



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de los tiempos de activación de los sistemas de
control de humos en almacenes logísticos

Autor: Jaime Bermejo Román

Director: Borja Rengel Darnaculleta

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Análisis de los tiempos de activación de los sistemas de control de humos en almacenes
logísticos”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 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.: Jaime Bermejo Román

Fecha: ...15.../ ...07.../ ...25...



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Borja Rengel Darnaculleta

Fecha: ...07.../ 25...





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de los tiempos de activación de los sistemas de
control de humos en almacenes logísticos

Autor: Jaime Bermejo Román

Director: Borja Rengel Darnaculleta

Madrid

ANÁLISIS DE LOS TIEMPOS DE APERTURA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE HUMOS EN ALMACENES LOGÍSTICOS

Autor: Bermejo Román, Jaime.

Director: Rengel Darnaculleta, Borja.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto, se investigan y se analizan los tiempos de activación de los sistemas de control de humos en naves industriales o almacenes logísticos. Para llevar a cabo las simulaciones se utilizará el software FDS (Fire Dynamics Simulator).

Palabras clave: control de humos, exutorios, simulación CFD, FDS, seguridad contra incendios

1. Introducción

Los sistemas de control de humos tienen como objetivo mantener condiciones aceptables de visibilidad y temperatura durante un incendio, facilitando la evacuación y la intervención de los equipos de emergencia. En grandes almacenes logísticos, la correcta activación de los exutorios es fundamental para evitar el colapso térmico y visual del recinto. Este trabajo parte de la necesidad de evaluar no solo el diseño de los sistemas, sino también su comportamiento real en función del momento y la forma de activación.

2. Definición del proyecto

El objetivo general de este trabajo es analizar comparativamente el rendimiento de sistemas de control de humos, en sus distintas configuraciones. Los tres aspectos diferenciadores elegidos para configurar el eje de análisis son: el momento y la forma de la activación térmica o temporizada, el diseño prescriptivo o alternativo y la agresividad del incendio ultrafast o medium. El principal fin es determinar cuánto los factores anteriormente mencionados influyen sobre la visibilidad por zonas del almacén, la temperatura general del recinto y los flujos y tiempos de extracción de humos a lo largo del desarrollo de un incendio

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Se han realizado simulaciones de un total de 12 escenarios distintos mediante el uso del software FDS (Fire Dynamics Simulator), la Ilustración siguiente ilustra uno de estos escenarios. Cada escenario se diferencia en el diseño alternativo o prescriptivo, el tipo de incendio ultrafast o medium y la forma de activación térmica o temporizada. Las simulaciones permiten observar cómo se desarrolla el incendio en términos de visibilidad a diferentes cotas, temperatura en el plano del rociador y flujo másico en los exutorios. Los resultados obtenidos se han comparado gráficamente y se han interpretado según los criterios técnicos de rendimiento de los sistemas de control de humos.

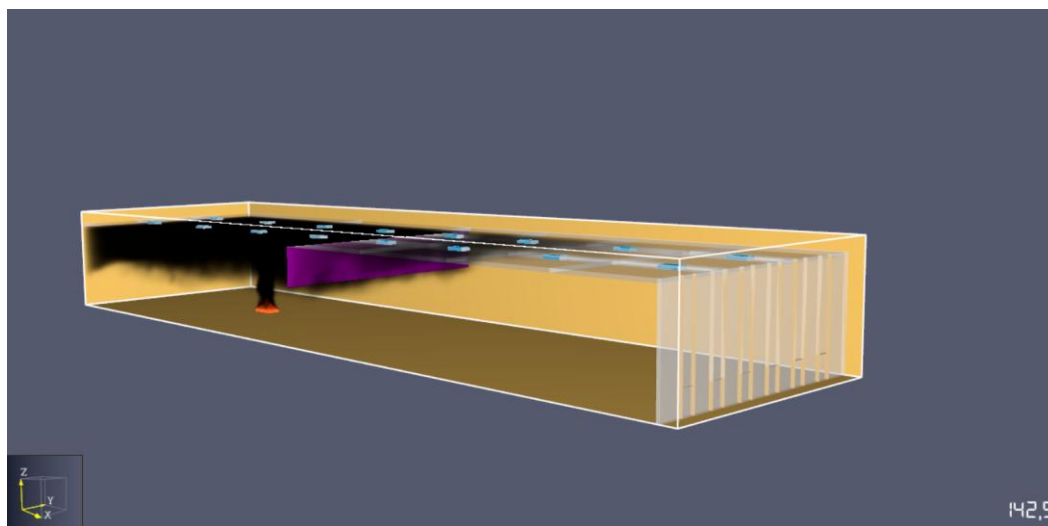


Ilustración: Simulación de incendio ultrarrápido prescriptivo

4. Resultados

Los escenarios con activación térmica no lograron activar nunca los exutorios, lo que resultó en un colapso completo de visibilidad. En el caso de los escenarios con activación temporizada a los 600 s, el sistema accionó el exutorio antes de llegar a condiciones peligrosas permitiendo una evacuación de gases calientes con caudales de entre 13-14 kg/s exutorio.

Los diseños prescriptivos, cuando actuaron correctamente, evacuaron mayor cantidad de humo en menor tiempo, aunque lo hicieron de forma más localizada. Los diseños alternativos mantuvieron mejores flujos más homogéneos por todo el recinto, aunque con caudales individuales algo menores. Por otro lado, el incendio ultrafast pone el sistema a prueba durante los primeros minutos; requiriendo respuestas rápidas para que el sistema no llegue a condiciones críticas. Se muestran en la siguiente tabla los resultados:

Caso	Tipo incendio	Activación	Tiempo apertura (s)	Caudal máx. (kg/s)	Caudal medio estabilizado (kg/s)
4PU-O2a	Ultrafast	600 s	742	~13 (8 exut.) ~6,5 (resto)	~11 (8 exut.), ~2,5 (resto)
4PU-O2b	Ultrafast	1200 s	1342	~14 (8 exut.) ~8,5 (resto)	~11 (8 exut.), ~2,5 (resto)
4PM-O2a	Medium	600 s	1100	~12 (8 exut.) ~5,5 (resto)	~9 (8 exut.) ~2 (resto)
4PM-O2b	Medium	1200 s	1700	~13 (8 exut.) ~7,5 (resto)	~9 (8 exut.) ~3 (resto)
4AU-O2a	Ultrafast	600 s	740	~12	~8
4AU-O2b	Ultrafast	1200 s	1340	~13	~8
4AM-O2a	Medium	600 s	1134	~11	~7
4AM-O2b	Medium	1200 s	1734	~12	~7

ANALYSIS OF THE ACTIVATION TIMES OF SMOKE CONTROL SYSTEMS IN LOGISTICS WAREHOUSES

Author: Bermejo Román , Jaime.

Supervisor: Rengel Darnaculleta, Jaime.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project focuses on the analysis of opening and closing times of smoke control systems in industrial buildings or logistics warehouses. Simulations were carried out using the FDS (Fire Dynamics Simulator) software.

Keywords: smoke control, smoke vents, CFD simulation, FDS, fire safety

1. Introduction

Smoke control systems aim to maintain acceptable visibility and temperature conditions during a fire, allowing for safe evacuation and the work of emergency services. In large logistics warehouses, the correct activation of smoke vents is key to avoiding thermal and visual collapse of space. This work addresses the need to evaluate not only the design of the systems but also their actual performance based on the timing and type of activation.

2. Project definition

The general objective of this project is to comparatively analyze the performance of smoke control systems in different configurations. The three variables selected as the focus of the analysis are: the moment and method of activation (thermal or timed), the design type (prescriptive or alternative), and the fire growth rate (ultrafast or medium). The main goal is to determine how these factors influence visibility in different warehouse zones, the general temperature of the space, and the extraction flow rates and timings throughout the fire development.

3. Description of the model/system/tool

Twelve different scenarios were simulated using FDS (Fire Dynamics Simulator), the next figure shows one of these setups. Each case differs in terms of design (alternative or prescriptive), fire type (ultrafast or medium), and activation method (thermal or timed). The simulations allow us to observe fire development in terms of visibility at

different heights, sprinkler plane temperature, and mass flow through the smoke vents. The results were compared graphically and interpreted based on technical performance criteria for smoke control systems.

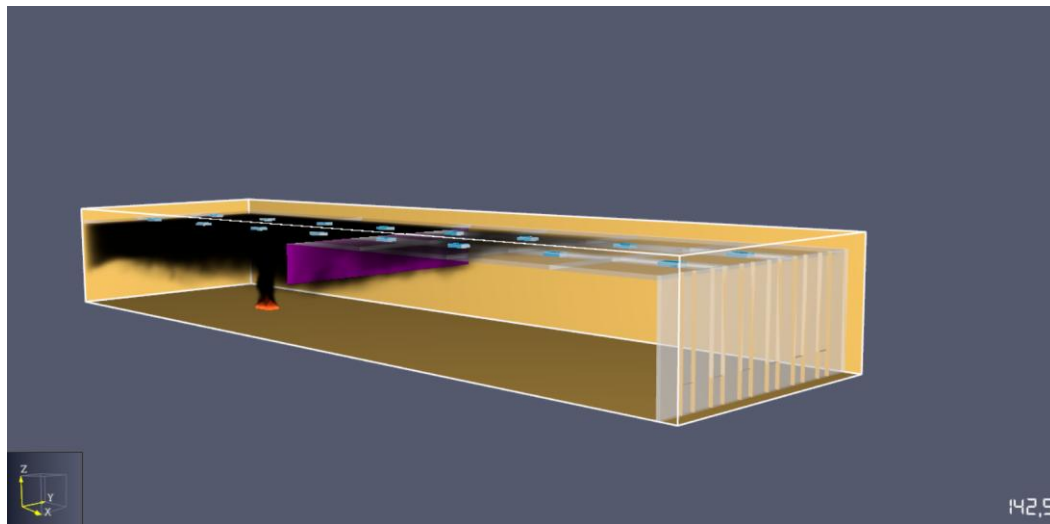


Figure: Simulation of ultrafast prescriptive fire

4. Results

In all thermally activated scenarios, the vents failed to open, leading to a complete loss of visibility and dangerous temperature rise. In contrast, in scenarios with timed activation at 600 s, the system successfully opened the vents before reaching critical conditions, allowing for hot gas evacuation with flow rates of 13–14 kg/s per vent.

Prescriptive designs, when operating properly, evacuated a larger volume of smoke in less time, although in a more localized manner. Alternative designs maintained more homogeneous flow across the entire space, albeit with slightly lower individual flow rates. Ultrafast fires stress the system during the first few minutes, requiring quick action to prevent unsafe conditions.

A table with representative results is shown below:

Caso	Tipo incendio	Activación	Tiempo apertura (s)	Caudal máx. (kg/s)	Caudal medio estabilizado (kg/s)
------	---------------	------------	---------------------	--------------------	----------------------------------

4PU-O2a	Ultrafast	600 s	742	~13 (8 exut.) ~6,5 (resto)	~11 (8 exut.), ~2,5 (resto)
4PU-O2b	Ultrafast	1200 s	1342	~14 (8 exut.) ~8,5 (resto)	~11 (8 exut.), ~2,5 (resto)
4PM-O2a	Medium	600 s	1100	~12 (8 exut.) ~5,5 (resto)	~9 (8 exut.) ~2 (resto)
4PM-O2b	Medium	1200 s	1700	~13 (8 exut.) ~7,5 (resto)	~9 (8 exut.) ~3 (resto)
4AU-O2a	Ultrafast	600 s	740	~12	~8
4AU-O2b	Ultrafast	1200 s	1340	~13	~8
4AM-O2a	Medium	600 s	1134	~11	~7
4AM-O2b	Medium	1200 s	1734	~12	~7

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	<i>XI</i>
<i>Índice de Ilustraciones</i>	<i>I</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>III</i>
Capítulo 1. Revisión Literaria	1
1.1 Definición y tipos de sistemas de control de humos	1
1.2 La evolución de las naves industriales	4
1.3 Incendios en naves industriales	10
1.3.1 Concepto de Incendio y combustión	10
1.3.2 Causas incendios en edificios industriales	13
1.3.3 Tipos de incendios en edificios industriales	14
1.4 Reglamento RSCIEI	16
Capítulo 2. Descripción de los sistemas de control de humo	25
2.1 Componentes del sistema	25
2.2 Norma de diseño del sistema UNE 23585	28
Capítulo 3. Sistema/Modelo Desarrollado	35
3.1 Condiciones de contorno y criterios de diseño	35
3.2 Caracterización del riesgo y escenarios de incendio	38
3.2.1 Tipología de incendios en almacenes logísticos	38
3.2.2 Parámetros representativos del incendio de diseño	39
3.2.3 Influencia del sistema de rociadores automáticos	40
3.2.4 Escenarios definidos para simulación	41
3.2.5 Herramientas de simulación	45
Capítulo 4. Análisis de Resultados	49
4.1 Enfoque del análisis	49
4.2 Comparativa de visibilidad	50
4.3 Comparativa Heat Release Rates y Temperaturas	55
4.4 Análisis del funcionamiento de los exutorios	61

4.4.1 tiempo de apertura	61
4.4.2 Análisis del flujo másico.....	63
Capítulo 5. Conclusiones.....	69
5.1 Visibilidad	69
5.2 Temperatura.....	70
5.3 Exutorios: activación y flujos.....	71
5.4 Conclusión general.....	71
Capítulo 6. Bibliografía.....	73
ANEXO I: gráficas e imágenes de los casos	75
ANEXO A: Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	122
ANEXO B: FM Datasheet 2020.....	126

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1:Sistemas de gestión de humos mecánicos. Fuente: NFPA (febrero 2021).....	2
Ilustración 2:Sistemas de contención de humos. Fuente: NFPA (febrero 2021).....	3
Ilustración 3:Presurización de salas y apertura de compuertas. Fuente: SODECA.	4
Ilustración 4:Gráfico de la variación de la productividad en el sector logístico entre los años 1990 y 2017. Fuente: Bureau of Transportation Statistics.	7
Ilustración 5:Mapa de Suelo Industrial de Castilla-La Mancha. Fuente: Gobierno Castilla-La Mancha (Julio 2020).....	8
Ilustración 6:Valor añadido bruto (millones de libras) en transportación y almacenamiento en Gran Bretaña desde 1990 hasta 2023. Fuente: Statista (2024).	9
Ilustración 7:Evolución semestral de la demanda online. Fuente: Marketing4eCommerce (marzo 2020).....	10
Ilustración 8:Triángulo del fuego. Fuente: elaboración propia.	11
Ilustración 9:Tetraedro del fuego con dos de sus vistas. Fuente: elaboración propia.	12
Ilustración 10:Proceso de Combustión. Fuente: Química del Fuego. Universidad de ingeniería Olavarría.	13
Ilustración 11:Establecimientos de Tipo A. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).	17
Ilustración 12:Establecimientos de Tipo B. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).	18
Ilustración 13:Establecimientos de Tipo D. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).	19
Ilustración 14:Establecimientos de Tipo E. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).....	20
Ilustración 15:Etapas de detección de un incendio. Fuente: VisionTIR.....	26
Ilustración 16:Componentes de un rociador. Fuente: MeyerFire (Junio 2017).....	28
Ilustración 17:Esquema de funcionamiento del sistema: cortinas canalizadoras, exutorios de evacuación de humos y exutorios que sirven para la entrada de aire. Fuente: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2012).....	30
Ilustración 18:Vista Axonométrica de un escenario modelo de diseño alternativo.	44
Ilustración 19:Vista Axonométrica de un escenario modelo de diseño prescriptivo.	45
Ilustración 20:Ejemplo de uso de una simulación FDS. Fuente: CYPE.	46
Ilustración 21:Distribución Humo a los 400s en el caso 7 (ultrarrápido).....	53

Ilustración 22:Distribución Humo a los 400s en el caso 7 (medio).....	53
Ilustración 23:Distribución Humo a los 400s en el caso 11 (medio).....	54
Ilustración 24:Distribución Humo a los 400s en el caso 11 (medio).....	55
Ilustración 25:HRR (kW) en función del tiempo en caso ultrarrápido.....	56
Ilustración 26:HRR (kW) en función del tiempo en caso Medium Fast	56
Ilustración 27:Temperatura Rociadores (°C) en caso Ultrafast prescriptivo O2a.	58
Ilustración 28:Temperatura Rociadores (°C) en caso Ultrafast prescriptivo O2b.	59
Ilustración 29:Temperatura Rociadores (°C) en caso Ultrafast prescriptivo O1.	60
Ilustración 30:Flujo másico en exutorios en el caso 3	66
Ilustración 31:Flujo másico en exutorios en el caso 9	67
Ilustración 32:Flujo másico en exutorios en el caso 6	68
Ilustración 33:SDG 3	122
Ilustración 34:SDG 11	123
Ilustración 35:SDG 12	123
Ilustración 36:SDG 13	124
Ilustración 37: FM Datasheet-2020	126

Índice de tablas

Tabla 1:Relación de la densidad de carga de fuego ponderada y corregida con el nivel de riesgo intrínseco. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).....	22
Tabla 2:Requisitos de las instalaciones de protección contra incendios de los establecimientos industriales (tipos A, B, C). Fuente: Cottess group (noviembre 2021).	23
Tabla 3:Requisitos de las instalaciones de protección contra incendios de los establecimientos industriales (tipos A, B, C). Fuente: Cottess group (noviembre 2021).	24
Tabla 4:Mínima altura limpia por encima de los recorridos de evacuación. Fuente: UNE 23585 (2017).	31
Tabla 5.Parámetros característicos del modelo de incendios para edificios de almacenamiento en altura (Tabla 1.4 en UNE 23585). Fuente: UNE 23585 (2017).	32
Tabla 6:Parámetros incendio de diseño Fuente: Elaboración propia.	40
Tabla 7: Casos de incendio.....	43
Tabla 8: Tiempo de activación de exutorios (s) y patrón de flujo.....	63
Tabla 9:Caudal máximo y medio en exutorios (kg/s).....	64

Capítulo 1. REVISIÓN LITERARIA

1.1 DEFINICIÓN Y TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL DE HUMOS

Los Sistemas de Control de Humos se utilizan para combatir y evacuar cualquier tipo de amenaza en forma de humo dentro de un edificio, y poder gestionar el movimiento del humo dentro del complejo, controlando su expansión y expulsándolos al exterior. El objetivo es tener las vías de escape libres de humo para no comprometer la integridad de seres humanos y facilitar la entrada de los equipos de emergencias y el posterior rescate.¹ Por tanto, los principales objetivos de los sistemas de control de humos son los siguientes.

El objetivo principal es proteger la vida humana manteniendo las vías de evacuación libres de humo para que las personas que se encuentren en el edificio puedan salir sin problema. Otro objetivo es la protección de la propiedad reduciendo los riesgos de daño por fuego o humo en la estructura del edificio y manteniendo las zonas de almacenaje de mercancías libres de humo. La parte humana también juega un papel importante en la extinción de incendios y humos, y es por ello hay que garantizar un ambiente con el menor riesgo para los equipos de emergencias, reduciendo la posible inhalación de humo y aumentando la visibilidad, siendo este punto el último objetivo.

Existen dos tipos de sistemas de control de humos catalogándolos por la extracción. Estos son el método mecánico y el de extracción natural. De forma mecánica se extrae el humo por medio de unos ventiladores cuyas hélices impulsan el humo al exterior del edificio. Estos sistemas son considerados la mejor forma de garantizar la salubridad del aire en los espacios contaminados. Los sistemas mecánicos requieren una inyección de aire externo para poder regular la presión en la sala en comparación a otras salas, y de esta forma no dañar la estructura del edificio u otras facilidades, como las puertas o accesos. La fuerza

¹ Prefire (2017)

ejercida por la presión en una puerta de la sala no puede superar los 133N puesto que complicaría la apertura de esta, y por ende la evacuación del personal en el interior o el acceso de los servicios de emergencias al interior.²

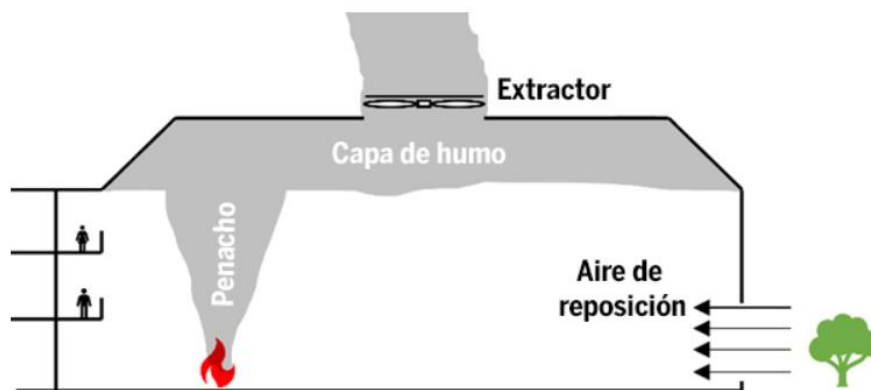


Ilustración 1: Sistemas de gestión de humos mecánicos. Fuente: NFPA (febrero 2021).

El método de extracción natural no hace uso de extractores ni turbinas, sino que aprovecha las características físicas del humo, es decir, la elevación del humo por su baja densidad y alta temperatura. Por tanto, se trata de mantener libre de humo la altura máxima que un ser humano podría ocupar. Esta extracción se lleva a cabo abriendo respiraderos, ventanas o conductos que lleven al exterior, dando lugar al efecto chimenea.³ Este tipo de extracción también requiere una inyección de aire ya que el efecto chimenea necesita una corriente de aire que lleve a hacer fluir el humo al exterior.

Otra forma de catalogar los tipos de sistemas de control de humos es por la contención. Se lleva a cabo la contención mediante la presurización de salas o lugares contiguos a la zona de humo para evitar que se propague fuera de esta. Los lugares que se suelen presurizar son donde es probable que se encuentren personas y rutas de evacuación como escaleras,

² O'Connor (2021)

³ DirectExtincter (2014)

ascensores y vestíbulos.⁴ La presurización se provoca mecánicamente con ventiladores. Estos aumentan la presión de una sala obligando al humo a desplazarse a una zona contigua de menos presión con el objetivo de contener el humo ahí.

Sin embargo, los sistemas de presurización diferencial no se suelen utilizar en almacenes logísticos. Debido al tamaño de los almacenes logísticos y al alto volumen de movimiento, sería imposible mantener una diferencia de presión efectiva. Además, los almacenes logísticos a menudo se mantienen abiertos y se encuentran sin ninguna partición, lo que hace imposible la instalación de tales sistemas. A parte de eso añade más dificultades al control del sistema y un costo mayor.

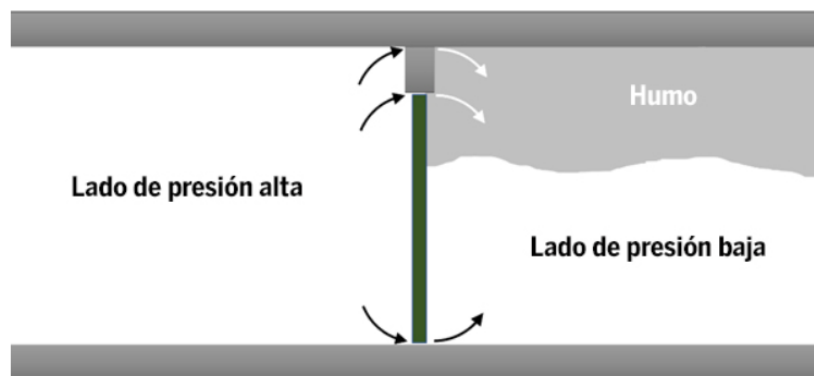


Ilustración 2: Sistemas de contención de humos. Fuente: NFPA (febrero 2021).

⁴ TotalFireProtection (2023)

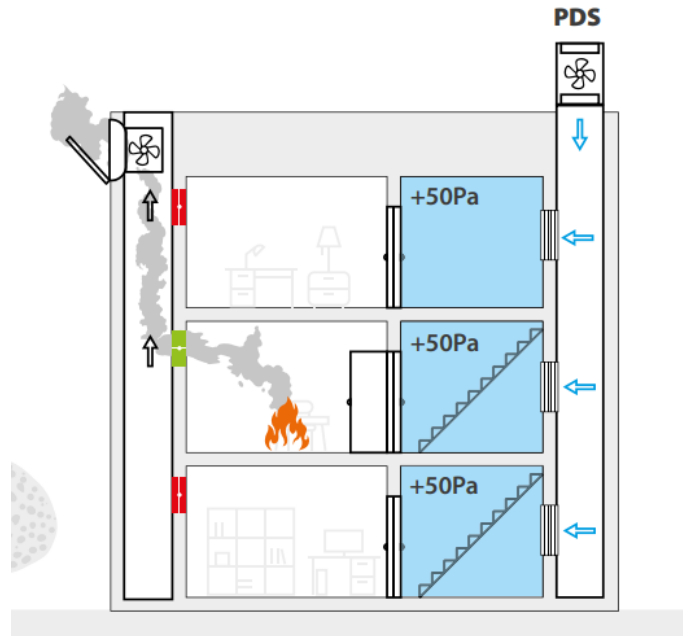


Ilustración 3: Presurización de salas y apertura de compuertas. Fuente: SODECA.

Estos sistemas se componen de ciertas partes que realizan la función. Los conductos dirigen el humo al punto de extracción y contienen paredes hechas de materiales resistentes a altas temperaturas. Los extractores son los componentes mecánicos que con el giro de las turbinas impulsan el humo a través de los conductos. Además, los conductos contienen unos delimitadores de sectores que tienen compuertas automatizadas que se abren y cierran para controlar el flujo de aire y humo en el conducto. Por último, los sensores, que pueden ser de cuatro tipos los más comunes: detectores de humo iónicos, ópticos, térmicos y de radiación.

1.2 LA EVOLUCIÓN DE LAS NAVES INDUSTRIALES

Las naves industriales juegan y han jugado un papel extremadamente importante en la logística, que es un sector muy importante en el progreso de la humanidad. Y es que en los últimos años está experimentando una evolución en potencia provocada por el auge de los

sistemas automatizados y tecnologías inteligentes como RFID, IoT e IA, además del crecimiento del comercio online.⁵

A mediados del siglo XX se dio la Segunda Revolución industrial también conocida por Revolución Tecnológica, que potenció el crecimiento de los descubrimientos científicos y producción en masa. La Revolución Tecnológica afectó repentinamente a estos sectores, y surgió la incógnita de donde almacenar tanto inventario, por lo que resultó en un impulso al sector logístico y concretamente el almacenamiento, transformándose a la digitalización. Con el objetivo de controlar el almacenamiento nació un sistema de gestión de almacenes o WMS (Warehousing Management System) llamado AS/RS (Automated Storage and Retrieval System).⁶ Su lógica era utilizar la catalogación de un artículo, además de su localización, cantidad y tamaño, para determinar donde almacenarlo y recogerlo y en que secuencia hacerlo.

Más tarde, en la década de los 60, la empresa Demag (ahora llamada Dematic) desarrolló el primer sistema automatizado de almacenamiento y recuperación, que es la base del sistema de gestión de almacenes que ahora se utiliza. Para demostrar la prospección en cuanto a optimización del almacenamiento, la empresa decidió implementarlo por primera vez en un almacén de un club de libros en Alemania. Este sistema tenía numerosas ventajas. En primer lugar, redujo mucho los costes de mano de obra, ya que el hecho de que los procesos fueran automatizados hizo que el trabajo manual fuera reemplazado. No solo los costes fueron menores por reducir la masa salarial, sino que los procesos automatizados mejoraron la eficiencia y precisión. Las técnicas ahora eran más ágiles y precisas, dando lugar a un sistema logístico más fluido, disminuyendo el error humano, y convirtiendo el flujo de mercancías más rápido.

La principal ventaja del Sistema de Almacenamiento y Recuperación fue la introducción de los altos pasillos de almacenamiento vertical. Estas grandes estanterías supusieron un acceso

⁵ NoatumLogistics (2023)

⁶ Hopstack (2023)

más rápido al stock y optimizaron el uso del espacio, y esto permitía almacenar más en una misma superficie de la nave. Esto se podía llevar a cabo gracias la creación de maquinarias destinadas al almacenaje en la década de 1940 (parecidas a las que conocemos hoy en día) y a que al principio de la década de 1950 nació el primer vehículo guiado automatizado diseñado (AGV) para cargar con mercancía pesada y alcanzar los estantes más elevados de los pasillos. ⁷ Es por ello por lo que los almacenes empezaron a constar de maquinaria y techos elevados, dando lugar a las naves verticalmente orientadas.

A principios de los setenta, con la aparición de los primeros ordenadores, se consolidó el primer WMS. La llamada Supply Chain dio un salto muy grande cuando un gigante de la logística como Walmart abrió su primer centro de distribución logística. Ya en 1974 la mayoría de los sistemas logísticos ya incorporaban el sistema de etiquetado por código de barras UPC, permitiendo almacenar los datos de cada producto de una forma digital. Ahora los almacenes eran más eficientes y cómodos, ya que con el nuevo sistema se podía saber cual era su inventario, donde está almacenado y que cantidad de producto hay disponible. Con los códigos de barras todo se convirtió más rápido ya que el producto se encontraba y se catalogaba más rápido.

En los 90, las naves ya empezaban a tener equipamiento y carruseles automatizados. Sin embargo, la cargas con las que se trabajaban empezaban a ser más pesadas, cada vez había más pedidos, el embalaje y la creación de tareas aumentaban; se tenía claro que el WMS (sistema de gestión de almacenes) tenía mucho potencial, pero había que hacerlo más robusto y contundente, es decir llevarlo a un nivel más alto en cuanto a complejidad. Introdujeron pistolas RFID y RF para que los trabajadores identificasen el inventario de forma más ágil. Otra característica de la segunda generación fue el Cross-Docking que fue una forma de agilizar el proceso de envío de un almacén a otro, haciendo simple llevar el inventario del punto donde se recibe al de envío.

⁷ InviaRobotics (2020)

Transportation and Warehousing Labor Productivity by Mode

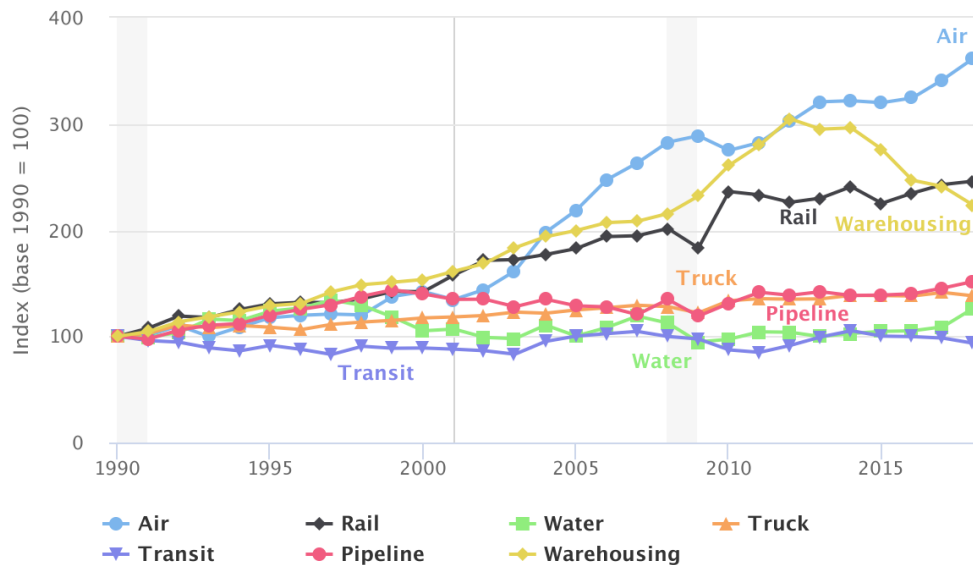


Ilustración 4: Gráfico de la variación de la productividad en el sector logístico entre los años 1990 y 2017. Fuente: Bureau of Transportation Statistics.

Durante esta década además se produce una transformación notable en el mercado de naves industriales, no solo porque incrementa el uso de los sistemas logísticos, sino porque los tipos de interés estaban muy bajos y la inversión es mayor. Se distinguen diferentes razones que explican esta metamorfosis en el mercado en los noventa: el auge de la logística, las nuevas promotoras de polígonos industriales, la conversión de las naves a un activo refugio y el incremento de las operaciones “sale and lease back”. Se destaca entre ellas el auge de la logística, que es la que ayudará a entender la evolución de las naves industriales.

La demanda de los almacenes logísticos aumentó, entre algunos motivos, por la globalización, cada vez más empresas buscaban su expansión de manera internacional lo que llevó a cambiar su estructura logística y pensar a lo grande. Previamente las redes y almacenes logísticas estaban pensadas para distribuir de una manera local, ahora necesitaban centros logísticos de gran tamaño y por ello grandes naves industriales. La expansión de las

grandes ciudades y la demanda de naves dio lugar a una escasez de suelo industrial que repercutió en la creación de ciudades logísticas en las áreas periféricas de las ciudades. En casos como Madrid, se expandieron los centros industriales hasta las provincias contiguas, y como se puede observar en la ilustración, las fronteras de Toledo y Guadalajara con Madrid constan de una notable cantidad de zonas de suelo industrial.⁸

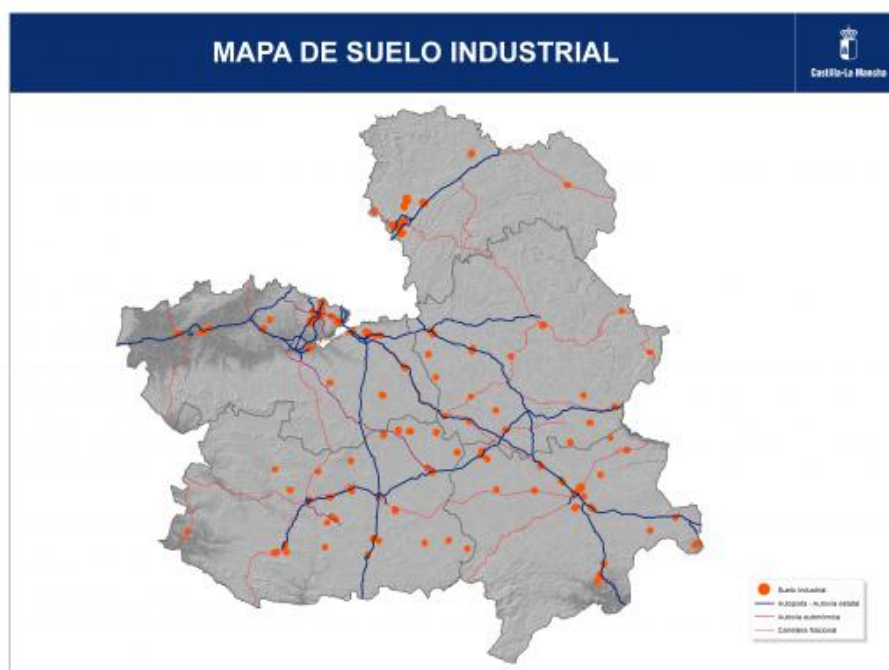


Ilustración 5: Mapa de Suelo Industrial de Castilla-La Mancha. Fuente: Gobierno Castilla-La Mancha (Julio 2020).

Otro motivo muy importante fue que dada la internacionalización de las empresas necesitaban recortar gastos. Para ello una recomendación de los expertos fue subcontratar empresas especializadas para llevar a cabo ciertas tareas, es decir, en este caso empresas de logística externas. Nacieron numerosas empresas que llevaban a cabo labores logísticas por lo que aumentó la demanda de todo tipo de edificio que pudiera utilizarse para un fin industrial. Las nuevas naves estaban pensadas para ser operadas por empresas diferentes ya

⁸ G.Bernardos (2007)

que ahora las empresas de logística eran subcontratadas, así que el mobiliario de las naves era muy general para ser reutilizado por la siguiente entidad que contratase los servicios, sin necesidad de que fuera difícil la adaptación al nuevo equipo. La rentabilidad y uso se ve reflejada con el aumento de valor añadido bruto tanto en transportación como en almacenamiento, como se observa en la ilustración 6.

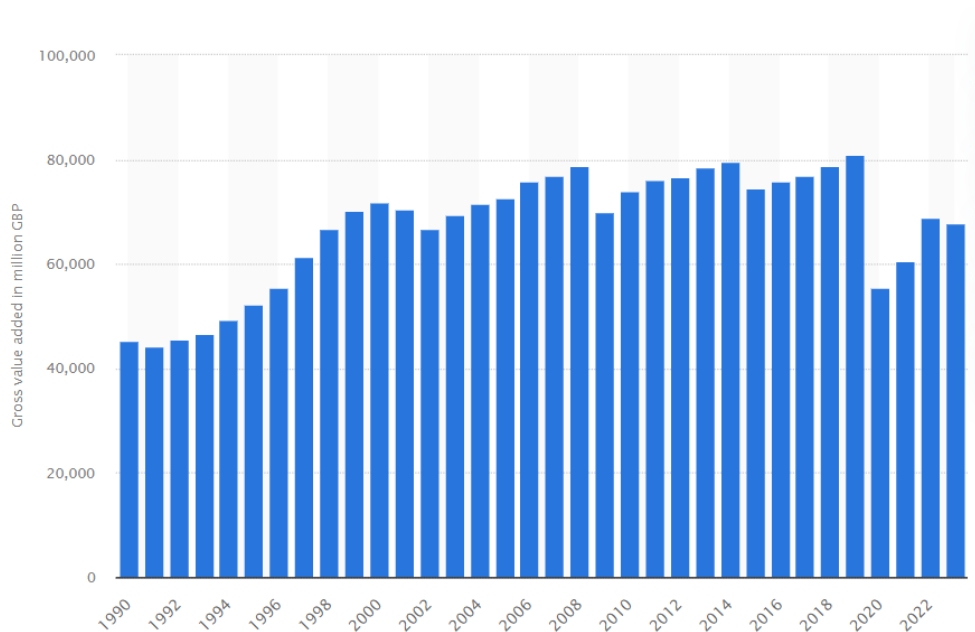


Ilustración 6: Valor añadido bruto (millones de libras) en transportación y almacenamiento en Gran Bretaña desde 1990 hasta 2023. Fuente: Statista (2024).

El último motivo, que explica este auge en la demanda de suelo industrial, fue la introducción del comercio electrónico, o más conocido como e-commerce. El producto se podía enviar directamente de los centros de distribución mayoristas hasta el comprador y así evitar tener que ir a la tienda o local que lo venda. Aunque empezó a aparecer en los años noventa, este motivo ha sido mucho más diferencial en la última década, y es un sector que no para de crecer. En 2020 y 2021 se dio el mayor aumento en cuanto a necesidades logísticas ya que surgió la pandemia de Covid-19, y el consumidor empezó a utilizar el servicio de e-commerce para evitar contagios o por confinamiento domiciliario, y después del confinamiento este sector no volvió a su progreso anterior, sino que nuevos clientes fueron

captados por esta forma de consumo. Esto se puede ver reflejado en que en el primer semestre de 2021 se invirtieron más de 1510 millones de euros en naves logísticas, casi lo mismo que durante todo el 2020.⁹ Además, se puede ver en la siguiente ilustración como creció el comercio online durante el primer semestre de 2020, con la ola de coronavirus.

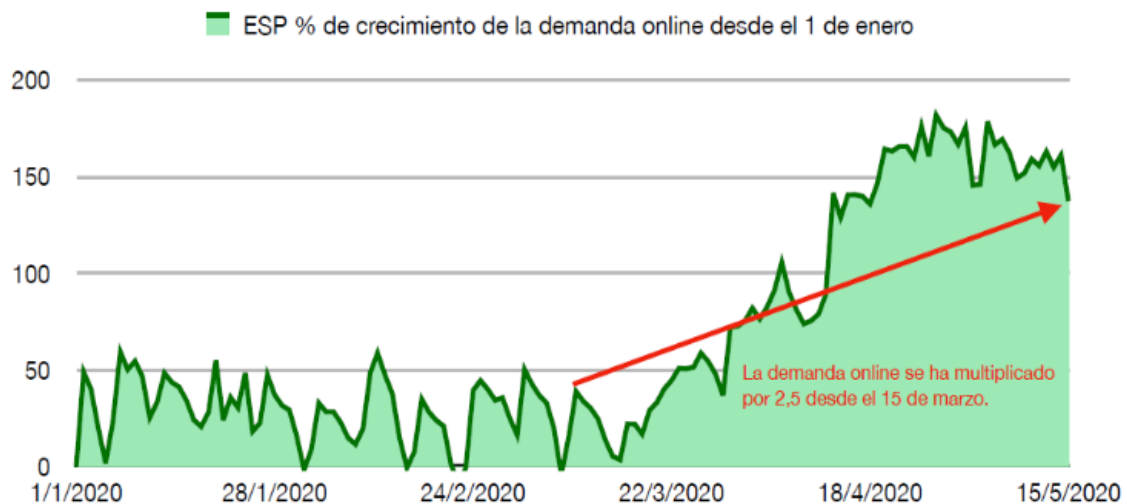


Ilustración 7. Evolución semestral de la demanda online. Fuente: Marketing4eCommerce (marzo 2020).

1.3 INCENDIOS EN NAVES INDUSTRIALES

1.3.1 CONCEPTO DE INCENDIO Y COMBUSTIÓN

Los incendios son una acumulación de fuego que se desarrolla sin control, los cuales se presentan de manera tanto gradual como instantánea, perjudicando así la salud humana, provocando pérdidas económicas o de bienes, o también dañando el medioambiente. El incendio se produce por combustión, que es la reacción química entre un combustible y un

⁹ Savills (2021)

agente oxidante, que junto a una fuente de energía producen este fenómeno.¹⁰ El agente oxidante, también llamado comburente, será la mayoría de las veces el aire, que se compone de un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno, pudiendo tratarse también de líquidos como agua oxigenada, aunque la combustión dependerá del combustible y de la cantidad de oxígeno que necesita este para que ocurra este fenómeno.



Ilustración 8: Triángulo del fuego. Fuente: elaboración propia.

Una vez creada la llama, habría que añadir un término más al triángulo para que el incendio suceda, convirtiéndolo en tetraedro, y este es llamado la reacción en cadena. Las llamas existirán si existen gases, y los gases producidos provocarán que el propio fuego se autoalimente creando así el incendio. Esto significa que el calor del fuego generará gases y estos a su vez más calor, provocando un círculo vicioso que no se apagará hasta que una de las caras del tetraedro no esté presente. La reacción en cadena es un término científico de la cual sus factores son principalmente del combustible. Dependiendo de la humedad, composición, estado o el tamaño la reacción en cadena variará. Un ejemplo con la madera puede ser que arda antes una pila de leña seca que el tronco entero húmedo y sin cortar.

¹⁰ Bioex (n.d.)



Ilustración 9: Tetraedro del fuego con dos de sus vistas. Fuente: elaboración propia.

Las materias orgánicas en los incendios se caracterizan del fenómeno de pirólisis, que es el desprendimiento de materias volátiles (producido por el calor) de los cuerpos sólidos que arden y forman las llamas. La combustión lenta sin llama (incandescente) también se puede dar, y ocurre también en sólidos orgánicos en casos como cigarrillos o brasas, y en el caso de un almacén industrial podría pasar con los palés. En los sólidos orgánicos la reacción en cadena dejará de ocurrir cuando deje de haber suspendidas sustancias volátiles, que esto puede ser por la falta de calor u oxígeno. Los líquidos, aunque muy parecido a los sólidos, desprenden unos vapores que al entrar en contacto con las llamas es absorbido, generando más y más vapor combustible que proviene del líquido, caso parecido a las sustancias volátiles de los sólidos. El calor radiante negro proveniente de las llamas produce sustancias llamadas especies activas que son fragmentos moleculares como hidrógeno libre y carbono libre que producen reacciones en cadena. El vapor entra en contacto con el aire, y las partículas arderán cuando hayan recibido, por difusión, el aire necesario (depende del líquido) y estarán en su límite superior de inflamabilidad. El límite inferior lo alcanzarán las partículas que lleguen al exterior de la llama, llegando a la oxidación, produciéndose el humo. Químicamente explicado, las uniones de carbono-hidrógeno (C-H) del hidrocarburo

se unen con el oxígeno, dándose uniones H-O y C-O, y el proceso se llama hidrooxidación. La siguiente ilustración trata de explicar el proceso.¹¹

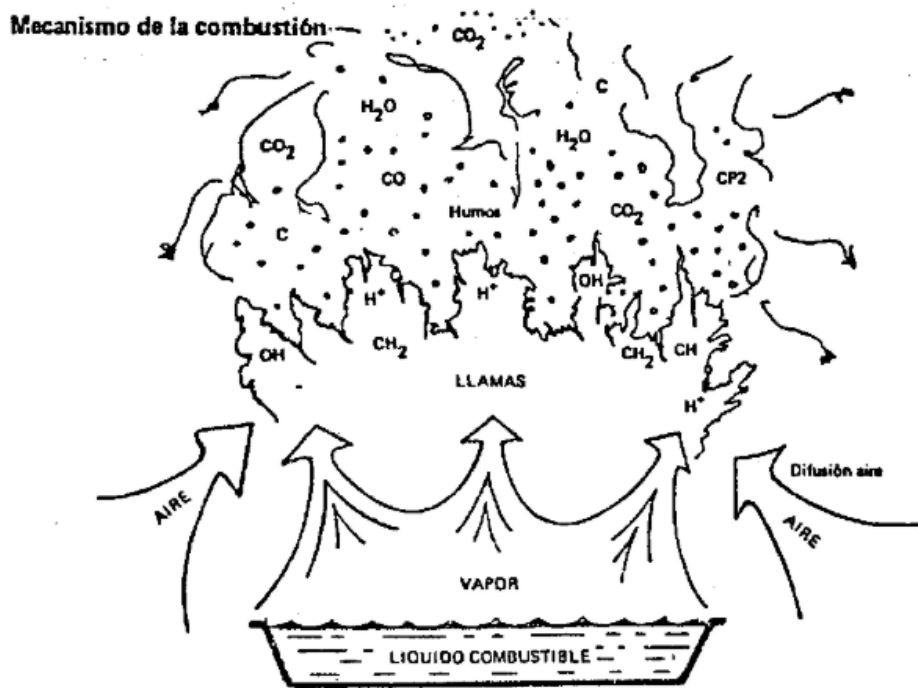


Ilustración 10:Proceso de Combustión. Fuente: Química del Fuego. Universidad de ingeniería Olavarría.

1.3.2 CAUSAS INCENDIOS EN EDIFICIOS INDUSTRIALES

Un incendio junto con la propagación de humos suele ser uno de los enemigos de las naves industriales. En el panorama industrial hay diferentes causas que puedan provocar un incendio en un edificio. El calentamiento de ciertas superficies como tuberías, hornos o calderas es una causa ya que pueden llegar a disipar una cantidad de calor peligrosa, por

¹¹ Universidad de Ingeniería Olavarría (n.d.)

tanto, es importante alejar de estas superficies otras con un punto de ignición específico bajo. El escape de chispas de equipos de trabajo, chimeneas o hornos puede prender objetos inflamables por la liberación de partículas incandescentes. En tercer lugar, hay algunos objetos con los que se trabaja a llama abierta, como incineradores o bombas de calor, que podrían llegar a descontrolarse, por lo que es importante un mantenimiento regular. En cuarto lugar, los cortocircuitos es un gran causante de incendios industriales, debido a instalaciones eléctricas con poco mantenimiento, sobreconsumos o excesos de flujo en la línea. En quinto lugar, los objetos engrasados o cubiertos de hidrocarburos son también una amenaza potencial, y es importante guardarlos en recipientes metálicos para no propiciar la combustión. En sexto lugar, la fricción de piezas de maquinaria que están mal lubricadas provoca sobrecalentamientos que producen chispas. Un ejemplo de que el salto chispas pueda ser un aliciente catastrófico, fue la explosión en el puerto de Beirut en 2020, ocasionado por una pequeña chispa que costó alrededor de 4 millones de dólares.¹² Por último, líquidos como solventes o gasolinas son inflamables, es decir, que sus vapores se incendian con facilidad, así que suelen ser manejados con precaución.¹³

1.3.3 TIPOS DE INCENDIOS EN EDIFICIOS INDUSTRIALES

Explicado ya el concepto de incendio y de cómo nace, se catalogan los incendios de algunas maneras. Una manera de diferenciar las clases de incendios en edificios industriales es por el tipo de material combustible, dividiéndose en incendios de clase A, B, C, D y F, como se explica en norma americana NFPA.¹⁴

Los incendios de clase A son aquellos que tienen materiales sólidos como combustible. Este tipo de incendios son los más comunes en entornos como el que estamos estudiando. Un ejemplo de los materiales combustibles sólidos más comunes son los siguientes: madera, papel, cartón, palés, tela, plásticos y productos orgánicos. Estos incendios, comentado

¹² BancoMundial (agosto, 2020)

¹³ Sinelec (n.d.)

¹⁴ O'Connor (2022)

anteriormente, producen brasas y pueden expandirse rápidamente si el almacén tiene muchos de los materiales mencionados. Estos incendios se pueden extinguir con agua o agentes espumosos.

Por otro lado, existen los incendios de clase B, los cuales involucran líquidos y gases inflamables, hidrocarburos y disolventes. Los líquidos pueden ser combustible, diesel, queroseno, etc., mientras que los gases pueden ser propano, butano o metano. El fuego producido es de extensas llamas y de alta propagación, y cabe destacar que no se apaga con agua ya que puede provocar su dispersión, provocando vapores inflamables y muy tóxicos para los humanos. El fuego debe ser apagado con extintores de espuma, polvo químico seco o dióxido de carbono, ya que estos sellan los vapores.¹⁵

Los incendios de clase C incluyen equipos eléctricos energizados, y estos pueden ser motores, transformadores, cuadros eléctricos, ordenadores y todo el cableado que involucre el equipo. El fuego proveniente de estos equipos puede provocar chispas, presentando arcos eléctricos y que pueden llevar a la electrocución. En estos incendios es importante no intentar disiparlos con agua ya que puede conducir la electricidad y por ende, aumentar el riesgo de electrocución. Los métodos de extinción suelen ser por medio de dióxido de carbono, que elimina el oxígeno y no conduce la electricidad, y de polvo químico seco. Cabe destacar que hay que apagar la corriente de los equipos antes de intentar apagar el fuego.

Otro tipo de incendio es el de clase D, que es aquel que engloba los metales combustibles como magnesio, sodio, titanio, etc. Son tipos de metales que son comunes en laboratorios, almacenes y en distintos fabricantes de metales. Los incendios que involucran estos metales son muy difíciles de extinguir y es muy complicado que el agua lo atenúe dado que esta reacciona con los metales haciendo el fuego más intenso. Se suele apagar utilizando extintores de polvo seco especial.

¹⁵ BIOEX

La clase K son aquellos incendios que incluyen aceites y grasas de cocina, y otros combustibles que se encuentren en cocinas. El agua tampoco es eficiente en la extinción puesto que puede crear una explosión de calor. Una medida eficiente es un extintor con agentes químicos húmedos y estos forman espuma que enfría el fuego. Existen otros incendios como químicos e incendios de polvo combustible.

1.4 REGLAMENTO RSCIEI

Para el TFG en cuestión, donde se trabaja con incendios en naves industriales, es importante conocer el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales, o bien el RSCIEI (se ha estudiado 2004, dado que la nueva versión del 2025 se publicó muy recientemente y es crucial tener en cuenta ciertos de los aspectos discutidos en él. En primer lugar, el RSCIEI es una normativa española que con el fin de garantizar la seguridad en establecimientos industriales por fuego rige ciertas normas técnicas. Garantizar la seguridad conlleva la propia prevención del incendio, proteger la integridad física de las personas, facilitar la evacuación y limitar o prevenir los daños a bienes o al entorno del establecimiento. Fue publicado en 2004 y su última actualización fue publicada en marzo de 2023.

El RSCIEI abarca temas desde la clasificación de los riesgos de incendio tanto por la cantidad de fuego como por la actividad llevada a cabo en el establecimiento, hasta los requisitos para la prevención de incendios. Contiene también el cómo dividir los sectores de incendio en zonas separadas, la instalación de los sistemas de detección y extinción y los propios sistemas de evacuación de humos, que son los que se van a testear. El reglamento lo debe aplicar todo establecimiento industrial en el país, tanto como nuevas instalaciones por ampliación de las anteriores como los establecimientos reformados. Cumplir el reglamento no solo es beneficioso por cumplir las directrices legales, sino que su cumplimiento disminuye el peligro de incendio en los entornos industriales y por tanto se reduce la

probabilidad de que ocurran accidentes graves. El decreto, además, incluye pasos y normas para concienciar y formar al personal encargado de los sistemas de control de incendios.

En primer lugar, el Anexo 1 del RSCIEI es una sección del decreto que es crucial ya que proporciona los criterios y directrices que se necesitan para la clasificación de los establecimientos industriales, que se entiende por este el edificio o zona del edificio donde se lleven a cabo tareas de carácter industrial. Se catalogan entonces de dos maneras: por su configuración y ubicación con relación a su entorno, y por su nivel de riesgo intrínseco.

En cuanto a la forma de clasificarlos por su configuración y ubicación en relación con su entorno se encuentran diferentes clases. Las siguientes recogen aquellos establecimientos que se encuentran en edificios:

- Tipo A: incluye naves aisladas del que es parte el establecimiento industrial en uso, y puede además tener otros establecimientos dentro del edificio ya sea para uso industrial u otro diferente. Son las que mayor riesgo de propagación presentan de las que se encuentran en la lista.

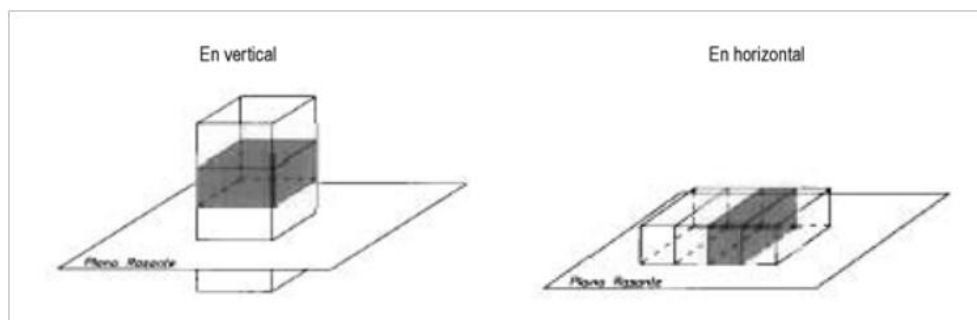


Ilustración 11: Establecimientos de Tipo A. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).

- Tipo B: la zona de uso industrial ocupa en su totalidad el edificio en el que se encuentra, pero también se tiene que cumplir que el edificio esté adosado a otro o bien esté a tres metros o menos de distancia de este, sin importar si este último es de uso industrial o no.

Es importante destacar que las exigencias correspondientes a las naves de Tipo B se cumplirán en los edificios adosados siempre que tengan techos independientes unos de otros y que se justifique que un hipotético colapso de la estructura contigua no repercuta en la nave en cuestión, sino se calificará de mayor riesgo.

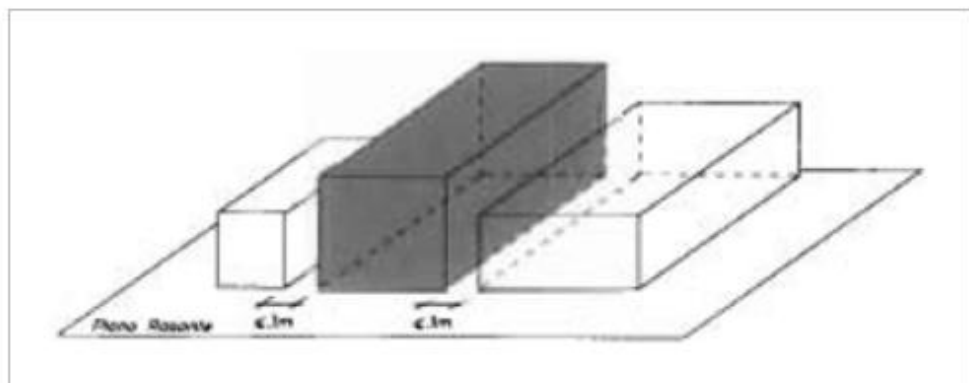


Ilustración 12: Establecimientos de Tipo B. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).

- Tipo C: las naves industriales de Tipo C también cumplen que el establecimiento ocupe todo el edificio, sin embargo, los edificios que colinden deberán estar a tres metros o más de la estructura del edificio. Para considerarlo de este tipo, el espacio entre naves deberá carecer de mercancías combustibles o cualquier sustancia que facilite la propagación de un posible incendio, y si no es así, se considerará edificio de mayor riesgo.

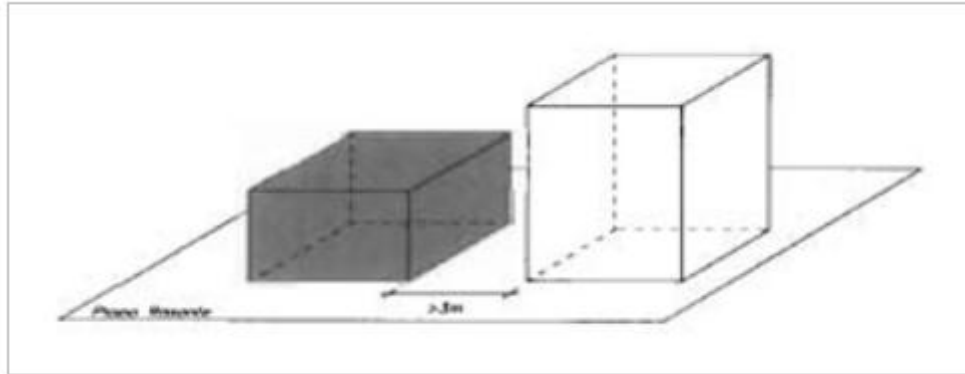


Ilustración 13: Establecimientos de Tipo C. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).

La siguiente forma de clasificarlos por su ubicación son las clases de naves que realizan su actividad industrial en un espacio abierto, y estas son las siguientes:

- Tipo D: los establecimientos industriales de Tipo D se encuentran en un espacio abierto, y pueden estar cubiertos por completo. Sin embargo, al menos una de las paredes laterales debe de estar completamente abierta.

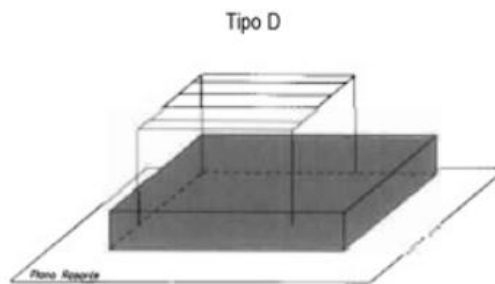


Ilustración 14: Establecimientos de Tipo D. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).

- Tipo E: la zona de uso industrial se encuentra en un espacio abierto cubierto hasta un 50% del área. Como los del anterior tipo, el edificio debe carecer de al menos una pared lateral. Estas son las naves con menor riesgo de propagación del fuego.

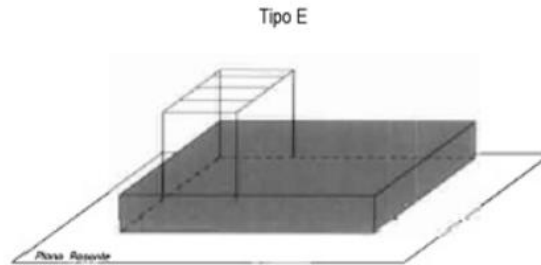


Ilustración 15: Establecimientos de Tipo E. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).

La otra forma de clasificar los establecimientos de uso industrial es por su nivel de riesgo intrínseco. Los niveles de riesgo intrínseco se basan en la carga de fuego, que es la cantidad de energía liberada en caso de incendio, la peligrosidad del inventario o del material manejado, que pueden ser materiales inflamables o combustibles, y el tipo de actividad realizada. Se explorará e informará de la importancia de evaluar el riesgo de nivel intrínseco, los criterios utilizados para catalogar por estas directrices, y las implicaciones de cada nivel de riesgo intrínseco.

Los establecimientos industriales se catalogarán como uno o varios de los Tipos anteriormente explicados. El nivel de riesgo intrínseco se asocia posterior a calcular la densidad de carga del fuego de un área de incendio que se calcula de la siguiente manera:

$$Q_s = \frac{\sum_i^i G_i q_i C_i}{A} R_a \quad \left(\frac{MJ}{m^2} \right) \text{ o } \left(\frac{Mcal}{m^2} \right)$$

Los parámetros son explicados a continuación:

Q_s = densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del sector o área de incendio, en MJ/m² o Mcal/m².

G_i = masa, en kg, de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector o área de incendio (incluidos los materiales constructivos combustibles).

q_i = poder calorífico, en MJ/kg o Mcal/kg, de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

C_i = coeficiente adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

R_a = coeficiente adimensional que corrige el grado de peligrosidad (por la activación) inherente a la actividad industrial que se desarrolla en el sector de incendio, producción, montaje, transformación, reparación, almacenamiento, etc.¹⁶

Existen otras formas de calcular la densidad de carga del fuego de una manera parecida a la anterior. Según los procesos que se lleven a cabo dentro del establecimiento, relacionados con el almacenamiento, hay una forma de calcular Q_s , ya que en estos se puede estar almacenando combustible (se tiene en cuenta la altura de donde se almacena), y para los procesos distintos a este hay otra, en ambos teniendo en cuenta la superficie de uso ocupada. También, se añaden en las fórmulas las áreas de superficies construidas para conseguir las densidades de carga de fuego en edificios industriales o conjuntos de zonas en diferentes edificios. Posteriormente se le asignará un nivel de riesgo intrínseco, o NRI, donde podremos distinguir tres niveles: riesgo bajo (RB), riesgo medio (RM) y riesgo alto (RA).

¹⁶ RSCIEI, Anexo I Parte 3

Nivel de riesgo intrínseco		Densidad de carga de fuego ponderada y corregida	
		Mcal/m ²	MJ/m ²
BAJO	1	$Q_s \leq 100$	$Q_s \leq 425$
	2	$100 < Q_s \leq 200$	$425 < Q_s \leq 850$
MEDIO	3	$200 < Q_s \leq 300$	$850 < Q_s \leq 1.275$
	4	$300 < Q_s \leq 400$	$1.275 < Q_s \leq 1.700$
	5	$400 < Q_s \leq 800$	$1.700 < Q_s \leq 3.400$
ALTO	6	$800 < Q_s \leq 1.600$	$3.400 < Q_s \leq 6.800$
	7	$1.600 < Q_s \leq 3.200$	$6.800 < Q_s \leq 13.600$
	8	$3.200 < Q_s$	$13600 < Q_s$

Tabla 1: Relación de la densidad de carga de fuego ponderada y corregida con el nivel de riesgo intrínseco. Fuente: RSCIEI (marzo 2023).

Las especificaciones y medidas de protección necesarias para su nivel de riesgo intrínseco y su superficie se encuentran en las siguientes tablas:

	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
	Producción, montaje, transformación, reparación, etc.	Almacenamiento	Producción, montaje, transformación, reparación, etc.	Almacenamiento	Producción, montaje, transformación, reparación, etc.	Almacenamiento
Sistema automático detección ⁽¹⁾	S ≥ 300 m²	S ≥ 150 m²	RM y S ≥ 2000 m² RA y S ≥ 1000 m²	RM y S ≥ 1000 m² RA y S ≥ 500 m²	RM y S ≥ 3000 m² RA y S ≥ 2000 m²	RM y S ≥ 1500 m² RA y S ≥ 800 m²
Sistema manual de alarma ⁽²⁾	S ≥ 1000 m² o no se requiere SADI	S ≥ 800 m² o no se requiere SADI	S ≥ 1000 m² o no se requiere SADI	S ≥ 800 m² o no se requiere SADI	S ≥ 1000 m² o no se requiere SADI	S ≥ 800 m² o no se requiere SADI
Sistema de hidrantes exteriores ⁽³⁾	Cuando lo exijan las disposiciones que regulan actividades industriales sectoriales o específicas, de acuerdo con el art. 1 del Reglamento.					
	RM y S ≥ 300 m² RB (excepto si en la tabla 3 de la NTP 832 aparece como RB 1) y S ≥ 1000 m²		RA y S ≥ 1000 m² RM y S ≥ 2500 m² RB y S ≥ 3500 m²		RA y S ≥ 2000 m² RM y S ≥ 3500 m²	
Extintores ⁽⁴⁾	Se instalarán en todos los sectores de incendio del establecimiento industrial. Dotación y eficacia mínima: para fuegos tipo A estará en función el NRI, y para fuegos tipo B en función del volumen máximo de combustible líquido en el sector, según tablas 3.1 y 3.2 del RD. Distribución: será tal que el recorrido horizontal desde cualquier punto del sector hasta el extintor ≤ 15 m.					
BIE ⁽⁵⁾	S ≥ 300 m²		RA y S ≥ 200 m² RM y S ≥ 500 m²		RA y S ≥ 500 m² RM y S ≥ 1000 m²	
Columna seca	En establecimientos de RM o RA y altura de evacuación ≥ 15 m					
RAA ⁽⁶⁾	RM y S ≥ 500 m²	RM y S ≥ 300 m²	RA y S ≥ 1000 m² RM y S ≥ 2500 m²	RA y S ≥ 800 m² RM y S ≥ 1500 m²	RA y S ≥ 2000 m² RM y S ≥ 3500 m²	RA y S ≥ 1000 m² RM y S ≥ 2000 m²

Tabla 2: Requisitos de las instalaciones de protección contra incendios de los establecimientos industriales (tipos A, B, C). Fuente: Cottes group (noviembre 2021).

	Producción, montaje, transformación, reparación, etc.	Almacenamiento
Sistema manual de alarma ⁽²⁾	S ≥ 1000 m ²	S ≥ 800 m ²
Sistema de hidrantes exteriores ⁽²⁾	Cuando lo exijan las disposiciones que regulan actividades industriales sectoriales o específicas (art. 1 del Reglamento).	
	RM y RA y S ≥ 5000 m ² RB, RM y RA y S ≥ 15.000 m ²	
Extintores ⁽⁴⁾	Se instalarán en todas las áreas de incendio del establecimiento industrial, excepto en aquellas con RB 1. Dotación y eficacia mínima: para fuegos tipo A estará en función del NRI, y para fuegos de tipo B en función del volumen máximo de combustible líquido en el sector, según tablas 3.1 y 3.2 del RD. Distribución: será tal que el recorrido horizontal, desde cualquier punto del sector hasta el extintor ≤ 25 m.	
BIE ⁽⁵⁾	RA y S ≥ 5000 m ²	

S: Superficie total construida del sector de incendio del establecimiento industrial / SADI: Sistema Automático de Detección de Incendio

(1) Cuando es exigible la instalación de un sistema automático de detección de incendio y las condiciones del diseño (Anexo III, punto 1) den lugar al uso de detectores térmicos, podrá sustituirse por rociadores automáticos de agua.

(2) Cuando se requiera la instalación de un sistema manual de alarma de incendio, se situará, en todo caso, un pulsador junto a cada salida de evacuación del sector de incendio, y la distancia a recorrer desde cualquier punto hasta alcanzar un pulsador será ≤ 25 m.

(3) Cuando se requiera un sistema de hidrantes, la instalación debe proteger todas las zonas de incendio que constituyen el establecimiento industrial.

(4) Podrá justificarse su no instalación en las zonas de los almacenamientos operados automáticamente, en los que la actividad impide el acceso de personas.

(5) Las BIE podrán ser de 25 mm en establecimientos con RB y de 45 mm para RM y RA. En establecimientos de RB y RM el tiempo de autonomía será 60 min para una simultaneidad 2; en establecimientos de RA el tiempo de autonomía será 90 min para una simultaneidad 3. La presión en boquilla estará comprendida entre 2 y 5 bar.

(6) Cuando es exigible la instalación de rociadores automáticos, concurrentemente con un sistema automático de detección que emplee detectores térmicos, de acuerdo con las condiciones de diseño (Anexo III, punto 1) quedará cancelada la exigencia del sistema de detección.

Tabla 3: Requisitos de las instalaciones de protección contra incendios de los establecimientos industriales (tipos A, B, C). Fuente: Cottes group (noviembre 2021).

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE HUMO

2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA

Se encuentran diferentes componentes en los sistemas de control de temperaturas y evacuación de humos (SCTEH), los cuales ayudan a cumplir el objetivo de estos sistemas. Los SCTEH están diseñados para controlar, dirigir y evacuar el humo generado en un incendio. Los componentes principales del sistema incluyen los exutorios en cubierta, las compuertas, los detectores y los rociadores (o sprinklers), cada uno destacando por aportar diferentes funciones al sistema.

Los detectores de incendios son sistemas electrónicos que sirven para avisar de la existencia de un incendio. Los detectores tienen como objetivo avisar en la fase precoz del incendio al personal encargado para que de esta manera sea más fácil prevenir su expansión. Se distinguen varios tipos de detectores.

Los detectores ópticos utilizan diodos emisores de luz que iluminan el área del detector donde se analiza el humo y se utiliza en zonas donde sea probable una generación rápida de humo. Los detectores de temperatura son los térmicos y termovelocimétricos. Los térmicos detectan altas temperaturas creando una señal cada vez que se sobrepase la temperatura definida y suelen ser termómetros o termopares. Los termovelocimétricos contienen un termistor que detecta los cambios de temperatura gracias a la variación de la resistencia interna, creando un voltaje que si cambia mucho activará la señal. Es muy común utilizar la combinación de ambos detectores térmicos y ópticos (óptico-térmico). Existen también detectores de llamas, que mediante tecnología ultravioleta (UV), infrarrojos (IR) o ambos,

detectan radiación infrarroja en el caso de IR o luz ultravioleta emitida por las llamas, en la siguiente ilustración se puede observar las etapas de detección.¹⁷

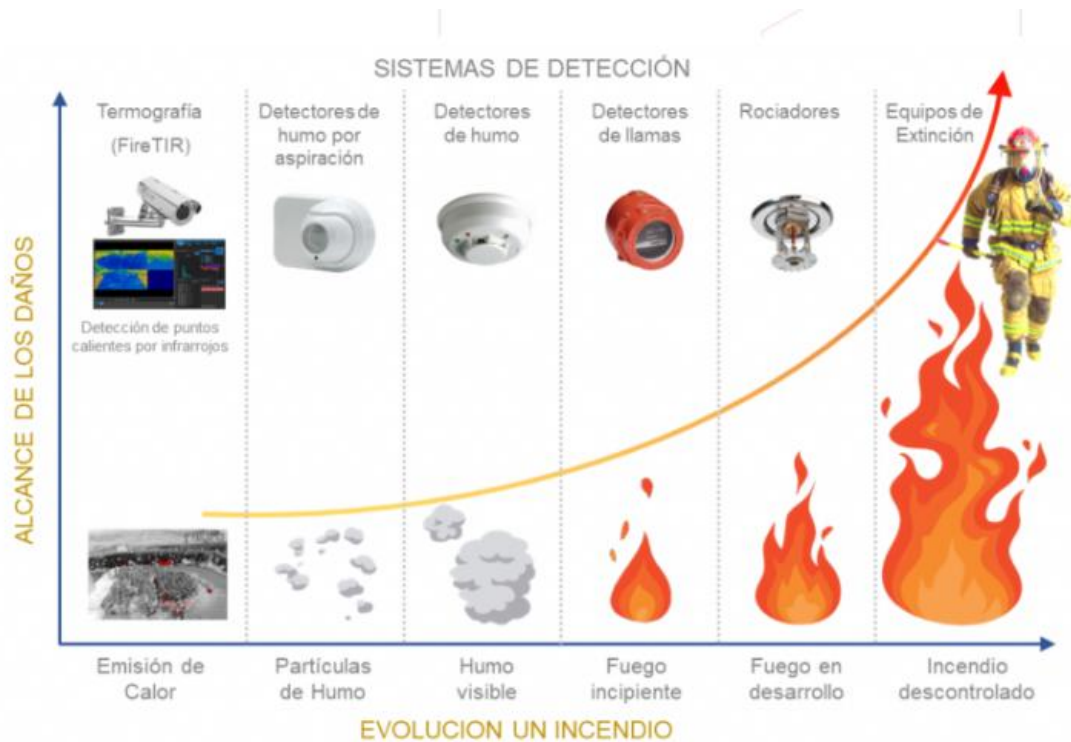


Ilustración 16: Etapas de detección de un incendio. Fuente: VisionTIR.

Los exutorios o aireadores son dispositivos de apertura y cierre que reciben una señal automática para que posteriormente evacúe el humo verticalmente hacia el exterior y de esta forma controlar la temperatura y disminuir la densidad del humo en el edificio. Existen varios tipos de exutorios, pero todos tienen en común el funcionamiento. En caso de incendio, las compuertas se abrirán o bien de forma manual mediante el accionamiento de una palanca o bien mediante un accionamiento automático cuando recibe la señal de los

¹⁷ Pefipresa (2022)

detectores. Los mecanismos utilizados pueden ser neumáticos (por medio de CO₂ o aire) o eléctricos.

En caso de fallo, los aireadores suelen incorporar en el interior un dispositivo auxiliar que funciona como detector térmico de emergencia por si el mecanismo no ha recibido la señal o hubiera cualquier otro problema. En cuanto a normativa, están establecidas ciertas especificaciones en la norma UNE EN 12101-2. Durante un incendio puede darse una racha de viento que cierre de forma repentina el exutorio provocando el estanque del humo dentro del edificio, por lo que se estableció en esta norma que las compuertas abiertas deben resistir vientos laterales de 10 m/s. En el caso de que los exutorios no estén en el tejado y estén en la fachada, se deberá instalar un exutorio adicional en la fachada opuesta por cada exutorio colocado. Los exutorios se pueden dividir en tres grupos:

- Exutorios tipo lamas o rejillas
- Exutorios tipo claraboya o lucernario
- Exutorios de ventana, mediante el uso de bisagras

Los rociadores o sprinklers son otro elemento crucial en el SCTEH y que actúan en la sofocación de las llamas. Son unas boquillas colocadas en el techo que liberan el líquido en la zona de las llamas y son el elemento final del sistema de tuberías que contienen agua a presión, aunque también son el primer elemento si se cuenta con que van ligados al sistema de detección de humo o de altas temperaturas. El detector es un objeto termosensible que cuando hay altas temperaturas el líquido del interior se expande por el calor y libera el tapón que impedía el agua correr. Hay diferentes tipos de líquidos que se activan a diferentes temperaturas como se puede observar en la siguiente figura. Antes de salir el agua, esta choca con un deflector que dispersa el agua para conseguir un mayor radio de actuación, aunque existen diferentes tipos de deflectores dependiendo de la zona donde se va a situar. En edificios residenciales, por ejemplo, se colocan deflectores que hagan que el agua apunte a las paredes.

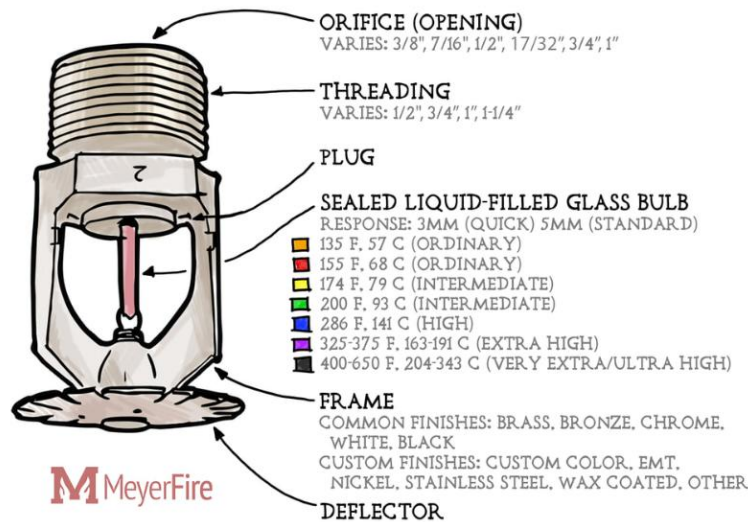


Ilustración 17: Componentes de un rociador. Fuente: MeyerFire (Junio 2017).

En resumen, los detectores, exutorios, y rociadores son componentes esenciales de un sistema de humos bien diseñado. Cada uno cumple una función específica que, en conjunto, garantiza un ambiente más seguro y controlado durante una emergencia de incendio.

2.2 NORMA DE DISEÑO DEL SISTEMA UNE 23585

La norma UNE 23585 es un estándar fundamental para la seguridad contra incendios en edificios. El objetivo principal es establecer las normas y especificaciones para el diseño, la instalación y el mantenimiento de los sistemas de control y evacuación de humos, con el fin de proteger de manera significativa a las personas y los bienes en situaciones de emergencia.

Esta norma se enfoca en los sistemas que controlan el movimiento de humos producidos durante un incendio, un componente crucial para mantener condiciones seguras en las vías de evacuación y facilitar la operación de los equipos de emergencia. La UNE 23585 establece las pautas para diseñar sistemas de extracción y ventilación de humos eficientes,

asegurándose de que se adapten a las características particulares de cada edificio, como su uso, tamaño y ocupación.

Al seguir esta normativa, se asegura que los sistemas de control de humos funcionen correctamente en caso de incendio, ayudando a reducir la propagación del humo y el calor, lo que es crucial para salvar vidas y reducir daños materiales. En este trabajo se va a focalizar el interés en el cálculo de la altura de las cortinas de humo y del número de exutorios en cubierta, y para ello se deberán calcular ciertos parámetros y especificar algunas directrices que se muestran a lo largo de este apartado.

En primer lugar, las cortinas de humo son barreras que se utilizan como separadores con el objetivo de sectorizar y encerrar el humo en una zona. Hay dos ventajas significantes respecto a estas cortinas, la primera que estas sirven como cortafuegos, dejando zonas libres de humo, y la segunda, que orientan el humo hacia los exutorios, facilitando la evacuación de humos y los gases de combustión. La bolsa de humo formada por la cubierta y las cortinas se denomina “depósito de humo”. Se define en la norma UNE 23585:2017 un depósito de humos como: “la zona dentro de un edificio u obra de ingeniería limitada o bordeada por cortinas de humo o por elementos estructurales de modo que retienen una capa de humos térmicamente flotante en el caso de un incendio”.

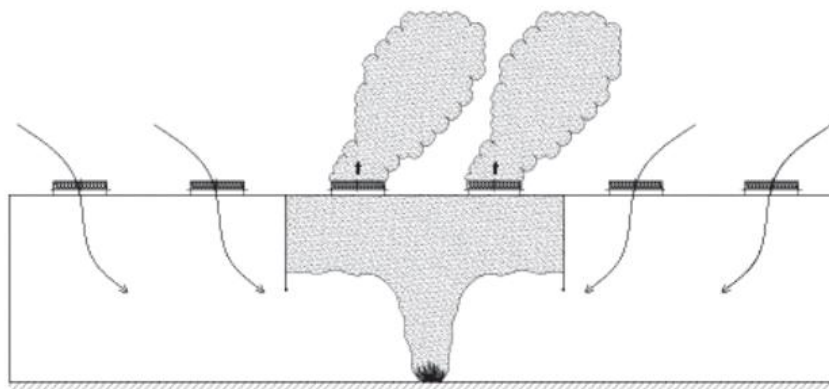


Ilustración 18: Esquema de funcionamiento del sistema: cortinas canalizadoras, exutorios de evacuación de humos y exutorios que sirven para la entrada de aire. Fuente: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2012).

La norma UNE 23585 obliga a que estos depósitos no ocupen un máximo de 2000 m^2 de área cuando se utilizan aireadores naturales, y, por el contrario, cuando se utiliza un sistema de extracción de humo mecánico, está establecido que el área máxima del depósito sea de 2600 m^2 . Se procura que no sea demasiado grande el depósito porque el enfriamiento de la bolsa de humo puede dar lugar a una pérdida de flotabilidad del humo, provocando su descenso. Esto provoca una disminución de la visibilidad en la zona y de la eficacia de los aireadores. Otro requisito que debe cumplir es que la longitud máxima debe ser de 60 m en su eje mayor. Según la norma, el depósito no debe ser tan largo por el efecto psicológico negativo sobre las personas que se mueven a través del aire limpio que se encuentra debajo de la bolsa de humo.¹⁸

Es preciso calcular también la altura libre de humos (Y), definida según la norma como la altura desde la base del incendio, que suele ser el suelo, hasta la base de la bolsa de humo. Según la norma, en el apartado 6.2, se especifican los distintos valores de la altura libre de humos, que dependerán del fin primordial de los sistemas de evacuación de humos, que puede ser tanto para evacuar a personas o para proteger el stock del almacén. En el caso de que la prioridad sea salvar vidas humanas, se establece en la siguiente tabla los valores de mínimas alturas para cada tipo de edificio.

¹⁸ UNE 23585 (2017)

Tipo de edificio	Altura mínima (Y) m
Edificios pública concurrencia	2,5
Edificios de uso industrial	2,5
Aparcamientos de coches	2,5 o 0,8.H (Cualquiera que sea menor)

Tabla 4: Mínima altura limpia por encima de los recorridos de evacuación. Fuente: UNE 23585 (2017).

El SCTEH no debe tener una altura desde la base del incendio a la base de la capa de humos menor que un décimo (1/10) de la altura de suelo a techo. Además, no debe tener una altura desde la base del incendio a la base de la capa de humos más de nueve décimos (9/10) de la altura desde la base del incendio al techo. En el caso de que la temperatura de la capa de humos sea de menos de 50°C por encima de la temperatura ambiente se deberá añadir 0,5 metros más a la altura libre. En el caso de que haya almacenamiento, deberá haber 0,5 metros de altura libre por encima de este.

Para almacenamientos por estibas o estanterías, y locales de venta con superficie mayor de 1000 m² con productos almacenados a más de 5 m de altura si el local cuenta con rociadores o 2.4 m si no cuenta con ellos, se debe usar la tabla X como procedimiento de cálculo. La siguiente tabla muestra las ecuaciones clave y definiciones para las determinadas áreas del incendio, perímetros del incendio y flujo de calor liberado, teniendo en cuenta el tipo de sprinklers utilizados.

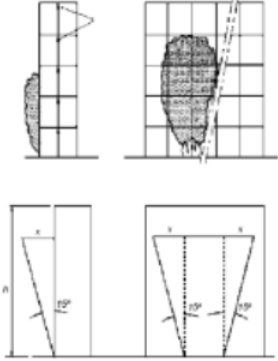
Edificio de almacenamiento en altura.			
Almacenamiento con productos en estanterías (w = anchura de la estantería) (h = altura de la estantería) (x = 2/3 · h · tangente 15° = 0,18·h) SILOS: (w = anchura de la estantería, para el cálculo, máximo 3 m) (Y = altura de libre de humo) (x = Y · tangente 15° = 0,27·Y) Y ≥ 2/3h			
	Área de incendio (A _i) m ²	Perímetro del incendio (P) m	Flujo de calor liberado (q _f) kW / m ²
- Rociadores de techo, independientemente de su tipología	4/3h (w + x)	2 (w + 4x)	q _f (bajo) = 250 q _f (alto) = 625
- Rociadores intermedios	2/3h (w + x)	w + 4x	
- Sin rociadores	81	36	q _f (bajo) = 250 q _f (alto) = 1 250

Tabla 5. Parámetros característicos del modelo de incendios para edificios de almacenamiento en altura (Tabla 1.4 en UNE 23585). Fuente: UNE 23585 (2017).

La profundidad de la capa flotante de humos en un depósito de humos se calcula de la siguiente manera:

$$d_1 = h_c - Y$$

Siendo h_c la altura bajo techo, es decir, desde la base del incendio hasta el techo, e Y la altura libre.

Otro parámetro que se necesita es la temperatura de la capa de humos (T_1), que se calcula con la diferencia de temperatura respecto al ambiente (θ_1).

$$\theta_1 = \frac{Q_f}{c \cdot M_1}$$

$$T_1 = \theta_1 + T_{amb}$$

T_1 temperatura absoluta de la capa de humos (K)

M_1 valor de la masa circulante de los gases de los humos (kg/s)

Q_f flujo de valor convectivo, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_f = 0.8 \cdot q_f \cdot A_f$$

Siendo q_f el flujo de calor liberado y A_f el área de incendio, ambas sacadas de la tabla 5.

Finalmente, para calcular el número de exutorios en cubierta, se utiliza la superficie aerodinámica libre. La superficie aerodinámica libre es el producto del área geométrica y el coeficiente de descarga. El área geométrica (A_v) es la superficie de abertura de los aireadores sobre el plano de la superficie del edificio donde serán instalados, es decir el techo en este caso, y que además es parte del exutorio. El coeficiente de descarga (C_v) es la tasa del valor real del flujo, medido bajo condiciones especificadas para el valor del flujo teórico que atraviesa el aireador. La superficie aerodinámica libre de exutorios se consigue a través de la siguiente ecuación:

$$A_{v\ tot} \cdot C_v = \frac{T_1 \cdot M_1}{\left[2 \cdot \rho_{amb}^2 \cdot g \cdot d_1 \cdot \theta_1 \cdot T_{amb} - \frac{T_1 \cdot M_1^2 \cdot T_{amb}}{[A_i \cdot C_i]^2} \right]^{0,5}}$$

$A_{v\ tot}$ superficie geométrica total libre de todos los aireadores de extracción de humos en un depósito de humos (m).

C_v coeficiente de descarga de una abertura de entrada de aire de alimentación;

M_1 masa circulante de gases de humo que entra en la capa flotante del depósito de humos (kg · s⁻¹);

T_1 promedio de temperatura absoluta en la capa flotante de humos (K);

ρ_{amb} densidad del aire a temperatura ambiente ($kg \cdot m^{-3}$);

g aceleración de la gravedad ($km \cdot s^{-2}$);

d_1 profundidad de la capa flotante de humos en un depósito de humos, medida desde el techo hasta la base visible de la capa de humos (m);

θ_1 temperatura media de los gases del depósito de humos por encima de la del ambiente ($^{\circ}C$);

T_{amb} temperatura ambiente absoluta (K);

A_i superficie geométrica total libre de todas las entradas de aire (m^2);

C_i coeficiente de descarga (es decir coeficiente de funcionamiento) de una abertura de entrada de aire de alimentación;

El número de exutorios se calculará posteriormente como un cociente, utilizando la superficie geométrica total de la abertura de los exutorios y la superficie individual de cada exutorio que se desee instalar.

Capítulo 3. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

3.1 *CONDICIONES DE CONTORNO Y CRITERIOS DE DISEÑO*

Antes de realizar el análisis del sistema de control de humos en distintos escenarios de incendio, es necesario establecer las condiciones geométricas, normativas y operativas que definen el modelo base de simulación. Estas condiciones se han fijado para representar de forma realista un entorno de riesgo logístico, siguiendo tanto la normativa nacional vigente como recomendaciones internacionales reconocidas en protección contra incendios.

El planteamiento se enmarca en la comparación entre un diseño prescriptivo, conforme a la norma UNE 23585, y una configuración alternativa basada en prestaciones. El análisis se desarrolla mediante simulaciones CFD con Fire Dynamics Simulator (FDS), utilizando incendios representativos del entorno logístico, en combinación con las recomendaciones del estándar internacional FM Global Datasheet 2-0.

Geometría del recinto y configuración del sistema

Superficie y dimensiones: la nave logística estudiada presenta una superficie de 4080 m², con una longitud de 120 m, una anchura de 34 m y una altura libre total de 13,7 m.

Altura de almacenamiento: se considera una carga apilada hasta 12,2 m, dejando un espacio superior para acumulación de humos, conforme al apartado 6.2.1 de la UNE 23585, que exige garantizar una altura libre adecuada para la formación de la capa de humos.

Sectorización del sistema de humos: el volumen interior se divide en dos depósitos de humos, cumpliendo con el límite de 2000 m³ por depósito para sistemas con aireadores naturales, tal como indica la norma en su capítulo 8.2.3.

Tipo de nave industrial

El edificio modelado corresponde a una nave tipo C, según la clasificación establecida en el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales (RSCIEI). Este tipo de configuración se caracteriza por ser una edificación exenta o separada de otras construcciones por al menos 3 metros, con un único uso industrial y sin presencia de otras actividades colindantes.

Tipos de incendio y condiciones térmicas

Se evalúan dos tipos de incendio en función del punto de ignición:

- Incendio en altura, de crecimiento ultrarrápido.
- Incendio en suelo, de crecimiento medio.

Ambos escenarios emplean una tasa de calor liberado por unidad de área (HRRPUA) de 1500 kW/m² y un área de fuego de 7,5 m², en línea con los parámetros orientativos incluidos en la Tabla 1.4 de la UNE 23585 para estanterías superiores a 5 m de altura.

- El combustible modelado corresponde a GM37, una espuma de poliuretano utilizada como referencia en análisis de incendios industriales, con elevada liberación de calor y alta producción de humos.

Diseño del sistema de control de humos (SCTEH)

Se comparan dos configuraciones:

Diseño prescriptivo, basado en UNE 23585:

- 8 exutorios por depósito (16 en total) de 1 m² (repartidos uniformemente).
- Cortinas de humos de 8 m de altura.

Diseño alternativo, basado en prestaciones:

- 8 exutorios naturales.
- Sin cortinas de humos.

Sistema de rociadores automáticos

Se incluye un sistema de rociadores tipo ESFR. Para evaluar la influencia del tiempo de activación, se consideran tres condiciones:

- Activación inmediata (eslabón térmico a 182 °C),
- Retardo de 10 minutos,
- Retardo de 20 minutos.

Estas configuraciones permiten analizar tanto escenarios ideales como retardos críticos, en condiciones realistas.

Medidas correctoras conforme a FM Global 2-0

Según la figura 2.5.1.3.1 del FM Global Datasheet 2-0 (Incluida en el ANEXO B: FM Datasheet 2020 ANEXO B: FM Datasheet 2020), la instalación de exutorios automáticos en combinación con rociadores requiere aplicar una de tres medidas correctoras para evitar interferencias que puedan comprometer la activación efectiva de los sistemas de extinción:

- Instalación de exutorios con eslabón térmico estándar (182 °C).
- Retardo en la apertura de exutorios, mínimo de 10 minutos para zonas sin almacenamiento y 20 minutos en áreas de almacenamiento.
- Instalación de rociadores suplementarios directamente bajo los exutorios.

En este trabajo, se simulan y comparan específicamente las opciones 1 y 2, como se comentaba en la sección de rociadores, para valorar cuál de ellas ofrece mejores resultados en términos de contención de humos, visibilidad y seguridad térmica.

Condiciones ambientales

La temperatura ambiente inicial se fija en 293 K (20 °C) y presión atmosférica estándar. No se consideran efectos de viento ni ventilación mecánica, garantizando un entorno de simulación neutral para analizar únicamente el impacto de las decisiones de diseño y activación.

3.2 *CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO Y ESCENARIOS DE INCENDIO*

3.2.1 TIPOLOGÍA DE INCENDIOS EN ALMACENES LOGÍSTICOS

Hay ciertas características de los incendios en almacenes logísticos que los hacen particularmente peligrosos, a saber: grandes volúmenes interiores, materiales combustibles almacenados en altura y una alta carga térmica distribuida sobre áreas extensas. Bajo tales condiciones, el incendio puede desarrollarse a diferentes velocidades, dependiendo de la ubicación de la ignición y la eficacia del sistema de detección/control. Por lo tanto, según las legislaciones UNE 23585 y referencia técnica NFPA 92 el desarrollo del incendio puede clasificarse sobre la base de la velocidad de propagación en: lento, moderado, rápido y muy rápido.¹⁹ En un almacén de gran altura con estanterías altas, el escenario más peligroso es el incendio con la velocidad de propagación muy rápida, especialmente cuando el incendio se enciende en la parte superior del almacenamiento. Sin embargo, también se considera un escenario alternativo con un nivel bajo de peligro: desarrollo incendio moderado a nivel del piso como escenario alternativo cuando la ignición se enciende en el nivel base antes de alcanzar el área de mayor carga térmica. Ambos escenarios son relevantes para este estudio, ya que permiten comparar la eficacia de un sistema de control de humo para dos escenarios de incendio opuestos: propagación media y ultrarrápida.

¹⁹ UNE 23585 (2017)

3.2.2 PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DEL INCENDIO DE DISEÑO

La nave objeto de estudio es un almacén logístico rectangular con una superficie total de 4080 m², dimensiones de 120 metros de largo por 34 metros de ancho, y una altura libre de 13,7 metros. La altura máxima de almacenamiento se establece en 12,2 metros, lo que representa una configuración habitual en instalaciones logísticas automatizadas o de gran capacidad vertical.

Se consideran dos situaciones de incendio diferenciadas en función del tipo de foco de ignición: un incendio en altura, correspondiente a un desarrollo ultrarrápido originado en la parte alta del almacenamiento, y un incendio en suelo, de desarrollo medio, comenzando en la base de las estanterías. Ambos escenarios permiten estudiar comportamientos térmicos y dinámicos contrastados dentro del mismo volumen arquitectónico.

Los parámetros característicos empleados para la modelización de los incendios son los siguientes:

Parámetro	Incendio en altura (ultrarrápido)	Incendio en suelo (medio)
Altura del depósito (H)	13,7 m	13,7 m
Altura de almacenamiento (h)	12,2 m	12,2 m
Anchura de estanterías (w)	2,4 m	2,4 m
Flujo de calor liberado (qf)	625 kW/m ²	625 kW/m ²
Temperatura ambiente (T _{amb})	293 K (20 °C)	293 K (20 °C)
Coefficiente de combustibilidad (C _v)	0,65	0,65

Coefficiente de inflamabilidad (Ci)	0,60	0,60
Área del incendio (Af)	74,76 m ²	20,25 m ²
Perímetro del incendio (P)	22,37 m	18,00 m

Tabla 6: Parámetros incendio de diseño UNE Fuente: Elaboración propia.

El combustible utilizado en ambos casos es espuma de poliuretano (GM37), una sustancia con alta tasa de emisión de humo, rápida ignición y comportamiento térmico severo, representando una situación crítica desde el punto de vista de la generación y estratificación de humos.

3.2.3 INFLUENCIA DEL SISTEMA DE ROCIADORES AUTOMÁTICOS

En entornos logísticos con almacenamiento en altura, el sistema de rociadores automáticos representa el principal recurso de control inicial del incendio. Su activación reduce de forma significativa la tasa de liberación de calor y limita la expansión de gases calientes, contribuyendo a mantener una estratificación térmica estable dentro del volumen protegido.

La efectividad del sistema de control de humos (SCTEH) está estrechamente relacionada con el momento en que se produce dicha activación. Una respuesta temprana favorece la conservación de una capa superior de humos bien definida, con temperaturas y densidades compatibles con la evacuación y la intervención de equipos de emergencia. Por el contrario, una activación tardía implica un mayor desarrollo del incendio y un descenso más rápido de la capa de humos, comprometiendo la visibilidad y la seguridad de los ocupantes.

En el presente trabajo se han considerado tres posibles tiempos de activación de los rociadores:

- Activación inmediata, mediante eslabón térmico a 182 °C.

- Activación retardada de 10 minutos, simulando una detección tardía o fallo parcial del sistema.
- Activación retardada de 20 minutos, correspondiente a un escenario adverso sin intervención eficaz inicial.

Cabe destacar que la fiabilidad de estos sistemas puede verse afectada por factores como la acumulación de aire en sistemas de tubería húmeda o la corrosión interna de las tuberías, lo cual puede generar pérdidas de estanqueidad o bloqueos parciales en caso de incendio. Según FM Global (FMDS0201, 2021), “la corrosión interna en los sistemas de rociadores puede resultar en obstrucciones parciales o totales, disminuyendo la capacidad de flujo y comprometiendo gravemente la eficacia del sistema frente al fuego” FM-DS-0201 2021.

Estos supuestos se analizarán en combinación con diferentes configuraciones del sistema de control de humos, tanto prescriptivo como alternativo, con el objetivo de evaluar el rendimiento global del sistema bajo distintas condiciones críticas de actuación.

3.2.4 ESCENARIOS DEFINIDOS PARA SIMULACIÓN

Para evaluar el comportamiento del sistema de control de humos en distintos contextos de incendio, se han definido doce escenarios de simulación, todos aplicados a una nave logística de 4080 m², con una altura libre de 13,7 m y dividida en dos depósitos de humos.

Estos escenarios responden a tres variables clave:

- Tipo de incendio: se diferencian incendios en altura (de crecimiento ultrarrápido) y en suelo (de crecimiento medio).
- Diseño del SCTEH: se comparan dos configuraciones:
 - Un diseño prescriptivo, conforme a la norma UNE 23585.
 - Un diseño alternativo, más simplificado, basado en prestaciones.

- Tiempo de activación del sistema de rociadores automáticos: se consideran tres condiciones:
 - Activación inmediata mediante eslabón térmico (182 °C),
 - Retardo de 10 minutos,
 - Retardo de 20 minutos.

En ambos diseños se mantiene constante la geometría de la nave y la división en depósitos. Por este motivo, y conforme al capítulo 8.2.3 de la UNE 23585, se establece una superficie de exutorios total equivalente en todos los casos, compuesta por 8 exutorios de 1 m² repartidos en cubierta. Los diferentes casos se recogen en la siguiente tabla:

Escenario	N	Tipo de incendio	Diseño de SCTEH	Cortinas	Activación rociadores	Nº exutorios por depósito
4PU-O1	1	ultrarrápido	Prescriptivo	Sí (8 m altura)	Inmediata (182 °C)	8
4PU-O2a	2	ultrarrápido	Prescriptivo	Sí (8 m altura)	10 min	8
4PU-O2b	3	ultrarrápido	Prescriptivo	Sí (8 m altura)	20 min	8
4PM-O1	4	medio	Prescriptivo	Sí (8 m altura)	Inmediata (182 °C)	8

4PM-O2a	5	medio	Prescriptivo	Sí (8 m altura)	10 min	8
4PM-O2b	6	medio	Prescriptivo	Sí (8 m altura)	20 min	8
4AU-O1	7	ultrarrápido	Alternativo	No	Inmediata (182 °C)	8
4AU-O2a	8	ultrarrápido	Alternativo	No	10 min	8
4AU-O2b	9	ultrarrápido	Alternativo	No	20 min	8
4AM-O1	10	medio	Alternativo	No	Inmediata (182 °C)	8
4AM-O2a	11	medio	Alternativo	No	10 min	8
4AM-O2b	12	medio	Alternativo	No	20 min	8

Tabla 7: Casos de incendio

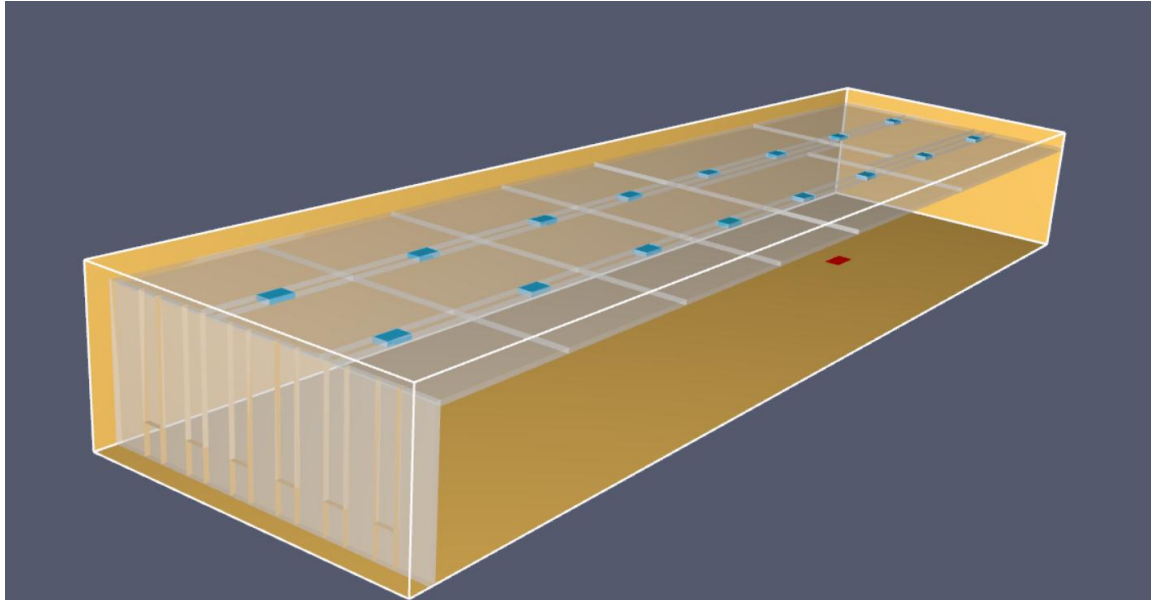


Ilustración 19: Vista Axonométrica de un escenario modelo de diseño alternativo.

La ilustración 18 muestra la geometría tridimensional de la nave industrial utilizada en las simulaciones CFD. Se trata de un recinto logístico, de dimensiones ya comentadas, dividido en dos depósitos de humos conforme a lo dispuesto en la UNE 23585. A continuación, se describen los principales elementos representados en el modelo:

Las paredes laterales (color naranja claro) corresponden al cerramiento de la nave tipo C, sin aperturas laterales ni compartimentación adicional. La estructura de sectorización (color blanco translúcido) delimita los depósitos de humos, definidos para canalizar y contener la capa caliente durante la evolución del incendio.

Los exutorios de humos (rectángulos azules en cubierta) están dispuestos de forma uniforme. Se han incluido ocho unidades de 1 m², cumpliendo con los requisitos de superficie de extracción por depósito. El foco del incendio (cuadro rojo) indica el punto de ignición considerado en cada caso.

Las estanterías (elementos verticales translúcidos en beige) representan el sistema de almacenamiento en altura, con una altura máxima de 12,2 m. Esto deja una cámara libre superior de 1,5 m bajo la cubierta.

Las cortinas de humos (paneles verticales morados) aparecen exclusivamente en los escenarios prescriptivos. Estas se colocan para limitar la propagación horizontal de la capa de humos y se ajustan a los criterios de sectorización establecidos por la norma UNE 23585.

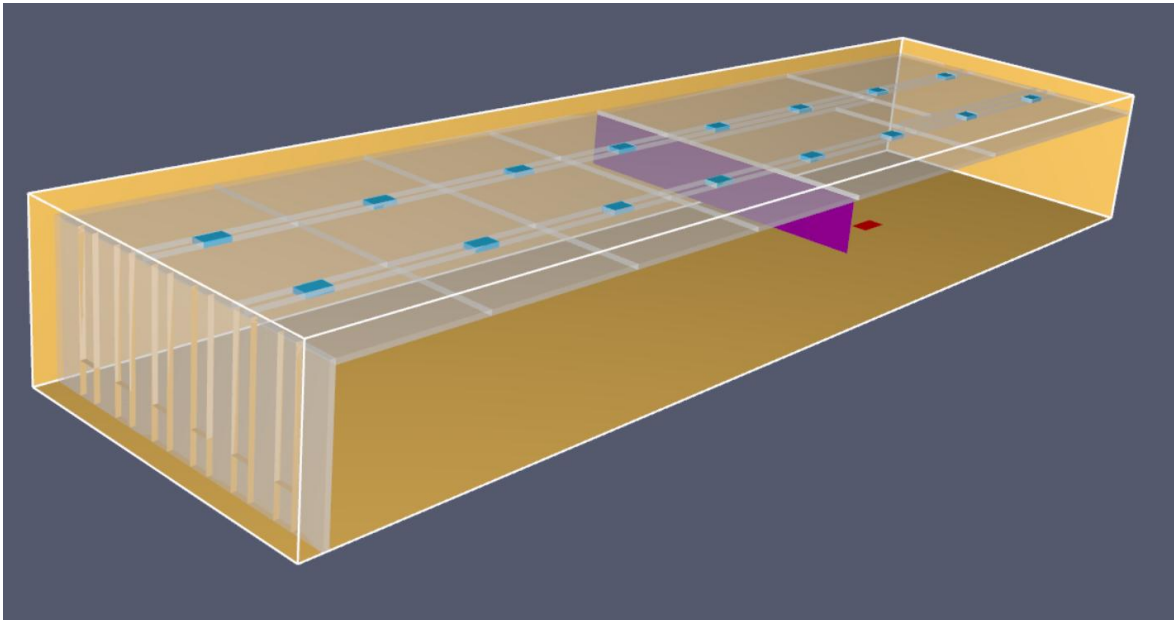


Ilustración 20: Vista Axonométrica de un escenario modelo de diseño prescriptivo.

3.2.5 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Para la realización de este estudio se recurre al uso del software Fire Dynamics Simulator, en su sexta versión, software desarrollado por el National Institute of Standards and Technology. Este software permite realizar simulaciones de incendios en espacios cerrados a partir de la resolución de ecuaciones diferenciales para el comportamiento de gases,

generación de calor y propagación de humo. FDS se basa en una malla tridimensional para la división de espacios de cálculo en bloques o celdas pequeñas, que va analizando la evolución a lo largo del tiempo de variables como temperatura, velocidad del aire o concentración de humos. Es posible visualizar la dinámica del incendio desde su inicio hasta su extinción, y el comportamiento del controlador de humos en diferentes situaciones.

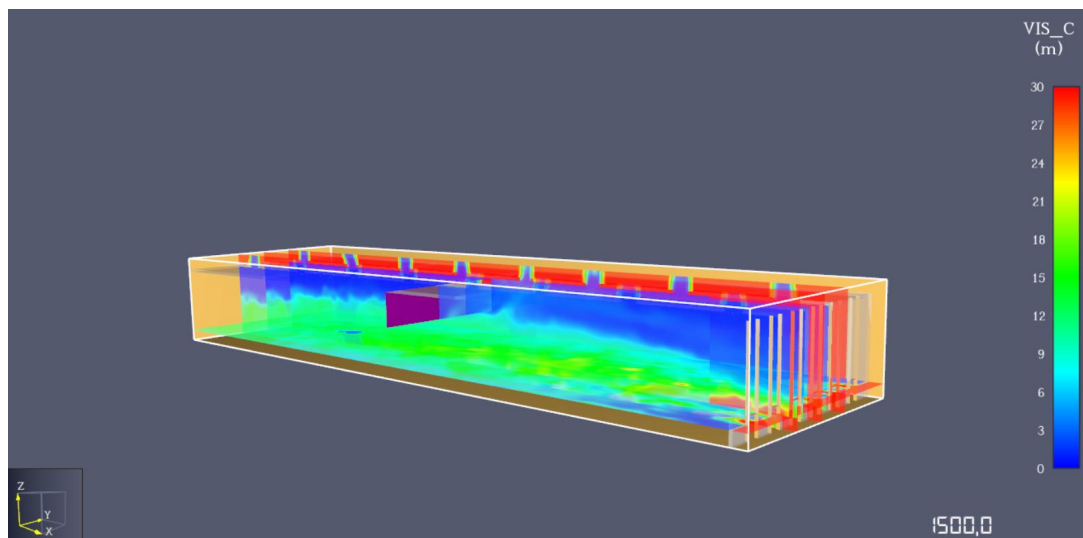


Ilustración 21: Ejemplo de uso de una simulación FDS.

Las gotas de agua no se simulan de manera completamente física o detallada, ya que no se modelan individualmente todas las interacciones complejas con la llama ni su efecto real sobre la pirólisis del combustible. En su lugar, se utilizan modelos empíricos y simplificaciones que permiten estimar el efecto global del agua, evitando así el enorme coste computacional que implicaría resolver con precisión todas las fases del comportamiento del agua en incendios reales.²⁰

²⁰ Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide (2000)

El modelo se ha construido con el programa Pyrosim, una interfaz gráfica que facilita el diseño del recinto, la definición de materiales, aperturas, rociadores y demás elementos del sistema. Pyrosim permite generar automáticamente los archivos de entrada que FDS necesita para ejecutar las simulaciones, y también ofrece opciones para modificar manualmente algunos parámetros más avanzados.

Para analizar los resultados se ha utilizado Smokeview, herramienta también desarrollada por el NIST, que permite visualizar el comportamiento del fuego y del humo durante la simulación. Se han representado campos de temperatura, altura de la capa de humos, visibilidad, y activación de los sistemas de protección. Aunque FDS genera archivos compatibles con Smokeview, en este trabajo los archivos .smv se han visualizado directamente desde Pyrosim, que incluye un visor integrado con las funciones principales de análisis.

Las simulaciones se han ejecutado en ordenadores con procesador multinúcleo, utilizando una malla uniforme de 0,4 metros. Esta resolución asegura un buen equilibrio entre el detalle de los resultados y el tiempo de cálculo. Se ha comprobado, además, que el número de celdas utilizado garantiza un valor adecuado del parámetro de resolución $D^*/\delta x$ ($D/4$ y $D/16$), siguiendo las recomendaciones del manual técnico de FDS para modelos con fuego localizado en grandes recintos. Los cálculos son los siguientes:

$$D^* (m) = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{amb} \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} = \left(\frac{1500 \cdot 7,5}{1,2 \cdot 1,012 \cdot 293 \cdot \sqrt{9,81}} \right)^{\frac{2}{5}} \approx 2,52 m$$

Siendo:

$\dot{Q}$: tasa de liberación del incendio en kW.

g : gravedad en m/s^2 .

ρ_{∞} : densidad del aire a T_{amb} .

T_{amb} : temperatura ambiente en Kelvin.

C_p : calor específico del aire en $\frac{kJ}{kg K}$

Para $\delta x=4$, $\frac{D^*}{4} = 0,63$

Para $\delta x=16$, $\frac{D^*}{16} = 0,16$

$$0,16 \leq \delta x \leq 0,63$$

Justificando entonces la elección de una malla de 0,4 m.

Finalmente, los datos obtenidos se han exportado para su análisis gráfico y numérico en hojas de cálculo, permitiendo comparar los diferentes escenarios en función de parámetros como temperatura, visibilidad o tiempo de activación, que se comentaran en el siguiente capítulo.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ENFOQUE DEL ANÁLISIS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones CFD realizadas con FDS, centradas en evaluar el comportamiento del sistema de control de humos en diferentes configuraciones de diseño. Se incluyen en las secciones algunas gráficas importantes para explicar el análisis, sin embargo, se recogen todas las gráficas utilizadas para el estudio en el ANEXO I: gráficas e imágenes de los casos.

El análisis se estructura en torno a variables clave que afectan directamente a la seguridad durante la evacuación y la intervención en caso de incendio. Estas variables son:

- Caudal de humos y entrada de aire
- Visibilidad en cotas críticas para personas y equipos de emergencia
- Temperatura a distintas alturas
- Tiempo y modalidad de activación del sistema

El enfoque comparativo permitirá contrastar los efectos de distintas soluciones de diseño, algunas con cortinas de sectorización y activación inmediata, otras con menor dotación de medios o retardo, sobre la evolución de las condiciones de seguridad en el recinto.

El objetivo es identificar configuraciones más eficaces en términos de control de humos y mantenimiento de condiciones aceptables para la evacuación e intervención, y aportar recomendaciones justificadas sobre el diseño de este tipo de sistemas en naves logísticas.

4.2 COMPARATIVA DE VISIBILIDAD

La visibilidad en un incendio es un parámetro fundamental para la seguridad de los ocupantes y la intervención de los servicios de emergencia. En las simulaciones realizadas, se ha evaluado la evolución de la visibilidad en función del tiempo para diferentes configuraciones del sistema de control de humos.

Caso 1

En los primeros 200 segundos, la visibilidad cae rápidamente desde los 30 metros iniciales hasta unos 15 metros. Hacia los 500 segundos ya se encuentra por debajo de los 10 metros, y alrededor de los 1000 segundos baja a menos de 2 metros. A partir de ahí, permanece por debajo de 1 metro hasta el final de la simulación, dado que no se activan los exutorios.

Caso 2

La visibilidad disminuye hasta cerca de los 10 metros hacia los 500–600 segundos, justo antes de la activación del sistema. Una vez activado, se observa una recuperación progresiva: sobre los 1000 segundos se sitúa en torno a 15–18 metros y se mantiene estable por encima de 15 metros hasta el final, lo que indica un entorno favorable para la evacuación.

Caso 3

Durante los primeros 1000 segundos, la visibilidad se reduce a valores críticos, descendiendo por debajo de 10 metros ya desde los 600 segundos y alcanzando mínimos de 1-2 metros entre los 1200 y 1300 segundos. Tras la activación, mejora hasta aproximadamente 12–14 metros, aunque sin llegar a los niveles del caso 2, ya que se ha activado más tarde.

Caso 4

En este escenario, la visibilidad desciende de forma más lenta debido al menor crecimiento del incendio. Hacia los 1000 segundos, aún se encuentra en torno a 6 metros, pero a partir de los 1500 segundos la visibilidad es nula prácticamente.

Caso 5

La visibilidad se mantiene por encima de 15 metros durante los primeros 600 segundos. Parece que se estabiliza al final de la simulación, llegando a una visibilidad entre 20 y 22 metros. No se llega a perder el umbral de los 5 metros en ningún momento, reflejando un sistema medianamente bien dimensionado y oportunamente activado.

Caso 6

Alcanza el umbral de los 10 metros hacia los 600 segundos. A partir de ahí, desciende hasta unos 2 metros antes de la activación del sistema a los 1740 segundos. Posteriormente, se recupera hasta unos 14–16 metros, aunque con una respuesta más lenta que en el caso 5, y estando con visibilidad muy baja durante 500 s.

Caso 7

La visibilidad baja de forma gradual hasta alcanzar los 10 metros entre los 600 y 700 segundos. Hacia los 1200 segundos cae a valores de 2 metros, estabilizándose en niveles críticos sin recuperación posterior, ya que los exutorios no se activan.

Caso 8

La visibilidad se mantiene por encima de los 10 metros hasta casi los 800 segundos. Después mejora lentamente hasta alcanzar unos 15 metros hacia los 1200 segundos, y se mantiene en 30 metros hasta el final.

Caso 9

Se produce una caída por debajo de los 10 metros hacia los 600 segundos, alcanzando mínimos de 1-2 metros (durante 200 s) justo antes de la activación. Tras la apertura del sistema, hay una recuperación parcial que lleva la visibilidad hasta valores de 25 metros, sin llegar a estabilizarse tanto a los 2400 s como en el caso 8.

Caso 10

La visibilidad desciende rápidamente hasta los 10 metros entre los 800 y 1000 segundos. Posteriormente cae a lentamente hasta ser nula. No se observan repuntes ni mejora de condiciones, ya que el sistema no se activa.

Caso 11

Se alcanza el umbral de 10 metros hacia los 900 segundos. Tras la activación a los 600 segundos, la visibilidad mejora progresivamente hasta situarse entre 15 y 18 metros durante parte de la simulación, hasta estar la zona del suelo totalmente despejada en régimen permanente.

Caso 12

La visibilidad cae por debajo de los 10 metros cerca de los 1000 segundos y alcanza un mínimo de unos 5 metros. Tras la activación a los 1700 segundos, se produce una mejora lenta que lleva los valores a unos 15 metros hacia los 2400 segundos, aunque sin llegar a estabilizarse.

En conjunto, el análisis de visibilidad en los diferentes escenarios simulados permite extraer varias conclusiones relevantes. En primer lugar, los incendios de tipo *ultrafast* generan una pérdida de visibilidad mucho más rápida y pronunciada que los de tipo *medium fast*. Esta diferencia se hace especialmente crítica cuando no se produce activación del sistema de control de humos, ya que en los casos con incendios ultrarrápidos se alcanzan niveles inferiores a 10 metros en apenas 400–600 segundos, mientras que en los de desarrollo medio este umbral se supera más tarde, ofreciendo un mayor margen de respuesta.



Ilustración 22: Distribución Humo a los 400s en el caso 7 (ultrarrápido)



Ilustración 23: Distribución Humo a los 400s en el caso 4 (medio)

Respecto al tipo de diseño, los sistemas prescriptivos que incluyen cortinas de sectorización muestran un buen comportamiento únicamente cuando se combinan con una activación temprana de los exutorios. En caso contrario, las cortinas pueden tener un efecto contraproducente: al compartimentar el volumen, el humo queda confinado en depósitos sin evacuación, lo que acelera el colapso de la visibilidad en las zonas sectorizadas.

Los diseños alternativos, por su parte, prescinden de cortinas y permiten una mayor dispersión del humo. Esto evita la concentración local extrema, y aunque no garantiza zonas

limpias de forma permanente, suele permitir mantener visibilidades medias ligeramente superiores durante más tiempo. No obstante, si la activación también falla o se retrasa, el resultado final sigue siendo una visibilidad comprometida.

Por último, el criterio de activación tiene un peso determinante. La activación a los 10 minutos se muestra sistemáticamente más efectiva que la basada en eslabones térmicos (que en varios casos no llega a producirse) o la activación a los 20 minutos. En los escenarios con activación a 10 minutos, la visibilidad mejora tras la apertura de los exutorios y puede mantenerse estable por encima del umbral crítico de 10 metros. En cambio, con activaciones más tardías, se produce un periodo prolongado con visibilidad por debajo de los niveles seguros, lo que compromete tanto la evacuación como la actuación de los equipos de emergencia. En las siguientes imágenes se muestra la visibilidad a los 2400s en los casos de velocidad media alternativos, con activación temporal, donde se muestra que en el que se activa a los 10 minutos, prácticamente a nivel de suelo hay visibilidad total:

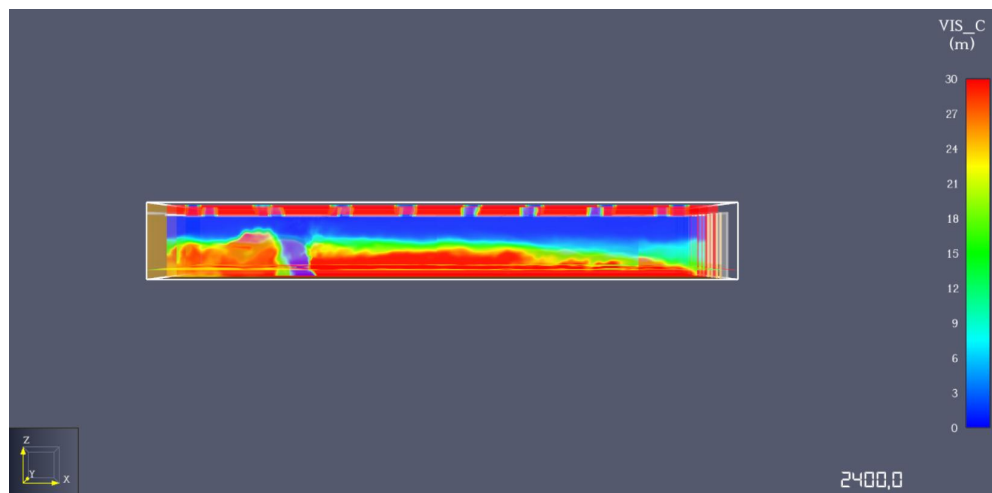


Ilustración 24: Distribución Humo a los 2400s en el caso 11 (medio)

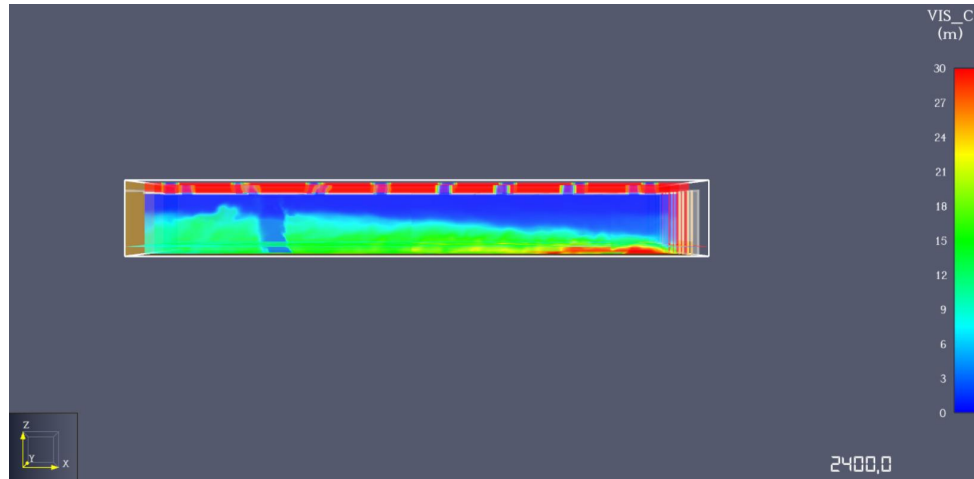


Ilustración 25: Distribución Humo a los 2400s en el caso 12 (medio)

4.3 COMPARATIVA HEAT RELEASE RATES Y TEMPERATURAS

El análisis de la potencia calorífica liberada (HRR) en los distintos escenarios permite evaluar la intensidad del incendio y su impacto sobre las condiciones internas del recinto. Esta variable se relaciona directamente con la generación de humo, el incremento de temperatura y la necesidad de ventilación eficaz.

En todos los escenarios modelizados, el incendio sigue una curva de crecimiento tipo t^2 hasta alcanzar un valor máximo. En los casos de fuego ultrarrápido, este máximo se alcanza en los primeros 300–500 segundos, superando fácilmente los 6000 kW, y en algunos casos, como 4PU-O1, llega hasta los 8000 kW. Una vez alcanzado ese pico, la potencia calorífica permanece constante durante el resto de la simulación, generalmente hasta los 2400 o 3000 segundos, lo que simula una fase de incendio plenamente desarrollado sin intervención directa sobre el foco.

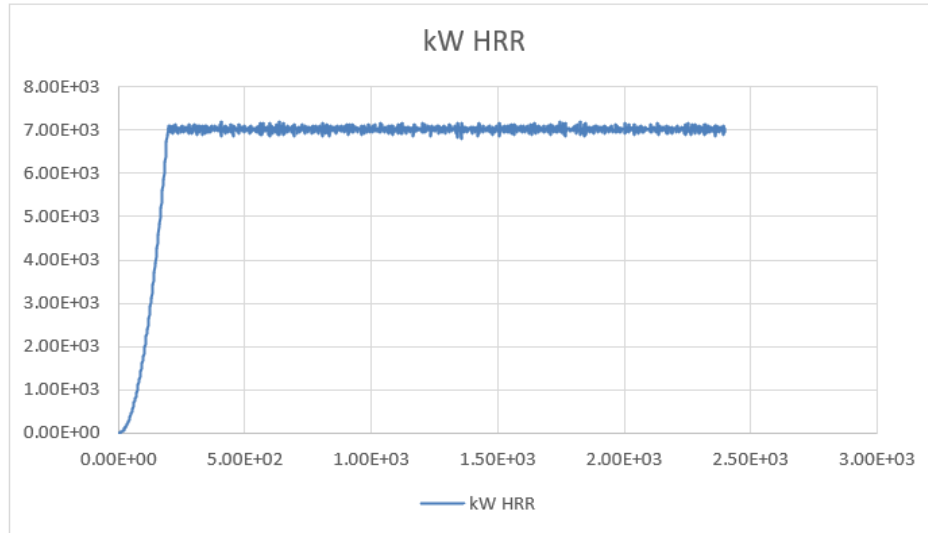


Ilustración 26:HRR (kW) en función del tiempo en caso ultrarrápido.

En los casos de incendio de tipo Medium, como los escenarios 4PM y 4AM, la evolución de la HRR es más progresiva, alcanzando valores de entre 3000 y 4000 kW en un tiempo mayor (cercano a los 800–1000 segundos), aunque también se mantiene constante una vez alcanzado el máximo.

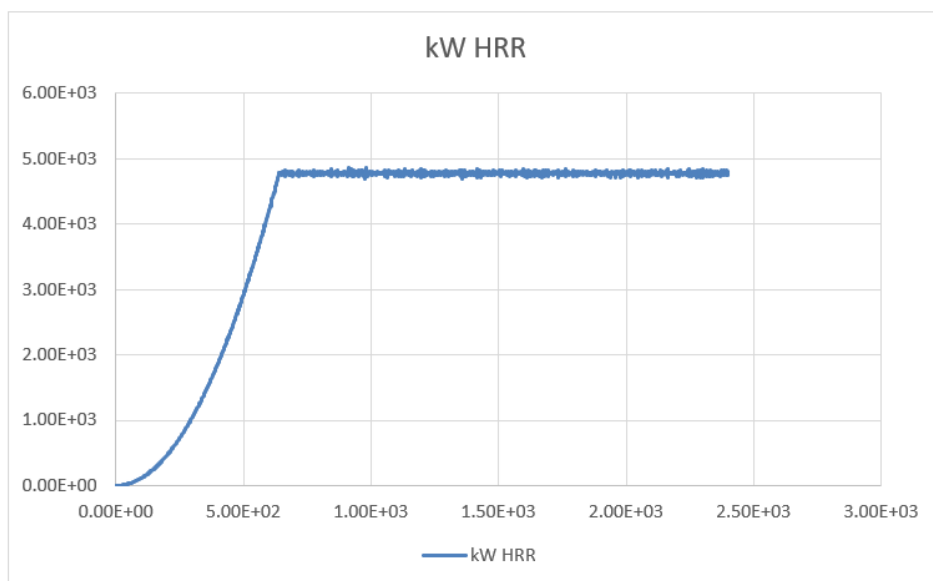


Ilustración 27:HRR (kW) en función del tiempo en caso Medium Fast

En cuanto al efecto de la configuración del sistema, se aprecia que el tipo de activación no influye sobre la evolución de la HRR, ya que esta se modela independientemente del sistema de control de humos. Tanto en escenarios con activación temprana (O2a), como tardía (O2b) o sin activación (O1), la HRR sigue la misma trayectoria: crecimiento hasta el valor máximo y mantenimiento de ese nivel constante hasta el final de la simulación.

Respecto al tipo de diseño (prescriptivo o alternativo), no se observa una diferencia sustancial en la forma o magnitud de la curva de HRR. Esto se debe a que el diseño del sistema de control de humos no actúa directamente sobre el foco del incendio. Sin embargo, en los escenarios alternativos, que prescinden de cortinas de humos y cuentan con menor compartimentación, el desarrollo térmico tiende a ser más distribuido, lo que puede traducirse en una menor concentración de calor en puntos específicos. Por el contrario, en los casos prescriptivos con cortinas, la separación puede provocar que parte del calor quede confinado dentro del depósito de humos, acentuando localmente la temperatura, aunque sin alterar el valor total de HRR. Por tanto, aunque la HRR total se mantiene similar, la distribución espacial de la carga térmica puede verse condicionada por el tipo de diseño.

Hablando de la temperatura, en todos los casos, se ha monitorizado la temperatura en la zona superior del recinto, coincidente con la ubicación de los rociadores automáticos.

En los escenarios con incendio de tipo ultrafast, se observa un ascenso de temperatura muy rápido: en los primeros 300–500 segundos se superan los 160 °C, y en algunos casos, se alcanza el umbral de activación de 182 °C. No obstante, en muchos casos con activación por eslabón térmico (O1), la temperatura no llega a ese valor en el punto exacto del sensor, por lo que no se produce la apertura del sistema, a pesar de que las condiciones térmicas en el entorno ya son severas.

En los incendios de tipo medium fast, la evolución térmica es más progresiva. Se alcanzan temperaturas similares, pero en un plazo mucho más largo (800–1000 segundos), lo que ofrece un mayor margen de actuación. Esto permite que, en muchos casos, incluso un sistema

con activación a los 10 o 20 minutos entre en funcionamiento cuando aún es posible mitigar los efectos del incendio.

El modo de activación tiene una influencia directa en la evolución térmica del recinto. En los casos O2a (activación a los 10 minutos), los exutorios se abren antes de alcanzar los picos térmicos más elevados, lo que permite controlar en parte la acumulación de calor, ascendiendo únicamente hasta los 140°C.

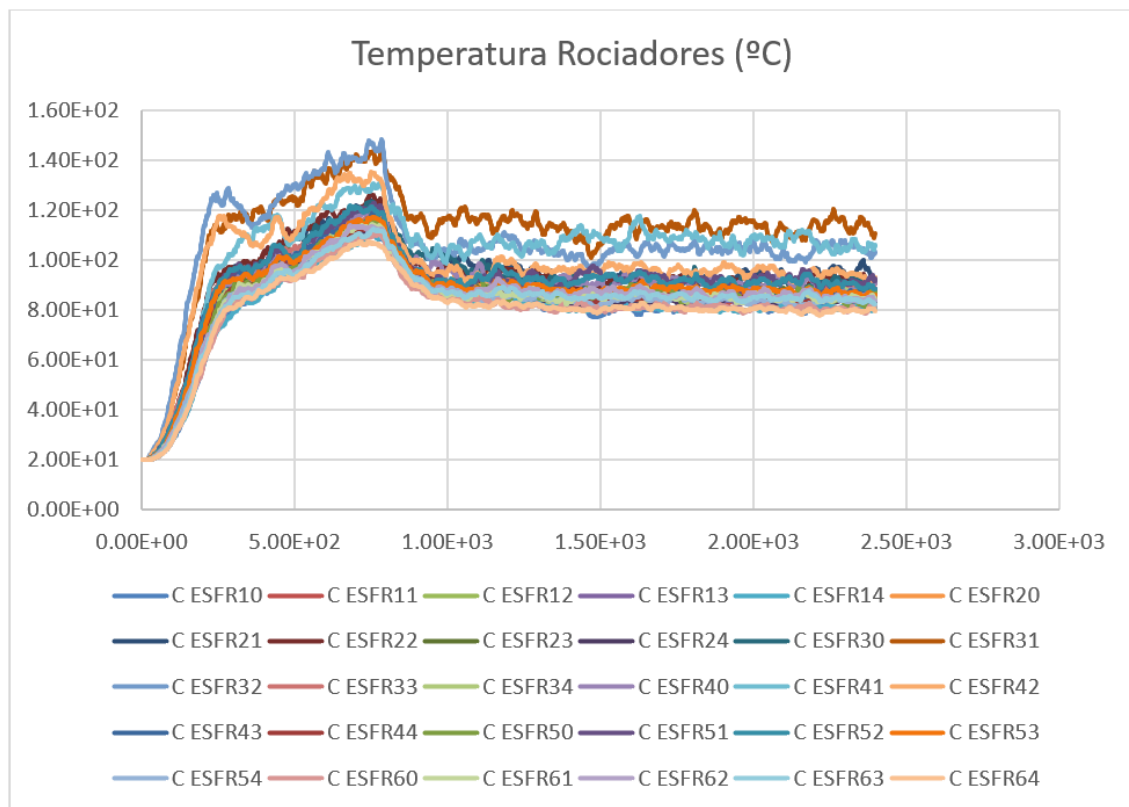


Ilustración 28: Temperatura Rociadores (°C) en caso Ultrafast prescriptivo O2a.

En los casos O2b (activación a los 20 minutos), las temperaturas ya se han estabilizado en niveles altos cuando el sistema se activa, lo que limita su efectividad, encontrándose el pico de temperatura alrededor de los 180°C.

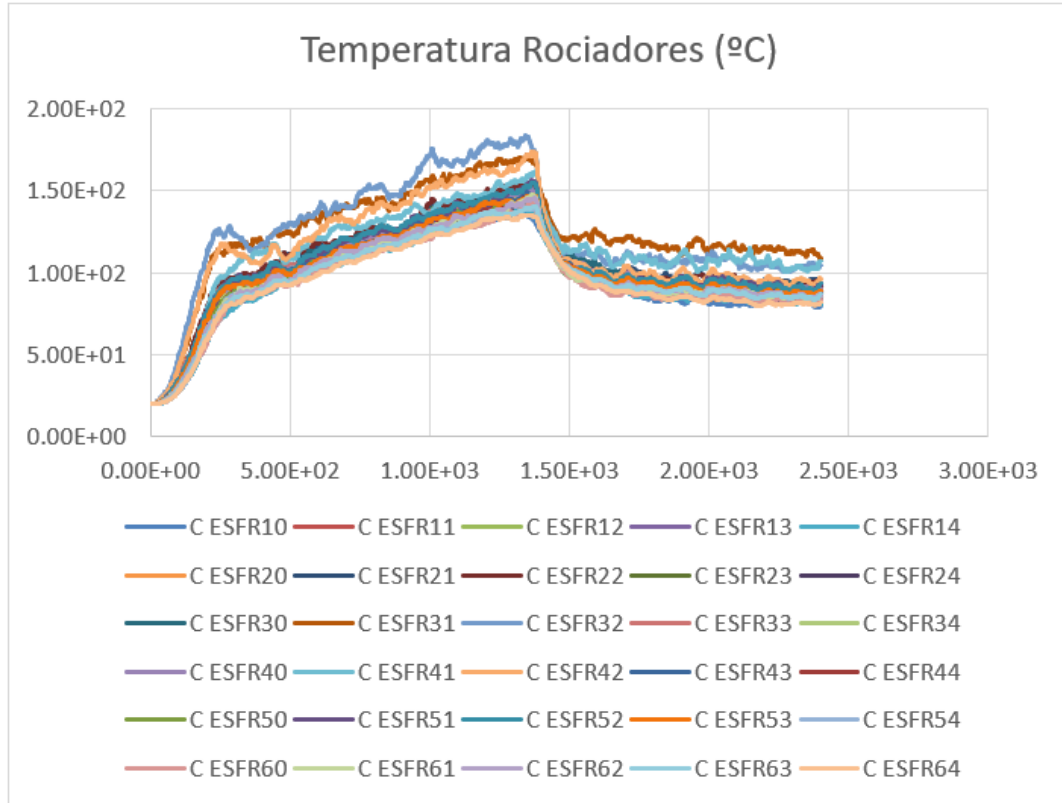


Ilustración 29: Temperatura Rociadores (°C) en caso Ultrafast prescriptivo O2b.

Los casos O1, con activación térmica dependiente de alcanzar los 182 °C, suelen fallar en su respuesta, lo que deriva en una acumulación térmica prolongada que no es evacuada de forma efectiva.

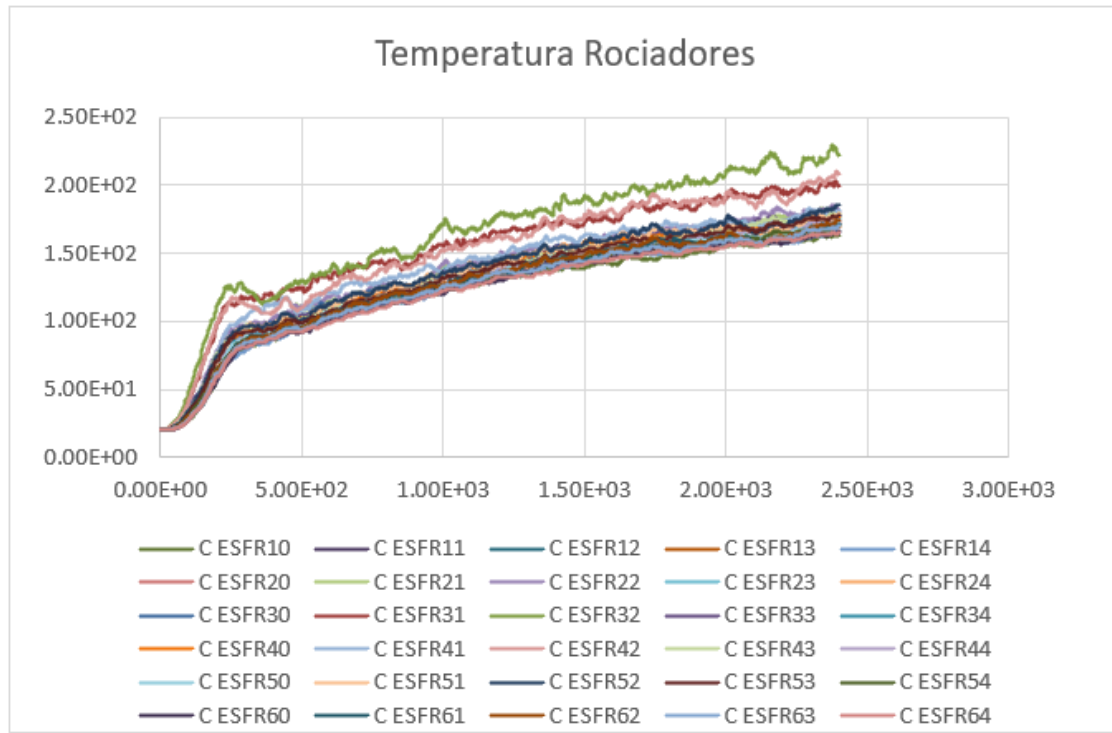


Ilustración 30: Temperatura Rociadores (°C) en caso Ultrafast prescriptivo 01.

Respecto al tipo de diseño, los escenarios prescriptivos, que incluyen cortinas de humos, tienden a generar zonas con temperaturas más altas debido a que el calor queda más contenido dentro de los depósitos definidos por dichas cortinas. En cambio, los diseños alternativos, sin cortinas, permiten una mayor dispersión del aire caliente, lo que puede evitar puntos localizados de alta temperatura, aunque a costa de una elevación más uniforme en todo el volumen del recinto. En ambos casos, la eficacia final depende de que el sistema esté activado: sin extracción activa, la diferencia entre ambos diseños es secundaria frente al efecto dominante del incendio sostenido.

En todos los casos, una vez alcanzado el máximo térmico, la temperatura se mantiene estable durante el resto de la simulación, reproduciendo una fase de incendio plenamente desarrollado. Esta condición prolongada obliga al sistema a funcionar durante un largo periodo para mantener un entorno viable para la evacuación y la intervención.

4.4 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS EXUTORIOS

4.4.1 TIEMPO DE APERTURA

Aunque algunos de los escenarios simulados contaban con activaciones programadas a los 600 o 1200 segundos, en la práctica se ha comprobado que la apertura efectiva no ocurre exactamente en ese instante. A través de las gráficas de flujo másico por exutorio se han determinado los tiempos reales de apertura, definidos como el momento en que el flujo deja de ser cero.

Este retraso respecto a la consigna no es trivial. En varios casos, la apertura se produce entre 100 y 500 segundos más tarde de lo previsto. Este retardo puede deberse a:

- La inercia térmica del sistema y la dinámica de acumulación de humo, dado que tarda en acumularse el humo en la zona detección, siendo más rápida la acumulación en los casos ultrarrápidos (hasta 400 segundos aproximadamente).
- La falta de entrada de aire o presión suficiente que dificulta la generación del flujo ascendente.

En situaciones de incendio de desarrollo rápido, este desfase puede suponer una pérdida crítica de tiempo. Especialmente en incendios ultrarrápidos, incluso una demora de 60 segundos puede implicar la pérdida total de visibilidad y la elevación de la temperatura a niveles no tolerables.

Por otro lado, en los casos con activación térmica mediante eslabón (O1), se ha comprobado que en ninguno de los escenarios se alcanzó la apertura. Aunque el incendio se desarrolló, la temperatura local en el punto del sensor no fue suficiente para superar los 182 °C requeridos. Esta limitación muestra la poca fiabilidad de este método de activación en naves de gran volumen, donde la distribución del calor puede ser muy irregular.

En cambio, en los casos con activación temporizada (O2a y O2b), el sistema siempre se activa. Sin embargo, la diferencia entre ambos modos es crítica:

- En O2a, aunque existe un ligero retardo respecto a la consigna (aperturas reales entre 740 y 1134 s), el sistema entra en funcionamiento antes de que las condiciones térmicas sean insostenibles. Esto permite evacuar eficazmente los primeros volúmenes de humo acumulado y mantener una capa útil.
- En O2b, con aperturas reales entre 1340 y 1734 s, el ambiente ya ha colapsado visual y térmicamente en la mayoría de los casos, especialmente si el incendio es ultrafast. Aunque los caudales sean similares a los de O2a, llegan demasiado tarde para evitar la pérdida de control del entorno.

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de apertura:

Caso	Código	Apertura observada (s)	Patrón de flujo
Caso 1	4PU-O1	No apertura	Sin flujo
Caso 2	4PU-O2a	742 s	Desigual (8 altos / 8 bajos)
Caso 3	4PU-O2b	1342 s	Desigual (8 altos / 8 bajos)
Caso 4	4PM-O1	No apertura	Sin flujo
Caso 5	4PM-O2a	1100 s	Desigual (8 altos / 8 bajos)
Caso 6	4PM-O2b	1700 s	Desigual (8 altos / 8 bajos)
Caso 7	4AU-O1	No apertura	Sin flujo
Caso 8	4AU-O2a	740 s	Homogéneo
Caso 9	4AU-O2b	1340 s	Homogéneo

Caso 10	4AM-O1	No apertura	Sin flujo
Caso 11	4AM-O2a	1134 s	Homogéneo
Caso 12	4AM-O2b	1734 s	Homogéneo

Tabla 8: Tiempo de activación de exutorios (s) y patrón de flujo.

4.4.2 ANÁLISIS DEL FLUJO MÁSSICO

Los flujos mássicos por exutorio presentan un comportamiento común en todos los escenarios activados (O2a y O2b): tras la apertura, se produce un ascenso rápido del caudal, alcanzando un pico en pocos segundos, seguido de una fase de estabilización.

A continuación, se recogen los valores mássimos y medios estimados cada caso activado:

Caso	Tipo incendio	Activación	Tiempo apertura (s)	Caudal máx. (kg/s)	Caudal medio estabilizado (kg/s)
4PU-O2a	Ultrafast	600 s	742	~13 (8 exut.) ~6,5 (resto)	~11 (8 exut.), ~2,5 (resto)
4PU-O2b	Ultrafast	1200 s	1342	~14 (8 exut.) ~8,5 (resto)	~11 (8 exut.), ~2,5 (resto)
4PM-O2a	Medium	600 s	1100	~12 (8 exut.) ~5,5 (resto)	~9 (8 exut.) ~2 (resto)
4PM-O2b	Medium	1200 s	1700	~13 (8 exut.)	~9 (8 exut.)

				~7,5 (resto)	~3 (resto)
4AU-O2a	Ultrafast	600 s	740	~12	~8
4AU-O2b	Ultrafast	1200 s	1340	~13	~8
4AM-O2a	Medium	600 s	1134	~11	~7
4AM-O2b	Medium	1200 s	1734	~12	~7

Tabla 9: Caudal máximo y medio en exutorios (kg/s).

En todos los casos, los valores máximos se alcanzan en torno a 50–100 s tras la apertura, y el sistema estabiliza su comportamiento de forma relativamente rápida.

En los escenarios con diseño prescriptivo, se observa una distribución desigual del flujo entre los exutorios: aproximadamente 8 de los 16 exutorios concentran casi el 80% del caudal total. Esta asimetría responde al efecto de las cortinas de humos, que canalizan el flujo hacia sectores específicos. Este tipo de diseño puede resultar muy eficiente si el incendio se localiza dentro del volumen confinado, pero también muy vulnerable si no es así: la mitad de los exutorios queda inutilizada en la práctica.

En contraste, en los escenarios con diseño alternativo, se observa una evacuación más equilibrada: los 16 exutorios presentan caudales similares, entre 6 y 9 kg/s, ya estabilizados. Aunque la potencia total de extracción puede ser algo menor que en los casos prescriptivos concentrados, la distribución homogénea asegura una mayor fiabilidad y menos dependencia de la ubicación del foco del incendio.

Los incendios ultrafast generan un mayor volumen de gases calientes en menos tiempo. Esto provoca que, tras la apertura, los exutorios entren en funcionamiento con mayor intensidad: los caudales máximos suelen estar en el rango de 13,5 kg/s por unidad activa (prescriptivos), o 12,5 kg/s en configuraciones homogéneas (alternativos).

En cambio, en los incendios medium, el caudal total es algo menor, con picos alrededor de 12 kg/s. La carga térmica y la presión de evacuación se desarrollan más lentamente, por lo que el sistema opera a menor régimen. Esta diferencia también implica que el sistema tiene más tiempo para activarse eficazmente en incendios medium, mientras que en incendios ultrafast, la capacidad de extracción debe ser inmediata para evitar el colapso del ambiente.

Se puede comprobar en las siguientes gráficas de incendios este análisis, donde los casos ultrarrápidos por activación a los 20 minutos (casos 3 y 9) difieren en el valor pico de flujo, debido a la mayor acumulación de humo en uno de los depósitos del caso 3 (prescriptivo) frente a la distribución homogénea en el caso 9 (alternativo). Además, se comprueba que el hecho de tener los depósitos separados por una cortina en el caso 3 hace que el flujo en la mitad de los exutorios sea menor que en la otra mitad, localizados en el depósito cercano al origen del incendio.

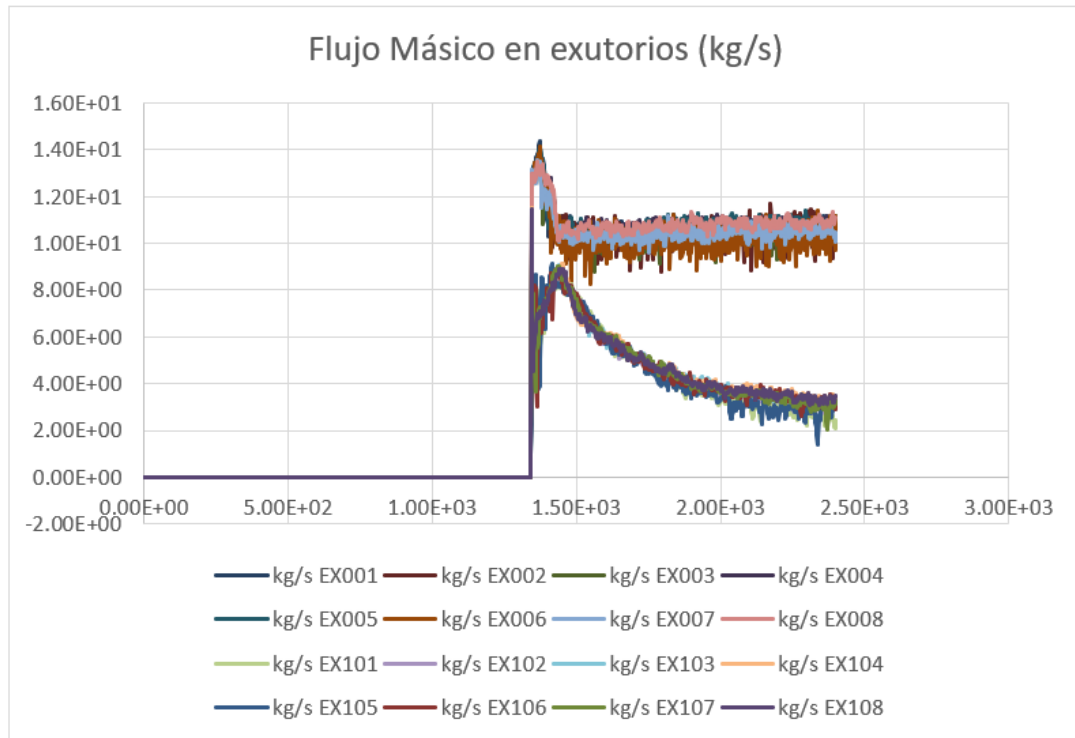


Ilustración 31: Flujo másico en exutorios en el caso 3

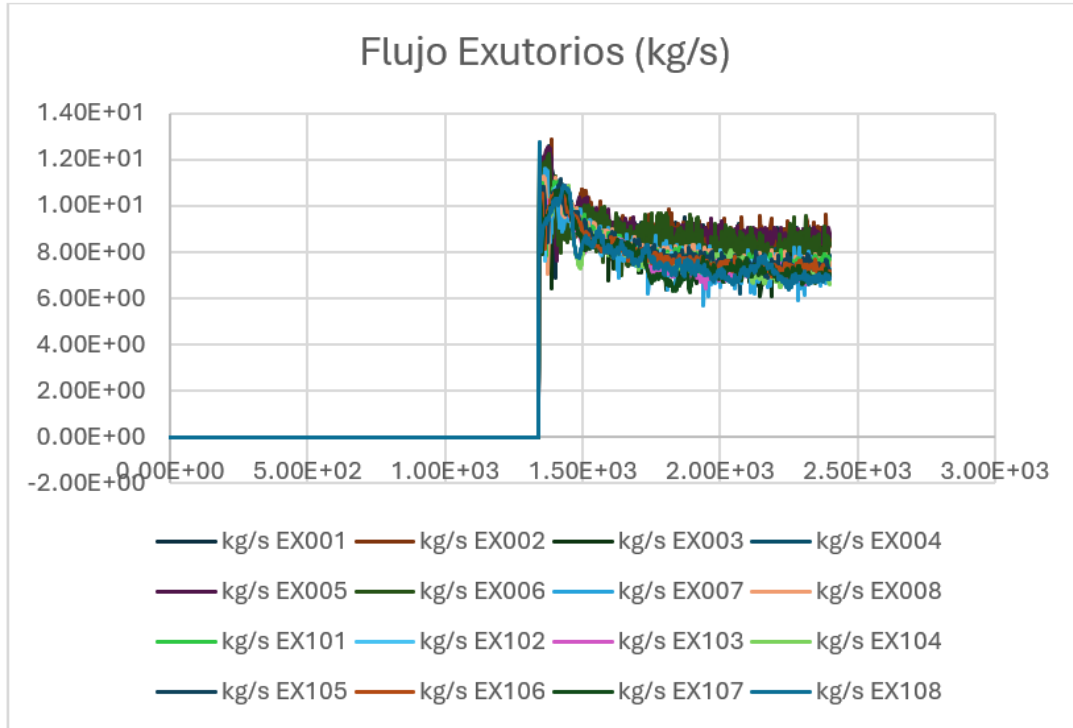


Ilustración 32: Flujo másico en exutorios en el caso 9

También es preciso comparar el caso 3 con su homólogo de crecimiento medio (caso 6), donde a su vez se cumple que el pico de flujo en el caso 6 es menor debido a que la acumulación de humo es menor debido a la menor rapidez de crecimiento. En el caso 6 se observa que la activación de los exutorios es a los 1700 segundos aproximadamente, teniendo más tiempo el humo para acumularse, siendo 400 segundos más tardía que en el caso 3, y aun así el pico es 1 kg/s mayor en este último. En la siguiente gráfica se muestra el flujo en exutorios del caso 6.

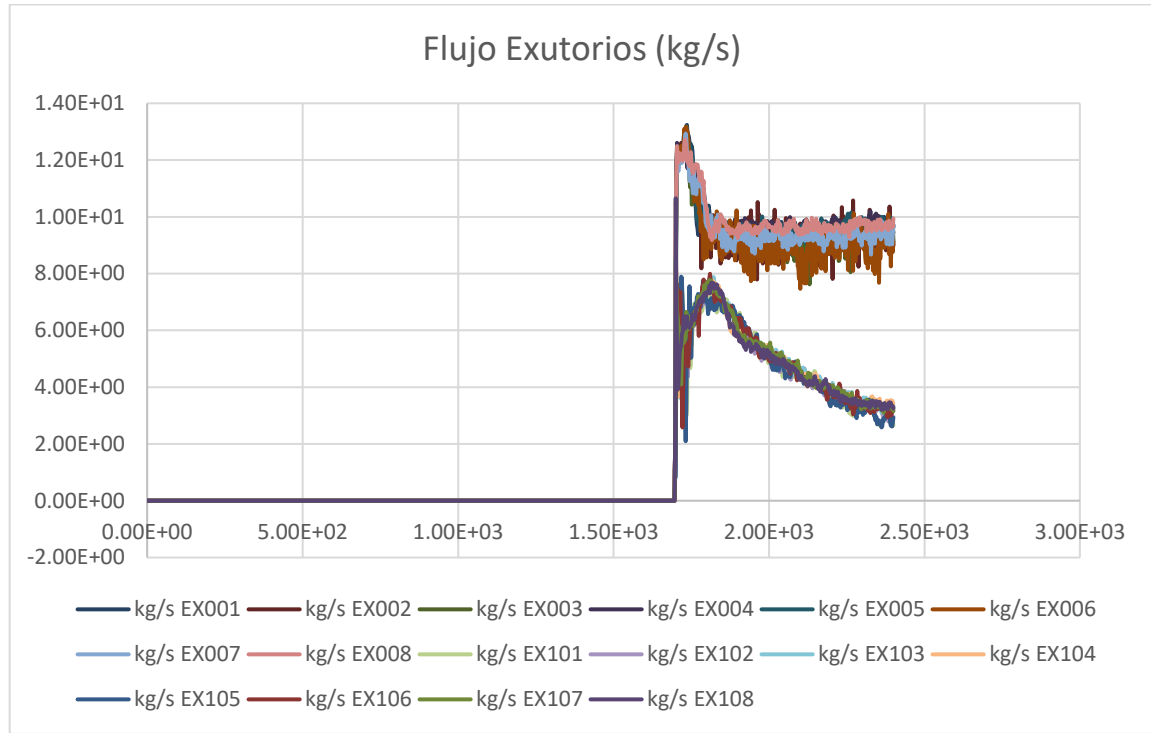


Ilustración 33: Flujo másico en exutorios en el caso 6

Capítulo 5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido realizar una comparativa detallada entre diferentes configuraciones de sistemas de control de humos aplicados a una nave industrial, en función del tipo de diseño (prescriptivo o alternativo), el modo de activación (térmica o temporizada), y el tipo de incendio (ultrafast o medium).

El análisis realizado mediante simulaciones CFD ha proporcionado una visión cuantitativa sobre el comportamiento del sistema ante distintos escenarios. Se han evaluado de forma específica tres variables clave: visibilidad, temperatura y funcionamiento de los exutorios. Las principales conclusiones obtenidas se agrupan a continuación:

5.1 VISIBILIDAD

- En los casos de incendio de tipo ultrafast, la pérdida de visibilidad es muy rápida. Se alcanzan valores inferiores a 10 metros entre los 400 y 600 segundos, especialmente si el sistema no se activa.
- En incendios de desarrollo medio, la visibilidad cae de forma más progresiva, permitiendo mantener durante más tiempo condiciones viables para la evacuación. Aun así, sin activación, se termina por superar el umbral crítico de visibilidad tras los 800–1000 segundos.
- Los diseños prescriptivos, cuando se combinan con una activación temprana (casos O2a), consiguen mantener zonas limpias de humo durante gran parte del incendio. Sin embargo, si no se produce activación o esta se retrasa, la compartimentación puede retener humo y empeorar la visibilidad localmente.
- En cambio, los diseños alternativos, sin cortinas de sectorización, permiten una dispersión más homogénea del humo, evitando acumulaciones localizadas severas. Esto no garantiza zonas completamente limpias, pero mantiene valores medios de visibilidad más estables.

- En los casos con activación a 600 segundos, se ha logrado recuperar visibilidad hasta valores de entre 15 y 25 metros según el caso. Con activaciones a 1200 segundos o más, la mejora es parcial y tardía, y la zona ya ha entrado en condiciones críticas antes de la activación.

5.2 *TEMPERATURA*

- En incendios ultrarrápidos, se alcanza el umbral de 160–180 °C entre los 400 y 600 segundos, y en algunos casos se llega a superar el umbral de activación térmica (182 °C), aunque no siempre en la zona del sensor.
- En incendios de tipo medium, el ascenso térmico es más lento, alcanzándose 140–160 °C entre los 800 y 1000 segundos.
- En los escenarios con activación O2a (600 s), la temperatura máxima se contiene en torno a 140–150 °C, gracias a la evacuación temprana de gases calientes.
- En O2b (1200 s), la activación ocurre una vez alcanzada la estabilización térmica, con valores ya situados en torno a los 180 °C, lo cual limita su efecto corrector.
- En los casos con activación por eslabón térmico (O1), no se produjo apertura en ningún escenario. Esto demuestra su baja fiabilidad en naves de gran volumen, donde la temperatura no siempre alcanza el umbral de activación en el punto concreto del sensor.
- Los diseños prescriptivos, al contener el calor en zonas definidas por cortinas, presentan acumulaciones térmicas más localizadas, mientras que los alternativos ofrecen una elevación más uniforme en todo el recinto.

5.3 EXUTORIOS: ACTIVACIÓN Y FLUJOS

- En los escenarios O2a (activación a 600 s), la apertura real se produjo entre los 740 y 1134 segundos, debido a retardo de activación. Aun así, en la mayoría de estos casos el sistema consiguió activarse antes del colapso total del ambiente.
- En los escenarios O2b (activación a 1200 s), el sistema se activó entre los 1340 y 1734 s, cuando ya se habían superado las condiciones críticas. En estos casos, aunque el caudal fue correcto, su eficacia fue muy limitada.
- Los caudales máximos por exutorio en configuraciones prescriptivas alcanzaron hasta 14 kg/s en los 8 exutorios más activos, con medias estabilizadas de aproximadamente 11 kg/s. Los otros 8 exutorios del sistema prescriptivo evacuaron entre 2 y 3 kg/s debido a la distribución sectorizada.
- En los diseños alternativos, la evacuación fue más homogénea, con todos los exutorios activos en torno a 12–13 kg/s de máximo, y medias estabilizadas de 7–8 kg/s. Aunque el pico por unidad es algo menor que en los prescriptivos, la distribución uniforme mejora la fiabilidad general del sistema.
- En incendios ultrafast, los flujos alcanzan máximos más altos debido a la mayor presión térmica. En incendios medium, los picos son algo menores (alrededor de 12 kg/s), y se alcanzan más tarde, lo que ofrece más margen para la activación del sistema.

5.4 CONCLUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos demuestran que el rendimiento de un sistema de control de humos depende de forma crítica de la estrategia de activación y el momento real en el que esta se produce. Tanto el diseño prescriptivo como el alternativo pueden ser eficaces si se activan a tiempo, pero ninguno de ellos es completamente funcional si la activación falla o se retrasa.

En este sentido:

- La activación térmica (O1) no es adecuada para recintos de gran volumen sin garantías de temperatura localizada.
- La activación temporizada a 600 s (O2a) ofrece el mejor equilibrio entre anticipación y rendimiento, mientras que la de 1200 s (O2b) resulta insuficiente en escenarios ultrarrápidos.
- El diseño prescriptivo permite caudales más altos por unidad, pero depende de que el incendio se ubique dentro del depósito de extracción activo.
- El diseño alternativo ofrece evacuación continua y estable en todo el recinto, compensando la menor potencia individual con una mayor fiabilidad global.

Finalmente, este trabajo demuestra la importancia de realizar simulaciones CFD durante la fase de diseño. Solo así es posible anticipar el comportamiento real del sistema bajo condiciones específicas de incendio, identificar limitaciones estructurales o funcionales, y aplicar soluciones correctoras antes de la implementación.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Prefire “SISTEMAS DE CONTROL DE HUMOS. ¿EN QUÉ CONSISTEN?”. Prefire, 2017. <https://www.prefire.es/hub/2017/01/sistemas-de-control-de-humos-en-que-consisten/>
- [2] O'Connor, B “SISTEMAS DE CONTROL”. NFPA, febrero 2021. <https://www.nfpa.org/es/news-blogs-and-articles/blogs/2021/02/05/sistemas-de-control-de-humo>
- [3] DirectExtintor “¿CÓMO EXTRAER EL HUMO?”. DirectExtintor, Julio 2014. <https://www.directextintor.es/blog/como-extraer-el-humo/>
- [4] TotalFireProtection “NFPA 92 STANDARD FOR SMOKE CONTROL SYSTEMS”, TFP, enero 2023 <https://www.tfp1.com/blog/smoke-control-system-fire-safety-total-fire-protection/#:~:text=Two%20main%20types%20of%20smoke,different%20areas%20of%20the%20building.>
- [5] NoatumLogistics “EVOLUCIÓN DEL ALMACENAMIENTO: DE INSTALACIONES TRADICIONALES A SISTEMAS INTELIGENTES”, NoatumLogistics, agosto 2023. <https://www.noatumlogistics.com/es/evolucion-del-almacenamiento-de-instalaciones-tradicionales-a-sistemas-inteligentes/>
- [6] Hopstack “EVOLUTION OF WAREHOUSING SYSTEMS: HISTORY AND TIMELINES”, Team Hopstack, marzo 2022. <https://www.hopstack.io/blog/evolution-warehousing-systems-history-timelines>
- [7] InviaRobotics “A BRIEF HISTORY OF WAREHOUSES: PART II”, Invia Robotics, enero 2020. <https://inviarobotics.com/blog/brief-history-warehouses-part-ii/>
- [8] Bernardos, G “LA EVOLUCION DEL MERCADO DE NAVES INDUSTRIALES (I)” Directivos Construcción, abril 2007 <https://gonzalobernardos.es/wp-content/uploads/2020/08/La-evoluci%C3%B3n-del-mercado-de-naves-industriales.pdf>
- [9] Keller, M “LA INVERSIÓN LOGÍSTICA EN ESPAÑA SUPERA LOS 1.510 MILLONES DE EUROS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DEL AÑO”, Savills, 2021, <https://www.savills.es/publicaciones/noticias/316973/la-inversion-logistica-en-espa%C3%B1a-supera-los-1.510-mn-euros-durante-el-1s-del-a%C3%B1o>

-
- [10] Bioex “DIFERENTES TIPOS DE INCENDIO” Bioex, <https://www.bioex.com/es/conocimientos/tipos-de-incendios/>
- [11] Jaureguierry, M “QUÍMICA DEL FUEGO” Universidad de ingeniería Olavarría, <https://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/segumar/a13-3/material/Incendio%201.pdf>
- [12] World bank Group “BEIRUT RAPID DAMAGE AND NEEDS ASSESSMENT” World Bank, Agosto 2020. <https://www.worldbank.org/en/news/factsheet/2020/08/30/qa-beirut-rapid-damage-and-needs-assessment-august-2020>
- [13] Sinelec “INCENDIOS INDUSTRIALES: CAUSAS DEL FUEGO EN NAVES Y FÁBRICAS.” Sinelec Fire Protection <https://sinelec.com/incendios-naves-industriales/>
- [14] O’Connor, B “FIRE EXTINGUISHER RATINGS” NFPA, Agosto 2022 <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articulos/blogs/2022/08/26/fire-extinguisher-ratings>
- [15] Bioex “DIFERENTES TIPOS DE INCENDIO” Bioex, <https://www.bioex.com/es/conocimientos/tipos-de-incendios/>
- [16] Ministerio del Interior. (2004). “REGLAMENTO DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES (RSCIEI)”. Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre. Anexo I, Parte 3. Boletín Oficial del Estado (BOE), nº 303, de 17 de diciembre de 2004.
- [17] Pefipresa “TIPOS DE DETECTORES DE INCENDIOS, CÓMO FUNCIONAN” Pefipresa, julio 2022. <https://www.pefipresa.com/blog/tipos-de-detectores-de-incendios-como-funcionan/>
- [18] Asociación Española de Normalización. “NORMA UNE-EN 23585:2017. SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS”. Noviembre 2017. Sistemas de control de humo y calor. Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y de evacuación de humos (SCTEH) en caso de incendio estacionario.
- [19] FDS Tutorial “WHAT IS FDS?”. <https://fdstutorial.com/what-is-fds/>
- [20] Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum, Ronald G. Rehm, Anthony Hamins, Glenn P. Forney “FIRE DYNAMICS SIMULATOR – TECHNICAL REFERENCE GUIDE” 2000 <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6467.pdf>
- [21] Naciones Unidas “LOS 17 OBJETIVOS” Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Desarrollo Sostenible, 2025 <https://sdgs.un.org/es/goals>
-

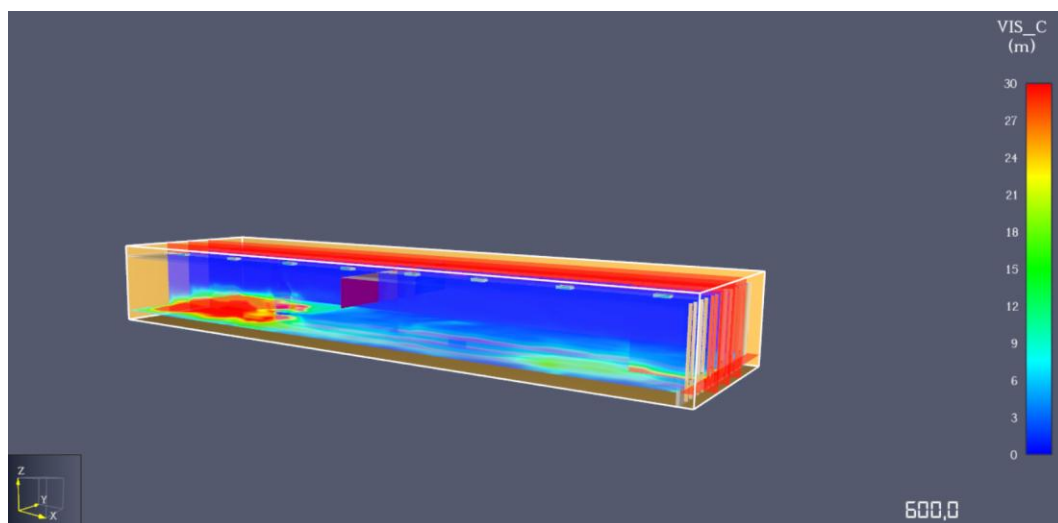
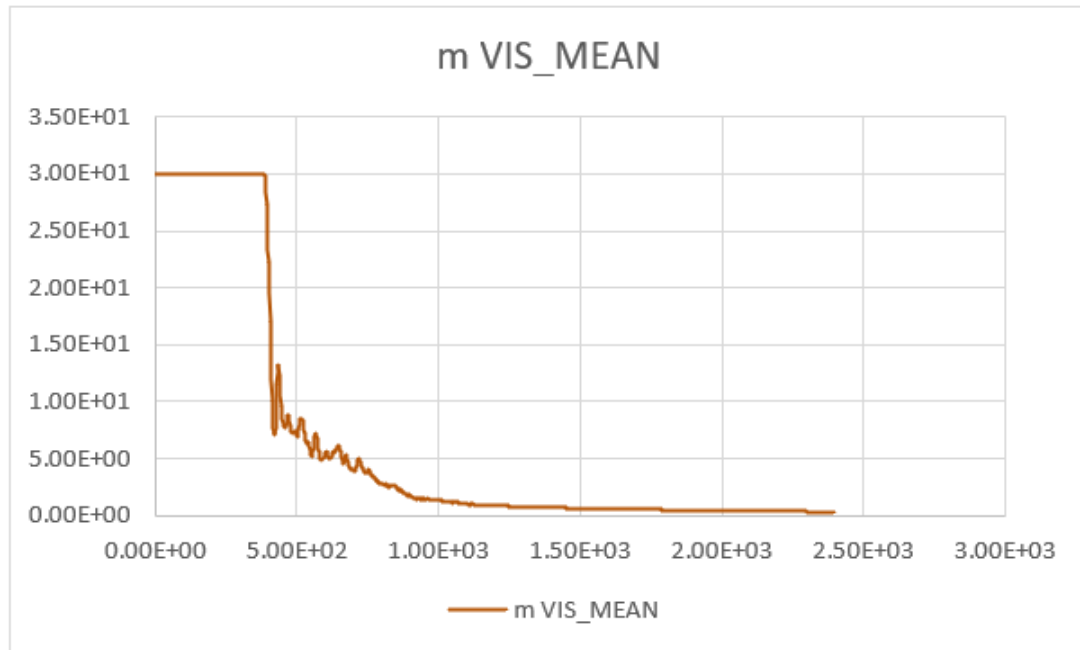
ANEXO I: GRÁFICAS E IMÁGENES DE LOS CASOS

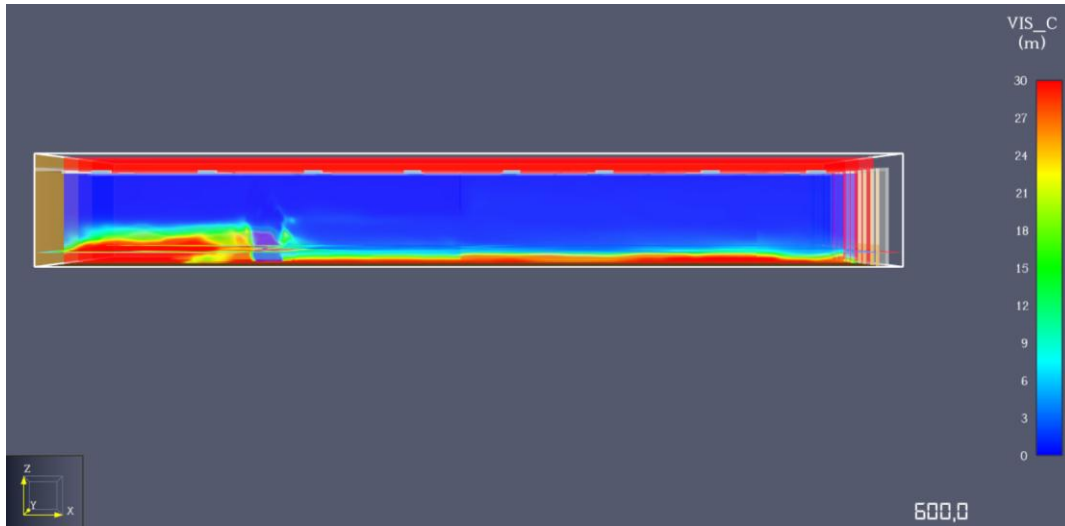
Con el objetivo de complementar el análisis técnico realizado a lo largo del trabajo, se incluye este anexo donde se recopilan todas las gráficas y capturas extraídas de las simulaciones CFD realizadas con FDS. Este apartado recoge, para cada uno de los casos simulados, los resultados gráficos correspondientes a la evolución de la visibilidad, temperatura, potencia del incendio, caudal másico y funcionamiento de los exutorios, facilitando así una visión más clara y visual del comportamiento del sistema en cada escenario.

Caso 1, 4PU-O1

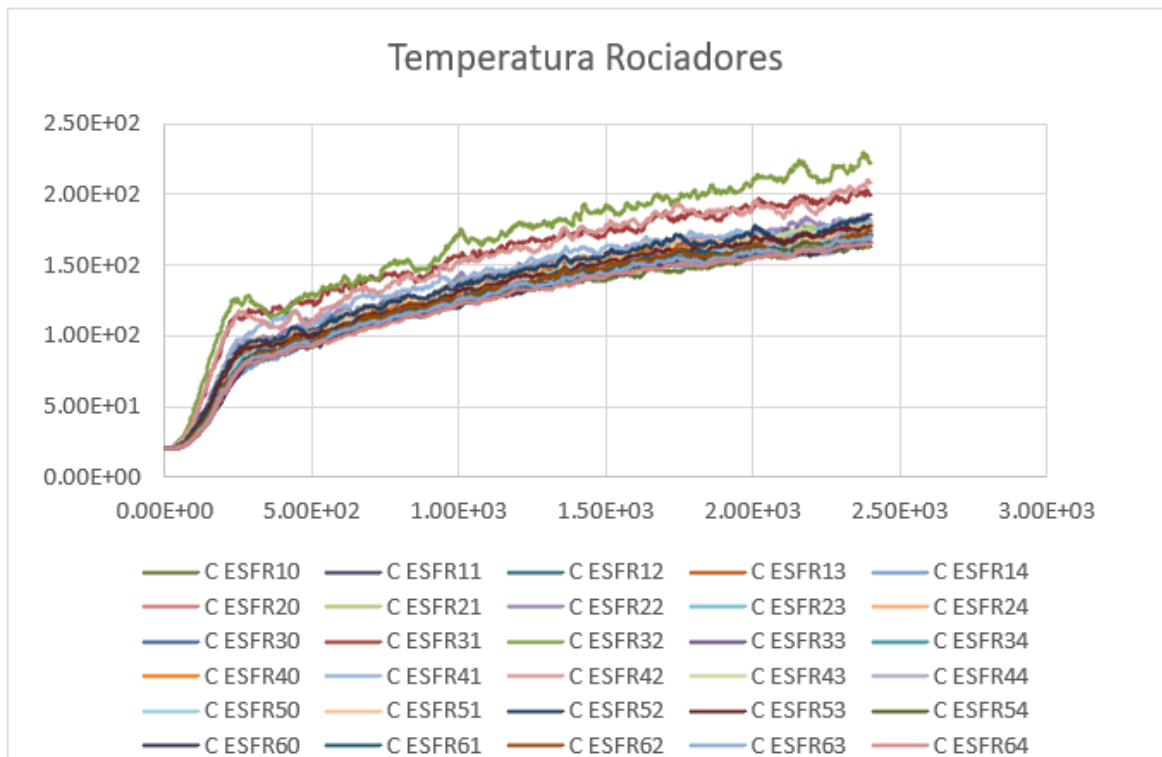
Se trata del caso de diseño prescriptivo ultrarrápido, donde se sigue la primera norma de activación, por eslabón térmico de 182°. (En todos los casos O1 no se abren los exutorios ya que no se supera la temperatura 182°)

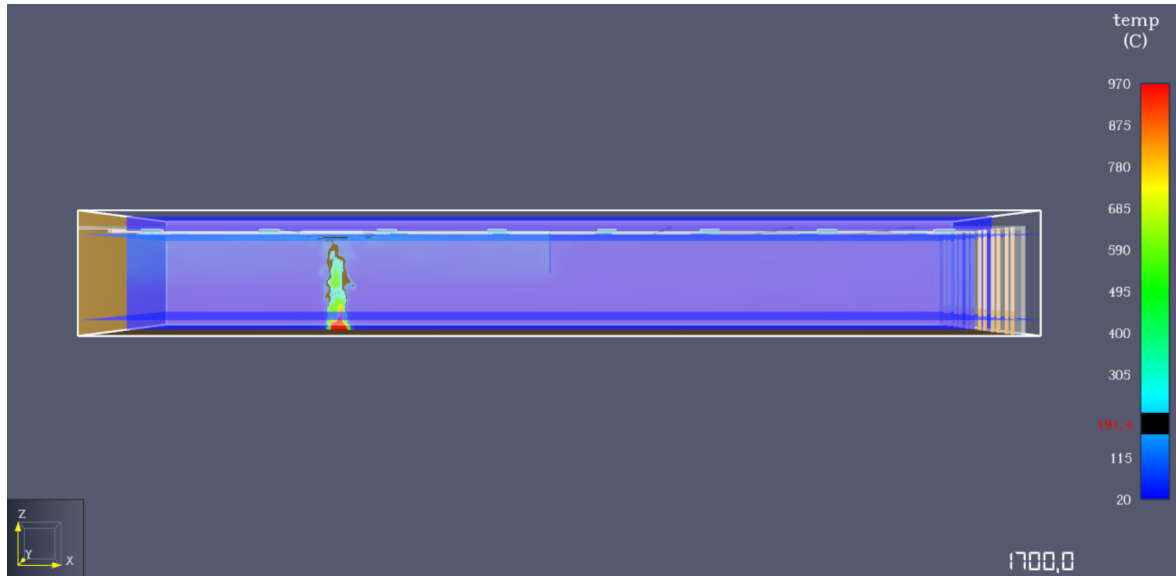
Visibilidad:



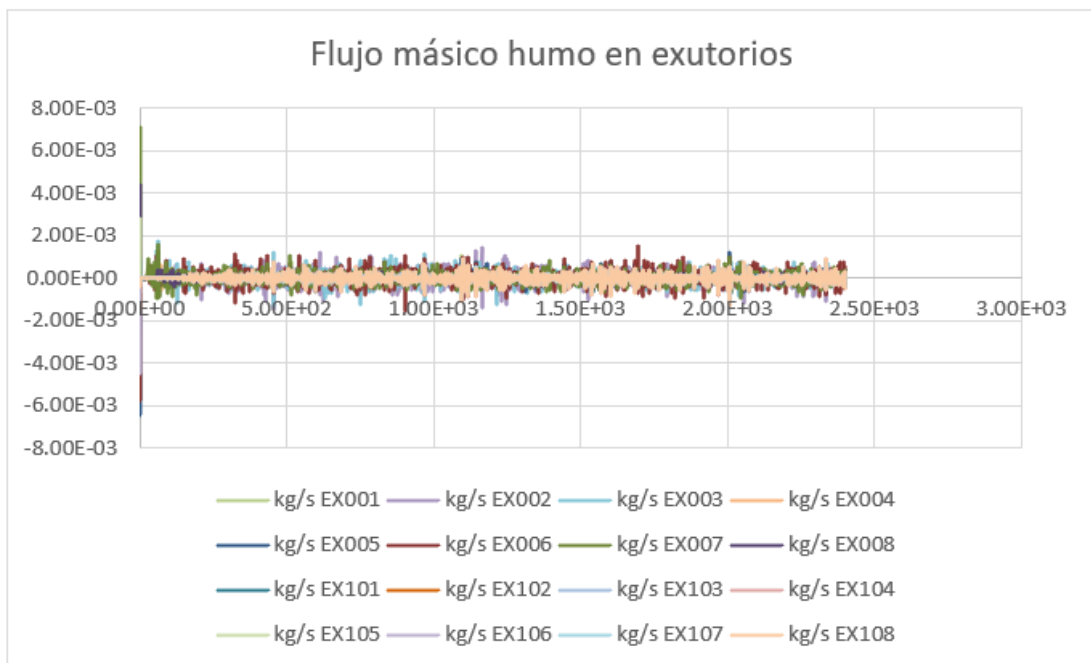


Temperatura



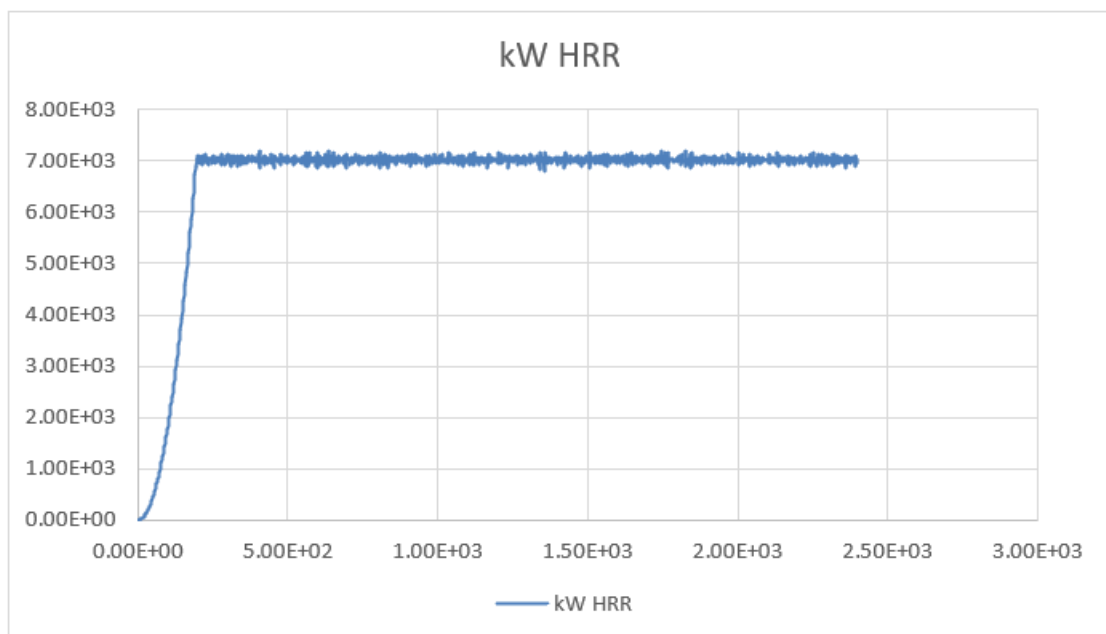


Flujo de Humo en Exutorios (0 kg/s)





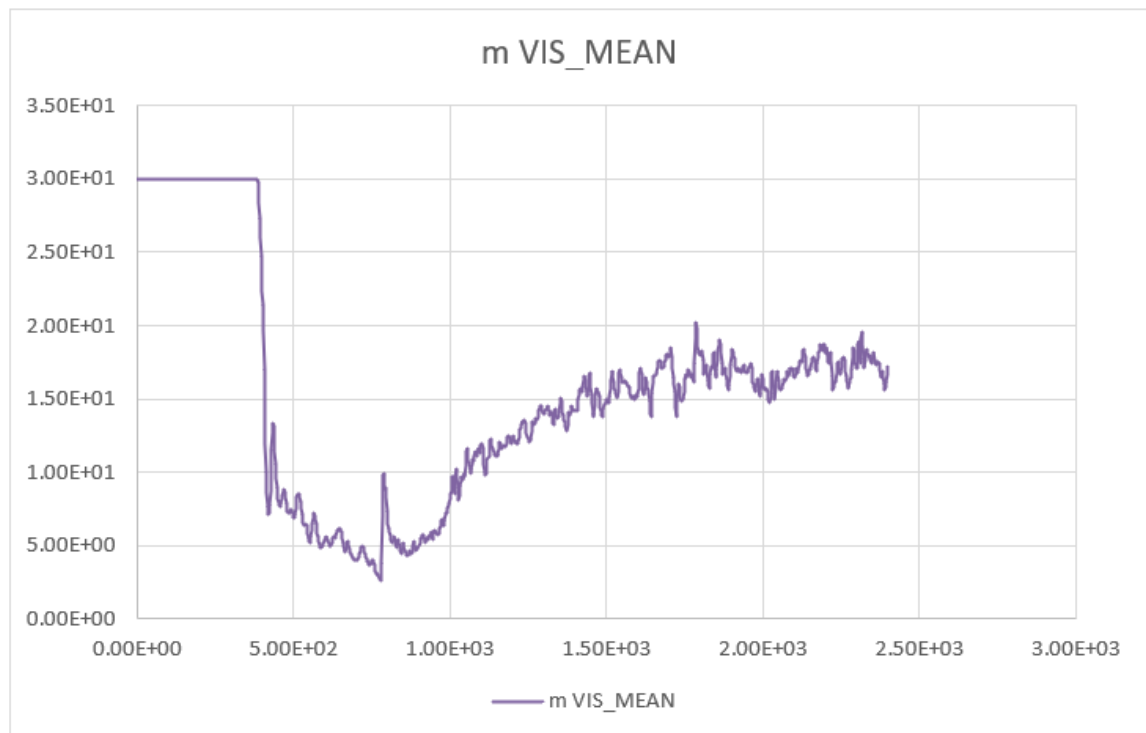
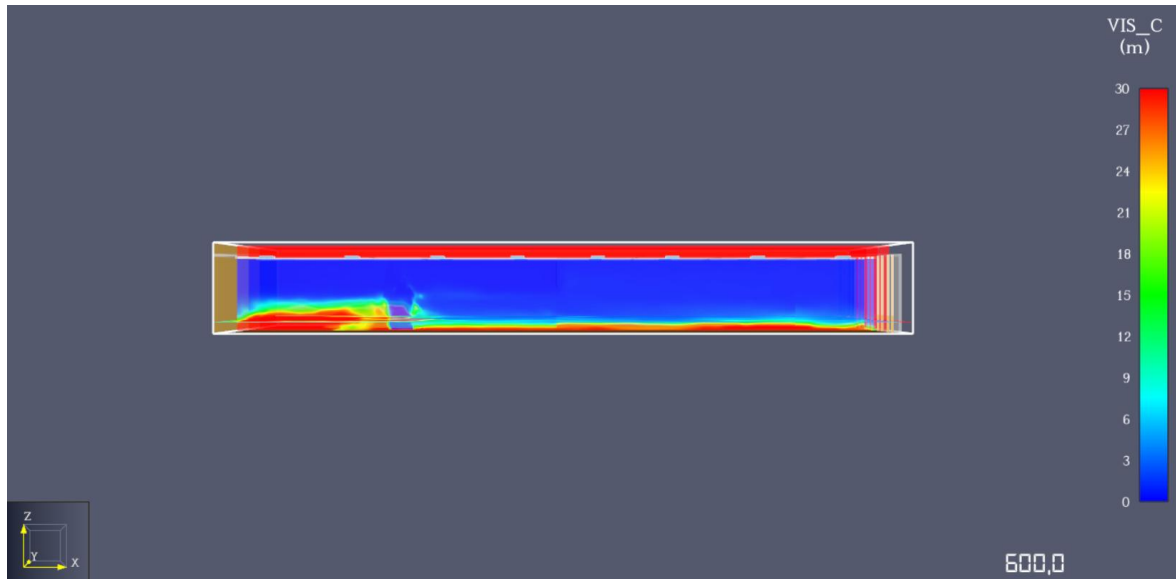
HRR

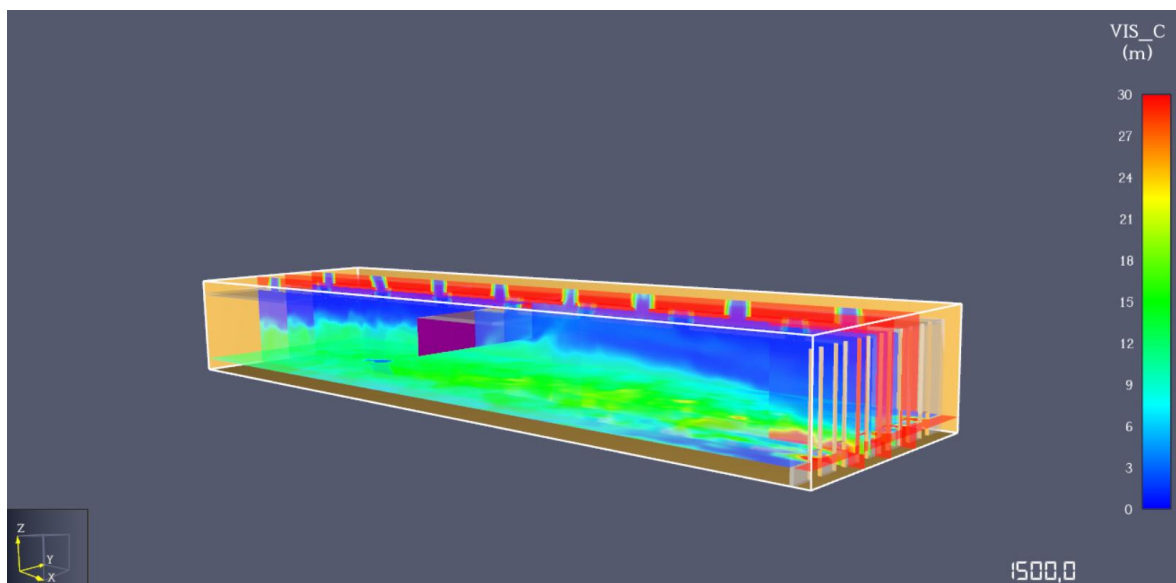
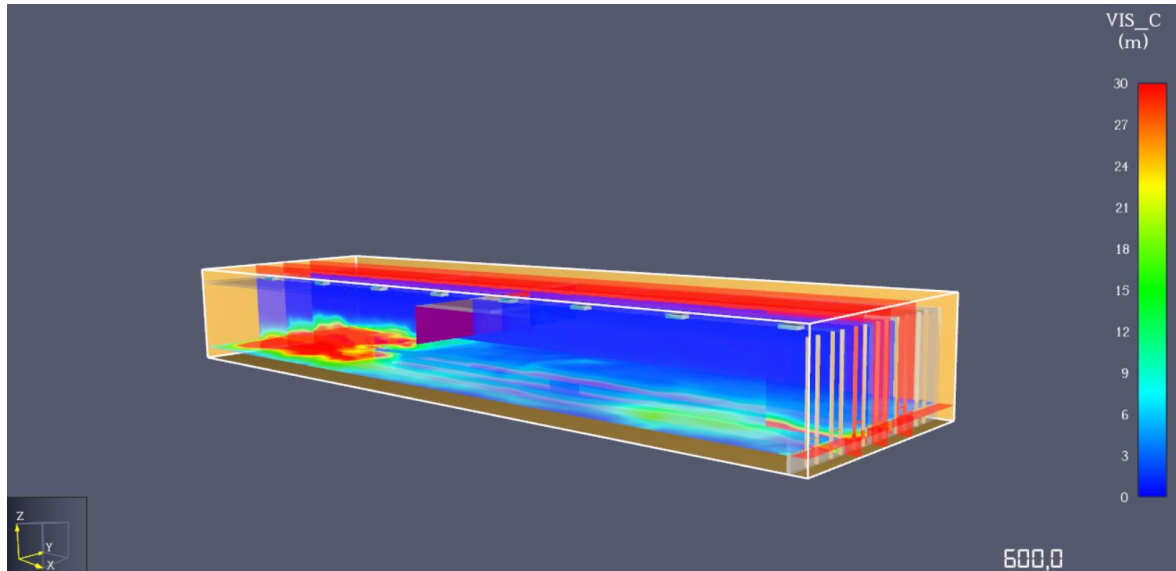


Caso 2, 4PU-O2a

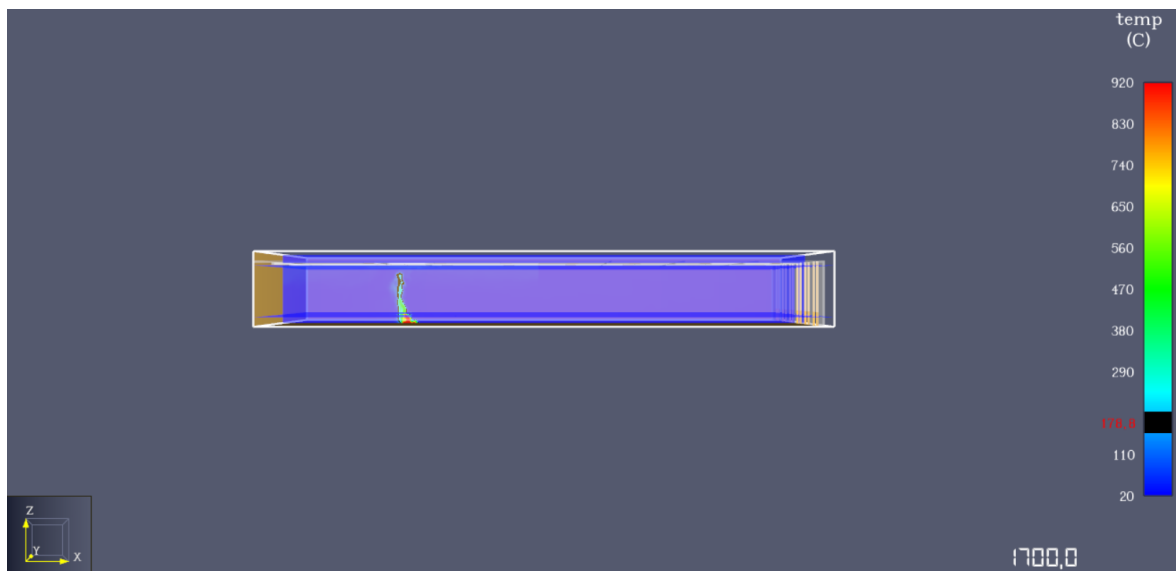
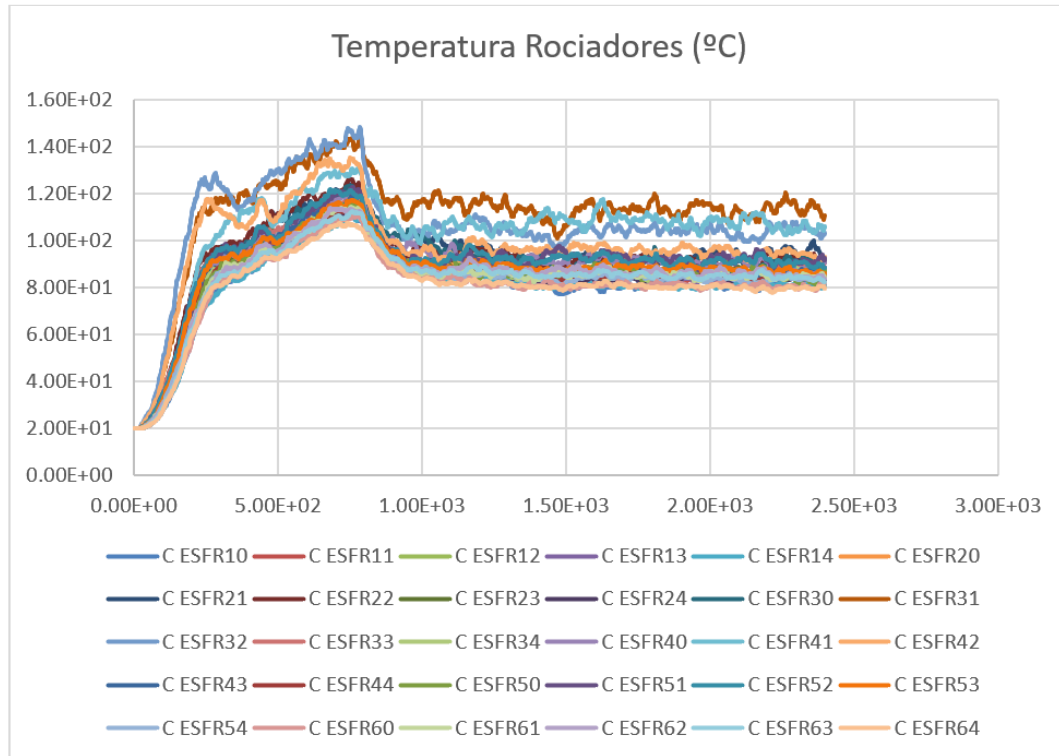
Se trata del caso de diseño prescriptivo ultrarrápido, donde se sigue la segunda norma de activación del sistema, donde se activa a los 10 minutos

Visibilidad:

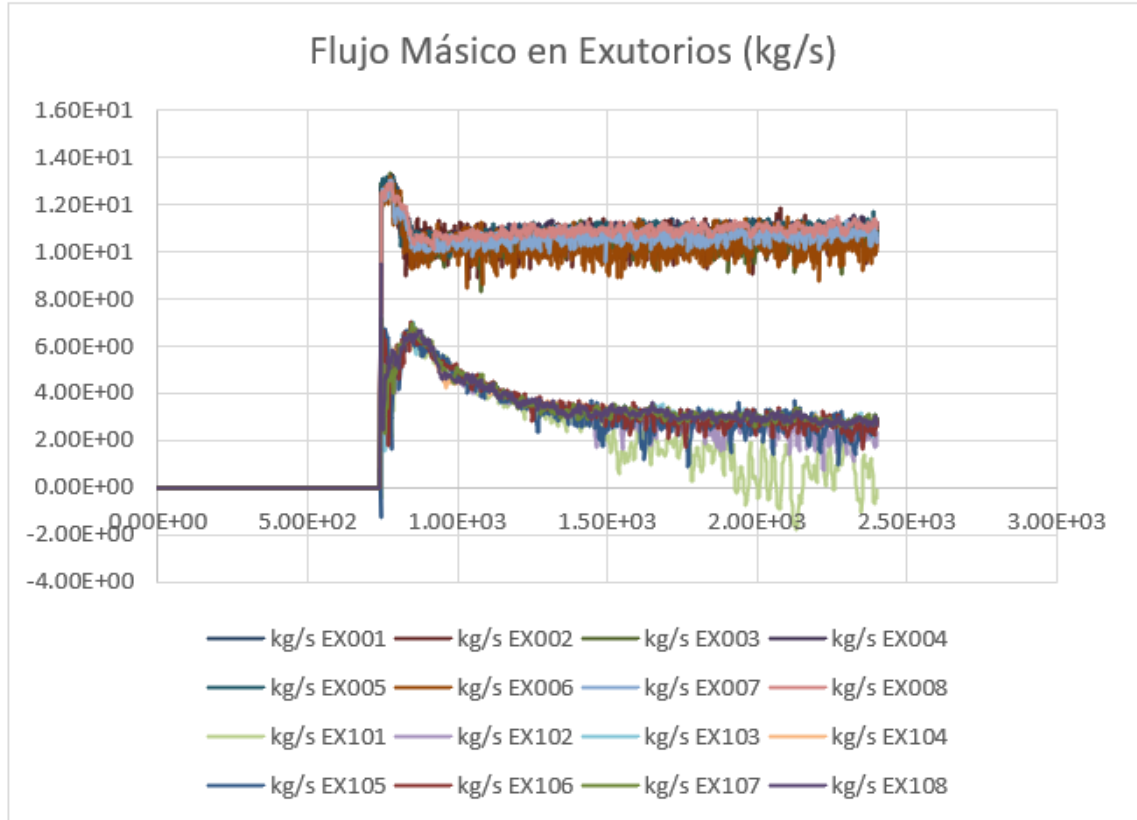




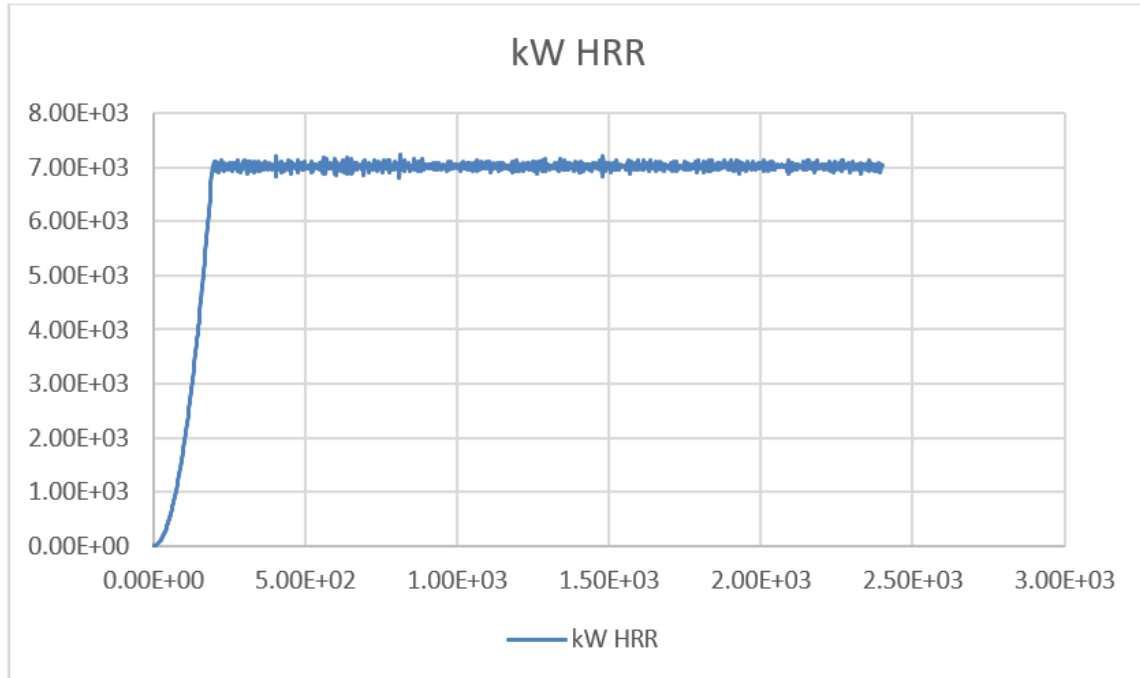
Temperatura:



Flujo Másico Exutorios:

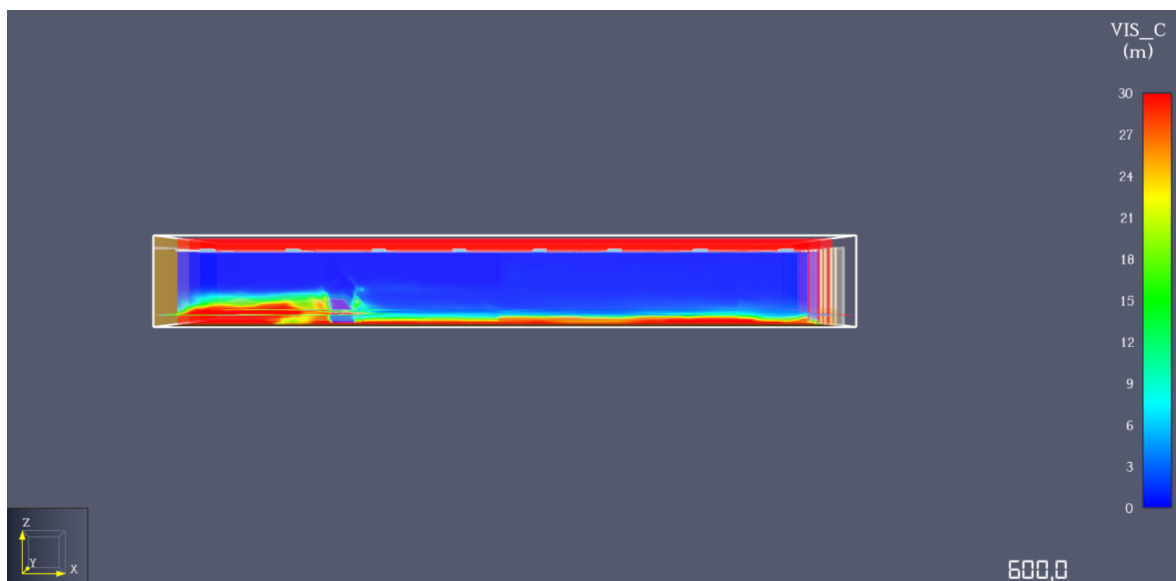


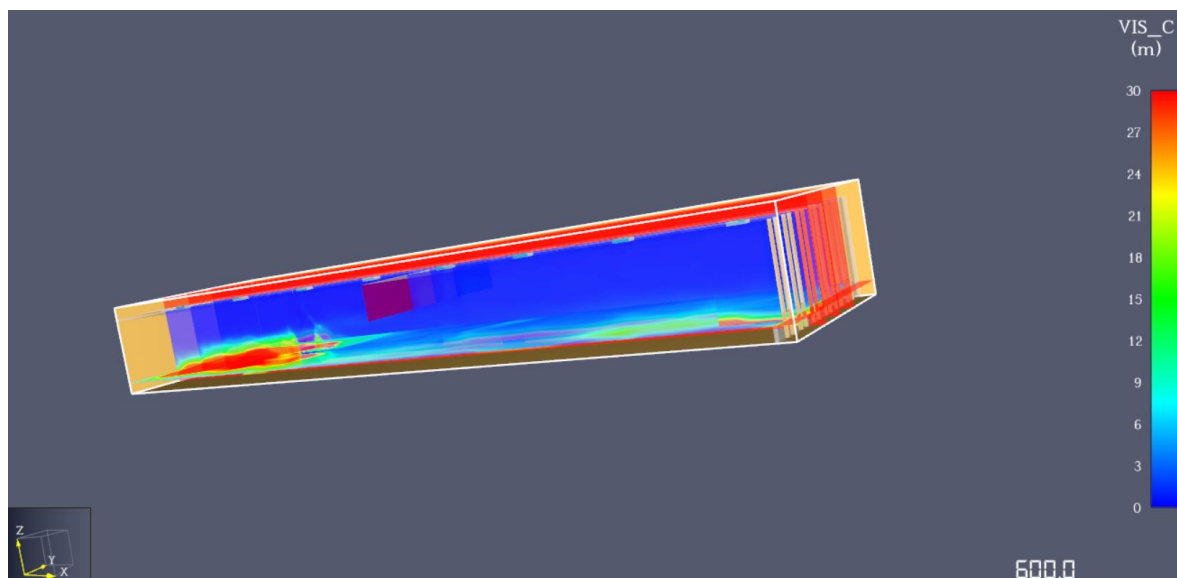
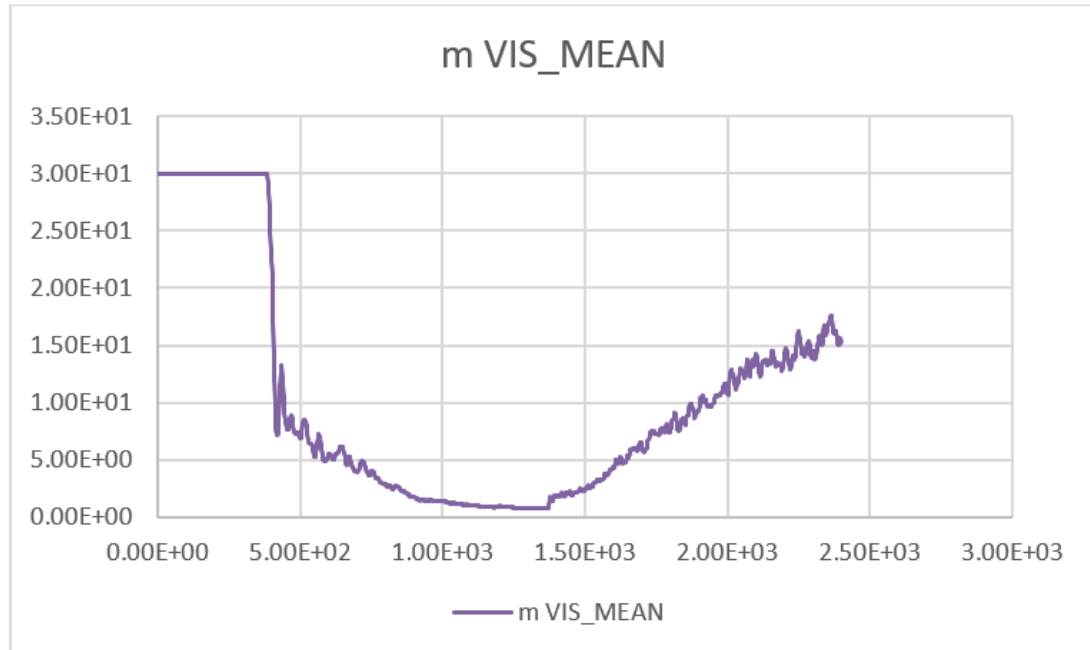
HRR:

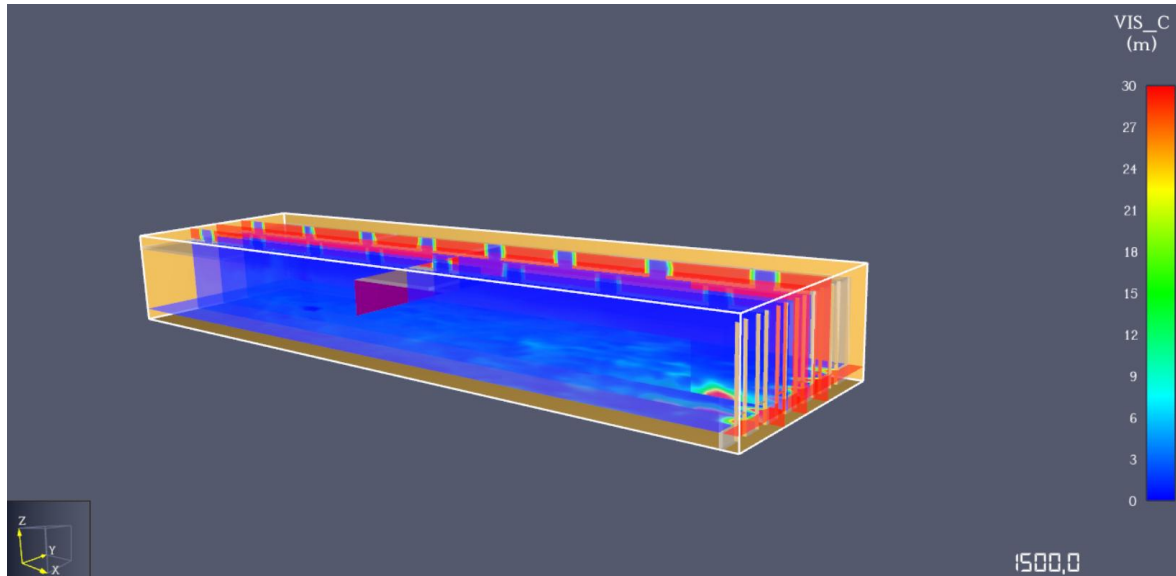


Caso 3, 4PU-O2b

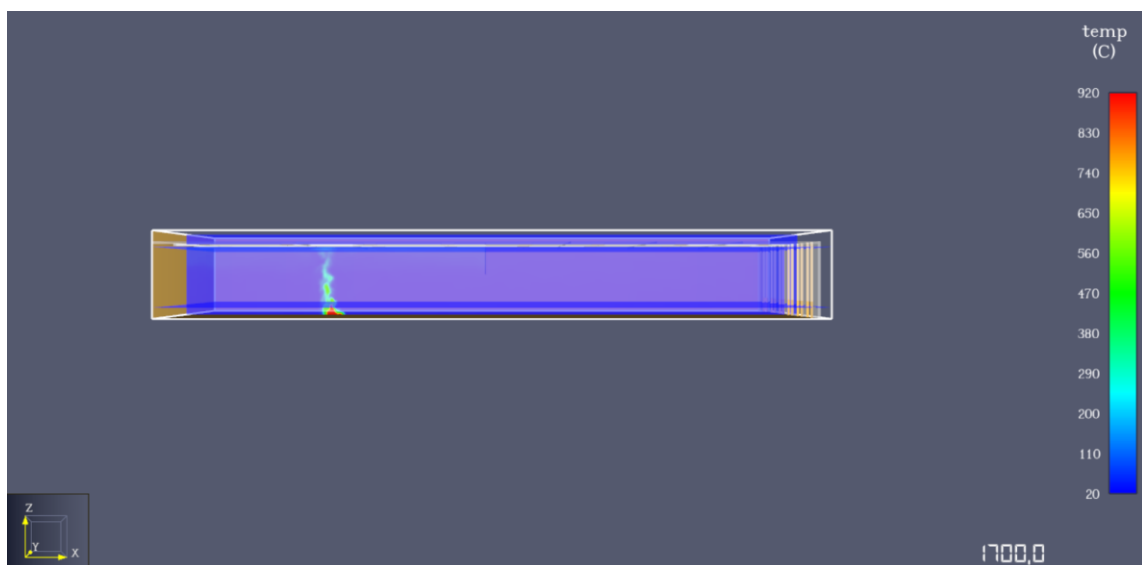
Visibilidad:

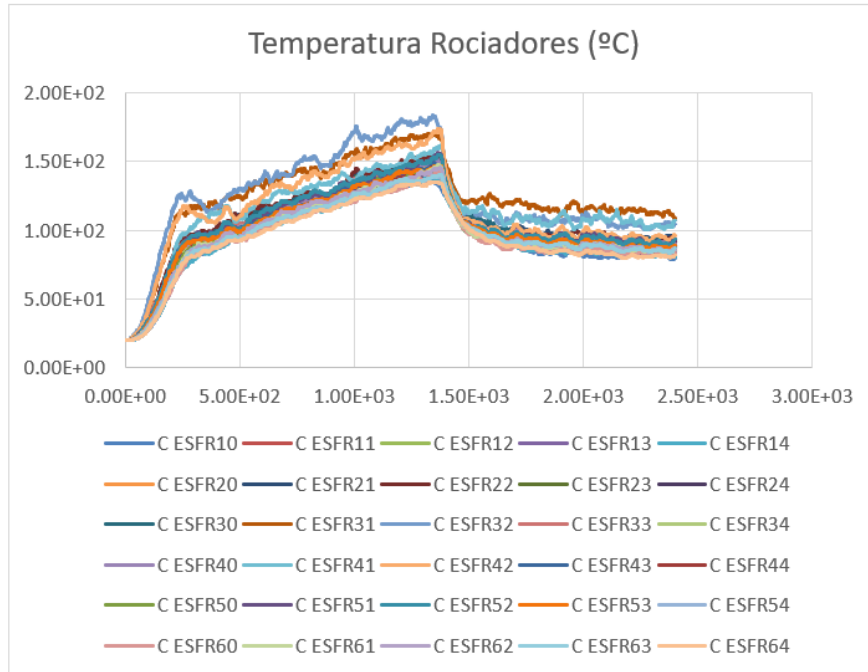






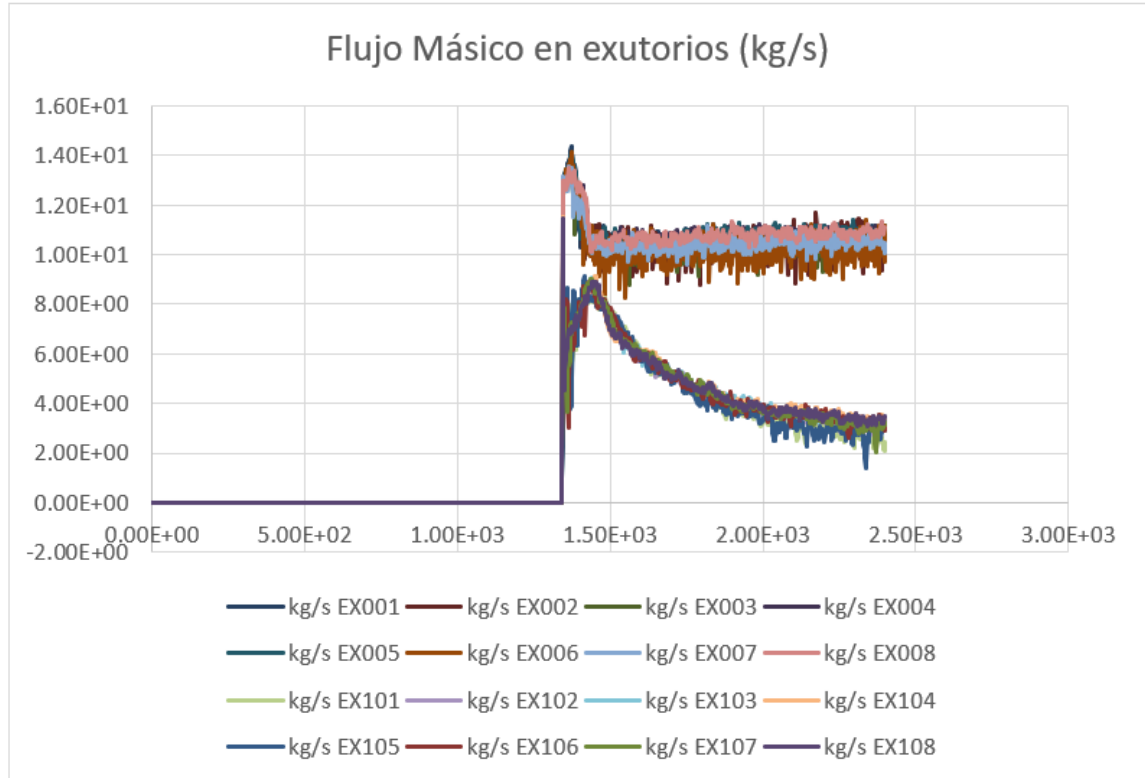
Temperatura:



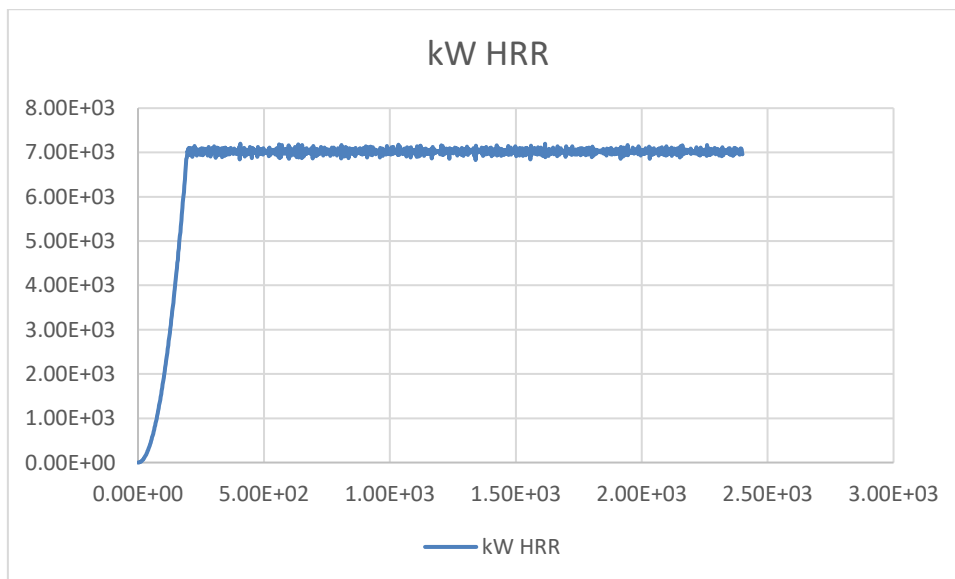


Flujo Másico Exutorios:



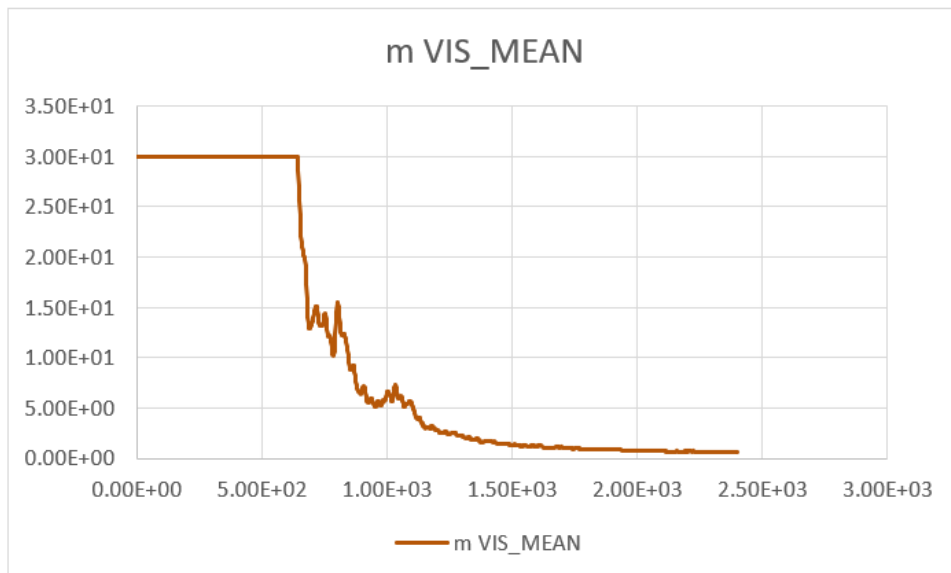
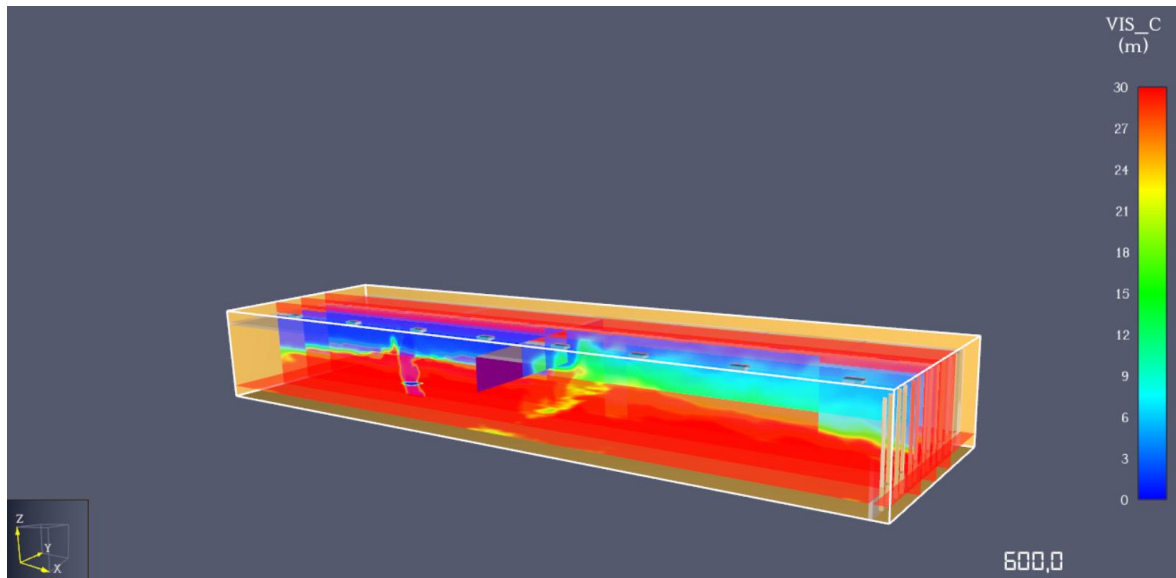


HRR:

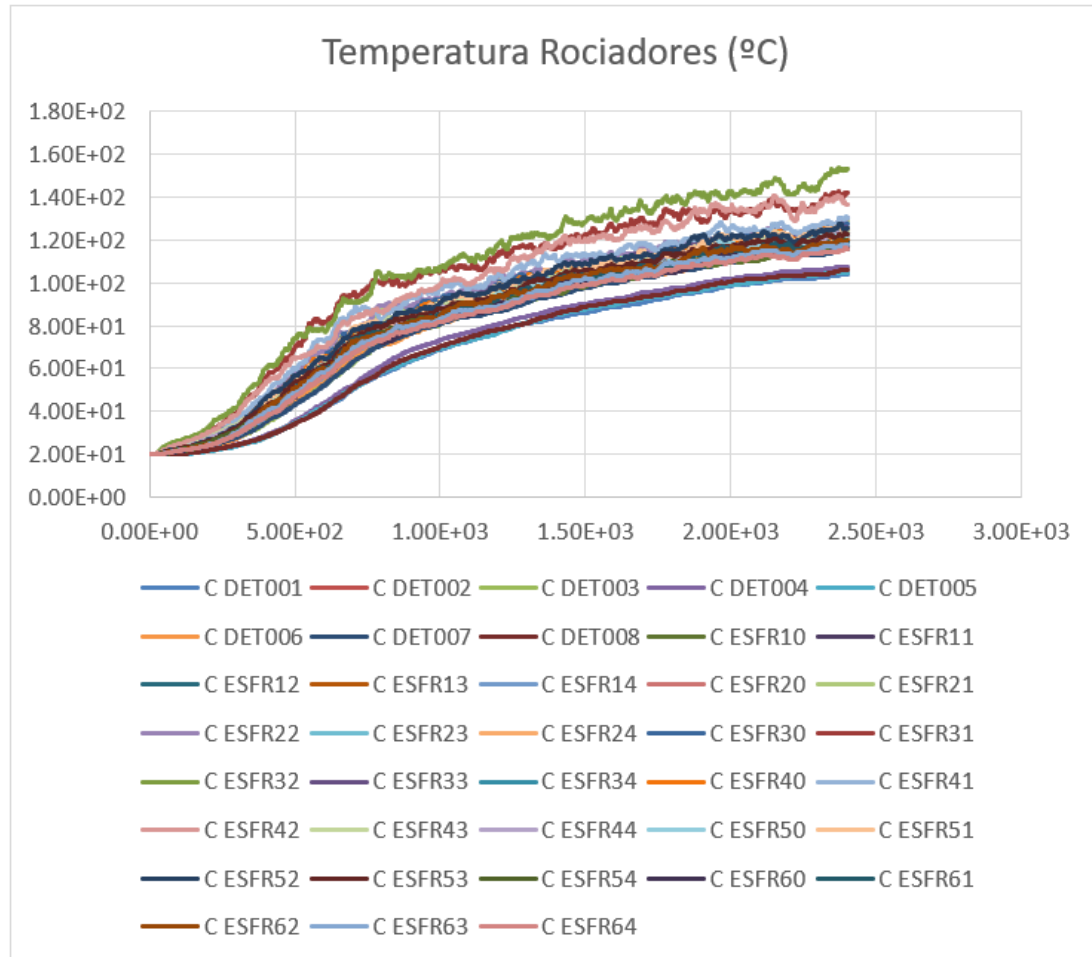


Caso 4, 4PM-O1

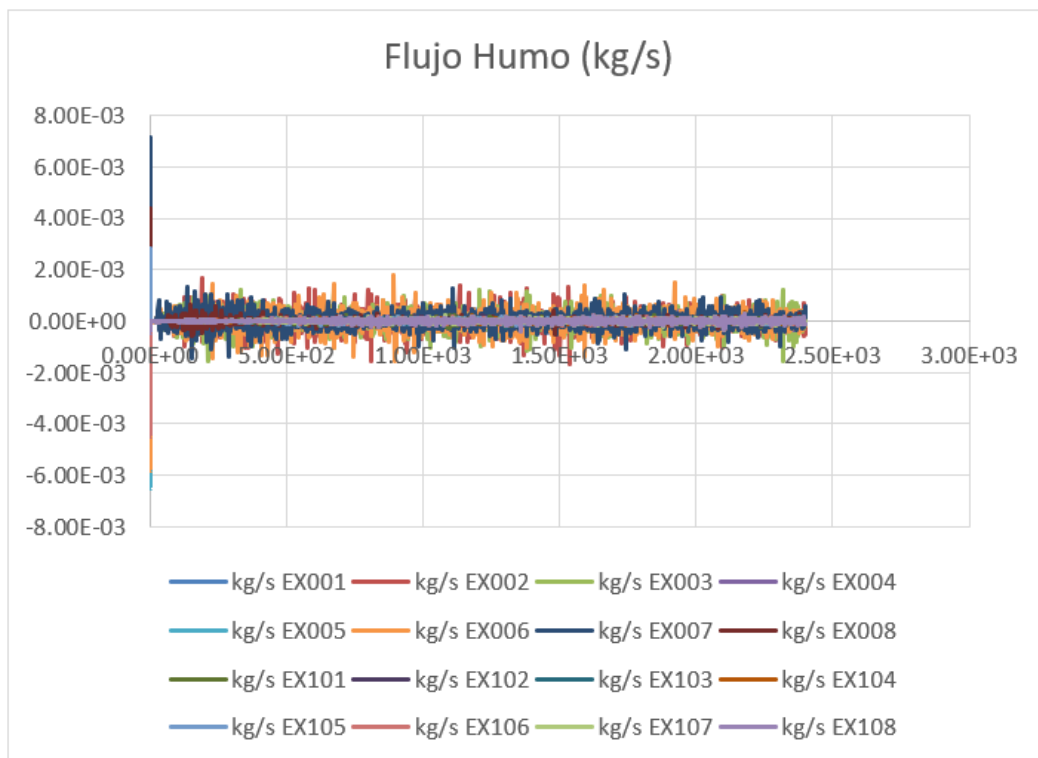
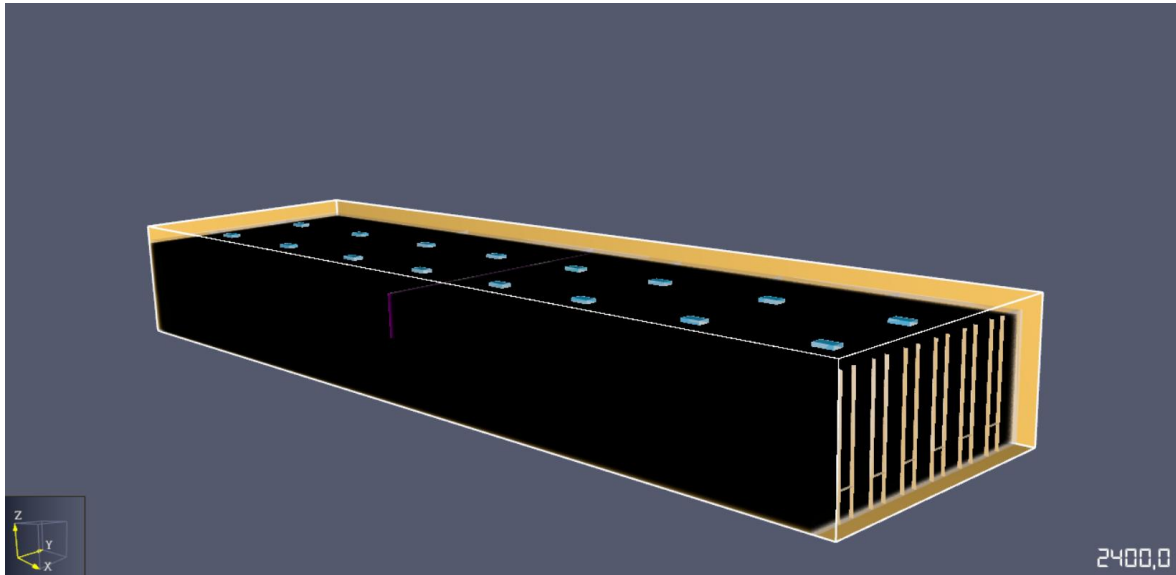
Visibilidad:



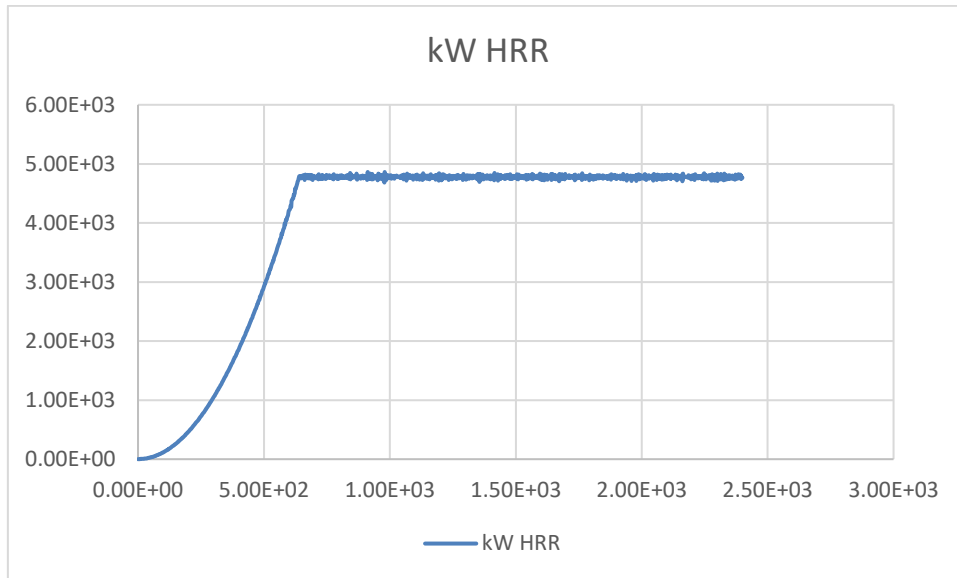
Temperatura:



Flujo Másico Exutorios:

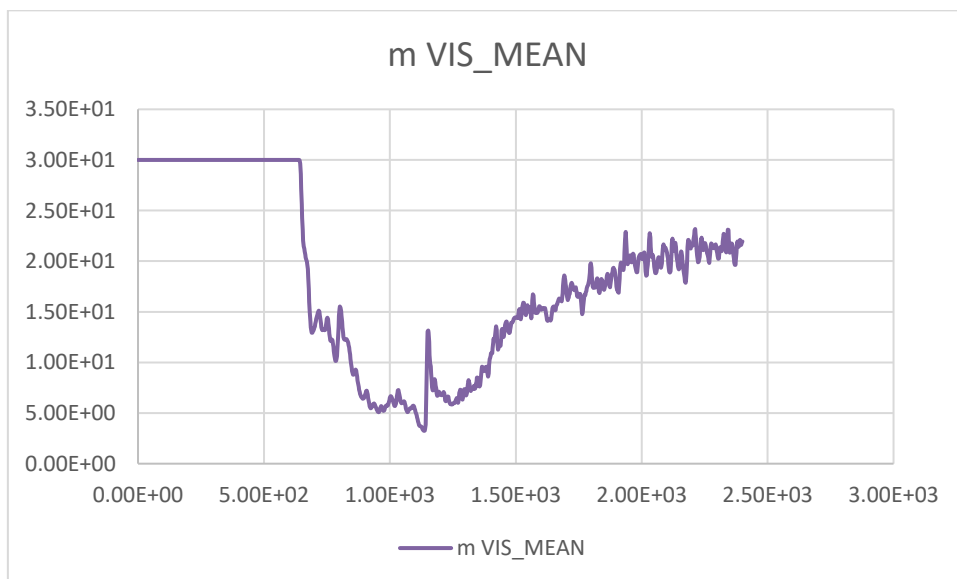


HRR:

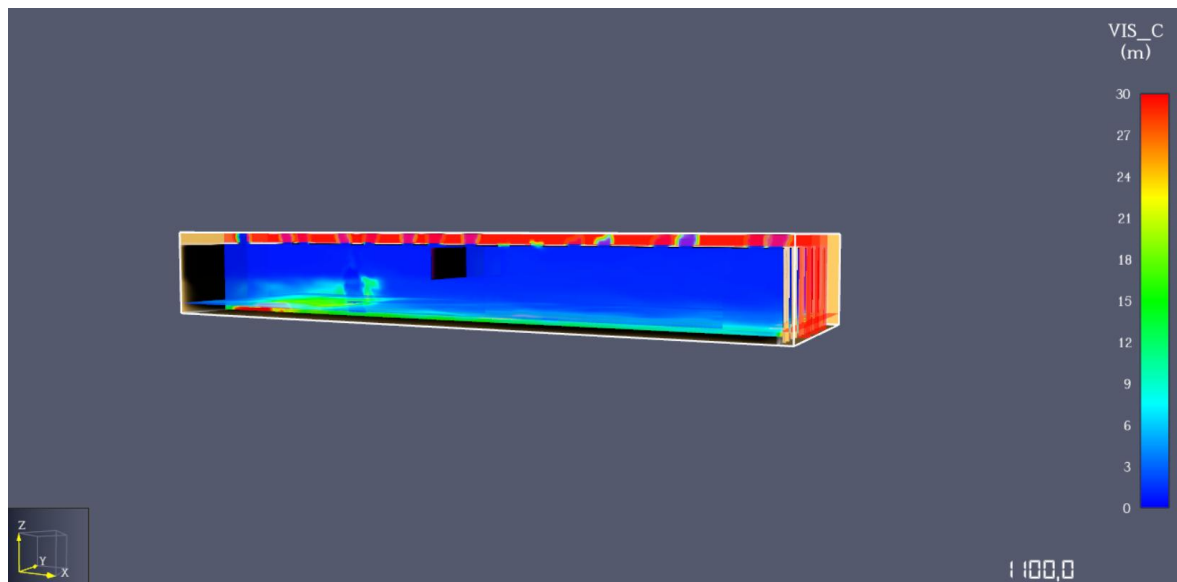


Caso 5, 4PM-O2a

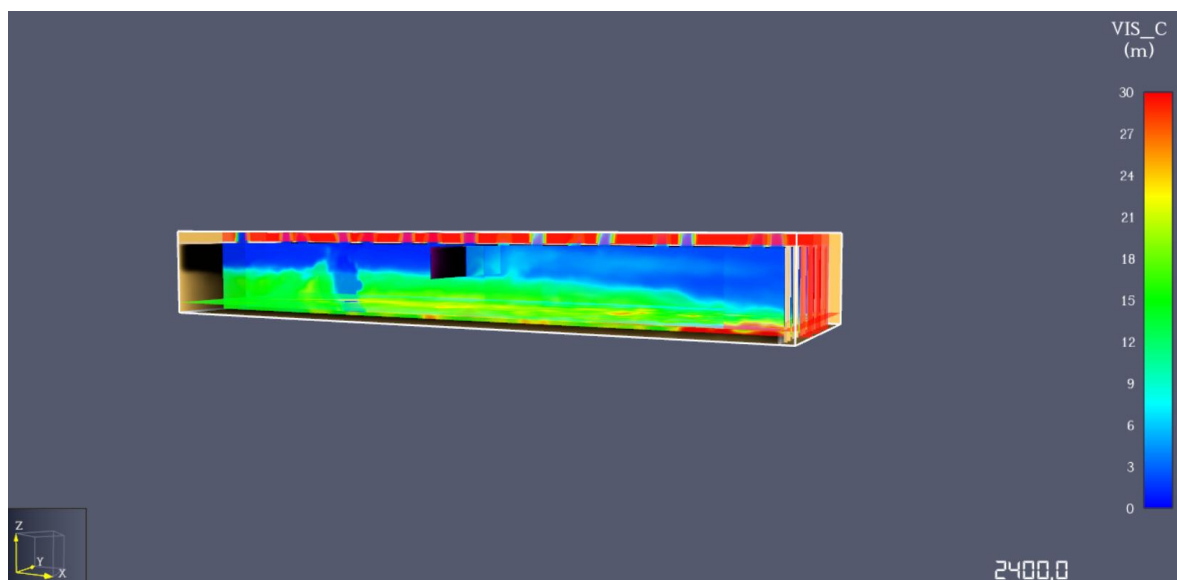
Visibilidad:



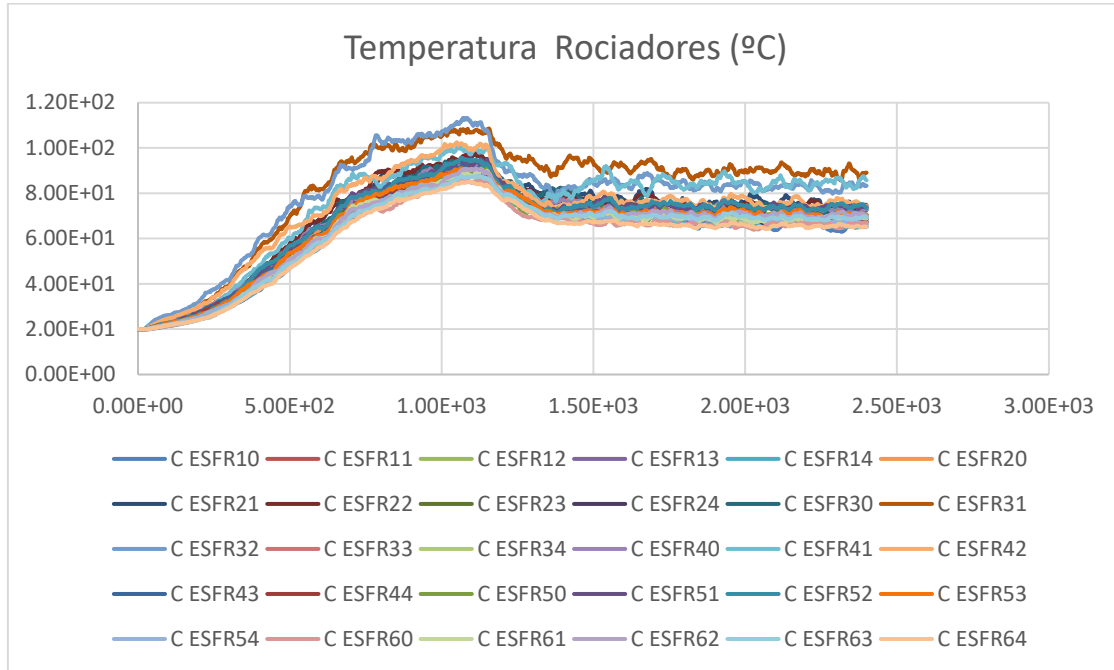
Visibilidad en el momento de apertura:



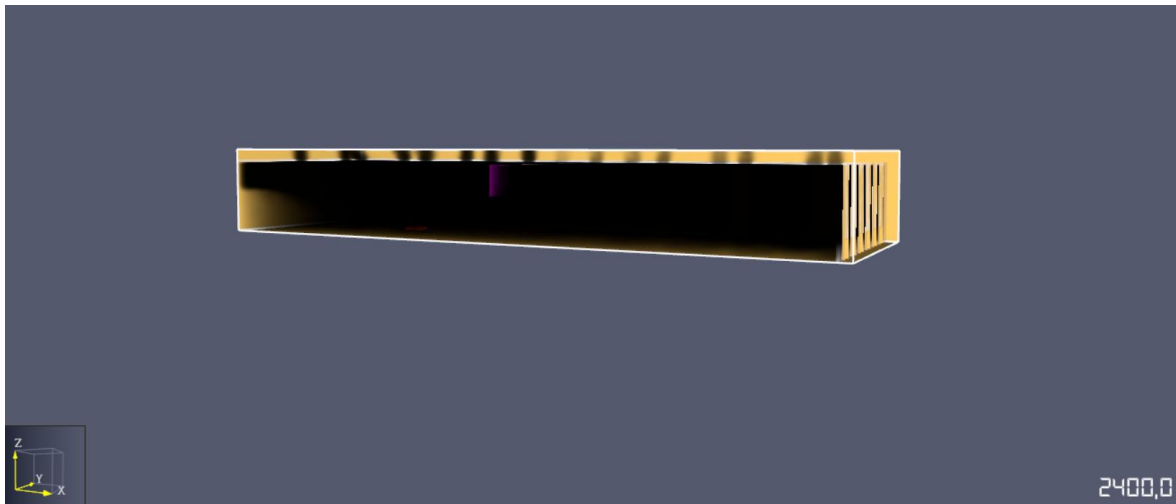
Visibilidad a los 40 minutos:

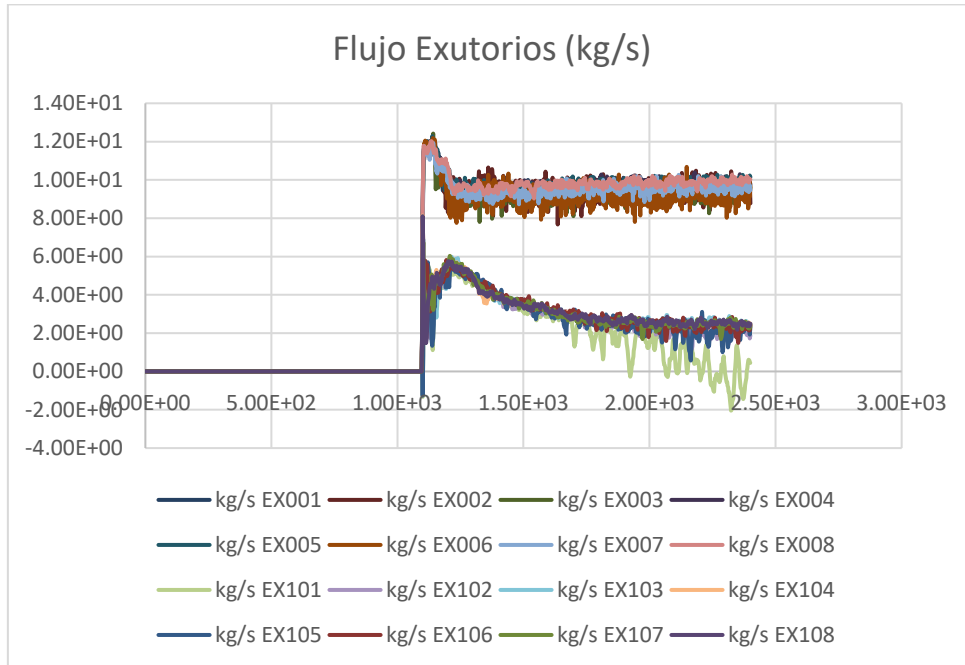


Temperatura:

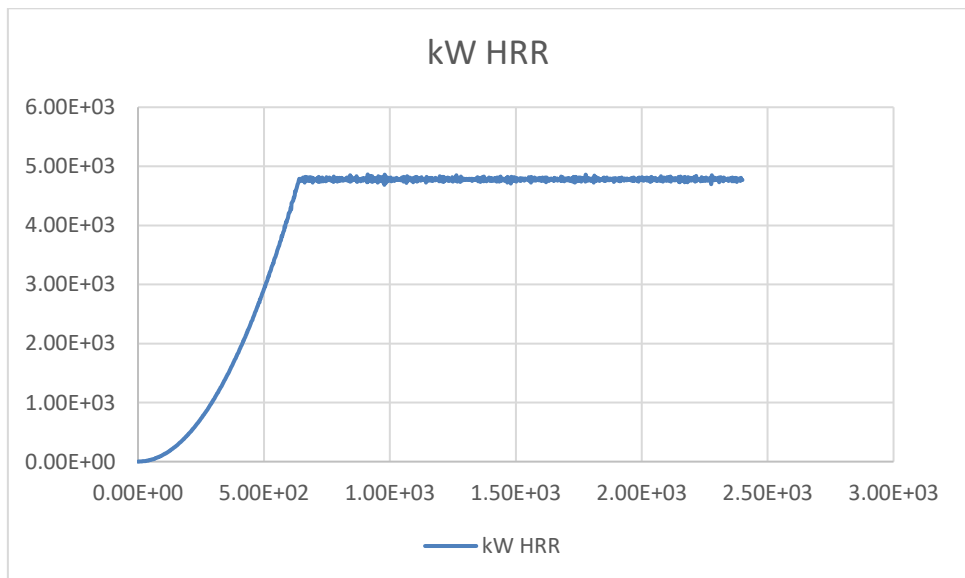


Flujo Másico Exitorios:



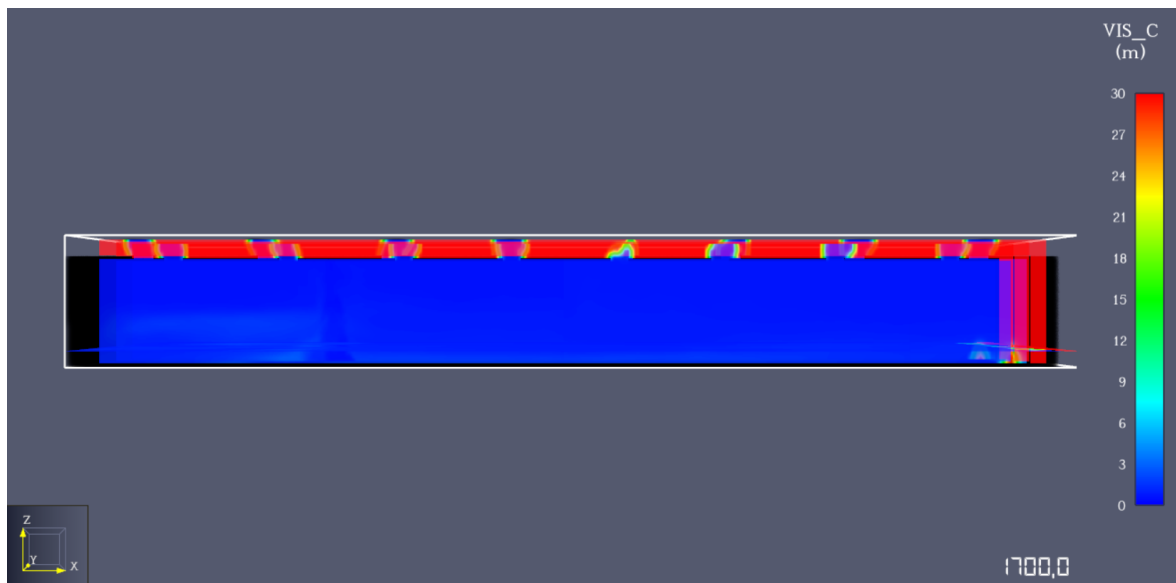
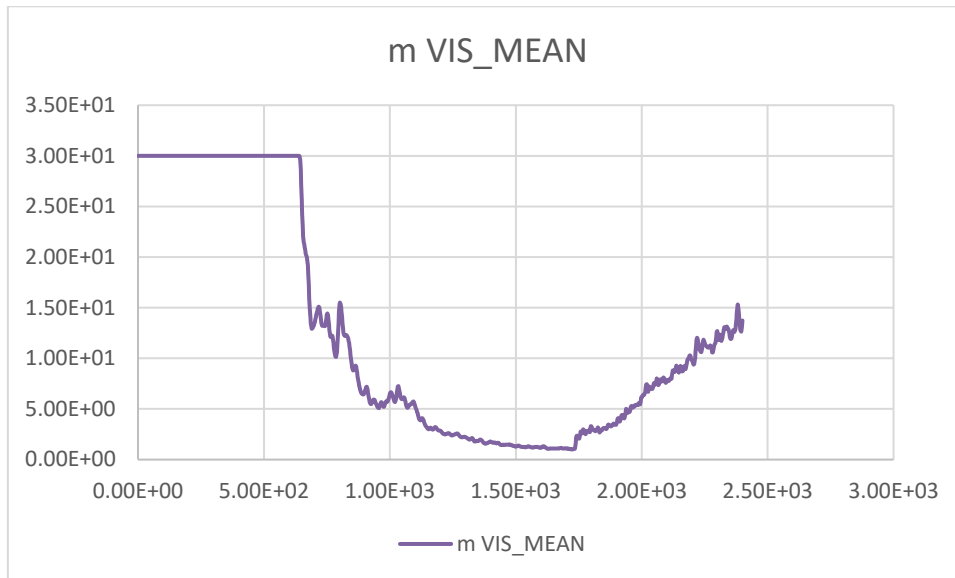


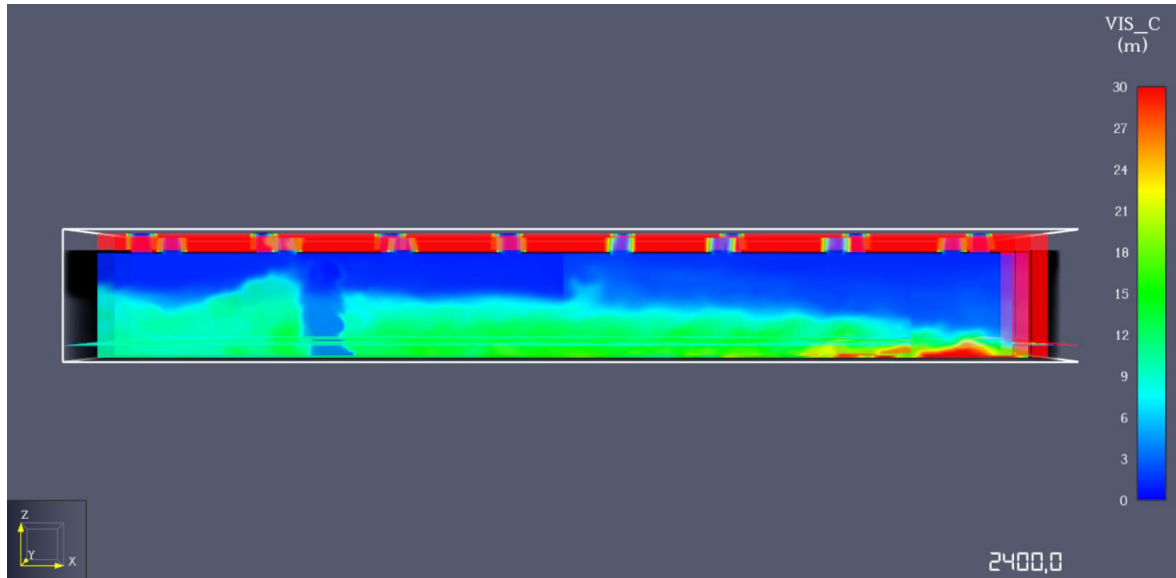
HRR:



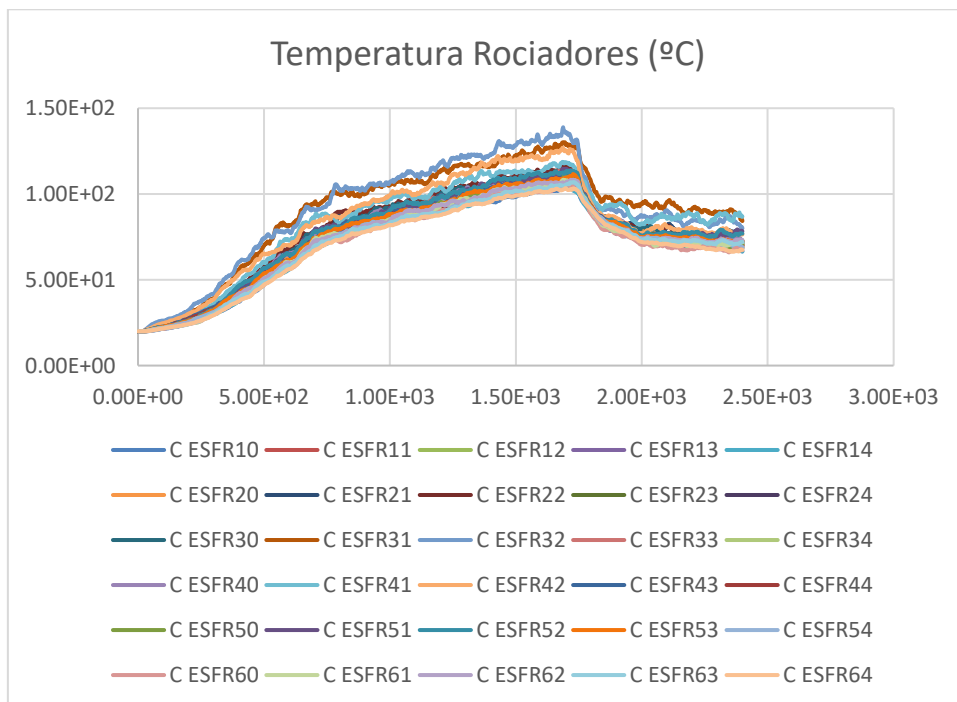
Caso 6, 4PM-O2b

Visibilidad:

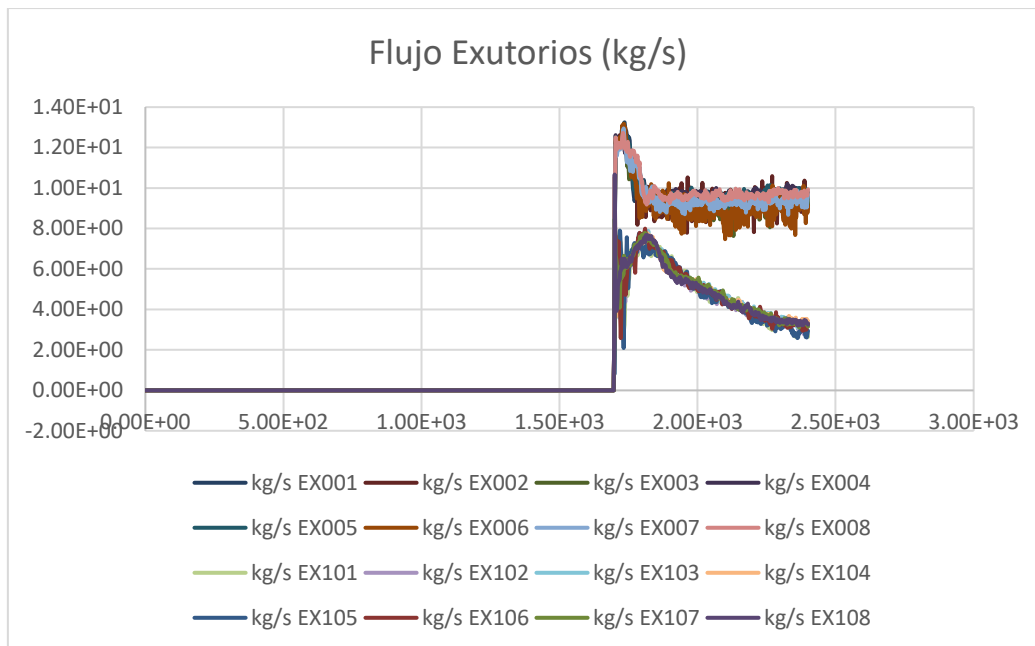
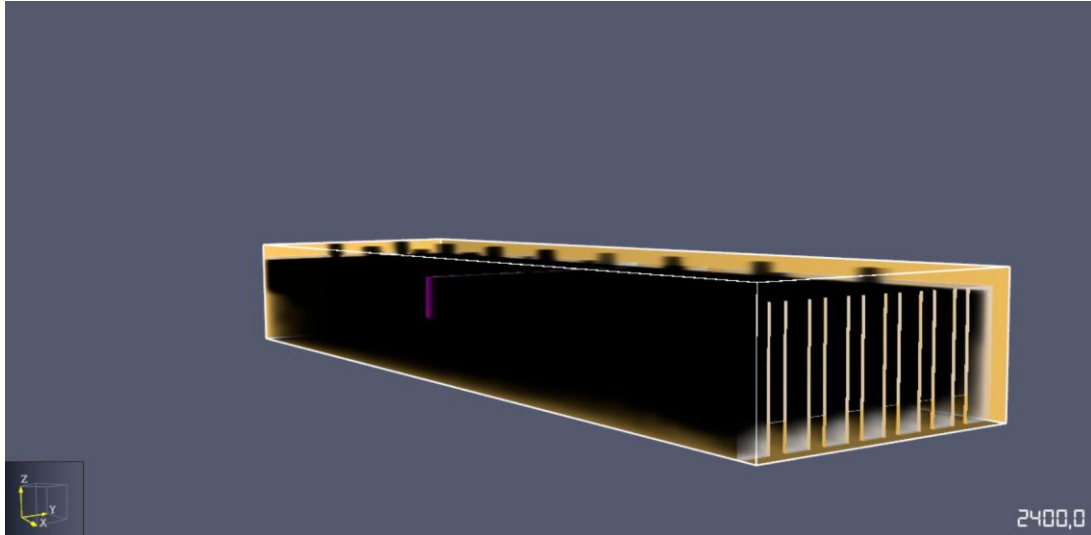




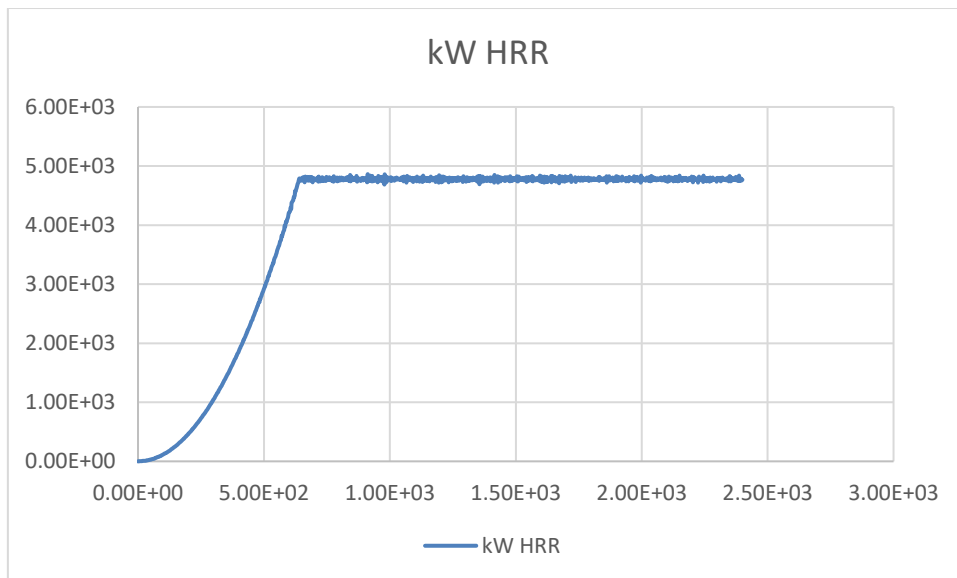
Temperatura:



Flujo Másico Exutorios:

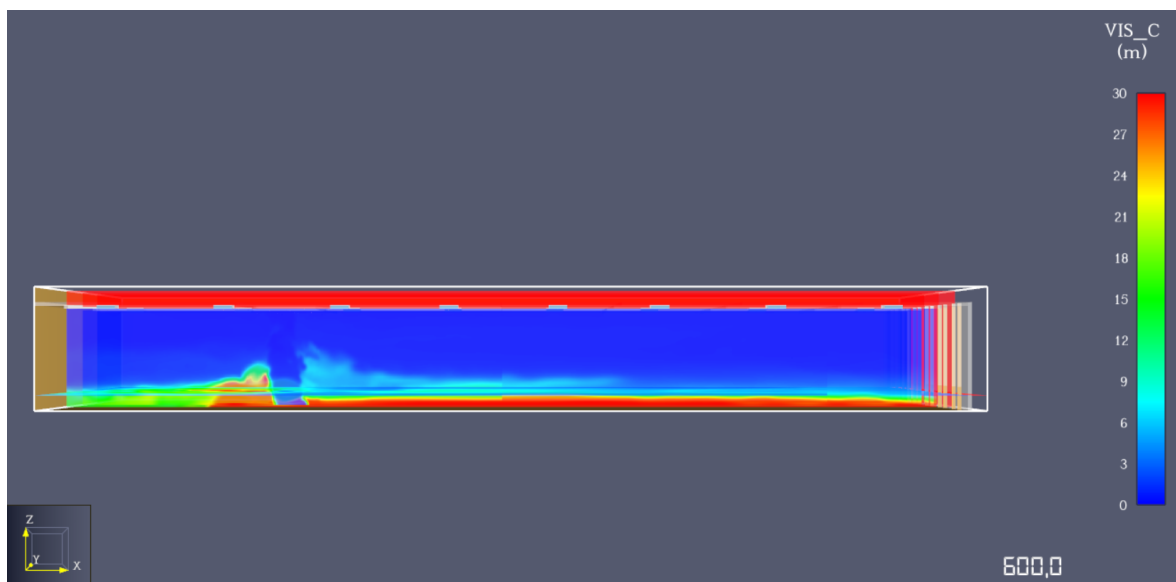
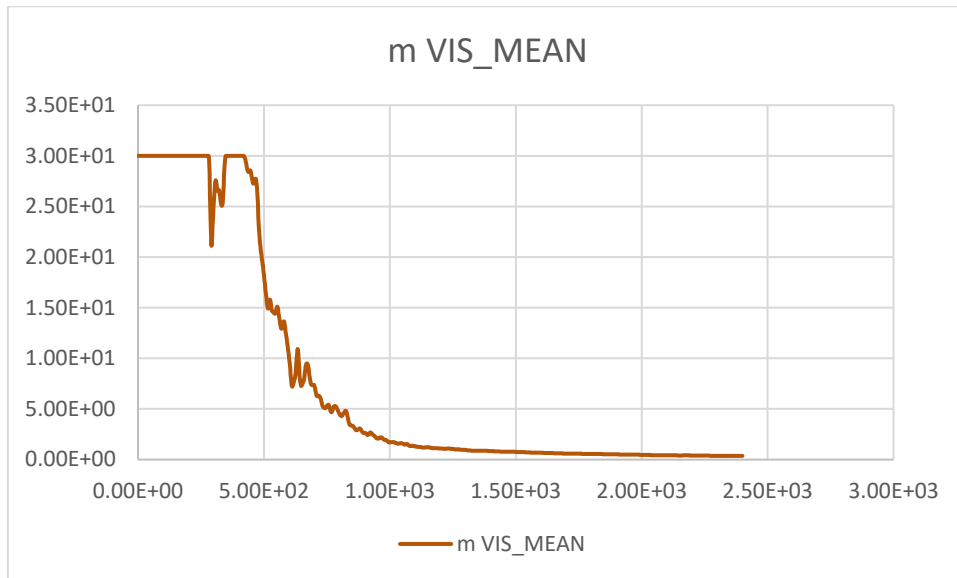


HRR:

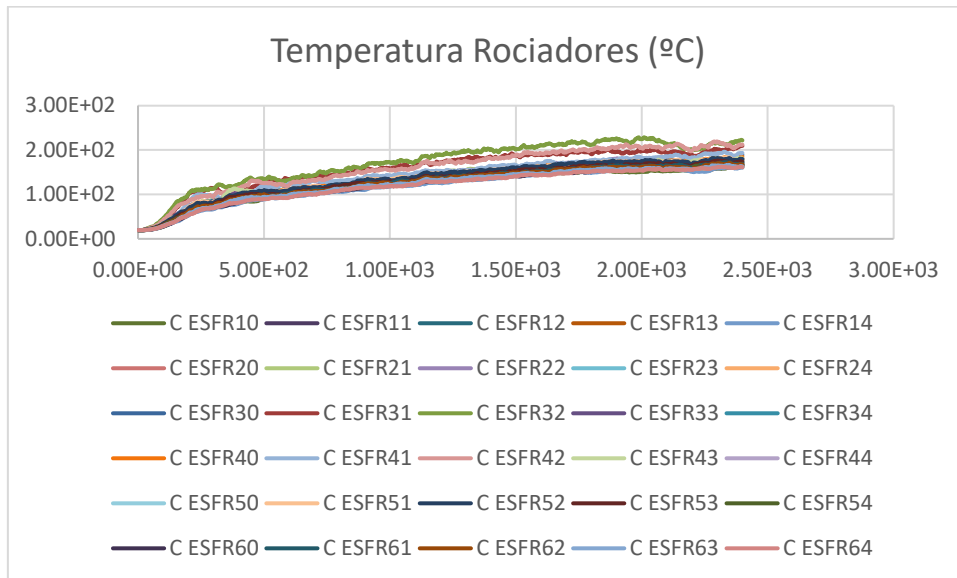


Caso 7, 4AU-O1

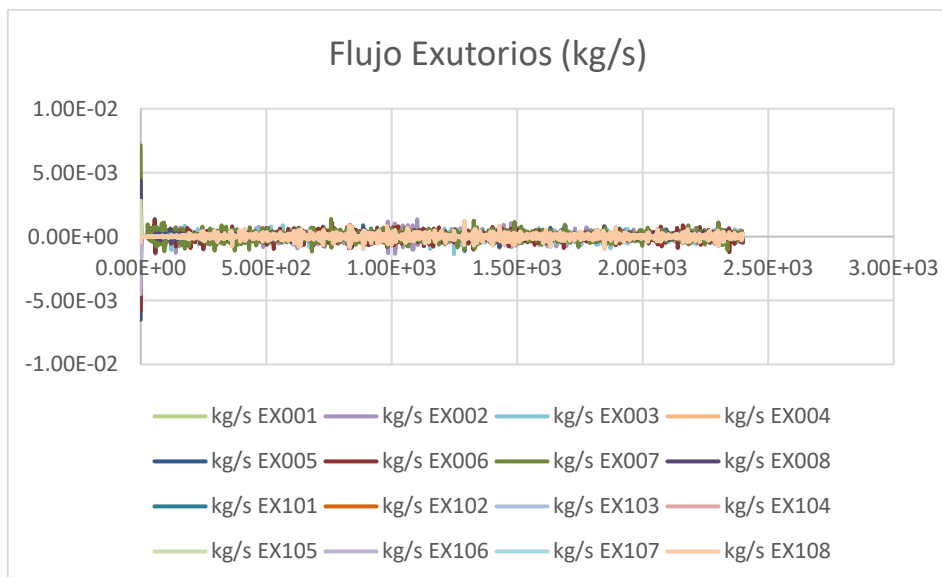
Visibilidad:

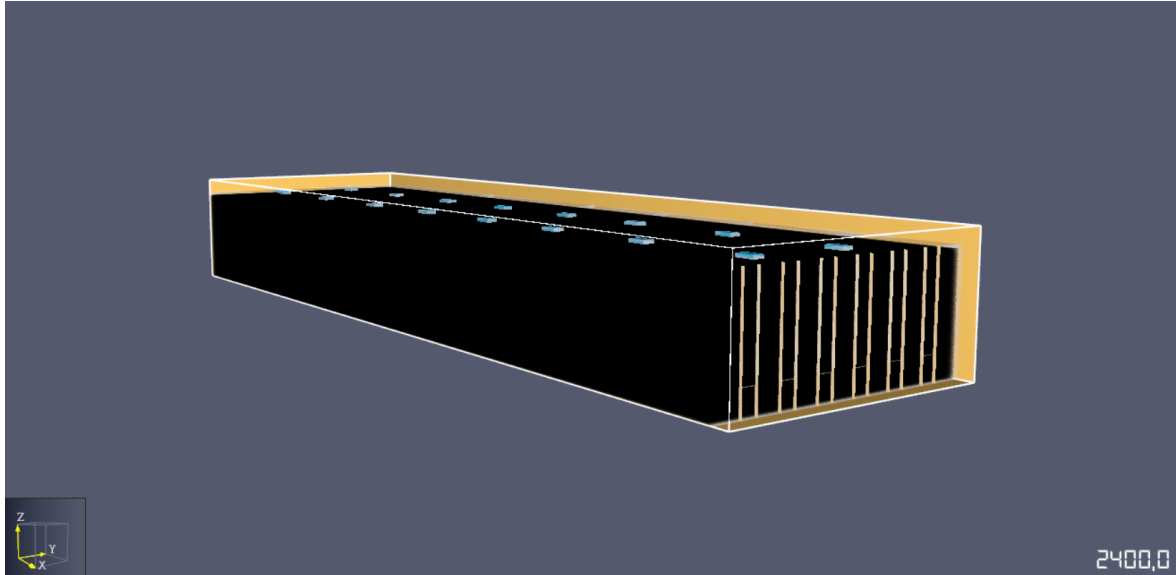


Temperatura:

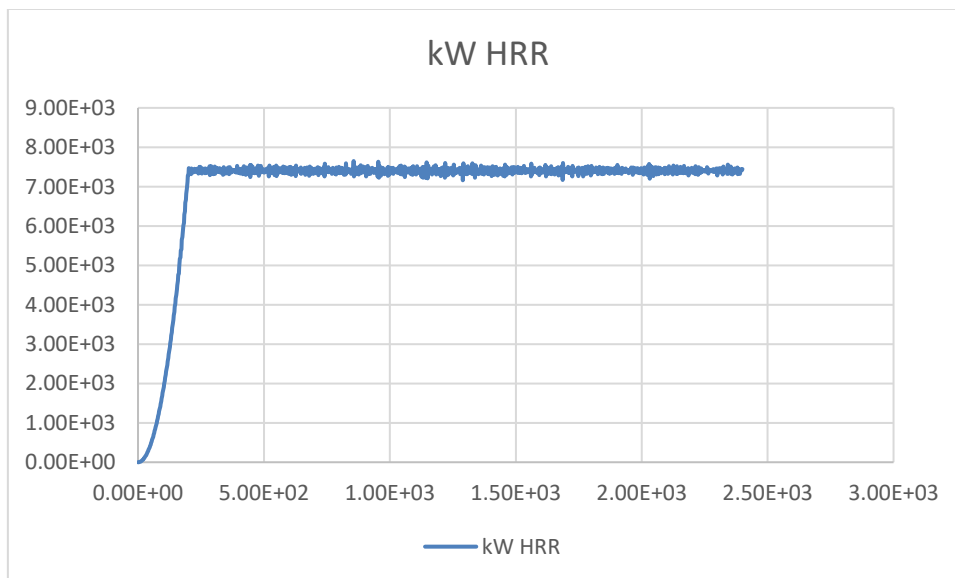


Flujo Másico Exutorios:





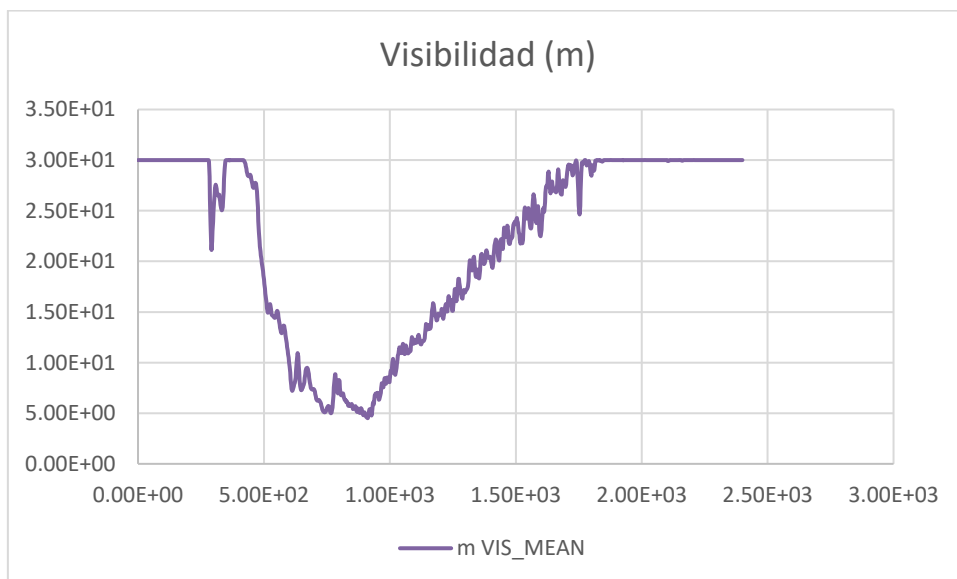
HRR:

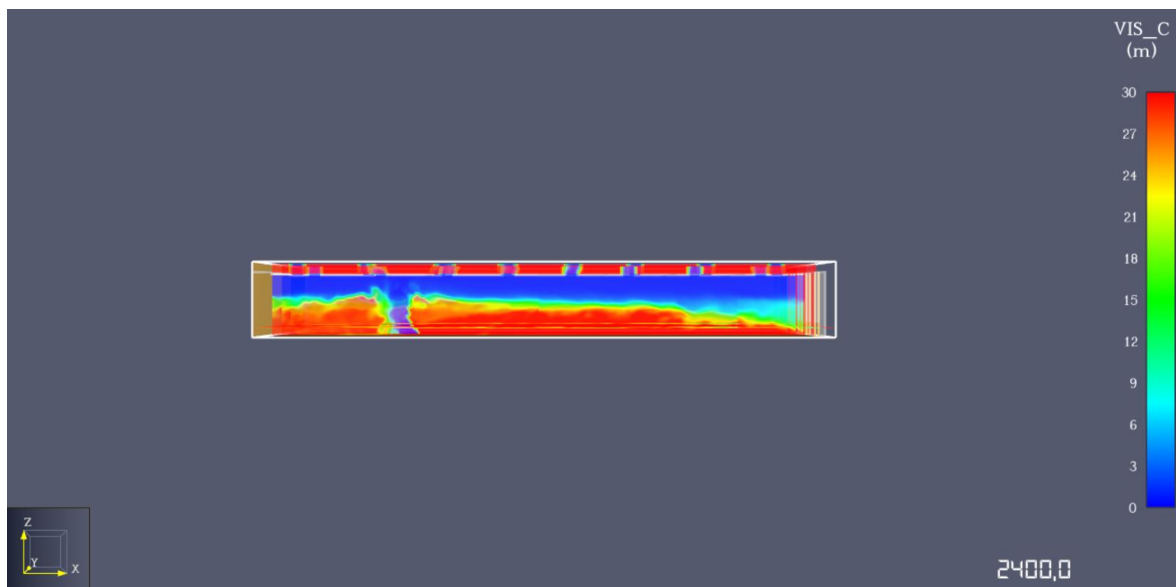
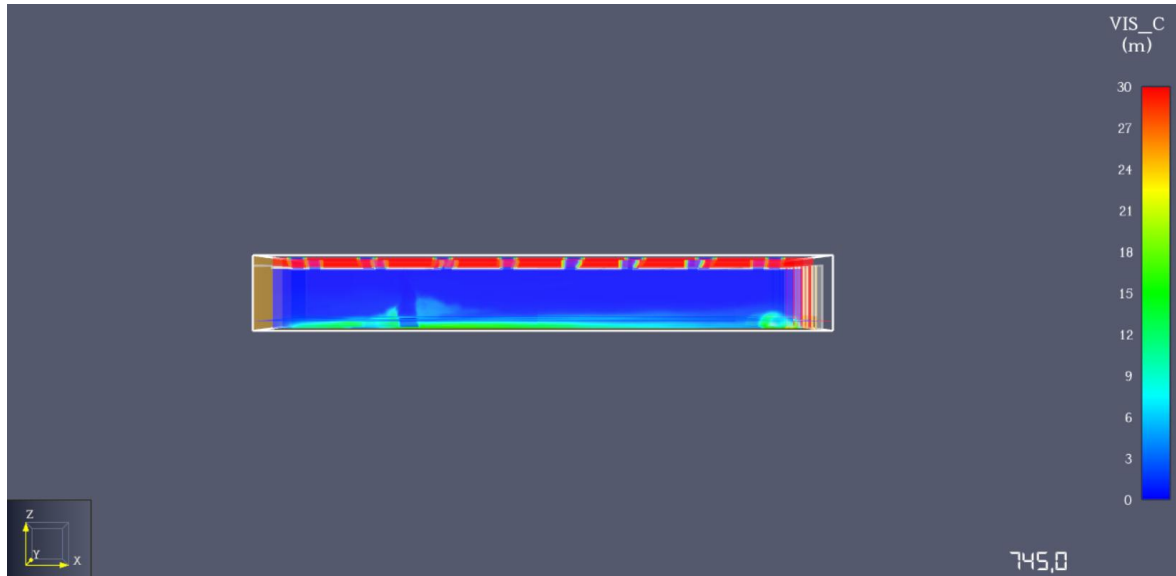




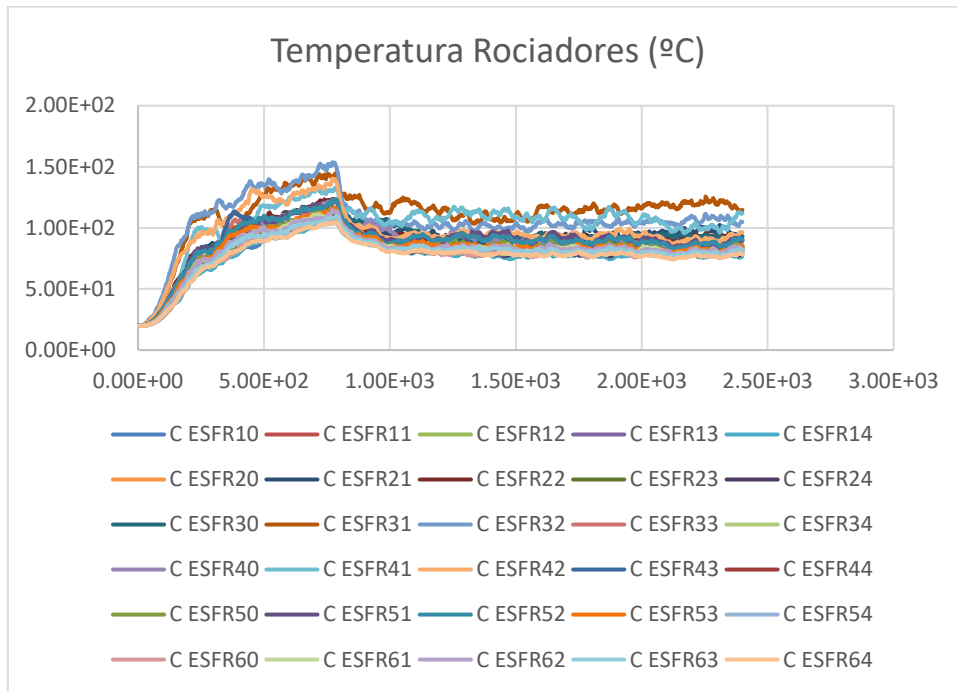
Caso 8, 4AU-O2a

Visibilidad:

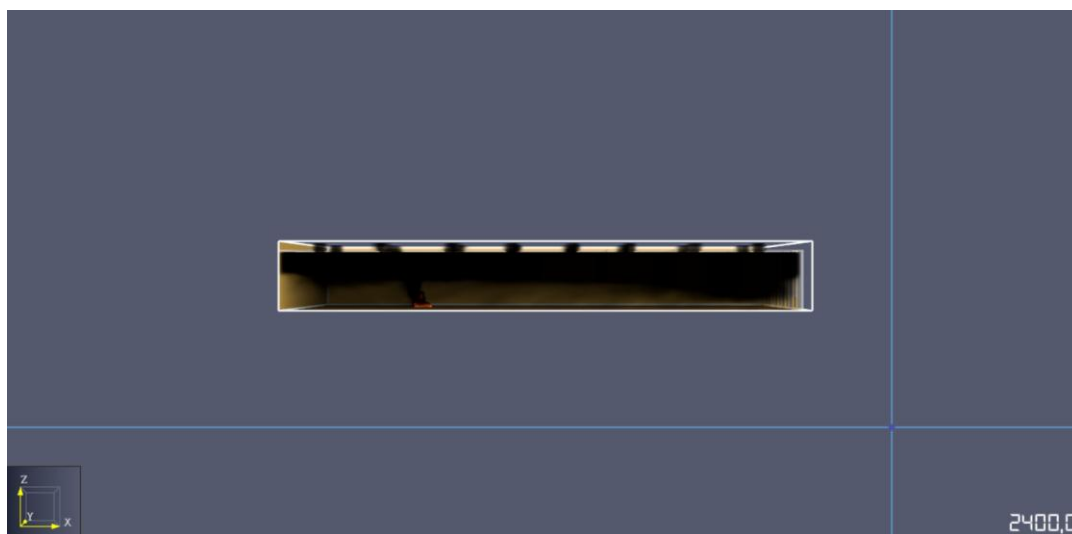


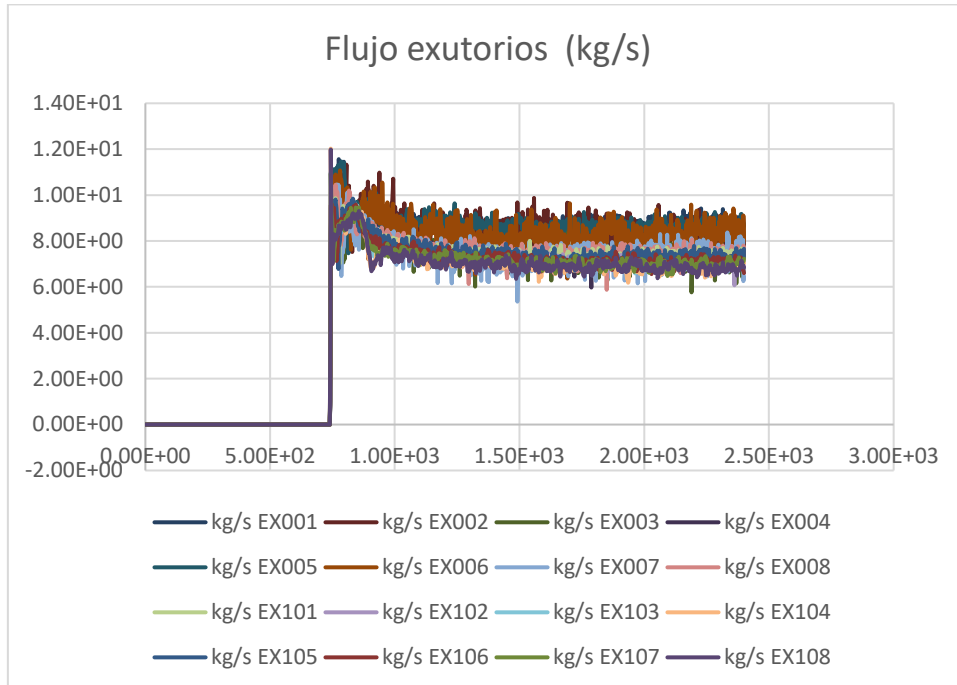


Temperatura:

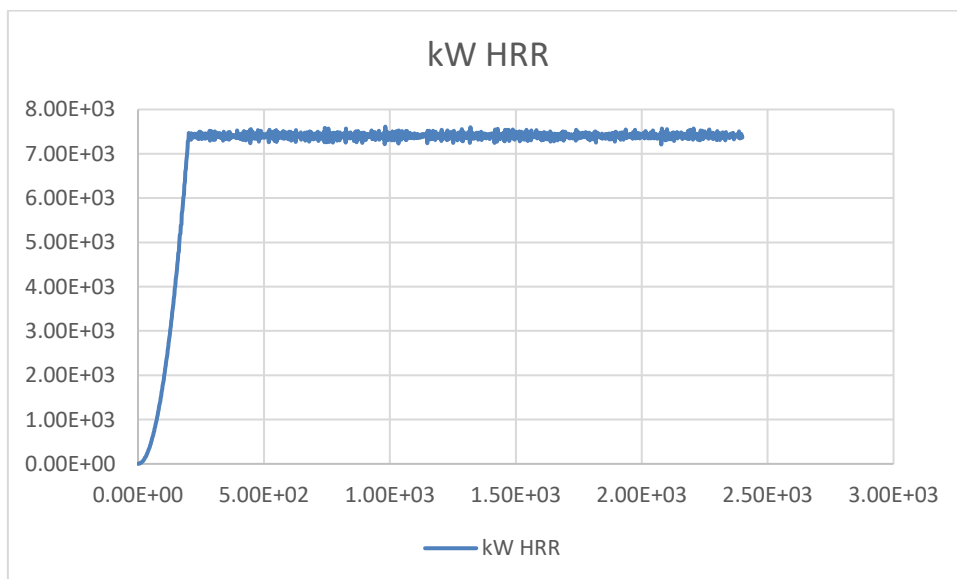


Flujo Másico Exitorios:



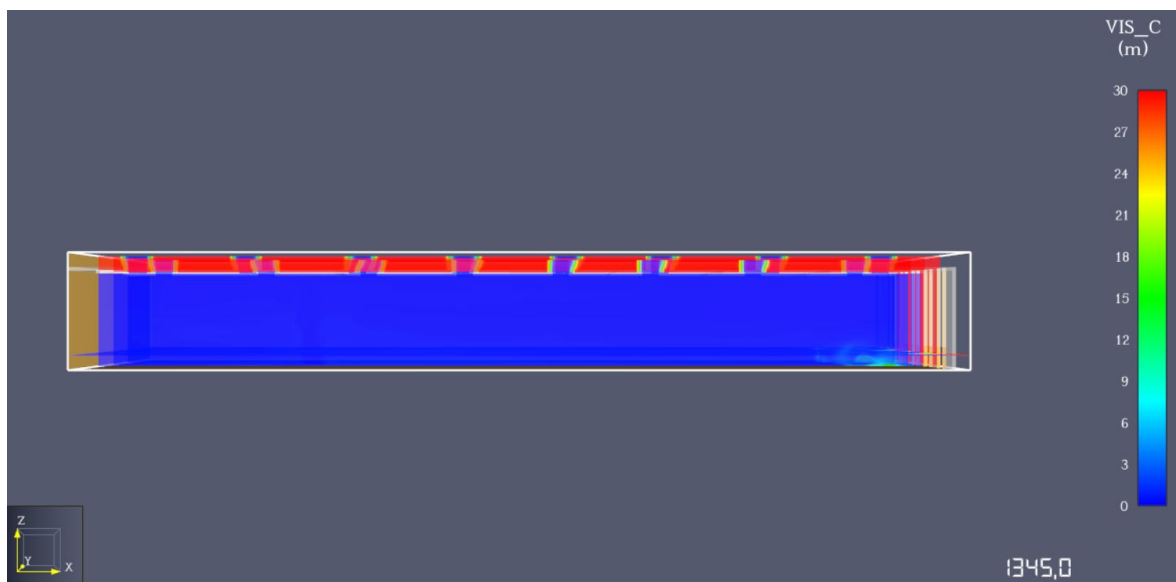
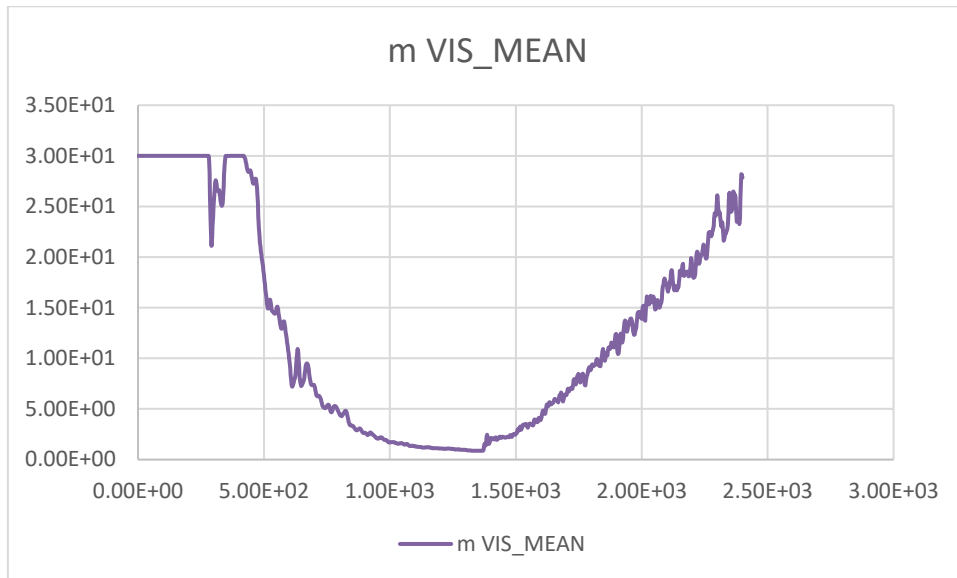


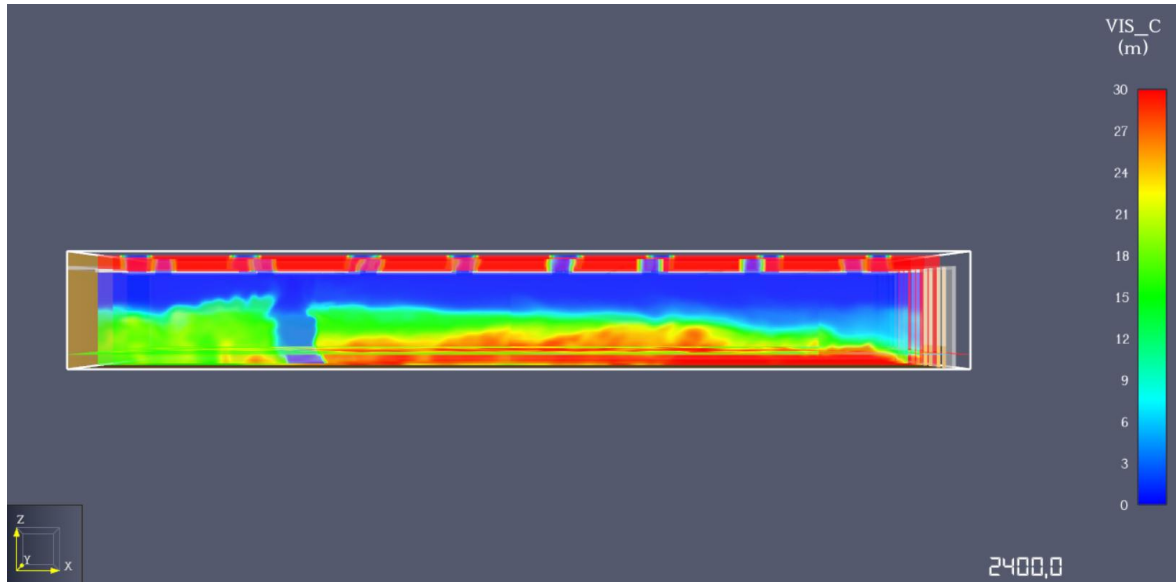
HRR:



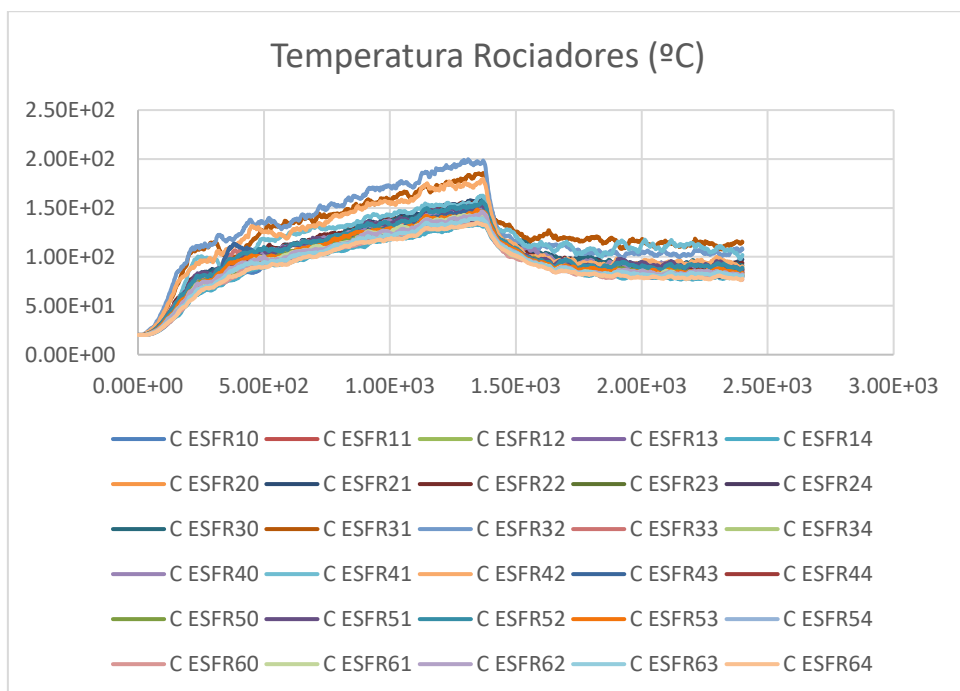
Caso 9, 4AU-O2b

Visibilidad:

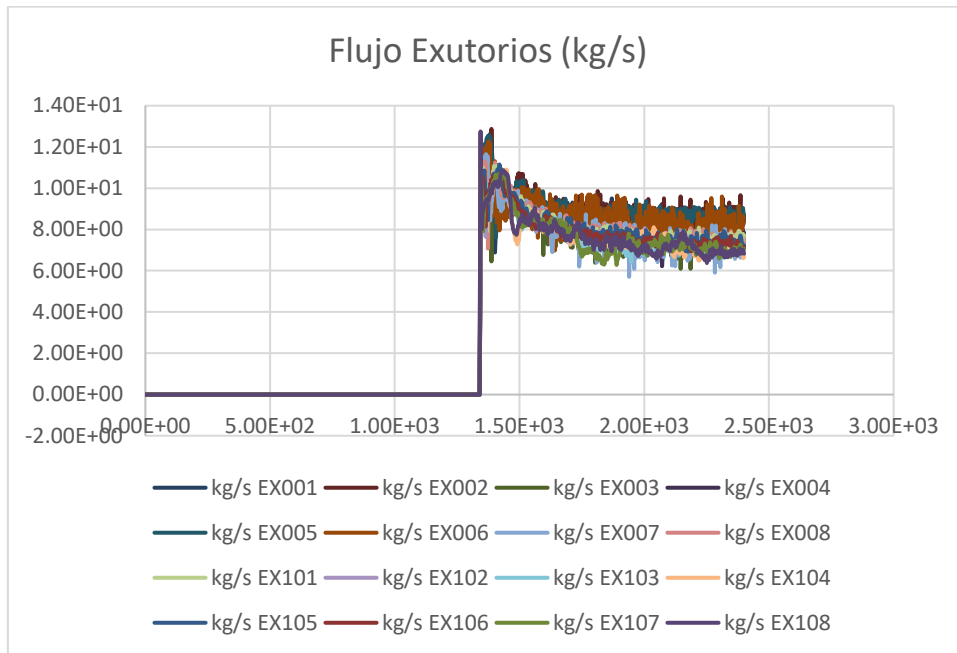




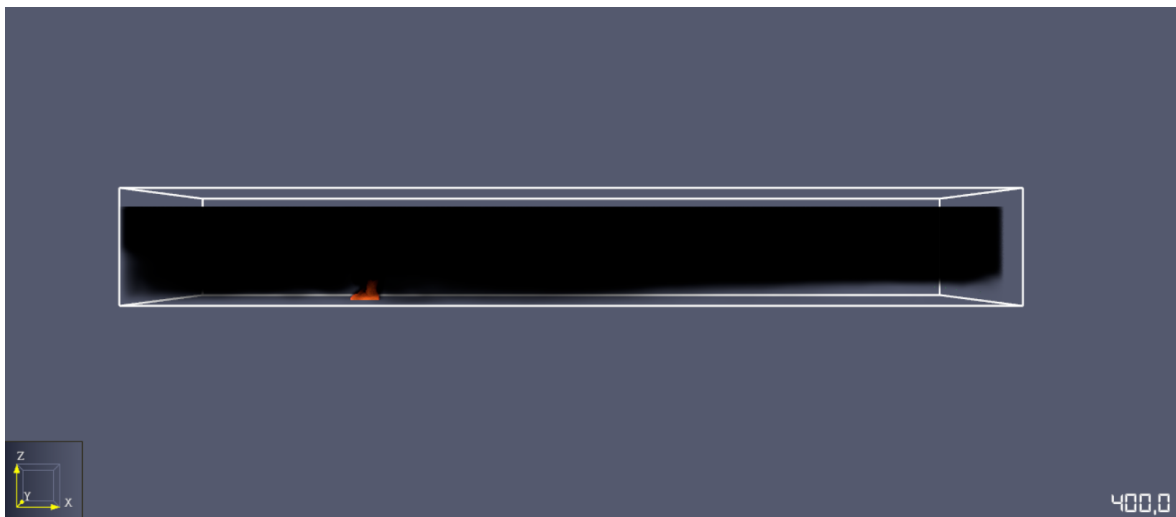
Temperatura:

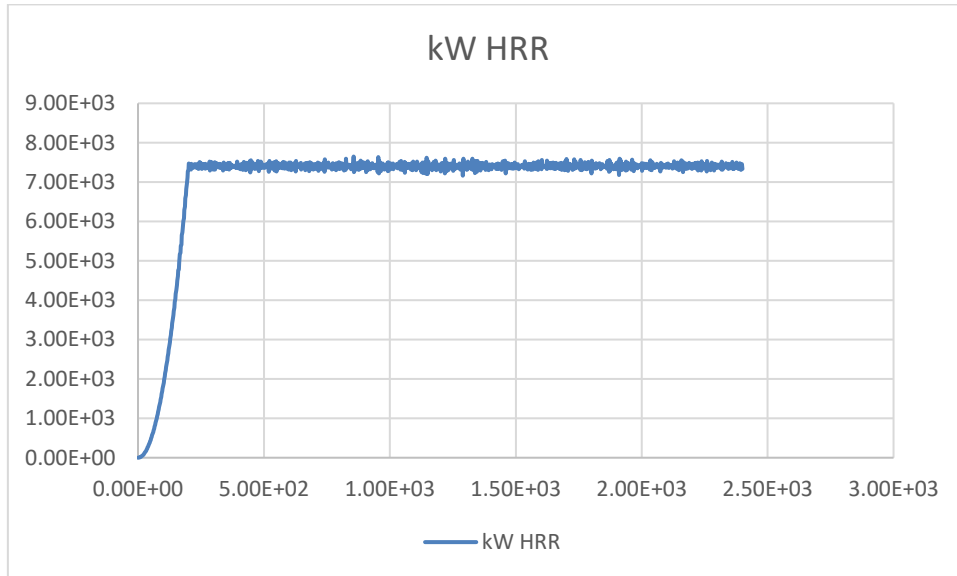


Flujo Másico Exitorios:



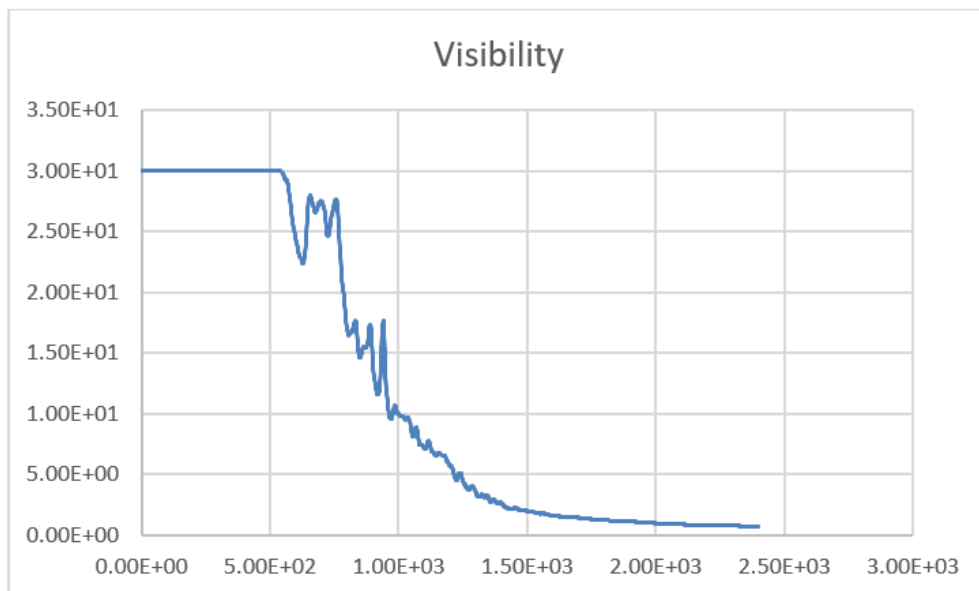
HRR:

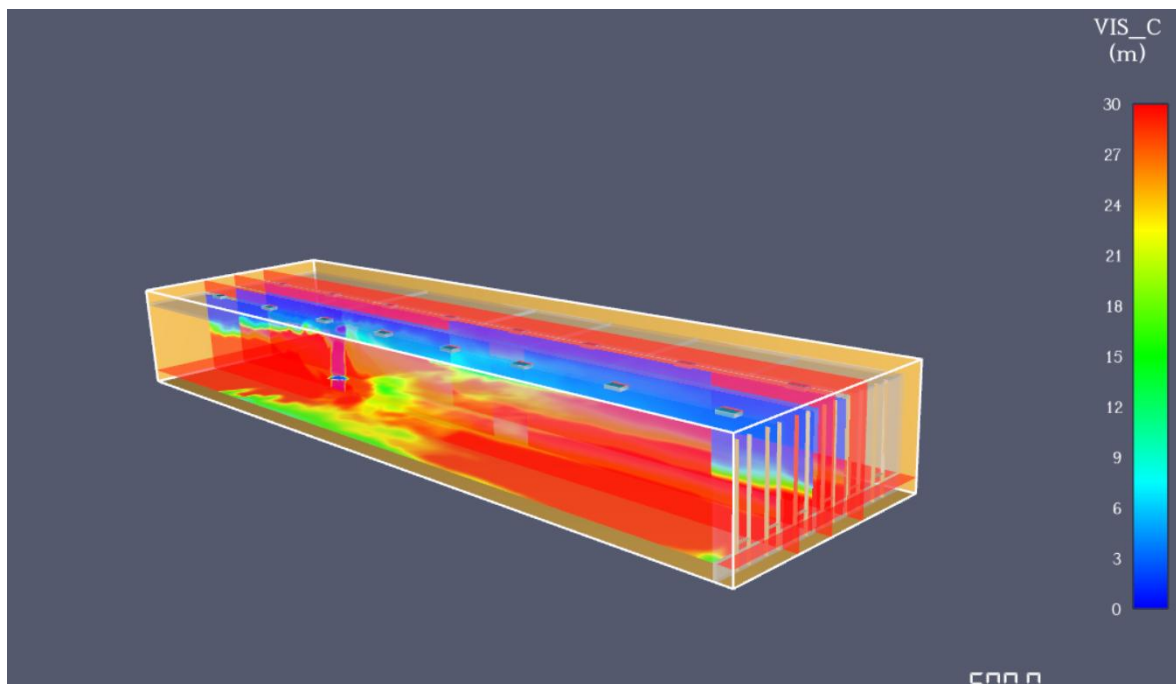
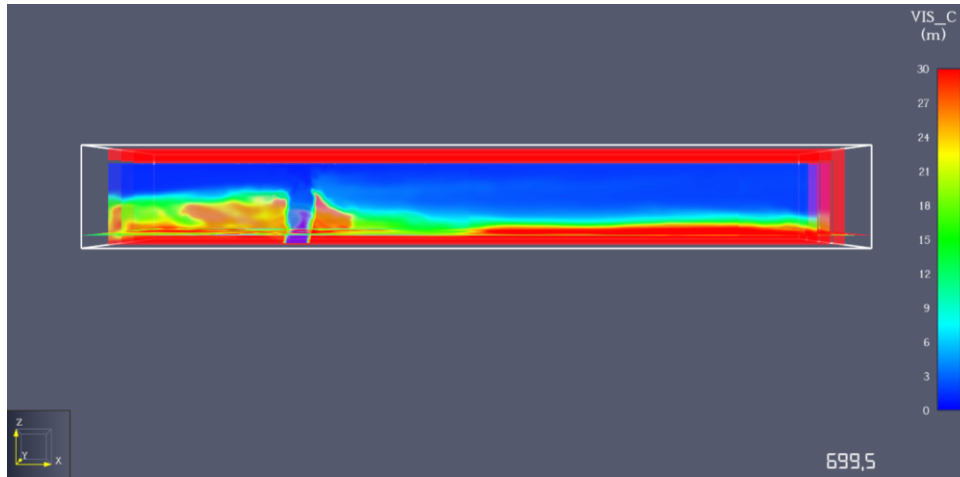




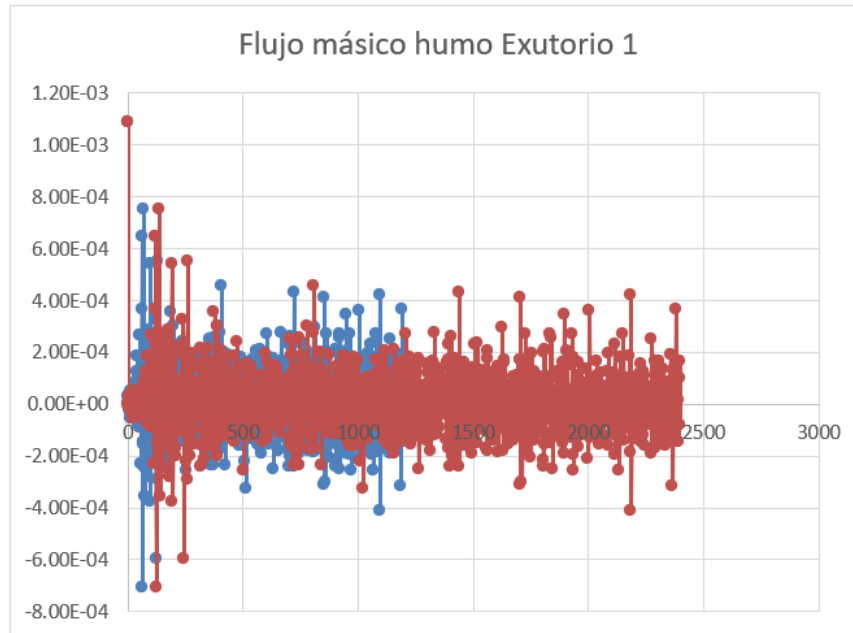
Caso 10, 4AM-O1

Visibilidad:



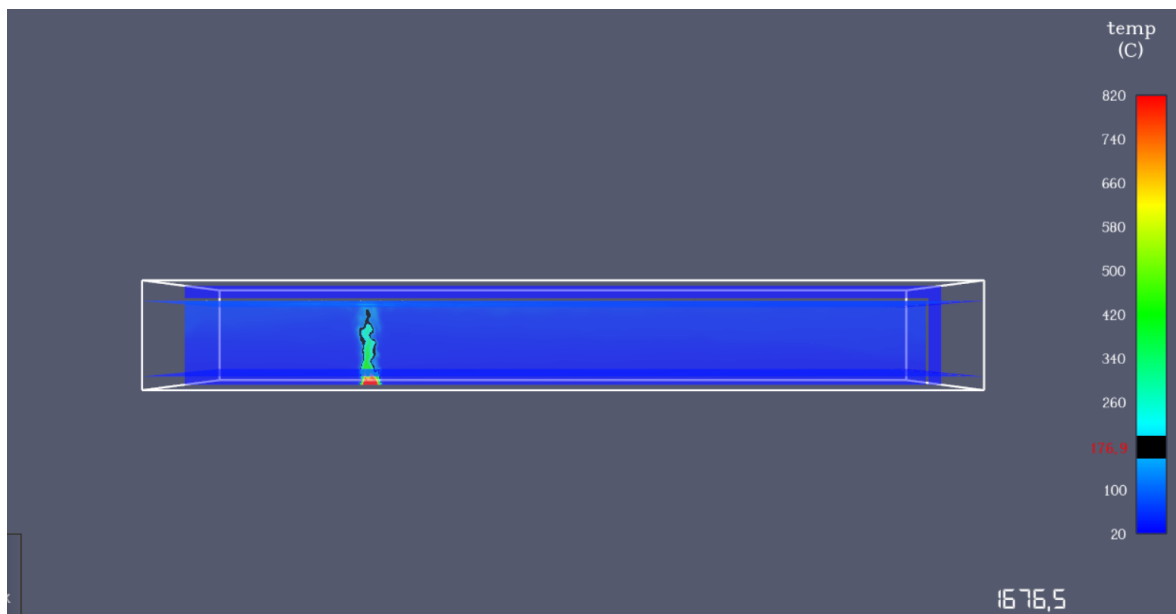
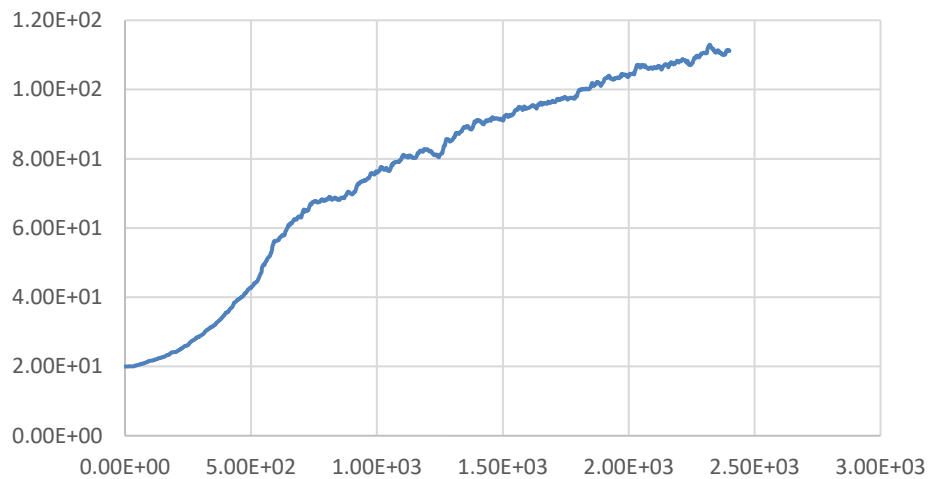


FLUJO MÁSSICO NULO, NO PASA HUMO POR ELLOS

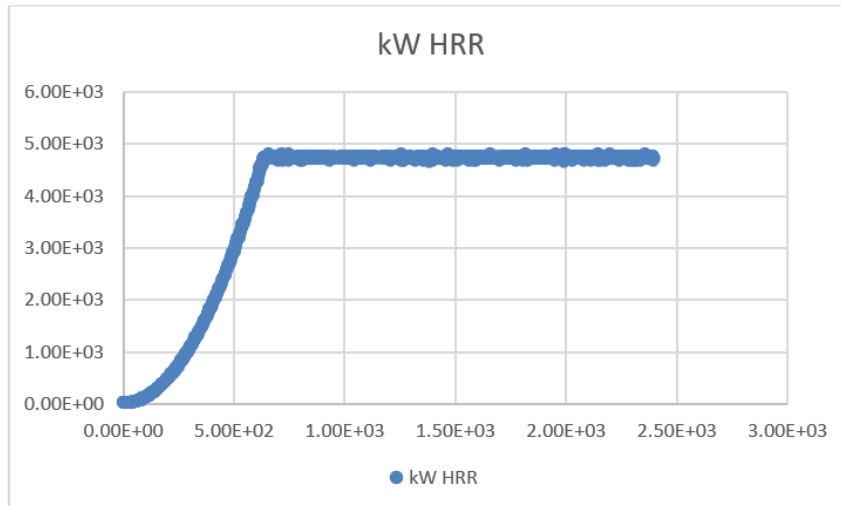


Se debe a que la activación del sistema se rige a la primera condición de activación:
Activación inmediata (eslabón térmico a 182 °C),

5th sprinkler temperature

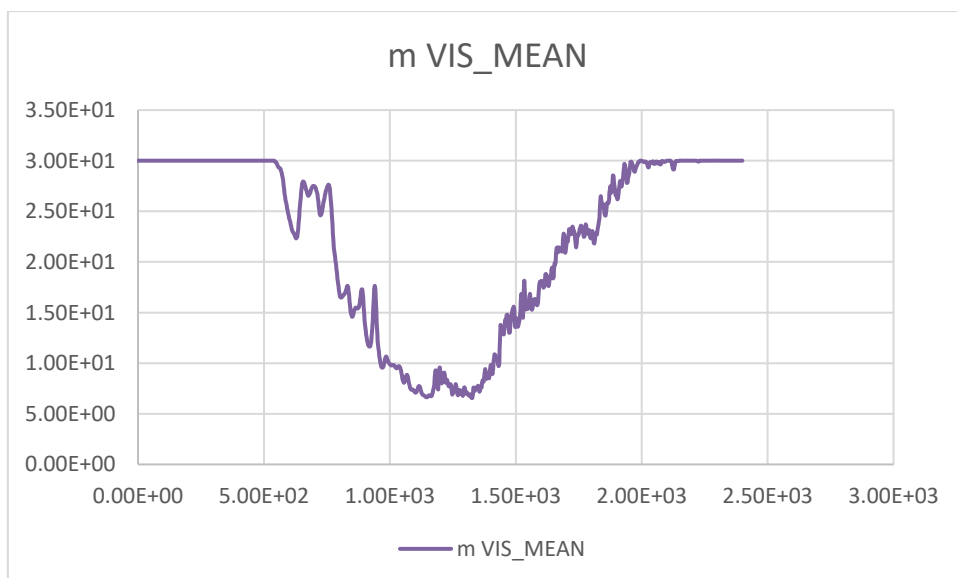


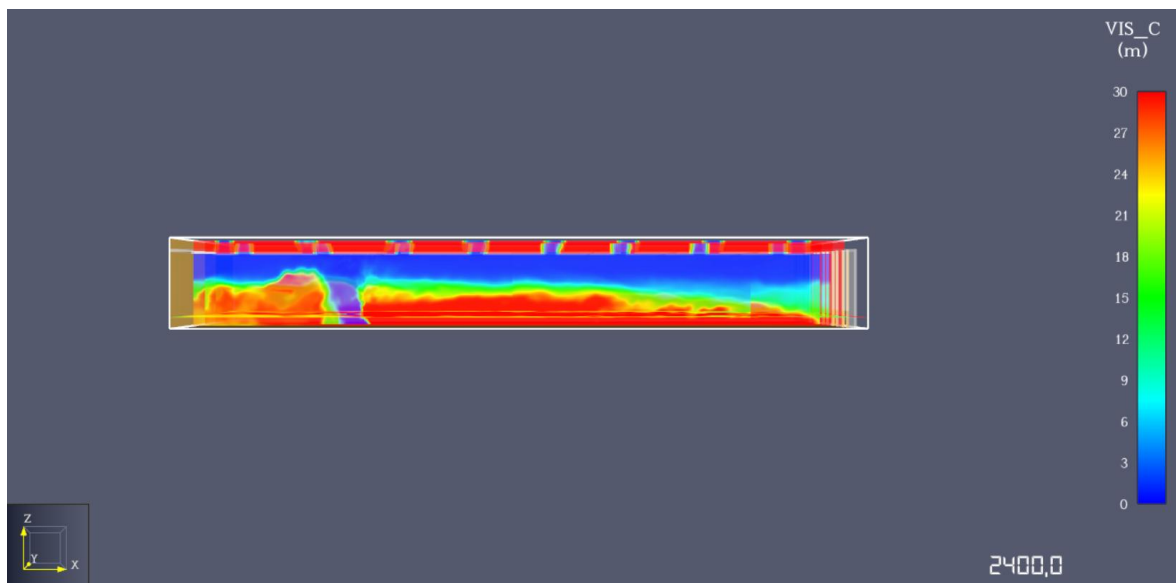
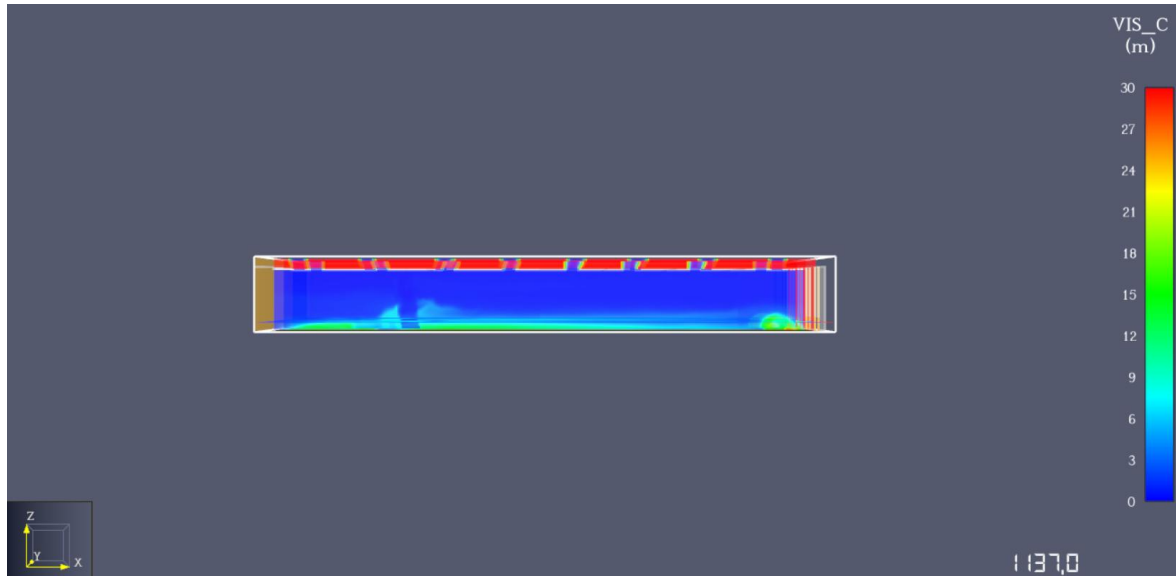
HRR



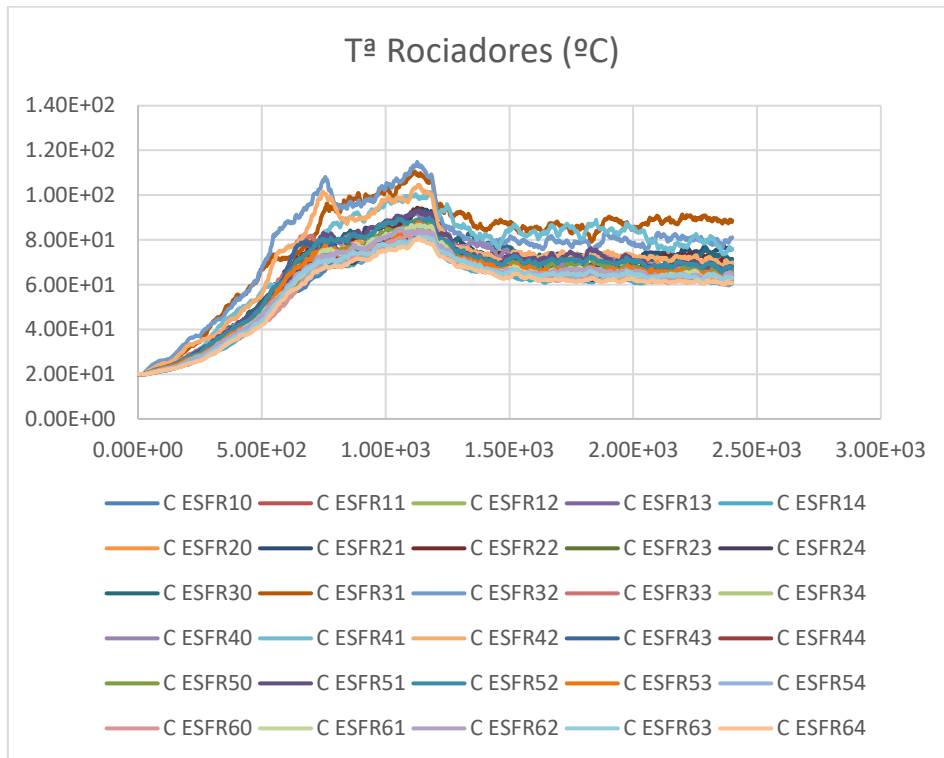
Caso 11, 4AM-O2a

Visibilidad:

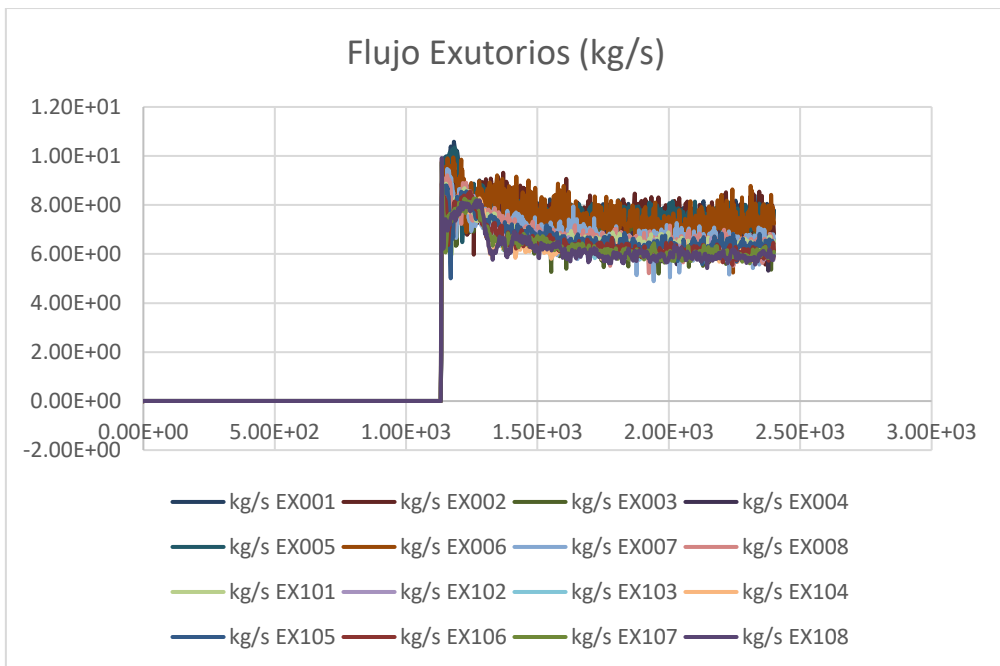
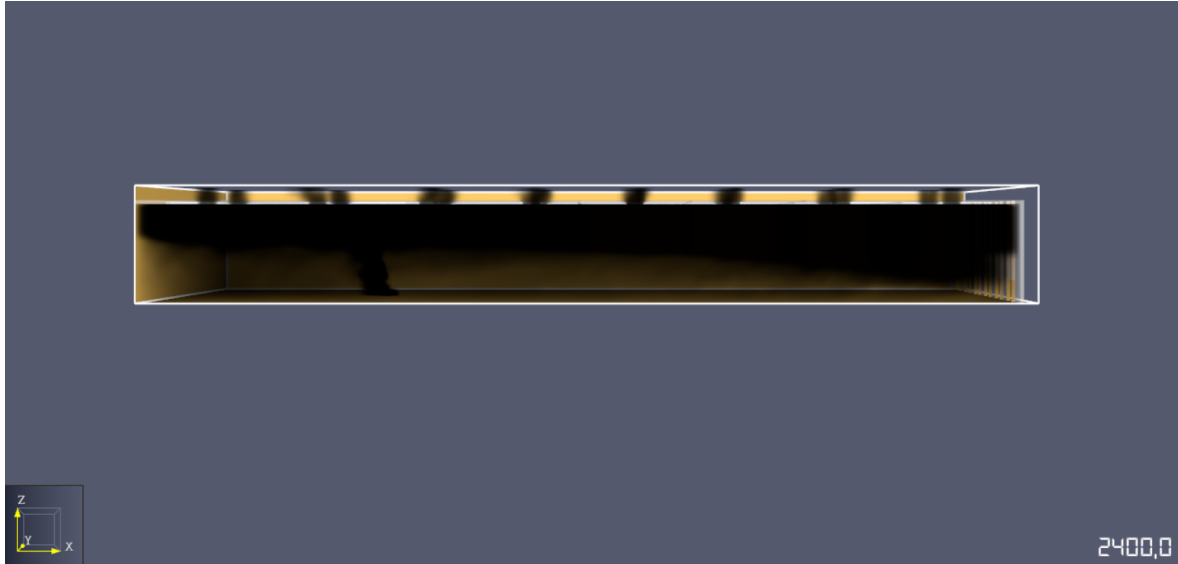




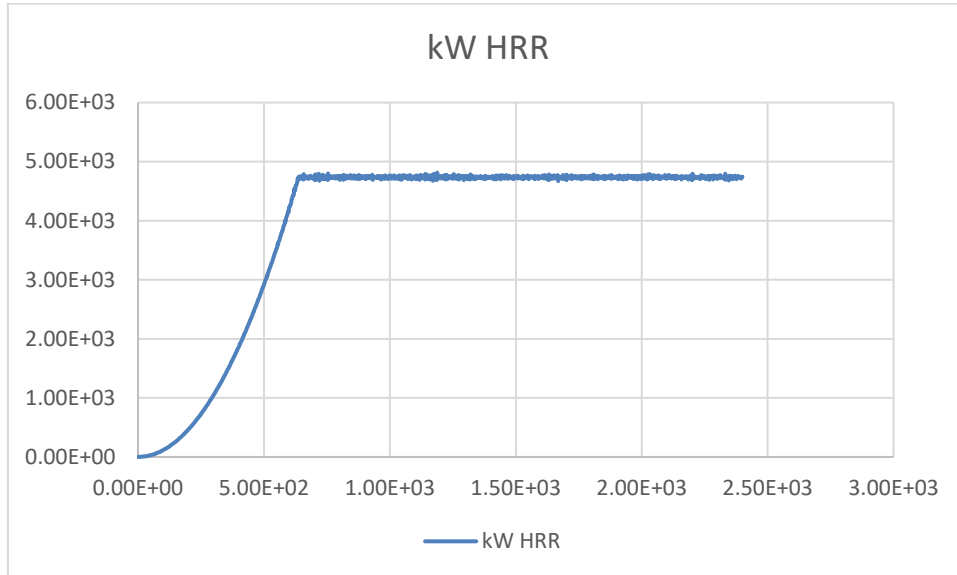
Temperatura:



Flujo másico en exutorios:

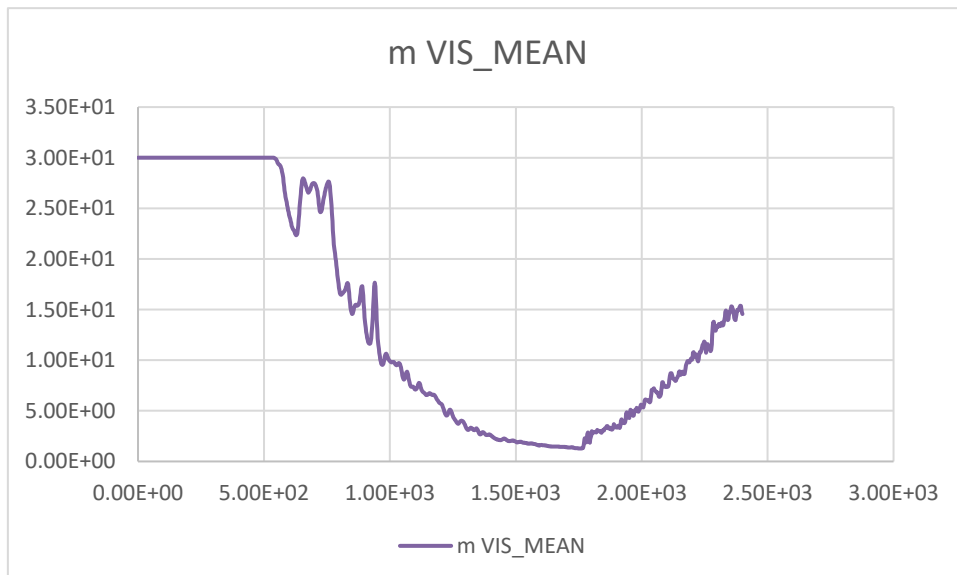


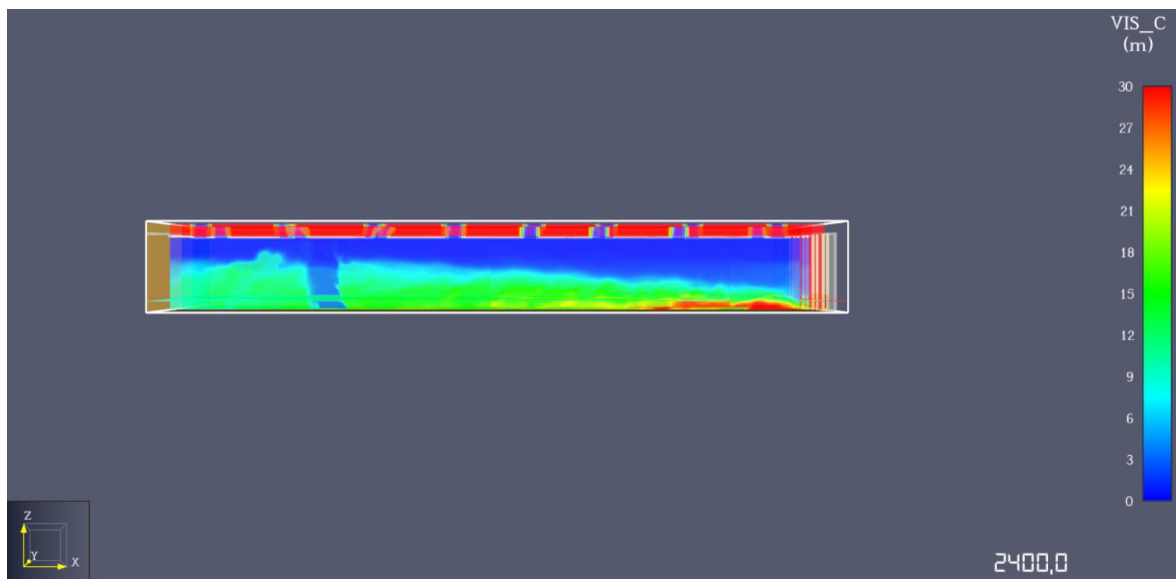
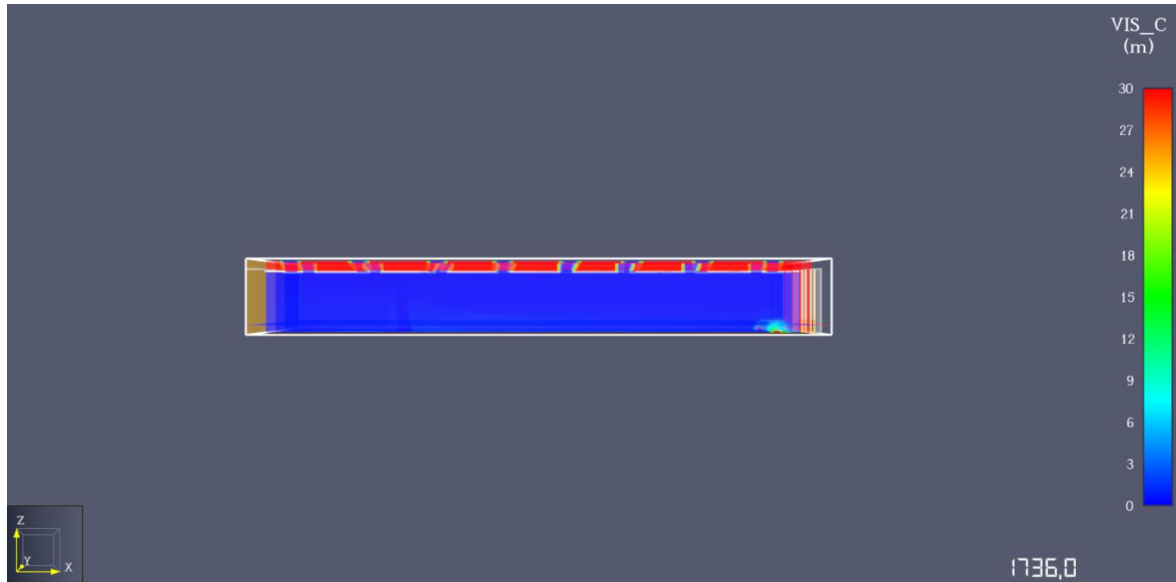
HRR:



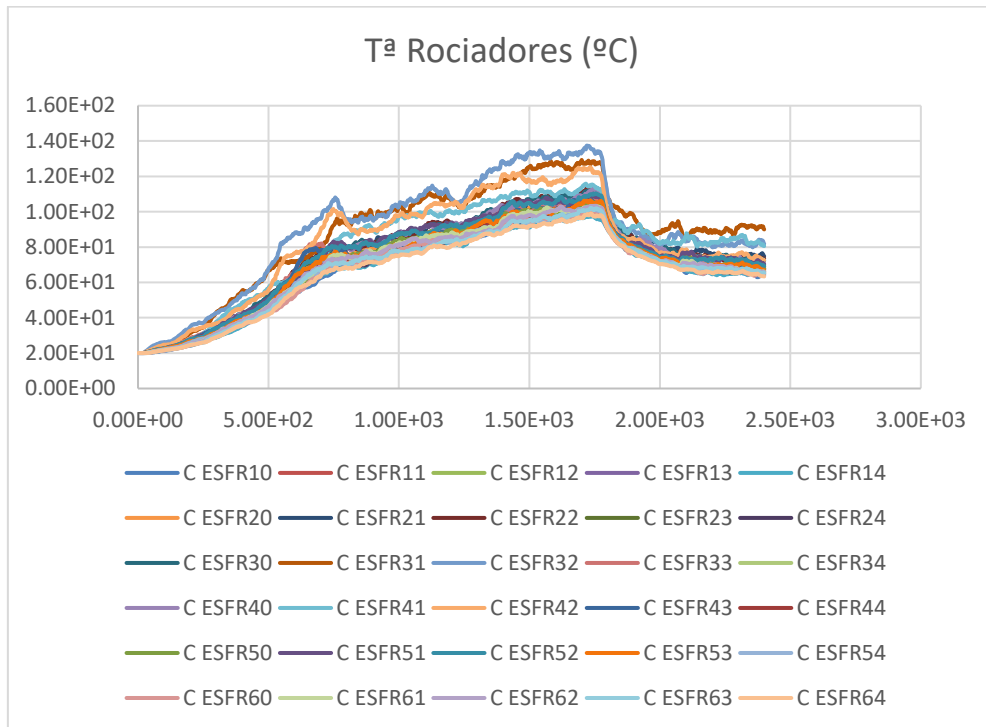
Caso 12, 4AM-O2b

Visibilidad:

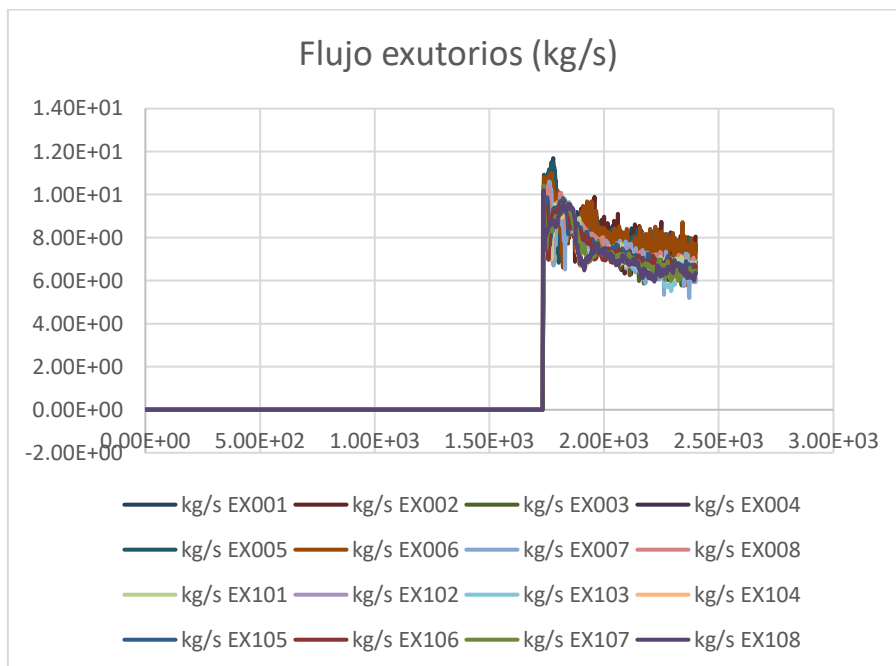




Temperatura:

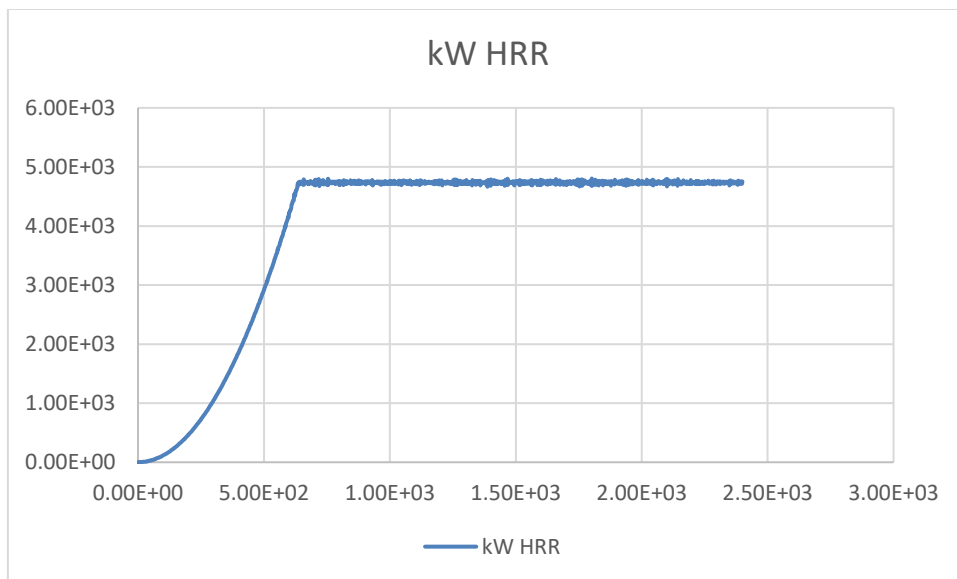


Flujo másico en exutorios:





HRR:



ANEXO A: OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLE

Este Trabajo Fin de Grado se alinea con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (SDG: Sustainable Development Goals) marcados por la Agenda 2030, especialmente en lo relacionado con la mejora de la seguridad en edificios, el uso eficiente de los recursos técnicos y el diseño de soluciones más seguras y prácticas para la industria.²¹ A continuación, se explican los SDG más relacionados con el contenido del trabajo:

SDG 3: Salud y bienestar

El sistema de control de humos tiene como objetivo principal proteger la vida de las personas en caso de incendio. Este trabajo analiza qué configuraciones permiten mantener mejores condiciones de visibilidad y temperatura, lo cual es clave para que se pueda evacuar de forma segura. Por tanto, ayuda a reducir los riesgos para la salud de los ocupantes y a mejorar la seguridad en los espacios de trabajo.



Ilustración 34:SDG 3

SDG 11: Ciudades y comunidades sostenibles

²¹ Naciones Unidas (2025)

Los almacenes logísticos y grandes recintos industriales forman parte de la infraestructura de muchas ciudades. Diseñar sistemas que respondan bien en caso de incendio mejora la seguridad general de estos espacios. Este trabajo propone soluciones más fiables que pueden integrarse en proyectos reales, haciendo que las instalaciones sean más seguras y preparadas para situaciones de emergencia.



Ilustración 35:SDG 11

ODS 12: Producción y consumo responsables

Comparar distintos diseños de sistemas de control de humos (prescriptivo y alternativo) permite valorar no solo la eficacia, sino también la cantidad de recursos necesarios. Por ejemplo, algunos diseños permiten reducir el número de exutorios o evitar cortinas si se compensa con una buena estrategia de extracción. Esto ayuda a tomar decisiones más eficientes en el uso de materiales y en el diseño de sistemas que consuman menos energía.



Ilustración 36:SDG 12

ODS 13: Acción por el clima

Aunque el trabajo no se centra en temas climáticos, sí propone sistemas que pueden funcionar sin necesidad de equipos eléctricos o mecánicos intensivos, como ocurre con la ventilación natural. Esto supone un ahorro energético y una solución más sostenible.

Además, disponer de instalaciones seguras y bien diseñadas es cada vez más importante si se tienen en cuenta las condiciones climáticas actuales, que pueden aumentar el riesgo de incendios.



Ilustración 37:SDG 13

ANEXO B: FM DATASHEET 2020

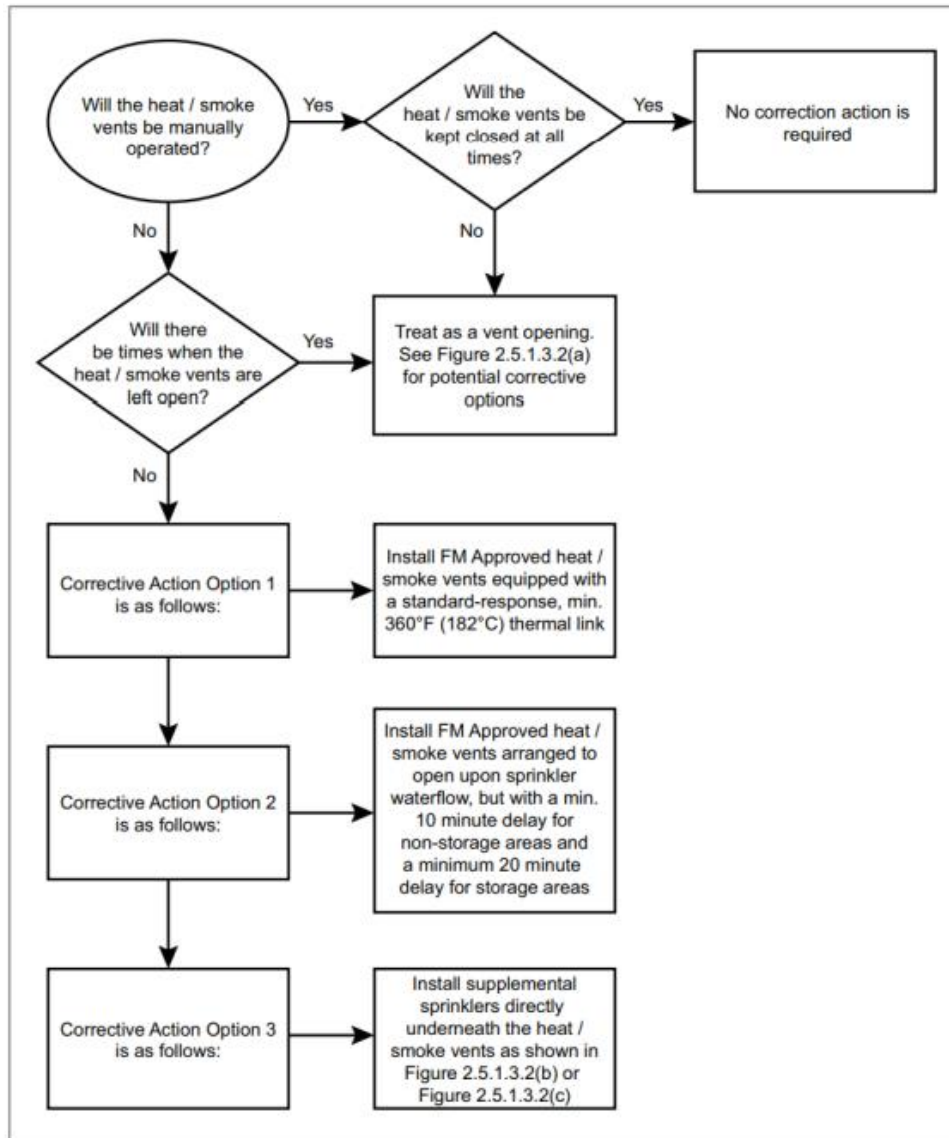


Ilustración 38: FM Datasheet-2020