrededor del segundo 450, una vez abiertos los exutorios. La gran diferencia que salta a la vista es que el gráfico del FDS tiene un mínimo alrededor del 3.5, mientras que el CFAST alcanza su mínimo alrededor de 7 m. Esto se puede deber a una gran cantidad de factores:

- Diferencia en la definición de la capa de humos: CFAST y FDS definen la capa de humos de manera diferente. CFAST define la capa de humos como la interfaz donde se encuentran las zonas superior e inferior, mientras que FDS calcula la altura de la capa de humos a lo largo de una línea desde el techo hasta el suelo. Esta diferencia en la definición puede resultar en diferencias en los valores de la altura de la capa de humos entre los dos modelos.
- Diferencia en los algoritmos de modelado: CFAST y FDS utilizan algoritmos de modelado diferentes. CFAST utiliza un modelo de dos zonas, que asume que cada zona está a una temperatura uniforme. Por otro lado, FDS utiliza un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para representar la propagación de fluidos (como el humo) a través del espacio. Esto puede resultar en una mayor variabilidad en los resultados de FDS en comparación con CFAST.

- Diferencia en la resolución temporal: la diferencia en la resolución temporal entre los dos modelos también puede explicar la variabilidad en las gráficas. FDS, con su enfoque CFD, puede capturar fluctuaciones rápidas en el comportamiento del humo, lo que puede resultar en una gráfica con "ruido" o picos. Por otro lado, CFAST, con su enfoque de dos zonas, tiende a suavizar estas fluctuaciones, lo que resulta en una gráfica más suave.

Aun existiendo diferencias entre las dos gráficas, se puede concluir que CFAST realiza unas predicciones lo suficientemente parecidas como para poder tenerlas en cuenta sobre todo en un primer análisis, donde lo que se busca es una visión rápida del escenario.

4.3.3.2. Plano Longitudinal de Temperatura

Se estudiarán tres puntos de la simulación, los cuales han sido descritos en el apartado de resultados de CFAST, puesto que son tres puntos muy característicos de nuestro escenario.

Para obtener el plano longitudinal de temperaturas, previamente a simular, habrá que seleccionar ciertos parámetros. En la pestaña de “Output” y en el cuadro de “Visualizations” se añade un plano 2-D que tenga la siguiente forma general: $y - 25 = 0$. De esta manera cuando se entra en Smokeview para ver nuestra simulación, además de poder ver las distintas zonas en cada parte de la nave, se podrá ver lo que ocurre en este plano, tanto velocidades, como temperaturas, como otras muchas variables, la que verdaderamente nos interesa a nosotros es la temperatura.

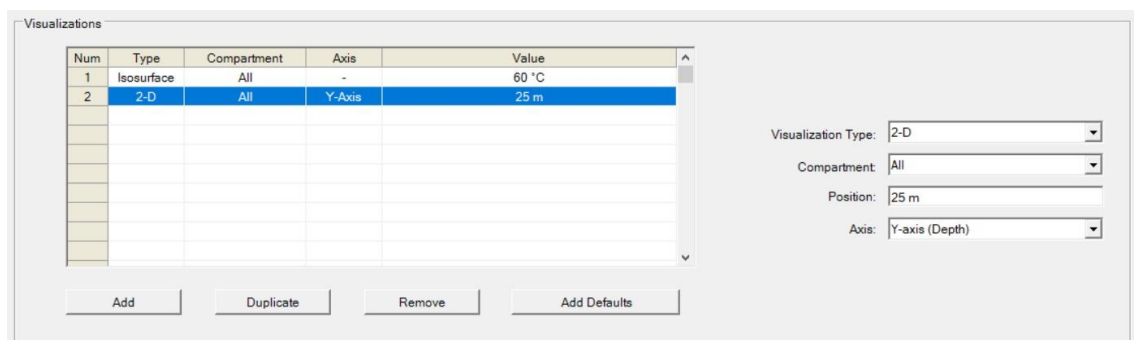


Figura 51: Creación Plano 2D --> $y = 25$

Se comenzará con el segundo 240, que es un punto intermedio en la curva de crecimiento de la evolución del incendio:

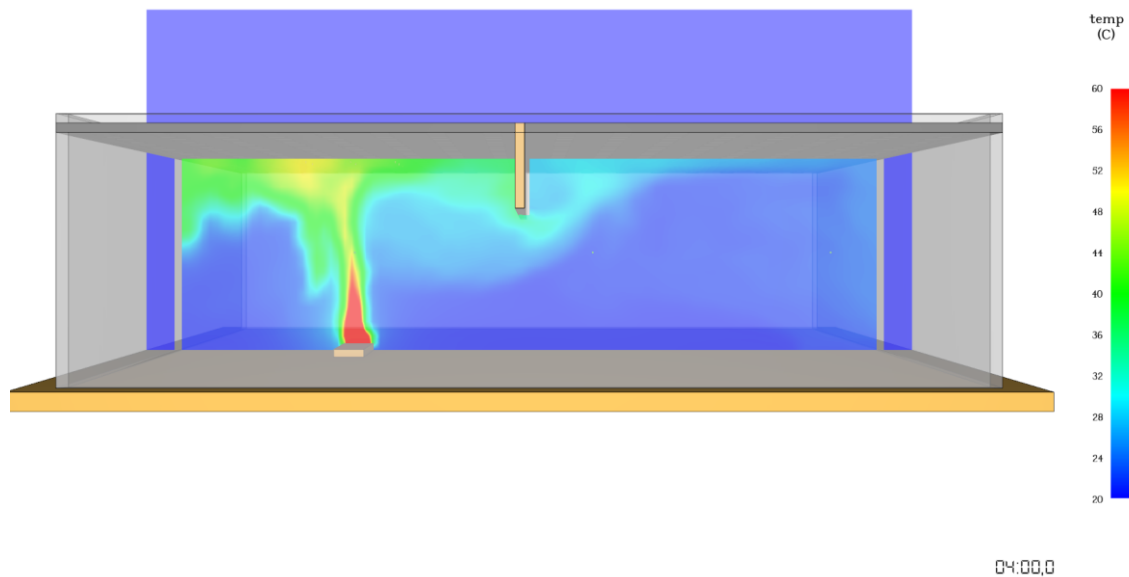


Figura 52: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 240$ s

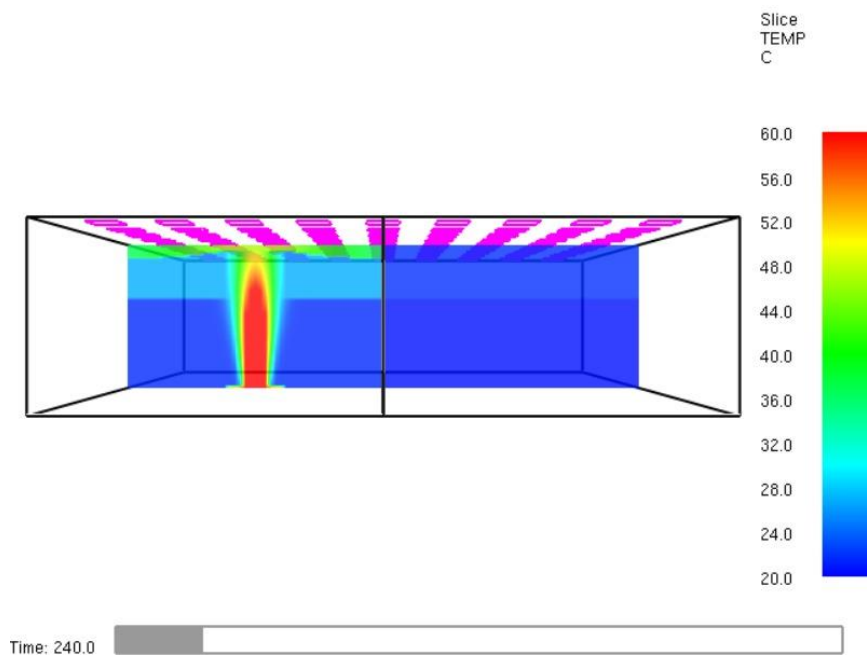


Figura 53: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 240$ s

Ambas simulaciones coinciden para la parte de la derecha de la nave, su parte inferior a poco más de 20°C en ambos casos y la parte superior algo más caliente, pero sin alcanzar los 25°C . También ambas zonas de la parte derecha de la nave son similares. La diferencia

entre ambas simulaciones son que los puntos a 60°C en la simulación de CFAST alcanzan una mayor altura que en la de FDS, pero esto se puede justificar con el método de cálculo usado en cada modelo, FDS es mucho más preciso mientras que CFAST será un valor considerando más aproximaciones.

El siguiente momento que se analizará, será el segundo 420, el incendio se encuentra en su pico de tasa de liberación de calor, pero sin haber abierto los exutorios aún:

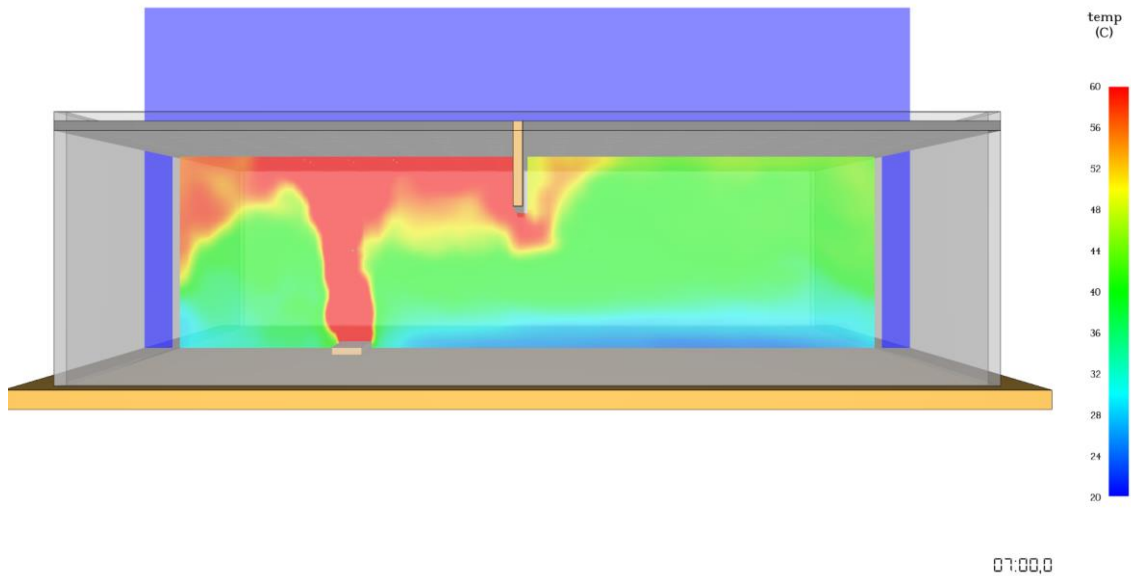


Figura 54: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 420$ s

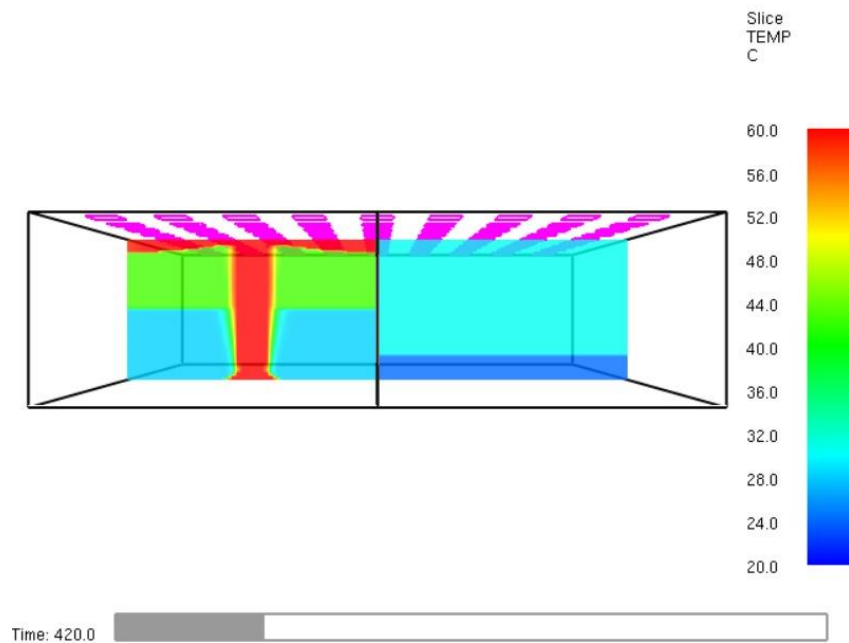


Figura 55: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 420$ s

Se podrá comprobar que los exutorios siguen cerrados, puesto que el aire encima de la cubierta sigue a la temperatura exterior inicial (20°C). Se puede ver claramente que la separación entre zonas es muy parecida respecto a su altura. Respecto a las temperaturas de las zonas ocurre lo mismo que en el segundo 240, los resultados de la parte derecha de la nave son bastante parecidos y de la zona inferior de la parte izquierda también, pero sin embargo para la parte superior de esta zona, la simulación de FDS marca algo más.

El siguiente y último tiempo por analizar será el segundo 900, segundos antes de que el incendio finalice:

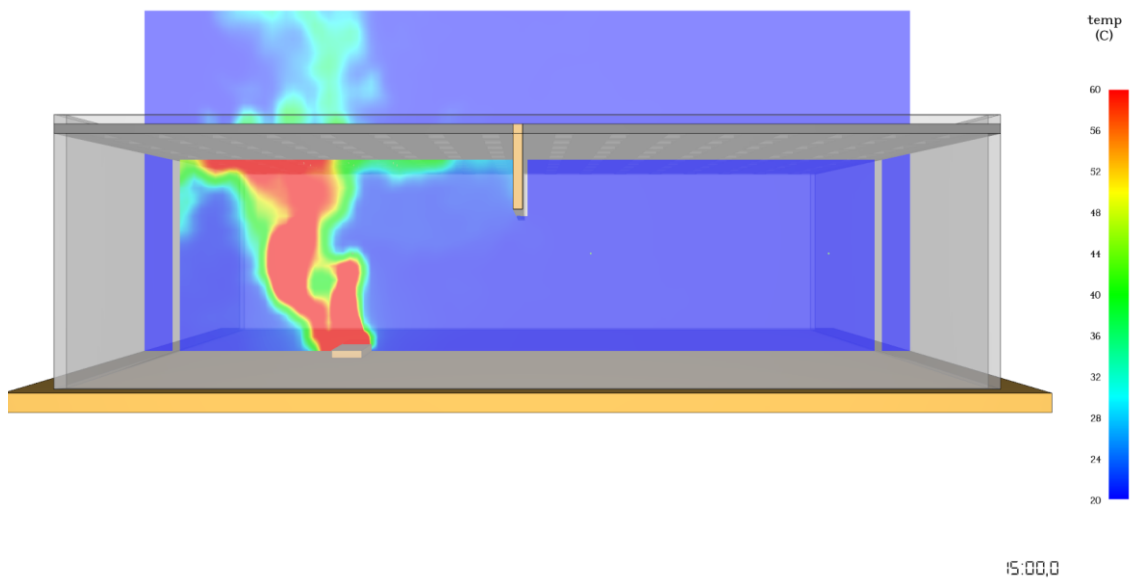


Figura 56: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 900$ s

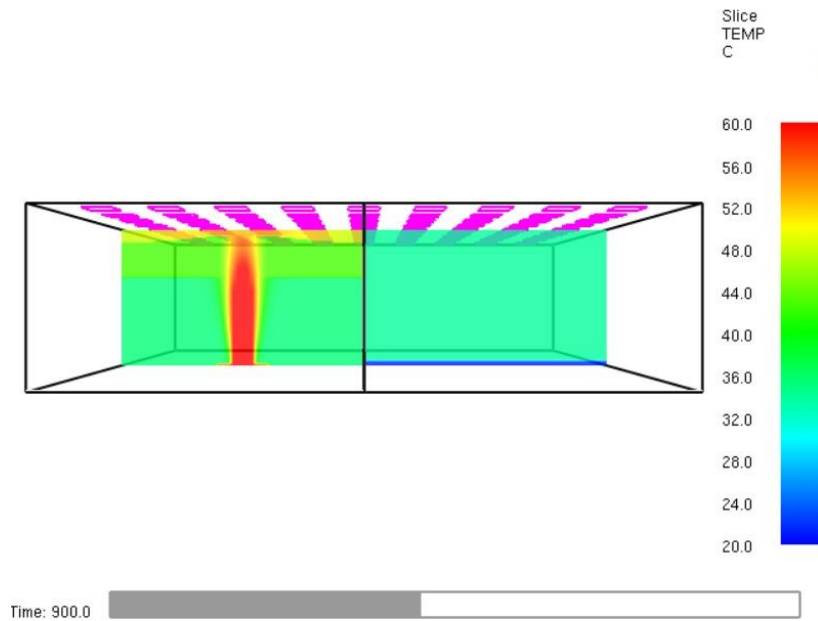


Figura 57: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 900$ s

Se puede ver como los exutorios se han abierto puesto que se ve que el aire de por encima de la cubierta de la nave ha variado su temperatura (evidentemente ha subido de temperatura). Aquí hay una clara diferencia entre las dos simulaciones y está en la parte derecha de la nave, en CFAST la temperatura es mucho más alta que en la simulación de FDS. Esto es muy probable que se deba a la no evacuación de humo por parte de los exutorios, no parece que estén haciendo todo el trabajo que consiguen realizar en FDS. Esto también lo podemos correlacionar con los resultados anteriores de las capas de humo en la parte derecha, donde es casi mínima para el segundo 900, esto también reafirma que los exutorios no están realizando todo el trabajo que deberían hacer.

Por lo que, el único problema grave que surge es en el segundo 900, donde como se ha comentado, parece que el humo no se está evacuando correctamente por lo que el aire en el interior de la nave se mantiene mucho más caliente que si se consiguiese extraer el humo de la nave.

4.3.3.3. Isosuperficie de 60°C

Una isosuperficie es una superficie tridimensional en la cual la temperatura en todos los puntos de esa superficie es exactamente 60°C. Para analizar esta variable se tendrán en cuenta los tres mismos instantes de tiempo de antes. Para obtener la isosuperficie de

temperatura 60°C, previamente a simular, habrá que realizar la misma operación que hemos hecho para crear el plano longitudinal de temperatura en $y = 12.5$, pero esta vez en vez de seleccionar el plano 2D, habrá que seleccionar la isosuperficie. Únicamente habrá que añadir dos parámetros más, en que compartimento se desea que se calcule la isosuperficie (nosotros la queremos de la nave al completo) y definir la temperatura de esa superficie, que en este caso será 60°C para poder realizar la comparativa.

Para el segundo 240:

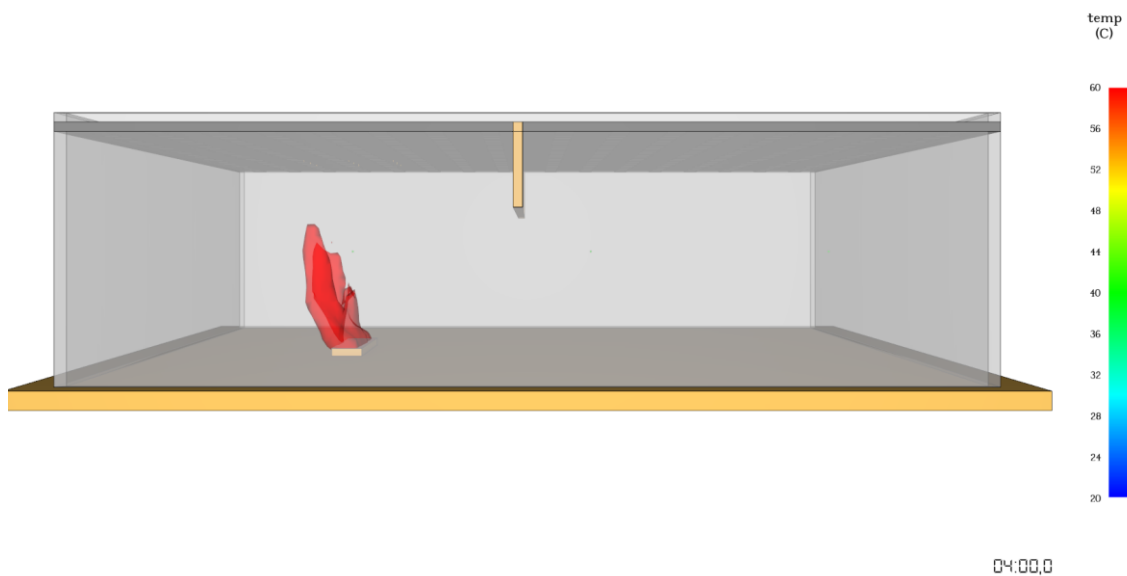


Figura 58: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 240$ s

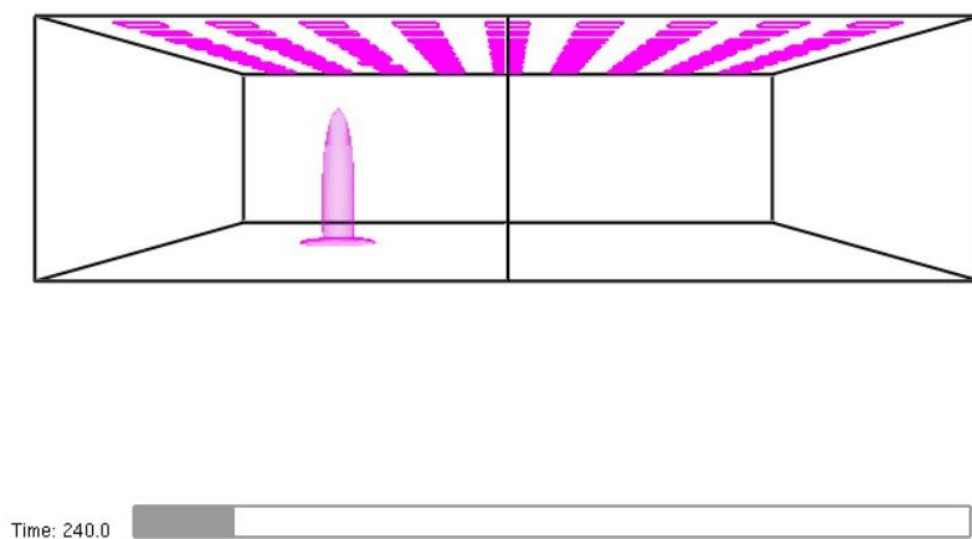


Figura 59: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 240$ s

Se ve que la diferencia es mínima en el segundo 240, la altura del penacho es semejante, la única diferencia es que la isosuperficie de FDS está ligeramente volcada hacia la izquierda mientras que la del CFAST se mantiene simétrica respecto a un eje. Esto se debe a los métodos de calcular que tienen cada modelo, CFAST al ser más simple y rápido no tiene tanta precisión, sino que es una aproximación.

Para el segundo 420:

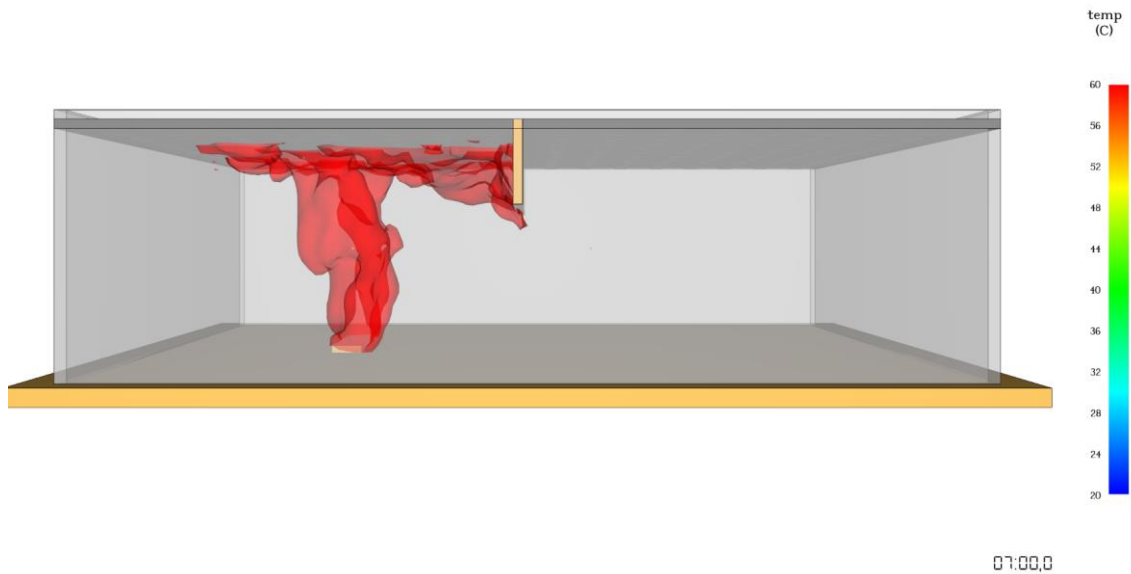


Figura 60: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 420$ s

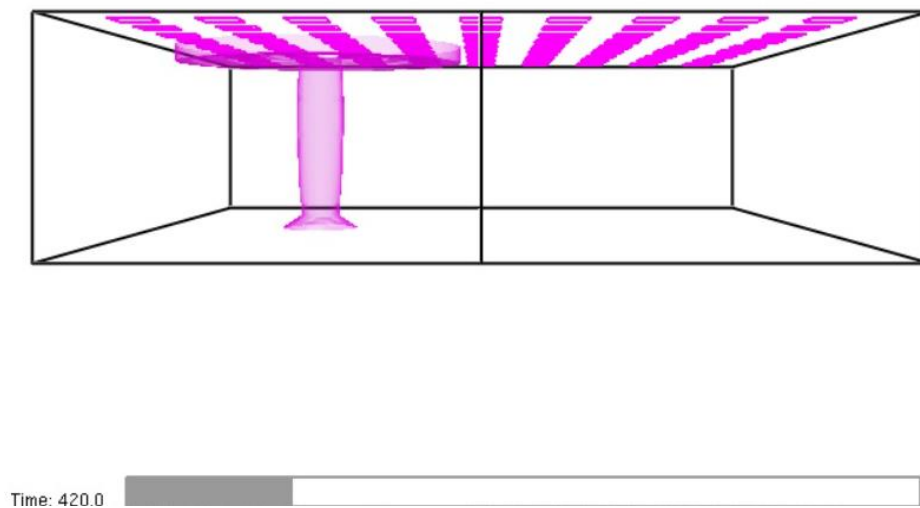


Figura 61: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 420$ s

En el segundo 420, se puede ver que la isosuperficie es bastante semejante, ambas han llegado al techo y se han expandido de manera radial. Al igual que ocurría antes, al no ser CFAST tan preciso, no se ve exactamente la misma superficie, la isosuperficie de CFAST es un conjunto de geometrías regulares unidas mientras que la de FDS es mucho más irregular que a la vez será más precisa.

Para el segundo 900:

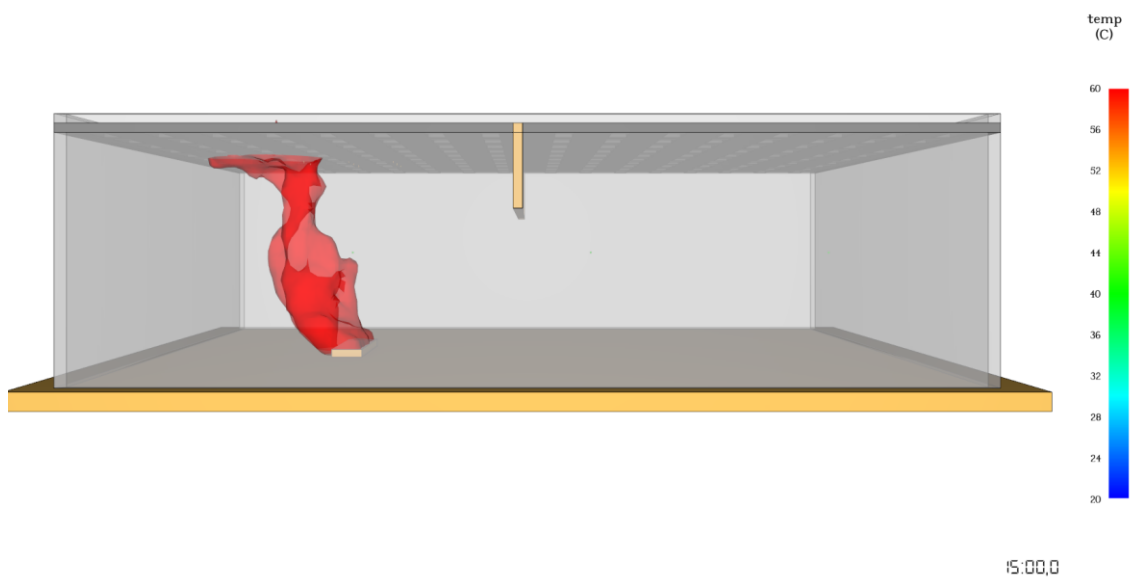


Figura 62: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 900$ s

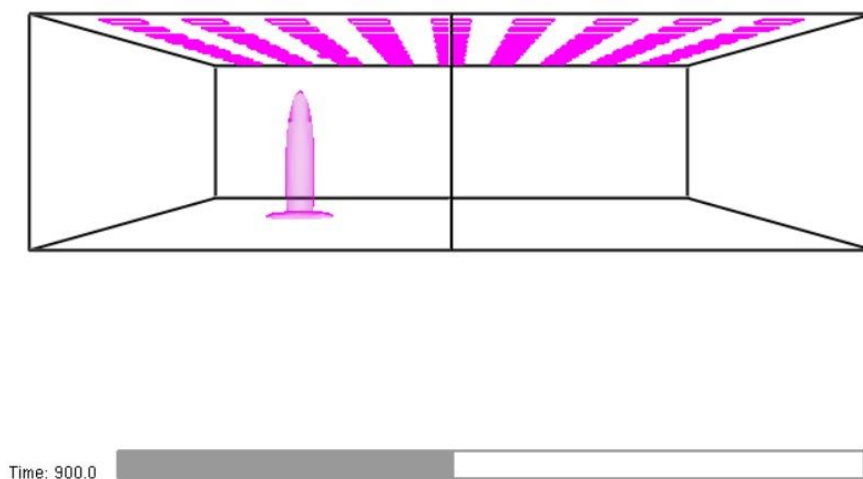


Figura 63: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 900$ s

En este último caso, la isosuperficie no es tan parecida a las anteriores veces, esto se puede deber a que la extracción de humos en la simulación FDS es mucho mayor, por lo que los gases a temperaturas altas (60°C) ascenderán de manera más rápida que en CFAST.

4.3.3.4. Tiempo Activación Rociador

Aquí simplemente habrá que comparar la unidad de tiempo en la que se activa cada rociador. Como se tiene varios rociadores en la simulación FDS en comparación con la simulación CFAST, que solo se tiene uno, habrá que ver los que estén por la zona cercana a la posición del incendio que es en la posición en la que tenemos ubicado el rociador del CFAST.

DEVICE Activation Times

10	SPRK	No Activation
11	SPRK01	376.7 s
12	SPRK02	No Activation
13	SPRK03	368.3 s
14	SPRK04	374.8 s
15	SPRK05	No Activation
16	SPRK06	No Activation
17	SPRK07	368.3 s
18	SPRK08	No Activation

Tabla 27: FDS - Tiempos Activación Rociadores

Se ve como el tiempo de activación de los 4 rociadores que se activan, rondan los 370 s, de hecho, la media aritmética entre las 4 nos da lugar a un tiempo de 372.025 s. El rociador de CFAST se activa en el segundo 374:

```
Log: Total execution time = 11.9 seconds
Log: Sprinkler (Sensor 1) has activated at 374 s in compartment 1
Log:
Log: Compilation Date : Thu 01/19/2023 11:24 AM
Log: Revision Date : Fri Jan 13 15:42:10 2023 -0500
Log: Revision : CFAST7.7.4-0-g6b52d0c3
Log: Release Version : CFAST 7.7.3
Log:
Log: CFAST
Log:
```

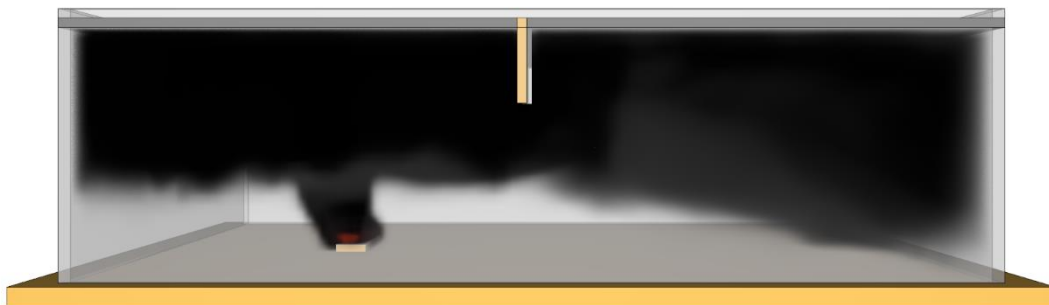
Figura 64: CFAST - Tiempos Activación Rociador

Como se ha podido comprobar, el rociador en la simulación de CFAST salta prácticamente al mismo tiempo y como esta señal de activarse o no es dependiente de la temperatura, podríamos concluir también que CFAST es bastante bueno a la hora de predecir las temperaturas en puntos pertenecientes a las zonas superiores de los grandes compartimentos.

4.3.3.5. Expansión del Humo

Para la distribución de humo a través de la nave, se estudiará igual que las anteriores veces, los 3 momentos característicos de la simulación.

Para el segundo 240:



04:00,0

Figura 65: FDS - Dispersión del Humo en $T = 240$ s



Time: 240.0



Figura 66: CFAST - Dispersión del Humo en $T = 240$ s

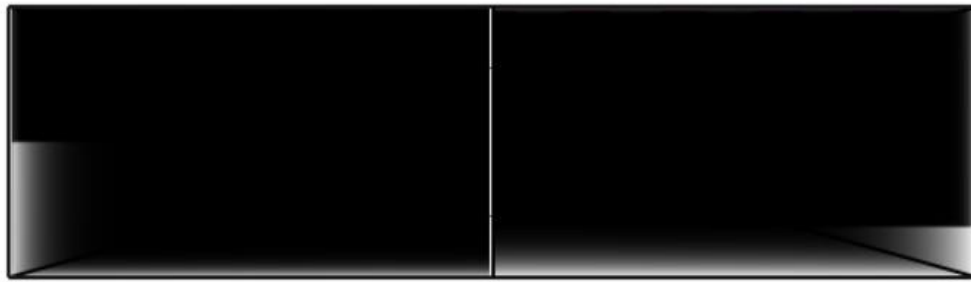
Como se puede ver, existen similitudes entre ambas gráficas como puede ser que ambas partes de la nave están igual de llenas de humo. Sí es verdad que parece que en la simulación del FDS la altura de la capa de humos está algo más baja que la de la simulación del CFAST.

Para el segundo 420:



07:00,0

Figura 67: FDS - Dispersión del Humo en $T = 420$ s



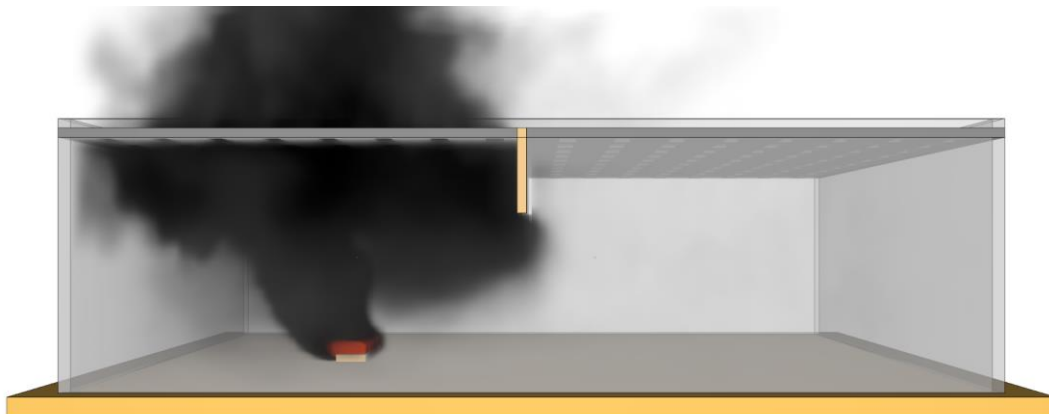
Time: 420.0



Figura 68: CFAST - Dispersión del Humo en $T = 420$ s

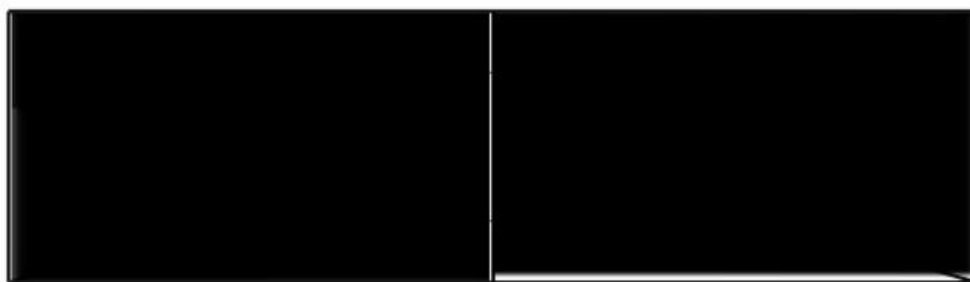
Como los exutorios siguen cerrados, en ambas simulaciones, la nave se encuentra por completo envuelta en humo, por lo que no hay mucho que comparar en este instante de tiempo.

Para el segundo 900:



15:00,0

Figura 69: FDS - Dispersión del Humo en $T = 900$ s



Time: 900.0



Figura 70: CFAST - Dispersión del Humo en $T = 900$ s

Entre estas dos gráficas, se ve claramente que, en el FDS, el flujo a través de los exutorios debe de ser mucho mayor o que el incendio en ese escenario crea menos humo. Este error se lleva notando ya durante varios apartados y puede considerarse una debilidad por parte de CFAST a la hora de prever el desarrollo del humo. Parece que el flujo a través de los exutorios es mucho menor en comparación con la simulación FDS.

4.3.3.6. Resumen

En la comparación de resultados, se han tenido en cuenta cinco variables, la altura de la capa de humos de la parte izquierda de la nave, las temperaturas en el plano $y=25$, la isosuperficie de 60°C , el instante de tiempo en el que saltan los rociadores y la dispersión del humo a lo largo de la simulación.

Para la primera variable que es la altura de la capa de humos en la parte izquierda de la nave, se calcula en el intervalo de tiempo en el que existe el incendio, es decir, desde el tiempo inicial ($T=0\text{s}$) hasta el segundo 920. Si se comparan ambas gráficas se podrá ver como la tendencia es la misma, decreciente desde el primer segundo hasta alcanzar el segundo 200 donde cambia de tendencia a empezar a crecer. Las curvas no pasan ni mucho menos por los mismos puntos (h, t), pero esto no es raro puesto que para calcular la altura de la capa de humos en FDS se crea una línea desde la cubierta hasta el suelo y

se calcula la altura de la capa de humos en esos puntos a lo largo de la simulación, una línea no se puede generalizar a toda la parte izquierda de la nave. En CFAST la altura de la capa de humos se calcula a partir de la altura de la interfaz entre las dos zonas, esto no siempre es válido. En este caso, se ha podido ver en el análisis de la dispersión del humo, como aun habiendo humo cubriendo casi la totalidad del espacio de la nave, la altura de la interfaz subía alrededor de 9 m, en esos casos no es válida la comparación. Esto sí que nos quiere decir que, si los exutorios hubiesen actuado en la simulación de CFAST igual que en la simulación de FDS, la capa de humos hubiese subido hasta ese nivel, por lo que se puede tomar como un valor de referencia. Teniendo en cuenta estos factores, ambas curvas terminan en puntos muy cercanos, por lo que se puede decir que realiza una predicción aceptable.

Respecto a las temperaturas en el plano $y=25$, se ven como las primeras diferencias que saltan a la vista están en las formas geométricas de las superficies que marcan cada temperatura. En la simulación de FDS, la geometría es más compleja e irregular pero más precisa al mismo tiempo, mientras que en la simulación de CFAST, las formas son muy parecidas y únicamente varía el tamaño, esto hace que sean menos realistas. Más allá de la forma de las superficies, en el segundo 900 se ve una gran diferencia entre ambas simulaciones, la simulación FDS marca una temperatura mucho más baja en general en toda la nave, pero sobre todo en la parte derecha de la nave, esto está relacionado con el error por parte de los exutorios de la cubierta para extraer el humo de la nave.

En las isosuperficies de 60°C una de las diferencias entre la simulación FDS y CFAST es la geometría de nuevo, esta imprecisión recurrente es debida a que los modelos tienen distintas maneras de llegar a sus respectivos resultados. CFAST crea un elipsoide alargado para representar esta isosuperficie, mientras que FDS es más fidedigno a la realidad puesto que al haber dividido todo el espacio en mallas de tamaño pequeño, va uniendo las mallas que estén a 60°C y esto crea una superficie más irregular pero más realista. También se puede ver que en el segundo 900, la isosuperficie calculada por el modelo FDS, tiene una altura mayor, esto también vendrá influido por el fallo de extracción del humo por parte de los exutorios, puesto que, si funcionasen de manera correcta, los gases a temperaturas altas (60°C) ascenderían de manera más rápida e intentarían evacuar a través de los exutorios.

La última variable que se ha comparado entre las simulaciones de ambos modelos es la dispersión del humo, hemos podido comprobar que CFAST realiza una predicción muy

similar a la de FDS mientras los exutorios se encuentran cerrados. El problema surge cuando llega el segundo 434, donde los exutorios tienen la orden de abrirse, mientras que en FDS se consigue evacuar todo el humo, en CFAST el flujo de aire a través de los exutorios es muy pequeño, en el segundo 900 el flujo de salida por un exutorio era de 0.2627 kg/s. Este problema de evacuación de humos ha afectado como es lógico, al plano longitudinal de temperatura y a la isosuperficie de 60°C a partir de la apertura de los exutorios. Otra diferencia está en la visualización, FDS representa todas las mallas que contienen algo de humo, mientras que CFAST representa las zonas que tienen humo, en nuestra simulación la capa superior de la parte izquierda de la nave.

4.4. Simulación CFAST Nave Industrial con Muelles de Carga

Siguiendo la misma estructura que se ha llevado en el anterior punto, se explicará la simulación de CFAST dividiéndola en 3 partes, la primera será la introducción de las variables de entrada, la segunda, se mostrará y se explicarán los resultados que se hayan obtenido y por último se terminará este punto con una comparación de resultados con los obtenidos con el software FDS. En este caso, como se ha explicado anteriormente, el escenario cambiará ligeramente al ser una nave industrial, pero con muelles de carga esta vez.

4.4.1. Parámetros de entrada en la simulación CFAST

Primero de todo se verán cuáles son las similitudes y diferencias entre las dos simulaciones para no repetir la explicación si ya está detallado en anteriores puntos. La nave industrial tiene las mismas dimensiones y está construida a partir de los mismos materiales, tendrá también una cortina de humos, pero esta vez será de 4.5 m de altura en vez de los 4 m que teníamos en la anterior simulación. Los 81 exutorios serán idénticos a la anterior simulación, pero la evolución del incendio cambia a tener un pico de 5 MW, tardar en alcanzar este pico 335 segundos y se mantendrá con ese valor durante 600 segundos para terminar instantemente en cuanto hayan pasado 935 segundos desde el

comienzo del incendio. Por último, esta simulación de nave industrial con muelles de carga carecerá de rociadores.

4.4.1.1. Muelles de Carga y Columna de Humos

La nave industrial es de las mismas dimensiones 50 x 50 x 14 m, pero esta vez tiene unos muelles de carga tanto en la fachada anterior como en la posterior, también en esta simulación habrá una cortina de humos separando la nave en dos partes iguales. Hemos agrupado en este apartado ambos conceptos porque se crean en la misma pestaña de CFAST, denominada como “Wall Vents”.

Ambas fachadas tendrán 7 muelles de carga de 2 m de ancho y 3 m de altura. Hay que tener en cuenta que los muelles de carga están situado a 1 m por encima del nivel de suelo, esto se debe a que facilita la carga y descarga de camiones. El espacio de carga de un camión típicamente está a una altura similar del suelo, por lo que al elevar el muelle de carga se facilita el movimiento de mercancías directamente desde el camión al muelle (y viceversa) sin la necesidad de levantar o bajar las mercancías. Esto ahorra tiempo y esfuerzo, y puede ayudar a prevenir lesiones causadas por levantamientos pesados. Además, tener los muelles de carga elevados puede proporcionar beneficios adicionales. Por ejemplo, puede ayudar a proteger las mercancías de las inundaciones si el nivel del agua sube por encima del nivel de la calle, y puede proporcionar un espacio adicional debajo del muelle que puede ser útil para el almacenamiento o para el acceso de mantenimiento. Sin embargo, la razón principal de la elevación es para alinear el muelle de carga con el piso del camión para facilitar la carga y descarga.

Como tenemos 7 muelles de carga por fachada, para calcular la distancia entre cada muelle habrá que resolver la siguiente ecuación, siendo l el ancho de cada muelle de carga:

$$7 \cdot l + 8 \cdot d = 50 \rightarrow d = 4.5 \text{ m}$$

Una vez se tiene la distancia entre muelles, habrá que calcular a la distancia que se encuentra la esquina inferior izquierda de cada muelle de carga a lo largo del eje X respecto del origen del primer compartimento, en nuestro caso ese origen se sitúa en la esquina inferior izquierda de la fachada anterior de la nave industrial. Esta distancia que

se pretende calcular ahora, se denomina como “Vent Offset” y para los primeros tres muelles de carga seguirán las siguientes ecuaciones:

$$1 \rightarrow d$$

$$2 \rightarrow 2 \cdot d + l$$

$$3 \rightarrow 3 \cdot d + 2 \cdot l$$

Se puede detectar un patrón a partir del cual se construye la siguiente expresión general que se puede generalizar para todos los muelles de carga:

$$n \cdot d + (n - 1) \cdot l, \quad \text{siendo } n \text{ el número del muelle de carga del que se trata}$$

Por lo tanto, ya se puede averiguar la distancia “Vent Offset” para todos los muelles de carga. Para representar estas distancias de manera ordenada, mostraremos un vector de dimensión 7 con unidades en m.

$$(4.5 \quad 11 \quad 17.5 \quad 24 \quad 30.5 \quad 37 \quad 43.5)$$

Para añadir los 14 muelles de carga a la nave, habrá que introducir los siguientes parámetros, se pondrá el ejemplo del primer muelle de carga de la fachada anterior:

Figura 71: Parámetros a introducir para los Muelles de Carga

Una vez se introduzcan los siguientes parámetros, habrá que ir variando la distancia “Vent Offset” para cada muelle de carga hasta llegar al séptimo y a continuación repetir el proceso para la fachada posterior, que para eso habrá que cambiar el parámetro “Face”.

También se cambiará la altura de la cortina de humos de 4 m a 4.5 m, para esto se introducirá el valor de 9.5 m en la variable de altura, puesto que, si la altura total de la nave es de 14 m, si se quiere una cortina de humos de altura 4.5 m, dará como resultado 9.5 m.

Vent 1 (of 15) Geometry

ID: No_Cortina

First Compartment

Nave_Izq

Second Compartment

Nave_Dcha

Bottom:

0 m

Height:

9.5 m

Width:

50 m

Vent Offset:

0 m

Face:

Right

Figura 72: Cortina de Humos Nave Industrial con Muelles de Carga

Una vez se haya terminado de introducir todos los parámetros para los 14 muelles de carga y los cambios que había que realizar sobre la cortina de humos, quedará la siguiente pestaña “Wall Vents”:

CFD 7.7.4 (Nave_Sprinkler)

File View Help

Simulation | Thermal Properties | Compartments | Wall Vents | Ceiling/Floor Vents | Mechanical Ventilation | Fires | Targets | Detection / Suppression | Surface Connections | Output

Num	ID	First Compartment	Second Compartment	Bottom	Height	Width	Initial Oper	Face	Offset
1	No_Cortina	Nave_Izq	Nave_Dcha	0	10	50	1	Right	0
2	Muelle_Carga_F	Outside	Nave_Izq	1	3	2	1	Front	4.5
3	Muelle_Carga_F	Outside	Nave_Izq	1	3	2	1	Front	11
4	Muelle_Carga_F	Outside	Nave_Izq	1	3	2	1	Front	17.5
5	Muelle_Carga_F	Outside	Nave_Izq	1	3	2	1	Front	24
6	Muelle_Carga_F	Outside	Nave_Izq	1	3	2	1	Front	30.5
7	Muelle_Carga_F	Outside	Nave_Izq	1	3	2	1	Front	37
8	Muelle_Carga_F	Outside	Nave_Izq	1	3	2	1	Front	43.5

Add

Duplicate

Move Up

Move Down

Remove

Vent 2 (of 15) Geometry

ID: Muelle_Carga_F-1

First Compartment

Outside

Second Compartment

Nave_Izq

Bottom:

1 m

Height:

3 m

Width:

2 m

Vent Offset:

4.5 m

Face:

Front

Open/Close Criterion:

Time

Time

Fraction

Open

Save

Geometry

Run

View

14 Errors or Messages: Error: Wall vent 15. Compartment order is incorrect. Outside must always be second compartment. Output: Validation CFAST Window

Figura 73: Pestaña Muelles de Carga y Cortina de Humos

132

A continuación, se puede ver el output que se obtendría tras aplicar estos cambios:

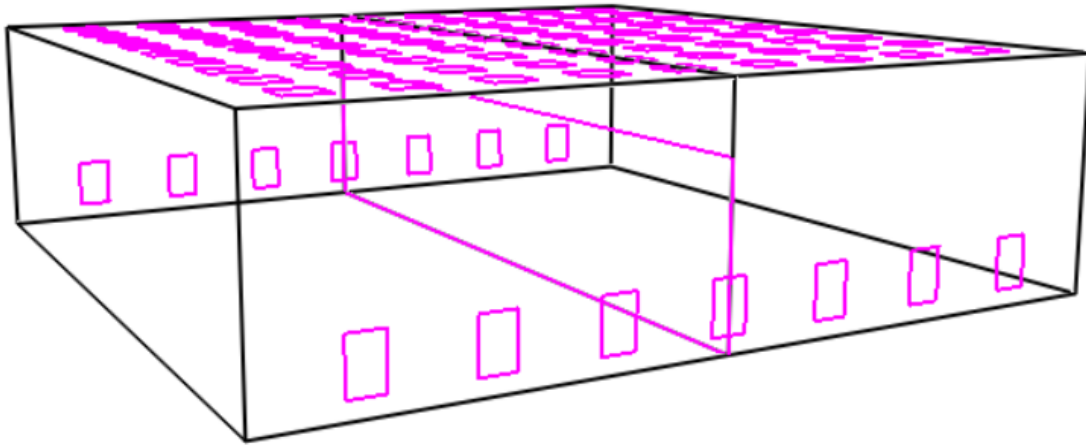


Figura 74: Nave Industrial con 14 Muelles de Carga

4.4.1.2. Incendio

Como se ha comentado anteriormente, el incendio para esta simulación varía en su manera de evolucionar. Se introduce un nuevo incendio con las mismas propiedades, ubicado en el mismo lugar, pero variando su HRR máximo y los tiempos de desarrollo:

A screenshot of a software dialog box titled "Define New Fire". It contains several input fields for configuring fire parameters. The "Fire Growth Rate" is set to "Custom" via a dropdown menu. The "Time to Peak" is 335 s, "Peak HRR" is 5000 kW, "Steady Burning Period" is 600 s, and "Decay Time" is 0.01 s. Each field has a small "x" icon to its right for clearing the input. The dialog box has a close button (X) in the top right corner.

Figura 75: Definir expresión del Incendio Nave Industrial con Muelles de Carga

La siguiente figura representa la evolución temporal del HRR del incendio:

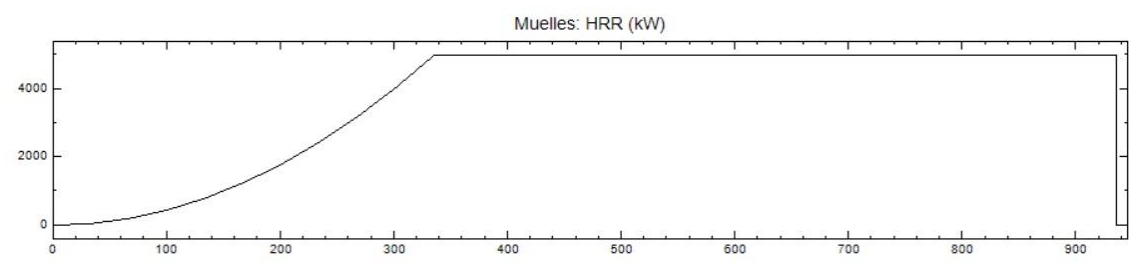


Figura 76: Expresión del incendio Nave Industrial con Muelles de Carga

Una vez se haya configurado todas estas variables de entrada ya se tendría listo todo lo necesario para poder realizar la simulación en CFAST.

4.4.2. Resultados de la simulación CFAST

Para este apartado se seguirá la misma estructura que para la anterior simulación, se estudiará los mismos 5 puntos y se analizarán los outputs que se hayan obtenido. En esta simulación, no habrá rociadores, pero sí que habrá muelles de carga que crearán corrientes de aire que veremos como afectarán al incendio esta vez, también hay que notar que el pico de la tasa de liberación de calor es menor que para la anterior simulación (5 MW).

Los 5 puntos para analizar serán los siguientes:

1. Tiempo Inicial ($T = 0$ segundos)
2. Mitad en la curva de crecimiento ($T = 240$ segundos)
3. En pico previamente a que los exutorios se abran ($T = 420$ segundos)
4. Antes de finalizar el incendio ($T = 900$ segundos)
5. Tiempo tras haber finalizado el incendio ($T = 2000$ segundos)

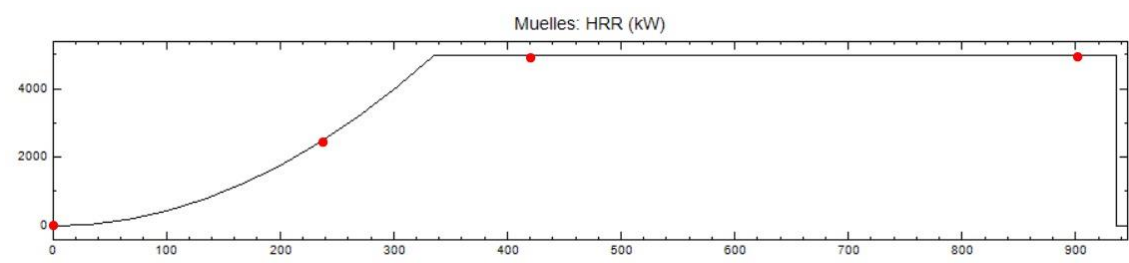


Figura 77: Puntos a analizar los resultados Nave Industrial con Muelles de Carga

4.4.2.1. Tiempo Inicial (T = 0 s)

Los primeros resultados que se obtienen son los siguientes:

```
*****
* Time =      0.0 seconds. *
*****
```

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)		Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	20.00	20.00	14.00	1.0	(0%)	22.5	2.179E-02	0.00
Nave_Dcha	20.00	20.00	14.00	1.0	(0%)	22.5	2.184E-02	0.00

Tabla 28: Temperatura media y altura de la zona de humos en T = 0 s

Se puede ver como al no haber comenzado el incendio, tanto las temperaturas, como la presión, como la altura de las capas de humos sigue siendo las configuradas previamente.

```
FIRES
```

Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
Incendio_Mue		Y	0.00	0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 29: Resultados del Incendio en T = 0 s

Al no haberse iniciado el incendio, todos sus parámetros valen 0.

```
UPPER LAYER SPECIES
```

Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.4	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

```
LOWER LAYER SPECIES
```

Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.4	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 30: Resultados de la Composición en % en T = 0 s

Como se puede ver, la composición de gases de las 4 zonas es idéntica y la misma que en el aire ambiente (78% N₂, 21% de O₂ y por último vapor de agua H₂O de 1%).

A continuación, se puede ver los flujos a través de las aberturas, a diferencia de la anterior simulación, la nave tiene 14 muelles de carga y los exutorios se encuentran abiertos desde el primer momento.

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)											
Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer	
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000								
H 2	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 3	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 4	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 5	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 6	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 7	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 8	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 9	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 10	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 11	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 12	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 13	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 14	Nave_Izq	Outside	1.000								
H 15	Nave_Izq	Outside	1.000								
V 1	Nave_Izq	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 2	Nave_Izq	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 3	Nave_Izq	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 4	Nave_Izq	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 5	Nave_Izq	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 6	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 7	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 8	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	
V 9	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.7216E-11				0.7216E-11	

Tabla 31: Resultados del Flujo a través de los Exutorios y Muelles de Carga en $T = 0$ s

El flujo es casi nulo a través de todos los conductos, indicando que no hay actividad de carga o descarga significativa en los muelles, y tampoco hay un flujo significativo de gases hacia fuera a través de los exutorios. Existe un flujo mínimo de 0.7216E-11 kg/s desde tanto la parte izquierda de la nave como de la parte derecha hacia el exterior a través de los exutorios, lo que podría ser indicativo de una ventilación o filtración normal.

Estos son todos los resultados que se obtienen en el tiempo de simulación inicial a partir del archivo .out.

4.4.2.2. Curva de Crecimiento ($T = 240$ s)

Se ha escogido el tiempo de simulación igual a 240 segundos, porque es un valor medio dentro de la curva, se analizarán los cambios que han ocurrido en los resultados respecto al tiempo inicial.

Primero de todo, se observarán las temperaturas de las capas y la altura de la capa de humos.

* Time = 240.0 seconds. *							

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	27.26	20.76	11.90	2.62E+03(15%)	0.145	2.313E-02	-0.865
Nave_Dcha	20.41	20.01	10.27	4.66E+03(27%)	4.055E-02	2.464E-02	-0.720

Tabla 32: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 240$ s

Se puede ver como las temperaturas de las 4 zonas se han calentado al ser mayores a 20°C todas, pero sin lugar a duda, la que más se ha calentado es la superior de la zona izquierda de la nave. Esto tiene todo el sentido del mundo puesto que es en la parte izquierda de la nave donde se ha originado el incendio y el calor se eleva, haciendo que las partes superiores sean las más calientes. Además, debido a que el calor tiende a moverse de áreas de mayor a menor temperatura, se puede propagar hacia las áreas adyacentes, afectando así a otras partes de la nave.

Se analizará ahora la evolución del incendio:

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Mue	Y	72.0	0.157	2.573E+06	0.288				1.191E+06	1.382E+06	12.7	0.00
Nave_Izq			72.0	0.157	2.573E+06		0.00	2.573E+06	0.00				

Tabla 33: Resultados del Incendio en $T = 240$ s

Cuando el incendio ha comenzado hace 4 minutos, el flujo del penacho (Plume Flow) es de 72 kg/s, lo que indica la cantidad de humo que está siendo liberada por el incendio. La tasa de pirolisis (Pyrol Rate) es de 0.157 kg/s, que es la tasa a la que el material se está descomponiendo debido al calor del incendio. El tamaño del incendio es de 2.573 MW, lo que indica la cantidad de calor que está liberando el incendio (tiene que llegar a 5 MW para alcanzar su pico). La altura de la llama es de 0.288 m. La radiación es de 1.382 MW, que es la cantidad de calor que se está irradiando desde el incendio. La convección es de 1.191 MW, lo que indica la cantidad de calor que se está transfiriendo por convección. Finalmente, la cantidad de material pirolizado (Pyrolysate) es de 12.7 kg.

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.0	20.0	0.206	6.954E-03	0.00	0.00	0.00	1.73	1.41	1.41	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.4	20.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 34: Resultados de la Composición en % en $T = 240$ s

- Nitrógeno (N_2): al inicio ($T = 0$ s), la nave al completo muestra porcentajes similares de N_2 tanto en las capas superiores como en las inferiores. Sin embargo, a los 240 segundos, el porcentaje de N_2 en la capa superior de la parte izquierda de la nave ha disminuido ligeramente.
- Oxígeno (O_2): similar al N_2 , el O_2 también disminuye levemente en la capa superior de la parte izquierda de la nave después de 240 segundos, lo cual puede ser una señal de que está siendo consumido por el fuego.
- Dióxido de Carbono (CO_2) y Monóxido de Carbono (CO): estos gases se producen durante la combustión y no estaban presentes en ninguna de las capas al inicio. A los 240 segundos, sin embargo, ambos gases se hacen presentes en la capa superior de la parte izquierda de la nave, lo cual es una clara señal de que está ocurriendo una combustión en ese compartimento.
- Agua (H_2O): la cantidad de agua también aumenta en la capa superior de la parte izquierda de la nave después de 240 segundos. Este es otro producto común de la combustión.
- Densidad óptica (OD , OD_F , OD_S): al inicio, la densidad óptica es cero en ambos compartimentos, pero a los 240 segundos, aumenta en la capa superior de la parte izquierda de la nave, indicando la presencia de humo o partículas suspendidas.
- Otros gases (HCN , HCL , $TUHC$): no hay cambios en la presencia de estos gases, pues sus valores se mantienen en cero en todos los compartimentos y tiempos.

En la parte derecha de la nave no parecen ocurrir cambios significativos en el transcurso de los 240 segundos, al menos en los parámetros observados. En la parte izquierda de la nave, sin embargo, hay claras señales de que está ocurriendo una combustión: el O_2 disminuye, mientras que los productos de la combustión (CO_2 , CO , H_2O) aparecen, y la densidad óptica aumenta, señalando la presencia de humo. Todos estos cambios ocurren en la capa superior, mientras que la capa inferior se mantiene sin cambios, lo cual es coherente con el comportamiento esperado de un incendio, donde los gases calientes y los productos de la combustión tienden a subir hacia la parte superior del espacio.

A continuación, se analizarán los flujos a través de las aperturas:

Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Flow Relative to 'To'		Flow Relative to 'To'		Flow Relative to 'To'	
				Upper Layer Inflow	Outflow	Lower Layer Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Lower Layer Inflow	Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.3708E-01		0.6774E+02					
H 2	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01		0.6045E+02	0.5887E+02	0.1577E+01	0.6778E+02
H 3	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 4	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 5	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 6	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 7	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 8	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 9	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 10	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 11	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 12	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 13	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 14	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
H 15	Nave_Izq	Outside	1.000	0.3020E-02		0.5629E+01					0.5632E+01
V 1	Nave_Izq	Outside	1.000		0.1763E+01		0.1718E+00	0.1934E+01			
V 2	Nave_Izq	Outside	1.000		0.1763E+01		0.1718E+00	0.1934E+01			
V 3	Nave_Izq	Outside	1.000		0.1763E+01		0.1718E+00	0.1934E+01			
V 4	Nave_Izq	Outside	1.000		0.1763E+01		0.1718E+00	0.1934E+01			
V 5	Nave_Izq	Outside	1.000		0.1763E+01		0.1718E+00	0.1934E+01			
V 6	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1995E+00					0.1995E+00
V 7	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1995E+00					0.1995E+00
V 8	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1995E+00					0.1995E+00
V 9	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1995E+00					0.1995E+00

Tabla 35: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 240$ s

El conducto H1, que conecta las dos naves, muestra un flujo significativo de gases en ambas direcciones, tanto en la capa superior como en la inferior. Esto podría indicar una transferencia activa de gases o partículas entre las dos naves. Los muelles de carga (H2 a H15) muestran un flujo sustancial de gases desde la parte izquierda de la nave hacia el exterior, tanto en la capa superior como en la inferior. En cuanto a los exutorios (V1 a V5), hay un flujo de gases desde la parte izquierda hacia el exterior en la capa inferior, lo que indica que los gases o partículas se están expulsando activamente de esta nave a través de estos exutorios. En dirección opuesta, hay un flujo de gases desde el exterior hacia la parte izquierda, lo que podría ser indicativo de una cierta presión o flujo de aire entrante. Los exutorios (V6 a V9) muestran un flujo de gases desde la parte derecha hacia el exterior en la capa inferior, lo que sugiere una expulsión activa de gases o partículas desde esta nave a través de estos exutorios. No vamos a detallar sobre los 81 exutorios puesto que siguen un patrón, los exutorios que se encuentren a la misma distancia a lo largo del eje X del origen del incendio, tendrán los mismos valores de flujo a través de su superficie.

En resumen, a los 240 s, hay una actividad significativa de carga o descarga en los muelles (se encuentran abiertos), así como una expulsión activa de gases a través de los exutorios, tanto en la parte izquierda como en la parte derecha.

A continuación, se puede ver una visualización de todo lo que hemos explicado con números anteriormente. Vemos las temperaturas de cada zona, las alturas de la capa de humos de cada parte de la nave, el tamaño y evolución del fuego y, por último, el flujo a través de la parte debajo de la cortina de humos.

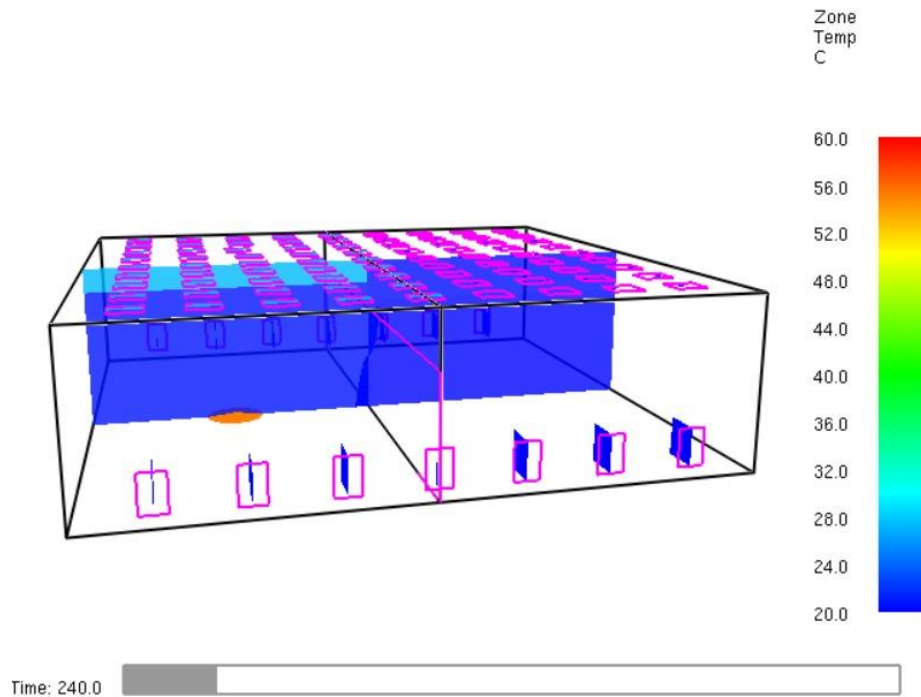


Figura 78: Nave Industrial con Muelles de Carga en $T = 240$ s

Se puede ver, como efectivamente la única zona que se calienta mucho más que las demás respecto a su temperatura inicial es la zona superior de la parte izquierda de la nave. También se puede observar como la altura del fuego no llega al medio metro y los flujos a través de los muelles de carga son bastantes más altos que los que atraviesan los exutorios de la cubierta, esto se debe en gran parte al área de cada una de estas aberturas.

4.4.2.3. Pico HRR previo a Apertura de Exutorios ($T = 420$ s)

Se comenzará estudiando la temperatura de las zonas, la altura de la capa de humos y la presión.

* Time = 420.0 seconds. *							

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	36.91	21.82	12.41	1.98E+03(11%)	0.247	2.270E-02	-1.74
Nave_Dcha	20.95	20.02	2.302	1.46E+04(84%)	2.327E-02	5.422E-02	-1.49

Tabla 36: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 420$ s

- Temperatura Superior: en la parte izquierda de la nave, la temperatura subió de 27.26°C a 36.91°C, un aumento considerable. Por otro lado, en la parte derecha de la nave, la temperatura se mantuvo más estable, subiendo ligeramente de 20.41°C a 20.95°C.
- Temperatura Inferior: en ambas naves, la temperatura inferior se mantuvo bastante constante, subiendo levemente de 20.76°C a 21.82°C en la parte izquierda de la nave y de 20.01°C a 20.02°C en la parte derecha.
- Altura de la Interfaz: en la parte izquierda de la nave, la altura aumentó de 11.90 m a 12.41 m. Por el contrario, en la parte derecha de la nave la altura disminuyó considerablemente de 10.27 m a 2.302 m. En el caso de la parte izquierda de la nave, esta altura se puede considerar la altura de la capa de humos, pero en la parte derecha no, puesto que las temperaturas son tan similares que la altura de la interfaz no tiene nada que ver con la altura de la capa de humos.
- Volumen Superior: en la parte izquierda de la nave disminuyó de 2.62E+03 m³ a 1.98E+03 m³. En la parte derecha de la nave, el volumen aumentó drásticamente de 4.66E+03 m³ a 1.46E+04 m³.
- Absorbancia Superior: en la parte izquierda de la nave aumentó de 0.145 1/m a 0.247 1/m, mientras que en la parte derecha disminuyó de 4.055E-02 1/m a 2.327E-02 1/m.
- Absorbancia Inferior: en la parte izquierda de la nave, la absorbancia inferior se mantuvo bastante constante, variando de 2.313E-02 1/m a 2.270E-02 1/m. En la parte derecha, hubo un aumento de 2.464E-02 1/m a 5.422E-02 1/m.
- Presión: en ambas naves, la presión disminuyó. En la parte izquierda, de -0.865 Pa a -1.74 Pa, y en la parte derecha, de -0.720 Pa a -1.49 Pa.

Se analizará ahora la evolución del incendio:

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolystate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Mue	Y	90.8	0.305	5.000E+06	1.94				2.315E+06	2.685E+06	60.3	0.00
Nave_Izq			90.8	0.305	5.000E+06		0.00	5.000E+06	0.00				

Tabla 37: Resultados del Incendio en T = 420 s

Se puede observar como el flujo del penacho aumentó de 72 kg/s a 90.8 kg/s, la tasa de pirolisis se incrementó de 0.157 kg/s a 0.305 kg/s. El tamaño del incendio aumentó

significativamente de 2.573 MW a 5 MW, la altura de la llama creció de 0.288 m a 1.94 m. La convección aumentó de 1.191 MW a 2.315 MW, y la radiación se incrementó de 1.382 MW a 2.685 MW. La cantidad de material pirolizado aumentó considerablemente de 12.7 kg a 60.3 kg.

Respecto a la composición de los gases en cada zona:

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	77.7	19.4	0.425	1.438E-02	0.00	0.00	0.00	2.35	2.84	2.84	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.2	20.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.3	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 38: Resultados de la Composición en % en $T = 420$ s

Las especies en la capa superior de la parte izquierda de la nave sufrieron los siguientes cambios:

- El porcentaje de N2 disminuyó ligeramente de 78.0% a 77.7%.
- El porcentaje de O2 disminuyó de 20.0% a 19.4%.
- El porcentaje de CO2 aumentó de 0.206% a 0.425%.
- El porcentaje de CO aumentó de 6.954E-03% a 1.438E-02%.
- No hubo cambios en los porcentajes de HCN, HCL y TUHC.
- El porcentaje de H2O aumentó de 1.73% a 2.35%.
- La densidad óptica total (OD) aumentó de 1.41 1/m a 2.84 1/m, reflejando la misma tendencia en OD_F.

Para la parte derecha de la nave no hubo cambios en la capa superior entre los dos tiempos.

Tampoco hubo cambios significativos entre $T = 240$ s y $T = 420$ s, tanto en la parte izquierda como en la parte derecha de la nave, en las especies en la capa inferior. Los porcentajes de todas las especies permanecieron constantes, y la densidad óptica total (OD), OD_F y OD_S permanecieron en 0.

Estos cambios en la capa superior de la parte izquierda de la nave reflejan un aumento en la concentración de los gases producidos por el fuego y una mayor opacidad en la atmósfera del compartimento, lo cual puede tener implicaciones importantes para la seguridad y la evacuación en caso de incendio.

A continuación, se procede a analizar los flujos a través de las aperturas:

Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer	
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.1794E-01		0.7687E+02	0.6747E+02	0.6742E+02	0.2432E+02	0.5074E-01	0.5257E+02
H 2	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 3	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 4	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 5	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 6	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 7	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 8	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 9	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 10	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 11	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 12	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 13	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 14	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
H 15	Nave_Izq	Outside	1.000	0.1273E-02		0.7964E+01					0.7965E+01
V 1	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2047E+01		0.6554E+00	0.2702E+01			
V 2	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2047E+01		0.6554E+00	0.2702E+01			
V 3	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2047E+01		0.6554E+00	0.2702E+01			
V 4	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2047E+01		0.6554E+00	0.2702E+01			
V 5	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2047E+01		0.6554E+00	0.2702E+01			
V 6	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2534E+00					0.2534E+00
V 7	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2534E+00					0.2534E+00
V 8	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2534E+00					0.2534E+00
V 9	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2534E+00					0.2534E+00

Tabla 39: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 420$ s

Para la ventilación H1 que conecta la parte izquierda de la nave con la derecha, el flujo de entrada desde la parte izquierda hacia la parte derecha en la capa inferior aumentó a 76.87 kg/s, el flujo de salida también aumentó a 67.47 kg/s. Además, ahora hay un flujo de salida desde la parte derecha hacia la parte izquierda en la capa superior de 24.32 kg/s. Esto indica que el intercambio de gases entre la parte izquierda y derecha de la nave se ha intensificado, con más gas moviéndose en ambas direcciones.

Para las ventilaciones H2 hasta H15, que conectan la parte izquierda de la nave con el exterior, en $T=240$ s, el flujo de gas saliente en la capa inferior era de 5.767 kg/s, mientras que en $T=420$ s, este flujo de salida aumentó a 7.964 kg/s. Esto indica que la cantidad de gas que se está ventilando al exterior desde la parte izquierda de la nave ha aumentado con el tiempo.

Para las ventilaciones V1 hasta V5, que conectan la parte izquierda de la nave con el exterior, en $T=240$ s, el flujo de gas saliente en la capa inferior era de 0.1154 kg/s y en $T=420$ s, este flujo de salida aumentó a 0.6554 kg/s. Esto indica que la cantidad de gas que se está ventilando al exterior desde la parte izquierda de la nave ha aumentado con el tiempo.

Para las ventilaciones V6 hasta V9, que conectan la parte derecha de la nave con el exterior, en $T=240$ s, el flujo de gas saliente en la capa inferior era de 0.2052 kg/s, en $T=420$ s, este flujo de salida aumentó a 0.2534 kg/s. Esto indica que la cantidad de gas

que se está ventilando al exterior desde la parte derecha de la nave también ha aumentado con el tiempo.

Estos cambios en los flujos de gas sugieren que la actividad del incendio se ha intensificado tanto en la parte izquierda como en la derecha de la nave, lo que ha resultado en un aumento en la cantidad de gas que se mueve entre estas dos partes y que se ventila al exterior.

A continuación, se visualizará nuestra estructura con todos estos detalles que hemos comentado:

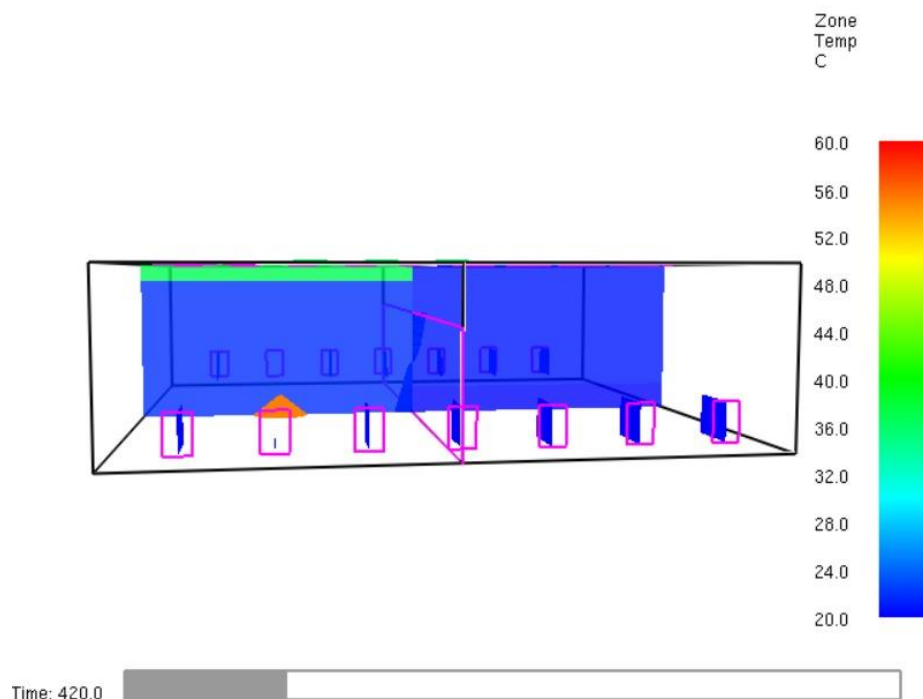


Figura 79: Nave Industrial con Muelles de Carga en $T = 420$ s

Se confirma que la única zona donde ha subido la temperatura de manera notable es en la zona superior de la parte izquierda de la nave, esto seguramente se deba a la presencia de humo en esta zona, a diferencia de en las restantes tres zonas, donde el humo será prácticamente inexistente.

4.4.2.4. Previo a Finalizar el Incendio ($T = 900$ s)

Se ha escogido el segundo 900, puesto que es un instante previo a que finalice el incendio, la tasa de liberación está en su máximo (5 MW).

Siguiendo la estructura marcada anteriormente, se empezará a analizar las 4 zonas de la nave:

* Time = 900.0 seconds. *							

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	38.81	22.97	12.51	1.86E+03(11%)	0.248	2.254E-02	-2.28
Nave_Dcha	22.07	20.07	0.3845	1.70E+04(97%)	2.190E-02	0.145	-2.07

Tabla 40: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 420$ s

En la parte izquierda de la nave:

- La temperatura en la capa superior aumentó de 36.81°C a 38.81°C.
- La temperatura en la capa inferior aumentó de 21.79°C a 22.97°C.
- La altura de la interfaz aumentó ligeramente de 12.44 m a 12.51 m.
- El volumen de la capa superior disminuyó ligeramente de 1950 m³ a 1860 m³.
- La absorción en la capa superior apenas cambió, de 0.247 1/m a 0.248 1/m.
- La absorción en la capa inferior disminuyó ligeramente de 0.02268 1/m a 0.02254 1/m.
- La presión disminuyó de -1.68 Pa a -2.28 Pa.

En la parte derecha de la nave:

- La temperatura en la capa superior aumentó de 20.94°C a 22.07°C.
- La temperatura en la capa inferior aumentó de 20.02°C a 20.07°C.
- La altura de la interfaz disminuyó significativamente de 2.417 m a 0.3845 m.
- El volumen de la capa superior aumentó de 14500 m³ a 17000 m³.
- La absorción en la capa superior disminuyó de 0.02336 1/m a 0.0219 1/m.
- La absorción en la capa inferior aumentó de 0.05264 1/m a 0.145 1/m.
- La presión disminuyó de -1.43 Pa a -2.07 Pa.

Para ambas partes de la nave se observa un aumento en las temperaturas de las capas superior e inferior, aunque muy pequeño, esto indica que el incendio está totalmente controlado.

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Mue	Y	91.7	0.305	5.000E+06	1.94				2.315E+06	2.685E+06	207.	0.00
Nave_Izg			91.7	0.305	5.000E+06		0.00	5.000E+06	0.00				

Tabla 41: Resultados del Incendio en $T = 900$ s

Se analizará ahora la evolución del incendio:

- El flujo del penacho ha aumentado ligeramente de 91.1 kg/s a 91.7 kg/s, lo que indica que la cantidad de gas que está siendo empujado hacia arriba por el fuego ha aumentado.
- La tasa de pirólisis, que es la velocidad a la que los materiales se descomponen debido al calor sin oxígeno, se mantiene constante en 0.305 kg/s.
- El tamaño del fuego también se mantiene constante a 5 MW, lo que sugiere que la cantidad total de energía liberada por el fuego no ha cambiado.
- La altura de la llama permanece constante en 1.94 m.
- El calor del fuego que se convierte en convección y radiación también se mantiene constante, con 2.315 MW y 2.685 MW respectivamente.
- La cantidad total de material que se ha descompuesto debido a la pirólisis, ha aumentado significativamente de 60.3 kg a 207 kg, lo que indica que se ha descompuesto más material a lo largo del tiempo.

Estos cambios indican que el fuego se ha mantenido bastante constante en términos de tamaño y energía liberada, pero la cantidad de material que se ha descompuesto debido a la pirólisis ha aumentado con el tiempo.

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	77.6	19.5	0.421	1.425E-02	0.00	0.00	0.00	2.34	2.79	2.79	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.2	20.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.2	20.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.2	20.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 42: Resultados de la Composición en % en $T = 900$ s

Estos datos indican que la composición de gases y partículas en ambas partes de la nave se ha mantenido relativamente estable entre estos dos momentos. El único cambio

observable es una disminución leve en la densidad óptica en la capa superior de la parte izquierda de la nave, lo que puede indicar una ligera disminución en la cantidad de partículas o gases que absorben o dispersan la luz en ese espacio. Esto es un indicador de que el humo está poco a poco siendo desalojado a través de los exutorios.

A continuación, se tienen los datos de los flujos que atraviesan los distintos conductos y aperturas:

Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Lower Layer		Flow Relative to 'To'		Lower Layer	
				Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow	Upper Layer Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.2469E-01		0.7468E+02	0.6570E+02	0.6567E+02	0.6580E+02	0.3290E-01	0.8905E+01
H 2	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 3	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 4	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 5	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 6	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 7	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 8	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 9	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 10	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 11	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 12	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 13	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 14	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
H 15	Nave_Izq	Outside	1.000	0.5225E-03		0.9143E+01					0.9144E+01
V 1	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2040E+01		0.1013E+01	0.3053E+01			
V 2	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2040E+01		0.1013E+01	0.3053E+01			
V 3	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2040E+01		0.1013E+01	0.3053E+01			
V 4	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2040E+01		0.1013E+01	0.3053E+01			
V 5	Nave_Izq	Outside	1.000		0.2040E+01		0.1013E+01	0.3053E+01			
V 6	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2472E+00					0.2472E+00
V 7	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2472E+00					0.2472E+00
V 8	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2472E+00					0.2472E+00
V 9	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.2472E+00					0.2472E+00

Tabla 43: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 900$ s

Ventilaciones horizontales:

- Desde la parte izquierda de la nave hacia la parte derecha (H1): en la capa inferior, el flujo de salida de la parte izquierda disminuyó de 76.87 kg/s a 74.68 kg/s, y el flujo de entrada a la parte derecha también disminuyó de 67.47 kg/s a 65.7 kg/s. En la capa superior, el flujo de salida de la parte derecha aumentó de 24.32 kg/s a 65.8 kg/s.
- Desde la parte izquierda hacia el exterior (H2 a H15, los muelles de carga): en la capa inferior, el flujo de salida de la parte izquierda aumentó ligeramente de 7.964 kg/s a 9.143 kg/s en cada ventilación.

Ventilaciones verticales:

- Desde la parte izquierda hacia el exterior (V1 a V5): en la capa inferior, el flujo de salida de la parte izquierda aumentó ligeramente de 0.6554 kg/s a 1.013 kg/s en cada ventilación.

- Desde la parte derecha hacia el exterior (V6 a V9): el flujo de salida de la parte derecha en la capa inferior disminuyó ligeramente de 0.2534 kg/s a 0.2472 kg/s en cada ventilación.

Como en los tiempos anteriores, se mostrarán a continuación todo lo explicado de manera visual y más gráfica:

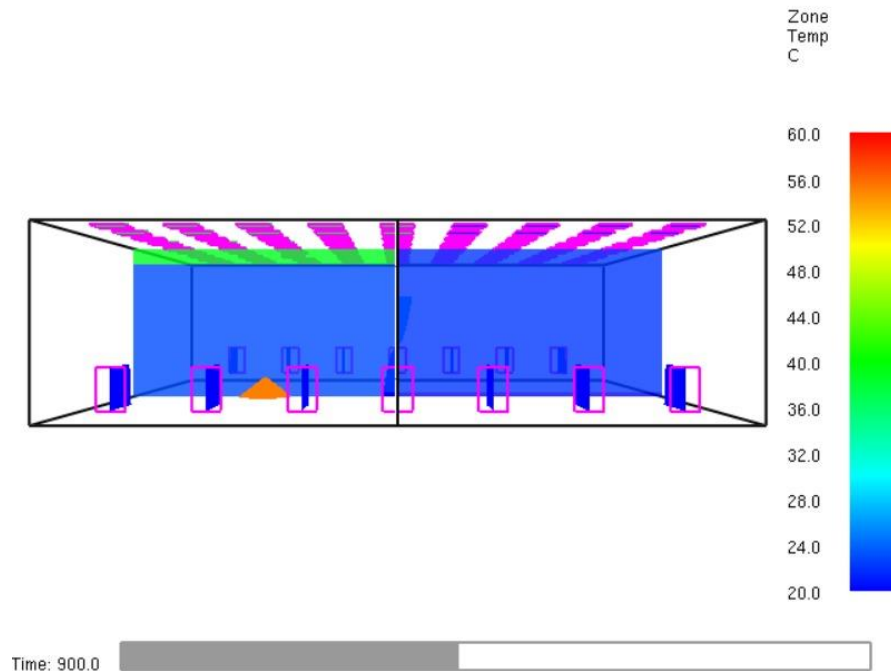


Figura 80: Nave Industrial con Muelles de Carga en $T = 900$ s

En la figura 80, podemos comprobar como la temperatura de las zonas no ha variado demasiado y que el incendio tiene el mismo tamaño y fuerza.

4.4.2.5. Tiempo Tras el Incendio ($T = 2000$ s)

El tiempo que hemos escogido es de 2000 segundos, puesto que es el final de la simulación y es más de 1000 segundos tras haber finalizado el incendio, por lo que puede llegar a considerarse un tiempo con resultados muy cercanos al régimen permanente.

Se comenzará estudiando la temperatura de las zonas, la altura de la capa de humos y la presión:

* Time = 2000.0 seconds. *							

Compartment	Upper Temp. (C)	Lower Temp (C)	Inter. Height (m)	Upper Vol (m^3)	Upper Absor (1/m)	Lower Absorb (1/m)	Pressure (Pa)
Nave_Izq	21.90	20.76	13.05	1.19E+03(7%)	9.429E-02	2.236E-02	-0.429
Nave_Dcha	20.73	20.77	11.45	3.19E+03(18%)	5.080E-02	2.351E-02	-0.432

Tabla 44: Temperatura media y Altura de la capa de humos en $T = 2000$ s

Parte izquierda de la nave:

- Temperatura Superior: ha disminuido de 38.81°C a 21.90°C.
- Temperatura Inferior: ha disminuido ligeramente de 22.97°C a 20.76°C.
- Altura Intermedia: ha aumentado ligeramente de 12.51m a 13.05m.
- Volumen Superior: ha disminuido de 1.86E+03 m³ a 1.19E+03 m³.
- Absorción Superior: ha disminuido de 0.248 1/m a 9.429E-02 1/m.
- Absorción Inferior: ha permanecido casi constante, con una leve disminución de 2.254E-02 1/m a 2.236E-02 1/m.
- Presión: ha aumentado de -2.28 Pa a -0.429 Pa, lo que indica una reducción en la presión negativa.

Parte derecha de la nave:

- Temperatura Superior: ha disminuido ligeramente de 22.07°C a 20.73°C.
- Temperatura Inferior: ha aumentado ligeramente de 20.07°C a 20.77°C.
- Altura Intermedia: ha aumentado significativamente de 0.3845m a 11.45m.
- Volumen Superior: ha disminuido de 1.70E+04 m³ a 3.19E+03 m³.
- Absorción Superior: ha disminuido de 2.190E-02 1/m a 5.080E-02 1/m.
- Absorción Inferior: ha aumentado ligeramente de 0.145 1/m a 2.351E-02 1/m.
- Presión: ha aumentado de -2.07 Pa a -0.432 Pa, lo que indica una reducción en la presión negativa.

En general, parece que la situación ha mejorado en ambos compartimentos, ya que la temperatura ha disminuido y la presión se ha equilibrado en comparación con el momento $T=900$ s, el fuego se está controlando o extinguiendo.

FIRES													
Compartment	Fire	Ign	Plume Flow (kg/s)	Pyrol Rate (kg/s)	Fire Size (W)	Flame Height (m)	Fire in Upper (W)	Fire in Lower (W)	Vent Fire (W)	Convec. (W)	Radiat. (W)	Pyrolysate (kg)	Trace (kg)
	Incendio_Mue	Y	0.00	0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	217.	0.00

Tabla 45: Resultados del Incendio en $T = 2000$ s

Se ve como el incendio ya ha finalizado, por eso todos sus parámetros están a cero.

UPPER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.3	20.6	1.118E-03	3.779E-05	0.00	0.00	0.00	1.16	7.797E-03	7.797E-03	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.2	20.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00
LOWER LAYER SPECIES												
Compartment	N2 (%)	O2 (%)	CO2 (%)	CO (%)	HCN (%)	HCL (%)	TUHC (%)	H2O (%)	OD (1/m)	OD_F (1/m)	OD_S (1/m)	TS kg
Nave_Izq	78.2	20.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Nave_Dcha	78.2	20.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 46: Resultados de la Composición en % en $T = 2000$ s

Capa Superior:

- Parte izquierda: en $T = 2000$ s, los porcentajes de N_2 y O_2 han aumentado ligeramente en comparación con $T = 900$ s. La concentración de CO_2 ha disminuido significativamente, mientras que las concentraciones de CO, HCN, HCL, TUHC y H_2O han permanecido constantes. La densidad óptica (OD, OD_F, OD_S) ha disminuido, aunque sigue siendo pequeña en ambas instancias de tiempo.
- Parte derecha: no hay cambios notables en las concentraciones de ninguna de las especies de gases entre $T = 900$ s y $T = 2000$ s.

Capa Inferior: no hay cambios en las concentraciones de ninguna de las especies de gases entre $T = 900$ s y $T = 2000$ s a lo largo de toda la nave.

Vent	From/Bottom	To/Top	Opening Fraction	Flow relative to 'From'		Flow Relative to 'To'		Flow Relative to 'To'		Flow Relative to 'To'	
				Upper Layer Inflow	Lower Layer Outflow	Upper Layer Inflow	Lower Layer Outflow	Upper Layer Inflow	Lower Layer Outflow	Upper Layer Inflow	Lower Layer Outflow
H 1	Nave_Izq	Nave_Dcha	1.000	0.5853E+00		0.9806E+01	0.9916E+01	0.5365E+01		0.4550E+01	0.1039E+02
H 2	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 3	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 4	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 5	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 6	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 7	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 8	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 9	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 10	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 11	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 12	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 13	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 14	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
H 15	Nave_Izq	Outside	1.000	0.4488E-02		0.3852E+01					0.3857E+01
V 1	Nave_Izq	Outside	1.000		0.6641E-02		0.1203E+01		0.1210E+01		
V 2	Nave_Izq	Outside	1.000		0.6641E-02		0.1203E+01		0.1210E+01		
V 3	Nave_Izq	Outside	1.000		0.6641E-02		0.1203E+01		0.1210E+01		
V 4	Nave_Izq	Outside	1.000		0.6641E-02		0.1203E+01		0.1210E+01		
V 5	Nave_Izq	Outside	1.000		0.6641E-02		0.1203E+01		0.1210E+01		
V 6	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1427E-01					0.1427E-01
V 7	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1427E-01					0.1427E-01
V 8	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1427E-01					0.1427E-01
V 9	Nave_Dcha	Outside	1.000			0.1427E-01					0.1427E-01

Tabla 47: Resultados del Flujo a través de las Aperturas en $T = 2000$ s

Ventilación H1 (entre las dos partes de la nave): el flujo de aire ha aumentado significativamente en la capa superior desde 0.2469E-01 kg/s a 0.5853 kg/s. También observamos un flujo de aire saliente en la capa superior en $T = 2000$ s que no estaba presente en $T = 900$ s. En la capa inferior, el flujo de aire ha disminuido de 74.68 kg/s a 9.806 kg/s.

Ventilaciones H2 a H15 (muelles de carga): vemos una pequeña aumento en la entrada de aire en la capa superior, y una disminución en la capa inferior. Sin embargo, el flujo de aire a través de estas ventilaciones permanece relativamente estable en comparación con otras partes del sistema.

Ventilaciones V1 a V5 (exutorios de la cubierta de la parte izquierda): la salida de aire de la capa inferior ha aumentado ligeramente de 1.013 kg/s a 1.203 kg/s. La entrada de aire en la capa superior también ha aumentado.

Ventilaciones V6 a V9 (exutorios de la cubierta de la parte derecha): la salida de aire de la capa inferior ha disminuido significativamente de 0.2472 kg/s a 0.1427E-01 kg/s.

En general, parece que hay un cambio hacia un mayor flujo de aire en la capa superior y un menor flujo en la capa inferior a medida que pasa el tiempo.

Se visualizarán a continuación todos estos resultados en Smokeview:

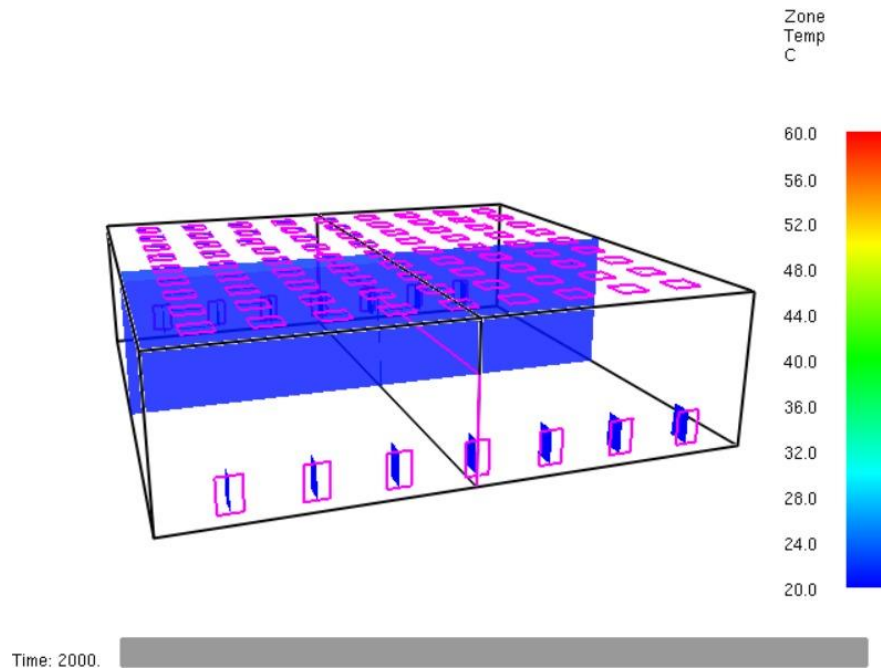


Figura 81: Nave Industrial con Muelles de Carga en $T = 2000\text{ s}$

Se ve como prácticamente no queda rastro del incendio en la nave, las temperaturas de las zonas han vuelto a su normalidad y tampoco queda rastro de humo alguno.

4.4.3. Comparación de Resultados

Los parámetros que se compararán serán los siguientes:

- Plano Longitudinal de Temperatura
- Temperatura en P (20, 25, 13)
- Comparación de Isosuperficie de 60°C
- Expansión del Humo a través de la nave

4.4.3.1. Plano Longitudinal de Temperatura

Al igual que se ha hecho en la anterior simulación, se han escogido tres tiempos de la simulación y se ira analizando cada uno de ellos en detalle.

Se empezará con el segundo 120, que es un punto intermedio en la curva de crecimiento de la evolución del incendio:

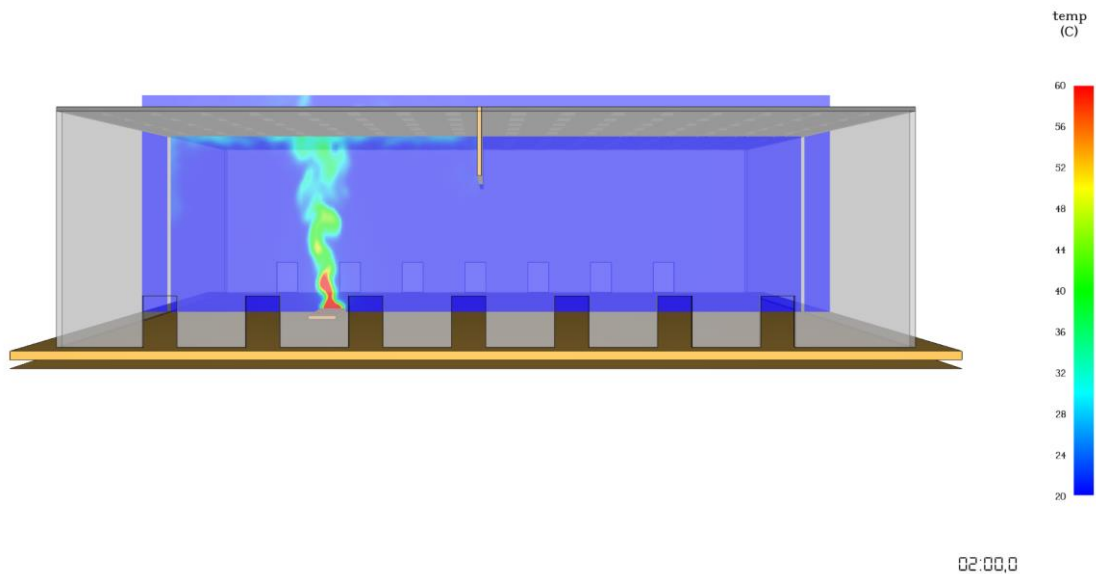


Figura 82: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 120$ s - Muelles

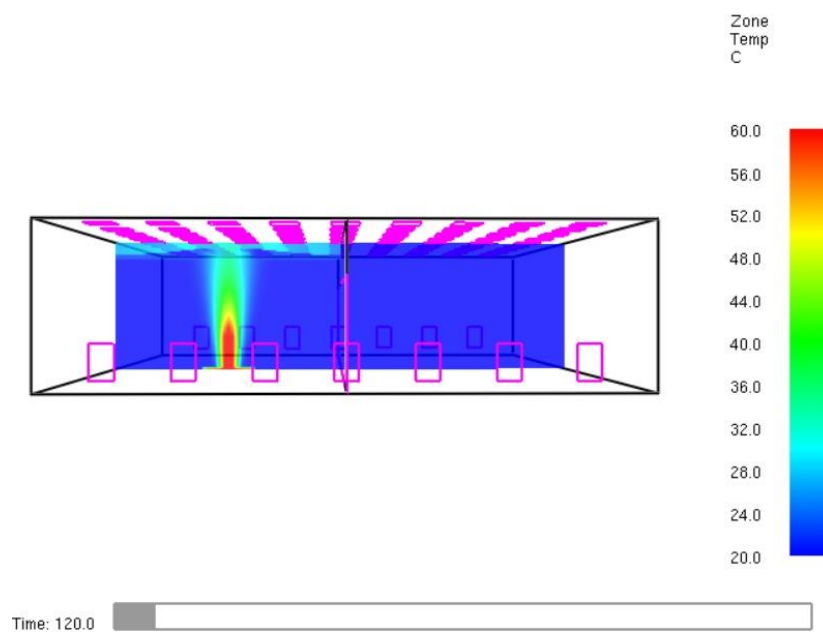


Figura 83: CFAST - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 120$ s - Muelles

Ambas imágenes son muy similares, se podría decir que nos dan la misma información, únicamente hay diferencias en la geometría de las isosuperficies, esto se debe a que FDS tiene un método de cálculo por mallas y esto hace que sea más preciso, mientras que CFAST realiza estos cálculos por zonas y a partir de aproximaciones.

El siguiente momento que se analizará será el segundo 360, el incendio se encuentra en su pico de tasa de liberación de calor:

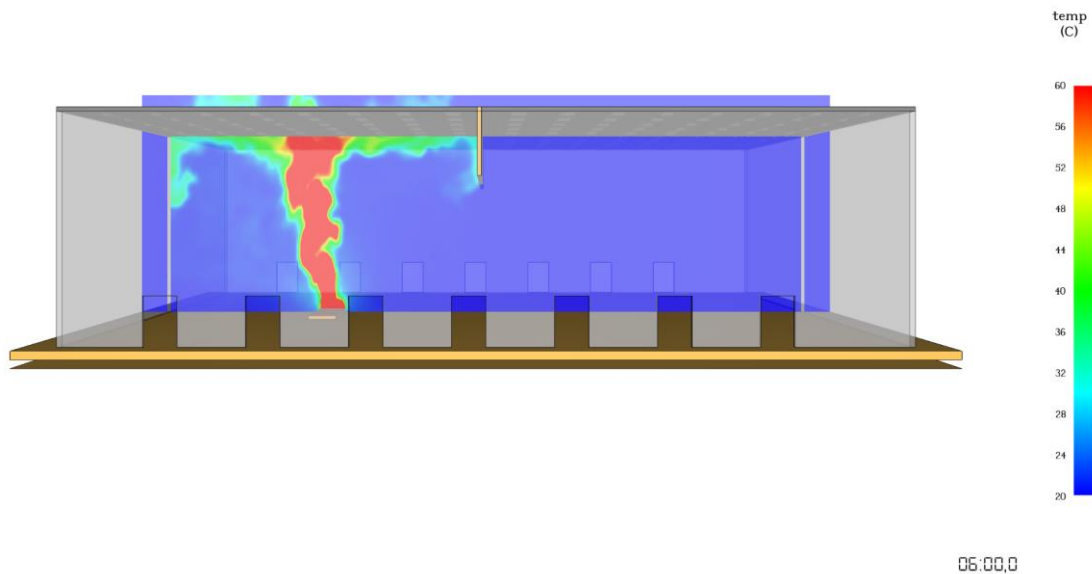


Figura 84: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 360$ s - Muelles

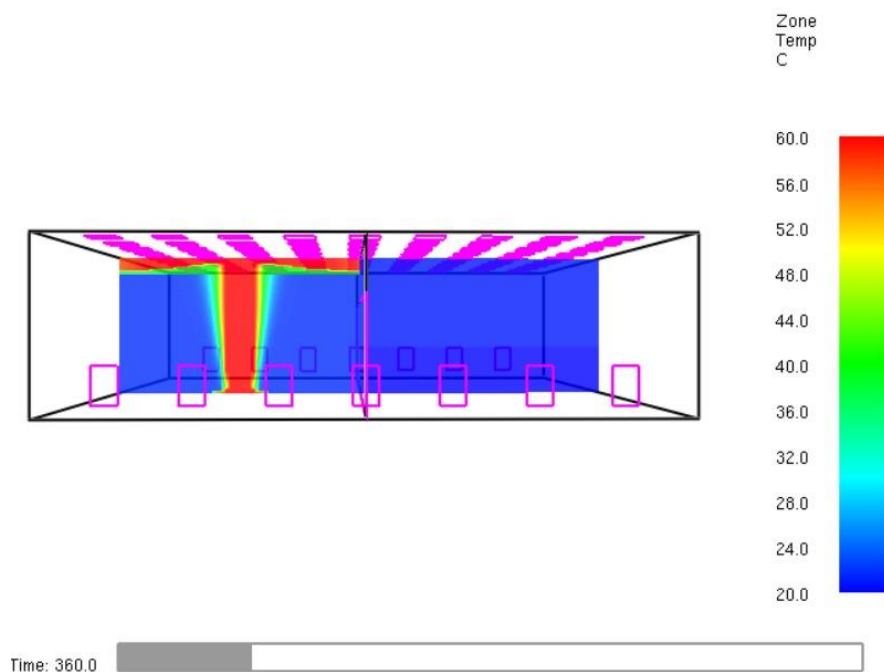


Figura 85: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 360$ s - Muelles

En el segundo 360, se puede ver como en ambas simulaciones, existen puntos a 60°C pegados a la cubierta de la nave, es cierto que la diferencia está en que CFAST considera todos los puntos de la cubierta a 60°C y FDS nos detalla cuales lo están y cuáles no. Este error por parte de CFAST es entendible puesto que como hemos dicho previamente, por

su método de cálculo, en cuanto el penacho a 60°C entra en contacto con la cubierta, todos los puntos a esa altura están a la misma temperatura, es una aproximación, al fin y al cabo. El siguiente y último tiempo por analizar será el segundo 540, es el último segundo que se tiene de este escenario, a diferencia del anterior que llegaba a 900 segundos:

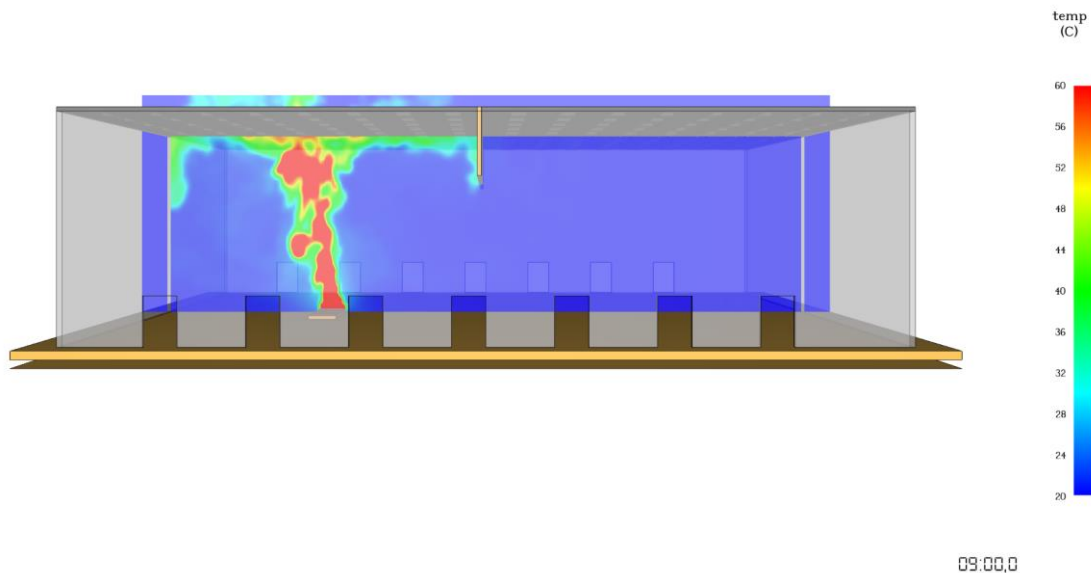


Figura 86: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 540\text{ s}$ - Muelles

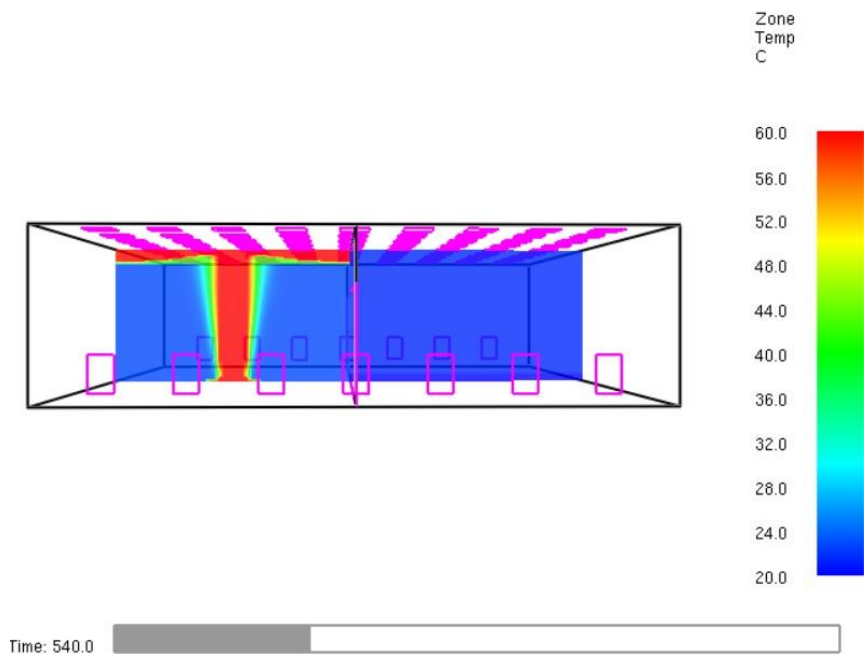


Figura 87: FDS - Plano Longitudinal de Temperatura en $T = 540\text{ s}$ - Muelles

Vemos como en la simulación de CFAST, entre los segundos 360 y 540, no parece que las temperaturas de las zonas sufran cambio alguno. Esto se debe a que en el segundo 360

ya se ha alcanzado su pico máximo de tasa de liberación de calor (5 MW) y al estar los exutorios abiertos desde un inicio el humo que se extraía es el mismo, CFAST entiende que es la misma situación, puesto que lo que se genera es lo mismo y lo que sale también. Sin embargo, FDS es mucho más preciso y por eso las imágenes entre estos tiempos no son idénticas, pero da información muy parecida.

4.4.3.2. Temperatura en P (20, 25, 13)

Se tiene el siguiente gráfico de la simulación FDS que representa la temperatura en el tiempo del punto en el espacio con coordenadas 20 m en X, 25 m en Y, 13 m de Z (altura):

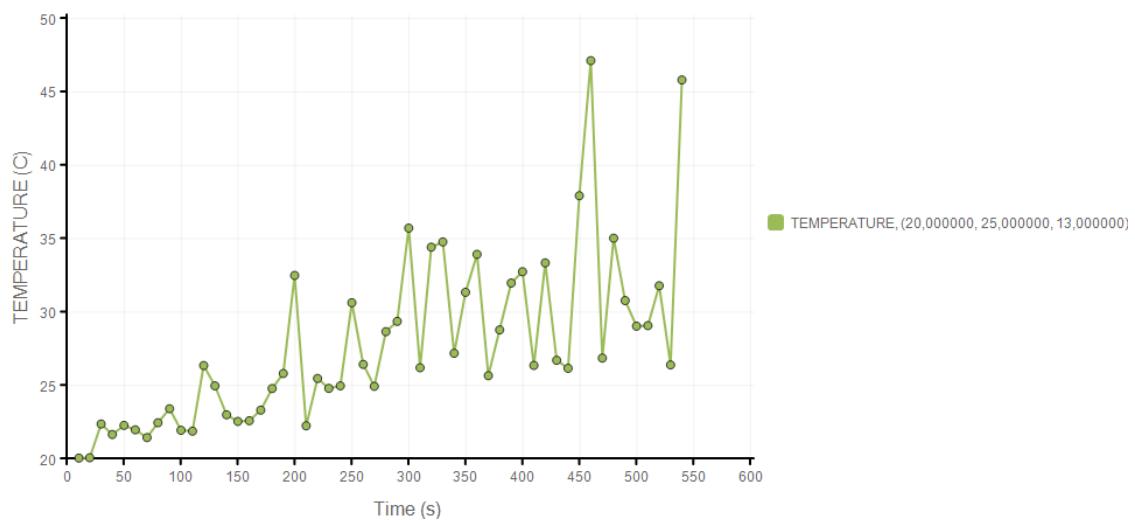


Figura 88: FDS - Temperatura en P (20, 25, 13) - Muelles

Para poder comparar esta gráfica, se necesita un sensor de temperatura en este punto en nuestra simulación CFAST. Para conseguir esto, se configurará una alarma de incendios dependiente de la temperatura (Heat Alarm) en esas coordenadas, este dispositivo irá midiendo la temperatura a lo largo del tiempo, esto se podrá realizar en la siguiente pestaña:

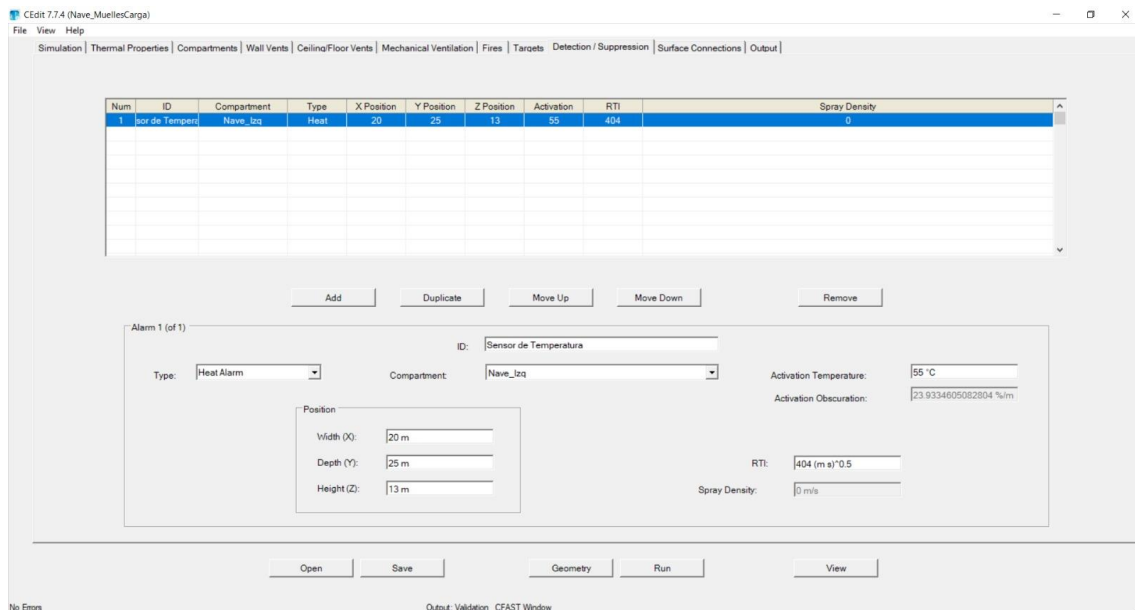


Figura 89: Configuración de Alarma de Incendios

En la gráfica de FDS se puede ver cómo hay grandes fluctuaciones de crecimiento y decrecimiento en poco tiempo, estas grandes variaciones no las veremos en la gráfica de CFAST. Para conseguir esta gráfica, se utilizará de nuevo Jupyter Notebooks y también de base el código utilizado para la visualización de la gráfica de la anterior simulación. Los cambios que habrá que introducir serán, cambiar el nombre del archivo donde vamos a buscar los datos numéricos y el nombre de la columna donde esta almacenada dicha información. Tras aplicar estos cambios, el código resultante será el siguiente:

```
In [2]: 1 datos_devices = pd.read_csv('Nave_MuellesCarga_devices.csv', sep=',', low_memory=False, index_col=0)

In [3]: 1 temperatura = datos_devices['SENST_1']
2 indice_actual = datos_devices.index
3 indice_numeros = indice_actual.to_list().index(' 0.000000000000E+00')
4 temperatura = temperatura.iloc[indice_numeros:]
5 temperatura.head()

Out[3]: Time
0.000000000000E+00    0.200000000000E+02
0.150000000000E+02    0.200095340456E+02
0.300000000000E+02    0.200332756990E+02
0.450000000000E+02    0.200764952856E+02
0.600000000000E+02    0.201521104261E+02
Name: SENST_1, dtype: object

In [4]: 1 temperatura = temperatura.astype(float).apply(lambda x: '{:.2f}'.format(x))
2 temperatura.index = temperatura.index.map(lambda x: '{:.2f}'.format(float(x)))
3 print(temperatura.head())

Time
0.00    20.00
15.00   20.01
30.00   20.03
45.00   20.08
60.00   20.15
```

```

In [5]: 1 temperatura.index = temperatura.index.astype(float)
        2 temperatura_filtrada = temperatura.loc[temperatura.index <= 600]
        3
        4 temperatura_filtrada = temperatura_filtrada.astype(float)
        5 x = temperatura_filtrada.index
        6 y = temperatura_filtrada.values
        7
        8 plt.figure(figsize=(10, 6))
        9 plt.plot(x, y)
        10 plt.xticks(rotation=45)
        11
        12 plt.xlabel('Tiempo')
        13 plt.ylabel('Temperatura')
        14 plt.title('Punto (20, 25, 13)')
        15 plt.show()

```

A partir del cual, se obtendrá la siguiente gráfica como output:

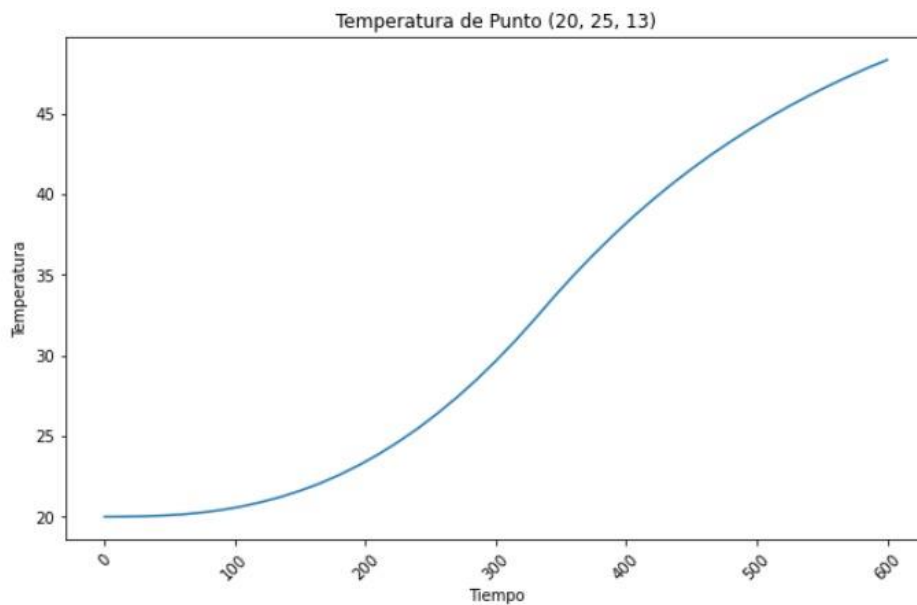


Figura 90: CFAST - Temperatura en P (20, 25, 13) - Muelles

Comparando ambas gráficas, se puede ver como son similares, lo primero que salta a la vista es que la tendencia es la misma. En ambas gráficas, la temperatura empieza a subir considerablemente más rápido en el segundo 200 (derivada y gradiente de temperaturas de valores cada vez más altos). También se aprecia como la última temperatura registrada en la gráfica del modelo FDS marca una temperatura alrededor de 45°C, mismo valor que el marcado por la gráfica de CFAST. A partir de esta comparación se puede asegurar que, aunque no sea igual de precisa la predicción de CFAST comparada con la de FDS, se acerca mucho.

4.4.3.3. Isosuperficie de 60°C

Se seguirá la misma estructura que para los anteriores apartados, se mostrarán los 3 mismos instantes de tiempo y se compararán entre las visualizaciones de FDS con las de CFAST.

Para el segundo 120 se tienen las siguientes dos visualizaciones:

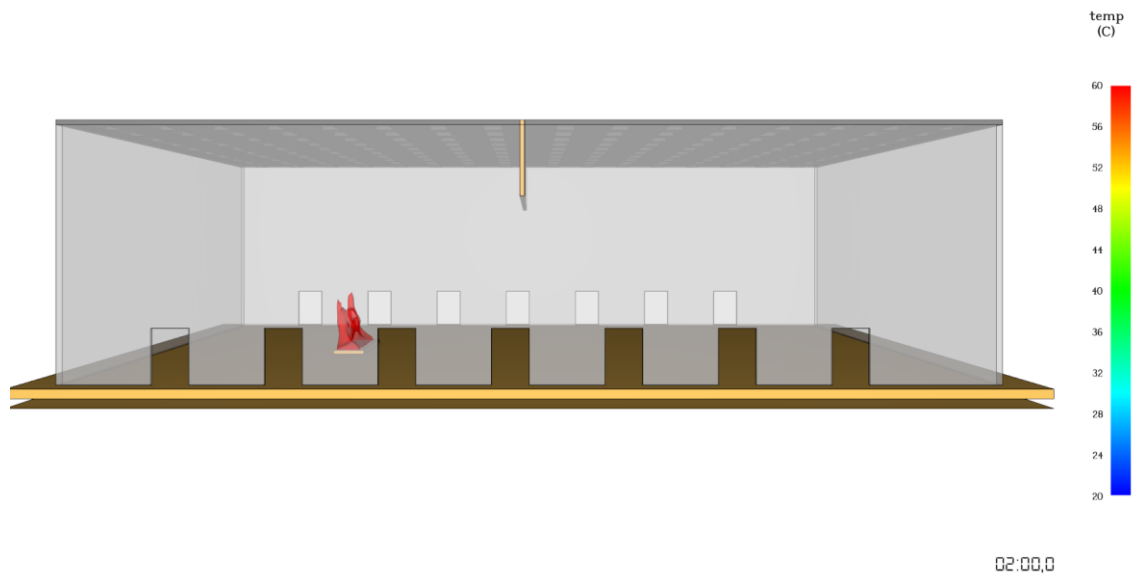


Figura 91: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 120$ s - Muelles

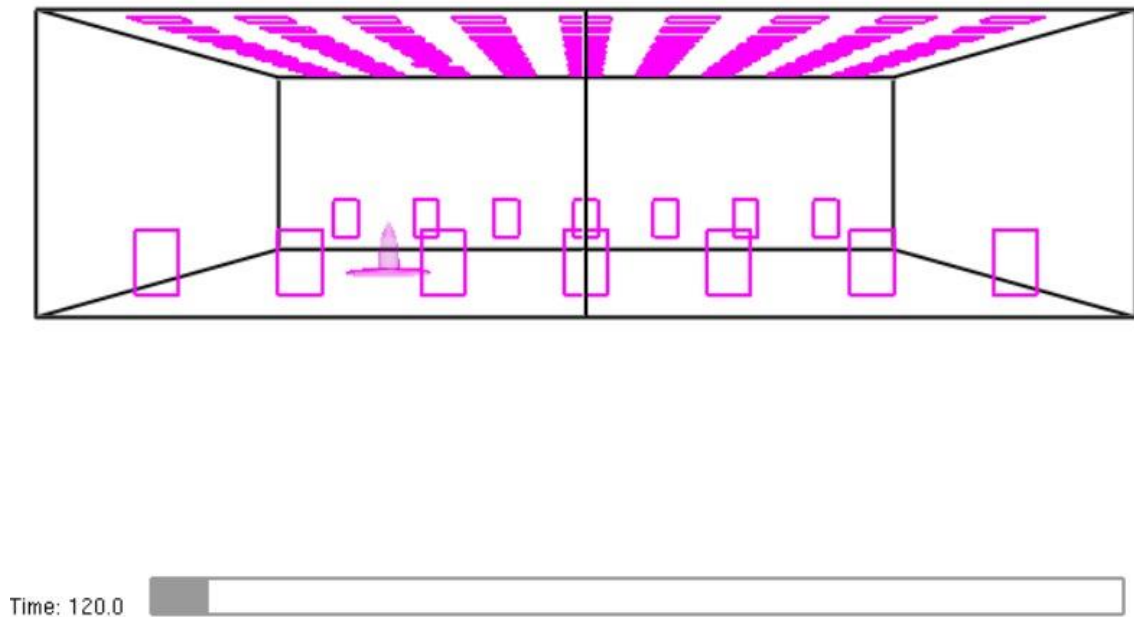


Figura 92: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 120$ s - Muelles

Se puede ver como la única diferencia entre estas dos imágenes es la forma de la isosuperficie. En la primera, la del FDS, la superficie del fuego en el suelo de la nave es rectangular mientras que en la simulación de CFAST, esta superficie es circular, pero esto

es porque en CFAST no se permite diseñar la forma de tu fuego, simplemente el valor de su área en el suelo. La otra diferencia es que en la simulación de FDS se ven incluso las llamas del incendio, en CFAST en cambio, esto no es posible y la mejor manera que tiene de representarlo es con forma de elipsoide alargado o esfera oblonga.

Para el segundo 360:

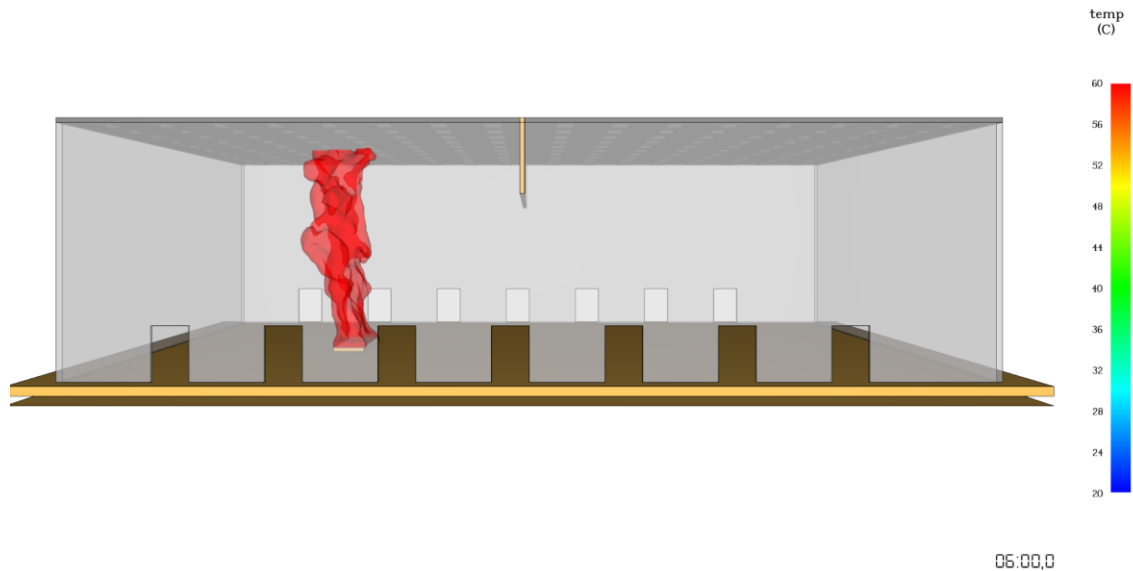


Figura 93: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 360$ s - Muelles

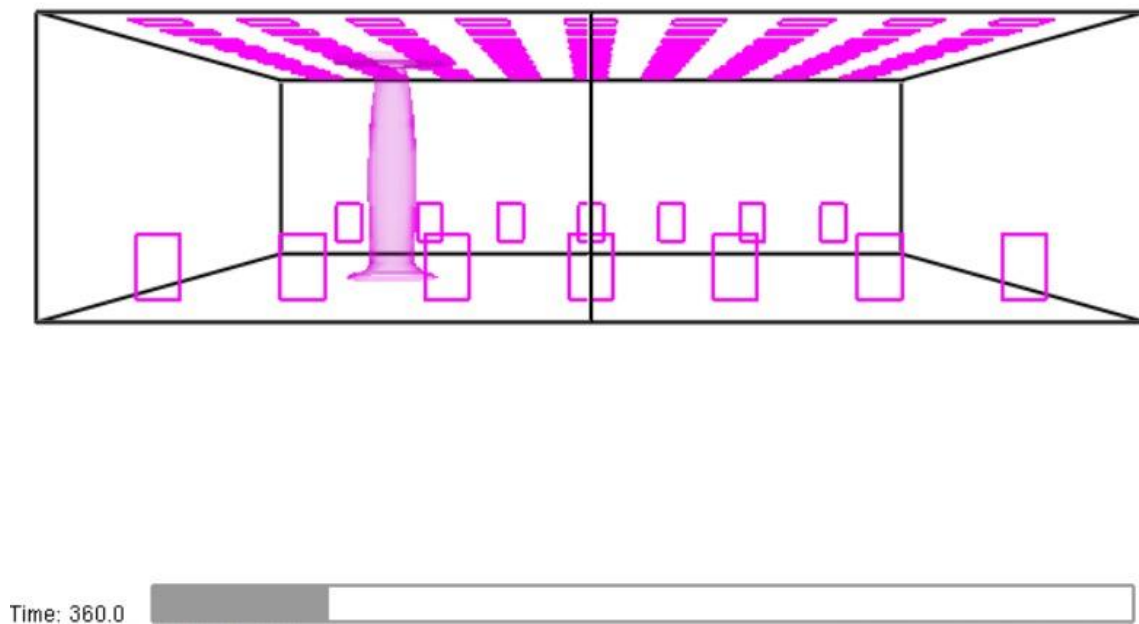


Figura 94: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 360$ s - Muelles

En este instante pasa lo mismo que antes, la isosuperficie es muy similar pero no exactamente idéntica debido a la manera de resolver los cálculos que tiene cada modelo,

esto lleva a que la forma de la isosuperficie del FDS sea más irregular, pero a la vez más precisa y lo contrario le pasará a la isosuperficie de CFAST.

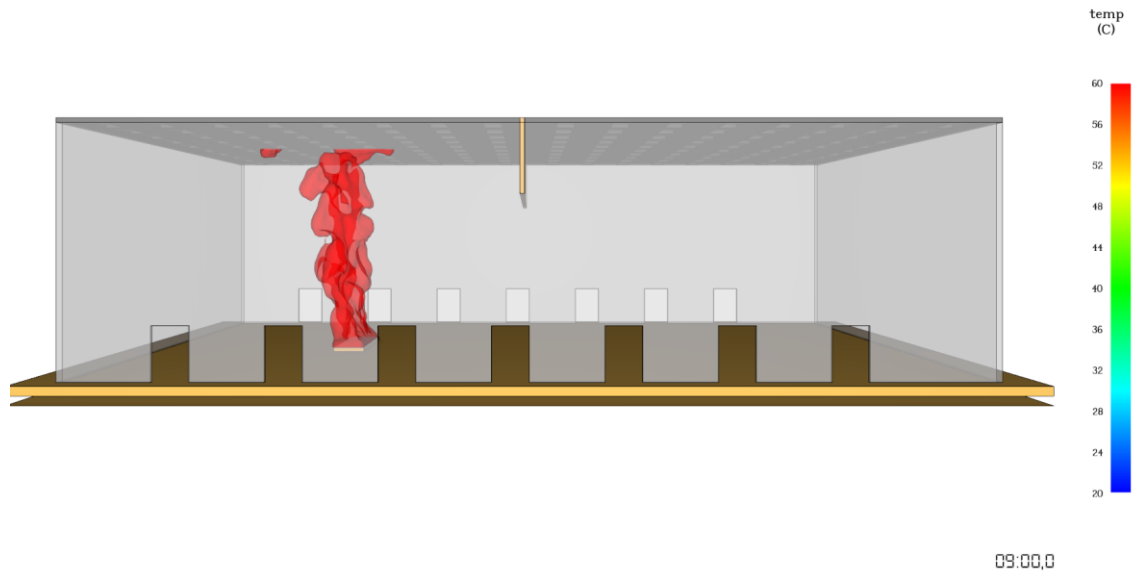


Figura 95: FDS - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 540$ s - Muelles

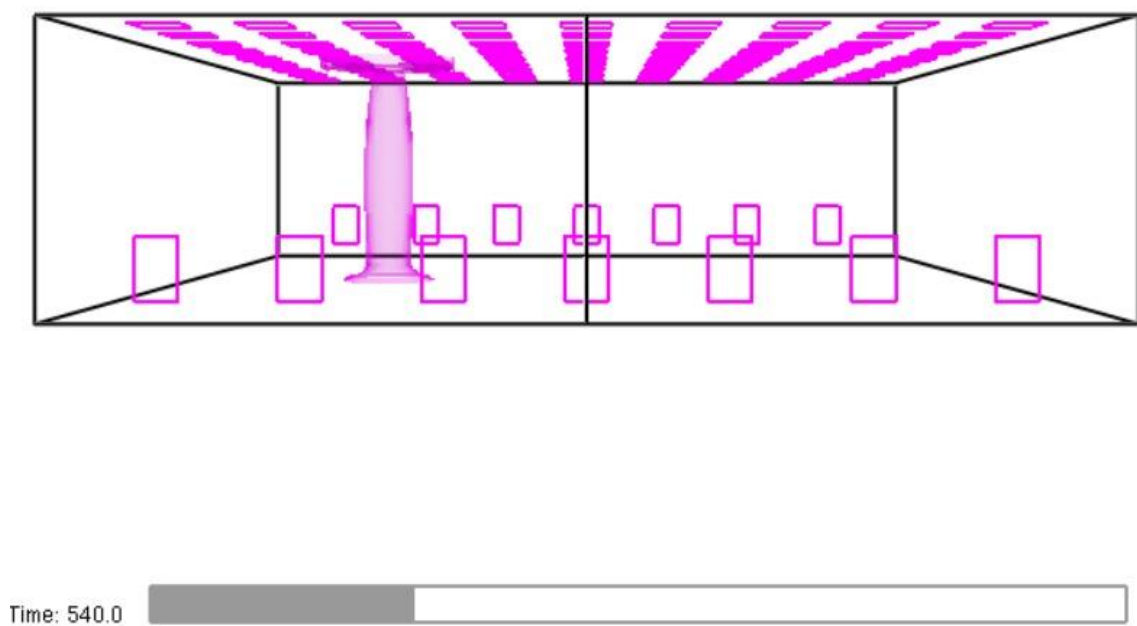


Figura 96: CFAST - Isosuperficie de Temperatura de 60°C en $T = 540$ s - Muelles

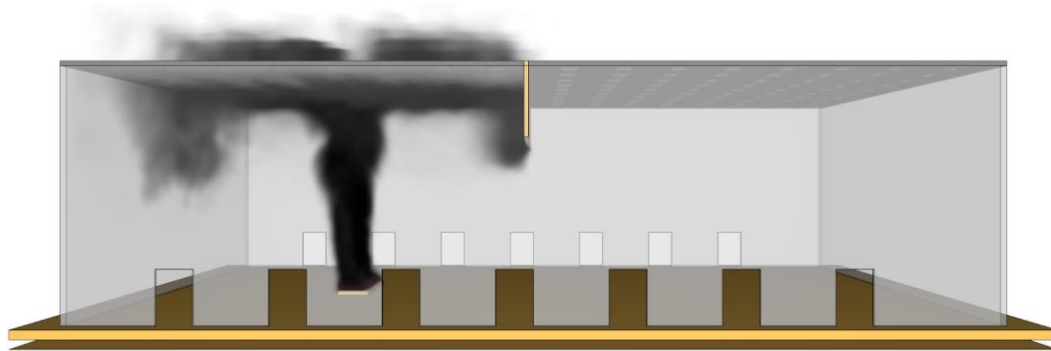
Al igual que ocurría en apartados previos, no hay cambios en la isosuperficie de 60°C de CFAST entre los segundos 360 y 540, esto se debe a que en ambos instantes la tasa de liberación de calor es la misma, la máxima (5 MW) y al no variar ningún parámetro de

entrada, CFAST entiende que es el mismo escenario. La isosuperficie calculada por FDS es muy parecida también a la del segundo 360, pero tiene ligeras variaciones porque es un modelo más preciso y fidedigno a la realidad.

4.4.3.4. Expansión del Humo

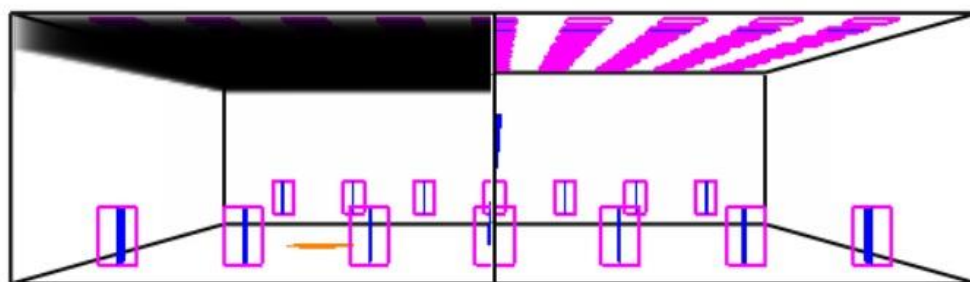
Para la distribución de humo a través de la nave, se estudiará igual que las anteriores veces, los 3 momentos que se han elegido de la simulación: $T=120s$, $T=360s$ y $T=540s$.

Para el segundo 120:



02:00,0

Figura 97: FDS - Dispersión del Humo en $T = 120 s$ - Muelles

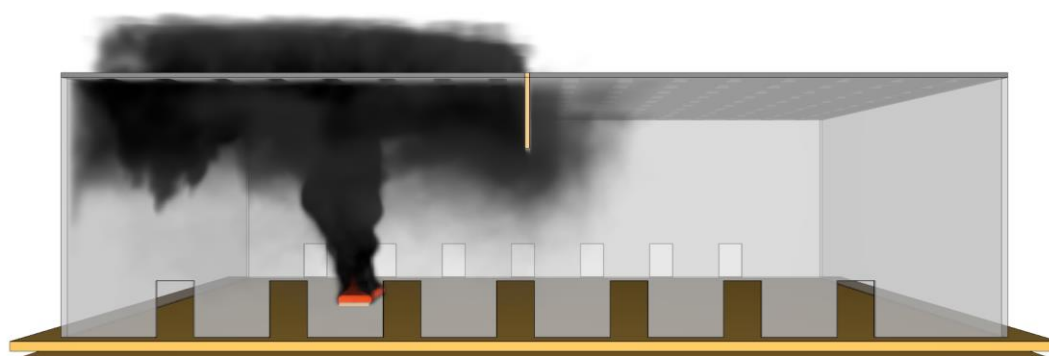


Time: 120.0



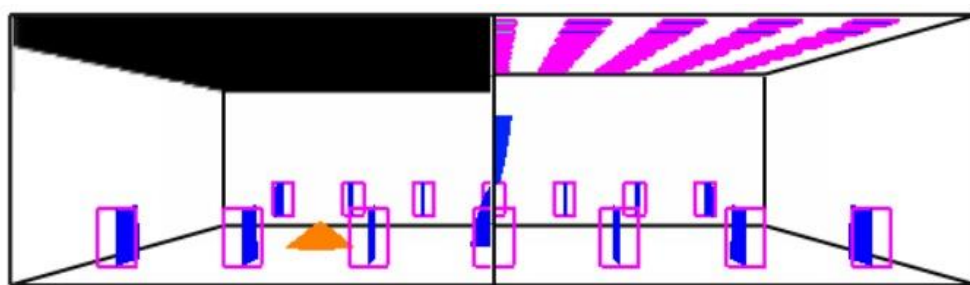
Figura 98: CFAST - Dispersión del Humo en $T = 120$ s - Muelles

Ambas imágenes son muy similares, la parte derecha de la nave no contienen nada de humo en ningún caso y el poco humo que hay se mantiene en la zona superior de la parte izquierda de la nave.



06:00,0

Figura 99: FDS - Dispersión del Humo en $T = 360$ s - Muelles

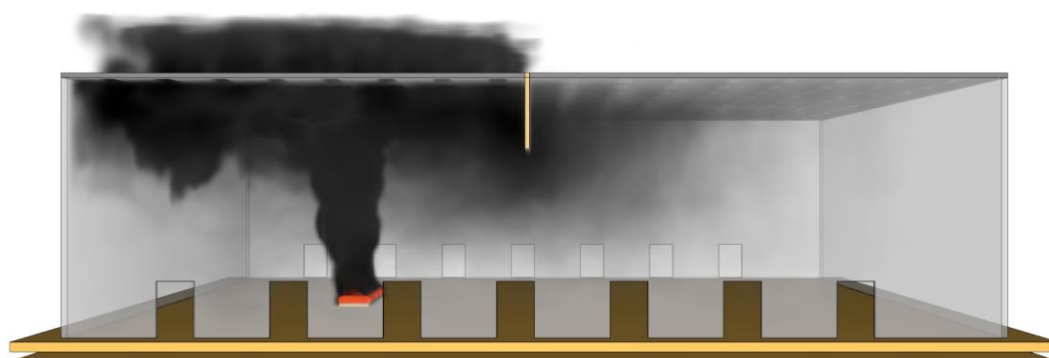


Time: 360.0



Figura 100: CFAST - Dispersión del Humo en $T = 360$ s - Muelles

En este instante de tiempo el incendio ha alcanzado su máxima tasa de liberación de calor (se puede apreciar como el fuego ha crecido respecto de las anteriores imágenes) y se ve como tanto en la simulación de FDS como de CFAST la densidad de humo ha aumentado. El humo se ha mantenido en la parte superior de la parte izquierda de la nave mientras es evacuado a través de los exutorios. Habrá que notar que para la evacuación del humo que los muelles de carga se encuentren operativos es de gran ayuda para evitar su expansión por la nave.



09:00,0

Figura 101: FDS - Dispersión del Humo en $T = 540$ s - Muelles

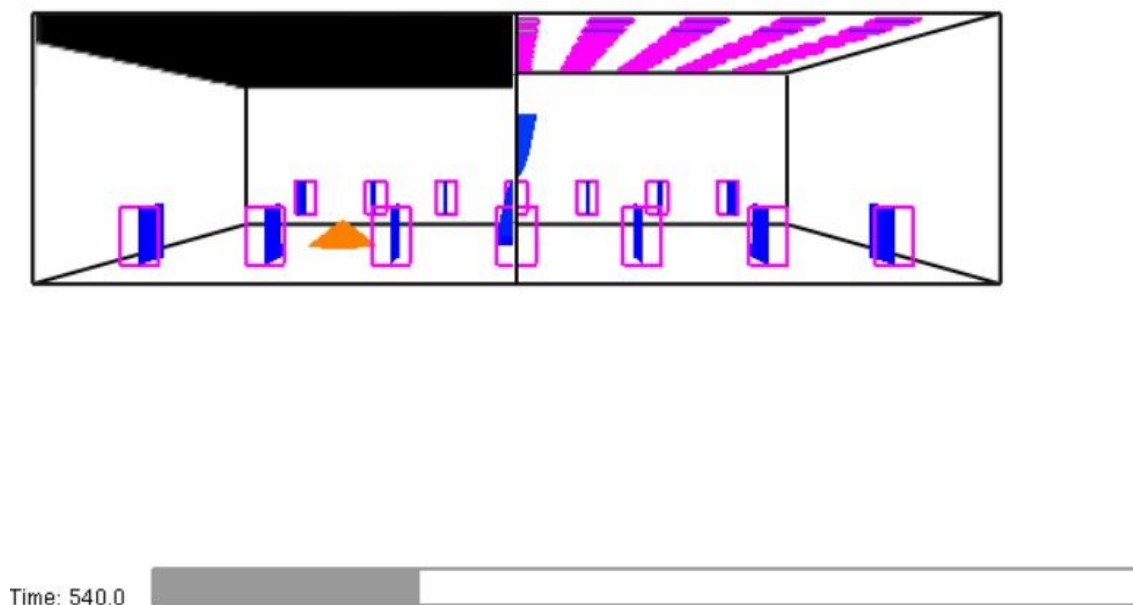


Figura 102: CFAST - Dispersión del Humo en $T = 540$ s - Muelles

Como ocurría en anteriores apartados, no se ve ninguna diferencia clara entre este instante y el anterior, al fin y al cabo, el escenario es muy parecido, el incendio no ha variado (por lo que se ha seguido generando la misma cantidad de humo) y los exutorios se han mantenido abiertos. De todas maneras, hay una clara diferencia existente en los 3 instantes entre las simulaciones de CFAST y FDS, el humo del penacho no se visualiza en CFAST mientras que en FDS sí, esto se debe a que CFAST muestra el humo que se encuentra almacenado en las zonas, no todo el humo presente en la nave. Evidentemente es más realista la simulación del FDS al mostrar el humo proveniente del incendio.

4.4.3.5. Resumen

En la comparación de resultados, se ha tenido en cuenta cuatro variables, las temperaturas en el plano $y=25$, la temperatura en el punto con coordenadas (20, 25, 13), la isosuperficie de 60°C y la dispersión del humo a lo largo de la simulación.

Respecto a las temperaturas en el plano $y=25$, se ve como las diferencias están en las formas geométricas de las superficies que marcan cada temperatura. En la simulación de FDS, la geometría es más compleja e irregular pero más precisa al mismo tiempo, mientras que en la simulación de CFAST, las formas son muy parecidas y únicamente varía el tamaño, esto hace que sean menos realistas. Pero partiendo de la base de que

CFAST es mucho más rápido a la hora de simular, podemos decir que da muy buenos resultados a la hora de predecir los planos longitudinales de temperatura.

La segunda variable, que mucho tiene que ver con la anterior, pero es un estudio distinto al ser la temperatura de un punto y no de un conjunto de puntos que formarían una de las superficies de las que hemos hablado antes. Se puede decir que CFAST realiza unas predicciones muy parecidas a FDS sobre todo cuando se analiza la tendencia de ambas curvas, sí que es verdad que las curvas no pasan por los mismos puntos (T, t), pero dentro de un intervalo de error, se pueden considerar curvas bastante parejas, sobre todo si consideramos en donde empiezan y donde terminan.

En las isosuperficies de 60°C la única diferencia entre la simulación FDS y CFAST es la forma de nuevo, esta imprecisión recurrente es debida a que los modelos tienen distintas maneras de llegar a sus respectivos resultados. CFAST crea un elipsoide alargado para representar esta isosuperficie, mientras que FDS es más fidedigno a la realidad puesto que al haber dividido todo el espacio en mallas de tamaño pequeño, va uniendo las mallas que estén a 60°C y esto crea una superficie más irregular pero más realista.

La última variable que se ha comparado entre las simulaciones de ambos modelos es la dispersión del humo, se ha podido comprobar que CFAST realiza una predicción muy similar a la de FDS. La gran diferencia está en la visualización, FDS representa todas las mallas que contienen algo de humo, mientras que CFAST representa las zonas que tienen humo, en nuestra simulación, únicamente es la capa superior de la parte izquierda de la nave.

5. Conclusiones

El propósito de este estudio ha sido verificar la eficacia del modelo CFAST en compartimentos de gran tamaño, lo cual se ha logrado comparando sus resultados con los generados por el modelo FDS. Se han llevado a cabo simulaciones en dos escenarios, ambos ubicados en una nave industrial de 50 x 50 x 14 m, dividida en dos partes iguales por una cortina de humos, y con una ventilación en la cubierta compuesta por 81 exutorios. La diferencia principal entre estos dos escenarios radica en que, en el segundo,

los muelles de carga de la nave estuvieron operativos durante toda la simulación, mientras que en el primero estuvieron completamente cerrados.

Para realizar la comparación de resultados, se decidió estudiar una serie de variables: plano longitudinal de temperaturas, isosuperficie de 60°C, temperatura en un punto específico del espacio, altura de la capa de humos, momento de activación del rociador (dependiente de la temperatura), y la dispersión del humo. CFAST y FDS arrojaron resultados muy similares en todas estas variables, excepto en el primer escenario, donde a partir del segundo 434, cuando se abren los exutorios de la cubierta, el modelo FDS logra evacuar todo el humo de la nave, mientras que CFAST predice que no se conseguirá evacuar todo el humo. Existen dos posibles explicaciones para esto: la primera, que los flujos a través de los exutorios de la cubierta se calculen incorrectamente en CFAST al ser de menor valor (no logrando evacuar todo el humo), o que configurar la apertura de los exutorios dependiente del tiempo provoque un error en el cálculo del flujo a través de ellos. Estas hipótesis surgen debido a que, en el segundo escenario, con muelles de carga operativos, CFAST realiza predicciones muy similares a las del FDS. Cabe señalar que, el hecho de que los muelles de carga estén operativos (abiertos), facilita la dispersión del humo, a diferencia del primer escenario.

También hemos podido confirmar que FDS es una herramienta mucho más precisa que CFAST. Al dividir todo el espacio de la simulación en pequeñas mallas, realiza cálculos de cada una de ellas y luego, mediante superposición, genera una simulación del espacio completo. Esto le permite a FDS generar superficies más irregulares, pero más precisas que las generadas por CFAST, que realiza los cálculos por zonas y comete más errores de precisión.

Por lo tanto, podemos concluir que CFAST realiza buenas predicciones en compartimentos grandes, aunque con ligeras variaciones en comparación con FDS. Es importante notar que el flujo a través de conductos en superficies tan grandes puede no ser tan preciso y puede cometer errores, pero en cuanto al resto de las variables, la precisión es razonablemente buena. La conclusión es que CFAST es un modelo extremadamente útil para realizar simulaciones en compartimentos grandes debido a su rapidez, y aunque sus predicciones pueden no ser tan precisas como las de FDS, ofrece un buen análisis inicial para entender la progresión del incendio que se está prediciendo.

6. Bibliografía

- [1] R. D. Peacock and P. A. Reneke. CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 3: Software Development and Model Evaluation Guide. Technical Note 1889v3, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2015. 4
- [2] H.W. Emmons and T. Tanaka. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Vent Flows. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 28
- [3] J. P. Holman. Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company, 1990. 33
- [4] R.L. Alpert. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Ceiling Jet Flows. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 33
- [5] W. F. Moss and G. P. Forney. Implicitly coupling heat conduction into a zone fire model. NISTIR 4886, National Institute of Standards and Technology, 1992. 35
- [6] R.L.P. Custer, B.J. Meacham, and R.P. Schifiliti. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Design of Detection Systems. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 37, 38
- [7] G.W. Mulholland. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, fourth edition, 2008. 38
- [8] J. A. Milke, F W. Mowrer, and P. Gandhi. Validation of a Smoke Detection Performance Methodology, Volume 3. Evaluation of Smoke Detector Performance. Technical report, The Fire Protection Research Foundation, Quincy, Massachusetts, October 2008. 39
- [9] R.W. Bukowski and J.D. Averill. Methods for Predicting Smoke Detector Activation. In Proceedings of the Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Research and Practice, Bridging the Gap, pages 64–72, Orlando, Florida, February 1998. National Fire Protection Research Foundation, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts. 39
- [10] D. Madrzykowski and R. Vettori. A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. NISTIR 4833, National Institute of Standards and Technology, 1992. 39

- [11] D. D. Evans. Sprinkler Fire Suppression for HAZARD. NISTIR 5254, National Institute of Standards and Technology, 1993. 39
- [12] International Organization for Standardization, CP 401 - 1214 Vernier, Geneva, Switzerland. Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires, iso 13571:2012(e) edition, September 2012. 39, 40
- [13] R. D. Peacock, P. A. Reneke, and G. P. Forney. CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide. Technical Note 1889v2, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2015. 41
- [14] J. H. Klotz, J. A. Milke, P. G. Turnbull, A. Kashef, and M. J. Ferreira. Handbook of Smoke Control Engineering. ASHRAE, Atlanta, GA, 2012. 47