

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Diseño de un sistema de evacuación de humos en una nave industrial conforme a la norma UNE 23585 y análisis de los resultados obtenidos mediante el software CFAST

Autor: Pablo Jara Mateos

Tutor: Estanislao Núñez Delgado

Cotutor: Manolo Villalba García

Dep. Ingeniería de la Construcción y Proyectos
de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

**Diseño de un sistema de evacuación de humos en
una nave industrial conforme a la norma UNE
23585 y análisis de los resultados obtenidos
mediante el software CFAST**

Autor:

Pablo Jara Mateos

Tutor:

Estanislao Núñez Delgado

Profesor asociado

Manolo Villalba García

Profesor asociado

Dep. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de la Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Grado: Diseño de un sistema de evacuación de humos en una nave industrial conforme a la norma UNE 23585 y análisis de los resultados obtenidos mediante el software CFAST

Autor: Pablo Jara Mateos

Tutor: Estanislao Núñez Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis maestros

Agradecimientos

Tras siete largos años, llega el momento de cerrar esta etapa y empezar algo nuevo. Este trabajo representa el final de dicha etapa.

Quiero dar las gracias a todas las personas que me han acompañado en el camino. Empezando por mis padres y mi hermano, sin los que esto no hubiera sido posible. A mis amigos de toda la vida, que cuando no tenía fuerzas para seguir me ayudaban a encontrarlas y, por supuesto, a los nuevos amigos conocidos en el grado, con los que tantos momentos he compartido.

Agradecido también a todos los profesores que han dedicado parte de su tiempo a ayudarme y hacerme entender la necesidad de esforzarse para conseguir los objetivos.

Por último, gracias a los tutores por acompañarme y guiarme en la elaboración del presente trabajo.

En definitiva, gracias a todos los que han hecho posible que esto llegue a su fin de una u otra forma.

Pablo Jara Mateos

Sevilla, 2019

El desarrollo de la tecnología ha propiciado la aparición de nuevos sistemas destinados a mejorar situaciones diversas del día a día. Dichas mejoras se aplican también al mundo laboral, intentando mejorar la productividad de las empresas y ahorrar costes. En este contexto, han surgido los modelos de simulación computacional que permiten representar situaciones mediante novedosos softwares. El objetivo de estos modelos no es otro que optimizar los antiguos métodos empleados ahorrando costes y tiempo.

En el mundo de la protección contra incendios y, concretamente, con el diseño de los sistemas de evacuación de humos el uso de dichos modelos ha experimentado un auge importante en los últimos años. Sin embargo, existen dudas sobre el uso de estos nuevos sistemas en relación con las normas que regían el diseño anteriormente.

En el presente documento vamos a tratar de entender el funcionamiento de los modelos de simulación computacional, específicamente haciendo uso del modelo de zona CFAST. Se analizarán los parámetros que debemos definir, así como la influencia que tiene sobre los resultados la variación de estos.

Abstract

The development of technology has led to the emergence of new systems designed to improve various everyday situations. These improvements also apply to the world of work, trying to improve the productivity of companies and saving costs. In this context, the models of computational simulation have arisen that allow to represent situations by means of new software. The objective of these models is none other than to optimize the old methods used saving costs and time.

In the world of fire protection and, specifically, with the design of smoke evacuation systems, the use of these models has experienced a significant boom in recent years. However, there are doubts about the use of these new systems in relation to the standards that previously governed the design.

In this document we will try to understand the operation of computational simulation models, specifically using the CFAST zone model. The parameters that must be defined will be analyzed, as well as the influence that the variation of these has on the results.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Ilustraciones	xix
1 Introducción	1
1.1 <i>Geometría de estudio</i>	3
1.2 <i>Norma UNE 23585:2017</i>	4
1.3 <i>Modelos de zona: Software CFAST</i>	5
2 Métodos de control de humo	7
2.1 <i>Dilución</i>	7
2.2 <i>Contención</i>	8
2.3 <i>Extracción</i>	8
2.3.1 <i>Extracción natural</i>	8
2.3.2 <i>Extracción forzada</i>	8
2.4 <i>Presurización</i>	9
3 Sistemas de evacuación de Humos	10
3.1 <i>Objetivos de un Sistema de evacuación de humos</i>	10
3.2 <i>Elementos de un Sistema de evacuación de humos</i>	11
3.2.1 <i>Exutorios</i>	11
3.2.2 <i>Entrada de aire</i>	13
3.2.3 <i>Cortinas de humo</i>	13
3.2.4 <i>Cuadro de mando</i>	13
3.3 <i>Necesidad de disponer del sistema en el caso de estudio</i>	13
3.3.1 <i>Tipo de establecimiento</i>	14
3.3.2 <i>Nivel de riesgo intrínseco</i>	14
3.3.3 <i>Sectorización</i>	15
4 Diseño y Dimensionado de Sistemas de Evacuación mediante la Norma UNE 23585	17
4.1 <i>Extracción natural</i>	17
4.2 <i>Depósito de humos</i>	17
4.3 <i>Altura libre de humos (Y)</i>	18
4.4 <i>Modelo de incendio</i>	18
4.5 <i>Caudal de aire que entra dentro de un penacho ascendente de humos por encima de un incendio</i>	19
4.6 <i>La temperatura de la capa de humos</i>	20
4.7 <i>Superficie aerodinámica total de aireadores naturales</i>	21
4.7.1 <i>Influencia de los parámetros de entrada sobre la superficie de salida</i>	22
4.8 <i>Número de exutorios de salida que debemos disponer</i>	25
4.9 <i>Elección de los exutorios y posicionamiento en la nave industrial</i>	26
4.10 <i>Admisión de aire</i>	28
4.10.1 <i>Posicionamiento</i>	29
4.10.2 <i>Superficie de entrada</i>	31

5	Modelado y simulación computacional de incendios	32
5.1	<i>MSCI: conceptos básicos</i>	32
5.2	<i>Validación y verificación del modelo</i>	33
6	Diseño de un Sistema de Evacuación de Humos Mediante CFAST	36
6.1	<i>HRR</i>	37
6.1.1	<i>Evolución del HRR</i>	37
6.1.2	<i>Métodos de medición del HRR</i>	39
6.2	<i>Características del incendio en CFAST</i>	40
6.2.1	<i>Tamaño y potencia liberada del incendio</i>	40
6.2.2	<i>Posición del fuego</i>	41
6.3	<i>Características de los compartimentos en CFAST</i>	41
6.4	<i>Características de los exutorios en CFAST</i>	42
6.4.1	<i>Exutorios de entrada</i>	42
6.4.2	<i>Exutorios de salida</i>	43
6.5	<i>Limitaciones de CFAST</i>	44
7	Puesta en marcha de CFAST 7.4 y Análisis de la Sensibilidad de las Salidas ante Cambios en las Entradas	45
7.1	<i>Simulación inicial y primera comparativa con UNE 23585</i>	48
7.2	<i>Variaciones a la simulación inicial</i>	54
7.2.1	<i>Exutorios de salida</i>	54
7.2.2	<i>Exutorios de entrada</i>	59
7.2.3	<i>Tamaño del compartimento</i>	62
7.2.4	<i>Fuego</i>	63
7.2.5	<i>Inclusión de los materiales de construcción a la simulación</i>	67
7.2.6	<i>Composición química del combustible</i>	74
7.2.7	<i>Producción de CO</i>	76
7.2.8	<i>Producción de carbonilla (soot)</i>	76
7.2.9	<i>Fracción de radiación</i>	767
8	Conclusiones extraídas del uso de CFAST	79
ANEXO A: Guía CFAST [4]		82
A.1	<i>Ecuaciones de cálculo y suposiciones</i>	82
A.2	<i>Parámetros de entrada</i>	82
A.2.1	<i>Ambiente de simulación</i>	83
A.2.2	<i>Compartimentos</i>	84
A.2.3	<i>Aberturas en muros</i>	85
A.2.4	<i>Aberturas en suelos y techos</i>	85
A.2.5	<i>Propiedades térmicas</i>	86
A.2.6	<i>Fuegos</i>	86
A.2.7	<i>Objetivos</i>	87
A.2.8	<i>Detectores y rociadores</i>	88
A.3	<i>Resultados obtenidos</i>	89
A.4	<i>Salidas generadas por CFAST</i>	89
A.4.1	<i>Salida compacta</i>	89
A.4.2	<i>Salida detallada</i>	89
A.4.3	<i>Salida en hojas de cálculo</i>	90
ANEXO B: Variables de entrada en las distintas simulaciones y representación gráfica de resultados interesantes		93
ANEXO C: Comparación gráfica de los resultados obtenidos		122
Referencias		153

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Densidad de fuego ponderada y corregida en función del tipo de establecimiento</i>	15
<i>Tabla 2. Máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio (Tabla extraída del RSCIEI)</i>	16
<i>Tabla 3. Parámetros característicos del modelo de incendios para edificios de almacenamiento en altura (Tabla 1.4 en UNE 23585)</i>	19
<i>Tabla 4: Tramo creciente de las curvas HRR</i>	38
<i>Tabla 6: Definición de los exutorios para entrada de aire para el caso inicial</i>	43
<i>Tabla 7: Definición de los exutorios de salida para el caso inicial</i>	44
<i>Tabla 8: Parámetros de entrada y salidas obtenidas mediante norma y CFAST</i>	48
<i>Tabla 9: Resumen de entradas y salidas principales para la simulación inicial</i>	50
<i>Tabla 10: Resumen de resultados para la simulación inicial</i>	53
<i>Tabla 11: Resultados obtenidos al dividir la superficie de salida en ocho</i>	55
<i>Tabla 12: Tabla de resultados: comparativa según tamaño del exutorio</i>	59
<i>Tabla 13: Resultados obtenidos al incluir paredes de acero (simulación 25)</i>	67
<i>Tabla 14: Resultados obtenidos al incluir techos de acero (simulación 26)</i>	68
<i>Tabla 15: Resultados obtenidos al definir suelo de acero (simulación 27)</i>	68
<i>Tabla 16: Resultados obtenidos al incluir paredes y techos de acero (simulación 28)</i>	69
<i>Tabla 17: Resultados obtenidos al definir todas las superficies del compartimento de acero (simulación 29)</i>	69
<i>Tabla 18: Resultados obtenidos al incluir paredes de hormigón (simulación 30)</i>	70
<i>Tabla 19: Resultados obtenidos al definir techos de hormigón (simulación 31)</i>	70
<i>Tabla 20: Resultados obtenidos al definir suelos de hormigón (simulación 32)</i>	71
<i>Tabla 21: Resultados obtenidos al definir paredes y techos de hormigón (simulación 33)</i>	71
<i>Tabla 22: Resultados obtenidos al definir todas las superficies del compartimento de hormigón (simulación 34)</i>	72
<i>Tabla 23: Resumen de los resultados obtenidos según los materiales incluidos</i>	72
<i>Tabla 24: Valor de los parámetros del material de construcción en los distintos casos</i>	73
<i>Tabla 25: Resultados obtenidos ante modificaciones en los parámetros de los materiales de construcción</i>	74
<i>Tabla 26: Análisis de los resultados relativos a composición química (I)</i>	75
<i>Tabla 27: Análisis de los resultados relativos a composición química (II)</i>	75
<i>Tabla 28: Comparación de resultados al definir porcentaje de CO</i>	76
<i>Tabla 29: Resultados relacionados con la composición química en función del hollín</i>	77
<i>Tabla 30: Resultados obtenidos ante variaciones de factor de radiación</i>	78

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Planta de la nave de diseño</i>	3
<i>Ilustración 2: Alzado de la nave de diseño</i>	4
<i>Ilustración 3: Representación de un atrio abierto para ilustrar la dilución del humo</i>	7
<i>Ilustración 4: Cortinas de humo para contención del humo en establecimiento industrial</i>	8
<i>Ilustración 5: Representación del efecto chimenea</i>	11
<i>Ilustración 6: Exutorio de lamas</i>	12
<i>Ilustración 7: Exutorio de compuerta sobre lucernario</i>	12
<i>Ilustración 8: Tamaño de los distintos exutorios según modelo y número de lamas</i>	27
<i>Ilustración 9: Superficie aerodinámica de los distintos exutorios según modelo y número de lamas</i>	27
<i>Ilustración 10: Sección transversal del exutorio de lamas EURA</i>	28
<i>Ilustración 11: Sección longitudinal del exutorio de lamas EURA</i>	28
<i>Ilustración 12: Representación de las zonas de succión severa sobre la fachada de un edificio</i>	29
<i>Ilustración 13: Existencia de zonas de succión severa en fachada frontal</i>	29
<i>Ilustración 14: Existencia de zonas de succión severa en fachada lateral</i>	30
<i>Ilustración 15: Fases de la evolución del fuego</i>	37
<i>Ilustración 16: Tramo de crecimiento cuadrático de un incendio según SFPE</i>	38
<i>Ilustración 17: Representación de prueba de incendio en sala para determinación del HRR</i>	39
<i>Ilustración 18: Representación de ensayo en calorímetro de cono para obtención del HRR</i>	40
<i>Ilustración 19: Medidas del compartimento en estudio</i>	42
<i>Ilustración 20: Condiciones de simulación (extraída de CFAST)</i>	45
<i>Ilustración 21: Definición del compartimento (extraída de CFAST)</i>	46
<i>Ilustración 22: Definición del fuego en CFAST</i>	46
<i>Ilustración 23: Definición de los exutorios de entrada</i>	47
<i>Ilustración 24: Definición de los exutorios de salida</i>	47
<i>Ilustración 25: Comparativa de los modelos de incendio según norma y CFAST</i>	51
<i>Ilustración 26: Definición de la superficie de salida dividida en ocho exutorios</i>	55
<i>Ilustración 27: Flujos de entrada y salida entre el compartimento y el exterior (simulación inicial)</i>	57
<i>Ilustración 28: Flujos de entrada y salida entre el compartimento y el exterior (simulación 2)</i>	57
<i>Ilustración 29: Flujos de entrada y salida entre el compartimento y el exterior (simulación óptima)</i>	58
<i>Ilustración 30: Variación de la forma de los exutorios</i>	58
<i>Ilustración 31: Exutorio de entrada simple frente exutorios múltiples</i>	60
<i>Ilustración 32: Tamaño de los exutorios de entrada en la nueva situación</i>	60
<i>Ilustración 33: Variación en la posición de los exutorios de entrada</i>	61
<i>Ilustración 34: Separación de la superficie de entrada entre los distintos muros</i>	62
<i>Ilustración 35: Posiciones del fuego analizadas</i>	63
<i>Ilustración 36: Orientación del compartimento y posicionamiento en CFAST</i>	84

1 INTRODUCCIÓN

“El ser humano es el único animal capaz de hacer fuego. Esto le ha procurado su dominio sobre la Tierra”.

- Conde de Rivarol -

La aparición del fuego supuso un antes y un después en el desarrollo de la especie humana. Hoy en día sigue resultando difícil dar una fecha exacta acerca de la aparición del primer fuego, aquel que marcaría un punto de inflexión en la historia. Además, resulta muy importante destacar las diferencias existentes entre dos conceptos muy relacionados con los incendios como son conservación y creación, ya que inicialmente, la aparición del fuego se debía únicamente a fenómenos naturales que las especies previas al actual homo sapiens trataban de mantener encendidos, mientras eran capaces, para conseguir principalmente luz y calor. Algunos estudios modernos¹ establecen que el fuego empieza a ser creado por el hombre (de forma intencionada) hace unos 350.000 años coincidiendo con el sedentarismo de los primeros pueblos ayudados por los beneficios que sus nuevos conocimientos sobre el fuego les aportaban: defensa contra animales, posibilidad de alumbrar el interior de las cuevas, posibilidad de alimentarse con carnes cocinadas, etc.

Por otra parte, la aparición del fuego también conllevaría inevitablemente efectos negativos, los cuales podían aparecer fundamentalmente cuando no se usa de forma conveniente o se produce la pérdida de control sobre el mismo. Esto nos permitiría, inicialmente, diferenciar entre el fuego como elemento claramente beneficioso para el hombre cuando este es capaz de manejar su uso y mantenerlo bajo control y, por el contrario, como un elemento que pueda tener impactos negativos cuando, la aparición de un incendio se convierte en un fuego incontrolado manifestándose, de ese modo, como algo claramente perjudicial. Y no es necesario remontarnos hasta el origen de los tiempos para poder hablar de la cara negativa del fuego, pues los efectos devastadores de estos fuegos incontrolados se pudieron ver en la Antigua Roma en el año 64 bajo el mandato del emperador Nerón, o en episodios mucho más próximos en espacio-tiempo como el incendio ocurrido en la Torre Windsor en Madrid en el año 2005.

De este modo y para hacer frente a los graves perjuicios que la aparición de un incendio puede provocar, los órganos competentes desarrollan múltiples normativas que permiten enfrentar o afrontar el problema antes incluso de la construcción de aquellas infraestructuras en las que vaya a desarrollarse cualquier tipo de actividad, sea esta del carácter que sea y en las que simplemente por el hecho de existir debemos tener en cuenta la posibilidad de que en algún momento (más cercano o más lejano) pueda aparecer un incendio que tenga consecuencias negativas tanto para el entorno como para el ser humano.

Debemos tener en cuenta que, concretamente, en nuestro país no se tiene una normativa relacionada con la protección frente a incendios hasta el año 1981 (lo que indica la poca concienciación que existía por parte del hombre en materia de incendios hace menos de cuarenta años), cuando el Ministerio de la Vivienda aprobó la NBE-CPI-81², dos años después del incendio del hotel Corona de Aragón, lo que supuso un antes y un después

¹ Estudios realizados por Ron Shimelmitz, arqueólogo de la Universidad de Haifa, en las cuevas Tabún (Israel)

² NBE-CPI: Normativa Básica de Protección Contra Incendios

en el enfoque frente a la protección contra incendios, al convertirse en la primera documentación existente en nuestro país que tenía en cuenta la posible aparición de incendios y que disponía las primeras medidas posibles para poder hacer frente a dichos fuegos. Sin embargo, desde esa fecha hasta la actualidad han surgido innumerables normativas que ayudan a enfrentar los incendios desde distintos ámbitos, resultando especialmente importante el conjunto de 148 normas dispuestas por AENOR³, asociación que marca las principales directrices que debemos seguir cuando queremos afrontar un proyecto en el que debemos tener en cuenta la protección contra incendios.

Entre todas, destacaremos las normativas facilitadas por el comité CTN 23 – SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS, cuyo campo de actividad se centra en la normalización de:

- Aparatos, equipos, productos, sistemas e instalaciones de prevención y lucha contra incendios;
- Tecnología del fuego: terminología, clasificación, símbolos, señalización;
- Equipo personal de uso exclusivo en la lucha contra incendios;
- Comportamiento ante el fuego de los materiales, elementos y estructuras de construcción, su clasificación y métodos de ensayo, incluyendo también indicaciones sobre la aplicación de estos ensayos;
- Los vehículos utilizados en la lucha contra incendios incluyendo el carrozado, prestaciones, accesorios y dotación;
- La instalación, uso y mantenimiento de los anteriormente mencionados, aparatos, equipos, productos, sistemas, instalaciones, materiales y estructuras.

Resulta importante realizar una mención a este comité puesto que, como podemos observar, especialmente en el primer y último punto dispuestos en la enumeración anterior, será quien imponga las restricciones en los procedimientos de diseño que se van a realizar en la primera parte del presente documento como veremos posteriormente.

Sin embargo, y a pesar de que los sistemas que se diseñaron teniendo presente las diferentes normativas frente a la protección contra incendios facilitadas por múltiples organismos especializados en la materia, se mostraban eficientes para satisfacer las necesidades para las que habían sido diseñados, fue el paso del tiempo, acompañado de una profunda especialización en la materia y, fundamentalmente, la evolución de la tecnología, aspectos que empiezan a poner en duda que los sistemas que se habían instalado en los diferentes establecimientos a partir de las normativas anteriormente mencionadas podían presentar cierto grado de sobredimensionamiento por lo que aunque van a cumplir con las necesidades para las que fueron dispuestos, su instalación también podría ir acompañada de un sobrecoste. Llegaba el momento de preguntarse si estos sistemas, que en la mayoría de las situaciones y exceptuando casos extremos eran de una incuestionable ayuda para afrontar incendios, están optimizados al máximo. Será este uno de los puntos que tratemos de resolver, cuando veamos los resultados que se obtienen mediante CFAST.

Este hecho, acompañado de la evolución tecnológica de la que hablábamos anteriormente, y que permitió la aparición de softwares informáticos cada vez más potentes, propició el desarrollo de programas de cálculo y simuladores que eran capaces de modelizar el desarrollo de distintos incendios facilitando, a su vez, la simulación de múltiples escenarios posibles a los que enfrentarse, en períodos de tiempo realmente cortos. Del mismo modo, también se supone que el uso de dichos softwares de cálculo permite obtener unos resultados más precisos, cuestión que se intentará demostrar, o al menos discutir, en el presente documento.

Y es que, el objetivo de este trabajo no es otro que diseñar el sistema de evacuación de humos de un almacén, situado en un establecimiento industrial y en el que se guarda fundamentalmente material eléctrico contenido en cajas de cartón situadas sobre palés. Dicho sistema deberá resolverse mediante dos métodos:

1. Aplicando la Norma UNE 23585:2017.
2. Empleando el software de cálculo CFAST, del que hablaremos de forma más extensa a lo largo de este documento.

Una vez resueltos ambos casos, procederemos a analizar los resultados obtenidos mediante ambos procedimientos, haciendo hincapié en la relación existente entre los parámetros de entrada para uno y otro caso

³ AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación

y cómo estos afectan a la resolución de la situación de estudio.

1.1 Geometría de estudio

Como acabamos de comentar, el propósito del presente estudio es el de diseñar y dimensionar el sistema de evacuación de humos, mediante dos métodos distintos, de un almacén situado en el interior de una nave industrial, por lo que el primer aspecto que podemos confirmar es que estamos diseñando un sistema para un establecimiento industrial. Dicho almacén cuenta con una superficie de 1652.77 m^2 dividida en dos zonas, disponiéndose sobre la segunda de estas un puente grúa con un peso de 3.5 toneladas que permite el transporte de mercancías pesadas de una parte a otra de dicha nave. A lo largo de la superficie del almacén se disponen, además, una serie de estanterías alineadas que se distribuyen simétricamente en ese área, tienen una altura de 5 m y en ellas, mediante palés de madera y cajas de cartón se almacena material eléctrico que queda empaquetado mediante retráctilado de plástico, considerándose una altura de almacenamiento de 4.5 m . Además, es importante tener en cuenta que dichas estanterías tienen una dimensión de 13.35 m de largo por 2.2 m de anchura.

La cubierta de la nave es a dos aguas con una altura mínima de 8.5 m en los extremos y una máxima de 10.17 m en el centro, coincidiendo esta con el pilar situado justo en medio de la estructura y que separa las dos zonas en las que hemos dividido anteriormente la nave de almacenamiento. Cabe reseñar que la infraestructura al completo carece de rociadores que actúen en caso de incendio por lo que adquiere mayor trascendencia la existencia de un sistema de evacuación de humos adecuado como el que diseñaremos más adelante.

Para una mejor comprensión de la geometría de diseño que hemos descrito previamente, se adjuntan las ilustraciones 1 y 2, correspondientes, respectivamente, a la planta y el alzado de dichas naves.

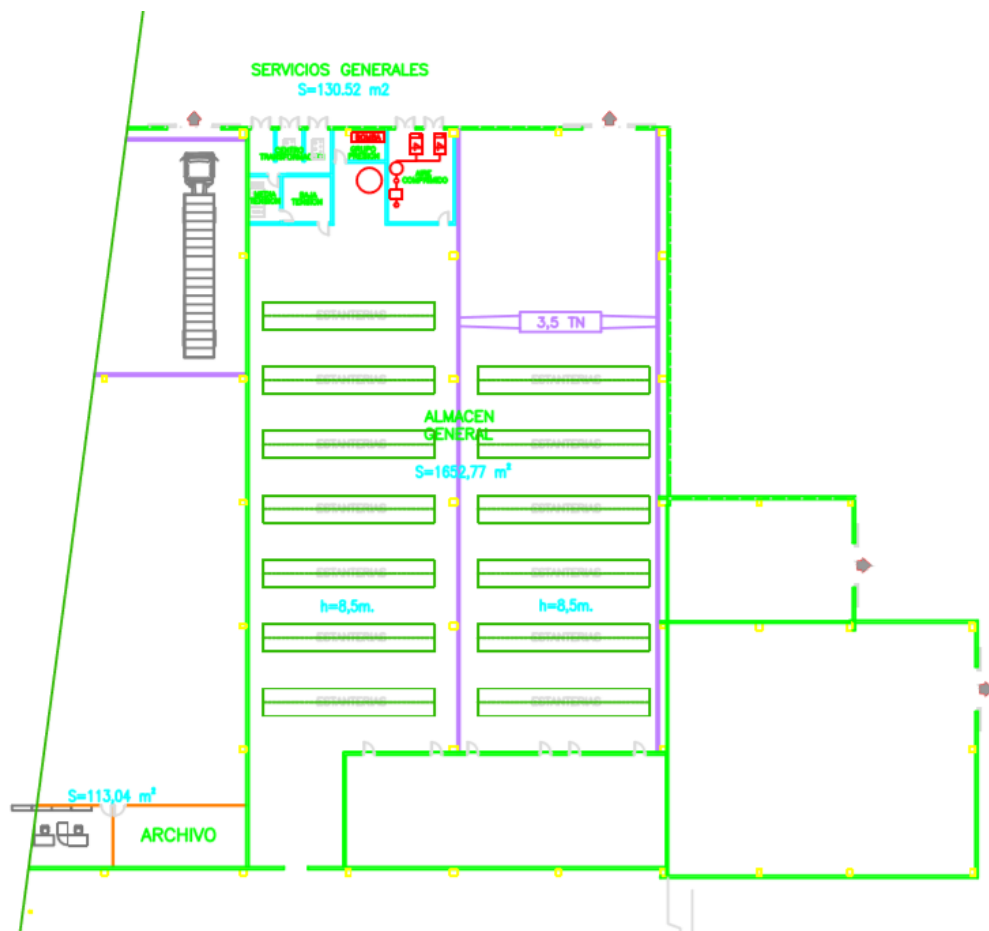


Ilustración 1: Planta de la nave de diseño

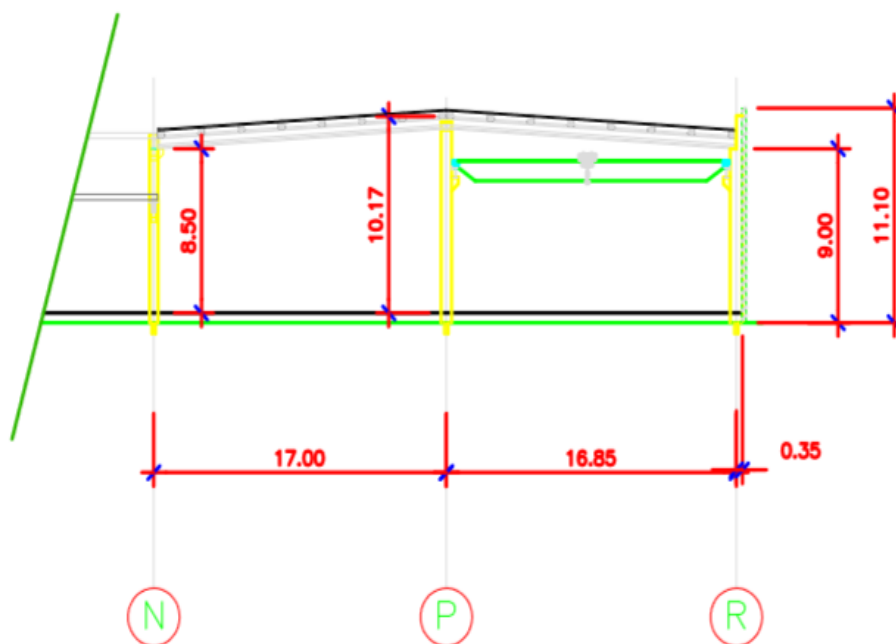


Ilustración 2: Alzado de la nave de diseño

Una vez que se ha representado la geometría que tiene la nave, de la cual vamos a proceder a realizar el diseño del sistema de evacuación de humos, aprovecharemos también para realizar un primer acercamiento a los materiales que componen las distintas superficies limítrofes con el exterior y con los espacios colindantes. En principio, la definición de dichos materiales no va a resultar útil desde el punto de vista del diseño mediante uso de la norma UNE 23585, sin embargo, es un parámetro que podría ser importante y que tendremos que definir para poder realizar el análisis de incendios mediante modelos de zona que posteriormente llevaremos a cabo haciendo uso de CFAST. Podemos ir viendo, el grado de detalle que van a emplear dichos modelos y lo riguroso que tendrá que ser la persona que diseñe si quiere obtener unos resultados precisos y no provocar una situación peligrosa en caso de que se produjera un incendio.

Hablaremos, por tanto, de materiales distintos con propiedades diferentes según estemos refiriéndonos a las distintas superficies. De forma genérica, podemos confirmar que la cubierta es de panel sándwich rellena de poliuretano rodeado por una fina capa de acero en sus lados superior e inferior. Además, tanto las paredes como el suelo están formados por hormigón, aunque de distintas densidades.

La descripción detallada de los materiales que componen dichas superficies, así como las propiedades que serán necesarias para llevar a cabo la simulación se desarrollarán más adelante cuando entremos a fondo con el estudio de CFAST.

1.2 Norma UNE 23585:2017

La aparición ocasional e incontrolada de incendios con el consecuente daño tanto personal como material que puede conllevar, incentivó el desarrollo paulatino de diversas normas que permitieran actuar de forma rápida y efectiva sobre el propio incendio determinando la posible reducción de los daños anteriormente citados. Aunque no fue un proceso fácil, debido al desconocimiento inicial que existía en materia de incendios y la falta de datos o experiencias en las que basarse, se consiguió establecer un conjunto de disposiciones que permitieran aumentar la seguridad de la sociedad.

Concretamente, de entre toda la normativa vigente de protección contra incendios, tenemos que destacar para el desarrollo de este proyecto, la Norma UNE 23585:2017, norma, que dentro de la protección contra incendios, está destinada al diseño de los sistemas de evacuación de humos que anula y sustituye a la Norma UNE 23585:2004, y que recoge la información y la normativa a cumplir en los siguientes aspectos:

- Seguridad contra incendios
- Sistemas de control de humo y calor
- Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y de evacuación de humos en caso de incendio estacionario

Dicha norma, será la que tendremos que aplicar principalmente, aunque no de forma única ya que también haremos referencia a la Normativa UNE-EN 12101-2: “Especificaciones para aireadores de extracción natural de humos y calor”, en la primera parte del proyecto, pues marca los pasos a seguir en el diseño y dimensionado de sistemas de evacuación de humos y será, por tanto, en la que nos basaremos para hacer un primer análisis de la estructura a analizar que posteriormente compararemos con los cálculos realizados mediante CFAST. Además, también haremos uso del RSCIEI⁴ para clasificar el tipo de establecimiento.

1.3 Modelos de zona: Software CFAST

CFAST son las siglas bajo las que se conoce al software “*The Consolidated Model of Fire and Smoke Transport*”, que será el software de cálculo y simulación de incendios que emplearemos en la segunda parte del trabajo. CFAST es un programa de ordenador empleado en el ámbito de la construcción por especialistas como pueden ser ingenieros, arquitectos, constructores, etc. con el objetivo de simular incendios pasados o potenciales, así como la propagación y avance del humo fruto de dichos incendios en una construcción concreta. En definitiva, CFAST es un modelo de zona usado para calcular la evolución de la distribución de humos, gases producto del fuego y temperatura a través de distintos compartimentos de un edificio durante la evolución de un incendio. La simulación de dichos modelos nos permitirá obtener una serie de resultados que determinen la peligrosidad de los diferentes escenarios supuestos.

La primera versión de CFAST, la 1.0, fue publicada en junio de 1990. Dicha versión supuso un primer acercamiento a la simulación de incendios. Sin embargo, el mayor conocimiento en materia de incendios provocó también el desarrollo y evolución de CFAST, con la correspondiente aparición de nuevas versiones cada vez más precisas y avanzadas, hasta que en 2015 fue lanzada la versión 7 que se corresponde con la versión que disponemos actualmente.

CFAST fue desarrollado, y es mantenido actualmente, por la División de Investigación de Incendios del NIST⁵, siendo sus desarrolladores principales Richard Peacock, Glenn Forney y Paul Reneke, Rebecca Portier y Walter W. Jones.

Los modelos de zona, como es el caso de CFAST, junto con los modelos de campo, representan los dos tipos de modelización del desarrollo del incendio (CFD). Las herramientas de CFD pueden ser utilizadas en el diseño de sistemas de protección contra incendios y para investigar fuegos reales. El desarrollo de estos modelos supone la posibilidad de simular múltiples escenarios posibles de incendio, en espacios breves de tiempo, dejando de lado la vía experimental tradicional más costosa, con el consiguiente ahorro de dinero y tiempo.

Los modelos de zona se caracterizan, principalmente, por dividir los recintos en diferentes zonas, estando cada una de ellas caracterizada por diferentes propiedades de las diversas magnitudes medidas dentro de ellas. Generalmente, la división de los diferentes dominios se realiza en dos zonas, la superior o zona caliente y la inferior o zona fría. CFAST es un modelo multi-compartimento, en el que el usuario podrá definir más de 40 compartimentos. Además, se podrán considerar distintos escenarios de incendios en cada uno de los compartimentos que conformen nuestro caso de estudio, pudiendo incluirse también sistemas de Protección contra Incendios, como pueden ser sistemas de rociadores automáticos o sistemas de detección, además de los sistemas de ventilación.

⁴ RSCIEI: Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales

⁵ NIST: Instituto Nacional de Estándares y Tecnología

Se trata de modelos de cálculo rápido que permiten obtener una primera estimación de los resultados con gran celeridad, siendo ampliamente utilizados en diseños preliminares para obtener resultados aproximados relacionados principalmente con la evolución de las temperaturas o la evolución del humo en los distintos compartimentos.

Sin embargo, también presentan ciertas restricciones que limitan su uso como la falta de información de detalle o la imposibilidad de ser empleados para analizar o simular situaciones en las que las geometrías son complejas, que podrían conducir a la falta de exactitud en los resultados obtenidos en caso de no hacerse una representación correcta de la situación que analizamos.

2 MÉTODOS DE CONTROL DE HUMO

Existen diversos métodos que permiten actuar sobre el humo producido en un incendio, consiguiendo así que podamos mantener el control sobre su movimiento para favorecer determinados procedimientos que permitan al ser humano encontrar situaciones algo más favorables para poder hacer frente a los devastadores efectos provocados por un incendio. Para ello, podemos seguir distintos métodos en función de los objetivos que queremos conseguir: favorecer la visibilidad, expulsar el humo del edificio afectado, mantenerlo en un espacio determinado, etc. Los métodos más comunes que permiten controlar el movimiento del humo son: dilución, extracción, contención y presurización. De entre todos ellos, cabe destacar para el trabajo que aquí se realiza, el método de extracción, pues dicho método representa la base sobre la que se sostiene este documento.

A continuación, se realiza una descripción breve de en qué consiste cada uno de estos métodos.

2.1 Dilución

Se trata de un método directamente relacionado con el efecto que tiene la presencia de humo sobre la visibilidad de las personas. Es evidente que la presencia de humo, además de sus efectos nocivos sobre las vías respiratorias, reduce considerablemente la visibilidad, en mayor o menor medida, en función de la concentración. La dilución persigue la reducción de la concentración de humo producido por un incendio mejorando la visibilidad y facilitando, como consecuencia, tanto la evacuación de las personas que puedan verse afectadas por el incendio como las tareas a llevar a cabo por los bomberos.

Dicho método de control de humo puede realizarse de forma natural a partir de la geometría de los espacios del edificio que estamos considerando. Si el volumen disponible de dichos espacios es lo suficientemente grande, la acumulación del humo tendrá lugar en los niveles superiores, permitiéndose asimismo que transcurra un tiempo considerable hasta que se produzca cualquier amenaza directa procedente del humo. Se trata de aprovechar la geometría de la estructura para conseguir que el humo denso se concentre en las zonas elevadas, facilitando fundamentalmente la visibilidad y permitiendo así la evacuación controlada de las personas que puedan verse afectadas.

Consideremos un atrio abierto como el que se muestra en la ilustración 3. En este caso podríamos emplear el concepto de dilución, siempre y cuando el volumen del atrio sea suficiente, de forma que el humo se pueda dirigir hacia su interior llenándolo mientras se lleva a cabo la evacuación del resto del edificio.

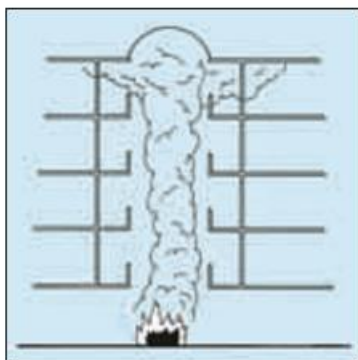


Ilustración 3: Representación de un atrio abierto para ilustrar la dilución del humo

Sin embargo, la existencia de un humo negro denso y visible, fluyendo hacia el atrio, para quienes ocupan las plantas altas del edificio provoca un negativo impacto psicológico que convierte esta posibilidad en una solución inaceptable a no ser que se disponga en los pisos superiores de aberturas de ventilación que permita que el humo pueda ser expulsado.

2.2 Contención

La contención se emplea con la intención fundamental de mantener el humo producido por un incendio en una zona concreta, generalmente donde ha tenido lugar el incendio, para evitar que se propague a otras estancias. La finalidad de este método es permitir que el humo quede confinado en una zona característica, limitando los efectos negativos del fuego a un espacio concreto para facilitar la evacuación del resto de espacios de una forma más sencilla y eficaz. Se trata de un método que debería ir acompañado, para conseguir un efecto óptimo, de algún sistema de extracción que expulsara el humo concentrado hacia el exterior. Por tanto, para que la actuación sobre el incendio sea realmente eficiente, deberán combinarse dos medidas simultáneas: confinar el humo en una zona específica y emplear los sistemas de evacuación de humos adecuados.

Los elementos de contención de utilización más frecuente son las cortinas anti-humo y los muros cortafuegos.

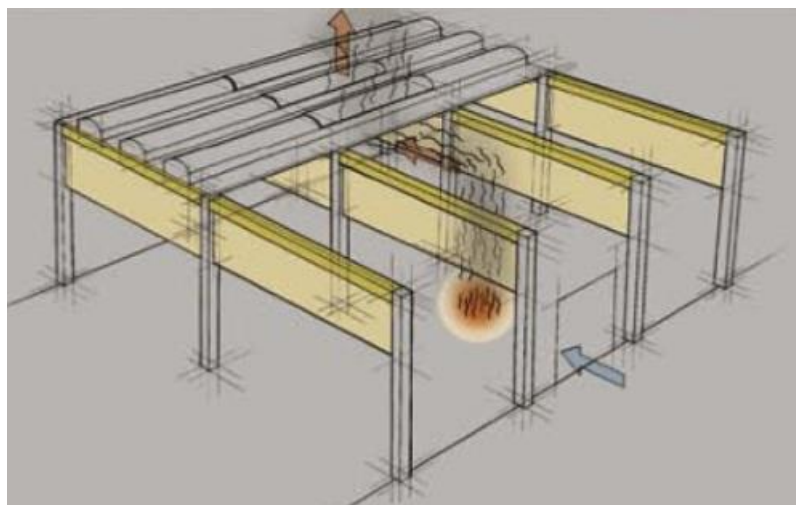


Ilustración 4: Cortinas de humo para contención del humo en establecimiento industrial

2.3 Extracción

Como su propio nombre indica, los métodos de control de humo mediante extracción tratan de eliminar el humo generado en un incendio dirigiéndolo hacia el exterior del edificio, generalmente, a través de la generación de gradientes de presión hacia los puntos donde se encuentran los dispositivos de extracción. Representa el método por el cual tratamos de resolver el problema planteado mediante el diseño de aireadores o exutorios, según establece la norma UNE 23585 y, posteriormente, utilizando programa de simulación CFAST con el fin de comparar y optimizar la solución obtenida previamente.

2.3.1 Extracción natural

Los dispositivos de extracción natural que se emplean son los denominados exutorios o aireadores que consisten en aberturas realizadas en las cubiertas o fachadas de los edificios que se desean proteger. Dichas aberturas, en forma de ventanas, claraboyas o exutorios de lamas, definen posibles caminos de salida de los gases originados en un incendio. Normalmente, los exutorios se abren de manera automática cuando los sistemas de detección de humos se activan ante la presencia de gases, estando siempre presente la posibilidad de ser abiertos de forma manual.

2.3.2 Extracción forzada

La extracción forzada, también denominada extracción mecánica, se ayuda de sistemas o elementos que actúan sobre los humos moviéndolos y dirigiéndolos hacia el exterior. Los dispositivos más empleados como sistemas

de extracción forzada son los ventiladores y los conductos para extracción de humos, pudiendo estos últimos ser sustituidos por equipos de movimiento de aire (jet fan, fundamentalmente) que guían el humo en la dirección en que se disponen. Se trata del sistema más empleado en el caso de garajes o edificios subterráneos donde resulta más complicado la admisión de aire limpio del exterior que ayude a expulsar los humos del incendio como ocurría en el caso de los sistemas de extracción natural.

2.4 Presurización

Se trata de un método de protección contra incendios en el que se intenta controlar el movimiento del humo manteniendo las zonas de evacuación a presiones más elevadas que las adyacentes, para así impedir el movimiento de los gases procedentes del incendio hacia las vías de escape de un edificio o establecimiento como pueden ser las cajas de escaleras y vestíbulos o pasillos.

Debemos resaltar la idea de que estos sistemas, en su mayoría, representan métodos para controlar los espacios ocupados por el humo, por lo que cualquiera de los sistemas mencionados debería emplearse de manera conjunta con otros sistemas de extracción de humos ya que por sí solos facilitarían la evacuación de personas, pero en ningún caso se puede esperar que acaben definitivamente con el incendio.

Una vez explicados los diversos métodos que se emplean para controlar el movimiento de los humos, nos centraremos en explicar en profundidad los sistemas de evacuación de humos, ya que serán estos los que diseñemos a lo largo del presente trabajo.

3 SISTEMAS DE EVACUACIÓN DE HUMOS

Los sistemas de evacuación de humos constituyen, de forma directa o indirecta, el punto de partida del presente documento ya que su estudio y definición, utilizando métodos prescriptivos (Norma UNE), nos ayudarán a entender mejor el uso de los modelos de zona basados en los métodos computacionales, y más concretamente el uso del software CFAST para simulación de incendios.

“Parte del SCTEH⁶ diseñado para extraer los humos y el calor de un incendio en un edificio u obra de ingeniería o en una parte de la misma”.

[1]⁷

En definitiva, consideraremos que los sistemas de evacuación de humos son el conjunto de elementos incorporados a un edificio para que, en caso de incendio, faciliten la evacuación de los humos y el calor producido.

3.1 Objetivos de un Sistema de evacuación de humos

Como ya hemos visto, la aparición de incendios aumentó la conciencia de prevención sobre los mismos, así como la necesidad de desarrollar medidas y sistemas que permitieran hacer frente de una forma eficaz a los daños que pudieran ocasionar. Evidentemente, el primer aspecto al que nos enfrentamos será eliminar o disminuir al máximo los posibles daños generados sobre los seres vivos, aunque también existirán casos en los que el objetivo principal de estos sistemas destinados a la protección contra incendios se centre en asegurar la integridad de los bienes, es decir, de los distintos materiales o maquinarias que nos interese proteger, debido, principalmente, a que se trate de elementos de gran coste.

Desde este punto de vista, e incidiendo en la protección de los seres humanos que se puedan ver involucrados en un incendio, se trata de diseñar distintos sistemas de protección frente a incendios, que en su inicio iban fundamentalmente encaminados a actuar directamente sobre el foco del fuego para intentar extinguirlo en el menor tiempo posible sin preocuparse en exceso de actuar sobre la extracción de humos. Sin embargo, con el paso del tiempo y debido a distintas malas experiencias relacionadas con este tema se pudo observar que gran parte de los daños que se producían en las personas eran debidos al humo fruto de las llamas y no al propio fuego, que en muchos casos no llegaba a alcanzar a la gente que ocupaba el recinto afectado. Es en ese momento se decide actuar también sobre el humo producido por las llamas en lugar de actuar únicamente sobre el foco del incendio. Ni mucho menos se pretender dar a entender que la evacuación del humo sustituye a la extinción del incendio, sino que se empieza a actuar sobre ambos aspectos de forma complementaria.

A raíz de estas observaciones, se fueron intensificando las medidas que ayudaban a controlar los humos, dirigiéndolos hacia determinadas zonas donde sus efectos fueran mínimos sobre las personas o, si fuera posible, dirigiéndolos hacia el exterior de la zona cerrada que está afectada en cada caso por el incendio correspondiente. Para ello, surgen los sistemas de evacuación de humos y calor que permiten eliminar los humos y cuyas principales funciones se enumeran a continuación:

- **Facilitar la evacuación segura de los ocupantes del edificio.** El fin fundamental de la evacuación de humos y calor es la protección de las personas que se pudieran ver involucradas en un incendio, por lo que resulta transcendental reducir las dificultades que la presencia de humo en el ambiente ocasiona en la salida de personas hacia el exterior.

⁶ SCTEH: Sistema de Control de Temperatura y Evacuación de Humos.

⁷ Se ha decidido utilizar esta forma de relacionar los extractos literales de ciertos documentos. El número entre corchetes está relacionado con la documentación a la que pertenece en el apartado *Referencias*

- **Impedir que el incendio se extienda.** La concentración de humo a alta temperatura puede conllevar la propagación del incendio haciendo arder otros elementos del edificio mientras que la existencia de sistemas de evacuación de humos puede ayudar a que el incendio se mantenga aislado en una zona concreta facilitando su extinción. Este hecho está directamente relacionado con la compartimentación de la que hablábamos en el apartado 2, donde ya indicamos que compartimentación y evacuación de humos son métodos complementarios.
- **Reducir los efectos de las altas temperaturas sobre la integridad estructural del establecimiento en el que tiene lugar el incendio.** La aparición de un incendio conlleva el aumento rápido y generalizado de la temperatura pudiendo llegar a ser tan elevada que debilite los elementos estructurales (vigas, pilares, viguetas, etc.) encargados de mantener el edificio.
- **Ayuda y protección del cuerpo de bomberos.** Siempre es importante ser capaces de mejorar, en la medida de lo posible, las condiciones de trabajo del cuerpo de bomberos aumentando la visibilidad y favoreciendo un despliegue rápido de los medios empleados en la lucha contra el foco del incendio que permita acabar con este en el menor tiempo posible.

3.2 Elementos de un Sistema de evacuación de humos

Una vez definido qué es un sistema de evacuación de humos y para qué se utiliza, resulta importante que conozcamos cuales son los elementos que lo componen, dando una explicación detallada de la funcionalidad de cada uno de ellos. De este modo, vamos a centrarnos en los tres elementos principales del sistema que queremos implantar: aireadores naturales o exutorios, los elementos de admisión de aire limpio y, por último, el cuadro de mando.

3.2.1 Exutorios

Un exutorio o aireador natural es un dispositivo que facilita la evacuación de humos producidos en un incendio mediante su apertura a través de un accionamiento manual o mediante una señal automática que generará el sistema de detección de incendios. Dicha extracción de humos también va a actuar sobre el aumento de la temperatura, manteniéndola dentro de unos valores óptimos que impidan la extensión del incendio y faciliten las tareas de evacuación y extinción del fuego.

Los exutorios son elementos de evacuación de humos mediante extracción natural que permiten una salida de los gases originados en un incendio aprovechando el llamado efecto chimenea, es decir, cuando existe un gradiente de temperaturas considerable, y que acompañado por la diferencia de densidades entre el aire frío y el caliente produce un efecto de succión que favorece las renovaciones de aire desde el exterior.



Ilustración 5: Representación del efecto chimenea

Podemos clasificar los exutorios en dos grandes grupos según sus características:

1. Exutorio o aireador de lamas: formado por lamas o paletas que se abren en caso de activación del sistema

de detección de humos. Pueden ser instalados tanto en cubierta como en fachada y, además de participar en la evacuación de humos también son utilizados para aportar aire natural dentro de espacios cerrados. La apertura y cierre automático se realiza normalmente por línea neumática.



Ilustración 6: Exutorio de lamas

2. Exutorio de compuerta tipo claraboya, lucernarios y ventanas: los exutorios de compuerta, independientemente de que se opte por uno u otro, se caracterizan por su apertura oscilobatiente que permite que se abran, generalmente, entre 50° y 90° para permitir la entrada de aire. Además de trabajar en la evacuación de humos, estos sistemas contribuyen a la iluminación de los establecimientos permitiendo, a través de ellos, el paso de la luz natural procedente del exterior.



Ilustración 7: Exutorio de compuerta sobre lucernario

Generalmente, los exutorios de lamas tendrán un coeficiente de descarga (C_v) mayor que los exutorios de compuerta.

En ambos casos, los exutorios que se deseen montar en cualquier instalación contra incendios deberán satisfacer los requisitos incluidos en la Norma UNE-EN 12101: “Sistemas para el control de humo y calor” y, más concretamente, en el caso de que se instalen aireadores naturales, en la Parte 2 de dicha normativa: “Especificaciones para aireadores de extracción natural de humos y calor”.

3.2.2 Entrada de aire

Se trata de los elementos que permiten la entrada de aire fresco desde el exterior reemplazando a los gases producidos en el incendio. Dichos elementos pueden ser elementos instalados en los establecimientos destinados específicamente a permitir la entrada del aire exterior o dispositivos ya existentes en la estructura como podrían ser puertas o ventanas, aunque, en general, cualquier sistema que permita la entrada de aire frío puede ser utilizado.

La Normativa UNE 23585:2017 impone algunas restricciones en cuanto a los sistemas de admisión de aire:

- Los elementos de admisión de aire deben situarse siempre por debajo de la capa de humos.
- No se debe utilizar una abertura como entrada y salida de aire simultáneamente.
- En un mismo depósito de humos, no se deben utilizar de forma simultánea aireadores naturales y ventiladores para la aportación de aire.
- A pesar de disponer de sistemas de activación automática, las aperturas también deben poder realizarse de forma manual.

3.2.3 Cortinas de humo

“Barreras para restringir la extensión del humo y los gases calientes desde el incendio, que forman parte de la frontera de un depósito de humos o se utilizan como pantallas de canalización o como pantallas de borde de un vacío.”

[2]

Representan el sistema de contención de humos por excelencia y sus funciones fundamentales son las siguientes:

- Generar un depósito de humos que restrinja e impida el desplazamiento de los humos.
- Dirigir el humo en una dirección concreta.
- Evitar o complicar el paso de los humos a otras zonas.

La necesidad de disponer o no de estos sistemas dependerá del tamaño del depósito de humos, como se verá en páginas posteriores de este documento.

3.2.4 Cuadro de mando

El cuadro de mando o cuadro de control es el elemento que tiene la función de abrir los aireadores naturales cuando reciben la señal de activación en caso de incendio.

La línea de conexión entre el cuadro de mando y los aireadores podrá realizarse de forma eléctrica o neumática, no pudiendo mezclarse, en una misma zona, elementos de ambos tipos.

3.3 Necesidad de disponer del sistema en el caso de estudio

Una vez definido qué es un sistema de evacuación de humos y cuáles son sus objetivos, debemos preguntarnos si realmente será necesario disponer de dichos sistemas en la geometría que estamos estudiando.

Para ello, haremos uso del RSCIEI, que en su apartado 7: *“Ventilación y eliminación de gases y humos de la combustión en los edificios industriales”* establece la necesidad de disponer de sistemas de evacuación de humos en aquellos sectores con actividades de almacenamiento:

1. De riesgo intrínseco medio y superficie construida $\geq 1000m^2$.
2. De riesgo intrínseco alto y superficie construida $\geq 800m^2$.

A lo largo del presente punto, vamos a clasificar el tipo de establecimiento y el nivel de riesgo intrínseco sobre el que queremos diseñar el sistema de evacuación de humos, comprobando la necesidad de disponer los sistemas correspondientes.

3.3.1 Tipo de establecimiento

RSCIEI clasifica los establecimientos, en su apartado 2 del Anexo I, en función de su configuración y ubicación en relación con su entorno.

Según dicho apartado, en nuestro caso, podemos asumir que nuestro establecimiento será del Tipo C, al ocupar completamente el edificio y encontrarse a una distancia mayor de tres metros del edificio más próximo de otros establecimientos.

Esta clasificación resulta importante de cara a confirmar que la superficie de nuestro sector de incendio no rebasa los límites establecidos en función del nivel de riesgo intrínseco que calculamos a continuación.

3.3.2 Nivel de riesgo intrínseco

El nivel de riesgo intrínseco permite clasificar los establecimientos industriales según la peligrosidad que pueda conllevar un incendio, de modo que se intensifiquen las medidas de protección contra incendios según el grado de peligro.

El parámetro que permite llevar a cabo dicha clasificación es la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, Q_s , del sector de incendio, que viene definida en el RSCIEI, y particularizada para el caso concreto de establecimientos industriales de almacenamiento por la siguiente expresión:

$$Q_s = \frac{\sum_1^i q_{vi} \cdot C_i \cdot h_i \cdot s_i}{A} \cdot R_a \quad (1)$$

donde

Q_s densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del sector o área de incendio, en MJ/m^2 o $Mcal/m^2$.

q_{vi} carga de fuego, aportada por cada m^3 de cada zona con diferente tipo de almacenamiento (i) existente en el sector de incendio, en MJ/m^2 o $Mcal/m^2$.

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

h_i altura de almacenamiento de cada uno de los combustibles, (i), en m.

s_i superficie ocupada en planta por cada zona con diferente tipo de almacenamiento (i) existente en el sector de incendio en m^3 .

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

A superficie construida del sector de incendio o superficie ocupada del área de incendio, en m^2 .

En el caso que nos incumbe, $q_v = 600 MJ/m^3$, $R_a = 1.5$, se han obtenido de la tabla 1.2 del RSCIEI, siendo los valores correspondientes a *cables*. Se ha optado por esta decisión dado que sabemos que se almacena material eléctrico y los *cables* se incluyen dentro de esta terminología. Además, aunque también se podrían haber tomado los valores relacionados con *aparatos eléctricos* hemos optado por tomar los otros valores ya que son más críticos.

Por otra parte, se ha decidido considerar una altura de almacenamiento $h_i = 4.5 m$, algo inferior a la altura de las estanterías, mientras que el valor de la superficie ocupada en planta por cada zona de almacenamiento toma el valor $s_i = 396.11 m^2$, que representa el área en planta de las 13 estanterías de almacenamiento dispuestas en ambas naves. Finalmente, para el coeficiente adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) del combustible que existe en el sector de incendio se ha decidido darle un valor $C_i = 1.3$, asumiendo que el material eléctrico es capaz de iniciar su combustión a una temperatura comprendida entre $100^\circ C$ y $200^\circ C$.

Si particularizamos en el caso que estamos diseñando, teniendo en cuenta todos los parámetros definidos previamente, obtendríamos el siguiente valor de carga de fuego:

$$Q_s = \frac{600 \text{ MJ/m}^3 \cdot 1.3 \cdot 4.5\text{m} \cdot 396.11\text{m}^2}{1652.77\text{m}^2} \cdot 1.5 = 1261.83 \text{ MJ/m}^2$$

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	$200 < Q_s \leq 300$	$850 < Q_s \leq 1275$
	4	$300 < Q_s \leq 400$	$1275 < Q_s \leq 1700$
	5	$400 < Q_s \leq 800$	$1700 < Q_s \leq 3400$
ALTO	6	$800 < Q_s \leq 1600$	$3400 < Q_s \leq 6800$
	7	$1600 < Q_s \leq 3200$	$6800 < Q_s \leq 13600$
	8	$3200 < Q_s$	$13600 < Q_s$

Tabla 1. Densidad de fuego ponderada y corregida en función del tipo de establecimiento

[1]

De la tabla 3-1: “Densidad de fuego ponderada y corregida en función del tipo de establecimiento”, y para el valor de la carga de fuego calculado previamente podemos confirmar que nuestro establecimiento industrial presenta un nivel de riesgo intrínseco **MEDIO 3**, por tanto, y teniendo en cuenta que la superficie de dicho establecimiento es mayor que 1000m^2 , podemos asegurar la necesidad de disponer de sistemas de evacuación de humos.

3.3.3 Sectorización

Se denomina sector de incendios a una zona del edificio separada del resto de este por elementos constructivos delimitadores resistentes al fuego.

En lo que a la sectorización respecta, debemos aclarar que hasta ahora hemos diseñado suponiendo que la zona de almacenamiento del edificio que estamos estudiando constituye un único sector de incendio.

Por tanto, el último aspecto que debemos dejar claro es que la superficie del sector de incendio que estamos diseñando no sea superior a los límites establecidos en función del nivel de riesgo intrínseco, ya calculado, y el tipo de establecimiento que estamos dimensionando, que como dijimos anteriormente es Tipo C.

Con estos datos y haciendo uso de la guía RSCIEI, que facilita la tabla 3-2: “Máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio”, que adjuntamos a continuación y de la que se han obviado las notas que aplican a casos determinados por no ser útiles en este caso, podemos obtener la superficie máxima admisible para un establecimiento industrial con las características definidas hasta el momento.

De este modo, podemos concluir que la superficie máxima admisible para el caso de diseño es 5000 m^2 , superior a la superficie de nuestro sector, por lo que podemos asumir correcta la suposición de diseñar para un único sector de incendio.

Riesgo intrínseco del sector de incendio	Configuración del establecimiento		
	Tipo A (m ²)	Tipo B (m ²)	Tipo C (m ²)
BAJO			
1	2000	6000	SIN LÍMITE
2	1000	4000	6000
MEDIO			
3	500	3500	5000
4	400	3000	4000
5	300	2500	3500
ALTO			
6	NO ADMITIDO	2000	3000
7	NO ADMITIDO	1500	2500
8		NO ADMITIDO	2000

Tabla 2. Máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio (Tabla extraída del RSCIEI)

[1]

4 DISEÑO Y DIMENSIONADO DE SISTEMAS DE EVACUACIÓN MEDIANTE LA NORMA UNE 23585

Una vez que hemos comprobado la necesidad de incorporar sistemas de evacuación de humos haciendo uso de la reglamentación RSCIEI procedemos a realizar el diseño y dimensionado de los sistemas de extracción haciendo uso de la normativa UNE 23585:2017.

4.1 Extracción natural

Se dispondrán sistemas de extracción natural, siempre que sea posible y no lo impidan las condiciones de ubicación tal como dicta el RSCIEI en su apartado 7:

“La ventilación será natural a no ser que la ubicación del sector lo impida; en tal caso, podrá ser forzada”.

[1]

A pesar de la existencia de edificios colindantes al que nosotros queremos incorporar los sistemas de evacuación natural, existe una zona comunicada directamente con el exterior, lo que indica que no habrá inconvenientes en que el sistema de evacuación sea de extracción natural, desde el punto de vista de poder colocar los exutorios para la entrada de aire limpio desde el exterior en una de las paredes del edificio. Una vez se determine la superficie de salida necesaria para evacuar el humo procedente de un hipotético incendio, se comprobará también la posición en la que podemos colocar los exutorios de entrada que permiten la entrada de aire limpio que sustituya los humos contaminados.

4.2 Depósito de humos

“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”.

[2]

Vamos a determinar el número de depósitos de humos de los que debe disponer nuestra zona de diseño, siguiendo la norma UNE 23585, que enuncia en el apartado 6.6: *“El depósito de humo y los aireadores”*,

“Cuando el incendio está directamente debajo del depósito de humos, la superficie máxima de cualquier depósito de humos debe ser de 2000 m² si se han adoptado aireadores naturales de extracción de humos o, 2600 m² si se adoptan aireadores mecánicos de extracción de humos”.

[2]

Esta afirmación permite concluir que, dado que la superficie de la zona de almacenamiento que estamos diseñando tiene una superficie inferior a los 2000 m² y que se ha optado por aireadores naturales de extracción de humos, sólo tendremos un depósito de humos, que viene constituido por la propia nave de almacenamiento, que representa la superficie total de la zona sobre la que estamos trabajando, lo cual implica que no necesitaremos incluir elementos separadores como cortinas de humos, que separen la superficie de la nave en varios depósitos de humo.

4.3 Altura libre de humos (Y)

“Diferencia entre el nivel inferior de la capa de humos con respecto al nivel del suelo”

[2]

Para establecer la altura libre de humos nos basaremos en el apartado 6.2 de la Norma⁸: *“Penacho que asciende directamente desde el incendio hasta el depósito de humos”* donde se especifica el valor que debe tomar según sea el fin de los sistemas que se van a instalar, es decir, si el objetivo primordial es la evacuación de personas o la protección de los bienes almacenados.

En este caso, al tratarse de una zona de almacenamiento de material eléctrico consideramos que la necesidad de sistemas de evacuación de humos es la protección de los elementos contenidos y apilados en las estanterías por lo que, teniendo en cuenta las especificaciones de la Norma, consideramos una altura libre de humos de 5.5 m.

La Norma establece literalmente:

“La altura de ascenso hasta la base de la capa de humos en el depósito de humos debe tener previstos al menos 0.5 m de altura limpia por encima de la parte superior de los géneros almacenados”

[1]

Dicho esto, y teniendo en cuenta que la altura de almacenamiento era de 4.5 m, se ha optado por disponer de medio metro más al mínimo considerado según la Norma, teniendo en cuenta que también se verifican la altura libre de humos mínima y máxima establecidas para proyectar un sistema de evacuación de humos, un décimo (1/10) y nueve décimos (9/10), respectivamente.

4.4 Modelo de incendio

“Hipotético incendio con características suficientemente severas como para que sirva de base del diseño de un sistema de evacuación de incendios”

[2]

Una vez definida la altura de diseño, procedemos eligiendo el modelo de incendio que corresponde a la situación bajo estudio, siguiendo nuevamente los pasos establecidos en la Norma. Para ello, nos basaremos en el punto 6: *“Requisitos de ejecución”*, y más concretamente en una de las afirmaciones definidas en 6.1.2: *“Requisitos”*, que establece textualmente:

“Para almacenamientos por estibas o estanterías, y locales de venta con superficie mayor de 1000m² 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 1.4 como procedimiento de cálculo”

[2]

La tabla a la que hace referencia el enunciado anterior se adjunta, a continuación, incluyendo únicamente la parte de esta que nos va a ser de interés, bajo la referencia de tabla 4-1: *“Parámetros característicos del modelo de incendios para edificios de almacenamiento en altura”*. Atendiendo a nuestra situación particular, en la que no existen rociadores en el edificio y el almacenamiento se realiza con estanterías con una altura de almacenamiento de 4.5 m, parece evidente que se trata de la tabla que define nuestro modelo de incendio.

⁸ En el desarrollo del apartado 4 usaremos “la Norma” para referirnos específicamente a la Normativa UNE 23585:2017

Edificio de almacenamiento en altura.			
	Área de incendio (A_f) 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	$q_f(bajo) = 250$ $q_f(alto) = 1250$

Tabla 3. Parámetros característicos del modelo de incendios para edificios de almacenamiento en altura (Tabla 1.4 en UNE 23585)

En definitiva, el modelo de incendio que hemos definido viene caracterizado por los siguientes parámetros:

- Área de incendio: $(A_f) = 81 m^2$
- Perímetro del incendio: $(P) = 36 m$
- Flujo de calor liberado: $q_f(bajo) = 250 kW/m^2$; $q_f(alto) = 1250 kW/m^2$

La existencia de dos valores para el flujo de calor liberado radica en que podemos utilizar este parámetro para llevar a cabo cálculos diferentes. Así, según establece la Norma:

- Utilizaremos $q_f(bajo)$ para el cálculo de la superficie aerodinámica de descarga (A_v) y para comprobar que la temperatura de la capa de humos no es menor que 20°C por encima de la temperatura ambiente.
- Por otra parte, haremos uso de $q_f(alto)$ para comprobar el valor más peligroso previsible de la temperatura de humos.

4.5 Caudal de aire que entra dentro de un penacho ascendente de humos por encima de un incendio

La expresión que permite calcular el caudal de aire que entra dentro de un penacho ascendente de humos por encima de un incendio viene dada por la Norma como:

$$M_f = C_e \cdot P \cdot Y^{3/2} \quad kg \cdot s^{-1} \quad (2) [A.2]$$

Donde $C_e = 0.188$, en establecimientos con techos altos.

Sin embargo, dicha ecuación únicamente se satisface en casos en los que el caudal de aire que entra dentro del penacho es grande, o lo que es lo mismo, aquellos penachos en los que se satisface la relación:

$$Y \leq 10 \cdot [A_f]^{0.5} \quad (3) [A.1]$$

Que para el caso que nos incumbe, puede particularizarse para los valores obtenidos de altura libre humos, $Y = 5.5 \text{ m}$, y área de incendio, $A_f = 81 \text{ m}^2$, que se han definido con anterioridad. Por lo tanto, podemos afirmar que se trata de un penacho por encima de un gran incendio y la expresión del caudal de aire que entra en su interior se corresponde con la descrita en este apartado y que puede particularizarse como:

$$M_f = 0.188 \cdot 36 \cdot 5.5^{3/2} = 87.3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.6 La temperatura de la capa de humos

Para calcular el aumento promedio de la temperatura de los gases en la capa de humos hacemos uso de la siguiente expresión:

$$\Theta_1 = \frac{Q_1}{c \cdot M_1} \quad (4) \text{ [E.1]}$$

donde,

Q_1 calor convectivo en los gases del humo en la capa flotante del depósito de humos (kW);

c calor específico del aire a presión constante ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$);

M_1 masa circulante de gases de humo que entra en la capa flotante del depósito de humos ($kg \cdot s^{-1}$);

El valor obtenido lo tomaremos directamente para todo el depósito de humos por no disponer este de rociadores, de acuerdo con lo establecido en la Norma. De este modo, concluimos que, dado que no existen rociadores, podemos considerar que $T_1 = \Theta_1 + T_{amb}$, siendo T_1 la temperatura de la capa de humos.

Por tanto, a continuación, debemos calcular el valor de dicho calor convectivo en los gases del humo en la capa flotante del depósito y que se calculará según dicta la Norma en uno de los requisitos establecidos en el punto 6.2:

“...se debe tomar como 0.8 veces el valor del calor emitido ($q_f \cdot A_f$) predeterminado para el modelo de incendio de diseño, a menos que el proyectista pueda demostrar hechos o razones que aconsejen el uso de un valor diferente”.

[2]

Es decir, $Q_1 = 0.8 \cdot q_f(\text{bajo}) \cdot A_f$. El hecho de que hayamos tomado para el calor liberado su valor bajo se debe a que estamos calculando un nuevo parámetro, calor convectivo en los gases de los humos, que influirá directamente en el cálculo de la superficie aerodinámica de descarga previo cálculo de la temperatura de la capa de humos. Por ello, como se indicó previamente en este documento, se ha usado el valor de $q_f(\text{bajo})$ y no $q_f(\text{alto})$.

Con todo ello, se puede determinar que el aumento de temperatura en la capa de humos toma el valor $\Theta_1 = 186 \text{ }^\circ K$. Por tanto, la temperatura de la capa de humos será $T_1 = \Theta_1 + T_{amb} = 474 \text{ }^\circ K$, valor que implica que se ha producido un aumento de la temperatura de los gases contenidos en la capa de humos mayor de 20 grados centígrados tal y como se establecía en el apartado 4.4.

4.7 Superficie aerodinámica total de aireadores naturales

La superficie total de aireadores naturales para extracción de humos se calcula mediante la expresión establecida por la Norma en su Anexo E,

$$A_{vtot} \cdot C_v = \frac{M_1 \cdot T_1}{\left[2 \cdot \rho_{amb} \cdot g \cdot d_1 \cdot \Theta_1 \cdot T_{amb} - \frac{M_1^2 \cdot T_1 \cdot T_{amb}}{[A_i \cdot C_i]^2} \right]^{0.5}} \quad (5) \text{ [E.6]}$$

donde,

A_{vtot} superficie geométrica total libre de todos los aireadores de extracción de humos en un depósito de humos

C_v coeficiente de descarga, es decir, coeficiente de funcionamiento de un aireador natural

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 admisión

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

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

ρ_{amb} densidad del aire a temperatura ambiente. Se considera $1.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ para $T_{amb} = 288^\circ K$;

g aceleración de la gravedad. Se considera $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;

d_1 profundidad de la capa de humos que fluye (m);

Θ_1 aumento de temperatura de la capa de humos por encima de la temperatura ambiente K ;

T_{amb} temperatura ambiente. Se considera $T_{amb} = 288^\circ K$;

En esta expresión aparece relacionada la superficie de salida de humos con la superficie de entrada de aire. Sin embargo, procederemos de forma general considerando que ambas superficies son iguales, lo que permite definir el parámetro γ_V , que relaciona ambas superficies como se muestra en la ecuación 6:

$$\gamma_V = \frac{A_v \cdot C_v}{A_i \cdot C_i} = 1 \quad (6)$$

Dicha relación permite reescribir la ecuación para calcular la superficie aerodinámica de los exutorios, tras realizar los cálculos adecuados, como aparece en la *Norma Belga*⁹:

$$A_{vtot} \cdot C_v = \frac{M_1}{\rho_{amb}} \cdot \left[\frac{T_1^2 + T_1 \cdot T_{amb} \cdot \gamma_V^2}{2 \cdot g \cdot d_1 \cdot \Theta_1 \cdot T_{amb}} \right]^{0.5} \quad (7)$$

Una vez definida la expresión que permite determinar la superficie total de los aireadores naturales que debemos colocar, procedemos a calcular los parámetros que son desconocidos por el momento. Es decir, llegados a este punto sólo resta por hallar el parámetro d_1 , que vendrá dado por:

⁹ Norma Belga NBN S 21-208-1 Y 2. Normativa desarrollada por el Instituto Belga de Normalización para calcular instalaciones de Evacuación de Humos y Calor.

$$d_1 = h_c - Y \quad (8)$$

Donde h_c se define en la Norma Belga como la altura media desde el centro de la cara interior de los exutorios o de los puntos de extracción hasta el nivel más bajo del suelo e Y es la altura libre de humos definida anteriormente. Con ello, y considerando que el eje de los exutorios se encuentra inicialmente a 9.5 metros sobre el nivel más bajo del suelo, se establece que la profundidad de la capa de humos toma el valor $d_1 = 4 \text{ m}$.

Por lo tanto, el último paso será resolver la ecuación que hemos planteado anteriormente para calcular $A_{vtot} \cdot C_v$ con el valor de parámetros calculados en el desarrollo del apartado 4. Así, si sustituimos estos valores, se obtiene una superficie aerodinámica libre de descarga:

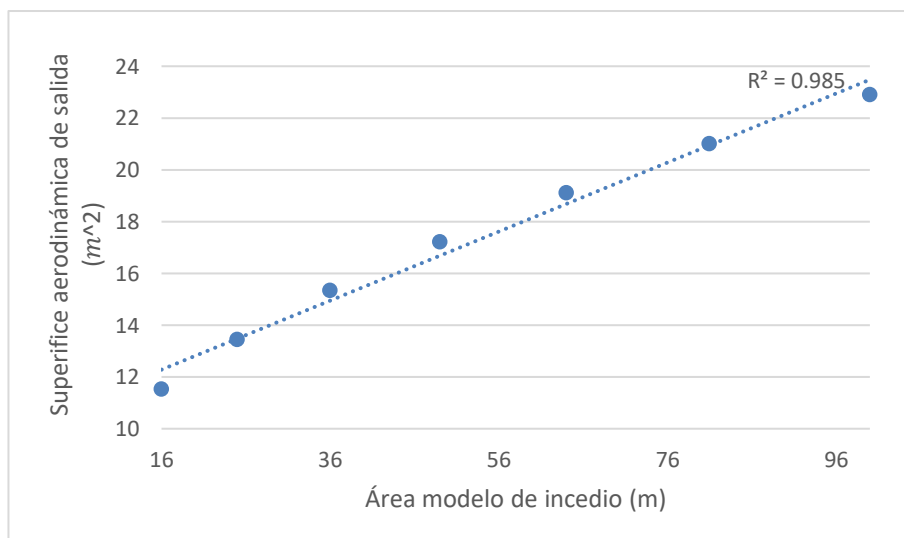
$$A_{vtot} \cdot C_v = 21 \text{ m}^2$$

Una vez determinada la superficie aerodinámica de descarga, deberemos elegir tanto el modelo que vamos a implantar como determinar la localización en la propia nave.

4.7.1 Influencia de los parámetros de entrada sobre la superficie de salida

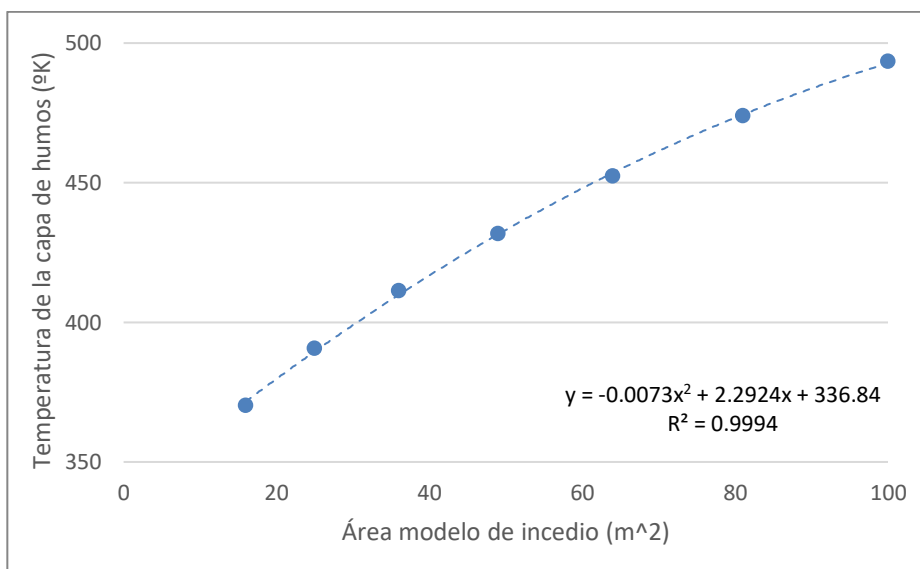
Vamos a analizar cómo afecta cada uno de los parámetros de entrada (altura libre de humos, área de incendio, perímetro de incendio y flujo de calor liberado) a la superficie de salida que hemos obtenido. Este análisis resulta interesante desde el punto de vista del diseño porque permite al propio diseñador conocer a qué parámetro es más susceptible el área aerodinámica de salida, pudiendo ser más o menos flexible a la hora de tomar decisiones que influirán directamente en el diseño como, por ejemplo, determinar la altura libre de humos.

Como es evidente, uno de los aspectos fundamentales en el diseño y que va a afectar directamente a la superficie de salida es el modelo de incendio. En nuestro caso, al no disponer de rociadores, se trata de un modelo de incendio de medidas definidas por la norma, con un área de incendio de 81 metros cuadrados y un perímetro de incendio de 36 metros. Se trata, por tanto, de un área cuadrada de lado 9 metros, en la que hablar de aumento/disminución del área también implica hablar de aumento/disminución del perímetro. Se ha analizado la influencia que tiene una variación del área/perímetro de incendio sobre la superficie aerodinámica de salida, obteniéndose los resultados más lógicos a priori, es decir, un aumento del área de incendio va a implicar que se aumente el área aerodinámica de salida mientras que una disminución del área de incendio conlleva también una reducción del área de salida. Dicha variación puede considerarse lineal, como se muestra en la gráfica 1 que se añade a continuación.



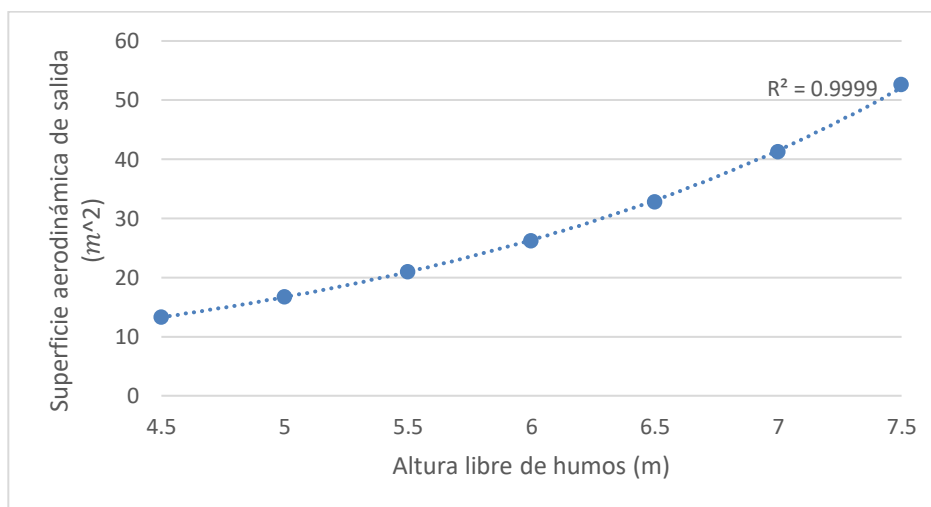
Gráfica 1. Variación de la superficie de salida ante cambios en el área del incendio

Por otra parte, también resulta interesante analizar la variación que experimenta la temperatura de la capa de humos cuando varía el área del modelo de incendio. Dicha variación se representa en la gráfica 2, en la que podemos ver cómo la temperatura aumenta a medida que se incrementa polinómicamente, y según la ecuación mostrada en el gráfico 2, el área del modelo de incendio que aplica a nuestro caso de estudio. Hay que tener en cuenta que dicha capa tiene, de partida, una temperatura de 288 grados Kelvin (temperatura ambiente), por lo que la variación de la temperatura de la capa de humos es más sustancial de lo que podría parecer previamente si no tenemos en cuenta que nuestro cero relativo de temperatura se sitúa en 288 Kelvin.



Gráfica 2. Variación de la temperatura de la capa de humos en función del modelo de incendio

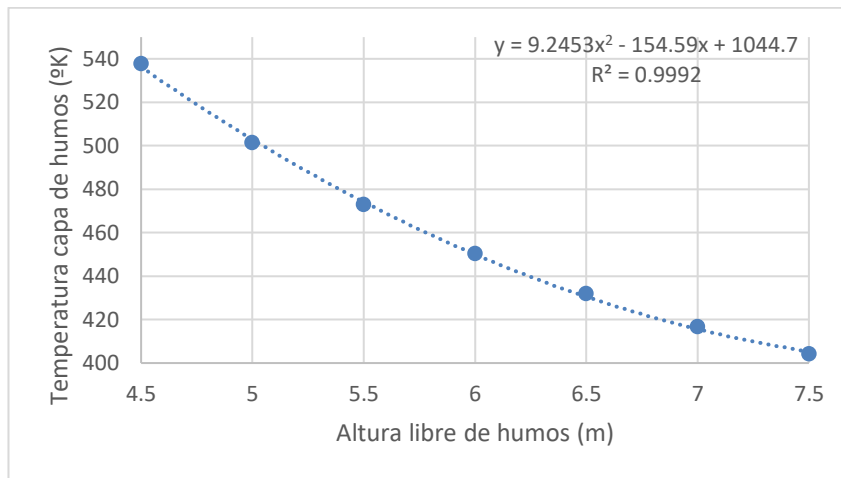
Otro de los aspectos que podemos destacar es la enorme influencia que tiene la altura libre de humos sobre el resultado final. Fundamentalmente, teniendo en cuenta que es el diseñador quien impone dicho valor, ya que la Norma establece únicamente un valor mínimo, por lo que resulta necesario ser conscientes de que si se diseña de una forma excesivamente conservadora (imponiendo alturas libres de humo muy por encima de los mínimos requeridos), el coste final de la solución adoptada puede verse altamente afectado a pesar de que no se estén añadiendo nuevas ventajas al sistema. Para analizar la influencia de la altura libre de humos sobre la superficie aerodinámica de salida podemos ver la gráfica 3:



Gráfica 3. Influencia de la altura libre de humos sobre la superficie de salida

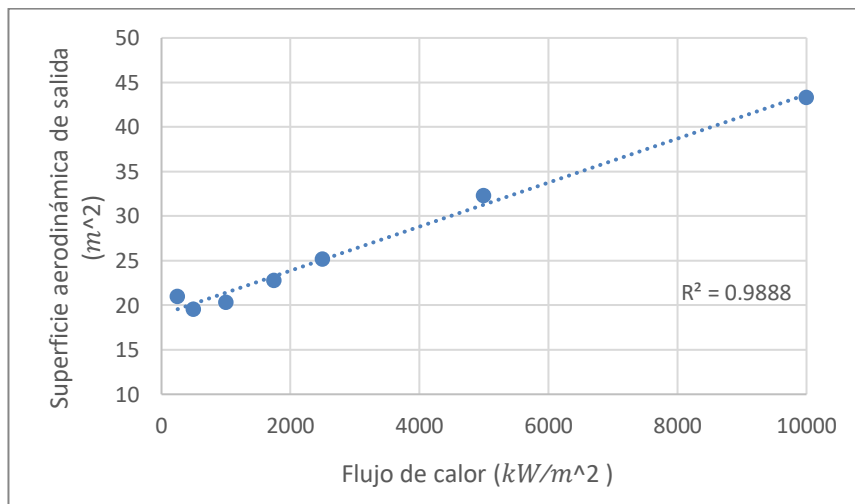
En este caso podemos ver cómo la superficie aerodinámica de salida evoluciona exponencialmente cuando se aumenta la altura libre de humos, de ahí que, como se indicó anteriormente, no sea recomendable optar por valores demasiado elevados al definir nuestra altura libre de humos, siempre y cuando tengamos certeza de que nuestro diseño es seguro en función de lo establecido por la Norma. Es fácil observar que un aumento de 1 metro para la altura libre de humos (si hubiésemos definido dicha altura a 6.5 metros en lugar de los 5.5 que se han impuesto) implica que se necesiten casi 12 metros cuadrados más de superficie de salida, es decir, se estaría aumentando la superficie de salida en un 50 por ciento sobre el valor actual.

En cambio, dicho aumento de la altura libre de humos favorecería en lo que a la temperatura de la capa de humos se refiere ya que un aumento de dicha altura implica una reducción de la temperatura de los humos contenidos en la capa, cuya evolución es polinómica según la ecuación mostrada en la gráfica 4. En este caso, sigue aplicándose el razonamiento indicado en párrafos anteriores en el que se hacía referencia a la temperatura original de la capa de humos.



Gráfica 4. Variación de la temperatura de la capa de humos en función de la altura libre

La última de las entradas que podemos analizar es el flujo de calor liberado durante el incendio, el cual afectará de distinta forma a la superficie de salida y a la temperatura de la capa de humos, sobre la que tiene una repercusión directa. Empecemos analizando cómo afecta el aumento del flujo de calor sobre la superficie de exutorios necesaria para la extracción de aire contaminado. En este caso, el flujo de calor afecta indirectamente puesto que se usa para calcular el calor convectivo en los gases del humo en la capa flotante del depósito de humos que posteriormente se utilizará en el cálculo de la temperatura de la capa de humos que, sí afecta a la superficie aerodinámica de salida, como podemos ver en la ecuación 7.



Gráfica 5. Variación de la superficie de salida en función del flujo de calor

A la vista de la gráfica 5, podemos afirmar que un flujo de calor mayor no implica la necesidad de aumentar la superficie de los aireadores de salida, pudiendo incluso reducirse para valores pequeños de este. Hay que tener en cuenta que, según la Norma, un valor alto del flujo de calor es $q_f = 1250 \text{ kW/m}^2$, valor para el que se reduce la superficie aerodinámica de salida requerida. Se puede decir entonces que solo variaciones muy elevadas (del orden del 1000 por mil, en caso de que nos encontremos en valores bajos del parámetro analizado) tendrán una repercusión importante sobre la superficie de salida.

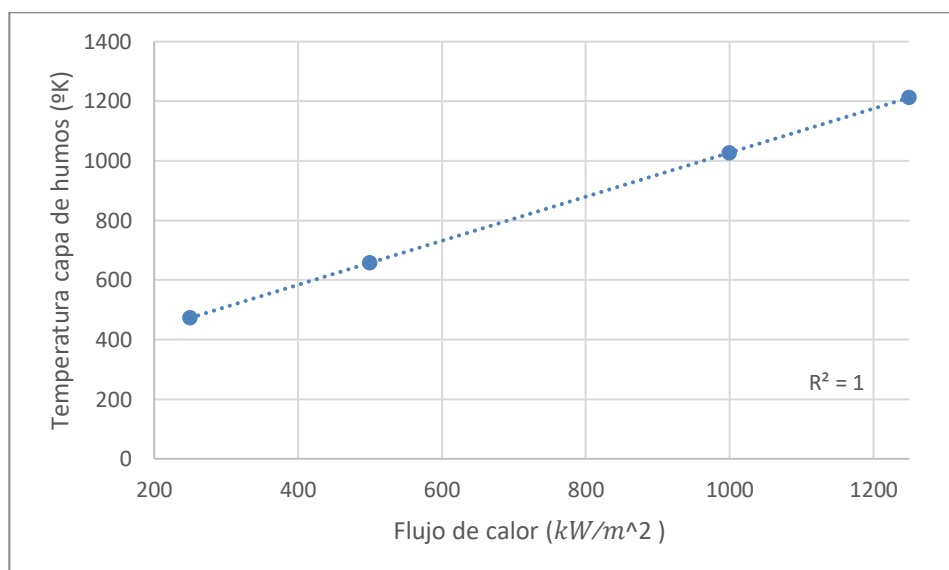
La última de las comparaciones que podemos realizar entre las salidas y entradas implicadas en el dimensionamiento de nuestra instalación es la que representa la variación de la temperatura de la capa de humos con el flujo de calor liberado en la combustión, mostrada en la gráfica 6.

En dicha gráfica, podemos destacar la evolución perfectamente lineal que sufre la temperatura de la capa de humos cuando aumenta el flujo de calor liberado durante el incendio. En este caso, dicho aumento es tan grande que se decide dejar de analizar para valores mayores de $q_f = 1250 \text{ kW/m}^2$. Dicha linealidad puede explicarse fácilmente si recordamos la ecuación 4, que viene dada por:

$$\Theta_1 = \frac{Q_1}{c \cdot M_1} ,$$

Donde $Q_1 = 0.8 \cdot q_f \cdot A_f$.

Por tanto, aunque el flujo de calor que se libera durante un incendio apenas tiene influencia sobre la necesidad de aumentar el área de salida del aire producido por la combustión, sí será importante no olvidarnos de comprobar que la temperatura de la capa de humos es admisible según el caso que estamos dimensionando.



Gráfica 6. Variación de la temperatura de la capa de humos en función del flujo de calor

4.8 Número de exutorios de salida que debemos disponer

Una vez hemos determinado la superficie total que van a ocupar dichos dispositivos en el edificio para permitir la extracción de los gases debemos determinar el número concreto de aireadores que se necesitarán. Resulta importante definir correctamente el número de exutorios que se deben instalar debido a las restricciones que presenta un aireador excesivamente grande, lo que podría implicar la entrada de gases limpios en el punto de extracción, en lugar de limitarse únicamente a la eliminación de los gases de los humos producidos en el incendio.

Para determinar este número, definiremos un valor crítico de extracción para una única abertura, a partir del cual se produciría la atracción de aire limpio desde debajo de la capa de humo hacia el punto de extracción. Dicho valor crítico de extracción está definido por la ecuación:

$$M_{crit} = 1.3 \cdot [g \cdot d_n^5 \cdot T_{amb} \cdot \Theta_1 / T_1^2]^{1/2} \quad kg \cdot s^{-1} \quad (9) \text{ [E.9]}$$

donde

d_n profundidad de la capa de humos debajo del punto de extracción (m);

El único parámetro que falta por determinar para definir el valor crítico de extracción es la profundidad de la capa de humos debajo del punto de extracción, que puede obtenerse fácilmente mediante la siguiente expresión: $d_n = h_a - Y$, siendo h_a la altura a la que están colocados los exutorios, que se considerará inicialmente $h_a = 9.5 m$, e Y la altura libre de humos que hemos definido con anterioridad. Con ello, la profundidad de la capa de humos debajo del punto de extracción toma el valor $d_n = 4 m$.

Finalmente, el valor crítico de extracción será $M_{crit} = 63.58 kg \cdot s^{-1}$, valor inferior al calculado anteriormente en el apartado 4.5, lo que implica que podría producirse este efecto de atracción conocido como plugholing, efecto vórtice o efecto desagüe, que implicaría el fallo de los sistemas de evacuación dispuestos. Debido a que el valor de M_{crit} es inferior que el de M_f , estaremos obligados a dividir la superficie aerodinámica de salida en, al menos, dos áreas. De cualquier modo, como veremos más adelante, existen complicaciones para encontrar dispositivos de extracción de tamaños tan grandes como los que necesitaríamos para que la superficie de salida quedara definida por dos únicos espacios. Por tanto, aunque dicho análisis es interesante para conocer mejor el caso, no es determinante debido a que podemos adelantar que la solución más eficiente implica colocar distintos exutorios en lugar de uno sólo con la superficie aerodinámica de salida total.

4.9 Elección de los exutorios y posicionamiento en la nave industrial

En función de la geometría de la cubierta de la nave de diseño, se ha decidido colocar dos exutorios por cada pórtico que presenta la nave, uno a cada lado del pilar central que separa las dos zonas. Este razonamiento implica que se dispondrán 8 aireadores a lo largo de la nave, lo que implica que la superficie aerodinámica de cada uno de ellos debe ser:

$$A_v \cdot C_v = 2.63 m^2$$

La existencia de correas sobre la que se dispondrá la cubierta dispuesta hacia al exterior limitará el tamaño de los aireadores que se van a colocar. La distancia entre correas consecutivas es de 2.4 metros, distancia que marcará una de las dos dimensiones de nuestro aireador. Además, se van a colocar a continuación de la segunda correa situada a partir del pilar central, para que ocupen una situación centrada y a una altura importante sobre el nivel más bajo del piso.

La elección de los exutorios que vamos a disponer en la zona de almacenamiento que estamos diseñando la realizaremos a partir de los catálogos que facilita la empresa Cottés Group¹⁰. En dicho catálogo podemos encontrar distintos modelos de exutorio, cada uno de estos con distintas medidas en función de nuestras necesidades de diseño. A continuación, se incluyen dos imágenes extraídas directamente del catálogo mencionado en las que podemos ver la superficie de los exutorios y la superficie aerodinámica, respectivamente, en ambos casos en función del número de lamas de que dispone el aireador.

¹⁰ Cottés Group: empresa especializada en materia de protección contra incendios

		Número de lamas															
Tipo		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
LB*/GHB	Ancho (mm)																
	030	300															
	060	600															
	120	1200	720	940	1160	1380	1600	1820	2040	2260	2480	2700	2920	3140	3360	3580	3800
	180	1800															
	240	2400															
HB	Ancho (mm)																
	030	340															
	060	640															
	120	1240	760	980	1200	1420	1640	1860	2080	2300	2520	2740	2960	3180	3400	3620	3840
	180	1840															
	240	2440															

Ilustración 8. Tamaño de los distintos exutorios según modelo y número de lamas

		Número de lamas														
Tipo		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14*	15*	16*	17*
030	LB/GHB	0,13	0,17	0,21	0,25	0,29	0,33	0,37	0,41	0,45	0,49	0,53	0,57	0,60	0,64	0,68
	HB	0,16	0,20	0,24	0,29	0,33	0,38	0,42	0,47	0,51	0,56	0,60	0,65	0,69	0,74	0,78
060	LB/GHB	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58	0,66	0,73	0,81	0,89	0,97	1,05	1,15	1,23	1,31	1,39
	HB	0,29	0,38	0,46	0,55	0,63	0,71	0,80	0,90	0,98	1,05	1,14	1,24	1,33	1,42	1,50
120	LB/GHB	0,52	0,68	0,84	0,99	1,15	1,31	1,47	1,65	1,82	1,94	2,10	2,30	2,46	2,62	2,78
	HB	0,57	0,73	0,89	1,06	1,22	1,38	1,57	1,74	1,91	2,04	2,20	2,40	2,57	2,74	2,90
180	LB/GHB	0,78	1,02	1,25	1,49	1,73	1,97	2,24	2,48	2,72	2,92	3,15	3,50	3,75	3,99	4,24
	HB	0,84	1,08	1,32	1,57	1,84	2,09	2,33	2,58	2,83	3,02	3,27	3,63	3,88	4,13	4,38
240	LB/GHB	1,04	1,35	1,67	1,99	2,34	2,66	2,99	3,31	3,63	3,89	4,20	4,67	5,00	5,33	5,65
	HB	1,11	1,43	1,76	2,08	2,44	2,77	3,10	3,42	3,75	4,01	4,33	4,81	5,15	5,47	5,81

Ilustración 9: Superficie aerodinámica de los distintos exutorios según modelo y número de lamas

De este modo, se ha decidido disponer de 8 aireadores de lamas practicables COTTES modelo **EURA 180-11 LB**, destinados a la ventilación natural diaria y a la evacuación de grandes volúmenes de aire y gases de combustión, sin consumo de energía. Están contruidos en aleación de aluminio $AlMg_3$ para una protección permanente contra la corrosión. Elementos de rotación integrados en las lamas y fricción sobre casquillos de nylon resistente a los rayos UV. Todos los elementos del aireador quedan integrados dentro de un paraviento perimetral para evitar los efectos negativos de viento. Marcado CE de acuerdo con la norma UNE EN 12101-2.

El aireador seleccionado tiene unas dimensiones $1800mm \times 2480mm$, lo que supone una superficie geométrica por aireador $A_v = 4.464 m^2$. Por otra parte, el fabricante facilita también la superficie aerodinámica de dicho exutorio, que toma un valor $A_v \cdot C_v = 2.72 m^2$, que nos permite afirmar que el aireador que hemos seleccionado tiene un coeficiente de descarga $C_v = 0.61$.

A continuación, se incluyen distintas imágenes que permiten apreciar tanto la sección transversal como la sección longitudinal de los dispositivos de aireación natural que hemos seleccionado, imágenes que han sido extraídas del catálogo anteriormente mencionado.

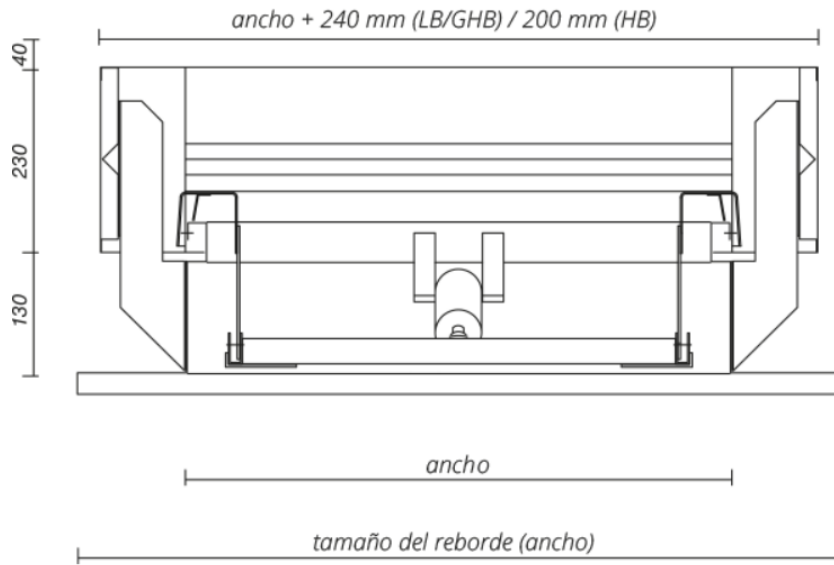


Ilustración 10: Sección transversal del exutorio de lamas EURA

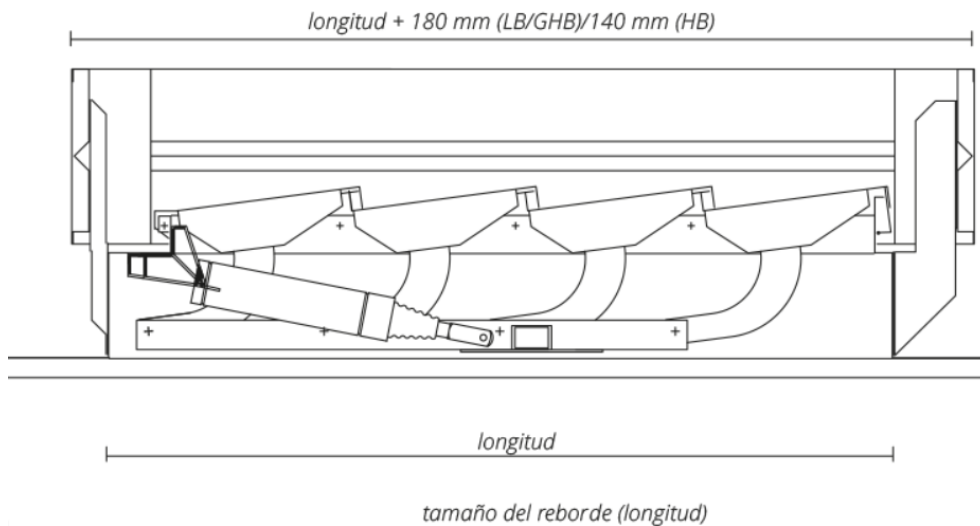


Ilustración 11: Sección longitudinal del exutorio de lamas EURA

4.10 Admisión de aire

Como se ha comentado con anterioridad, los sistemas de admisión de aire constituyen uno de los elementos principales de los sistemas de evacuación de humos, resultando su implantación imprescindible para permitir la entrada de aire frío desde el exterior que favorezca la expulsión de los gases producidos en el incendio, así como su sustitución.

Una vez determinado el posicionamiento y el número de exutorios que se van a implantar en la nave, debemos determinar las zonas de admisión de aire limpio de reemplazamiento, encargado de sustituir el humo procedente del incendio. Determinar las zonas de admisión de aire implica definir la posición de la nave que van a ocupar y el tamaño de las aberturas de entrada de aire del exterior.

4.10.1 Posicionamiento

El principal inconveniente al que debemos hacer frente en cuanto a la disposición de las aberturas que permitan la entrada de aire limpio desde el exterior es la existencia de zonas de succión en el entorno de dichas aberturas que puedan dificultar o incluso impedir la entrada del aire exterior. Además, existen restricciones en cuanto al posicionamiento de estas debido a la existencia de naves colindantes a la que queremos dimensionar, lo que implica la imposibilidad de realizar aberturas en determinadas fachadas.

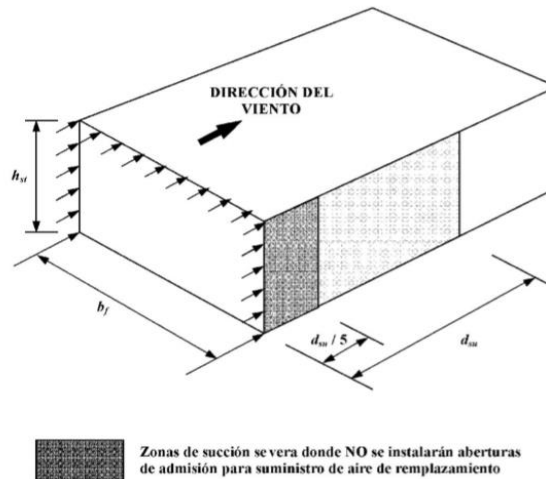


Ilustración 12: Representación de las zonas de succión severa sobre la fachada de un edificio

Para analizar la existencia de las mencionadas zonas de succión en las distintas fachadas disponibles para la realización de aberturas haremos uso del anexo F de la Norma: “Influencia de las zonas de sobrepresión y/o succión sobre un SCTEH”.

Si b_f es la longitud de la fachada impactada por el viento, d_{su} se calcula como sigue:

- Si $b_f > 2 \cdot h_{st}$ entonces $d_{su} = 2 \cdot h_{st}$
- Si $b_f \leq 2 \cdot h_{st}$ entonces $d_{su} = b_f$

4.10.1.1 Primer análisis: viento incidente sobre la fachada lateral

Considerando como fachada lateral la que se señala mediante un rectángulo de color negro, en la imagen 13, y sobre la que incide el viento en este primer análisis que realizamos, procedemos a comprobar la existencia de zonas de succión severas en la fachada frontal del establecimiento, en la cual existe una puerta que podría hacer las labores de zona de admisión de aire exterior, siempre y cuando no existiesen zonas que lo hicieran imposible según la Norma.

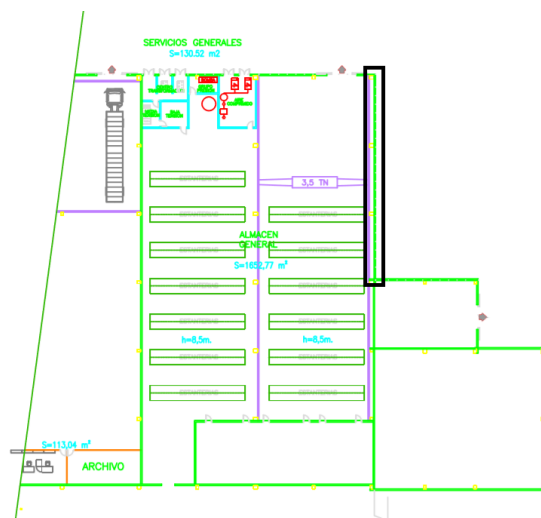


Ilustración 13: Existencia de zonas de succión severa en fachada frontal

Las medidas de dicha fachada frontal son 29.85 m de largo por 8.5 m de altura, por lo que los parámetros que intervienen en este análisis toman los siguientes valores: $b_f = 29.85\text{ m}$; $h_{st} = 8.5\text{ m}$. Por tanto, y dado que $b_f > 2 \cdot h_{st}$, definimos el tercero de los parámetros, $d_{su} = 17\text{ m}$, que permite afirmar que existe una zona de succión severa en la fachada frontal, y desde la esquina común a la fachada señalada de distancia $d_{su}/5 = 3.4\text{ m}$.

La existencia de dicha zona de succión implicaría la imposibilidad de emplear la puerta como elemento que permita la entrada de aire.

4.10.1.2 Segundo análisis: viento incidente sobre la fachada frontal

En este segundo caso, suponemos que el viento incide sobre la fachada frontal, señalada en la imagen 14.

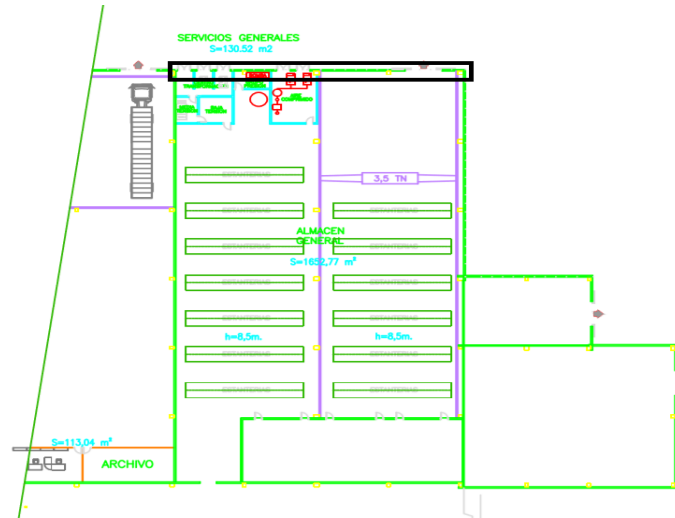


Ilustración 14: Existencia de zonas de succión severa en fachada lateral

En este análisis, la fachada tiene una longitud de 33.85 m , mientras que definiremos como altura de esta el valor medio de los puntos más alto y más bajo, es decir, 9.335 m .

Los parámetros a tener en cuenta son: $b_f = 33.85\text{ m}$; $h_{st} = 9.335\text{ m}$. Por tanto, dado que nuevamente se verifica la relación $b_f > 2 \cdot h_{st}$, podemos definir $d_{su} = 18.67\text{ m}$.

Finalmente, concluimos afirmando que pueden existir posibles zonas de succión en la fachada lateral a una distancia desde la esquina común a la fachada frontal hasta $d_{su}/5 = 3.734\text{ m}$.

4.10.1.3 Solución adoptada

Una vez analizadas las posibles soluciones en cuanto a las fachadas en las que existe la posibilidad de realizar las aberturas que permitan la entrada de aire exterior, procedemos a determinar la solución final que se ha decidido imponer.

A priori, la existencia de una puerta en la fachada frontal hacía prever que la solución más lógica sería utilizar dicha puerta como elemento que permitiese la entrada de aire de reemplazo. Sin embargo, y como se ha reflejado en el primer análisis realizado, la puerta se encuentra emplazada en una zona de succión severa, lo que implica la imposibilidad de que sea utilizada como elemento de admisión.

Por tanto, y ante la imposibilidad de utilizar la puerta con el fin deseado, se ha decidido posicionar las zonas de admisión en la fachada lateral anteriormente indicada, debido a la mayor distancia de fachada en relación con la frontal. Asimismo, se deberá dejar libre una zona de dicha fachada de longitud 3.8 metros debido a la existencia en ellas de zonas de succión severa.

4.10.2 Superficie de entrada

Una vez determinado el emplazamiento de las zonas de admisión que queremos definir, debemos determinar la superficie de fachada que deben ocupar. Para ello, tendremos en cuenta la Norma y la ecuación (6), que establece una relación entre la superficie aerodinámica de salida y la de entrada que implica que la superficie aerodinámica de entrada debe ser igual a la de salida o lo que es lo mismo $A_i \cdot C_i = A_v \cdot C_v = 21m^2$. Se ha optado por instalar como dispositivos de admisión de aire los mismos exutorios que se van a utilizar como elemento de extracción natural. Por otra parte, se ha descartado la opción de instalar ventanas oscilobatientes debido a la posibilidad de impacto con las estanterías interiores cuando se realizara la apertura automática de estas. Los exutorios se van a colocar a una altura sobre el nivel del suelo de 1.5 metros, facilitando la entrada de aire y la generación de corrientes de aire desde el exterior que favorezcan el efecto chimenea que permite la expulsión de humos hacia el exterior del establecimiento.

En cuanto al modelo de exutorios elegido para ser instalados como dispositivos de entrada de aire se ha decidido elegir el modelo **EURA 240-11 LB**, que presenta las mismas características y especificaciones que el aireador elegido para la extracción de los gases. Las dimensiones de dicho dispositivo son $2400mm \times 2480mm$, por lo que se trata de un exutorio prácticamente cuadrado.

Para cumplir con los requisitos de diseño, se van a disponer 6 exutorios del modelo indicado en la fachada lateral de nuestro establecimiento, solución que implica un área geométrica de entrada real $A_i = 35.712 m^2$ o, dicho de otra manera, una superficie aerodinámica de entrada real $A_i \cdot C_i = 21.78 m^2$, algo superior a la mínima necesaria según los cálculos realizados teniendo en cuenta la Normativa UNE 23585:2017.

Para evitar las zonas de succión severa que pudieran aparecer en zonas cercanas a la esquina constituida por las fachadas frontal y lateral anteriormente descritas, vamos a optar por colocar los exutorios definidos para la admisión de aire a una distancia de cuatro metros respecto de dicha esquina, colocadas una tras otra y sin espacio entre los exutorios sucesivos que conformarán el sistema completo de admisión de aire.

5 MODELADO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE INCENDIOS

Antes de abarcar de forma concreta el análisis de distintos escenarios mediante nuestro programa de estudio, vamos a abordar de una forma genérica los sistemas de modelado y simulación computacional de incendios, entre los que se encuentra CFAST, para poder entender de forma global la base de estos sistemas relativamente novedosos antes de entrar a fondo con el que queremos estudiar en este caso concreto.

La importancia del MSCI¹¹ radica en la posibilidad de resolver computacionalmente las diversas ecuaciones o expresiones que debemos solucionar cuando se estudia un incendio desde que se origina hasta que termina la combustión. El avance tecnológico y la mayor concienciación en materia de prevención que se ha producido en los últimos años ha provocado el desarrollo de nuevos sistemas de simulación computacional cada vez más potentes y que permiten una mayor proximidad a la realidad.

Como una gran parte de los avances tecnológicos que se han producido a nivel mundial, el modelado y simulación computacional surge por razones derivadas de conflictos bélicos durante los años 40, cuando se utilizan para trabajar en el desarrollo de las primeras bombas nucleares. Sin embargo, será en los años 80 cuando empiezan a aparecer los primeros MSCI, cuando el MSC¹² empieza a encontrar sus primeras aplicaciones a nivel civil y, especialmente, en aquellos casos en que se pretende simular situaciones que suponen un elevado costo y tienen asociada una gran peligrosidad como es el caso de incendios no controlados.

El principal problema de la resolución de situaciones complejas haciendo uso del modelado y la simulación computacional radicaba en la difícil reutilización de los modelos empleados previamente, lo que implicaba volver a empezar de cero cuando queremos simular una nueva situación, con el consiguiente coste económico y pérdida de tiempo. Sin embargo, a lo largo de los años 90 se intensifica el uso del MSC, aumentando el número de campos que hacen uso de estos (incluyendo los que estudian incendios), así como el número de personas que empezaban a especializarse en ellos. De esta manera, se produce un desarrollo importante de estos sistemas, lo que implica el desarrollo de modelos básicos que pueden emplearse posteriormente en diversas situaciones, además de programas de cálculo cada vez más realistas y que consiguen unos resultados más precisos y efectivos, facilitando su uso y la consiguiente normalización de ellos en casos reales.

5.1 MSCI: conceptos básicos

Cuando hablamos de forma genérica de modelado y simulación computacional debemos tener en cuenta algunos conceptos básicos que serán necesarios a la hora de entender bien todo lo que rodea a dichos sistemas y que, obviamente, tendrán una influencia clara en los modelos y simulaciones que a nosotros nos interesan fundamentalmente: aquellos que estudian los incendios. En el libro *Modelado y Simulación Computacional de Incendios en la Edificación*, publicado en el año 2007 y escrito, entre otros por el doctor ingeniero Daniel Alvear, Doctor Ingeniero Industrial, y Jorge A. Capote, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, ambos por la Universidad de Cantabria, se definen algunos de estos conceptos, además de clasificarnos estos modelos según su base de resolución. De esta forma, escriben:

“El concepto de sistema que se quiere simular se refiere al problema que se aborda y se define como la colección de componentes organizados para lograr una función específica. De la misma forma, modelo se define como la representación simplificada y de tipo lógico de un sistema, entidad, o fenómeno y que intenta describir como funciona”.

[3]

¹¹ MSCI: Modelado y Simulación Computacional de Incendios

¹² MSC: Modelado y Simulación Computacional

De esta manera, se intenta relacionar el problema, siendo en este caso el sistema que se quiere simular, con la simplificación que nos permitirá obtener respuestas ante una situación determinada, y que se representará como un modelo que puede ejecutarse mediante una computadora.

Estos modelos de los que hablamos pueden clasificarse, según el libro anteriormente indicado como sigue:

- Físicos: manifiestan a escala las propiedades físicas del sistema real.
- Gráficos: constituyen diagramas gráficos que describen la estructura a alto nivel o el funcionamiento del sistema.
- Matemáticos: son un conjunto de expresiones matemáticas o lógicas que expresan las relaciones entre las entidades del sistema.

De este modo, y para las necesidades que en nuestro caso se presentan, consideraremos los matemáticos, ya que son aquellos que se pueden implementar con mayor o menor complicación como un programa que puede resolverse haciendo uso de un ordenador.

Dentro de los modelos matemáticos podemos distinguir entre lo que son resueltos utilizando métodos analíticos o métodos numéricos. Los primeros hacen uso de una expresión matemática que permitirá obtener el valor de las variables de salida. Sin embargo, los modelos matemáticos más empleados son aquellos que utilizan métodos numéricos, ya que permiten resolver casos más complejos, siendo incluso la única posibilidad para resolver determinados casos.

Además, los modelos matemáticos pueden distinguirse según sean modelos que no varían en el tiempo (estáticos) o modelos que si tienen en cuenta los cambios temporales del estado del sistema (dinámicos), modelos cuyas variables dependen del tiempo (continuos) o aquellos que sólo consideran acciones puntuales en un momento concreto (discretos). Finalmente, también se puede diferenciar entre modelos que evitan la consideración de factores aleatorios (determinísticos) o aquellos que sí consideran estos factores aleatorios, incluyendo por tanto en su relación otras ramas de la matemática como la probabilidad o la estadística (modelos estocásticos o aleatorios). De forma particular, en lo que se refiere a los MSCI, podemos concluir que serán habitualmente modelos dinámicos, dada la dependencia del tiempo que presentan los fenómenos que tratan de simular y estudiar.

Resaltaremos que, en el caso de CFAST, nos encontramos ante un MSCI que podemos clasificar como dinámico, continuo y determinístico, pues no considera factores aleatorios como podría ser la aparición de vientos.

Siguiendo con el fin que nos propusimos en el inicio de este epígrafe, seguimos rescatando conceptos básicos para entender el funcionamiento interno del MSC, basándonos nuevamente en el contenido del libro que hemos citado anteriormente y del que podemos rescatar las siguientes definiciones de interés.

“Atributo: propiedad o valor asociado con una entidad o componente de interés principal del sistema estudiado”

“Estado del sistema: conjunto suficiente de atributos para describir el sistema en cierto momento con respecto al comportamiento de interés”.

“Variables de estado: conjunto de atributos cuantitativos que definen el estado del sistema”.

“Evento: ocurrencia instantánea que afecta al estado del sistema simulado.”

[3]

Con estas definiciones se da por concluido este apartado de conceptos generales que nos permitirá aclarar ciertos términos que serán utilizados comúnmente cuando se trabaje con sistemas de modelado y simulación de computacional de incendios.

5.2 Validación y verificación del modelo

Aunque en este apartado nos vamos a centrar principalmente en el concepto de validación y de cómo afecta dicho término al programa que en este documento se encuentra bajo estudio, es importante también mencionar el concepto de verificación y resaltar la complementariedad entre ambos conceptos. Se trata de procesos que

están relacionados entre sí pero que son diferentes y se llevan a cabo para valorar la evidencia necesaria para hacer saber a los usuarios cómo de buena es una simulación, cuáles son los puntos débiles que presenta y cómo de grande es la aproximación a las realidades que simula. Una vez establecidas las definiciones concretas de estos dos conceptos según los criterios estipulados por Alvear, Rein, Lázaro y otros:

Verificación: “proceso de determinación del grado en que la implementación de un modelo y sus datos asociados representan fielmente la descripción conceptual y las especificaciones dadas por el desarrollador de la misma”

Validación: “proceso que permite determinar el grado en que un modelo y sus datos asociados proporcionan una representación fidedigna del mundo real desde la perspectiva del uso que se le pretende dar al modelo”

[3]

Es cuando, finalmente, debemos tomar la decisión de hacer, o no, uso de una determinada simulación en función de qué potencial tiene ésta, la cercanía de los resultados que se obtienen respecto a la realidad y cómo de útil es dicha simulación para un caso concreto.

Cualquier proceso de verificación y validación deberá asentarse en la realización pautada de las siguientes etapas:

1. Verificación de los requisitos del modelado y la simulación computacional entendidos como la confirmación de que todas aquellas exigencias o requerimientos a la simulación son los imprescindibles y, además, correctas, para la resolución del problema que se haya planteado.
2. Identificación de objetivos, elaboración de un programa de ejecución, determinación de recursos a implementar, etc.
3. Validación del modelo conceptual de manera que se confirme con exactitud que se cumplen todos los requisitos establecidos en el modelo conceptual.
4. Verificación del diseño mediante la cual podremos establecer la correspondencia entre dicho diseño y el modelo conceptual, confirmando que este presenta todos los elementos necesarios.
5. Verificación de la implementación con la intención de establecer si el código fuente de la simulación y su implementación son correctos en el hardware de la simulación.
6. Validación de los resultados que permitirá determinar si los requisitos de uso se corresponden con el grado de la simulación.

El objetivo final de los procesos de validación y verificación es conseguir la máxima precisión posible en los resultados obtenidos de una simulación, al mismo tiempo que deben aportar la información necesaria para que el propio usuario sea capaz de evaluar si la solución producida satisface las expectativas iniciales, con el fin de conseguir la mayor credibilidad posible de los modelos. Sin embargo, debemos ser conscientes de que dicha credibilidad a la que estamos haciendo referencia será siempre en términos relativos y no absolutos, en función de la aplicación y situación en la que usemos el modelo.

Es importante resaltar el hecho de que un modelo será más creíble cuanto más exactos sean los resultados que de ella se desprenden, pero nuevamente hablamos de exactitud relativa según el uso que hagamos en cada caso. Por tanto, la precisión de un modelo va a depender directamente del uso que hagamos de éste y de como entendamos y apliquemos las soluciones obtenidas. Por todo ello, no se puede establecer una exactitud absoluta, es decir, mientras que para un usuario la simulación puede ser aceptable en un escenario, puede no serlo para uno diferente. Del mismo modo, la credibilidad de una simulación en un escenario determinado puede ponerse en duda si cambiamos la situación.

Llegados a este punto, una de las preguntas que debemos hacernos si queremos utilizar CFAST para realizar el dimensionado de un sistema de evacuación de humos debería ser: ¿quién nos está asegurando que los resultados obtenidos son válidos y no provocarán errores que puedan desembocar en una tragedia? Pues bien, cuando realizamos simulaciones en CFAST debemos tener claro que, a pesar de que los desarrolladores del programa trabajan continuamente en mejorar sus prestaciones y realizar comprobaciones a cerca de la validez real de distintos escenarios de simulación, es el usuario quien debe decidir si el modelo se adecúa al trabajo que estamos realizando. De hecho, en su sitio web podemos encontrar la respuesta a la pregunta de si CFAST está validado y siendo la respuesta ofrecida por los propios desarrolladores del programa, y se cita textualmente:

“Sí y no. CFAST se ha comparado con una amplia gama de resultados experimentales. Los detalles y referencias de estos están disponibles en la guía de verificación y validación de CFAST. Estamos trabajando para dar una mejor orientación sobre dónde se puede confiar en el modelo y dónde no, siendo esto un ejercicio continuo. Nuestro consejo a los usuarios es, como siempre, validar el modelo para el tipo de escenario de incendio que le interesa. Eso significa simular un experimento real con geometría y fuego similar al que se planea usar. Si la diferencia en el modelo y el experimento es aceptable, sea cual sea el criterio que elija, siga adelante y utilice el modelo. Si no es así, háganoslo saber y veremos si podemos mejorar esa característica o sugerir otro enfoque.”

De esta información podemos deducir que, aunque muchos casos o escenarios han sido contrastados con la realidad y se han obtenido resultados similares, hay que tener cuidado cuando realizamos una simulación en un entorno particular porque nos podemos encontrar con resultados inciertos. Por tanto, habrá determinados casos en los que CFAST solo sea realmente útil como método comparativo para asegurarnos de que los resultados obtenidos utilizando otra metodología (como puede ser el uso de la norma UNE o incluso el método ensayo-error que se ha utilizado en el pasado). Del mismo modo, se trata de un software de cálculo que exige unos conocimientos profundos en materia de protección contra incendios, pues la ausencia o equivocación en alguno de los parámetros en relación con la situación real que se quiere simular podría tener consecuencias nefastas.

6 DISEÑO DE UN SISTEMA DE EVACUACIÓN DE HUMOS MEDIANTE CFAST

Como se ha comentado previamente, la concienciación acerca de la protección contra incendios ha provocado el desarrollo de distintos softwares que permiten simular la evolución de un incendio, así como diseñar y dimensionar diversos sistemas implicados en dicha protección. Entre ellos, se incluyen los sistemas de evacuación de humos, base del presente trabajo, y cuya resolución dará pie, entre otras cosas, a conocer la influencia de los parámetros de entrada sobre los parámetros de salida según la Normativa UNE 23585:2017 y según el modelo de zona CFAST que se pretende conocer a continuación.

CFAST es un modelo de fuego de dos zonas que predice las variaciones termales del ambiente causadas por un fuego en una estructura compartimentada. Cada compartimento está dividido en una capa de gas superior y otra inferior, siendo el fuego el encargado de transportar los productos de la combustión desde la capa más baja hacia la superior a través del penacho de humos. Además, la temperatura dentro de cada capa es uniforme y su evolución temporal se describe por un conjunto ordinario de ecuaciones diferenciales derivadas de las leyes fundamentales de conservación de masa y energía. El transporte de humo y calor de una zona a otra está basado en correlaciones empíricas.

El objetivo último de este trabajo permitirá llevar a cabo una descripción minuciosa de los distintos parámetros de entrada que se deben introducir para realizar una simulación de incendios mediante CFAST para posteriormente ser capaces de analizar cómo afecta cada uno de estos a la solución final obtenida. Para ello, se va a partir de un modelo basado en la situación que se ha resuelto haciendo uso de la norma correspondiente y, mediante las simplificaciones que sean necesarias por imposición de nuestro software de estudio, trataremos de resolver ese mismo problema mediante el uso del modelado y simulación computacional de incendios. Finalmente, compararemos los resultados obtenidos por ambas vías de estudio y partiendo del modelo base, realizaremos distintas variaciones de los parámetros de entrada para estudiar cómo afectan dichos cambios a las variables de salida.

Antes de empezar, debemos destacar que CFAST ha sido desarrollado por el NIST, que es una agencia de la Administración de Tecnología del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. Cabe destacar esta información puesto que a la hora de comenzar a trabajar y familiarizarnos con el software se encontraron diversos problemas de los que no teníamos claro su origen, pero que daban como resultado la aparición de errores múltiples cuando se trataba de realizar una simulación. Tras realizar algunas investigaciones y comprobaciones, fue posible llegar a la conclusión de la necesidad de configurar nuestro ordenador en lengua inglesa (Estados Unidos) para evitar la aparición de dichos problemas, a priori, sin sentido. Dicho problema radica en que CFAST utiliza el formato numérico inglés de Estado Unidos, de ahí la necesidad de establecer esta nueva configuración en nuestra computadora.

El proceso de familiarización con CFAST se ha iniciado mediante el uso de la guía del usuario desarrollada por NIST en la que nos explican para qué sirve cada una de las opciones de las que disponemos dentro del software y cómo hacer uso de cada uno de ellos, información que incluimos al final del presente trabajo el anexo A: *Guía CFAST*, en cuya página 82 se definen todos los parámetros que vamos a necesitar para poder realizar una simulación de incendios de manera correcta y, donde, se explicará de forma concisa qué documentos genera el programa una vez ha concluido la simulación así como la información que podemos extraer directamente de ellos para poder realizar, a posteriori, el análisis de los resultados alcanzados.

Además, vamos a aprovechar para presentar algunos de los aspectos más importantes que afectan directamente a las simulaciones, como son el HRR o la definición de los compartimentos implicados.

6.1 HRR

El HRR o tasa de liberación de calor (medido en kW) es considerado, junto con la definición de los compartimentos, el parámetro más importante o crítico cuando se desea realizar una simulación en CFAST. Dicho parámetro representa la velocidad a la que se produce el calor como consecuencia de una reacción de combustión. Su valor variará en función de cada material e influirá directamente sobre el desarrollo del incendio en el compartimento en el que este se produzca. Es el parámetro básico de cara a cuantificar la potencia de los incendios y aparece íntimamente relacionado con la generación de calor que produce el propio incendio, la aparición de humo, la toxicidad del mismo, la cantidad de oxígeno, así como con la velocidad de cesión de calor y, por ende, con el peligro sobre el ser humano.

Tal es la importancia de esta magnitud, que resulta imposible conocer el comportamiento del fuego en un recinto si no somos capaces de definirla. Además, en algunas ocasiones, también podemos hablar de tasa de combustión (con unidades de $kg \cdot s^{-1}$) como indicador del HRR, aunque en este caso se trata de un término menos preciso que también hace referencia a la tasa de pérdida de masa durante el incendio. De hecho, en el manual *Handbook of Fire Protection Engineering* de la SFPE¹³ se relacionan ambos parámetros mediante la siguiente relación:

$$HRR = \Delta h_c \times MLR$$

Donde h_c representa el calor de combustión efectivo (con unidades de $MJ \cdot kg^{-1}$) y MLR es la tasa de pérdida de masa en la combustión. De esta expresión se puede deducir la influencia de la tasa de pérdida de masa sobre la tasa de liberación de calor y cómo también puede ser, por tanto, un indicador de la liberación de calor.

El HRR puede ser medido de forma teórica o experimental, siendo necesario realizar dicha medición directamente sobre situaciones reales en los casos en que el calor de combustión efectivo no es constante. Debido a la importancia que presenta este parámetro también se van a desarrollar brevemente los distintos métodos que existen de medirlo.

6.1.1 Evolución del HRR

En el manual anteriormente mencionado de la SFPE se incluyen diversos resultados, en lo que al cálculo de la tasa de liberación de calor se refiere, de múltiples objetos que presentan una tendencia importante a encontrarse en zonas en las que pueden producirse incendios: oficinas, viviendas, establecimientos industriales, etc. Dichos resultados se muestran en gráficas en las que el HRR depende del tiempo, como debe ser habitual, pues difícilmente encontraremos objetos en los que este valor se mantenga constante con el paso del tiempo. Entre otros objetos, encontraremos: cables de distinta tipología, material de oficina como sillas, muebles y ordenadores, artículos de ropa, etc.

En la ilustración 16, pueden observarse las distintas fases en que se divide la vida de un incendio, desde que se produce hasta que se termina.

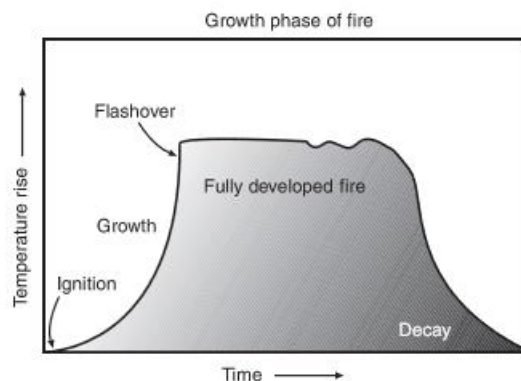


Ilustración 15: Fases de la evolución del fuego

¹³ SFPE: The Society of Fire Protection Engineers

Sin embargo, para una mejor comprensión de la definición del HRR vamos a desarrollar conceptualmente los tres tramos en que puede diferenciarse, ya que posteriormente vamos a necesitar aclararlo cuando tratemos de definir el fuego en CFAST.

1. Crecimiento. La principal importancia de la selección apropiada del crecimiento de fuego de diseño es obtener una predicción realista de la activación de detectores y rociadores, tiempo hasta el inicio de la evacuación y tiempo hasta la exposición inicial de los ocupantes.

En 1972, fue propuesta la primera relación que definía la evolución de la tasa de calor liberado, asumiéndose que el fuego crece según la siguiente relación:

$$Q = \alpha t^n$$

Donde,

Q: tasa de liberación de calor (kW);

α : coeficiente de intensidad del fuego (kW/sⁿ);

t: tiempo (s);

n: 1, 2, 3...

Posteriormente, se demostró que para la mayoría de los casos: n = 2 (exceptuando líquidos inflamables principalmente), de ahí que se conozca a este tipo de fuegos como fuegos de crecimiento cuadrático.

El tramo de crecimiento cuadrático puede clasificarse según la velocidad con la que el fuego alcanza el valor de HRR de 1055 kW en un tiempo concreto. Esta clasificación divide los fuegos en fuegos de velocidad lenta, media, rápida o ultra-rápida. En la tabla 6-1, se muestra esta clasificación, incluyendo el tiempo en segundos que tardan en alcanzar el valor de calor liberado que se ha definido anteriormente y el valor del coeficiente de intensidad del fuego α .

Growth curve	Time to reach ~1 MW [s]	Constante α [kW/m ²]
Slow	600	0.00293
Medium	300	0.01172
Fast	150	0.0469
Ultra fast	75	0.1876

Tabla 4: Tramo creciente de las curvas HRR

En la ilustración 16, se muestran las curvas de crecimiento de cada uno de estos tipos, indicándose algunos materiales característicos cuyo incendio provocaría esa evolución.

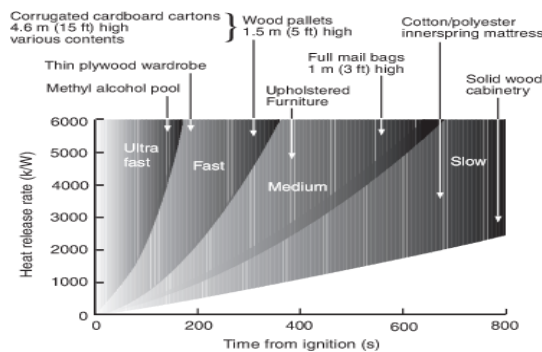


Ilustración 16: Tramo de crecimiento cuadrático de un incendio según SFPE

2. Combustión constante. Una vez se ha quemado toda el área superficial del combustible, la tasa de

liberación de calor alcanza la fase de combustión constante. Normalmente, esta fase se alcanza después de superar el nivel de flashover y estará controlado por la ventilación, siendo el nivel disponible de oxígeno el parámetro característico que lo controla.

3. Decaimiento. La velocidad de combustión disminuye a medida que se agota el combustible. Ante la ausencia de datos experimentales, una aproximación ingenieril sugiere que esta disminución se produce de forma inversa al crecimiento de la curva, tal y como se implementa por defecto en CFAST. Esto implica que curvas de crecimiento rápido decaen rápidamente mientras que curvas de crecimiento lento lo hacen paulatinamente.

6.1.2 Métodos de medición del HRR

6.1.2.1 Medición del HRR a escala real

El caso más sencillo que podemos encontrar para medir el HRR de un objeto en combustión se da cuando es posible medirlo directamente a escala real. Para ello, existen fundamentalmente dos técnicas de medida:

- Mediciones mediante carolímetros de quema abierta: se realizan en aquellos casos en los que la respuesta a la combustión de un objeto no se ve afectada por las interacciones de una habitación hasta que el fuego presenta un tamaño considerable. Conceptualmente, pueden ser visto como un calentador de cono sin calentador. Además, la ignición del objeto que pretende quemarse para realizar las medidas debe realizarse mediante una fuente realista en función del objeto que se desea quemar. Se trata de la forma más sencilla, ya que no se requiere construir una sala de pruebas como en el segundo caso.
- Mediciones mediante pruebas de incendio en sala: se utiliza en los casos en que se prevé una fuerte interacción de la habitación o el compartimento sobre el objeto en cuestión que se va a incendiar. Es evidente que se trata de un caso de mayor costo económico que el anterior, desventaja que debe sumarse al hecho de que los resultados obtenidos para una habitación no pueden extrapolarse a otro recinto con una ventilación mayor, mientras que los resultados obtenidos a cielo abierto pueden extrapolarse a otros espacios que presentan una buena ventilación.

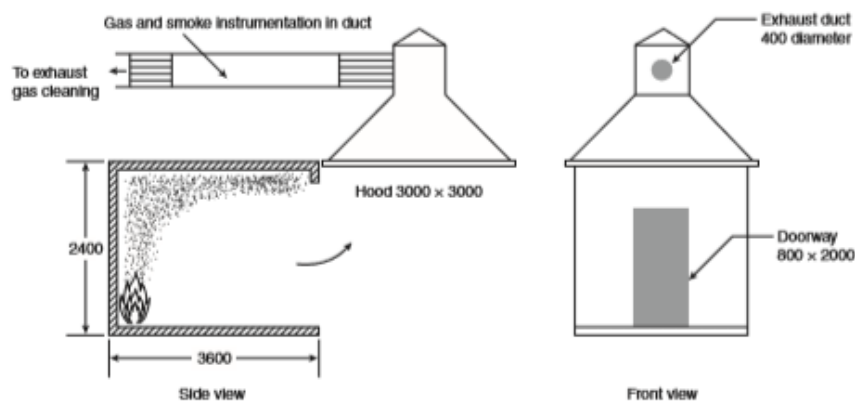


Ilustración 17: Representación de prueba de incendio en sala para determinación del HRR

6.1.2.2 Medición del HRR en banco de pruebas

Hoy en día, representa una forma sencilla de medir el HRR de objetos ardiendo. Para llevar a cabo las medidas se utiliza un calorímetro de cono principalmente. Los procedimientos imprescindibles para realizar pruebas mediante un calorímetro de cono se describen en las normativas ASTM E135420 e ISO 5660.21.

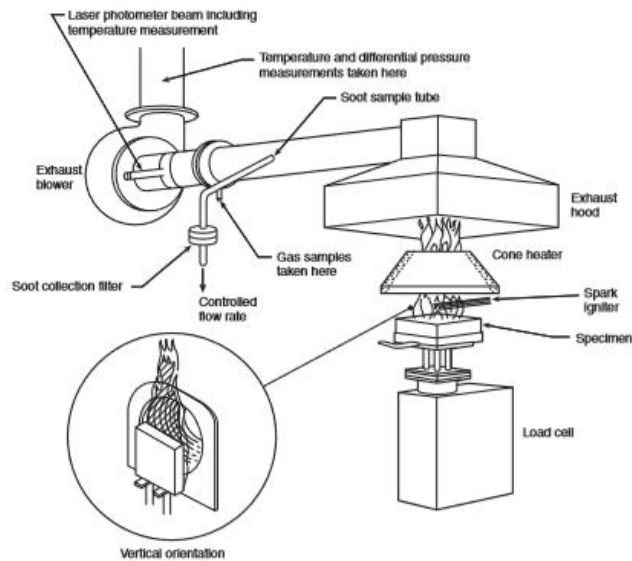


Ilustración 18: Representación de ensayo en calorímetro de cono para obtención del HRR

6.1.2.3 Medición del HRR a escala intermedia

Esta tecnología intermedia entre la escala real y la pequeña escala es la más novedosa de todas. Las bases para la realización de estos ensayos pueden encontrarse en la normativa ASTM E1623.24. Aunque permite comprobar construcciones complejas, necesita de análisis adicionales para poder utilizar los datos obtenidos en la modelación de incendios debido a que los datos no son a escala completa.

Una vez presentado el concepto de HRR, que, como hemos dicho, será fundamental en las simulaciones que realizaremos en CFAST, resulta imprescindible definir y desarrollar los parámetros más importantes que determinaremos posteriormente en CFAST para así obtener una primera idea sobre aquello que vamos a encontrar.

6.2 Características del incendio en CFAST

En cuanto a la definición del fuego, trataremos de analizar cómo afectan varios factores asociados al incendio que CFAST permite definir antes de realizar las simulaciones. Principalmente, estudiaremos dos situaciones posibles:

6.2.1 Tamaño y potencia liberada del incendio

Mediante estas magnitudes podemos determinar el tipo de incendio que se produce, es decir, qué dimensiones tiene y qué potencia se libera como consecuencia de la combustión. Para definir el tamaño, podemos caracterizar el incendio con una altura y un área. Por otra parte, la potencia liberada viene determinada por el HRR anteriormente descrito. La tasa de liberación de calor viene definida por un tipo de curva y un valor máximo alcanzado durante la evolución de dicha curva respecto al tiempo. Ambos parámetros serán variados para poder estudiar cómo afectan dichas variaciones a los resultados finalmente obtenidos. También probaremos a realizar simulaciones cambiando otros parámetros como el porcentaje de humo y monóxido de carbono, aunque por norma general emplearemos los valores característicos para la situación real que estudiamos mediante la norma estipulada capítulos atrás en esta publicación.

Al tratarse principalmente el material que se va a quemar de material eléctrico junto con palés de madera sobre los que se apoyan las cajas, deberíamos considerar una curva de crecimiento del incendio rápida, que se obtendría a partir de alguno de los procesos definidos anteriormente, aunque dado el carácter de este trabajo y el objetivo que nos planteamos de ver la similitud en los resultados que se obtienen entre CFAST y la norma UNE 23585 utilizaremos, en principio, un valor constante del HRR, teniendo en cuenta que en el dimensionado realizado haciendo uso de dicha norma, se tomaba como valor del flujo de calor liberado $q_f = 250 \text{ kW/m}^2$ para la

obtención de la superficie aerodinámica de salida.

Es decir, para realizar la primera simulación y que esta mantenga la mayor semejanza posible con el caso que resolvimos en la norma UNE 23585, vamos a definir, en primer lugar, un fuego con un valor de HRR de 20250 kW, que se obtiene a partir de los valores de la norma aplicando los siguientes cálculos:

$$HRR = 250 \text{ kW/m}^2 \cdot 81 \text{ m}^2 = 20250 \text{ kW}$$

con un área de incendio de 81 metros cuadrados.

En el análisis de resultados hablaremos sobre las diferencias de definir un HRR pequeño sobre un área de incendio grande o un HRR grande sobre un área de incendio pequeño y cuál de las opciones representa la situación más realista. Debemos recordar también que estamos presentando los datos de partida para que CFAST empiece a funcionar, pero una vez comencemos a realizar simulaciones, variaremos dichos parámetros con el fin de encontrar discrepancias que nos permitan profundizar sobre cómo opera el programa de cálculo que estamos estudiando.

Además, en lo que al fuego que vamos a introducir en la simulación se refiere, se va a estudiar cómo afecta la posición de este dentro del recinto. Para ello se van a realizar diferentes simulaciones en las que la única variación va a ser la colocación del fuego a lo largo de la superficie de la nave.

6.2.2 Posición del fuego

Otra de las entradas que nos pide incluir CFAST antes de realizar la simulación es la posición en la que el fuego se va a producir. Por tanto, usaremos distintas posiciones del fuego para analizar cómo afecta esta al resultado final obtenido. Vamos a realizar tres estudios relacionados con la posición del fuego en la nave: en primer lugar, se va a analizar el caso en el que el fuego se produce bajo los exutorios (centrado en planta); en segundo lugar, se colocará el fuego cerca de una de las paredes de la nave alejadas del centro respecto al eje X; por último, posicionaremos el fuego próximo a una de las dos paredes de la nave alejadas del centro según el eje Y.

En principio, estas van a ser las variables de entrada principales que iremos modificando para poder analizar los resultados o variables de salida que se obtienen. Una vez hayamos resuelto distintas situaciones de incendio, realizaremos una comparación entre los distintos resultados para analizar cómo afectan las entradas a las salidas. Por otra parte, vamos a analizar mediante el uso de CFAST la solución hallada para la resolución del problema mediante el uso de la normativa empleada tradicionalmente para diseñar los sistemas de evacuación de humos.

6.3 Características de los compartimentos en CFAST

A continuación, vamos a definir los compartimentos que se van a incluir en las simulaciones a realizar con CFAST. Para ello, debemos decidir cómo modelar el establecimiento del que se partía inicialmente y para el cual se realizó el dimensionado del sistema de evacuación de humos, que servirá como punto de partida para las simulaciones que se lleven a cabo con el programa de cálculo.

Antes de profundizar en la forma y tamaño de los compartimentos, debemos considerar que existe la posibilidad de definir los materiales que van a formar las superficies limitadoras de nuestro habitáculo de estudio, es decir, los materiales de los que están fabricadas paredes, techos y suelos, resaltando las características que es necesario definir para poder realizar la simulación en CFAST. Así, podemos adelantar, que para comprobar la influencia que tiene la definición de materiales en estas superficies, emplearemos en nuestras simulaciones acero y hormigón, incluidos en la base de datos de CFAST y que presentan las siguientes propiedades:

1. Acero
 - Conductividad: $0.048 \text{ kW/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
 - Calor específico: $0.559 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
 - Densidad: 7854 kg/m^3
 - Espesor: 0.003 m
 - Emisividad: 0.9

2. Hormigón

- Conductividad: $0.000125 \text{ kW/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
- Calor específico: $1.05 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
- Densidad: 525 kg/m^3
- Espesor: 0.15 m
- Emisividad: 0.94

Además, utilizaremos un material alternativo, definido manualmente y que utilizaremos para precisar cómo afecta cada propiedad que es necesario especificar para definir el material.

Una vez definidos los materiales que van a conformar los límites del compartimento en el que se desarrolla el incendio, pasamos a representar la geometría que se va a utilizar para realizar las distintas simulaciones a través de CFAST. En este caso, y con el objetivo de reducir la dificultad del problema sobre el que queremos trabajar para poder obtener las conclusiones sobre la correcta utilización del programa, se ha optado por una geometría en forma de paralelepípedo debido principalmente a la imposibilidad de definir techos a dos aguas como es el caso de la nave original. Por tanto, nuestra geometría presentará una planta rectangular de 30 metros de ancho por 55 metros de profundidad, con una altura de 9,5 metros, tal y como se muestra en la ilustración 18.

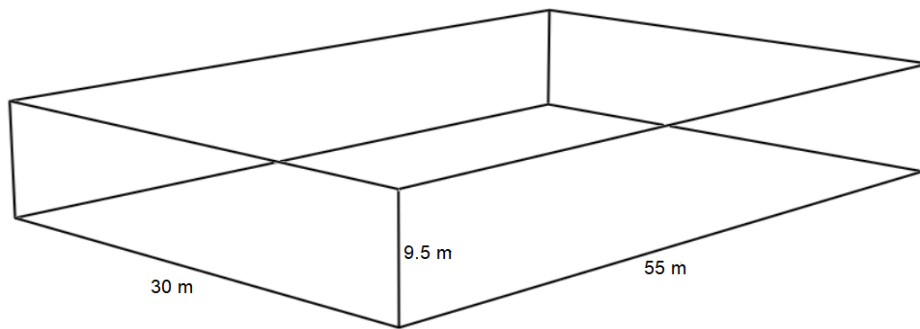


Ilustración 19: Medidas del compartimento en estudio

6.4 Características de los exutorios en CFAST

Como se indicó anteriormente, en la parte descriptiva del presente trabajo, los exutorios representan las zonas de entrada o salida del aire y tienen un papel fundamental en la eliminación del humo en recintos cerrados en los que se ha producido un incendio.

Para definir las zonas de entrada y salida de aire se partirá de los resultados obtenidos en el dimensionado de sistemas de evacuación de humos haciendo uso de la normativa UNE correspondiente. Dichos resultados servirán de partida para iniciar las simulaciones en CFAST, sin embargo, realizaremos modificaciones para comprobar la sensibilidad del programa a las variables de salida, tanto en el caso de las aberturas de entrada como de salida del aire.

6.4.1 Exutorios de entrada

En primer lugar, nos disponemos a definir las medidas que van a presentar las superficies de entradas, superficies por las que debe entrar el aire limpio desde el exterior que ayude a expulsar el humo resultante del incendio producido.

En el caso de los exutorios de entrada, debemos tener en cuenta la existencia de zonas de succión severa (al menos inicialmente porque también se va a proceder a comprobar la influencia de las zonas de succión severa definidas por la normativa que fue utilizada previamente). Para evitar dichas zonas, los exutorios de entrada se

deben definir en la fachada lateral, teniendo en cuenta que en los primeros 3,4 metros desde la esquina más lejana no pueden ser incluidas aberturas para la entrada de aire.

Además, debemos recordar la existencia de la puerta en la cara fachada frontal que, a priori, se mantendrá cerrada y no aportará flujo de aire en la simulación.

Por otra parte, para la definición de los exutorios de entrada se valorará la siguiente situación: representar dichas entradas de aire como una única, siendo la superficie de entrada la superficie total que se obtuvo usando la norma y centrados en la fachada lateral derecha. Posteriormente, trataremos de ver si influye sobre el resultado que las ventanas se representen de forma independiente a lo largo de la misma fachada con relación a la solución obtenida mediante la simplificación de representar dichas entradas como una sola.

Finalmente, variaremos la posición de dichas superficies de entrada de aire para comprobar si afecta a la simulación que se encuentren en una zona u otra de la fachada.

A continuación, se adjunta una tabla en la que se muestran los datos iniciales con los que se va a comenzar la simulación en lo que a entrada de aire se refiere.

Nº Abertura	Comp. 1	Comp. 2	Pto. Bajo [m]	Pto. Alto [m]	Ancho [m]	Pared	Offset [m]
Caso 1							
1	C1	Exterior	1.5	3.98	8.47	Derecha	22

Tabla 5: Definición de los exutorios para entrada de aire para el caso inicial

6.4.2 Exutorios de salida

Una vez se han definido los espacios destinados a permitir la entrada de aire limpio desde el exterior, debemos introducir los exutorios que van a permitir la salida de aire contaminado fruto de la combustión producida como consecuencia del incendio.

En este caso, y como se hizo al definir los exutorios para la admisión de aire, se partirá de los resultados obtenidos en el apartado 4: *Diseño y dimensionado de sistemas de evacuación mediante la norma UNE*. Dicho dimensionado permitió obtener como resultado para la superficie aerodinámica de salida total de aire una superficie de 21 metros cuadrados, que terminaría definiéndose como una superficie geométrica total de 35,71 metros cuadrados, que se distribuirían en 8 dispositivos de aireación cada uno de ellos con una superficie de 1800 mm × 2480 mm, es decir, 4.464 metros cuadrados, que traducido a superficie aerodinámica de salida, según los cálculos realizados en el punto 4, representa una superficie por exutorio de 2.63 m².

En lo que a los exutorios de salida se refiere, queremos realizar varias comprobaciones. La primera de ellas está relacionada con la posibilidad de representar las aberturas como 8 exutorios independientes a lo largo del eje Y (según el sistema de referencia impuesto por CFAST), en parejas de dos y situados centrados en el eje X o bien definir un único exutorio que tenga la superficie total de salida anteriormente especificada, que se situará en el centro de la nave. Además, nuestro software de cálculo permite representar estos exutorios de salida en forma cuadrada o definirlos en forma circular, según la norma atendiendo al cálculo del diámetro efectivo del exutorio y los coeficientes de flujo para aquellos flujos que atravesasen dicho exutorio. Aunque se partirá de exutorios que presenten una forma cuadrada, también vamos a realizar las simulaciones con exutorios circulares para ver cómo afecta a la solución la forma de estas aberturas.

Como ya se ha indicado, vamos a partir de los resultados obtenidos en el apartado 4. A continuación se adjunta un cuadro similar al elaborado con los exutorios destinados a la entrada de aire desde el exterior en el que se incluyen los parámetros a introducir en CFAST para definir los exutorios de salida. El fin de incluir dichos cuadros es tener una primera toma de contacto con el programa de cálculo, teniendo en cuenta que en el Anexo A, incluido en la página 82 se detalla el significado de cada uno de los parámetros incluidos en las tablas. Será esta situación la que representemos en el caso inicial.

Nº abertura	Comp.	Comp.	Área de sección transversal	Forma	Offset X	Offset Y
-------------	-------	-------	-----------------------------	-------	----------	----------

	Superior	Inferior	[m ²]		[m]	[m]
Escenario 1: Caso 1						
1	Exterior	C1	21.7	Cuadrada	15	27.5

Tabla 6: Definición de los exutorios de salida para el caso inicial

6.5 Limitaciones de CFAST

Antes de empezar a realizar simulaciones debemos tener en cuenta que, aunque CFAST supone un enorme avance en cuanto a la posibilidad que nos ofrece de simular un incendio en poco tiempo y a bajo coste, también presenta una serie de limitaciones que hacen de este software de cálculo una herramienta que no podrá ser utilizada para cualquier situación, especialmente en geometrías extremadamente complejas.

A continuación, se incluye una lista con todas estas limitaciones:

1. El tiempo máximo para una simulación es de 86400 segundos.
2. El número máximo de compartimentos por simulación es 100.
3. El máximo número de flujos horizontales (a través de puertas o ventanas en muros verticales) por conexiones de aireación que pueden incluirse en una simulación es 2500.
4. El número máximo de aberturas horizontales entre un par de compartimentos en un análisis es de 25.
5. El número máximo de flujos verticales (a través de techo/suelo) por conexiones de aireación que pueden incluirse en una simulación es de 200.
6. El número máximo de aberturas verticales entre un par de compartimentos en un análisis es de 25.
7. El número máximo de conexiones entre compartimentos y sistemas de ventilación mecánica que pueden incluirse en una simulación es 200.
8. El número máximo de ventiladores que pueden incluirse en una simulación es 100.
9. El número máximo de fuegos que pueden definirse en una simulación es 200.
10. El número máximo de propiedades térmicas del material que pueden incluirse en una carpeta de base de datos térmicos es 125.
11. El número máximo de *targets* que pueden incluirse en una simulación es 1000.
12. El número máximo de detectores/rociadores que pueden incluirse en una simulación es 1000.

Esta información se ha extraído directamente de la guía del usuario de CFAST. [2]

7 PUESTA EN MARCHA DE CFAST 7.4 Y ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD DE LAS SALIDAS ANTE CAMBIOS EN LAS ENTRADAS

Una vez que hemos explicado las variables más significativas que necesita CFAST para poder llevar a cabo una simulación, usaremos este epígrafe para tratar de poner en marcha el programa y obtener los primeros resultados, no sin antes tratar de ver las similitudes y diferencias existentes entre la metodología empleada por la norma UNE y la utilizada por CFAST.

Una vez aclarado este importante detalle, vamos a señalar los parámetros mínimos indispensables que requiere CFAST para poder llevar a cabo una simulación. Además, incluiremos fotos directamente extraídas del programa para que podamos familiarizarnos con su interfaz (dichas imágenes representan las ventanas en las que hemos rellenado información de entrada para obtener los resultados que posteriormente comentaremos en la que denominaremos *Simulación Inicial*). Por otro lado, vamos a añadir también una tabla a modo resumen donde se comparen las entradas y salidas de CFAST con las requeridas por la norma. De esta forma, si queremos ejecutar una simulación válida, tendremos que definir al menos las siguientes entradas:

- Tiempos de simulación: definen fundamentalmente cada cuanto tiempo queremos que se actualicen los resultados de salida. En caso de poner a cero alguna de las opciones, no obtendremos esos resultados.
- Condiciones de simulación: debemos definir las temperaturas, presión, humedad y elevación inicial, tanto dentro como fuera del compartimento donde tiene lugar el fuego. Servirán como condición inicial en la resolución de las ecuaciones diferenciales del modelo.

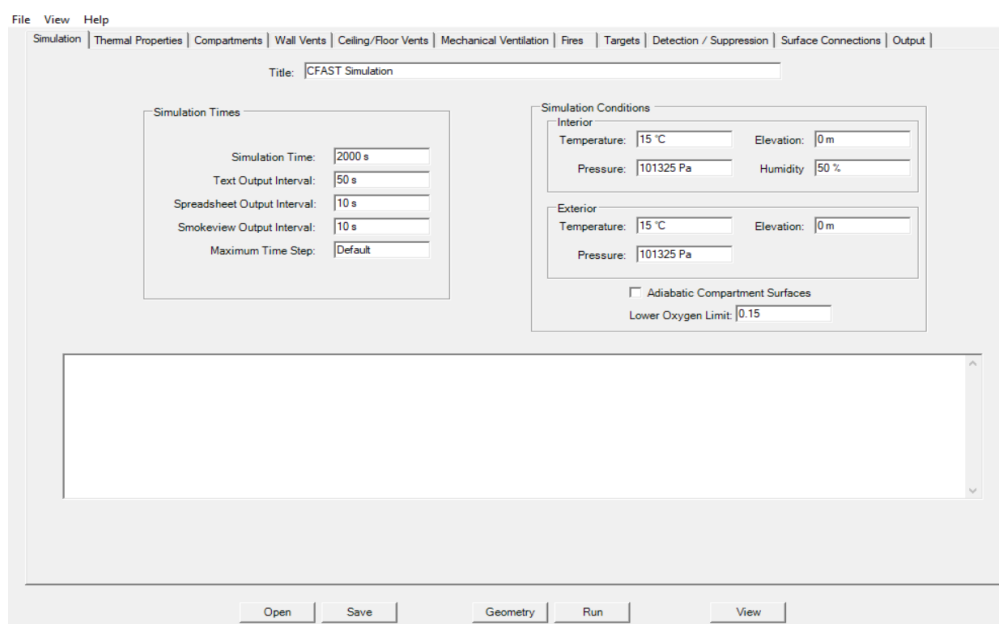


Ilustración 20: Condiciones de simulación (extraída de CFAST)

- Compartimento: es necesario representar el espacio en el que tiene lugar el incendio. Para ello, definiremos una anchura, una profundidad y una altura. Recordemos que CFAST solo permite definir techos planos, lo cual puede suponer una limitación según la complejidad del escenario que se quiera

estudiar. Por otra parte, no es necesario que definamos las propiedades térmicas de los materiales de construcción que definen las paredes, suelos y techos del compartimento que hemos definido previamente.

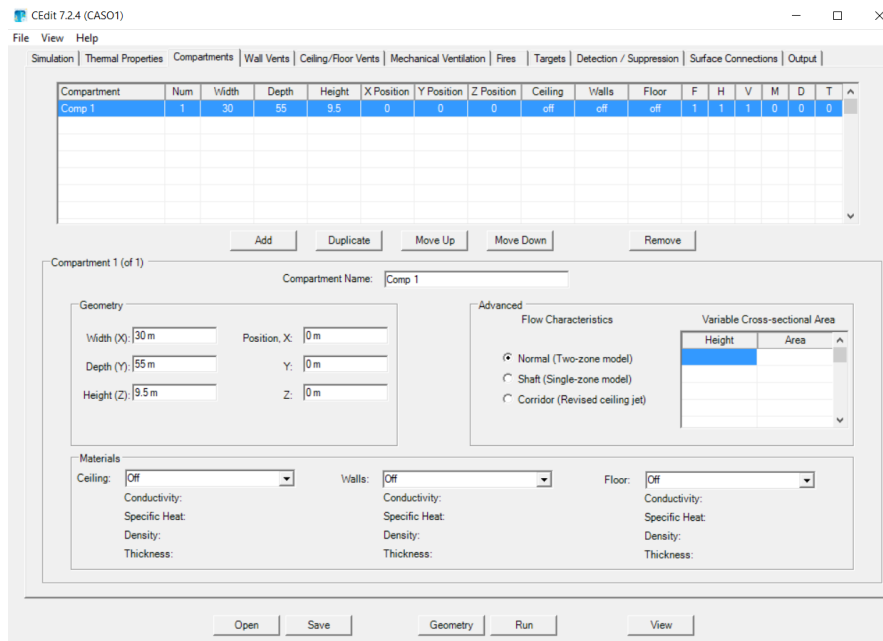


Ilustración 21: Definición del compartimento (extraída de CFAST)

- Incendio: donde, como explicamos en el punto anterior, tendremos que definir tanto la posición del fuego como su potencia y tamaño. Para esto último, se definirá un HRR, un área de la base de incendio y la altura de la base sobre el nivel del suelo (en nuestro caso el fuego se produce a nivel del suelo y, en principio se mantendrá así en todas las simulaciones), todos ellos en función del tiempo.

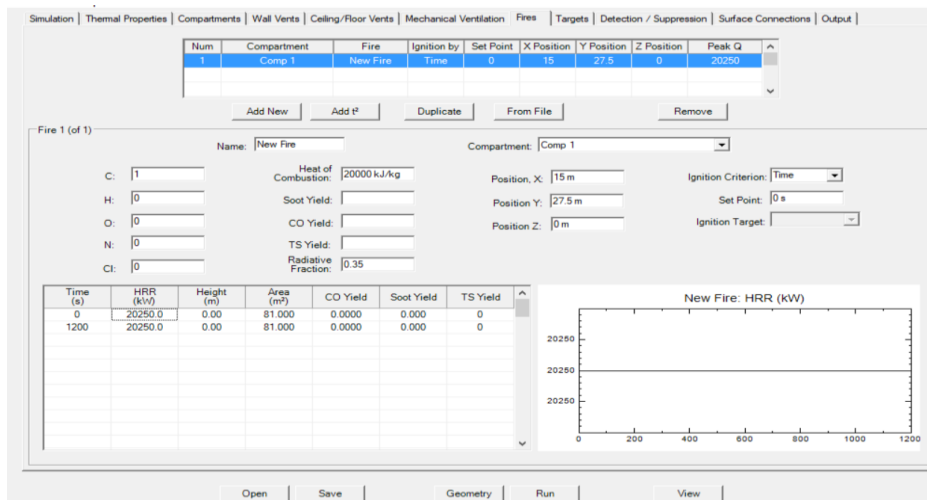


Ilustración 22: Definición del fuego en CFAST

En la imagen anterior podemos comprobar como se representa la evolución del HRR respecto al tiempo. En este caso se ha optado por representar un fuego constante de forma similar a la que se tiene para el caso de diseño mediante norma.

Realmente, sólo con estas entradas podemos estudiar la evolución de un incendio. Es decir, CFAST también va a permitir que estudiemos situaciones en las que no hay entradas ni salida de aire, o lo que es lo mismo, podemos estudiar la evolución de incendios en espacios completamente cerrados. Del mismo modo, también podríamos

estudiar situaciones en las que tenemos salidas de aire contaminado, pero no tenemos aire de reemplazo para ver que ocurriría en dicho caso. Sin embargo, a priori este no es el objetivo de nuestro estudio por lo que además de las entradas anteriores también tendremos que definir:

- Exutorios de entrada: en CFAST se les conoce como “*venteo en paredes*” y son necesarias para permitir la entrada de aire limpio.

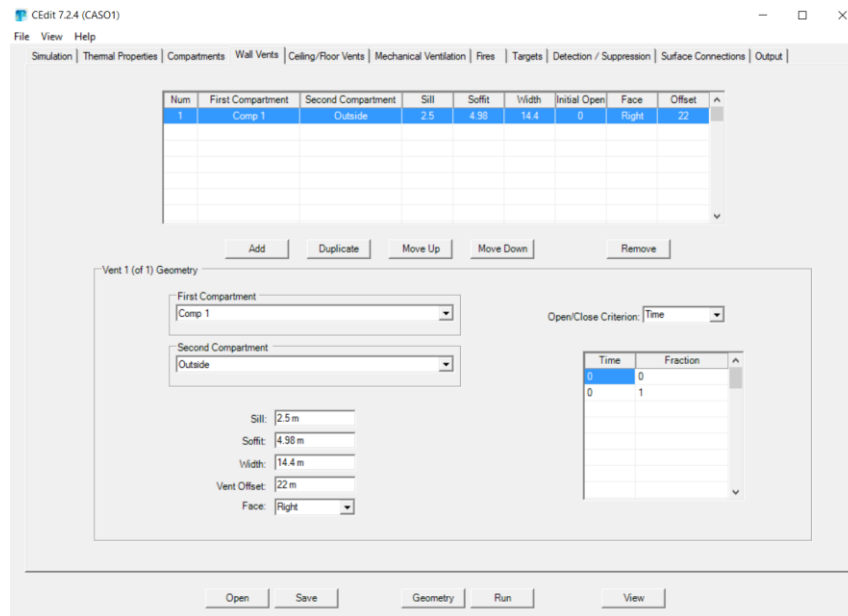


Ilustración 23: Definición de los exutorios de entrada

- Exutorios de salida: en CFAST aparecen como “*venteo en suelos/techos*” y representan la zona de salida de humos contaminados que ascienden hacia la capa superior a través del penacho.

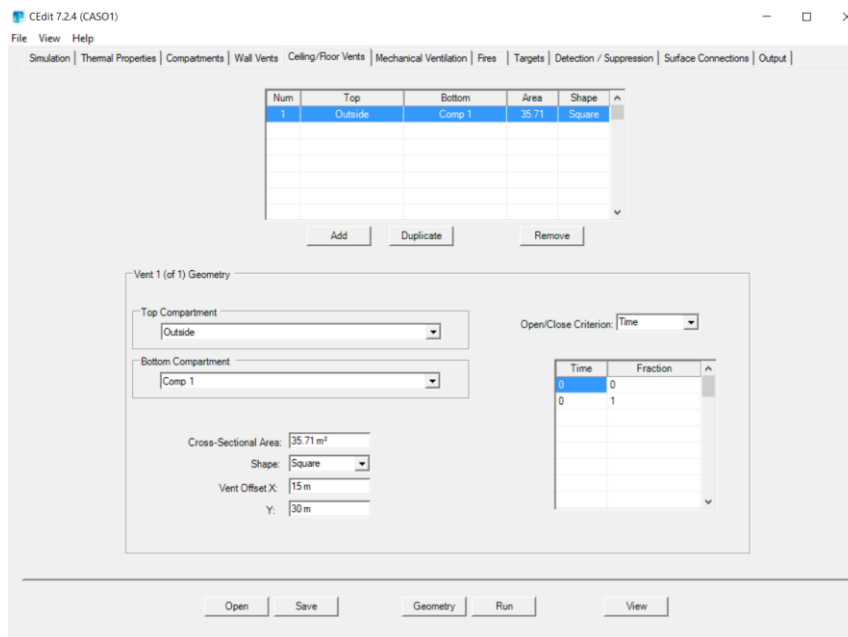


Ilustración 24: Definición de los exutorios de salida

El hecho de que los exutorios de entrada se definan como aberturas en muros es bastante obvio y se refiere a que el aire limpio siempre debe entrar desde zonas que generen corrientes ascendentes para la posterior eliminación del humo producido en el incendio y de ahí que no puedan situarse en el techo. Del mismo modo que los

exutorios de entrada se relacionan con aberturas en paredes, los exutorios de salida lo hacen con aberturas en el techo, que es la zona por la que se eliminan los gases contenidos en la capa caliente.

Como vemos en las ilustraciones anteriores, ambas extraídas de CFAST, podemos percatarnos de que, aunque se definen de forma parecida, no es exactamente igual. Por un lado, en el caso de las entradas, es necesario definir la altura a la que se colocan mientras que la salida ya sabemos que va en el techo. Además, también se nos va a permitir elegir el punto exacto en el que queremos que esté el centro de nuestro exutorio (para las entradas se elige la pared en la que queremos que vaya y un desplazamiento que viene definido por un offset, mientras que en el caso de los exutorios de salida se localiza directamente con la posición en x e y). Además, en ambos casos es necesario que definamos los compartimentos conectados por el exutorio y el criterio de apertura.

Por último, uno de los aspectos que más controversia puede generar cuando trabajamos con CFAST es si estamos definiendo superficies geométricas o aerodinámicas. La guía del usuario no resuelve esta duda por lo que la primera opción para comprobar de que superficie se trata es simular con las condiciones dadas para el caso de la norma y comprobar cual de los dos casos se acerca más. Después de realizar dichas simulaciones, se obtuvo una solución más próxima a la primera obtenida si hacíamos uso de la superficie geométrica, lo cual va un poco en contra de lo que podría parecer más lógico. Por tanto, y con el objetivo de resolver esta duda y hacer un uso adecuado del programa, se decidió preguntar en el principal foro de CFAST (Grupos de Google), donde uno de los desarrolladores del software, Richard Peacock, nos confirmó que debemos utilizar la superficie aerodinámica, lo cual contrasta con la idea anterior de que es la geométrica la que debemos introducir.

Además, en el Anexo C se van a incluir las entradas definidas para llevar a cabo todas las simulaciones que hagamos y poder comprobar las diferencias entre una y otra simulación.

7.1 Simulación inicial y primera comparativa con UNE 23585

A partir de este punto, procedemos a simular con CFAST la que podemos considerar, en principio, situación más parecida a la que obtuvimos con la norma y, de este modo, plasmar los primeros resultados que nos permitirán extraer las primeras conclusiones.

En este primer caso, nos quedaremos con las salidas más generales que nos da CFAST, las cuales podemos equiparar a las que se obtienen por norma, es decir, vamos a analizar fundamentalmente tanto la temperatura de la capa de humos como la altura libre de humos.

Comenzaremos el análisis y comparativa de las situaciones viendo los parámetros de entrada y las salidas que se obtienen con ambos modelos. A continuación, se incluye la tabla donde podemos ver las diferencias y similitudes.

ENTRADAS	
UNE 23585	CFAST
Área de incendio	HRR
Perímetro de incendio	Área de incendio
Poder calorífico del fuego	Exutorios (entrada y salida)
Altura libre de humos	Posición del fuego
SALIDAS	
UNE 23585	CFAST
Exutorios de salida	Altura libre de humos
Temperatura de la capa de humos	Temperatura de la capa de humos

Tabla 7: Parámetros de entrada y salidas obtenidas mediante norma y CFAST

Si observamos la tabla anterior, podemos ver que en ambos casos tenemos situaciones similares, donde la principal diferencia es que la norma UNE exige que impongamos una altura libre de humos para definir los exutorios mientras que en CFAST verificaremos, a partir de unos exutorios prediseñados, que el modelo implantado nos permite obtener una altura libre de humos apropiada para el caso concreto que se está simulando. En esta línea, podemos afirmar que según la norma seguimos un camino recto hasta llegar a un fin, mediante la imposición de más o menos restricciones y características de diseño según la geometría y situación que tengamos, mientras que en CFAST tenemos un proceso más iterativo donde podemos imponer el diseño final y, a partir de los resultados obtenidos, realizar las variaciones que creamos pertinentes para obtener los resultados que buscamos.

Por otra parte, aunque no lo hayamos incluido como entrada de diseño, la geometría del espacio en el que queremos implantar el sistema de evacuación de humos también jugará un papel importante. Sin embargo, dicha geometría va a influir de distinto modo si diseñamos según norma o mediante CFAST. De este modo, mientras que en el primer caso la geometría define principalmente la necesidad de disponer de uno o más depósitos de humos (la superficie máxima impuesta por la norma UNE 23585 por depósito de humo es de 2000 metros cuadrados), en el caso de CFAST sí tiene una mayor influencia sobre los resultados finales, ya que cualquier variación que se realice en cuanto forma o tamaño del compartimento, podría tener una repercusión directa sobre el resultado, por pequeña que sea dicha variación (aún así, resulta evidente que variaciones pequeñas de la geometría de entrada conllevan cambios pequeños en los resultados mientras que variaciones mayores supondrán también mayores cambios en las salidas).

Otra aclaración que debemos realizar antes de valorar los resultados obtenidos haciendo uso de CFAST es que en la tabla anterior se muestran las salidas básicas que nos permiten comparar los resultados de ambas situaciones. Sin embargo, CFAST nos permitirá tanto un mayor número de entradas con el fin de precisar en la situación que deseamos simular como de un mayor número de soluciones de las que iremos hablando con el desarrollo de nuevas simulaciones cada vez más complejas.

Con todo ello, procedemos ya a realizar la primera simulación que, como dijimos anteriormente, será bastante simple (dentro de las posibilidades que tiene CFAST) con el fin de poder comparar el modelo simulado con el modelo que utilizamos para diseñar el sistema de evacuación de humos mediante la norma. A continuación, se recogen en la tabla 8 las entradas y resultados obtenidos en esta primera simulación, los cuales servirán como caso base del estudio de sensibilidad de los parámetros que influyen en la resolución del problema mediante uso de modelos de zona.

SIMULACIÓN INICIAL		
ENTRADAS		
Temperatura	Interior: 15° C	
	Exterior: 15° C	
Presión	Interior: 101325 Pa	
	Exterior: 101325 Pa	
Elevación	Interior: 0 m	
	Interior: 0 m	
Compartimento	55 x 30 x 9.5 m	
Exutorios de entrada	Centrado en fachada derecha a 1,5 metros sobre el suelo. Dimensión: 2.48 x 8.47 m	
Exutorios de salida	Centrado en techo, cuadrado y con un área de 21 metros cuadrados	
Fuego	HRR	20250 kW
	Área	81 m ²
	Calor de combustión	20000 kJ/kg
	Fracción radiación	0.35

SALIDAS	
T^a capa de humos	330°C (603 °K)
Altura libre de humos	5.1 m
Flujo de humo entrante en el penacho	59 kg/s

Tabla 8: Resumen de entradas y salidas principales para la simulación inicial

A la vista de la tabla anterior podemos empezar a sacar las primeras conclusiones a cerca de la proximidad entre los resultados obtenidos mediante CFAST y los que obtuvimos cuando usamos la norma UNE 23585. En este caso, se ha realizado una simulación prescindiendo de las propiedades térmicas de las superficies limitadoras del compartimento (se ha asumido que, al menos en el punto que nos encontramos, la norma no considera dichas propiedades para llevar a cabo el diseño de sistemas de evacuación). Además, se ha decidido considerar para el instante inicial la misma temperatura dentro y fuera del compartimento ya que la norma solo considera una temperatura y no queremos que dicha variación entre ambas zonas pueda influir en el análisis de CFAST.

Sin embargo, podemos observar que los resultados difieren bastante de los obtenidos cuando hacíamos uso de la norma para realizar el diseño, especialmente en el caso de la temperatura de la capa de humos donde la diferencia es de 130° K (603°K haciendo uso de CFAST por los 473°K que teníamos usando el procedimiento propuesto por la normativa). En el caso de la altura libre de humos la solución obtenida mediante simulación se aproxima un poco más a la que impusimos para diseñar mediante norma, 5.1 metros en lugar de los 5.5 metros impuestos. Además, se ha decidido incluir también el flujo de humo entrante en el penacho, en cuyo caso, también existe diferencia en el valor obtenido respecto al que obtuvimos previamente con norma, que recordamos fue de 87,3 kg/s por los 59 kg/s obtenidos en la simulación inicial, tal y como se muestra en la tabla 8. La razón de incluir este valor en el análisis radica en la directa relación que presenta la masa de humos entrante en el penacho con la temperatura de la capa de humos. Por ello, se considera conveniente recordar las ecuaciones (2) y (4) del presente documento, las cuales establecen las siguientes relaciones:

$$M_f = C_e \cdot P \cdot Y^{3/2}$$

$$\Theta_1 = \frac{Q_1}{c \cdot M_f}$$

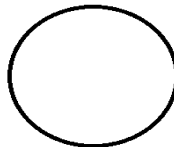
La primera de ellas representa la masa de humos entrante en el penacho, mientras que la segunda establece el aumento de temperatura (sobre la temperatura inicial de la habitación) sufrido en la capa superior tras producirse el incendio. Como podemos ver en la primera expresión, el perímetro del incendio interviene en los cálculos y, posteriormente, afectará también a la temperatura de la capa de humos. El hecho de resaltar la influencia del perímetro en los cálculos viene derivado del diferente modelo del fuego que hacen CFAST y la norma. Mientras que la norma define un fuego cuadrado con un área y un perímetro (que por otra parte nos permite conocer el lado de dicho fuego), CFAST define un fuego de base circular descrito únicamente por su área. En la ilustración 25, vemos una comparativa de ambos modelos de incendio:



Área = 81 metros cuadrados

Perímetro = 36 metros

Lado = 9 metros



Área = 81 metros cuadrados

Perímetro = 31,9 metros

Radio = 5.08 metros

Ilustración 25: Comparativa de los modelos de incendio según norma y CFAST

Si extrapolamos el modelo de incendio circular al procedimiento empleado para resolver el problema haciendo uso de la norma, los resultados obtenidos según dicho procedimiento variarían, siendo los valores de la temperatura de la capa de humos y superficie aerodinámica de los aireadores los que se muestran a continuación:

- Temperatura de la capa de humos = 497 ° K
- Superficie aerodinámica de los exutorios = 18.22 metros cuadrados

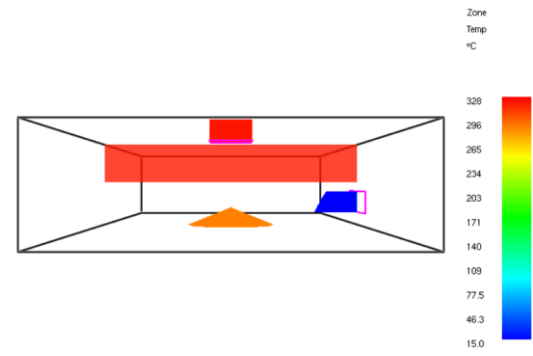
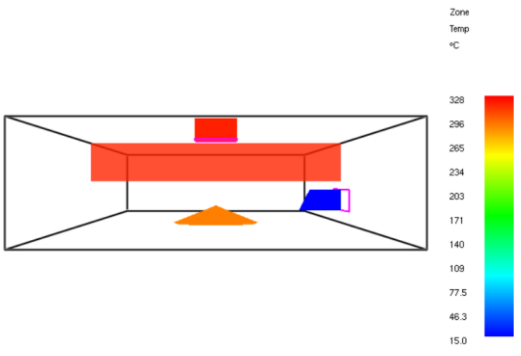
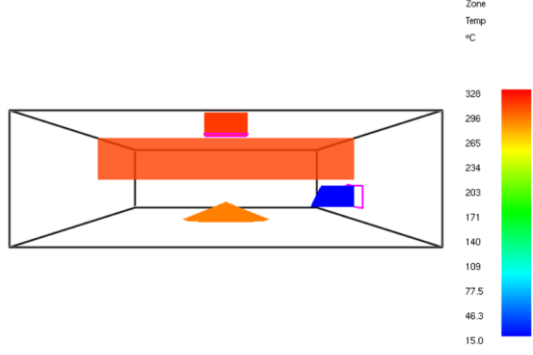
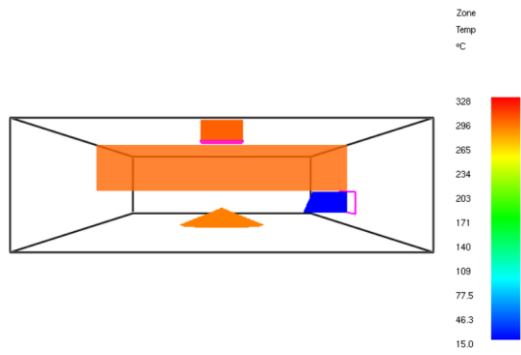
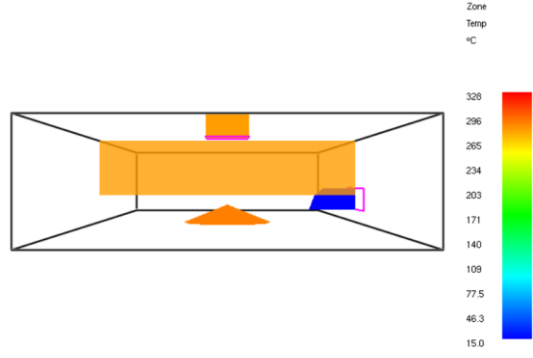
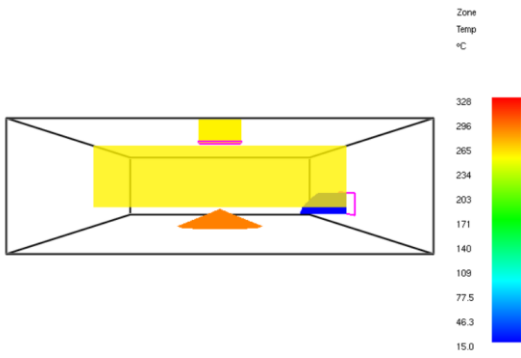
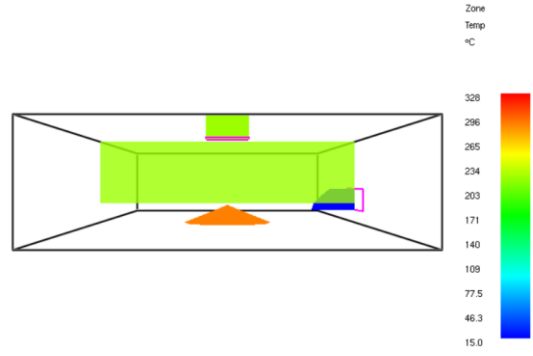
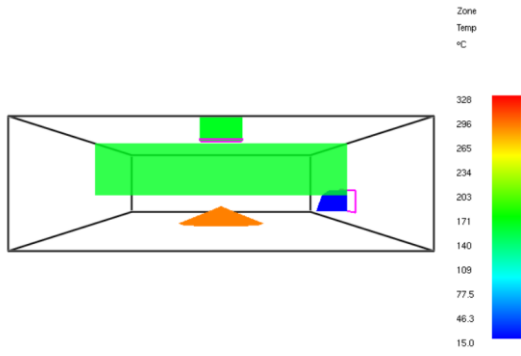
Resumiendo, la temperatura de la capa de humos aumenta en 25° K mientras que se reduce casi dos metros cuadrados la superficie aerodinámica destinada a la salida de los humos, reducción que, por otra parte, se podría compensar con un aumento de la altura libre de humos. Por tanto, si realizamos los cálculos empleando un perímetro de 31.9 metros (caso de base del incendio circular), podremos mantener los resultados de la superficie aerodinámica de salida, aunque elevemos la altura libre de humos a 5.7 metros. Por una parte, en cuanto a la temperatura de la capa de humos nos acercamos ligeramente al valor que se obtiene con CFAST, pero la altura libre de humos se aleja del valor simulado computacionalmente. A pesar de ello, es pronto para sacar conclusiones relativas a la proximidad entre ambos métodos y esperaremos a realizar nuevas simulaciones para obtener estas conclusiones.

Por otra parte, una vez realizada la primera simulación y obtenidos los primeros resultados, podemos adelantar que, además de los resultados obtenidos y comentados anteriormente, también vamos a obtener otras variables de salida como son:

- Presión en el suelo del compartimento relativa a la presión exterior
- Temperatura de la capa inferior
- Volumen de la capa superior
- Altura de llama
- HRR por convección
- Flujos de entrada y salida a través de los exutorios
- Composición química del humo producido tanto en la capa superior como en la inferior (este resultado puede obtenerse tanto en fracción molar como en kilogramos)
- Densidad óptica en función del humo liberado

A medida que avancemos con las diferentes simulaciones iremos completando los resultados obtenidos, con el objetivo final de analizar como afectan las variaciones a la entrada a estas salidas secundarias.

De cualquier modo, aprovecharemos la realización de esta primera simulación para incluir aquí los resultados obtenidos para las variables de entrada iniciales que se han definido previamente y, al mismo tiempo, poder sacar alguna conclusión interesante relativa a estas otras variables de salida. Mostramos los resultados completos de esta simulación inicial en la tabla 10, incluida a modo de resumen. Además, a continuación, ilustramos la evolución del incendio.



Tª capa de humos (K)	603												
Altura libre de humos (m)	5.11												
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	58.9												
Presión (Pa)	-18.3												
Tª capa inferior (K)	378												
Altura de llama (m)	2.05												
HRR por convección (kW)	13162.5												
Pirólisis (kg/s)	1.01												
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	73.8												
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	74.8												
Densidad óptica a través del humo producido (1/m)	0												
Composición química del humo (fracción molecular)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>N_2</th> <th>O_2</th> <th>CO_2</th> <th>CO</th> <th>HCN</th> <th>HCL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>78.6</td> <td>16.4</td> <td>4.2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	N_2	O_2	CO_2	CO	HCN	HCL	78.6	16.4	4.2	0	0	0
N_2	O_2	CO_2	CO	HCN	HCL								
78.6	16.4	4.2	0	0	0								

Tabla 9: Resumen de resultados para la simulación inicial

La representación gráfica de los resultados correspondientes a la simulación inicial y el código en el que se incluyen las variables de entrada definidas se han incluido conjuntamente en el Anexo B.1.

De estos resultados, nos centraremos en primer lugar en tres de ellos: la altura de la llama del fuego, el HRR por convección y el valor de pirólisis obtenido. El interés de estos resultados reside, en que se obtienen a través de ecuaciones directas que podemos encontrar en la Guía Técnica de Referencia de CFAST. Por tanto, se trata de valores constantes que no dependen del tiempo (siempre y cuando las variables de las que dependen tampoco lo hagan) y que se calculan directamente con las siguientes expresiones:

1. *Altura de llama:*

$$L = -1.02 \cdot D + 0.235 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{5}}$$

Donde \dot{Q} representa el valor de HRR definido y D el diámetro de la base del incendio obtenido como:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}, \text{ siendo } A \text{ el área del incendio.}$$

Si sustituimos $D = 10.155 \text{ m}$ y $\dot{Q} = 20250 \text{ kW}$ obtenemos $L = 2.05 \text{ m}$, tal y como CFAST ha calculado.

2. *HRR por convección:*

El valor de HRR por convección se calcula de manera sencilla a partir del HRR definido. Para obtenerlo, debemos proceder como sigue:

$$HRR_c = HRR \cdot (1 - \chi_R)$$

Donde χ_R representa la fracción por radiación.

3. Pirólisis:

Para obtener la pirólisis que se produce tendremos que conocer el HRR y el calor de combustión definidos por el usuario, y dividirlos, es decir:

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{\Delta H}$$

Esta expresión viene calculada en kg/s y el programa, además de aportar este valor, también nos da el valor de pirólisis para cada instante de tiempo (según los intervalos definidos en las condiciones de simulación para la obtención de los resultados).

Una vez descritos estos parámetros que son fácilmente calculables a partir de ecuaciones más o menos simples, vamos a proceder con múltiples simulaciones en las que variaremos una única entrada, dejando el resto constantes e iguales a las realizadas en la simulación inicial, con el objetivo de analizar como varían los parámetros de salida.

7.2 Variaciones a la simulación inicial

En este apartado trataremos de analizar cómo afectan a CFAST las variaciones realizadas a cada una de sus entradas, desde las entradas mínimas necesarias a otras propuestas por los desarrolladores del software para permitir la realización de simulaciones más próximas a la realidad.

7.2.1 Exutorios de salida

En primer lugar, puede ser interesante estudiar el comportamiento de CFAST cuando se varían las características de los exutorios de salida. Aunque, a priori, podíamos considerar CFAST como un programa de simulación que permitía obtener resultados más precisos que los obtenidos mediante la norma, hemos visto como los resultados obtenidos con CFAST son peores que los que obtuvimos con la norma para un mismo sistema de evacuación de humos.

En este caso, pretendemos estudiar cómo afecta a la simulación y, en definitiva, a los resultados, que variemos el tamaño del exutorio de salida. Además, también resultará interesante analizar cómo influye la definición de los exutorios de salida, es decir, el hecho de incluir toda la superficie de salida con un único exutorio o dividir dicha superficie entre varios exutorios. Por último, también comprobaremos si se producen cambios cuando cambiamos la forma (*shape*, en CFAST) del exutorio que hemos definido.

7.2.1.1 Simulación 2

En la primera variante del exutorio de salida, hemos decidido aumentar el área de la superficie de salida un 50% respecto a la original, que se definió en 21 metros cuadrados, manteniendo el resto de las entradas idénticas a la que definimos como simulación inicial. Dicho aumento, hace que la nueva superficie del exutorio sea de 31.5 metros cuadrados. Después de introducir esta variación y realizar la simulación se han obtenido los siguientes resultados remarcables:

- La temperatura de la capa inferior se reduce desde los 378 K de la simulación inicial hasta los 361 K.
- Los flujos de entrada y salida a través de los exutorios sí que sufren variaciones importantes al aumentar hasta los 92.5 kg/s en el caso del flujo de salida y hasta los 91.5 kg/s en el caso del flujo de entrada. Sigue resultando curioso ver como un cambio en el tamaño del exutorio de salida afecta al flujo de salida, del mismo modo que una variación de tamaño del exutorio de salida también afecta al flujo de aire que entra.

- La temperatura de la capa superior se mantiene prácticamente constante, se reduce en torno a 10 K, descenso que está relacionado con el ligero aumento que experimenta la altura libre de humos que se sitúa, en este caso, en 5.35 metros. Además, también concuerda que en este caso se haya aumentado la masa de aire entrante al penacho, aumento que es ligero pero que va ligado tanto al aumento de la altura libre de humos como al enfriamiento de la capa superior.

La representación gráfica de los resultados correspondientes a la simulación inicial y el código en el que se incluyen las variables de entrada definidas se han incluido conjuntamente en el Anexo B.2.

Las variaciones producidas en las salidas cuando aumentamos el área de salida están correctamente relacionadas. Sin embargo, si seguimos aumentando dicha superficie, podemos observar que la altura libre de humos empieza a bajar nuevamente, de forma que el exutorio empieza a perder eficiencia y los resultados obtenidos empeoran.

Debemos recordar, que la norma establecía un flujo crítico de extracción de humos por exutorio, que no debía rebasarse para evitar fenómenos no deseados como el denominado efecto vórtice o plugholing, que recordemos, se trata de un fenómeno por el cual, el aire situado debajo de la capa de humos sale por los puntos de extracción en lugar del propio humo producido en el incendio, provocando así el fallo de los sistemas de evacuación.

7.2.1.2 Simulación 3

A continuación, queremos analizar ahora los resultados que obtendríamos si en lugar de definir un único exutorio de salida definimos los ocho puntos de extracción (representando así una disposición de los exutorios más realista) que decidimos colocar en el caso de diseño mediante la norma.

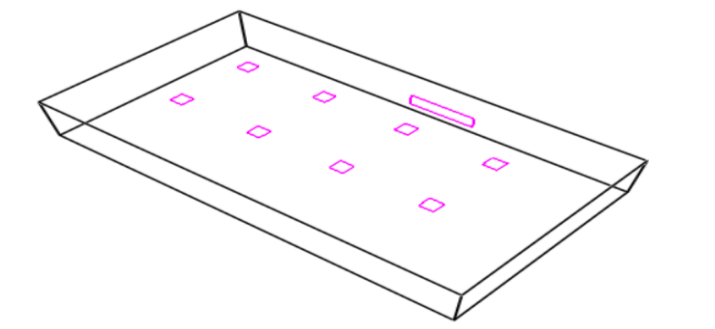


Ilustración 26: Definición de la superficie de salida dividida en ocho exutorios

Manteniendo el mismo área de salida dividida en ocho exutorios situados en dos filas paralelas a lo largo de la nave y con los mismos valores de la simulación inicial, es decir, 21 metros cuadrados como superficie total de salida (2.625 metros cuadrados por exutorio), obtenemos los siguientes resultados:

Tª capa de humos (K)	583
Altura libre de humos (m)	6.80
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	67
Presión (Pa)	-16.8
Tª capa inferior (K)	386
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	68.7
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	69.7

Tabla 10: Resultados obtenidos al dividir la superficie de salida en ocho

En primer lugar, vamos a comparar estos resultados con los resultados que obtuvimos en la simulación inicial y, posteriormente, con los valores de altura libre de humos y temperatura de la capa de humos que se obtuvieron con la norma. A partir de ahí, elegiremos para el resto de las simulaciones la opción más eficiente (un exutorio o múltiples exutorios) para seguir con los diversos análisis que queremos realizar al resto de los parámetros de entrada. En este sentido, consideramos que es más eficiente la que da como resultado una mayor altura libre de humos.

A la vista de estos resultados, y en relación con los resultados obtenidos en la simulación inicial en la que definimos un solo exutorio, podemos observar como la variación más significativa está relacionada con la altura libre de humos, que ha aumentado más de 1.5 metros. Hemos pasado de una situación en la que dicha altura se encontraba por debajo de la obtenida con la norma a un nuevo escenario donde cumplimos ampliamente con la altura que habíamos definido previamente. Llegados a este punto, podemos percibir la existencia del llamado plugholing en el caso anterior, con un solo exutorio, donde radica la obtención de unos resultados inferiores a los de la solución obtenida mediante la norma UNE 23585. Por ello, para llevar a cabo los diferentes análisis que tenemos por delante, vamos a optar por utilizar el sistema de evacuación de humos definido en este último caso, en el que dividimos la superficie aerodinámica de salida en varios puntos de extracción, que como hemos dicho, representa una situación más eficiente que en el caso de disponer de un solo exutorio de mayor tamaño. Además, vamos a tratar de encontrar la solución óptima para la superficie de salida calculada, estudiando el número de puntos de extracción que hace el sistema más eficaz.

En lo que al resto de resultados se refiere, destacamos el aumento de humo entrante en el penacho y el ligero descenso de la temperatura de ambas capas. Además, el flujo de salida viene dividido en ocho, un valor por exutorio, siendo el flujo de salida por exutorio igual a 8.72 kg/s. El resto de los resultados sufren variaciones poco importantes.

La representación gráfica de los resultados correspondientes a la simulación inicial y el código en el que se incluyen las variables de entrada definidas se han incluido conjuntamente en el Anexo B.3.

Además, en el Anexo C.1, se representan y comparan gráficamente: simulación inicial frente a simulación óptima con la superficie de salida dividida en ocho puntos de extracción.

7.2.1.3 Número óptimo de exutorios

Una vez comprobada la necesidad de dividir la superficie aerodinámica de salida, queremos analizar cual es el número óptimo de puntos de extracción, es decir, aquel número de exutorios que para un mismo área aerodinámica de salida total, permite obtener los mejores resultados en cuanto a temperaturas y altura libre de humos.

En primer lugar, vamos a reducir el número de exutorios a seis, con una superficie por exutorio de 3.5 metros cuadrados. En dicho caso, los resultados prácticamente no varían, salvo la altura libre de humos que se reduce muy ligeramente (en torno a 0.15 metros) y la masa de aire entrante al penacho que también se reduce hasta los 63 kg/s.

A continuación, seguimos reduciendo el número de exutorios hasta cuatro, para ver si el sistema implantado sigue perdiendo eficacia o se mantiene en valores próximos a los resultados que obtuvimos al definir ocho. En este caso, con solo cuatro exutorios la altura libre de humos sigue bajando ligeramente (se encuentra ya en 6.47 metros). Sin embargo, la masa entrante al penacho ha vuelto a subir hasta los 65.1 kg/s, lo que permite empezar a plantear la existencia de no linealidad en CFAST entre altura libre de humos y masa entrante al penacho. A pesar de la reducción de la altura libre de humos, debemos decir que seguimos estando muy por encima del valor de altura libre de humos que definimos haciendo uso de la norma, por lo que, aunque nos alejemos poco a poco de los mejores resultados obtenidos mediante CFAST seguimos estando ante simulaciones bastante buenas en relación con lo que obtuvimos mediante la norma. Cabe recordar, que, según los cálculos realizados con la norma, consideramos necesario definir al menos dos huecos de salida para evitar la aparición de fenómenos negativos que implicasen una pérdida de las cualidades del sistema descrito. De momento, podemos observar que los resultados obtenidos para ocho exutorios coinciden prácticamente con el resultado que obtenemos para cuatro y queda por ver si con dos exutorios también estamos ante valores similares de diseño.

En el caso de contar solo con dos exutorios de salida, la capa de humos baja, reduciéndose la altura libre

de humos hasta los 5.9 metros, valor que si podemos empezar a considerar importante si lo comparamos con los 6.7 metros de altura libre que teníamos con ocho exutorios. Podemos considerar entonces que el hecho de disponer únicamente de dos salidas implica que no trabajen con la máxima eficiencia y que en el caso de CFAST, el valor del caudal crítico por exutorio es menor que el que calculamos mediante la norma. Por tanto, y a falta de analizar situaciones con más de ocho salidas, podemos afirmar que menos de ocho salidas producen soluciones peores que cuando tenemos dicho número de puntos de extracción.

A continuación, comprobaremos si con diez salidas podemos seguir mejorando los resultados o si, por el contrario, el número de salidas óptimo es de ocho como definimos en el caso teórico usando la norma. Cuando simulamos con 10 exutorios, también obtenemos un ligero descenso de la altura libre de humos (por debajo de los 6.85 metros que obtuvimos con ocho salidas), mientras que el resto de los parámetros permanecen prácticamente invariables. Es por ello por lo que consideraremos que el número óptimo de exutorios es ocho, tal y como decidimos previamente en el estudio y diseño del sistema de evacuación que realizamos con la norma.

Por tanto, queremos dejar claro que, a partir de este momento, utilizaremos la solución obtenida para ocho exutorio de salida como *solución óptima* y de referencia para comparar las soluciones obtenidas de los nuevos modelos que analizaremos posteriormente.

Para confirmar la existencia del denominado plugholing en CFAST, del que hablamos anteriormente, vamos a incluir varias imágenes extraídas directamente de CFAST, pertenecientes a las simulaciones 1 (ideal), 2 y 3 (óptima), que corresponden al segundo 700 de simulación.

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)

Vent	From/Bottom	To/Top	Flow relative to 'From'			
			Upper Layer Inflow	Outflow	Lower Layer Inflow	Outflow
H 1	Comp 1	Outside	7.853E-05		75.1	
V 1	Comp 1	Outside		61.9		14.7

Ilustración 27: Flujos de entrada y salida entre el compartimento y el exterior (simulación inicial)

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)

Vent	From/Bottom	To/Top	Flow relative to 'From'			
			Upper Layer Inflow	Outflow	Lower Layer Inflow	Outflow
H 1	Comp 1	Outside	2.465E-04		90.9	
V 1	Comp 1	Outside		60.7		32.0

Ilustración 28: Flujos de entrada y salida entre el compartimento y el exterior (simulación 2)

FLOW THROUGH VENTS (kg/s)

Vent	From/Bottom	To/Top	Flow relative to 'From'			
			Upper Layer Inflow	Upper Layer Outflow	Lower Layer Inflow	Lower Layer Outflow
H 1	Comp 1	Outside			70.3	
V 1	Comp 1	Outside		8.57		0.120
V 2	Comp 1	Outside		8.57		0.120
V 3	Comp 1	Outside		8.57		0.120
V 4	Comp 1	Outside		8.57		0.120
V 5	Comp 1	Outside		8.57		0.120
V 6	Comp 1	Outside		8.57		0.120
V 7	Comp 1	Outside		8.57		0.120
V 8	Comp 1	Outside		8.57		0.120

Ilustración 29: Flujos de entrada y salida entre el compartimento y el exterior (simulación óptima)

A la vista de los resultados incluidos en las imágenes anteriores, podemos constatar que, cuando diseñamos aireadores de extracción demasiado grandes, parte del aire que se extrae corresponde a aire limpio de la capa inferior. En la última columna de estas imágenes podemos ver la cantidad de aire extraído que procede de la capa inferior, es decir, la cantidad de aire limpio que sale hacia el exterior. En la primera tabla, en la que se definió un único exutorio de salida con la superficie definida por la norma UNE 23585, ya podemos observar como parte del aire que sale es aire limpio, en lugar de los humos producidos en el incendio. Esta cantidad de aire limpio aumenta en el caso de que hagamos mayor esa superficie, por lo que el exutorio pierde eficiencia cuanto mayor es su tamaño. El caso contrario sucede cuando aumentamos el número de exutorios, dividiendo el área de salida entre todos ellos. Así, mientras en el caso de la simulación inicial salen 14.7 kg/s de aire limpio, en el caso de la simulación óptima este valor se reduce por debajo de 1 kg/s.

7.2.1.4 Simulación 4

Pasamos ahora analizar la entrada *shape* que incluye CFAST y que permite variar la forma del exutorio de salida. Se pretende comprobar si realmente el programa actúa de forma diferente si variamos esta opción. Para ello, partiremos de la simulación óptima, en la que definimos exutorios de salida cuadrados. En esta ocasión, simularemos con ocho exutorios de salida redondos, con una superficie igual a la de la simulación que realizamos con los exutorios cuadrados, es decir, 21 metros cuadrados de área.

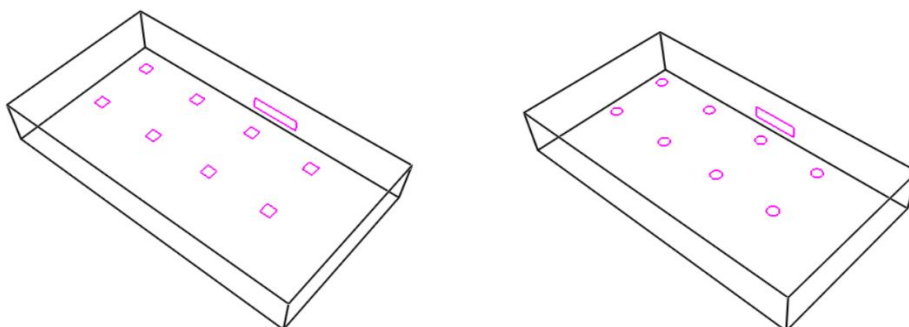


Ilustración 30: Variación de la forma de los exutorios

Si echamos un vistazo rápido a los resultados que obtenemos, podemos afirmar que prácticamente no existen diferencias con los resultados que obtuvimos al modelar los exutorios de forma cuadrada. Por tanto, podemos determinar que la forma de los exutorios no tiene una repercusión clara sobre los resultados si tenemos como ejemplo el problema que aquí se está analizando.

La representación gráfica de los resultados correspondientes a la simulación inicial y el código en el que se incluyen las variables de entrada definidas se han incluido conjuntamente en el Anexo B.4.

7.2.1.5 Simulaciones 5 y 6

Una vez analizado el posicionamiento y la forma de los exutorios de salida, queremos comprobar también como se ven afectados los resultados de la simulación si modificamos el tamaño de estos, aunque en esta ocasión tenemos ocho puntos de extracción en lugar de solo uno. Compararemos tres casos: el caso original, el caso de exutorios de mayor superficie (dispondremos ocho exutorios con una superficie total un 50% mayor que la original, es decir, una superficie total de 31.5 metros cuadrados, que llamaremos simulación 5) y un caso con exutorios más pequeños (ocho exutorios con un 50% de superficie menos que el caso original, es decir, una superficie total de 10.5 metros cuadrados, que llamaremos simulación 6). Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

	Tamaño original	Tamaño ampliado	Tamaño reducido
Tª capa de humos (K)	583	567	696
Altura libre de humos (m)	6.80	7.46	1.45
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	67	67	55.4
Presión (Pa)	-16.8	-19.9	-21.1
Tª capa inferior (°C)	386	370	456
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	68.7	81.2	45.1
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	69.7	82.2	46.1

Tabla 11: Tabla de resultados: comparativa según tamaño del exutorio

Podemos comprobar que los resultados obtenidos van en la línea de lo esperado. Mientras que al aumentar la superficie de salida se mejora tanto en altura libre de humos como en temperatura de la capa de humos, si se realiza la acción contraria reduciendo dicha superficie se produce el efecto contrario. Del mismo modo, como era de esperar, los flujos de entrada y salida aumentan con una mayor superficie de salida, mientras que disminuyen cuando se hace lo propio con la superficie de entrada. La presión y el flujo de entrada al penacho varían de una forma más aleatoria, ya que la presión aumenta tanto cuando se aumenta la salida como cuando se reduce de una forma bastante parecida, mientras que el flujo entrante al penacho se mantiene constante para el caso en que se mayor la salida mientras que se reduce cuando se minora, siendo este caso el que podemos considerar más próximo a la realidad, y siendo un tanto extraño la constancia de dicho flujo a la vista de los resultados.

Los códigos en los que se incluyen las variables de entrada definidas para las simulaciones 5 y 6 se encuentran respectivamente en los Anexos B.5 y B.6 mientras que en el Anexo C.2 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para ambos casos, comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima.

7.2.2 Exutorios de entrada

En el caso de los exutorios de entrada realizaremos tres variaciones relacionadas con la distribución, tamaño y posición de los exutorios.

7.2.2.1 Simulación 7

La primera de ellas tiene que ver con el hecho de representar los exutorios de una forma más real, es decir, 6 exutorios de 1.42 metros de ancho por 2.48 metros de altura (mantenemos la altura de los exutorios definidos para el caso con norma, pero disminuimos el ancho de estos). Como podemos ver la superficie de entrada no varía respecto a la simulación inicial, aunque en este caso los exutorios van a estar más distribuidos sobre la fachada derecha del compartimento. Por otra parte, se ha decidido dejar una distancia de un metro entre aireadores contiguos.

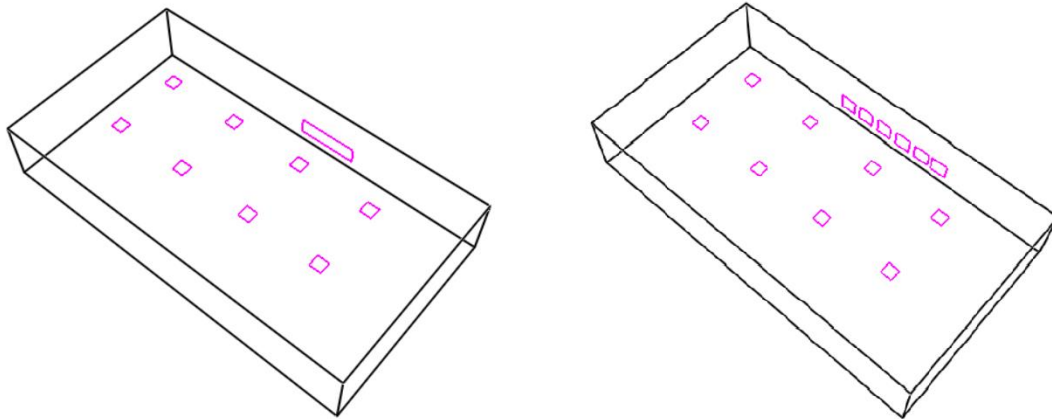


Ilustración 31: Exutorio de entrada simple frente exutorios múltiples

En este primer caso, en el que definimos la entrada de aire a partir de 6 exutorios independientes sobre la fachada lateral, al llevar a cabo la simulación y ver los resultados obtenidos podemos observar rápidamente que no se obtienen variaciones importantes. De esta forma, hemos obtenido unos resultados prácticamente idénticos a los que se obtenían en el caso de definir un único exutorio de entrada (en el caso de la solución óptima), por lo que a diferencia de lo que ocurría con los exutorios de salida, con las entradas no debemos dar importancia a definir la superficie por un único espacio o múltiples entradas de aire. Para facilitar los escenarios de simulación, y una vez comprobado que no afecta la definición de las entradas en varias superficies, podemos representar las entradas de aire a partir de un único exutorio de entrada que tenga la superficie de entrada total.

La representación gráfica de los resultados correspondientes a la simulación inicial y el código en el que se incluyen las variables de entrada definidas se han incluido conjuntamente en el Anexo B.7.

7.2.2.2 Simulaciones 8 y 9

La segunda variación, relativa a los exutorios de entrada, tiene que ver con su tamaño. En estos nuevos casos, se decidirá ampliar la superficie de los exutorios de dos formas: variando su anchura (consideramos este caso como la simulación 8), en primer lugar, y, posteriormente, variando su altura (la denominaremos simulación 9). De cualquier modo, la superficie de entrada se mantendrá constante en estas dos situaciones e igual a 31.5 metros cuadrados, lo que supone un aumento de un 50% en la superficie de entrada. Se plantean entonces los siguientes tamaños de exutorio:

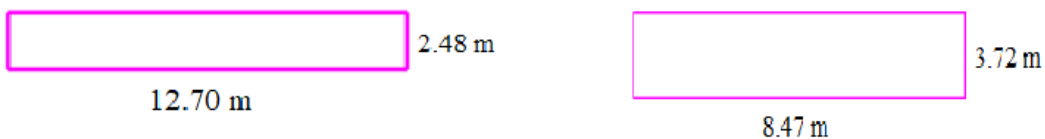


Ilustración 32: Tamaño de los exutorios de entrada en la nueva situación

En el primero de los casos, en el que hemos aumentado la anchura del exutorio, observamos ligeros descensos en la temperatura tanto en la capa superior como en la inferior (573°K y 380°K, respectivamente), mientras que

la altura libre de humos aumenta hasta los 7.2 metros. Cabe recordar que en esta simulación se sigue manteniendo el área de salida definida previamente e igual a 21 metros cuadrados. Por otra parte, la masa que entra al penacho se mantiene igual. Sin embargo, los flujos de entrada y salida aumentan 4 kg/s en ambos casos, lo que nos permite justificar las variaciones anteriores de temperatura y altura libre de humos. Por último, la presión baja considerablemente hasta 12.7 Pascales.

Por otro lado, cuando modificamos la altura del exutorio en lugar de la anchura, los resultados tienden a modificarse en la misma dirección que en el caso anterior, pero de forma más suave. Por lo tanto, podemos concluir que la forma del exutorio de admisión de aire limpio sí tiene influencia en los resultados finales, pues para una misma superficie de entrada se obtienen variaciones en los resultados de salida.

Los códigos en los que se incluyen las variables de entrada definidas para las simulaciones 8 y 9 se encuentran respectivamente en los Anexos B.8 y B.9 mientras que en el Anexo C.3 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para ambos casos, comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima.

7.2.2.3 Simulaciones 10 y 11

Otro de los análisis que queremos llevar a cabo con relación a la entrada de aire es si tiene alguna influencia que coloquemos los exutorios de entrada (manteniendo el área de entrada igual que en la superficie definida para LA simulación óptima) a una altura sobre el nivel del suelo, distinta a la que tomamos para definir su posición en el caso que usamos como referencia la norma UNE 23585, donde dicha altura quedó fijada en 1.5 metros. Analizaremos dos casos distintos: en el primero (que denominaremos simulación 10), vamos a bajar los exutorios a la altura del suelo (punto más bajo posible donde podríamos disponerlos), mientras que, en el segundo caso (que denominaremos simulación 11), optaremos por aumentar dicha altura en 1 metro por lo que el punto más bajo del exutorio de entrada se situará, en este último caso, a 2.5 metros sobre el nivel del suelo.

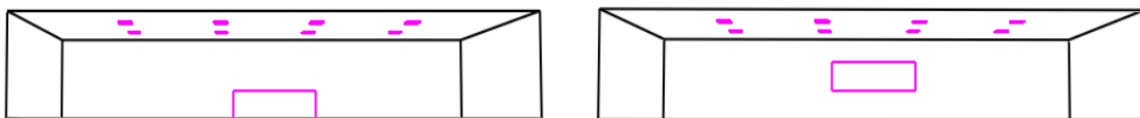


Ilustración 33: Variación en la posición de los exutorios de entrada

Cuando realizamos la simulación 10, llevando el exutorio de entrada a ras de suelo, se obtiene que la temperatura sufre un descenso poco importante respecto a la original, al mismo tiempo que se aumenta la altura libre de humos por encima de los siete metros. A pesar de estos cambios, la masa entrante al penacho se mantiene constante respecto al caso original, aunque sí varían los flujos de entrada y salida del compartimento, que aumentan ligeramente. Más brusco es el descenso sufrido por la presión, que se sitúa ahora en 13.5 Pascales.

A diferencia de lo que ocurría en el caso de bajar la posición de las entradas, si hacemos la operación inversa (simulación 11) y los colocamos a mayor altura, los resultados son menos eficientes. Por un lado, aumenta la temperatura de la capa de humos. Además, la altura libre de humos se reduce y cae hasta los 6.44 metros. La masa entrante al penacho sigue manteniéndose constante pero los flujos de entrada y salida son ahora más pequeños. Por último, la presión aumenta ahora hasta los 20 Pascales.

De este modo, podemos empezar a encontrar relaciones entre las distintas variables de salida. Hemos comprobado como aumentos de presión generalmente tienen relación con peores resultados. Siempre que entendamos como un resultado más negativo aquel en el que la altura libre de humos se reduce y la temperatura de la capa de humos aumenta. En esa línea afecta también la reducción de los flujos de entrada, pues flujos de entrada menores se producen cuando se verifica la relación anterior.

Los códigos en los que se incluyen las variables de entrada definidas para las simulaciones 10 y 11 se encuentran respectivamente en los Anexos B.10 y B.11 mientras que en el Anexo C.4 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para ambos casos, comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima.

7.2.2.4 Simulaciones 12 y 13

Otro aspecto que queremos comprobar con relación a los exutorios de entrada es la influencia que podría tener sobre los resultados que dispongamos la superficie aerodinámica de entrada dividida en dos o más paredes del compartimento definido. Por tanto, se analizarán los casos en los que se disponen dos superficies de entrada de 10.5 metros cuadrados cada una en las paredes laterales (simulación 12) y, posteriormente, analizaremos también que ocurre en el caso de que dispongamos de cuatro entradas repartidas entre los cuatro muros laterales del habitáculo de estudio (simulación 13).

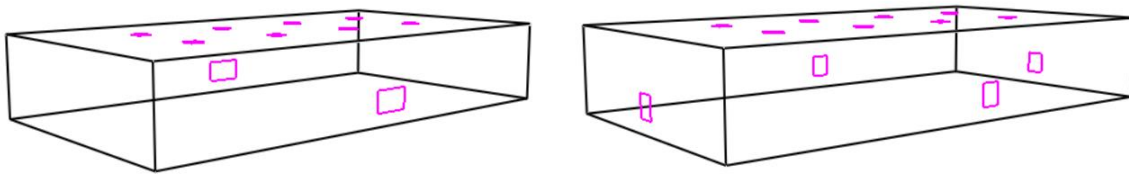


Ilustración 34: Separación de la superficie de entrada entre los distintos muros

Una vez llevadas a cabo dichas simulaciones, podemos confirmar que no se observan modificaciones en los resultados obtenidos. Por lo tanto, podemos concluir que el posicionamiento de los exutorios de entrada en distintas paredes del compartimento no tiene efecto sobre los resultados finales.

Los códigos en los que se incluyen las variables de entrada definidas para las simulaciones 12 y 13 se encuentran respectivamente en los Anexos B.12 y B.13 mientras que la evolución gráfica de variables de salida coincide íntegramente con la de las representadas para la simulación óptima.

Además, se ha comprobado también si CFAST tiene en cuenta las zonas de succión severa que puedan presentar las fachadas y donde no deberían disponerse las entradas de aire. Después de realizar este análisis, hemos comprobado que CFAST no considera dichas zonas lo que puede suponer un problema importante en el funcionamiento de los sistemas de evacuación de humos diseñados. Nos encontramos ante una debilidad de este software, que implicaría entonces la necesidad de estudios paralelos para confirmar la disposición correcta de los exutorios de entrada.

7.2.3 Tamaño del compartimento

Cuando realizamos la primera simulación, mantuvimos las medidas del compartimento que más se aproximaban a las medidas reales de la nave original que usamos como base del proyecto (en torno a 1650 metros cuadrados de planta). Sin embargo, la norma establece como área máxima de un depósito de humos 2000 m^2 . Es por ello por lo que se desea comprobar como variarán los resultados obtenidos en la simulación óptima si aumentamos la superficie del compartimento a 2000 m^2 .

7.2.3.1 Simulación 14

Con el objetivo de intentar mantener la forma del compartimento, simularemos con unas nuevas dimensiones de 59 metros de profundidad por 34 metros de anchura, manteniendo constante la altura que habíamos definido previamente de 9,5 metros. Para que el fuego y los exutorios sigan centrados, también variaremos su posición, aunque su tamaño permanecerá constante e igual al que teníamos en la situación inicial.

Al llevar a cabo esta simulación, se observan ligeros cambios respecto a la simulación óptima, que afectan especialmente a la temperatura de la capa de humos superior, que se reduce hasta los 571°K , todavía lejos de los 474°K que obtuvimos mediante la norma. Por otra parte, la altura libre de humos se reduce hasta los 6.21 metros,

mientras que se produce un ligero aumento en la masa de aire entrante al penacho que alcanza los 70 kg/s. Otras salidas que también sufren un ligero aumento son los flujos de entrada y salida de aire por el compartimento, a pesar de mantener constantes las superficies dispuestas para dicha entrada/salida.

El código en el que se incluyen las variables de entrada definidas para la simulación 14 se incluye en el Anexo B.14 mientras que en el Anexo C.5 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para esta simulación, comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima.

7.2.3.2 Simulación 15

Una vez comprobado como responde el programa ante un aumento del tamaño del compartimento, también queremos ver cómo actúa ante una disminución de este. Para ello, vamos a considerar unas dimensiones del compartimento de 50 metros de profundidad por 25 metros de anchura, siendo la altura de 9.5 metros. Nuevamente, modificaremos la posición de fuegos para mantenerlo en el centro de la nave.

En este caso, aumenta la temperatura de los humos que alcanza los 603°K al mismo tiempo que la altura libre de humos también aumenta hasta los 7.28 metros. Además, en comparación siempre con los resultados obtenidos en la simulación óptima, la masa entrante al penacho también se reduce hasta los 62 kg/s. También se reducen levemente los flujos de entrada y salida por el compartimento. En este caso, aunque normalmente un aumento de la altura libre de humos debería ir acompañada de una disminución de la temperatura de la capa de humos provocada por un aumento de la masa de aire que entra al penacho, se da el comportamiento contrario. La explicación a este fenómeno podemos encontrarla en el ligero aumento de la temperatura de la capa inferior, que conlleva un aumento de la temperatura de la masa de aire que entrar al penacho.

El código en el que se incluyen las variables de entrada definidas para la simulación 15 se incluye en el Anexo B.15 mientras que en el Anexo C.5 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para esta simulación, comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima y la simulación 14.

7.2.4 Fuego

7.2.4.1 Posición dentro del compartimento

En primer lugar, y en relación con variaciones relativas al fuego, puede ser interesante estudiar el comportamiento de CFAST cuando se varía la posición del fuego dentro del habitáculo en el que se produce el incendio. Para ello, comprobaremos la variación de resultados ante la colocación del fuego en la pared pegada a los exutorios de entrada, a la pared del fondo de la nave y finalmente a la esquina situada al fondo y a la izquierda del recinto (en la imagen 31 podemos ver las tres posiciones del fuego que se han definido). Con estos tres casos pretendemos conocer si la zona en la que se sitúa el fuego influye sobre los resultados.

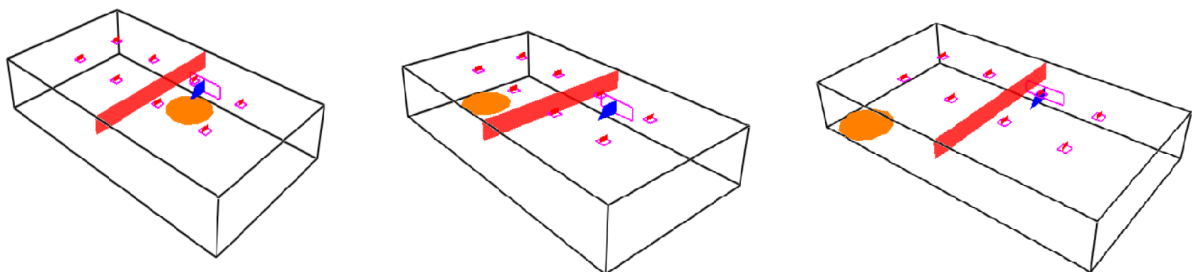


Ilustración 35: Posiciones del fuego analizadas

1. Fuego pegado a los exutorios de entrada (simulación 16)

En este caso solo se produce una variación mínima en la temperatura de ambas capas, que disminuye aproximadamente 3°K en la capa superior y apenas 1°K en la inferior. Variaciones que podemos considerar despreciables en vista de los valores que se tienen. El resto de los parámetros permanecen

constantes ante esta variación.

2. *Fuego pegado a la pared del fondo (simulación 17)*

Nuevamente, se repiten los resultados del caso anterior en el que el fuego se situaba junto a los exutorios de entrada.

3. *Fuego situado en la esquina del fondo a la izquierda (simulación 18)*

En esta última situación, varía nuevamente la temperatura de la capa superior, que vuelve a bajar otros 3°K respecto a las dos situaciones anteriores, bajada que de todos modos sigue siendo pequeña y apenas afecta a los resultados obtenidos. Sin embargo, en este caso, también baja ligeramente la altura libre de humos, que es ahora de 6.6 metros. Dicha reducción, podría estar relacionada con el pequeño aumento que también han experimentado los flujos de entrada/ salida por el compartimento.

A pesar de las variaciones mencionadas, podemos considerar que los efectos de variar la posición del fuego a lo largo de distintos puntos del compartimento definido son despreciables, por lo que se trata de una entrada que podemos considerar poco importante y que no requiere de gran exactitud cuándo simulemos con CFAST. Este hecho lo podemos constatar en el Anexo C.6, donde se representa la evolución de las variables de salida.

Los códigos en los que se incluyen las variables de entrada definidas para las simulaciones 16, 17 y 18 se encuentran respectivamente en los Anexos B.16, B.17 y B.18.

7.2.4.2 Área de incendio

Uno de los parámetros más importantes que debemos definir con relación al fuego es el área de este. Para ver cómo afecta, definiremos dos nuevas situaciones en las que, en primer lugar, aumentaremos el área de incendio un 50% (hasta 120 metros cuadrados) y, posteriormente, la reduciremos en esa misma proporción hasta los 40 metros cuadrados. El resto de los parámetros se mantienen iguales al caso de la simulación óptima, que definimos anteriormente.

7.2.4.2.1 Simulación 19

Vamos a agrupar, bajo la denominación de simulación 19, las cuatro simulaciones en las que variamos el área del incendio. El código en el que se incluyen las variables de entrada definidas para la simulación 19 se incluye en el Anexo B.19

En primer lugar, se desea estudiar el caso en el que la superficie del incendio es mayor. Para esta situación, se obtienen resultados prácticamente idénticos a los que teníamos para una situación igual, pero con un área de incendio de 81 metros cuadrados. En lo que respecta al caso contrario, en el que se reduce el área de incendio a 40 metros cuadrados, nos encontramos con la misma situación, en la que las variaciones son prácticamente despreciables.

Para que podamos obtener alguna conclusión al respecto de como se ven afectados los resultados de la simulación cuando modificamos el área de incendio, vamos a analizar situaciones más extremas en ambas direcciones. Para ello, simularemos, en primer lugar, un incendio con un área de 700 metros cuadrados, y posteriormente, haremos lo propio con un incendio de un solo metro cuadrado. En el primero de estos casos, tampoco se observan variaciones cuando se alcanza el régimen estacionario a pesar de haber propuesto una variación importante. A diferencia de lo que ocurría cuando incrementábamos considerablemente el área del incendio, cuando definimos un área mucho más reducida (como es el caso del área con un metro cuadrado que aquí se estudia), los resultados presentan variaciones importantes. En primer lugar, las temperaturas de ambas capas aumentan hasta los 632°K en el caso de la superior y hasta los 403°K en el caso de la inferior. Además, la altura libre de humos sufre un aumento importante situándose en casi 7.7 metros. Estas variaciones vienen acompañadas de una reducción de la masa entrante al penacho que se sitúa por debajo de los 55 kg/s, mientras que los flujos de entrada y salida a través del compartimento se mantienen constantes.

Además, se ha observado que si elevamos el área de incendio por encima de aproximadamente 750 metros cuadrados el compartimento se satura, obteniéndose prácticamente una única capa que correspondería a la capa de humos y que llenaría el compartimento de este. A partir de este valor, el resultado se mantiene constante para

cualquier valor de área de incendio que definamos.

Cabe destacar que en estas simulaciones también sufre cambios una salida que, hasta ahora no sufría cambios, al no modificar las entradas relativas a la definición del fuego, como es la altura de la llama. En este último caso, resulta importante destacar que dicha altura alcanza los 11.3 metros, por lo que se encuentra por encima del compartimento definido. No sabemos si CFAST tiene en cuenta este hecho y tiene influencia sobre el aumento de la altura libre de humos ya que, si nos atenemos a este resultado, el penacho de humos generado a partir de la altura de la llama se formaría fuera del recinto que estamos estudiando.

El código en el que se incluyen las variables de entrada definidas para la simulación 19 se incluye en el Anexo B.19 mientras que en el Anexo C.7 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para esta simulación, comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima.

7.2.4.3 Potencia (HRR)

Otro de los aspectos relativos al fuego que podemos variar para analizar como afecta a los resultados es la potencia del fuego que CFAST define a través del HRR o tasa de calor liberado. Para ello, siguiendo el procedimiento que venimos utilizando hasta el momento, vamos a definir valores por encima y por debajo del valor inicial que definimos de HRR (20250 kW). En ambos casos, aplicaremos la misma proporción, aumento en primer lugar un 50% el valor original (tomaremos un HRR constante e igual a 30000 kW) y, posteriormente, reduciéndolo un 50% (tomaremos un HRR de 10000 kW) para poder comparar las tres situaciones. En caso de que no encontremos variación en los resultados, optaremos por definir valores del HRR más extremos como hicimos en el caso de las áreas de fuego.

7.2.4.3.1 Simulación 20

En primer lugar, consideramos una potencia de 30000 kW. Como era de esperar, si aumentamos la potencia del incendio se obtiene una situación más crítica, en la que la temperatura dentro del compartimento va a ascender al mismo tiempo que se reduce la altura libre de humos. Dichas variaciones además vienen acompañadas de un aumento de la masa entrante al penacho que llega hasta los 77 kg/s, y de un aumento de los flujos de entrada y salida por el compartimento. Nuevamente, nos encontramos con que no se verifica la relación entre temperatura de la capa de humos, altura libre de humos y masa entrante al penacho según la cual (teniendo en cuenta la normativa), podíamos asumir que un aumento de altura libre de humos implicaba una mayor entrada de aire frío al penacho que posteriormente enfriaría la capa de humos.

El código en el que se incluyen las variables de entrada definidas para la simulación 20 se incluye en el Anexo B.20.

7.2.4.3.2 Simulación 21

En la otra dirección, cuando reducimos el HRR del fuego, nos encontramos en la situación contraria. Se reducen las temperaturas y se aumenta la altura libre de humo. La masa entrante al penacho se reduce como también lo hacen los flujos de entrada y salida.

El código en el que se incluyen las variables de entrada definidas para la simulación 21 se incluye en el Anexo B.21.

En el caso del HRR se observa además una variación, más o menos, proporcional entre las entradas y salidas, fenómeno que hasta el momento no podía verse con claridad en ninguna de las simulaciones anteriores.

7.2.4.3.3 Simulación 22

Hasta ahora, estamos simulando fuegos constantes, es decir fuegos que siempre liberan la misma potencia. Sin embargo, en la realidad, los fuegos tienden a evolucionar de forma cuadrática hasta que alcanzan un valor máximo de HRR. Queremos comprobar también como afecta que definamos un fuego de una forma más próxima a la realidad o si realmente nos vale con definir fuegos constantes con valor de HRR el de la potencia máxima liberada por el mismo. Llevada a cabo la simulación, vemos que los resultados que se alcanzan en el

régimen estacionario son prácticamente iguales que los resultados obtenidos para el fuego constante y con HRR 20250 kW que definimos desde el principio. Este hecho, nos hace preguntarnos si realmente es necesario concretar demasiado a la hora de definir un fuego o podemos optar por simplificarlo al máximo como en el caso original. Si nos ceñimos a esta última simulación, parece evidente que no es necesario perder tiempo en generar un fuego, sino que admite una importante simplificación. Sin embargo, si puede resultar interesante obtener la evolución del resultado desde el inicio del incendio en casos en que el motivo de estudio no se limite únicamente a lo que ocurre cuando se alcanza el régimen estacionario, por ejemplo, en casos en los que interese conocer los momentos iniciales en los que se produce la evacuación de los ocupantes.

El código en el que se incluyen las variables de entrada definidas para la simulación 22 se incluye en el Anexo B.22.

En el Anexo C.8 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para las simulaciones en las que se varía la potencia de incendio (simulaciones 20, 21 y 22), comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima.

7.2.4.4 Calor de combustión

Otra de las características del fuego que debemos definir es el calor de combustión. Hemos tomado como punto de partida para este valor 20000 kJ/kg, valor utilizado en todas las simulaciones realizadas. En este caso, queremos ver como afecta a las distintas soluciones que modifiquemos este valor. Para ello, tomaremos un valor más grande (40000 kJ/kg) y otro más pequeño (10000 kJ/kg).

7.2.4.4.1 Simulación 23

En primer lugar, simulamos con el mayor de los valores del calor de combustión mencionado anteriormente (40000 kJ/kg) y se obtienen algunas variaciones. Para empezar, observamos que cuando cambia el calor de combustión varía la tasa de pirólisis, que se reduce a la mitad por haber aumentado al doble el valor del calor de combustión. En cambio, el resto de los parámetros de salida apenas varían, produciéndose ligeros aumentos de la altura libre de humos y la temperatura de la capa superior.

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.23.

7.2.4.4.2 Simulación 24

Por el contrario, si reducimos a la mitad el calor de combustión, empleando el valor de calor de combustión de 20000 kJ/kg, la tasa de pirólisis aumenta hasta el doble de su valor original. Además, aunque siguen siendo variaciones pequeñas, dichas variaciones van en el sentido contrario del caso anterior, es decir, se reduce tanto la temperatura de la capa de humos como la altura libre de humos.

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.24.

En el Anexo C.9 se representan conjuntamente los resultados obtenidos para las simulaciones en las que se varía el calor de combustión (simulaciones 23 y 24), comparándolos, también, con los resultados de la simulación óptima. En dichas gráficas, podemos ver como las variaciones que se producen sobre las variables de salida son pequeñas.

7.2.5 Inclusión de los materiales de construcción a la simulación

Llegados a este punto, vamos a comenzar a incluir nuevos parámetros de entrada que nos permitan llevar a cabo una simulación más completa y próxima a la realidad y que, además, pueden tener un impacto sobre los resultados de salida que obtenemos cuando se completa la simulación. En este caso, queremos analizar dos situaciones extremas, haciendo uso de los materiales y propiedades térmicas que incluye el propio CFAST.

Para llevar a cabo este estudio, iremos añadiendo materiales a las distintas superficies limitadoras del compartimento de forma paulatina, es decir, en primer lugar, veremos cómo afecta que definamos un material de construcción a las paredes, después al techo y, finalmente, al suelo. Una vez tengamos los resultados de las simulaciones con la definición de los materiales en cada superficie de forma independiente simularemos con materiales definidos en techo y pared de forma conjunta y para terminar lo haremos con la inclusión del material correspondiente en las tres superficies que limitan: paredes, suelo y techo. Los dos materiales de los que queremos ver su comportamiento van a ser el acero y el hormigón (presentando comportamientos ante el fuego opuestos: el hormigón debería aportar mejores resultados que el acero).

7.2.5.1 Acero

7.2.5.1.1 Simulación 25

En una primera simulación, en la que mantendremos constantes todas las entradas definidas en la simulación inicial, vamos a incluir paredes de acero para comprobar si los resultados se ven o no afectados. Los resultados obtenidos cuando se decide considerar que las paredes son de acero cambian considerablemente, quedando de la siguiente manera:

Tª capa de humos (K)	493
Altura libre de humos (m)	2.26
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	83.2
Presión (Pa)	-18.3
Tª capa inferior (°K)	336
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	77.8
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	78.8

Tabla 12: Resultados obtenidos al incluir paredes de acero (simulación 25)

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.25.

7.2.5.1.2 Simulación 26

En el siguiente caso, queremos ver cuáles son los resultados si en lugar de colocar paredes de acero hacemos lo propio con los techos, manteniendo sin definir ni pared ni suelo. Así podremos analizar cómo afecta definir materiales de forma independiente sobre cada una de las superficies de forma independiente y de forma conjunta.

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.26.

Tª capa de humos (K)	429
Altura libre de humos (m)	1.89
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	79
Presión (Pa)	-16.8
Tª capa inferior (°K)	335
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	72.5
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	73.5

Tabla 13: Resultados obtenidos al incluir techos de acero (simulación 26)

7.2.5.1.3 Simulación 27

En la siguiente simulación analizamos como serán los resultados si añadimos acero únicamente al suelo del compartimento. Resulta evidente que definir un suelo de acero no es una solución constructiva muy real, pero nos puede dar una referencia de la influencia de definir esta superficie con un material como el acero. Los resultados obtenidos cuando consideramos suelo de acero manteniendo sin definir el resto de las superficies del compartimento son los siguientes:

Tª capa de humos (K)	493
Altura libre de humos (m)	2.26
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	83.2
Presión (Pa)	-18.2
Tª capa inferior (°K)	334
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	77.7
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	78.7

Tabla 14: Resultados obtenidos al definir suelo de acero (simulación 27)

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.27.

7.2.5.1.4 Simulación 28

A continuación, para seguir viendo como varían los resultados con la definición de los materiales de construcción, en la siguiente simulación vamos a tomar el compartimento con paredes y techos de acero, mientras que el suelo no tendrá asociado ningún material constructivo.

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.28.

Tª capa de humos (K)	407
Altura libre de humos (m)	1.66
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	76.5
Presión (Pa)	-15.5
Tª capa inferior (°K)	326
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	69.5
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	70.5

Tabla 15: Resultados obtenidos al incluir paredes y techos de acero (simulación 28)

7.2.5.1.5 Simulación 29

Una vez hemos obtenido los resultados relativos a añadir materiales de construcción de manera independiente según los límites que presenta el espacio de estudio, queremos obtener los resultados de definir acero en todas y cada una de las superficies limítrofes de dicho espacio. En dicho caso, los resultados que se obtienen son los que se muestran en la tabla 16.

Tª capa de humos (K)	395
Altura libre de humos (m)	1.5
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	75
Presión (Pa)	-14.7
Tª capa inferior (°K)	320
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	67.5
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	67.5

Tabla 16: Resultados obtenidos al definir todas las superficies del compartimento de acero (simulación 29)

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.29.

7.2.5.2 Hormigón

Una vez que hemos comprobado cómo responde el programa cuando definimos un material conductor para suelos, techos y paredes, queremos ver como varían las salidas si definimos un material que tenga un comportamiento relativamente bueno ante el fuego como es el hormigón.

7.2.5.2.1 Simulación 30

Como en el caso anterior, vamos a empezar añadiendo hormigón a las paredes para ver los resultados que obtenemos y poder compararlo con la simulación inicial y la simulación anterior en la que decidimos definir acero como material constructivo. En esta primera opción, obtenemos los siguientes resultados:

T^a capa de humos (K)	540
Altura libre de humos (m)	5
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	71.5
Presión (Pa)	-16.2
T^a capa inferior (°C)	83
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	72.2
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	73.2

Tabla 17: Resultados obtenidos al incluir paredes de hormigón (simulación 30)

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.30.

7.2.5.2.2 Simulación 31

Como hicimos en el caso anterior, vamos a incluir ahora techo de hormigón para ver los resultados que se obtienen y poder realizar una comparativa de situaciones similares. En esta situación se obtienen los siguientes resultados:

T^a capa de humos (K)	502
Altura libre de humos (m)	2.28
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	83.5
Presión (Pa)	-20.5
T^a capa inferior (°K)	369
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	78.2
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	79.2

Tabla 18: Resultados obtenidos al definir techos de hormigón (simulación 31)

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.31.

7.2.5.2.3 Simulación 32

Para acabar con los análisis por superficie, realizados de manera individualizada, vamos a simular definiendo únicamente suelos de hormigón para obtener los resultados correspondientes.

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.32.

Tª capa de humos (K)	523
Altura libre de humos (m)	3.4
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	77.8
Presión (Pa)	-17.8
Tª capa inferior (°K)	353
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	77.6
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	78.6

Tabla 19: Resultados obtenidos al definir suelos de hormigón (simulación 32)

7.2.5.2.4 Simulación 33

Para seguir la línea marcada en el caso anterior con el acero, queremos obtener los resultados de definir hormigón en paredes y techos. Dichos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tª capa de humos (K)	483
Altura libre de humos (m)	2.2
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	82.5
Presión (Pa)	-19.6
Tª capa inferior (°K)	360
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	77
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	78

Tabla 20: Resultados obtenidos al definir paredes y techos de hormigón (simulación 33)

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.33

7.2.5.2.5 Simulación 34

Y, por último, falta por incluir también los suelos de hormigón para completar este caso. Una vez incluyamos los resultados relativos a este último caso, trataremos de estudiar que puede haber sucedido al incluir materiales de construcción y ver si el programa responde bien o no a la inclusión de estos.

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en los que respecta a las variables de entrada definidas para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.34.

Tª capa de humos (°K)	464
Altura libre de humos (m)	2.1
Flujo de humo entrante en el penacho (kg/s)	81.3
Presión (Pa)	-19.4
Tª capa inferior (°K)	364
Flujo a través de exutorios de entrada (kg/s)	75.6
Flujo a través de exutorios de salida (kg/s)	76.6

Tabla 21: Resultados obtenidos al definir todas las superficies del compartimento de hormigón (simulación 34)

Para poder tener una visión más rápida de los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores, vamos a incluir a continuación una tabla, a modo resumen, en la que se incluyen dichos resultados y, posteriormente, sacaremos las conclusiones pertinentes.

MATERIAL \ SALIDAS		Tª capa humos (°K)	Altura libre (m)	Entrada al penacho (kg/s)	Presión (Pa)	Flujo de entrada (kg/s)
		Sin definir		583	6.85	67
Acero	Simulación 25	493	2.26	83.2	-18.3	77.8
	Simulación 26	429	1.89	79	-16.8	72.5
	Simulación 27	493	2.26	83.2	-18.2	77.7
	Simulación 28	407	1.66	76.5	-15.5	69.5
	Simulación 29	395	1.5	75	-14.7	67.5
Hormigón	Simulación 30	540	5	71.5	-16.2	72.2
	Simulación 31	502	2.28	83.5	-20.5	78.2
	Simulación 32	523	3.4	77.8	-17.8	77.6
	Simulación 33	483	2.2	82.5	-19.6	77
	Simulación 34	464	2.1	81.3	-19.4	75.6

Tabla 22: Resumen de los resultados obtenidos según los materiales incluidos

A la vista de los resultados anteriores, y atendiendo, principalmente, a los resultados obtenidos para la temperatura de la capa de humos, podemos sacar una primera conclusión bastante evidente. Los materiales de construcción que definen los límites del compartimento absorben calor. En todos los casos anteriores se han obtenido valores inferiores de este parámetro respecto al valor calculado en la simulación inicial, siendo la temperatura de la capa superior en alguno de los casos de casi 200°K menos que en el caso de referencia.

Además, también resulta evidente que cuantas más superficies se definen, mayor es la reducción de temperatura que se produce.

Por otra parte, la reducción de temperatura de la capa de humos de la que hablábamos anteriormente tiene un efecto directo sobre la altura libre de humos, que se desploma hasta valores más pequeños y que no cumplen con las expectativas que teníamos originalmente.

La falta de información relativa a las bases que emplea UNE para elaborar la norma a partir de la cual podemos diseñar el sistema de evacuación de humos de cada recinto nos hace preguntar si la norma usa procedimientos paralelos en los cálculos de altura libre de humos y temperatura de la capa de humos, considerando la existencia de un material de construcción con unas determinadas propiedades en los procesos de cálculo que establece o si no es el caso. Sin embargo, resulta difícil determinar dicha hipótesis a la vista de los resultados obtenidos por CFAST.

En el Anexo C.10 se muestran gráficamente los resultados correspondientes a las simulaciones en las que se considera que el compartimento está limitado por acero u hormigón.

7.2.5.2.6 Simulaciones 35-39

Otro de los aspectos relativos a la inclusión de los materiales de construcción que conforman las superficies que envuelve el espacio de estudio es como influye cada una de las características del material que definimos. Como se explicó anteriormente en el presente documento, CFAST propone, por defecto, unos materiales de construcción determinados, cada uno de los cuales con sus propiedades ya definidas. Anteriormente, hemos estudiado como afecta a la simulación el hecho de cambiar por completo un material, pero, a continuación, queremos estudiar cómo afecta la variación individual de las propiedades que definen estos materiales de construcción. Para ello, vamos a partir de uno de los aceros propuestos y realizaremos simulaciones continuas en las que únicamente cambiarán estos parámetros que definen el material. Además, se optará por simular únicamente casos en los que se definen conjuntamente techos, paredes y suelos.

El material del que partiremos será uno de los aceros incluidos en CFAST. En la tabla siguiente se recogen las propiedades del material definido para cada una de las simulaciones realizadas.

Simulación	Conductividad térmica [kW/(m · °C)]	Calor específico [kJ/(kg · °C)]	Densidad [kg/m ³]	Espesor [m]	Emisividad
29	0.048	0.559	7854	0.003	0.9
35	0.072	0.559	7854	0.003	0.9
36	0.048	0.84	7854	0.003	0.9
37	0.048	0.559	11781	0.003	0.9
38	0.048	0.559	7854	0.006	0.9
39	0.048	0.559	7854	0.003	1.35

Tabla 23: Valor de los parámetros del material de construcción en los distintos casos

Los códigos en los que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en lo que respecta a las variables de entrada definidas para estas simulaciones se pueden consultar en los Anexos B.35-39.

Al igual que hicimos anteriormente, se incluye, a continuación, una tabla resumen con los resultados que se han obtenido en las diferentes simulaciones realizadas.

SALIDAS SIMULACIÓN	Tª capa humos (°K)	Altura libre (m)	Entrada al penacho (kg/s)	Presión (Pa)	Flujo de entrada (kg/s)
29	375	1.5	75	-14.7	67.5
35	383	1.47	74.3	-14.6	67
36	380	1.42	73.4	-14.2	66
37	380	1.42	73.4	-14.2	66
38	376	1.40	72.3	-13.6	65
39	380	1.42	73.7	-14.4	66.3

Tabla 24: Resultados obtenidos ante modificaciones en los parámetros de los materiales de construcción

Si tenemos en cuenta la tabla anterior podemos afirmar que, una vez conocemos el material de construcción empleado para definir el espacio de estudio, no es necesario precisar con demasiada exactitud los valores de los parámetros que definen dicho material. Se ha comprobado como variaciones individuales del orden del 50% del valor original (el facilitado por CFAST en sus materiales por defecto), no tienen apenas influencia sobre los resultados obtenidos si se mantienen los valores originales que definen el material, en este caso el acero. Además, al hacer comprobaciones, no incluidas en este trabajo, en las que las variaciones de estos parámetros son mucho más significativas (del orden del 200%), tampoco se observan variaciones reseñables. Por lo tanto, es la superposición de variaciones en los distintos parámetros la que hace que se produzcan cambios importantes en los resultados que se obtienen, como ocurre cuando cambiamos de un material a otro.

7.2.6 Composición química del combustible

Uno de los aspectos que se ha mantenido al margen hasta el momento es el de la composición química del combustible que se está quemando y que nos permitirá definir la composición del humo producido como resultado del incendio. Hasta ahora, se había mantenido que el combustible lo formaba únicamente una molécula de carbono, requisito impuesto por CFAST, ya que al menos hay que definir una molécula de este elemento para llevar a cabo la simulación, mientras que el resto de los elementos pueden mantenerse a cero. Será interesante comprobar si el hecho de definir distintas composiciones moleculares del combustible afecta también a los resultados que hemos tratado hasta el momento o si su efecto se limitará únicamente a resultados relativos a la composición del humo final.

Según distintas informaciones recogidas, la madera se compone fundamentalmente de carbono (50%) y oxígeno (42%), además de hidrógeno (6%) y nitrógeno (2%). Esta composición nos va a permitir establecer una primera definición de la estructura molecular del combustible que será con la que empezaremos este estudio. A partir de esos datos y con el objetivo de tener una primera aproximación a cómo afecta el hecho de definir la composición del combustible a la simulación, vamos a establecer un combustible con 5 átomos de carbono, 4 de oxígeno y uno de hidrógeno para llevar a cabo la primera simulación. A partir de ahí, empezaremos a realizar diversas variaciones en dicha composición para ver como afectan los cambios a los resultados.

Cuando llevamos a cabo la simulación con la composición definida anteriormente, no se observan modificaciones en los resultados que, hasta ahora, se han venido analizando. Sin embargo, si empezamos a observar ligeras variaciones en cuanto a la composición del humo que se obtiene. Si comparamos la simulación óptima y esta última (simulación 40), se pueden ver dichas variaciones en la tabla

Composición química del humo (fracción molecular)						
Simulación	N_2	O_2	CO_2	CO	HCN	HCL
óptima	78.6	16.4	4.2	0	0	0
Simulación	N_2	O_2	CO_2	CO	HCN	HCL
40	77.9	19.5	1.6	0	0	0

Tabla 25: Análisis de los resultados relativos a composición química (I)

Una vez se ha simulado la situación más realista en lo que a composición del combustible se refiere, vamos a llevar a cabo otras situaciones más extremas para comprobar si cambios fuertes en las entradas si provocan cambios más sensibles en los resultados.

Se definirán los siguientes casos para llevar a cabo el análisis:

- Simulación 41: En este caso simplemente añadiremos también una molécula de nitrógeno y otra de cloro. Al introducir nuevos elementos, también empieza a haber HCN y HCL en los gases, aunque en este caso en pequeñas cantidades. En cuanto a los resultados habituales que ofrece CFAST, siguen manteniéndose invariables.
- Simulación 42: En el este caso analizaremos si al doblar el número de moléculas, respecto a la simulación anterior, se altera la composición del humo o si se mantiene constante. Además, podremos ver si se producen variaciones en los resultados principales. En primer lugar, no se observan cambios en dichos resultados. Por otra parte, resulta característico que la cantidad de HCN y de HCL vuelvan a cero.
- Simulación 43: Ahora cambiaremos los papeles y dispondremos de 8 moléculas de hidrógeno, nitrógeno y cloro, mientras que reduciremos a 2 los de carbono y y oxígeno. En este caso si se produce una reducción (aunque prácticamente despreciable) de la altura libre de humos y de la temperatura de la capa de humos. Por otra parte, vemos como la reducción de carbono hace que desaparezca CO_2 y CO de los gases. Además, se mantienen aproximadamente los valores de nitrógeno y oxígeno.

En la tabla 27 se recogen los resultados obtenidos al simular los casos anteriores, centrándonos únicamente en la composición de los gases, que son las salidas que se ven afectadas ante cambios en las entradas modificadas.

Composición química del humo (fracción molecular)						
Simulación	N_2	O_2	CO_2	CO	HCN	HCL
Óptima	78.6	16.4	4.2	0	0	0
40	77.9	19.5	1.6	0	0	0
41	77.8	20.2	0.8	0	0.27	0.27
42	78.6	16.9	3.68	0	0	0
43	77.1	21	0	0	0.75	0.75

Tabla 26: Análisis de los resultados relativos a composición química (II)

Los códigos en los que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en lo que respecta a las variables de entrada definidas para estas simulaciones se pueden consultar en los Anexos B.40-43.

7.2.7 Producción de CO

A parte de establecer la composición del combustible, CFAST nos permite la opción de definir la cantidad de monóxido de carbono por kilogramo de combustible. Dicho valor, predomina sobre la composición definida para las moléculas del combustible y afectará al resto de los componentes del humo. Sin embargo, y tras llevar a cabo una simulación con un porcentaje de CO definido del 10% se observa que los únicos resultados afectados son los correspondientes a la composición del humo.

Composición química del humo (fracción molecular)						
Simulación	N_2	O_2	CO_2	CO	HCN	HCL
Óptima	78.6	16.4	4.2	0	0	0
44	78.5	16.9	3.5	0.16	0	0

Tabla 27: Comparación de resultados al definir porcentaje de CO

En la simulación 44 se representa la situación en la que se define la cantidad de CO contenida en el combustible. Como podemos ver en la tabla 28, las variaciones son muy pequeñas, destacando la aparición ahora sí de monóxido de carbono en el humo resultante. Si echamos un vistazo a la tabla 26, podemos comprobar que en todos los casos estudiados anteriormente se mantenía a cero la composición del CO, a pesar de haber definido moléculas de carbono y oxígeno en el combustible.

El código en el que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima para esta simulación se puede consultar en el Anexo B.44.

7.2.8 Producción de carbonilla (soot)

Además del monóxido de carbono, también podemos definir la cantidad de carbonilla contenida en el combustible y que permitirá la entrada en juego de una nueva salida de las que dispone CFAST: la densidad óptica. La cantidad de hollín en el combustible influye directamente en la densidad del humo, pues a mayor hollín mayor oscuridad del humo y viceversa.

Llevaremos a cabo varias simulaciones que compararemos con la anteriormente denominada simulación óptima, en la que solo definimos un átomo de carbono. Podemos considerar en torno a 15 gramos de carbonilla por cada kilo de combustible (simulación 45). Será ese el valor que definamos para llevar a cabo la primera simulación. Posteriormente, utilizando como base ese valor de 15 gramos, simularemos con el doble (simulación 46) y con la mitad de hollín (simulación 47) para analizar que ocurre con los resultados.

Realizada la primera simulación, resulta llamativo que la inclusión de carbonilla sí que afecte a parámetros como la altura libre de humos y la temperatura de la capa de humos, que aumentan ligeramente. Ocurre lo mismo y en mayor medida cuando se aumenta la cantidad de carbonilla. Es decir, a más cantidad de carbón en el combustible, mayor altura libre de humos y mayor temperatura de la capa de humos. Cuando simulamos con la menor cantidad de carbonilla, de las tres que hemos simulado, también se aprecia esa ligera subida de la altura libre de humos y de temperatura de la capa superior.

Queremos analizar una situación más extrema, en la que la cantidad de carbonilla sea más importante que las analizadas hasta ahora. Para ello, vamos a considerar que hay 100 gramos de carbonilla por kilo de combustible (lo consideraremos como simulación 48). A pesar del aumento considerable, los resultados se mantienen prácticamente constantes respecto al caso anterior mientras que las variaciones en cuanto a la composición química tampoco son considerables.

Composición química del humo (fracción molecular)							
Simulación	Valor	N_2	O_2	CO_2	CO	HCN	HCL
Óptima	0	78.6	16.4	4.2	0	0	0
45	0.015	78.6	16.9	3.7	0.003	0	0
46	0.030	78.5	16.9	3.7	0.003	0	0
47	0.0075	78.6	16.9	3.7	0.002	0	0
48	0.1	78.3	17	3.4	0.003	0	0

Tabla 28: Resultados relacionados con la composición química en función del hollín

También se extraen de los resultados conclusiones relativas a la densidad óptica. Dicho valor aumenta a medida que aumentamos la cantidad de carbonilla, como era de esperar. Así, cuanto mayor sea este valor más denso será el humo y, por tanto, menos será la visibilidad a través de este. Sin embargo, en estos casos en los que la altura libre de humos es del orden de 7 metros, no va a tener efectos negativos sobre las posibles personas que se encontrarán en el edificio ya que CFAST distingue entre densidad óptica en la capa superior y en la capa inferior.

Los códigos en los que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en lo que respecta a las variables de entrada definidas para estas simulaciones se pueden consultar en los Anexos B.45-48.

7.2.8.1 Fracción de radiación

Se trata de la última de las entradas que vamos a analizar. En la guía del usuario se recomienda mantener para dicha entrada el valor que aparece por defecto, es decir, 0.35. Sin embargo, queremos estudiar como puede afectar que realicemos variaciones, tanto pequeñas como grandes, a este parámetro. El resto de las entradas se mantienen constantes e iguales a la simulación óptima. Será con esa simulación, con la que realizaremos la comparación de resultados.

En la primera simulación (simulación 49), vamos a reducir este parámetro a 0.3 para ver la influencia sobre los resultados. Posteriormente, se procederá con la simulación 50, en el que se ha optado por definir la fracción de radiación en 0.4. Para terminar, se analizarán dos casos más extremos, tomando como valor superior 0.5 (simulación 51) y como valor inferior 0.2 (simulación 52). En la tabla 30 se muestran los resultados obtenidos para estos casos.

Simulación	SALIDAS		T ^a capa humos (°K)	Altura libre (m)	Entrada al penacho (kg/s)	Presión (Pa)	Flujo de entrada (kg/s)
	Valor						
Óptima	0.35		583	6.8	67	-16.8	68.7
49	0.3		569	5.8	71.1	-16.7	70.6
50	0.4		600	7.4	61.4	-18.2	68
51	0.5		639	7.8	48.4	-19.9	68.8
52	0.2		539	3	82	-17.7	78.6

Tabla 29: Resultados obtenidos ante variaciones de factor de radiación

En este caso, a diferencia de en otros anteriores, se observa siempre la misma tendencia en los resultados, según se trate de un aumento o una disminución de la entrada. Así, si aumentamos su valor aumentan tanto la temperatura de la capa de humos como la altura libre de humos, además de la presión. Por otra parte, en ambos casos disminuye la entrada de aire al penacho. El caso completamente opuesto es el que nos encontramos cuando en lugar de aumentar esta entrada la reducimos.

Se trata de un parámetro que puede pasar desapercibido y que debemos tener muy en cuenta, ya que hemos visto que incluso variaciones pequeñas en este pueden ocasionar cambios relevantes, principalmente en cuanto a la altura libre de humos.

Los códigos en los que se incluyen las variaciones propuestas a la simulación óptima en lo que respecta a las variables de entrada definidas para estas simulaciones se pueden consultar en los Anexos B.49-52.

En el Anexo C.11 se muestran gráficamente los resultados correspondientes a las simulaciones en las que se consideran distintos valores del factor de radiación.

8 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL USO DE CFAST

Después de haber estado trabajando sobre CFAST durante los últimos meses, resulta interesante compartir algunas conclusiones que se han podido extraer del programa de cálculo. Es cierto que CFAST presenta una interfaz sencilla y bastante intuitiva para empezar a trabajar con el programa. Por otra parte, también es cierto que en este trabajo hay alguna funcionalidad disponible en CFAST que debido a distintos motivos no se han utilizado, como, por ejemplo, la posibilidad de disponer de rociadores (no se han colocado rociadores por no disponer de ellos la nave en estudio).

Una de las principales diferencias que se pueden destacar entre CFAST y la norma UNE 23585 es la seguridad que nos dan uno y otro método ante las soluciones obtenidas. Por un lado, la norma UNE 23585, elaborada por el Comité Técnico CTN 23 *Seguridad contra incendios* y respaldada por AENOR, surge a partir del Informe Técnico CEN/CR 12101-5 “*Requisitos funcionales y métodos de cálculo para sistemas de extracción de humos y calor*”, resultado del difícil consenso entre pioneros en el diseño de los sistemas de evacuación de humos. A pesar de la difícil aceptación que tuvieron en un primer momento los acuerdos técnicos alcanzados dentro del CEN/TC 191, sus principios fueron adoptados por todos los países. Como ya hemos dicho antes, la norma UNE 23585 nace como una mejora del documento CEN mencionado, mejora llevada a cabo en sintonía con otros países europeos y que corrige algunos errores y aclara distintas dudas que surgieron con el tiempo. Por tanto, se trata de una norma consolidada en el diseño de sistemas de evacuación de humos, que se ha utilizado durante muchos años y que se ha evolucionado con el paso del tiempo hasta alcanzar su forma actual. Con todo ello, solo queremos dejar claro que se trata de una norma contrastada a nivel internacional con una base sólida que otorga una seguridad importante a la hora de diseñar e instalar un sistema de evacuación de humos en un establecimiento.

Por otro lado, como se ha explicado en este documento anteriormente, CFAST fue lanzado por el NIST durante los años 90, siendo el primer acercamiento a los modelos de simulación computacional. A pesar de existir desde hace más de 20 años, es en los últimos tiempos en los que empieza a observarse un mayor uso de estos, presentándose como una alternativa real a la norma UNE 23585 en el diseño de sistemas de evacuación de humos. Se trata de modelos que, a día de hoy, siguen siendo renovados y actualizados con frecuencia y que requieren de un grado importante de conocimiento, tanto en materia de protección contra incendios como en el propio uso del software. Además, CFAST deja a la interpretación del usuario dar veracidad o no a la solución obtenida, algo que también nos puede llevar a confusión. A diferencia de la norma UNE 23585, resuelve el modelo a partir de ecuaciones diferenciales, lo que complica la resolución del problema (de ahí que se necesita un ordenador para resolver estos modelos) y genera cierto desconocimiento del proceso seguido por CFAST para alcanzar las soluciones. Por ejemplo, desconocemos el valor que le dan a ciertas constantes incluidas en la resolución del problema.

Para acabar con esta idea, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos, podemos afirmar que el grado de incertidumbre que aporta CFAST a los resultados es mucho mayor que el que tenemos al usar la norma UNE 23585.

Otro de los aspectos sobre los que podemos sacar conclusiones, está relacionado con la idea que vienen defendiendo los usuarios de CFAST, según los cuales, los resultados que se obtienen con la norma conllevan el sobredimensionado de los sistemas de evacuación de humos, lo que implica un mayor coste de implantación de estos. A la vista de los resultados, y utilizando como referencia la simulación realizada con CFAST que definimos como óptima en el punto 7 de este documento, si tenemos en cuenta el resultado de la altura libre de humos que se obtiene para la superficie aerodinámica de salida obtenida cuando realizamos el diseño con UNE 23585, es verdad que se obtiene un valor de dicha altura bastante más holgado utilizando CFAST que con la norma. En el caso de CFAST, que dicha altura aumente, implica también que podamos reducir la superficie de

salida y, por tanto, ahorrar en costes. En este sentido, sí podemos confirmar la hipótesis de que CFAST optimiza los resultados que se obtienen en comparación con la norma UNE 23585, para geometrías similares. También es cierto, que ese aumento de la altura libre de humos conlleva un aumento de la temperatura de la capa de humos. Sin embargo, cabe recordar que la norma UNE 23585 facilita dos valores de calor liberado (bajo y alto), el primero de ellos destinado a realizar el cálculo para llevar a cabo el diseño de los sistemas de evacuación de humos, mientras que el segundo permite determinar el valor más peligroso que podría alcanzar la temperatura de la capa de humos (de cara a tenerlo en cuenta para disponer de las protecciones térmicas necesarias en la estructura). El valor que se obtiene con CFAST para la temperatura de la capa de humos es superior al que se obtiene mediante la norma UNE 23585 cuando consideramos el valor inferior del calor liberado, pero se encuentra dentro del rango formado por dicho valor y el valor obtenido para el valor superior. De este modo, podríamos concluir que según los resultados obtenidos por CFAST, el valor de la temperatura de la capa de humos puede considerarse realista y que, además, el sistema de evacuación de humos que diseñamos mediante la norma UNE 23585 estaría sobredimensionado. Para dimensionar en CFAST, hemos utilizado también el valor inferior de los dos posibles valores, ya que lo que estamos haciendo es dimensionar el sistema. Es obvio que, si aumentamos el valor de HRR en la simulación, la temperatura de la capa de humos va a aumentar considerablemente, como hemos comprobado en las simulaciones realizadas. Sin embargo, lo que se refleja en estas líneas es que al diseñar mediante CFAST, la temperatura de la capa de humos que se obtiene se encuentra dentro del margen de temperaturas obtenidas mediante UNE 23585. No nos interesa en este caso, entrar a comparar los valores más altos de la capa de humos si no ver que la temperatura de la capa de humos que se obtiene mediante CFAST se encuentra dentro de un rango de valores admisibles en comparación con los valores que obtuvimos con la norma UNE 23585.

Otro aspecto que debemos tener en cuenta cuando comenzamos a trabajar con CFAST haciendo uso de la documentación propuesta, es la falta de información que podemos encontrar en algunas situaciones. Es el caso de la Guía del Usuario, donde a pesar de definir todos los parámetros involucrados en la simulación, no profundiza sobre ellos ni establece limitaciones en muchos de los casos. En gran medida, hemos visto como CFAST va a hacer que tengamos que llevar a cabo simulaciones a modo ensayo-error, que, acompañadas de los conocimientos en la materia, permitirá “intuir” la valía o no de los resultados. Además, que no se tengan en cuenta los fenómenos de succión a la hora de localizar las entradas de aire también puede generar cierta desconfianza cuando usamos CFAST. Estos hechos, pueden favorecer que diseños que creíamos bien realizados, sean defectuosos cuando se implanten en la realidad.

Por otra parte, también podríamos hablar del caso contrario, CFAST permite definir de forma detallada muchas de las entradas de las que dispone. Sin embargo, a la hora de analizar los resultados, hemos visto como hay cosas en los que no vale la pena profundizar tanto, pues aspectos como la posición de los exutorio de entrada y salida o la posición del incendio dentro del compartimento, no tienen influencia sobre los resultados que obtenemos. En este sentido, podemos considerar que se trata de una similitud con la norma UNE 23585, pues en ese caso tampoco se especifica donde colocar los exutorios (queda a cargo del diseñador) ni se tiene en cuenta la posición del incendio para llevar a cabo el diseño del sistema de evacuación de humos.

Otro de los aspectos que dificulta el aprendizaje de CFAST es la falta de situaciones resueltas a modo de ejemplo, que permitan comparar y analizar los resultados que nos da el programa con los obtenidos y que nos hubiese permitido conocer mejor desde el inicio los parámetros que pueden resultar más influyentes cuando llevamos a cabo las simulaciones con CFAST.

Finalmente, llegados a este punto, podemos considerar a CFAST como una herramienta útil de cara a comparar los resultados que se obtienen realizando el diseño mediante norma UNE 23585, pero que podría llevarnos a errores si no tenemos una solución con la que comparar. El paso del tiempo y la mejora continua de CFAST traerán consigo un mayor uso de este que haga que, quizás, dentro de unos años se convierta en la vía más

eficiente para llevar a cabo los diseños de sistemas de evacuación de humos. Por el momento, se considera que la norma UNE 23585 sigue siendo la mejor forma de realizar estos diseños.

Además, aunque con CFAST se han comprobado situaciones de incendios pasados, nunca se ha visto como reacciona un sistema de evacuación de humos diseñado, únicamente, con CFAST ante un incendio y, por tanto, no tenemos conciencia real sobre el correcto funcionamiento de estos. Cuando llegue ese momento, en el que un sistema de evacuación de humos diseñado íntegramente por CFAST hace frente a un incendio real, podremos sacar conclusiones más certeras a cerca del correcto funcionamiento de CFAST. Con ello, solo queremos decir que no es lo mismo comprobar el buen diseño de un sistema a partir de una situación ya ocurrida, que diseñar un sistema, implantarlo y, una vez ha sido implantado, comprobar que hace frente correctamente a un incendio real.

ANEXO A: GUÍA CFAST [4]

El presente anexo tiene como función servir de guía a los lectores del presente trabajo que quieren iniciarse en el diseño de sistemas de evacuación de humos haciendo uso de CFAST. Para su elaboración, se ha usado directamente la guía del usuario de CFAST que se encuentra disponible para todos aquellos que lo deseen en la página oficial del NIST y que puede ser descargada sin coste alguno. Para facilitar su comprensión, se ha decidido incluir este epígrafe, completamente en castellano, en el que se desarrollarán los aspectos más destacados de este software de cálculo y que serán necesarios para poder realizar correctamente las simulaciones que creamos necesarias.

Toda la información contenida en este apartado del proyecto se refiere únicamente a información teórica extraída directamente de la guía del usuario CFAST, pero en ningún caso está basada en simulaciones prácticas.

A.1 Ecuaciones de cálculo y suposiciones

Las ecuaciones que rigen los cálculos realizados por CFAST son las ecuaciones de conservación de la masa y de la energía aplicadas a las capas inferior y superior dentro de cada compartimento. Además, se debe tener en cuenta que el momento de inercia dentro de cualquiera de las zonas se considera nulo, mientras que entre las distintas zonas de compartimentos adyacentes se calcula a partir de las ecuaciones de Bernoulli.

Por otra parte, para llevar a cabo los cálculos y simulaciones CFAST realiza algunas suposiciones entre las que podemos destacar:

- Geometría del compartimento: existen ciertas limitaciones en cuanto a los escenarios de fuego que se pretendan modelar debido a que correlaciones empíricas contenidas en CFAST fueron desarrolladas para techos planos.
- Tasa de liberación de calor: CFAST no es capaz de predecir el crecimiento del fuego en objetos ardiendo. Por tanto, será el usuario el encargado de especificar la tasa de liberación de calor para uno o más incendios. Sin embargo, existe un submodelo simple que limita la liberación de calor en función del oxígeno disponible.
- La radiación de los incendios se modela como una aproximación de fuente puntual, es decir, se considera que el incendio se encuentra localizado en un punto concreto. Esta aproximación limita la precisión del modelo conforme nos alejamos del punto donde se encuentra localizado el incendio.
- La ventilación mecánica se modela especificando las velocidades de flujo volumétrico dentro o fuera de los compartimentos. El sistema HVAC (calefacción, ventilación, aire acondicionado) no está modelado.
- Ventilación natural y fugas: el flujo a través de las aberturas verticales, como puertas y ventanas, se modela utilizando las ecuaciones de Bernoulli para la diferencia de presiones entre dos compartimentos. Sin embargo, en el caso de aberturas horizontales, como exutorios, se utilizan simples correlaciones empíricas basadas en diferencias de presión y densidad entre los compartimentos superior e inferior. Las fugas se simulan creando, explícitamente, pequeñas aberturas verticales u horizontales.

A.2 Parámetros de entrada

Todos los datos de entrada requeridos para ejecutar el modelo CFAST se encuentran en un único archivo de entrada que genera el propio usuario. Dicho archivo consta de la siguiente información:

- Propiedades de los materiales: conductividad térmica, calor específico, densidad, calor de combustión...
- Dimensiones de los compartimentos: ancho, largo y alto.
- Materiales de construcción de los compartimentos: hormigón, yeso, etc.
- Dimensiones y posiciones de las aberturas verticales y horizontales como puertas, ventanas, exutorios, etc.

- Especificaciones relativas a la ventilación mecánica.
- Propiedades del fuego: tasa de liberación de calor, límite inferior de oxígeno, etc.
- Especificaciones relacionadas con rociadores y detectores.
- Definición de los objetivos.
- Especificaciones relacionadas con la visualización de los resultados desde el modelo.

A.2.1 Ambiente de simulación

Los primeros aspectos que debemos definir antes de comenzar una simulación están relacionados con las condiciones ambientales en las que se va a desarrollar el incendio y el tiempo que queremos que dure la simulación. Para ello, utilizaremos la pestaña *Simulation* que aparece en la interfaz del programa y en la que, además del título, habrá que establecer:

- Tiempo de simulación (*Simulation Time*): donde tendremos que definir, además del tiempo que toma la simulación (**Simulation Time**) con un valor máximo de 86400 segundos (1 día), el intervalo de tiempo entre cada impresión de los datos de salida (**Text Output Interval**) que debe ser distinto de cero para que aparezcan valores de salida. CFAST también nos permite mostrar los resultados obtenidos en un archivo de hoja de cálculo (**Spreadsheet Output Interval**), siempre que le demos un valor mayor que cero. Además, otra de las posibilidades que tenemos es generar un subconjunto de resultados en un formato compatible con el programa de visualización *Smokeview* (**Smokeview Output Interval**), lo que se consigue definiendo un valor mayor que cero en la opción existente para ello, que será el que defina el intervalo de tiempo entre las salidas de los resultados del modelo en el formato anteriormente citado. Finalmente, y dentro de las condiciones relacionadas con el tiempo de simulación, debemos saber que CFAST se encarga de ajustar automáticamente el intervalo de tiempo para la solución de la configuración de la ecuación diferencial de modo que la simulación sea lo más eficiente posible dentro de las tolerancias de error predefinidas. Para ello disponemos de un parámetro (**Maximum Time Step**) que coloca un valor máximo para el solucionador de ecuaciones que salvo casos extraños podemos mantener en el valor predeterminado y, en el caso de que el modelo no lograra converger, ir reduciéndolo hasta que consigamos que la simulación se complete de forma exitosa.
- Condiciones de simulación (*Simulation Conditions*): las condiciones de simulación definen el ambiente en el que el escenario comienza. Las presiones iniciales en una estructura se calculan simplemente como una tasa de caída (relacionada con la altura sobre el nivel del mar) basadas en las tablas NOAA/NASA [2]. Es conveniente elegir como altura cero la base de la estructura y referenciar entonces la altura de la estructura con respecto a esa altura. La temperatura y la presión deben ser medidas en esta posición. Otra posibilidad sería tomar la temperatura y la presión a nivel del mar, con la elevación de la estructura dada ahora respecto al nivel del mar.
 - **Temperatura**: temperatura inicial del ambiente dentro o fuera de la estructura a la elevación definida.
 - **Presión**: valores iniciales de presión atmosférica dentro y fuera de la estructura. El valor por defecto es la presión atmosférica estándar al nivel del mar.
 - **Elevación**: se trata de definir la altura a la que estamos definiendo la temperatura y la presión del ambiente.
 - **Humedad**: hace referencia a la humedad relativa inicial en el sistema, solo especificada en el interior. Se convierte a kilogramos de agua por metro cúbico como condición inicial para el interior y el exterior de la estructura.
 - **Superficies del compartimento adiabático** (*Adiabatic Compartment Surface*): Cuando se marca esta casilla, se supone que todas las superficies del compartimento son aislantes perfectos y la sección de materiales de la pestaña de compartimentos se atenúa. Esta característica es útil cuando se diseña un experimento en el que es seguro suponer que no hay transferencia de calor a las paredes de los compartimentos.

A.2.2 Compartimentos

En esta pestaña se establece el tamaño, la posición, materiales de construcción y características del compartimento o compartimentos que vamos a definir para realizar la simulación. Es fundamental que definamos al menos un compartimento para poder definir el resto de las entradas de la simulación, pues no podremos añadir nuevas entradas hasta que no exista un compartimento. De forma genérica, se definirá cada compartimento a partir de tres medidas: largo, ancho y alto. Además, existe un sistema de referencia que nos permitirá situar el compartimento en la posición que deseemos.

Antes de empezar a definir qué datos vamos a tener que incluir para poder introducir correctamente un compartimento, se adjunta una ilustración en la que podemos observar como se orientan los compartimentos introducidos en CFAST.

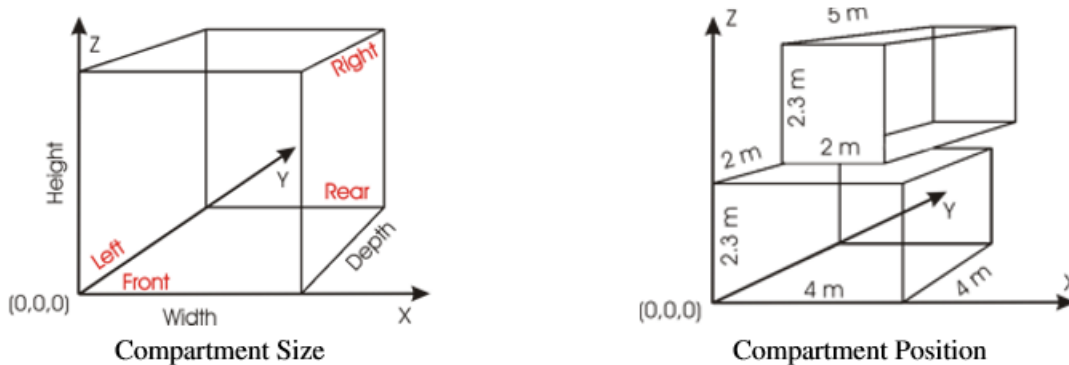


Ilustración 36: Orientación del compartimento y posicionamiento en CFAST

El primer aspecto por introducir para realizar correctamente la caracterización del compartimento es nombrarlo. Para ello, existe la pestaña nombre del compartimento (**Compartment Name**), teniendo que ser único y pudiendo ser tan simple como un número o una letra o más detallado como una definición del propio recinto.

A.2.2.1 Geometría

Se definen las siguientes entradas:

- Ancho (**Width**): especifica el ancho del compartimento medido en la dirección del eje X desde el origen (0, 0, 0).
- Profundidad (**Depth**): especifica la profundidad del compartimento medido en la dirección del eje Y desde el origen (0, 0, 0).
- Altura (**Height**): especifica la altura del compartimento medida en la dirección del eje Z desde el origen (0, 0, 0).
- Posición X (**Position X**): especifica la coordenada x absoluta de la esquina inferior, izquierda y frontal del habitáculo.
- Posición Y (**Position Y**): especifica la coordenada y absoluta de la esquina inferior, izquierda y frontal del habitáculo.
- Posición Z (**Position Z**): especifica la coordenada z absoluta de la esquina inferior, izquierda y frontal del habitáculo.

Para una mejor comprensión de estos parámetros se recomienda mirar con detenimiento la ilustración A.1 que se incluye anteriormente y en la que se especifica gráficamente la definición de las entradas incluidas en la definición de la geometría.

A.2.2.2 Materiales

Para calcular la pérdida de calor a través de techos, paredes y suelos de un compartimento, debemos conocer las propiedades de las superficies delimitadoras, incluyendo propiedades termofísicas de las superficies y la disposición de los compartimentos adyacentes para calcular la transferencia de calor entre compartimentos.

Las propiedades termofísicas de las superficies que definen los compartimentos son descritos especificando la conductividad térmica, calor específico, emisividad, densidad y el espesor de las superficies de cierre y, posteriormente, asignando el material al techo, las paredes o el suelo del recinto. Las propiedades térmicas de diversos materiales pueden definirse manualmente o ser importadas desde la hoja de cálculo incluida en el paquete de CFAST (esta opción se desarrollará con más detenimiento posteriormente).

- Material del techo (**Ceiling Material**): nombre del material en el archivo de datos de propiedades térmicas utilizado para la superficie del techo del compartimento.
- Material de las paredes (**Wall Material**): nombre del material en el archivo de datos de propiedades térmicas utilizado para la superficie de las paredes del compartimento.
- Material del suelo (**Floor Material**): nombre del material en el archivo de datos de propiedades térmicas utilizado para la superficie del suelo del compartimento.

Realmente, lo único que estamos haciendo en esta pestaña es relacionar los materiales definidos en la pestaña de propiedades térmicas con las superficies que limitan el compartimento.

Además, CFAST nos permite realizar simulaciones de modelos cuyos compartimentos presenten formas con un tamaño en una dirección mucho mayor que las otras (como sería el caso de un pasillo o de un pozo).

A.2.3 Aberturas en muros

En este caso vamos a definir las aberturas verticales que conectan dos compartimentos o, en nuestro caso, que conectan la nave de almacenamiento que estamos estudiando con el exterior. Dicho de otro modo, vamos a definir los elementos que permitirán la entrada de aire desde el exterior.

Para ello debemos comenzar indicando qué dos compartimentos pone en contacto (existe la posibilidad de señalar como segundo compartimento el exterior si se encuentra en una pared que limita el edificio con la zona exterior), la altura del punto más bajo de la abertura (**Sill**), el punto más alto (**Soffit**) y la anchura del hueco que estamos definiendo (**Width**). Por último, habrá que situar la ventana en una de las paredes del compartimento (**Face**).

Una vez definidos los aspectos relativos al posicionamiento y dimensiones de las aberturas será necesario especificar el tiempo que transcurre desde que la ventana se encuentra cerrada hasta que se encuentra completamente abierta. Para ello habrá que indicar el tiempo en segundos que transcurre entre ambas posiciones (**Time**), y si se encuentra en posición cerrada (**Fraction = 0**) o abierta (**Fraction = 1**).

A.2.4 Aberturas en suelos y techos

Una vez definidas las aberturas verticales, ubicadas en las paredes, es el turno de establecer los huecos horizontales, es decir, los exutorios o aberturas que existan en suelos y techos. Dichas aberturas podrán conectar un compartimento con otro superior o inferior, en caso de que estamos simulando un establecimiento de varias plantas, o poner en contacto un compartimento con el exterior, como es nuestro caso en el que solo hay una planta.

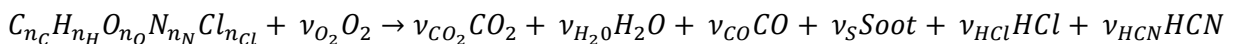
En este caso tendremos que especificar la posición del exutorio, indicando el techo del compartimento en el que se encuentra (**Bottom compartment**) y el suelo del compartimento que ocupa (**Top compartment**), el tamaño de la abertura en metros cuadrados (**Cross-sectional area**). También se nos permite definir la forma del exutorio, circular o cuadrado (**Shape**) y, finalmente, tendremos que definir los tiempos de abertura del dispositivo de la misma forma que hicimos en el caso de las aberturas en paredes.

A.2.5 Propiedades térmicas

Uno de los parámetros que debemos definir cuando queremos realizar una simulación mediante CFAST está relacionado con las propiedades térmicas (conductividad térmica, calor específico, densidad o calor emitido) de los materiales que están involucrados en el incendio. Para ello, se dispone, en la ventana principal, de la pestaña *Thermal Properties*, en la cual tenemos la posibilidad de añadir aquellas que posteriormente sean necesarias. Además, es importante resaltar que, una vez descargado el software, se incluye un archivo en formato Excel en el que se incluyen distintos materiales con sus propiedades ya definidas y que pueden importarse a nuestro trabajo directamente haciendo uso de la pestaña *From File* y buscando dicha carpeta dentro de la carpeta que incluye el paquete CFAST. En principio, y dado que el objetivo de las distintas simulaciones es analizar como afecta a las distintas salidas la variación de los parámetros que definen el incendio, vamos a utilizar directamente los materiales que vienen predefinidos por CFAST.

A.2.6 Fuegos

Probablemente, la definición del fuego es, junto con la definición de los compartimentos, el punto más crítico a la hora de realizar un análisis. El modelo puede simular múltiples fuegos en uno o más compartimentos. Estos fuegos son tratados como entidades independientes, sin interacción entre los penachos. Estos fuegos pueden iniciarse en un tiempo fijado por el usuario o cuando uno de los objetivos definidos anteriormente dentro del compartimento alcanza la temperatura o flujo de calor definido. El modelo de combustión se define por la siguiente reacción en un solo paso:



Donde se ha asumido que el nitrógeno y el cloro en el combustible se convierten en HCl y HCN.

Para añadir un fuego tenemos que utilizar las pestañas añadir nuevo (**Add New**) o añadir t^2 , en caso de que la evolución del fuego se produzca de forma cuadrática y no lineal. Además, para cada fuego que hayamos añadido a la simulación tendremos que definir:

- Nombre (**Name**): que debe ser único para fuego.
- Compartimento (**Compartment**): donde ocurre el fuego.
- **C, H, O, N, Cl**: el número de cada átomo en la molécula de combustible. Se supone que los combustibles que se queman en CFAST son combustibles de hidrocarburos que contienen al menos carbono e hidrógeno y opcionalmente oxígeno, nitrógeno y cloro.
- Calor de combustión (**Heat of combustion**): energía liberada por unidad de masa de combustible consumido.
- Producción de hollín (**Soot yield**): masa de hollín producida por unidad de masa de combustible quemado.
- Producción de CO (**CO yield**): masa de CO producida por unidad de masa de combustible quemado.
- Fracción radiativa (**Radiative fraction**): fracción de la energía de combustión emitida en forma de radiación térmica.
- Posición (**Position X, Y, Z**): posición del centro de la base del fuego con respecto a la esquina inferior izquierda delantera del compartimento.
- Criterio de ignición (**Ignition criterion**): puede emplearse un tiempo determinado por el usuario o por la temperatura o flujo de calor incidente sobre uno de los objetivos anteriormente definidos por el usuario.
- Valor de inicio (**Set point**): Valor crítico en el que se producirá la ignición. Varía según hayamos empleado un criterio de ignición u otro.
- Objetivo de ignición (**Ignition target**): objetivo especificado por el usuario utilizado para la calcular la temperatura de su superficie o flujo de calor incidente para que empiece el fuego.

Además de las propiedades que hemos definido hasta ahora, que no tienen que ver con el desarrollo del incendio, tenemos que definir otras que sí que dependen del tiempo, variando a medida que el incendio avanza. Se trata de las siguientes variables que son definidas como una función del tiempo:

- Tiempo (**Time**): tiempo transcurrido desde la ignición.
- HRR (**Heat Release Rate**): tasa de liberación de calor del fuego.
- Altura (**Height**): altura de la base del fuego.
- Área (**Area**): área de la base del fuego. Las correlaciones del penacho usadas en CFAST generalmente consideran que la base es circular. No fijar este valor a cero porque se utiliza en diversas correlaciones del penacho.
- Producción de CO y hollín (**CO, Soot Yield**): estos valores se sobrescribirán sobre los valores anteriormente definidos.

Por último, en lo relativo a la definición del fuego, existe la posibilidad de que el desarrollo de estos siga una evolución cuadrática, en cuyo caso es necesario establecer los siguientes aspectos:

- Ratio de crecimiento del fuego (**Fire growth rate**): se trata de un conjunto de fuegos específicos de crecimiento cuadrático etiquetados como lento, medio, rápido o ultra rápido en el que el fuego alcanza 1054 kW en 600 s, 300 s, 150 s o 75 s. También existe la opción de fuego personalizado (**custom**) que permite al usuario definir el tiempo de crecimiento y caída deseado.
- Tiempo hasta el pico (**Time to peak**): tiempo en el que el fuego alcanza el valor pico de HRR.
- Pico de HRR (**Peak HRR**): Valor pico del HRR que alcanza el fuego.
- Período de combustión constante (**Steady burning period**): tiempo durante el que la combustión continúa con el valor de pico HRR definido.
- Tiempo de extinción (**Decay time**): tiempo que tarda el fuego en caer hasta alcanzar el valor cero. Sigue el proceso inverso a la rama de crecimiento.

A.2.7 Objetivos

Un objetivo es cualquier objeto de la simulación que puede calentarse mediante la transferencia de calor por radiación o convección. La conducción de calor hacia el objetivo se realiza mediante un cálculo unidimensional en coordenadas cartesianas o cilíndricas. Para definirlos debemos completar la siguiente información:

- Nombre (**Name**): que debe ser único para cada objetivo de la simulación.
- Compartimento (**Compartment**): indica en qué compartimento se ubica el objetivo.
- Tipo de objetivo (**Target type**): hay que elegir entre plano o cilíndrico. Para los objetivos planos, CFAST resuelve una ecuación diferencial parcial en coordenadas cartesianas, y para los cilíndricos, una ecuación diferencial parcial en coordenadas cilíndricas.
- Posición en eje X (**Width**): distancia desde la pared izquierda hasta el objetivo.
- Posición en eje Y (**Depth**): distancia desde la pared frontal hasta el objetivo.
- Altura en eje Z (**Height**): altura del objetivo desde el suelo del compartimento.
- Vector normal X, Y, Z (**Normal vector**): especifica un vector de longitud unitaria perpendicular a la superficie expuesta del objeto. Por ejemplo, el vector (-1,0,0) indica que el objetivo está orientado hacia la pared izquierda mientras que el vector (0,0,1) indica que el objetivo está orientado hacia el techo.
- Material (**Material**): indica de qué material está fabricado el objetivo. Para este caso podemos usar cualquiera de los materiales anteriormente definidos en el apartado *Propiedades Térmicas*.
- Temperatura interna a... (**Internal temperature at**): Para cada objetivo, CFAST calcula la temperatura interna en un número de puntos nodales dentro del objetivo. Por defecto, la temperatura interna reportada en la hoja de cálculo es la temperatura en el centro del objetivo, equidistante de las caras

frontal y posterior del objetivo. Esta opción nos permite anular esa posición predeterminada. La entrada representa la posición como una fracción del espesor desde la superficie frontal hasta la superficie posterior del material.

A.2.8 Detectores y rociadores

Tanto los rociadores como los detectores son considerados dispositivos de detección por el modelo CFAST y se manejan utilizando las mismas entradas. La detección se basa en la transferencia de calor al detector. La extinción de incendios mediante agua pulverizada (parámetros especificados por el usuario) especificada por un usuario comienza una vez que se activa el dispositivo de detección asociado.

Para obtener información de los detectores y rociadores deberán cumplimentarse los siguientes campos:

- Tipo de detector (**Type**): detector de humo, detector de calor o rociador.
- Compartimento (**Compartment**): compartimento en el que se encuentra el detector o el rociador.
- Temperatura de activación (**Activation temperature**): temperatura a la cual o por encima de la cual se activa el detector.
- Oscurecimiento de activación (**Activation obscuration**): oscurecimiento al cual o por encima del cual se activa el detector.
- Posición X (**Width**): posición del detector o rociador medida desde el muro izquierdo del compartimento.
- Posición Y (**Depth**): posición del detector o rociador medida desde el muro frontal del compartimento.
- Posición Z (**Height**): posición del detector o rociador medida desde el suelo del compartimento.
- Índice de tiempo de respuesta (**RTI**): índice de tiempo de respuesta para el rociador o el dispositivo de detección.
- Densidad de spray (**Spray density**): indica la cantidad de agua dispersada por el rociador. Las unidades de la densidad de spray son longitud/tiempo, derivada del cociente del flujo volumétrico por el área de pulverización.

Es preciso prestar atención cuando se especifiquen los detectores que se activarán basándose en el oscurecimiento del humo, ya que el único cálculo incluido en CFAST es un simple cálculo de dos zonas de concentración de hollín que no incluye el impacto de una capa inicial de techo, como sí se hace en los cálculos basados en temperatura. A menudo, la activación de las alarmas de humo se simula con un criterio basado en temperatura (en CFAST como una alarma de calor), típicamente en el rango de 5°C a 10°C por encima de la temperatura ambiente.

Además, se deben tomar varias precauciones a la hora de usar estimaciones de supresión de los rociadores dentro del modelo:

1. El primer rociador que se activa controla el efecto del rociador sobre la tasa de liberación de calor del incendio. Los rociadores posteriores que puedan activarse no tendrán ningún efecto adicional sobre la simulación del incendio.
2. El algoritmo de extinción del fuego asume que el efecto del rociador es únicamente para reducir la tasa de liberación de calor del incendio. Se ignoran todos los efectos de las temperaturas del rociador sobre el gas o en la mezcla dentro del compartimento.
3. El aspersor siempre reduce el índice de liberación de calor del incendio. La capacidad de un fuego para sobrepasar un aspersor mal diseñado no está modelada.
4. Dado que la dinámica del aspersor y los efectos directos del agua pulverizada en las temperaturas y velocidades del gas no son modelados, los tiempos de activación calculados para los rociadores o detectores secundarios tras la activación del primer rociador no deberían modelarse debido a que el impacto del primer rociador en la activación de los rociadores adicionales no se incluye en el modelo de CFAST.

A.3 Resultados obtenidos

El resultado ofrecido por CFAST incluye las variables que permitan evaluar el entorno de un edificio sometido a un incendio. Una vez que la simulación se ha completado, se obtiene una carpeta de resultados que contiene todas las variables de la solución. Normalmente, los resultados incluyen:

- Las condiciones ambientales en el compartimento: temperatura de la capa de gas caliente, la temperatura de la línea central del penacho de humo, la concentración de oxígeno y humo y las temperaturas del techo, la pared y el piso.
- Salidas relacionadas con la transferencia de calor a las paredes y los dispositivos a diseñar: flujos convectivos, radiativos y la resultante del calor incidente.
- Intensidad del fuego y altura de la llama.
- Las velocidades de flujo a través de las aberturas.
- Tiempos de activación de los detectores y los rociadores.

A.4 Salidas generadas por CFAST

Los resultados que genera CFAST incluyen las temperaturas de la capa superior e inferior en cada compartimento, las temperaturas en suelo, techo y paredes en cada compartimento, las concentraciones de los distintos elementos del humo y gases dentro de cada capa, las temperaturas de los objetivos incluidos en la simulación y el tiempo de activación de los rociadores.

Debemos tener en cuenta que entre los resultados que se van a obtener de la simulación realizada solo aparecerán aquellos que apliquen según los parámetros que hayamos definido antes de ejecutar dicha simulación.

A.4.1 Salida compacta

Se conoce así a la salida generada por defecto y muestra la información básica sobre un escenario. Incluye además salidas de texto predeterminadas para que el usuario pueda certificar que la simulación se ha realizado con éxito. Esta ventana se abre de forma automática cuando se inicia la simulación.

A.4.2 Salida detallada

Esta sección describe cada una de las salidas del modelo. Cada sección se refiere a una parte concreta de lo que se ha obtenido y se detallan en el mismo orden que aparecen en la salida. Los datos relativos a esta salida pueden encontrarse en un archivo con extensión .doc, siguiendo el mismo orden que se establece en el presente epígrafe.

A.4.2.1 Resultados para iniciar la simulación

Muestra las condiciones iniciales previas a la ejecución de la simulación. Básicamente, recoge las entradas especificadas por el usuario en la carpeta de entrada de datos. Las condiciones iniciales pueden agruparse en siete secciones. Estas secciones son visión general (**overview**), condiciones ambientales (**ambient conditions**), compartimentos (**compartments**), ventilación natural horizontal (**horizontal natural ventilation**), ventilación natural vertical (**vertical natural ventilation**), conexiones de flujo mecánico (**mechanical flow connections**), especificaciones sobre los tiempos de apertura de los sistemas de ventilación (**ventilation opening ramp specifications**), propiedades térmicas (**thermal properties**), características del fuego (**fires**), los objetivos que se han definido (**target**) y los detectores y rociadores (**detectors and sprinklers**).

A.4.2.2 Salida de las variables principales

Estos resultados pueden consultarse en el mismo documento que los anteriores, a continuación de estos. En ella, podemos obtener la evolución temporal (siendo el usuario el encargado de imponer el intervalo de tiempo en la opción **Text Output Interval** en la pestaña **Simulation**) de diversos parámetros de estudio en la simulación, divididos en dos tablas. En la primera de estas tablas aparecen datos como son la temperatura de las capas superior e inferior, la altura de la entrefase entre ambas capas, el volumen de la capa superior y la presión en

cada compartimento en relación con la presión ambiental. La segunda de las tablas recoge información sobre los fuegos, incluyéndose información referida tanto a los fuegos de manera independiente como al resultado de los incendios según compartimento. Además, para ambos casos se hablará de conceptos como el flujo en el penacho de humo, el ratio de pirólisis, el tamaño del fuego y la altura de la llama. En caso de existir un único fuego en cada compartimento, los resultados coincidirán para ambos.

A.4.2.3 Salida para superficies, objetivos y detectores / rociadores

Aunque se agrupan de forma conjunta, encontraremos dos tablas, recogiendo la primera de estos datos a cerca de las superficies de cada compartimento y los objetivos definidos dentro de estos y la segunda información relacionada con los sistemas de detección y rociadores definidos para la simulación.

A.4.2.4 Resultados de composición del gas

Nuevamente aparecen dos tablas que recogen información relativa a la composición de los gases en las capas superior e inferior, respectivamente. Además de la proporción de cada uno de los componentes típicos del fuego, puede obtenerse también el total de hidrocarburos no quemados o combustible pirolizado que aún no se ha quemado (TUHC) y la densidad óptica, que es una medida de la cantidad de humo (OD).

A.4.2.5 Resultados de flujo a través de cada apertura

Incluye la información a cerca de los flujos de ventilación a través de las distintas aperturas o sistemas de ventilación mecánica. De hecho, se definirá el tipo de flujo (H en caso de flujo horizontal, V en caso de flujo vertical y M en caso de ventilación mecánica), los compartimentos involucrados en el trasvase de dichos flujos y si se realiza hacia el interior o hacia el exterior, entre otros. En el caso de los flujos de ventilación, se expresa en unidades de masa / tiempo, pudiéndose modificar esta opción para obtener los flujos netos a lo largo de la simulación, en unidades de masa.

A.4.3 Salida en hojas de cálculo

CFAST puede generar una serie de resultados en forma de hoja de cálculo. En ellos, se recoge información diversa grabada en intervalos cortos de tiempo. Sin embargo, existen sucesos que pueden ocurrir en tiempos distintos a los que se recogen en la hoja de cálculo como puede la ignición de objetos o la activación de los rociadores y detectores.

A.4.3.1 Resultados de variables primarias

Estos resultados aparecen en un archivo Excel con el nombre de la simulación seguida de `_n.csv`. Encontraremos información básica como las temperaturas de las capas en que se divide el espacio para realizar la simulación. Dejando a un lado el tiempo, los ocho primeros parámetros están referidas a los compartimentos mientras que los siete siguientes hacen referencia a los fuegos. A continuación, se describen los parámetros que van a aparecer en el documento del que hablamos:

- **Time** (s): tiempo en el que se recogen los datos.
- **Upper Layer Temperature** (° C): temperatura de la capa superior en el tiempo indicado.
- **Lower Layer Temperature** (° C): temperatura de la capa inferior en el tiempo indicado.
- **Layer Height** (m): altura de la capa de humos.
- **Upper Layer Volume** (m^3): volumen total de la capa superior. Se trata simplemente de la superficie de suelo multiplicada por la diferencia entre la altura del techo y la altura de la capa.
- **Pressure** (Pa): indica la presión en el suelo del compartimento con respecto a la presión exterior en la altura absoluta del suelo.
- **Ambient Temp Target Flux** (W/m^2): flujo de calor neto al centro del suelo asumiendo que está a temperatura ambiente. Se trata de un parámetro muy útil para estimar la sostenibilidad del compartimento.

- **Floor Temp Target Flux** (W/m^2): flujo de calor neto al centro del suelo.
- **Plume Entrainment Rate** (kg/s): masa instantánea arrastrada desde la capa inferior al penacho para este fuego.
- **Pyrolysis Rate** (kg/s): tasa actual de pérdida de masa para este fuego.
- **HRR** (W): tasa de liberación de calor instantánea para un fuego. Se trata de la suma de la tasa de liberación de calor para la capa inferior y la capa superior para cada fuego.
- **HRR Lower** (W): tasa de liberación de calor instantánea durante la combustión para la capa inferior.
- **HRR Upper** (W): tasa de liberación de calor instantánea durante la combustión para la capa superior.
- **Flame Height** (m): altura de la llama calculada en el tiempo establecido para cada fuego.
- **Convective HRR** (W): tasa instantánea de liberación de calor por convección para cada fuego. El resto de calor es liberado por radiación.
- **Total Pyrolysate Released** (kg): masa total liberada por el fuego hasta el instante actual.
- **Total Trace Species Released** (kg): masa total de especies de traza liberadas por el fuego hasta el instante actual.

A.4.3.2 Resultados relacionados con la composición del fuego

Podemos encontrar estos resultados en el archivo Excel con el nombre de la simulación seguido de `_s.csv`. Actualmente, se recogen nueve salidas en este archivo: oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), cianuro de hidrógeno (HCN), cloruro de hidrógeno (HCL), vapor de agua (H₂O), densidad óptica (OD), y las especies de traza (TS). En todos los casos se mostrará el resultado obtenido para los distintos tiempos dados tanto en la capa superior como en la capa inferior.

A.4.3.3 Resultados relacionados con los flujos de ventilación

En este caso se recogen los datos relacionados con los flujos de aire que atraviesan las distintas aperturas que puedan existir en un compartimento, bien horizontalmente (**HVENT**), verticalmente (**VVENT**) o a través de sistemas mecánicos de ventilación (**MVENT**).

A.4.3.4 Resultados relacionados con superficies, temperatura de objetivos y flujos de calor

Estos resultados se podrán encontrar en la hoja de cálculo que tiene el nombre de la simulación seguido de `_w.csv`. En ella, además de la información relativa a superficies, temperatura de objetivos y flujos de calor podremos encontrar también aspectos como el estado en un instante de los detectores y rociadores. Nos encontraremos con los siguientes resultados:

- **Ceiling Temperature** (° C): temperatura del techo en el compartimento indicado.
- **Upper Wall Temperature** (° C): temperatura de la pared en contacto con la capa superior en el compartimento indicado.
- **Lower Wall Temperature** (° C): temperatura de la pared en contacto con la capa inferior en el compartimento indicado.
- **Floor Temperature** (° C): temperatura del suelo en el compartimento indicado.
- **Target Surrounding Gas Temperature** (° C): temperatura del gas cerca del objetivo indicado.
- **Target Surface Temperature** (° C): temperatura en la superficie del objetivo indicado.
- **Target Center Temperature** (° C): temperatura interior del objetivo indicado.
- **Target Total Flux** (kW/m^2): flujo neto de calor actual en la superficie frontal del objetivo actual.
- **Target Convective Flux** (kW/m^2): flujo neto de calor por convección total en la superficie frontal del objetivo actual.
- **Target Radiative Flux** (kW/m^2): flujo neto de calor por radiación total en la superficie frontal del

objetivo actual.

- **Target Fire Radiative Flux** (kW/m^2): flujo de calor por radiación desde el fuego hasta la superficie del compartimento indicado.
- **Target Surface Radiative Flux** (kW/m^2): flujo de calor por radiación desde las superficies del compartimento hasta la superficie frontal del objetivo indicado.
- **Target Gas Radiative Flux** (kW/m^2): flujo de calor por radiación desde las capas de gas superior e inferior hasta la superficie del objetivo indicado.
- **Target Radiative Loss Flux** (kW/m^2): flujo de calor por radiación desde el objetivo indicado a la temperatura calculada del objetivo.
- **Target Total Gauge Flux** (kW/m^2): flujo neto de calor total a la superficie frontal del objetivo actual suponiendo que las pérdidas por radiación del objetivo son a temperatura ambiente.
- **Target Radiative Gauge Flux** (kW/m^2): flujo neto total de calor por radiación a la superficie frontal del objetivo indicado suponiendo que las pérdidas por radiación del objetivo son a temperatura ambiente.
- **Target Radiative Loss Gauge Flux** (kW/m^2): flujo de calor por radiación desde el objetivo indicado hacia los alrededores suponiendo que las pérdidas por radiación del objetivo son a temperatura ambiente.
- **Sensor Temperature** ($^{\circ}C$): temperatura del detector o rociador indicado.
- **Sensor Activation**: indica si el detector o el rociador se encuentra activado (valor 1) o no (valor 0).
- **Sensor Surrounding Gas Temperature** ($^{\circ}C$): temperatura del humo cerca del detector o el rociador.
- **Sensor Surrounding Gas Velocity** (m/s): velocidad del humo cerca del detector o el rociador.

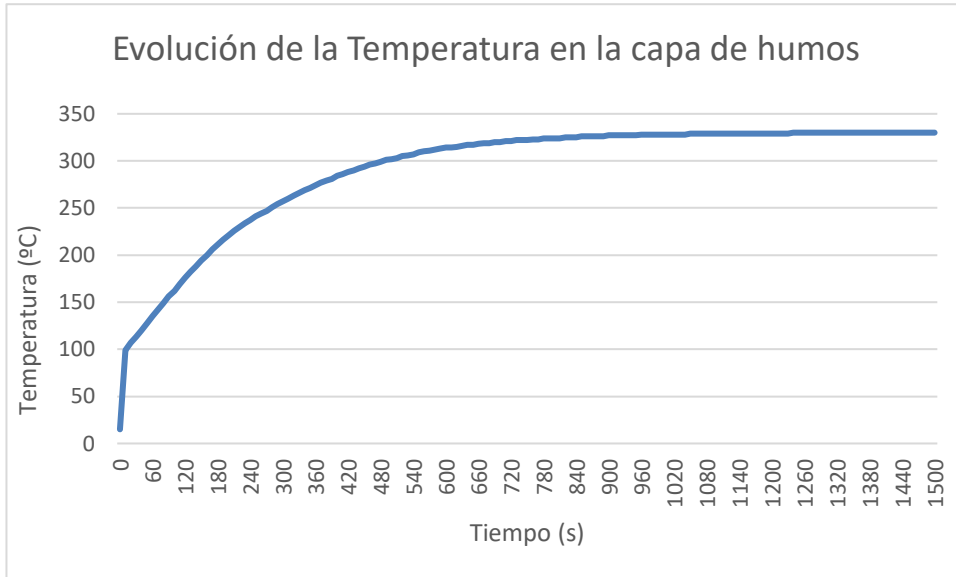
ANEXO B: VARIABLES DE ENTRADA EN LAS DISTINTAS SIMULACIONES Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS INTERESANTES

En este Anexo vamos a incluir todas las líneas que genera CFAST en función de las entradas definidas para cada una de las simulaciones.

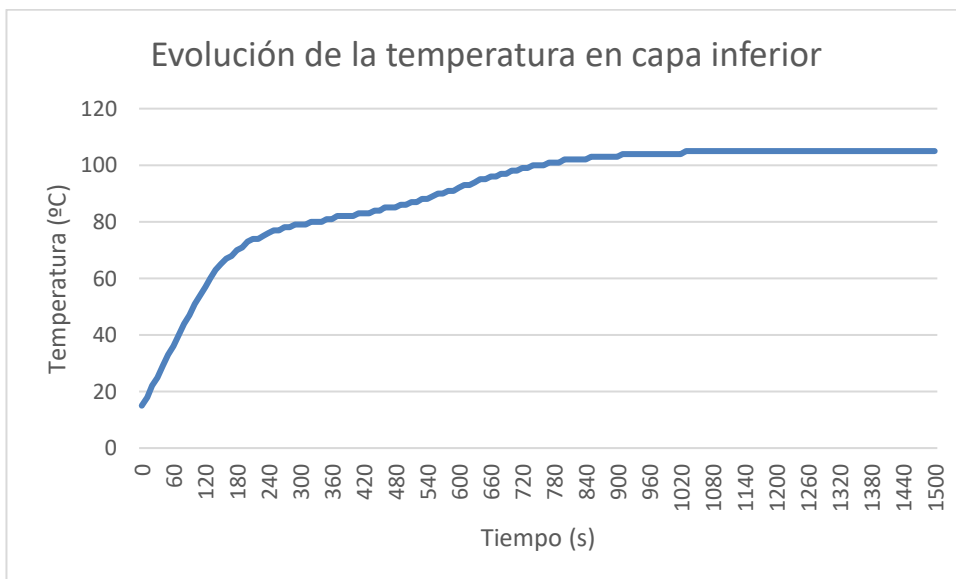
B.1 Simulación inicial

```
VERSN,7,CFAST Simulation
!!
!!Scenario Configuration
!!
TIMES,1500,50,10,10
EAMB,288.15,101325,0
TAMB,288.15,101325,0,50
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,55,9.5,0,0,0,OFF,OFF,OFF,50,50,50
!!
!!Vents
!!
HVENT,1,2,1,8.47,3.98,1.5,23.3,,2,TIME,,,0,0,0,1,0,0
VVENT,2,1,1,21,2,TIME,,,0,0,0,1,15,22.5
!!
!!Fires
!!
!!New Fire
FIRE,1,15,27.5,0,1,TIME,0,0,0,0,New Fire
CHEMI,1,0,0,0,0,0.35,2E+07
TIME,0,1500
HRR,2.025E+07,2.025E+07
SOOT,0,0
CO,0,0
TRACE,0,0
AREA,81,81
HEIGH,0,0
```

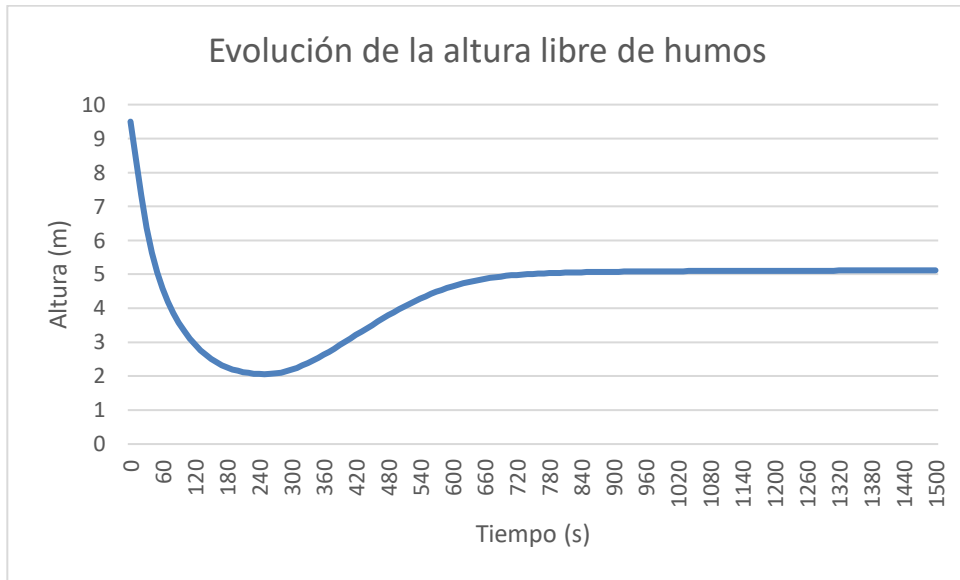
- Temperatura de la capa superior



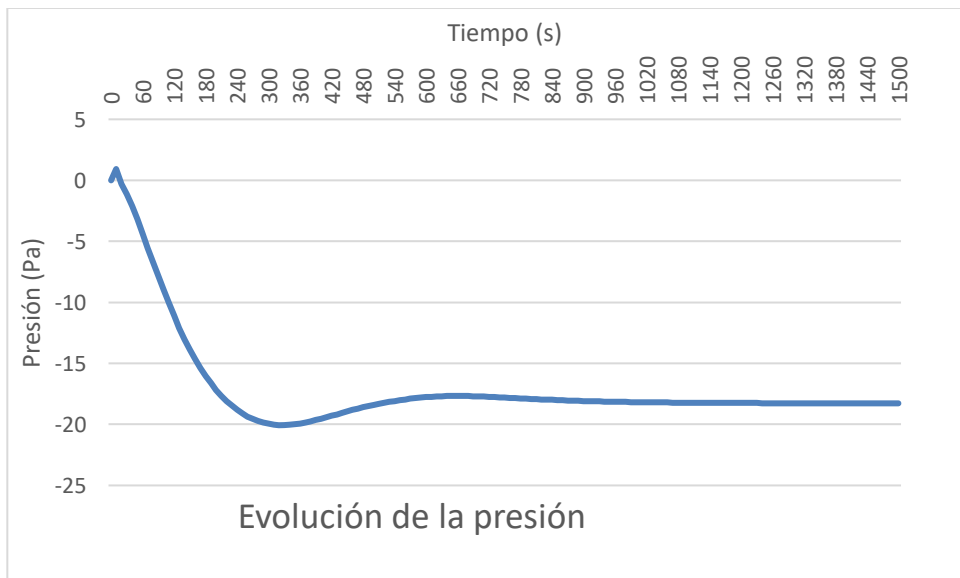
- Temperatura de la capa inferior



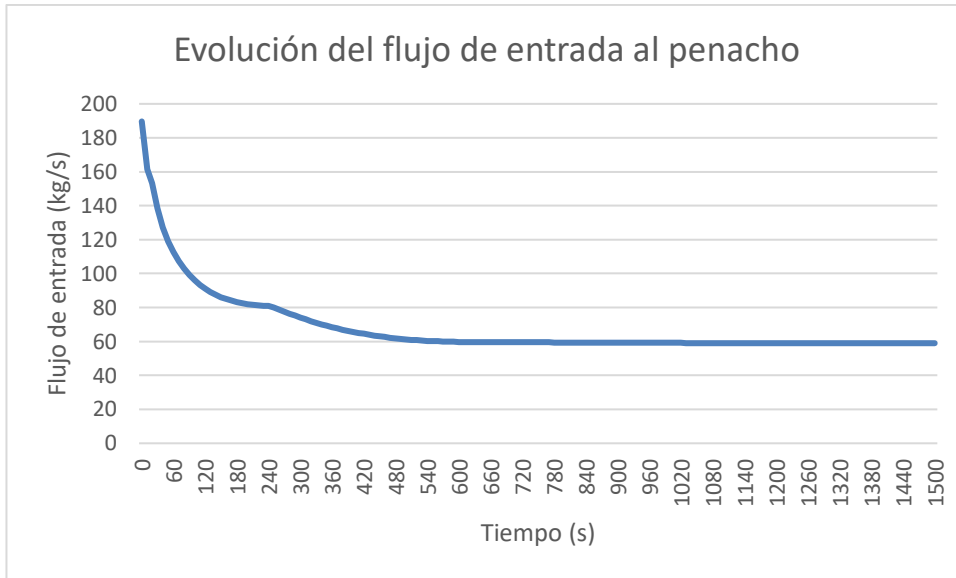
- Altura libre de humos



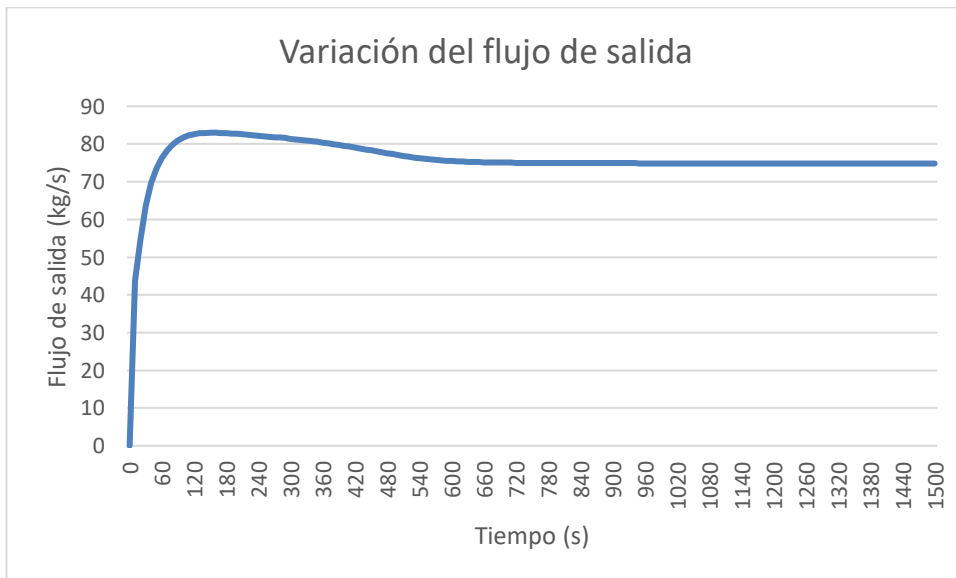
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



- Flujo de salida desde el compartimento

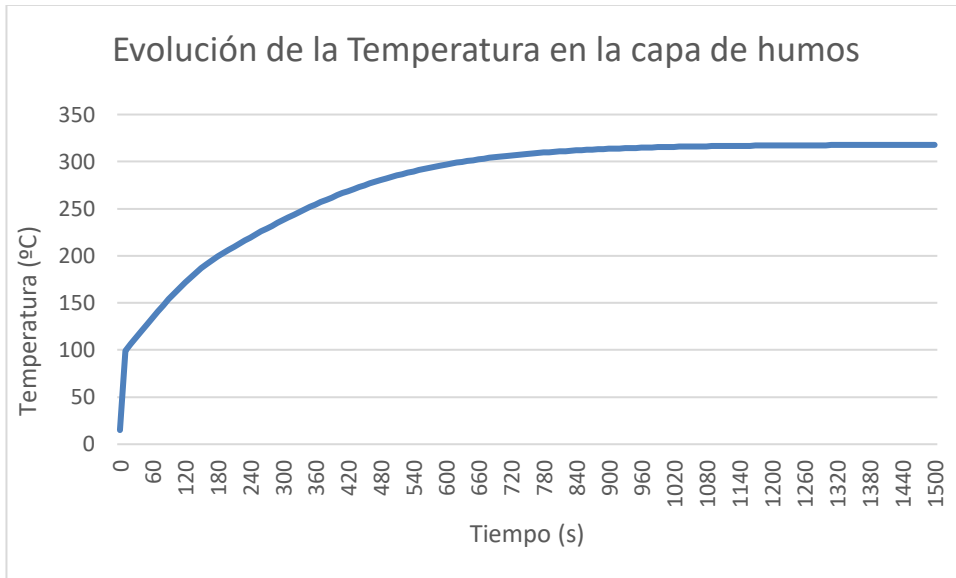


B.2 Simulación 2

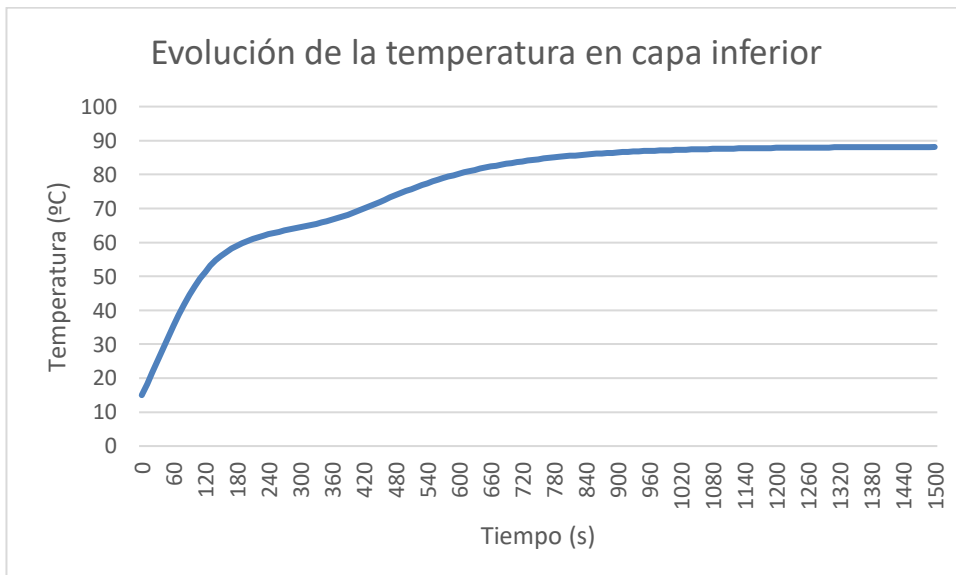
Variación a la simulación inicial: incremento del área del exutorio de salida.

```
VERSN,7, CFAST Simulation
!!
!!Scenario Configuration
!!
TIMES,1500,50,10,10
EAMB,288.15,101325,0
TAMB,288.15,101325,0,50
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,55,9.5,0,0,0,OFF,OFF,OFF,50,50,50
!!
!!Vents
!!
HVENT,1,2,1,8.47,3.98,1.5,23.3,,2,TIME,,,0,0,0,1,0,0
VVENT,2,1,1,31.5,2,TIME,,,0,0,0,1,15,22.5
!!
!!Fires
!!
!!New Fire
FIRE,1,15,27.5,0,1,TIME,0,0,0,0,New Fire
CHEMI,1,0,0,0,0,0.35,2E+07
TIME,0,1500
HRR,2.025E+07,2.025E+07
SOOT,0,0
CO,0,0
TRACE,0,0
AREA,81,81
HEIGH,0,0
```

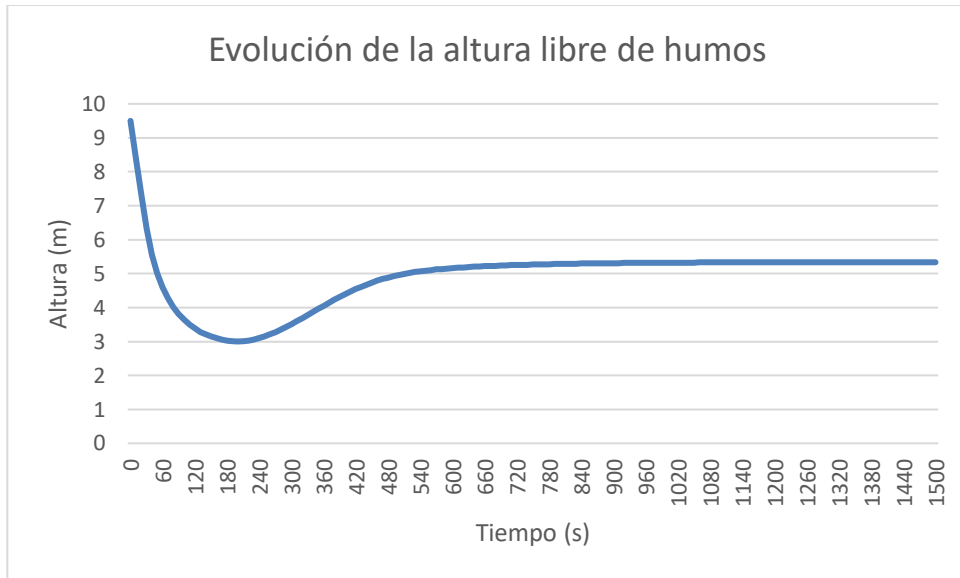
- Temperatura de la capa superior



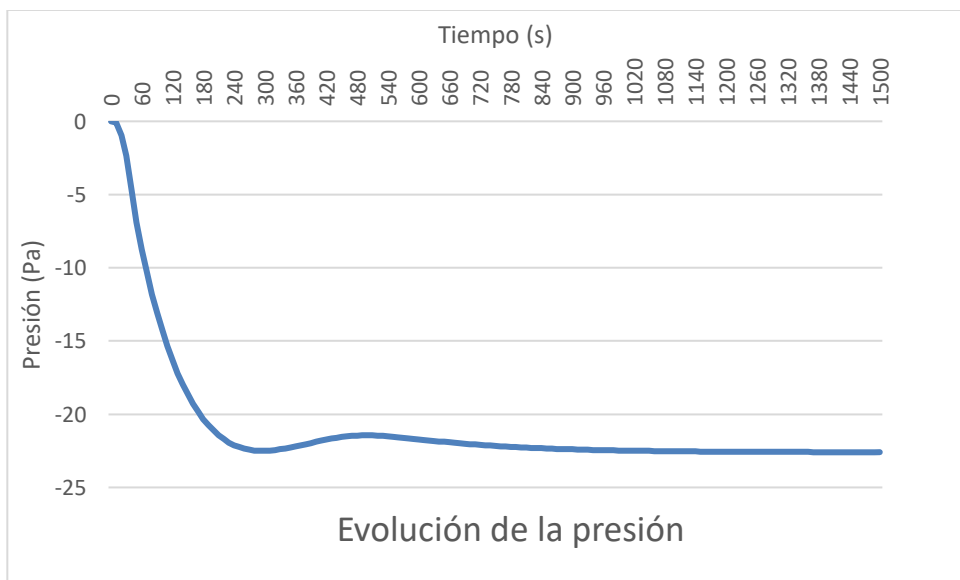
- Temperatura de la capa inferior



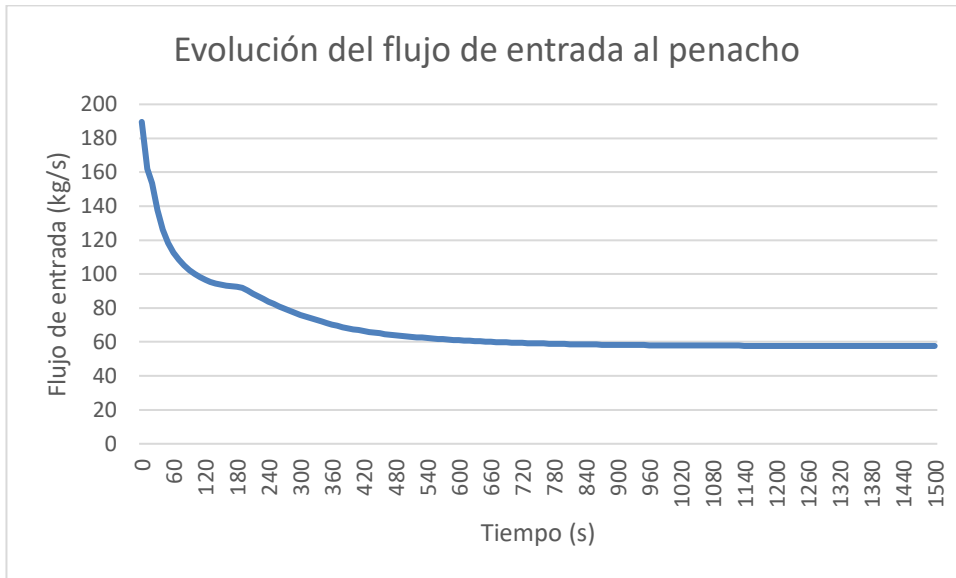
- Altura libre de humos



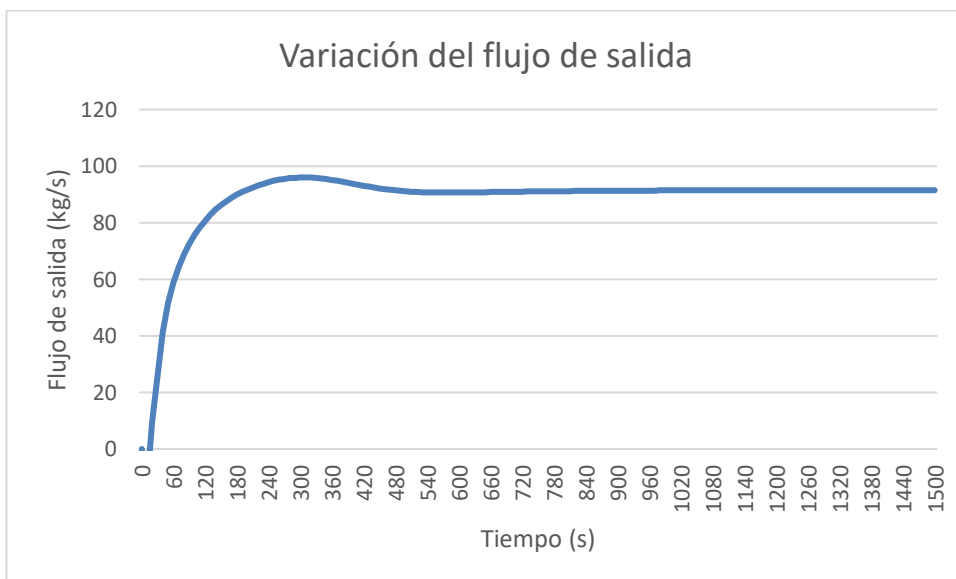
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



- Flujo de salida desde el compartimento

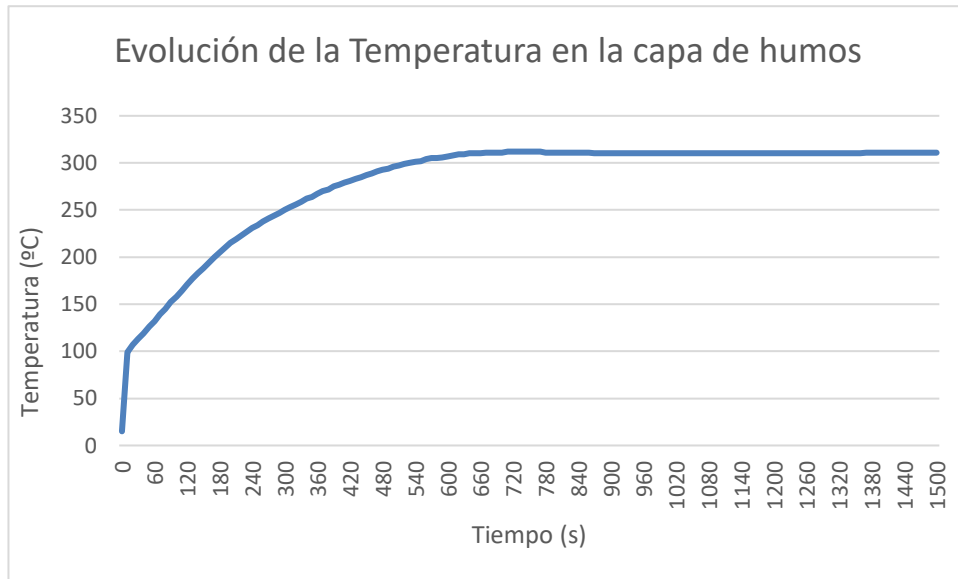


B.3 Simulación 3

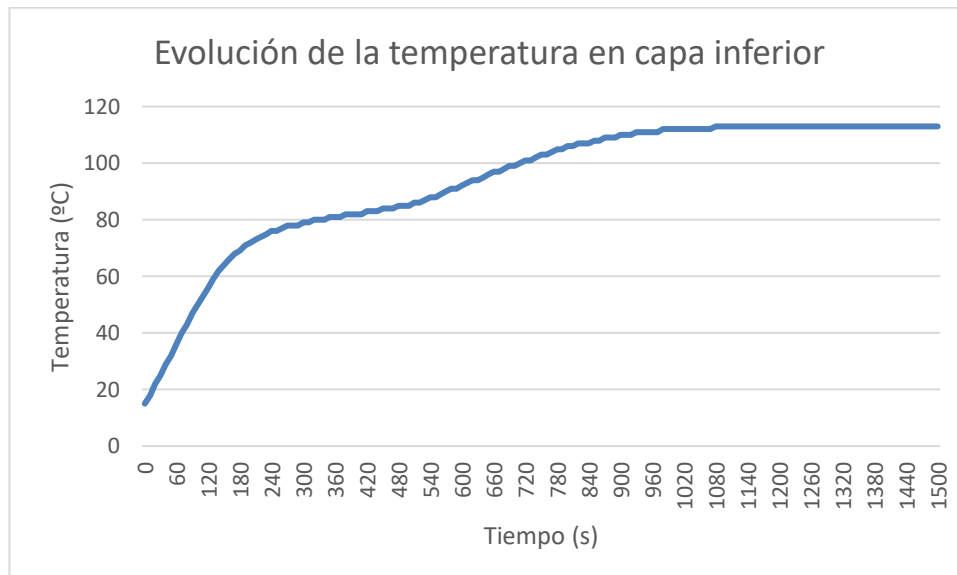
Variación respecto a la simulación inicial: división de la superficie de los exutorios de salida en ocho dispositivos de salida. Será considerada como *simulación óptima*.

```
VERSN,7,CFAST Simulation
!!
!!Scenario Configuration
!!
TIMES,1500,50,10,10
EAMB,288.15,101325,0
TAMB,288.15,101325,0,50
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,55,9.5,0,0,0,OFF,OFF,OFF,50,50,50
!!
!!Vents
!!
HVENT,1,2,1,8.47,3.98,1.5,23.3,,2,TIME,,0,0,0,1,0,0
VVENT,2,1,1,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,10,11
VVENT,2,1,2,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,10,22
VVENT,2,1,3,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,10,33
VVENT,2,1,4,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,10,44
VVENT,2,1,5,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,20,11
VVENT,2,1,6,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,20,22
VVENT,2,1,7,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,20,33
VVENT,2,1,8,2.625,2,TIME,,0,0,0,1,20,44
!!
!!Fires
!!
!!New Fire
FIRE,1,15,22.5,0,1,TIME,0,0,0,0,New Fire
CHEMI,1,0,0,0,0,0.35,2E+07
TIME,0,1200
HRR,2.025E+07,2.025E+07
SOOT,0,0
CO,0,0
TRACE,0,0
AREA,81,81
HEIGH,0,0
```

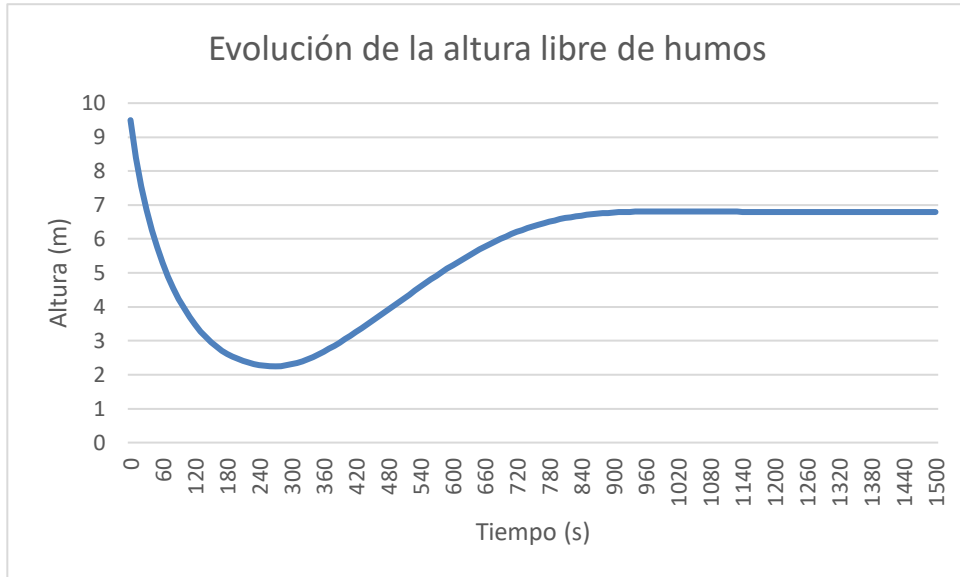
- Temperatura de la capa superior



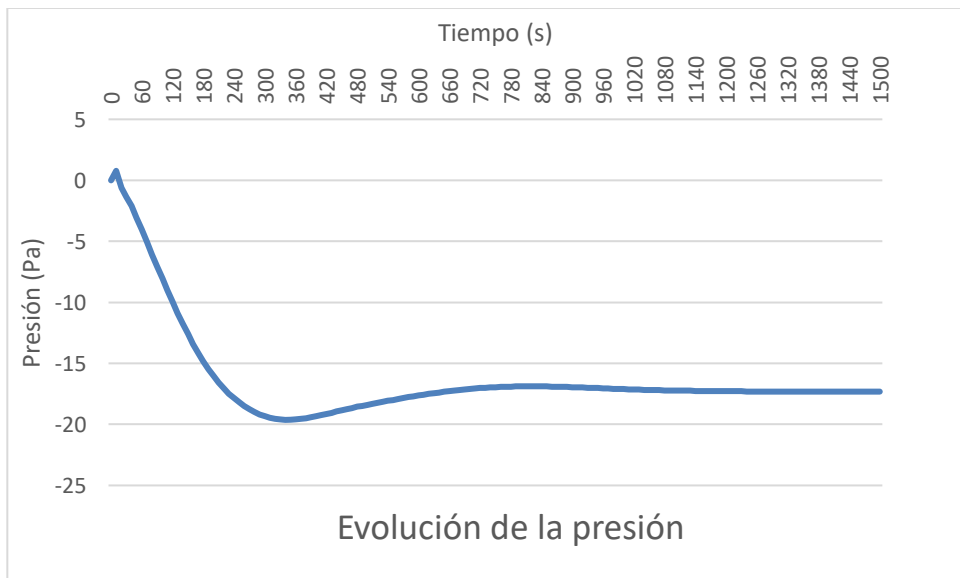
- Temperatura de la capa inferior



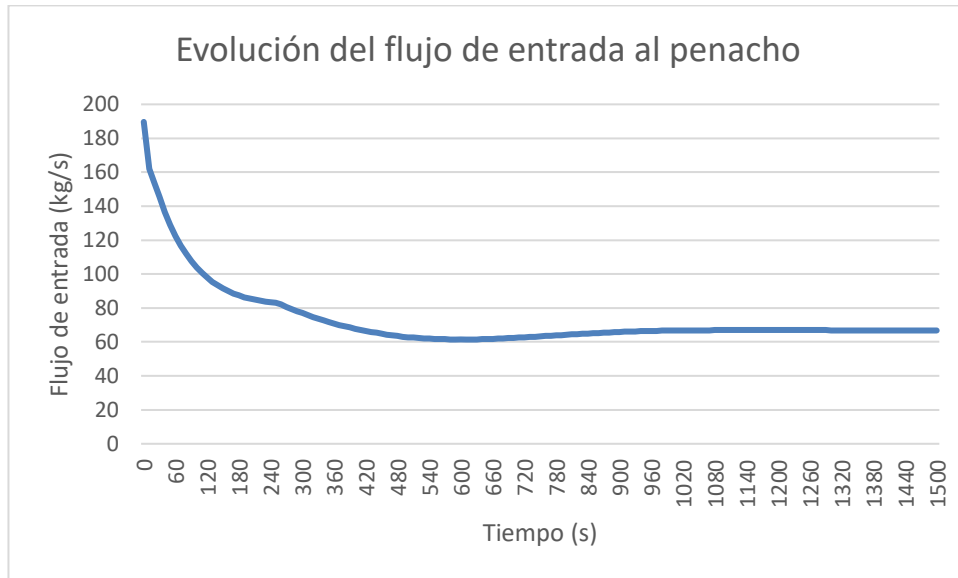
- Altura libre de humos



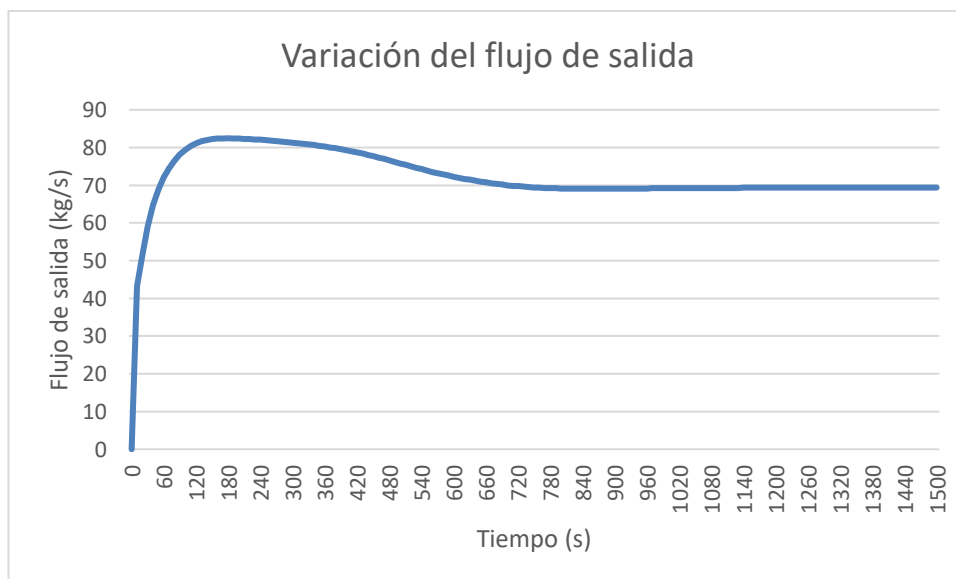
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



- Flujo de salida desde el compartimento

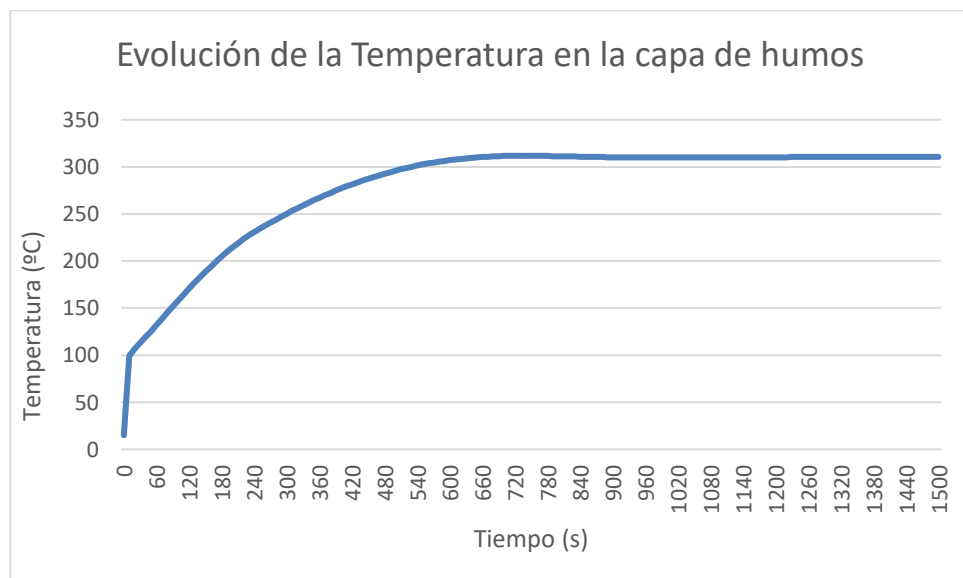


B.4 Simulación 4

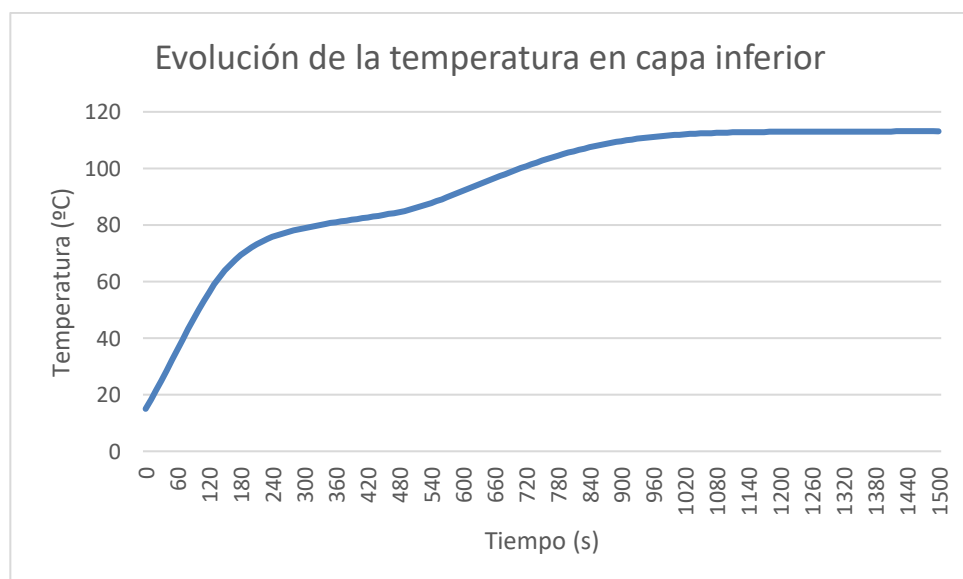
Variación respecto a la simulación **óptima**: forma de los exutorios redonda en lugar de cuadrada. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
VVENT, 2, 1, 1, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 10, 11  
VVENT, 2, 1, 2, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 10, 22  
VVENT, 2, 1, 3, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 10, 33  
VVENT, 2, 1, 4, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 10, 44  
VVENT, 2, 1, 5, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 20, 11  
VVENT, 2, 1, 6, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 20, 22  
VVENT, 2, 1, 7, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 20, 33  
VVENT, 2, 1, 8, 2.625, 1, TIME, ,, 0, 0, 0, 1, 20, 44
```

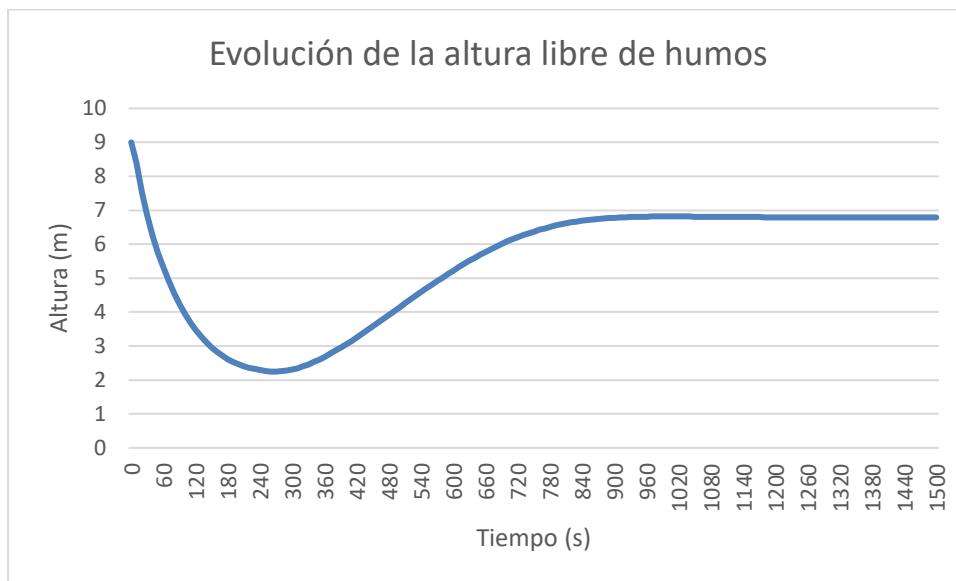
- Temperatura de la capa superior



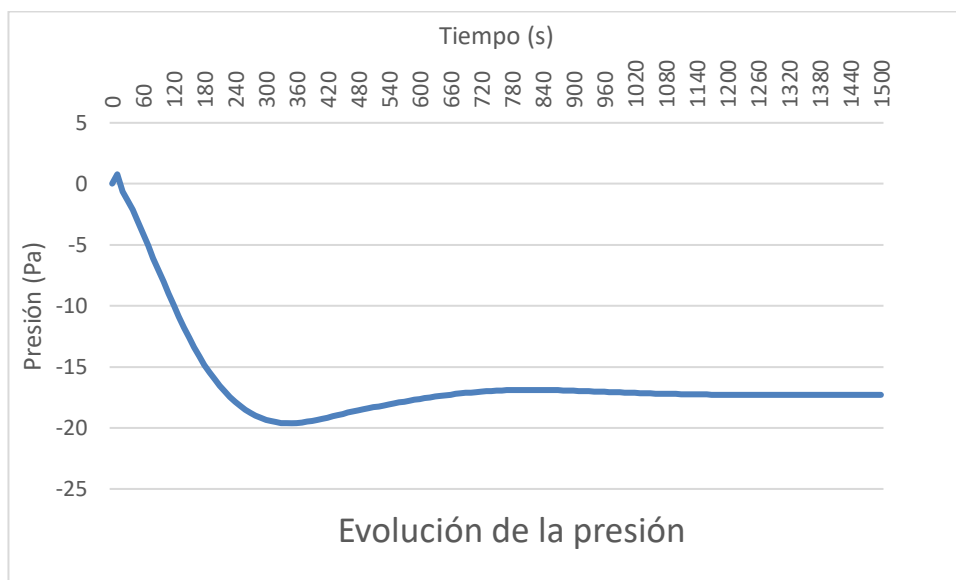
- Temperatura de la capa inferior



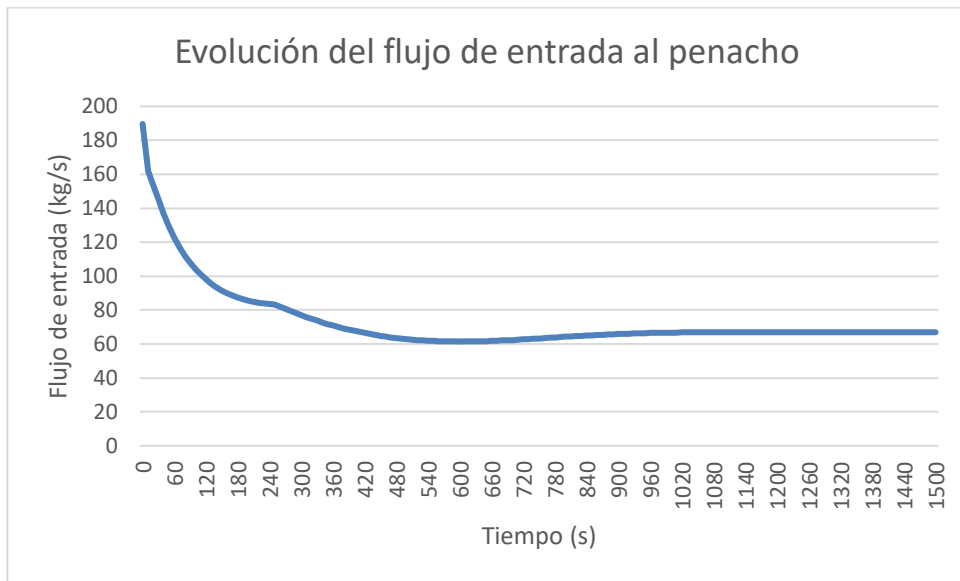
- Altura libre de humos



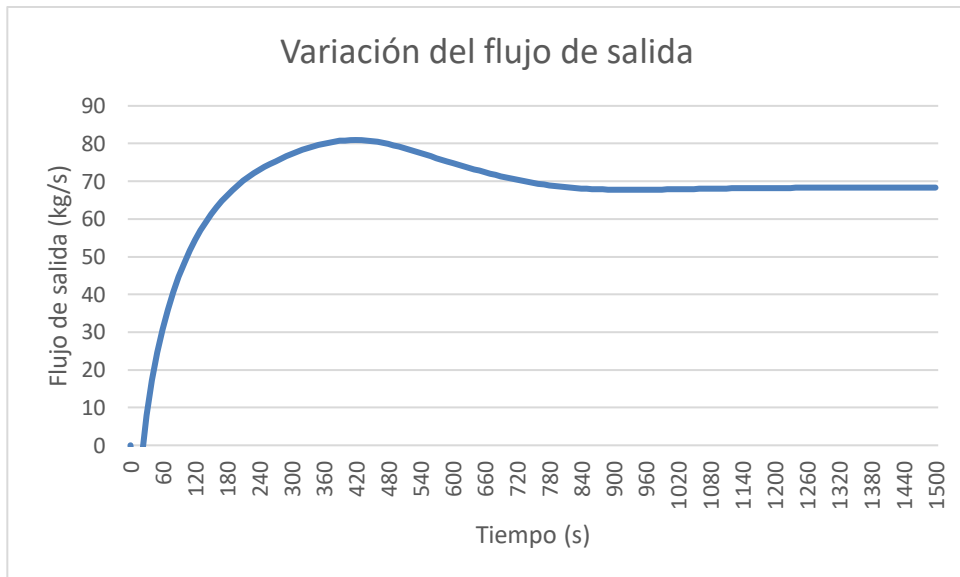
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



- Flujo de salida desde el compartimento



B.5 Simulación 5

Variación respecto a la simulación **óptima**: aumento del tamaño de los exutorios de salida. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima: Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
VVENT, 2, 1, 1, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 11
VVENT, 2, 1, 2, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 22
VVENT, 2, 1, 3, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 33
VVENT, 2, 1, 4, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 44
VVENT, 2, 1, 5, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 11
VVENT, 2, 1, 6, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 22
VVENT, 2, 1, 7, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 33
VVENT, 2, 1, 8, 3.94, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 44
```

B.6 Simulación 6

Variación a la simulación **óptima**: reducción del área de los exutorios de salida. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima: Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

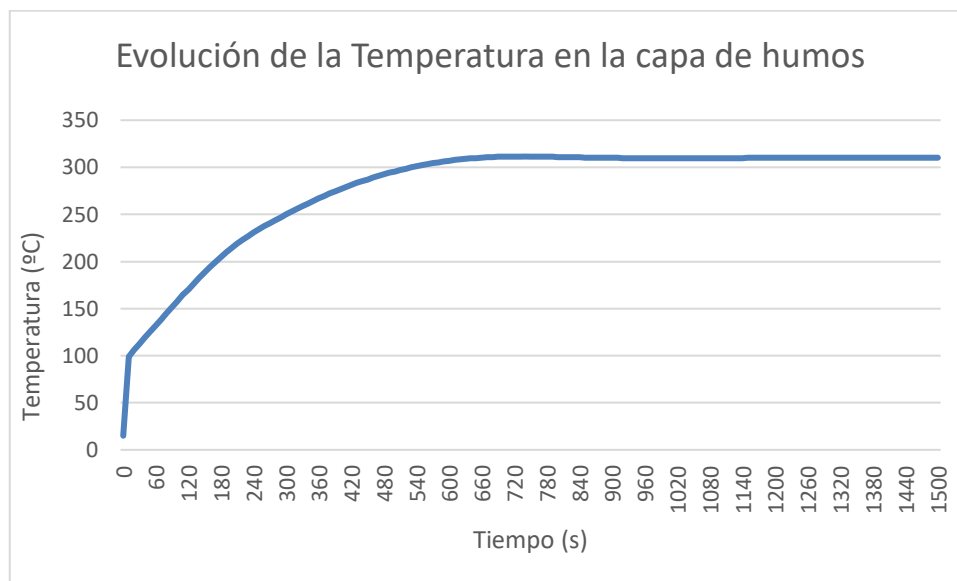
```
VVENT, 2, 1, 1, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 11
VVENT, 2, 1, 2, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 22
VVENT, 2, 1, 3, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 33
VVENT, 2, 1, 4, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 10, 44
VVENT, 2, 1, 5, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 11
VVENT, 2, 1, 6, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 22
VVENT, 2, 1, 7, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 33
VVENT, 2, 1, 8, 1.31, 1, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 20, 44
```


B.7 Simulación 7

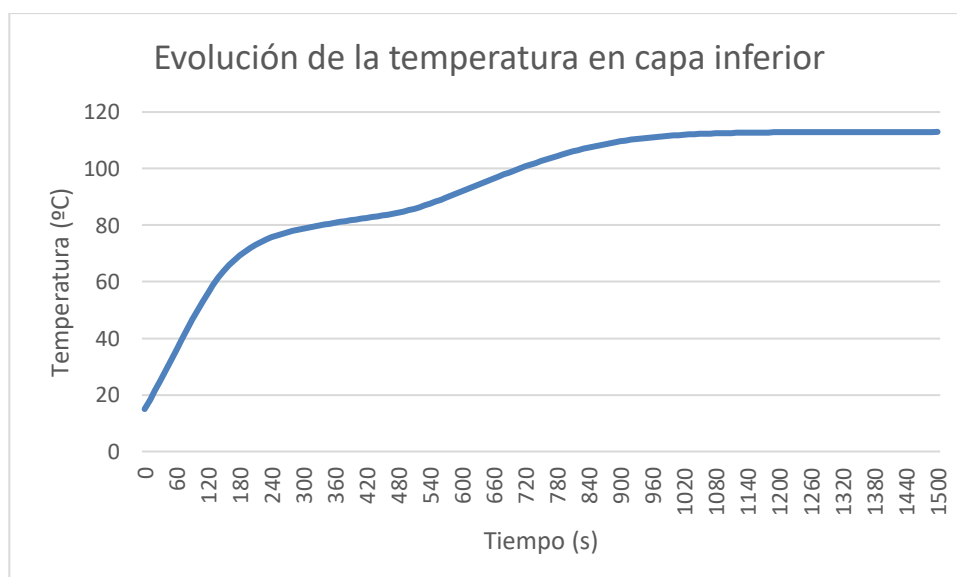
Variación respecto a la simulación **óptima**: división del área de entrada en seis exutorios. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima: Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
HVENT, 1, 2, 1, 1.42, 3.98, 1.5, 28, , 2, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 0, 0  
HVENT, 1, 2, 2, 1.42, 3.98, 1.5, 30.42, , 2, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 0, 0  
HVENT, 1, 2, 3, 1.42, 3.98, 1.5, 32.84, , 2, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 0, 0  
HVENT, 1, 2, 4, 1.42, 3.98, 1.5, 25.58, , 2, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 0, 0  
HVENT, 1, 2, 5, 1.42, 3.98, 1.5, 23.16, , 2, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 0, 0  
HVENT, 1, 2, 6, 1.42, 3.98, 1.5, 20.74, , 2, TIME, , , 0, 0, 0, 1, 0, 0
```

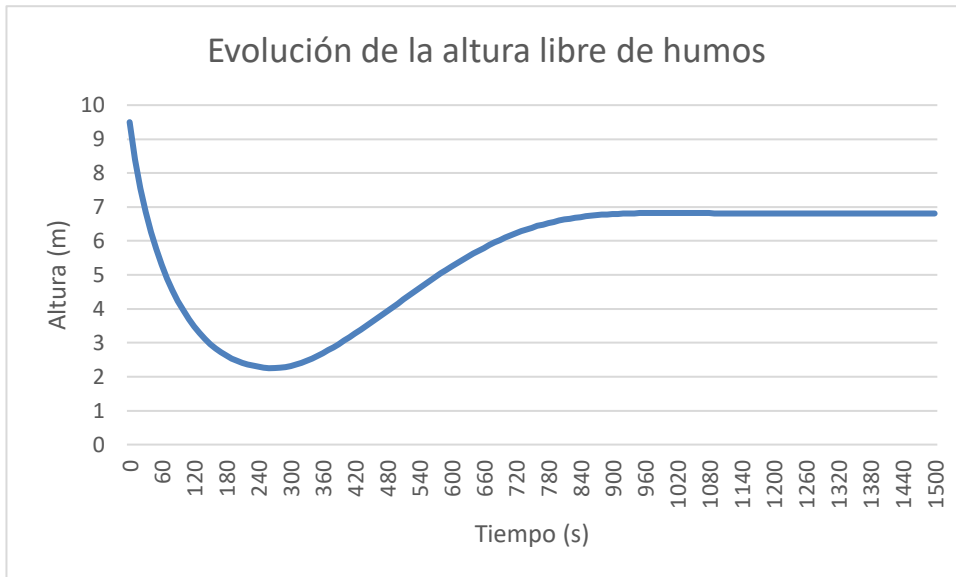
- Temperatura de la capa superior



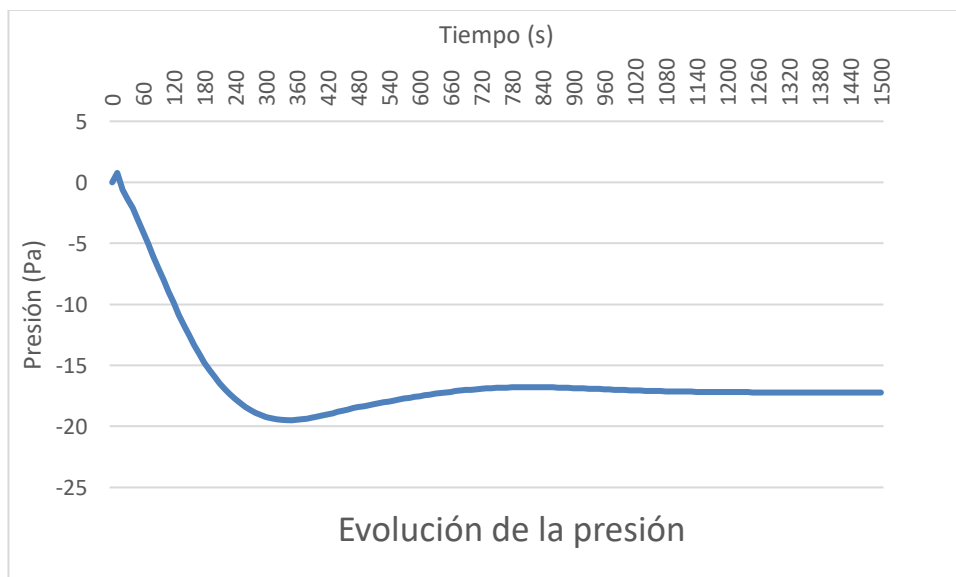
- Temperatura de la capa inferior



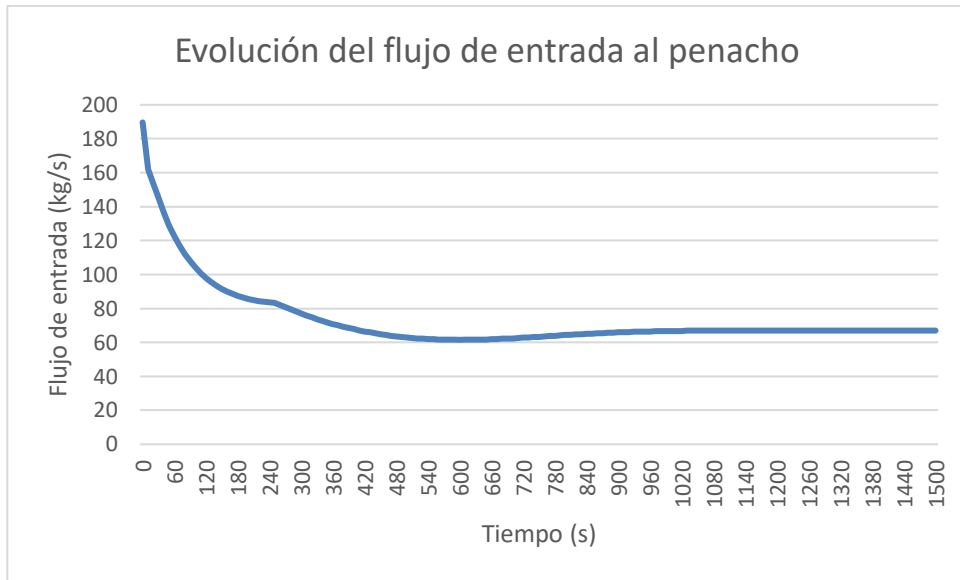
- Altura libre de humos



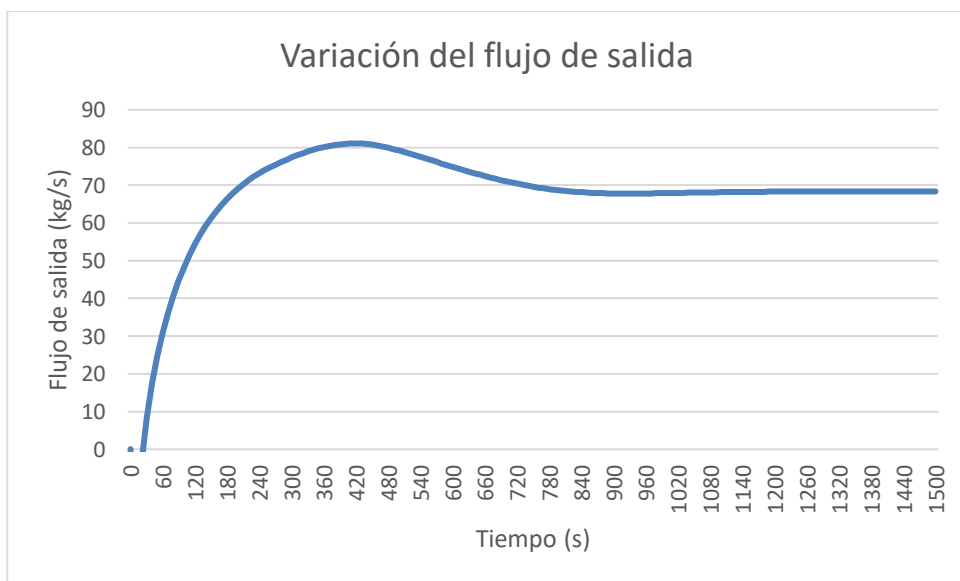
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



- Flujo de salida desde el compartimento



B.8 Simulación 8

Variación respecto a la simulación **óptima**: aumento de la superficie de entrada, aumentando el ancho de los exutorios. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
HVENT,2,1,1,12.7,3.98,1.5,23,,1,TIME,,,0,0,0,1,0,0
```

B.9 Simulación 9

Variación respecto a la simulación **óptima**: aumento de la superficie de entrada, aumentando la altura de los exutorios. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
HVENT,2,1,1,8.47,5.22,1.5,23,,1,TIME,,,0,0,0,1,0,0
```

B.10 Simulación 10

Variación respecto a la simulación **óptima**: posición de los exutorios de entrada colocados a menor altura (a ras de suelo). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
HVENT,2,1,1,8.47,2.48,0,23,,1,TIME,,,0,0,0,1,0,0
```

B.11 Simulación 11

Variación respecto a la simulación **óptima**: posición de los exutorios de entrada colocados a mayor altura (aumento de un metro sobre el suelo con relación a la simulación óptima). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
HVENT,2,1,1,8.47,4.98,2.5,23,,1,TIME,,,0,0,0,1,0,0
```

B.12 Simulación 12

Variación respecto a la simulación **óptima**: posición de los exutorios de entrada colocados en dos paredes en lugar de en una sola. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
HVENT,2,1,1,4.24,3.98,1.5,25,,2,TIME,,,0,0,0,1,0,0  
HVENT,2,1,2,4.24,3.98,1.5,25,,4,TIME,,,0,0,0,1,0,0
```

B.13 Simulación 13

Variación respecto a la simulación **óptima**: posición de los exutorios de entrada colocados en cuatro paredes en lugar de en una sola. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
HVENT,2,1,1,2.12,3.98,1.5,25,,2,TIME,,,0,0,0,1,0,0  
HVENT,2,1,2,2.12,3.98,1.5,25,,4,TIME,,,0,0,0,1,0,0  
HVENT,2,1,3,2.12,3.98,1.5,25,,1,TIME,,,0,0,0,1,0,0  
HVENT,2,1,4,2.12,3.98,1.5,25,,3,TIME,,,0,0,0,1,0,0
```

B.14 Simulación 14

Variación respecto a la simulación **óptima**: aumento del tamaño del compartimento. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
COMPA, Comp 1, 34, 59, 9.5, 0, 0, 0, OFF, OFF, OFF, 50, 50, 50
```

B.15 Simulación 15

Variación respecto a la simulación **óptima**: disminución del tamaño del compartimento. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
COMPA, Comp 1, 50, 25, 9.5, 0, 0, 0, OFF, OFF, OFF, 50, 50, 50
```

B.16 Simulación 16

Variación respecto a la simulación **óptima**: posición del fuego, situado juntos a los exutorios de entrada. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
FIRE, 1, 25, 22.5, 0, 1, TIME, 0, 0, 0, 0, New Fire
```

B.17 Simulación 17

Variación respecto a la simulación **óptima**: posición del fuego, situado pegado a la pared del fondo. Se mantiene el código de la simulación óptima, pero cambiando la siguiente línea:

```
FIRE, 1, 15, 49, 0, 1, TIME, 0, 0, 0, 0, New Fire
```

B.18 Simulación 18

Variación respecto a la simulación **óptima**: posición del fuego, situado pegado a la esquina del fondo a la izquierda. Se mantiene el código de la simulación óptima, pero cambiando la siguiente línea:

```
FIRE, 1, 5, 49, 0, 1, TIME, 0, 0, 0, 0, New Fire
```

B.19 Simulación 19

Variación respecto a la simulación **óptima**: área del incendio, se estudiarán varios casos. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
AREA, 120, 120
```

B.20 Simulación 20

Variación respecto a la simulación **óptima**: aumento del HRR. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
HRR, 3E+07, 3E+07
```


B.26 Simulación 26

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de acero en el techo del compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,STEEL1/8,48,559,7854,0.003,0.9,"Steel, Plain Carbon (1/8 in)"
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,STEEL1/8,OFF,OFF,50,50,50
```

B.27 Simulación 27

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de acero en el suelo del compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,STEEL1/8,48,559,7854,0.003,0.9,"Steel, Plain Carbon (1/8 in)"
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,OFF,STEEL1/8,OFF,50,50,50
```

B.28 Simulación 28

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de acero en paredes y techo del compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,STEEL1/8,48,559,7854,0.003,0.9,"Steel, Plain Carbon (1/8 in)"
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,STEEL1/8,OFF,STEEL1/8,50,50,50
```

B.29 Simulación 29

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de acero en todas las superficies que limitan el compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,STEEL1/8,48,559,7854,0.003,0.9,"Steel, Plain Carbon (1/8 in)"
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,STEEL1/8,STEEL1/8,STEEL1/8,50,50,50
..
```


B.30 Simulación 30

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de hormigón en el techo del compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,CONCRETE,1.75,1000,2200,0.15,0.94,"Concrete, Normal Weight (6 in)"  
!!  
!!Compartments  
!!  
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,OFF,OFF,CONCRETE,50,50,50
```

B.31 Simulación 31

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de hormigón en el techo del compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,CONCRETE,1.75,1000,2200,0.15,0.94,"Concrete, Normal Weight (6 in)"  
!!  
!!Compartments  
!!  
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,CONCRETE,OFF,OFF,50,50,50
```

B.32 Simulación 32

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de hormigón en el suelo del compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,CONCRETE,1.75,1000,2200,0.15,0.94,"Concrete, Normal Weight (6 in)"
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,OFF,CONCRETE,OFF,50,50,50
```

B.33 Simulación 33

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de hormigón en paredes y techo del compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,CONCRETE,1.75,1000,2200,0.15,0.94,"Concrete, Normal Weight (6 in)"
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,CONCRETE,OFF,CONCRETE,50,50,50
```

B.34 Simulación 34

Variación respecto a la simulación **óptima**: definición de hormigón en todas las superficies que limitan el compartimento. Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,CONCRETE,1.75,1000,2200,0.15,0.94,"Concrete, Normal Weight (6 in)"
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50
```

B.35 Simulación 35

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en parámetros relativos a los materiales de construcción (conductividad térmica). Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,NM1,72,559,7854,0.003,0.9,New Material 1
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,NM1,NM1,NM1,50,50,50
```

B.36 Simulación 36

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en parámetros relativos a los materiales de construcción (calor específico). Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,NM1,48,840,7854,0.003,0.9,New Material 1
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,NM1,NM1,NM1,50,50,50
```

B.37 Simulación 37

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en parámetros relativos a los materiales de construcción (densidad). Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,NM1,48,559,11781,0.003,0.9,New Material 1
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,NM1,NM1,NM1,50,50,50
```

B.38 Simulación 38

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en parámetros relativos a los materiales de construcción (espesor). Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,NM4,48,559,7854,0.015,0.9,New Material 4
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,NM4,NM4,NM4,50,50,50
..
```

B.39 Simulación 39

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en parámetros relativos a los materiales de construcción (emisividad). Se variarán las siguientes líneas de código respecto a la simulación óptima:

```
MATL,NM1,48,559,7854,0.003,1.35,New Material 1
!!
!!Compartments
!!
COMPA,Comp 1,30,54,9.5,0,0,0,NM1,NM1,NM1,50,50,50
```

B.40 Simulación 40

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la composición química del combustible (I). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CHEMI,5,1,4,0,0,0.35,2E+07
```

B.41 Simulación 41

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la composición química del combustible (II). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CHEMI, 5, 1, 4, 1, 1, 0.35, 2E+07
```

B.42 Simulación 42

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la composición química del combustible (III). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CHEMI, 10, 2, 8, 2, 2, 0.35, 2E+07
```

B.43 Simulación 43

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la composición química del combustible (IV). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CHEMI, 2, 8, 2, 8, 8, 0.35, 2E+07
```

B.44 Simulación 44

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la cantidad de CO contenido. Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CO, 0.1, 0.1
```

B.45 Simulación 45

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la cantidad de carbonilla presente (I). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
SOOT, 0.015, 0.015
```

B.46 Simulación 46

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la cantidad de carbonilla presente (II). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
SOOT, 0.03, 0.03
```

B.47 Simulación 47

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la cantidad de carbonilla presente (III). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
SOOT, 0.0075, 0.0075
```

B.48 Simulación 48

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en la cantidad de carbonilla presente (IV). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
SOOT,0.1,0.1
```

B.49 Simulación 49

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en el valor del factor de radiación (0.3). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CHEMI,1,0,0,0,0,0.3,2E+07
```

B.50 Simulación 50

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en el valor del factor de radiación (0.4). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CHEMI,1,0,0,0,0,0.4,2E+07
```

B.51 Simulación 51

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en el valor del factor de radiación (0.5). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

```
CHEMI,1,0,0,0,0,0.5,2E+07
```

B.52 Simulación 52

Variación respecto a la simulación **óptima**: cambios en el valor del factor de radiación (0.2). Se variará la siguiente línea de código respecto a la simulación óptima:

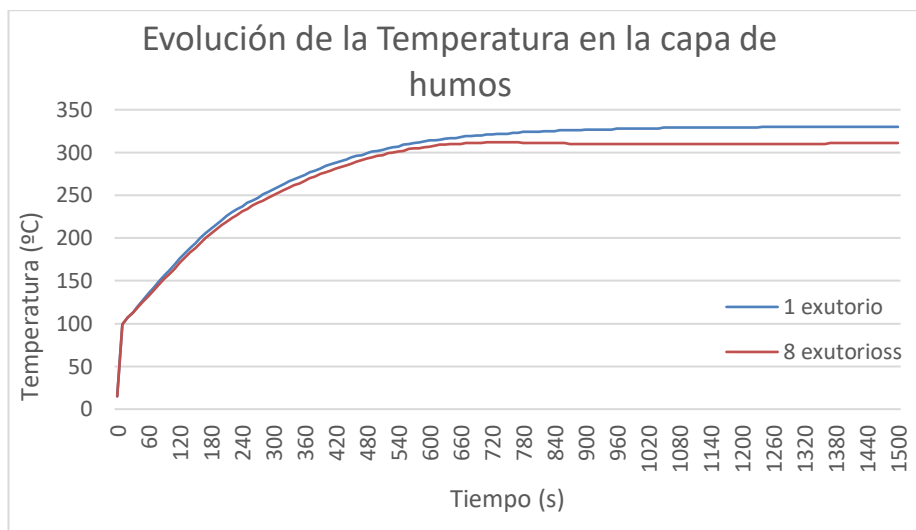
```
CHEMI,1,0,0,0,0,0.2,2E+07
```

ANEXO C: COMPARACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

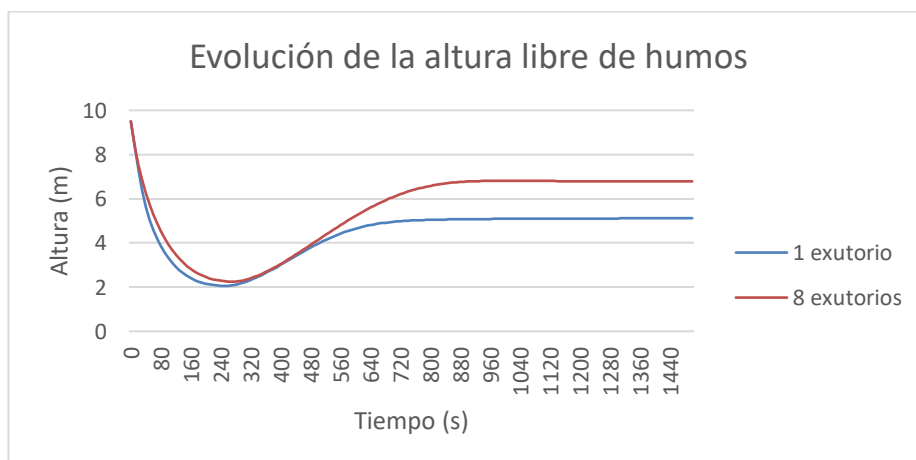
En este anexo, se desean comparar los resultados obtenidos en las distintas simulaciones, aquellos en los que se observen variaciones importantes y que puedan analizarse rápidamente con un simple vistazo a dichas gráficas.

C.1 Comparativa de resultados entre disponer uno u ocho exutorios de salida

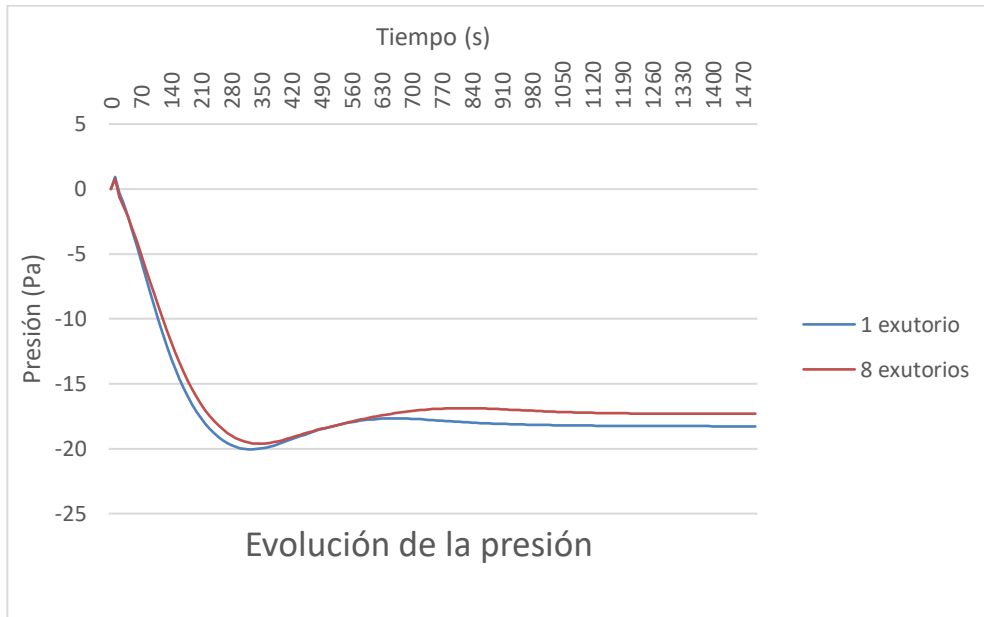
- Temperatura de la capa de humos



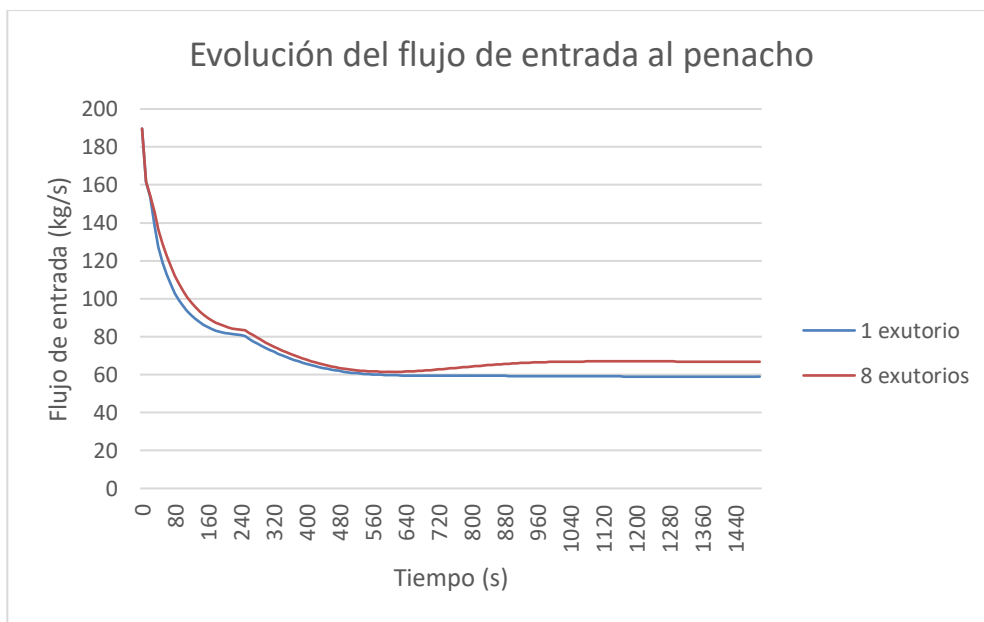
- Altura libre de humos



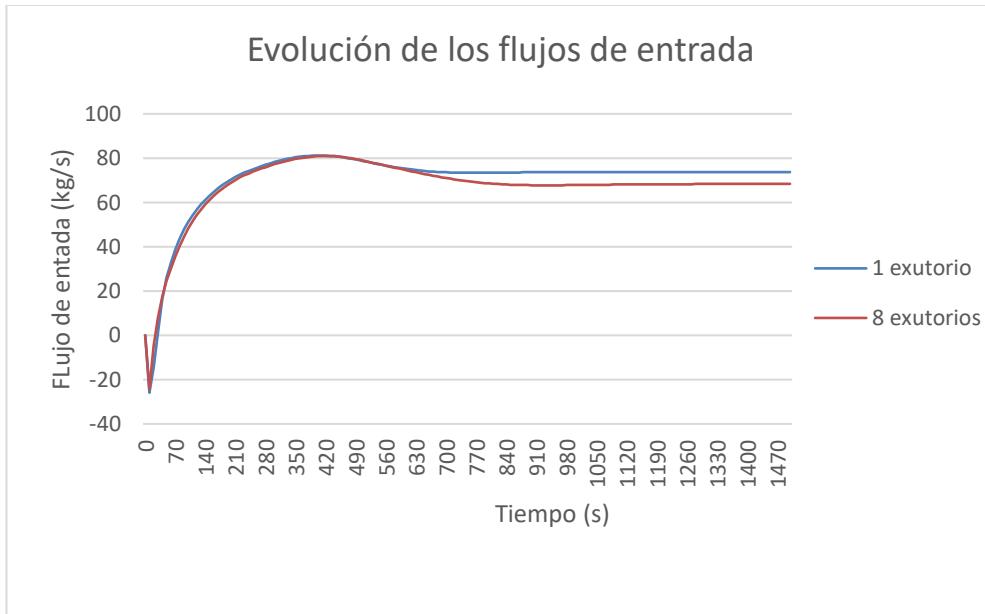
- Presión



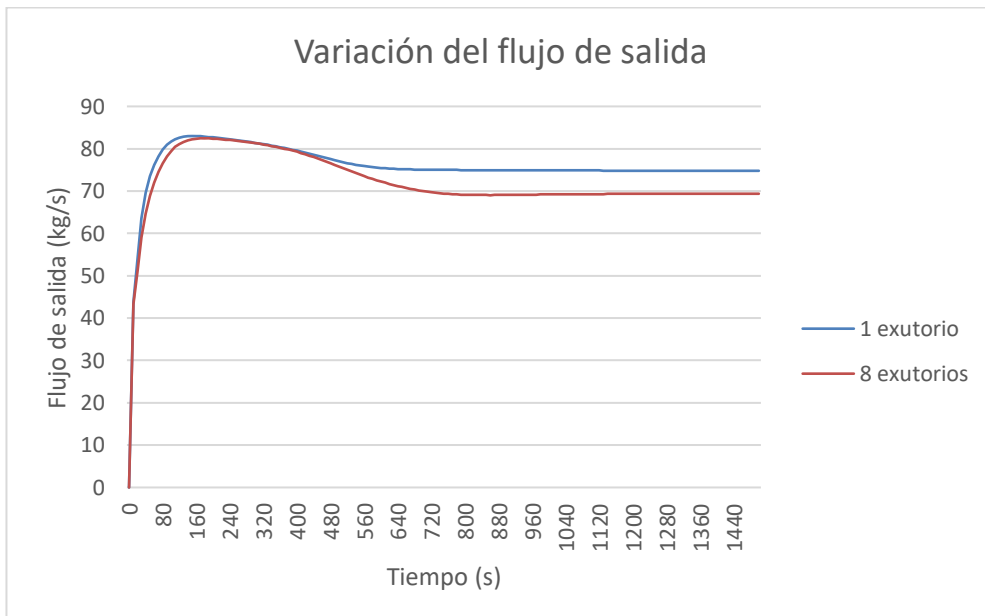
- Flujo de entrada al penacho



- Flujo de entrada al compartimento



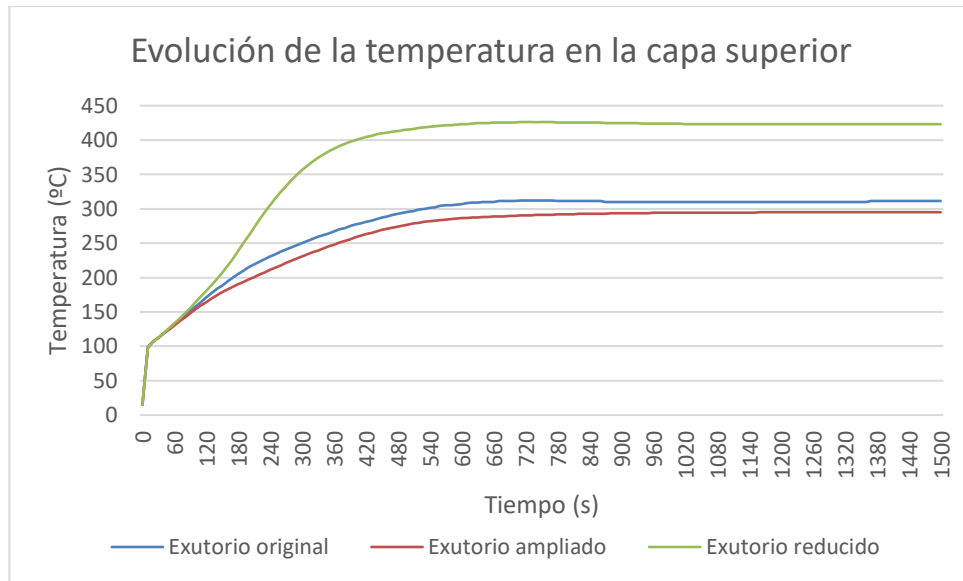
- Flujos de salida desde el compartimento



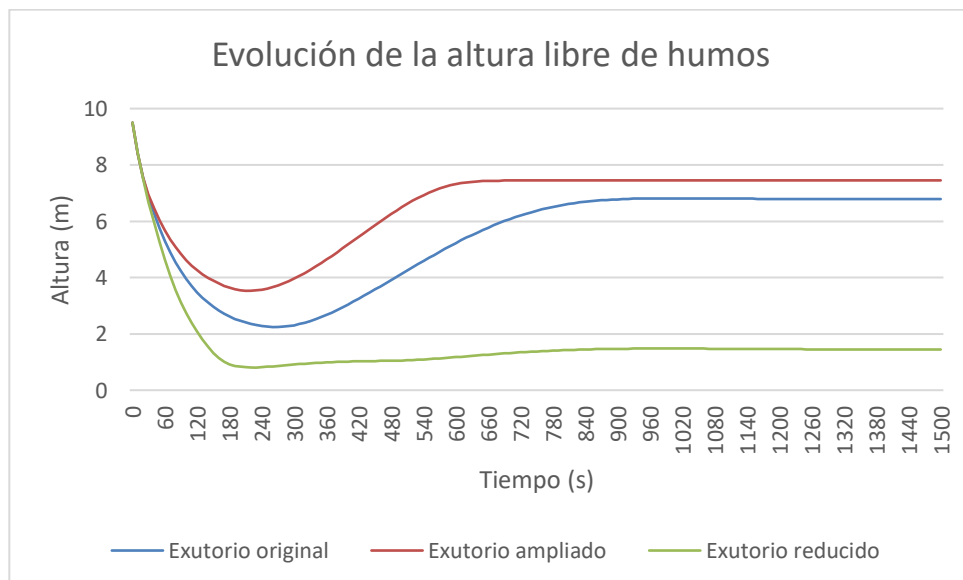
C.2 Comparativa de resultados ante variaciones de tamaño en los exutorios de salida

En este caso, se representan gráficamente tres casos casi idénticos, donde la única variación es el tamaño de la superficie de salida: la original en el primer caso, mientras que en segundo caso se aumenta un 50% dicha superficie y en el tercero se reduce en la misma proporción. Además, se mantienen ocho exutorios de salida en todos los casos.

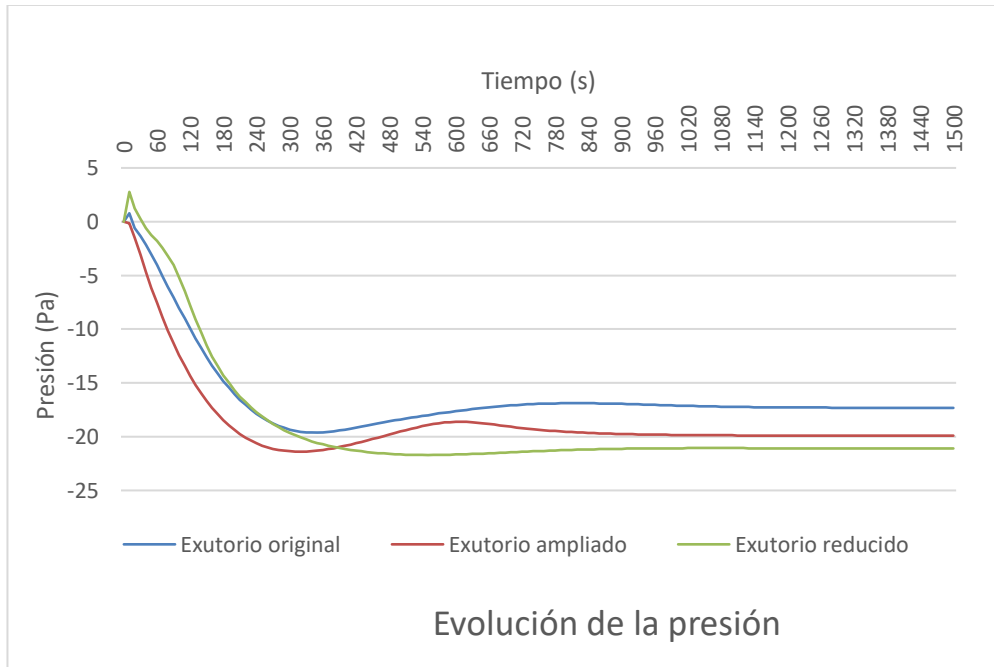
- Temperatura de la capa superior



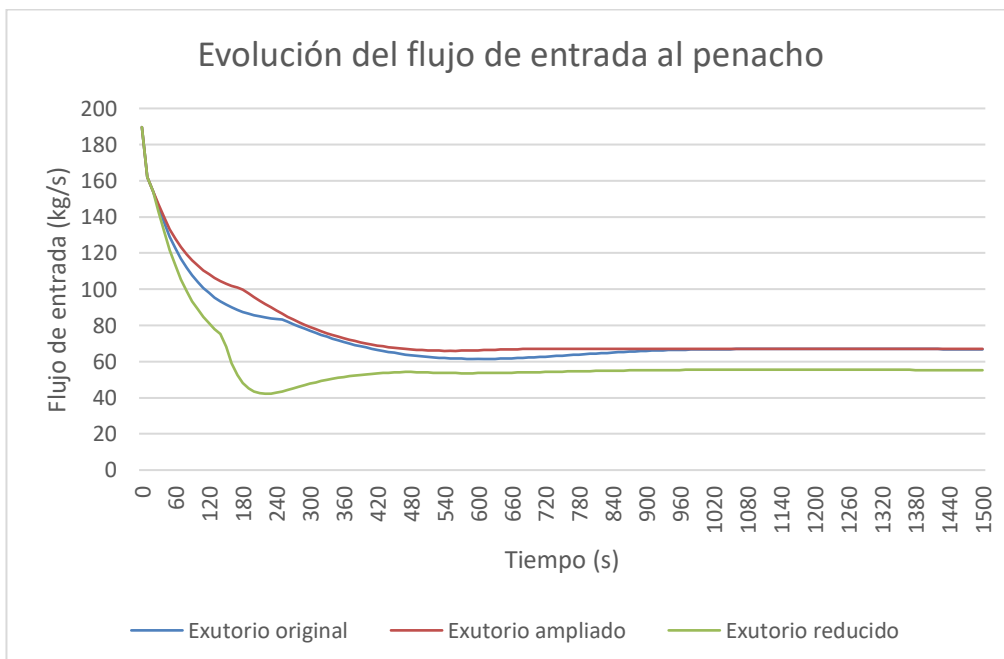
- Altura libre de humos



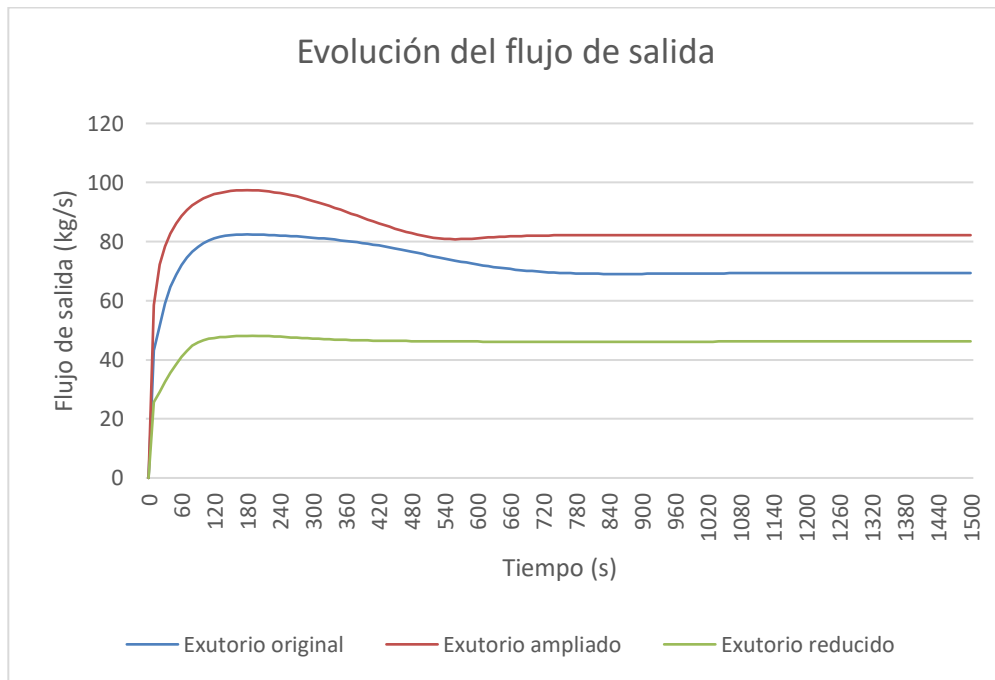
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



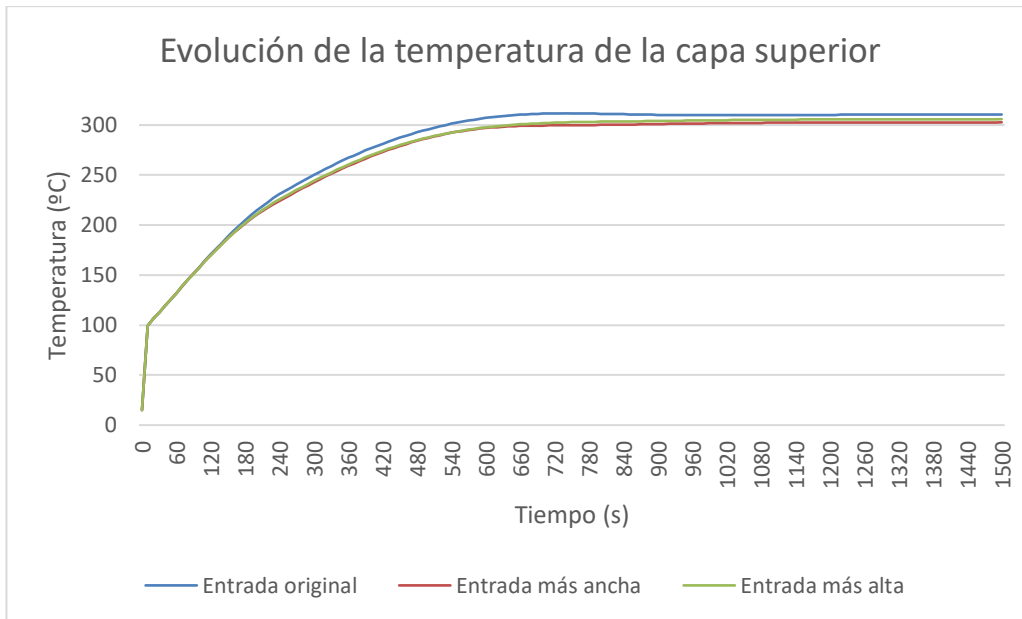
- Flujo de salida



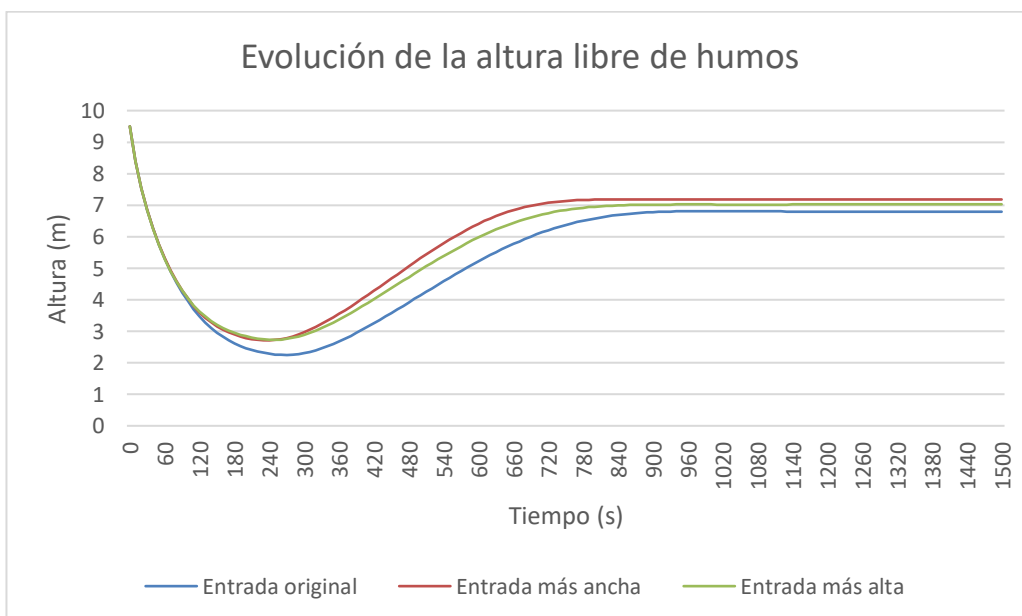
C.3 Comparativa de resultados ante variaciones de tamaño en el exutorio de entrada

En este caso, se representan gráficamente tres casos casi idénticos, donde la única variación es el tamaño de la superficie de entrada, la original en el primer caso mientras que en los dos siguientes se aumenta un 50% dicha superficie, tanto en anchura (simulación 8) como en altura (simulación 9). Además, se mantienen ocho exutorios de salida en todos los casos.

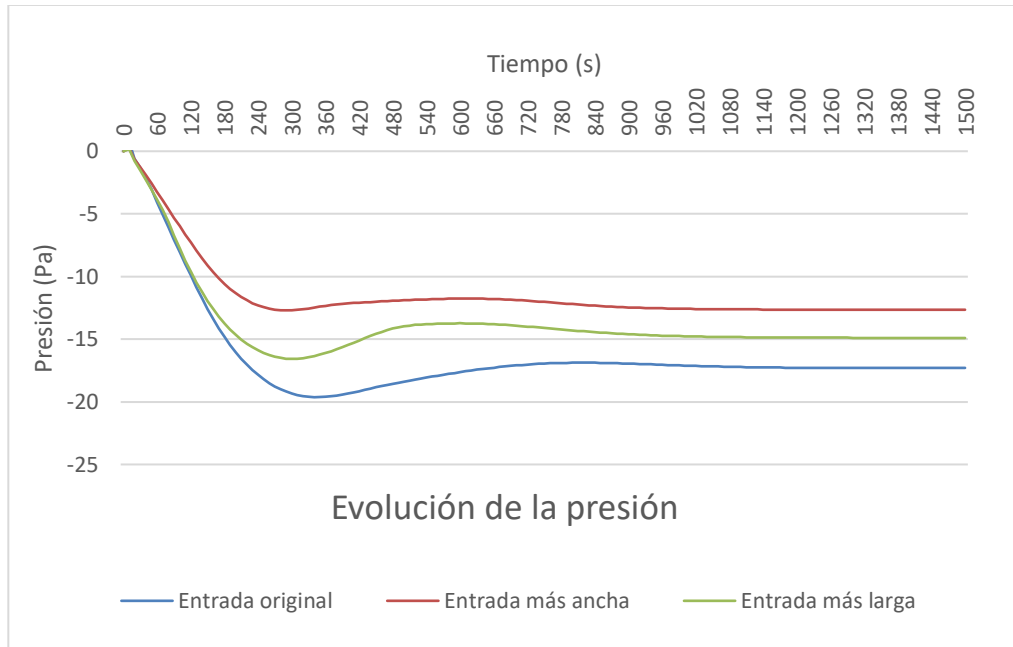
- Temperatura de la capa superior



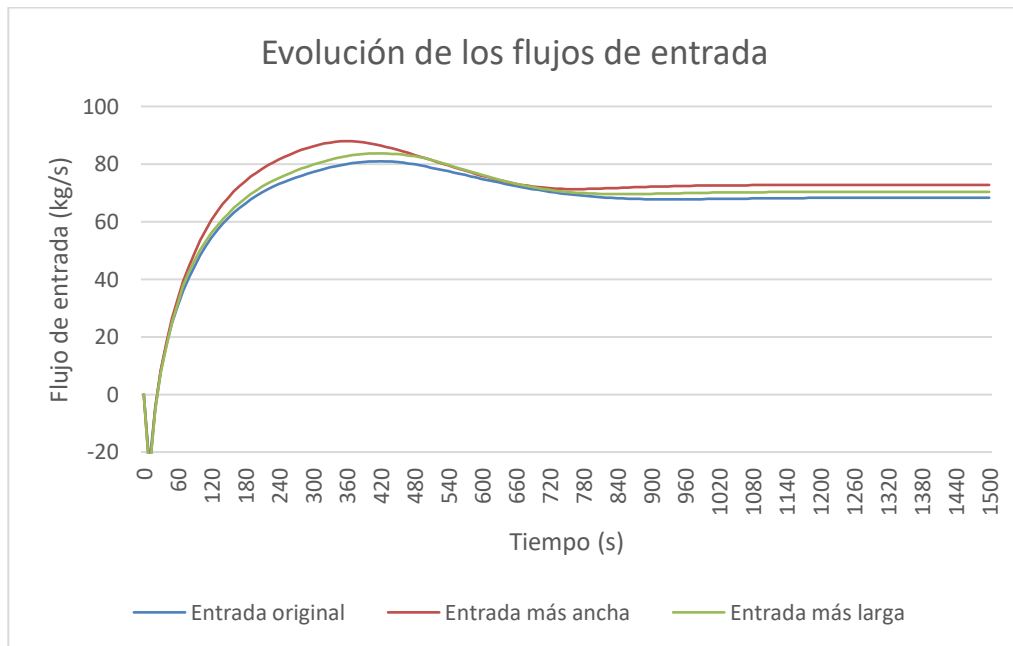
- Altura libre de humos



- Presión



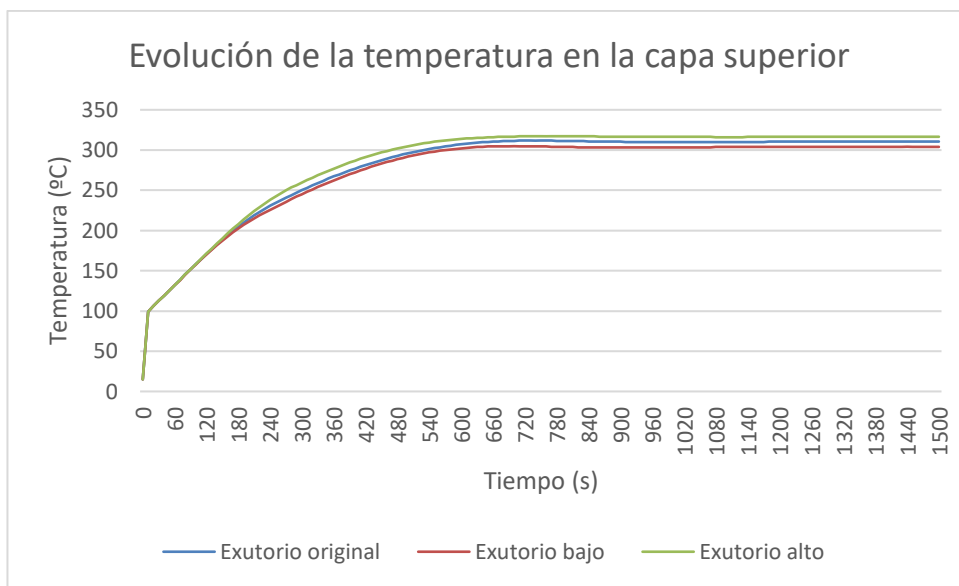
- Flujos de entrada al compartimento



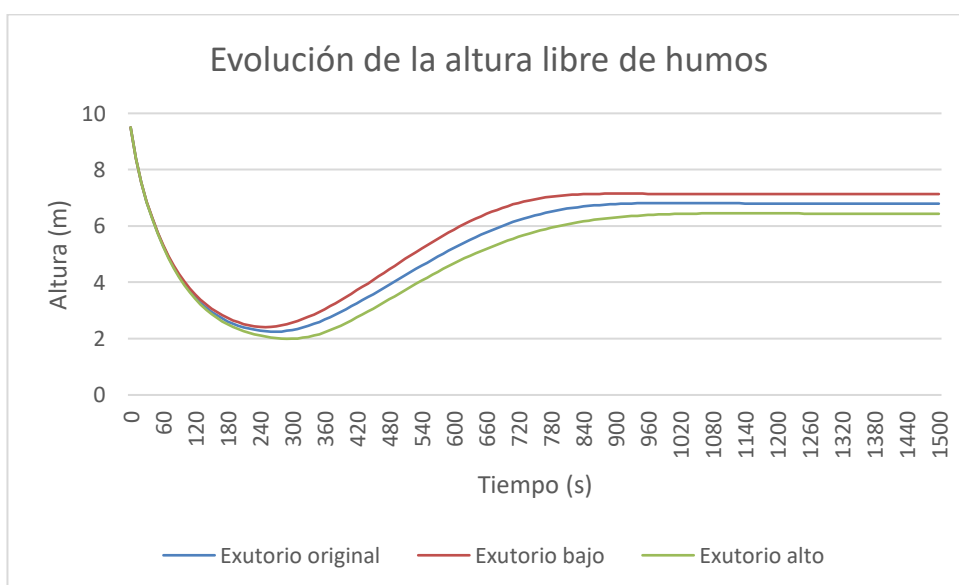
C.4 Comparativa de resultados ante variaciones de posición en el exutorio de entrada

En el presente anexo se desea analizar como afecta a los resultados que se modifique la posición de las zonas de admisión de aire fresco. Para ello se analizan tres casos: el caso original (exutorios de entrada a 1.5 metros sobre el nivel del suelo), el caso de exutorios situados más bajos (exutorios de entrada situados a nivel del suelo), denominada simulación 10 y el caso de exutorios situados más altos (exutorios de entrada situados a 2.5 metros sobre el suelo), denominada simulación 11.

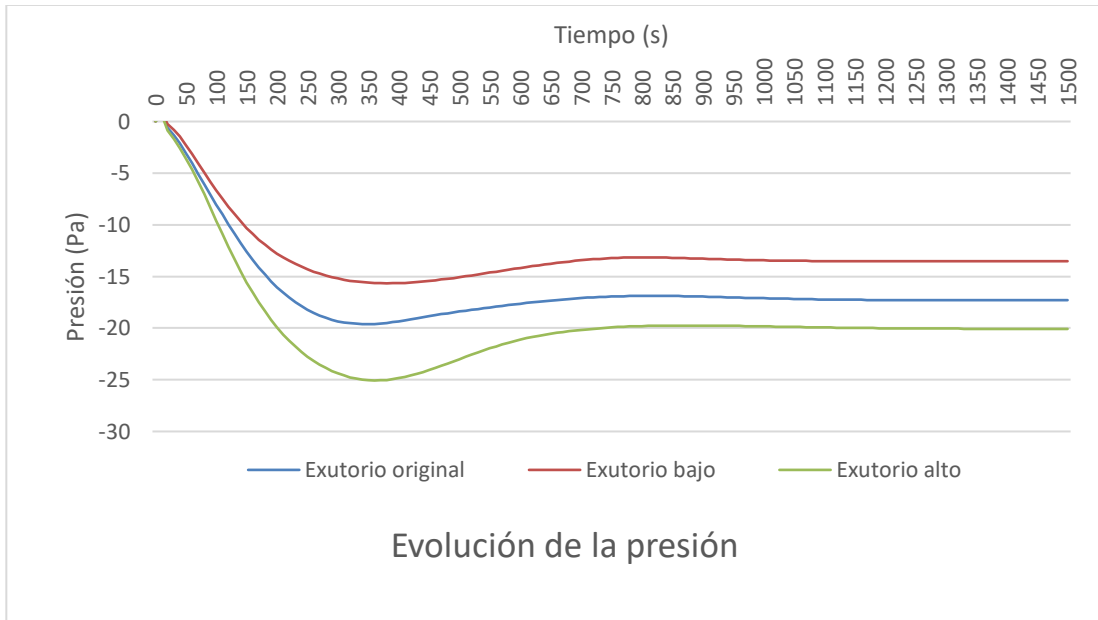
- Temperatura de la capa superior



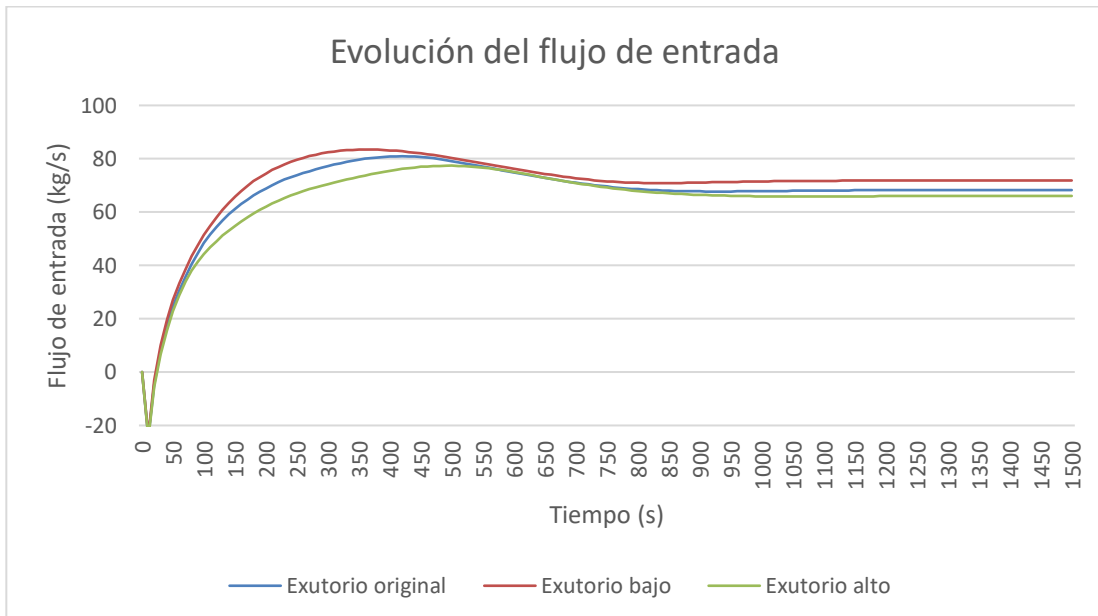
- Altura libre de humos



- Presión



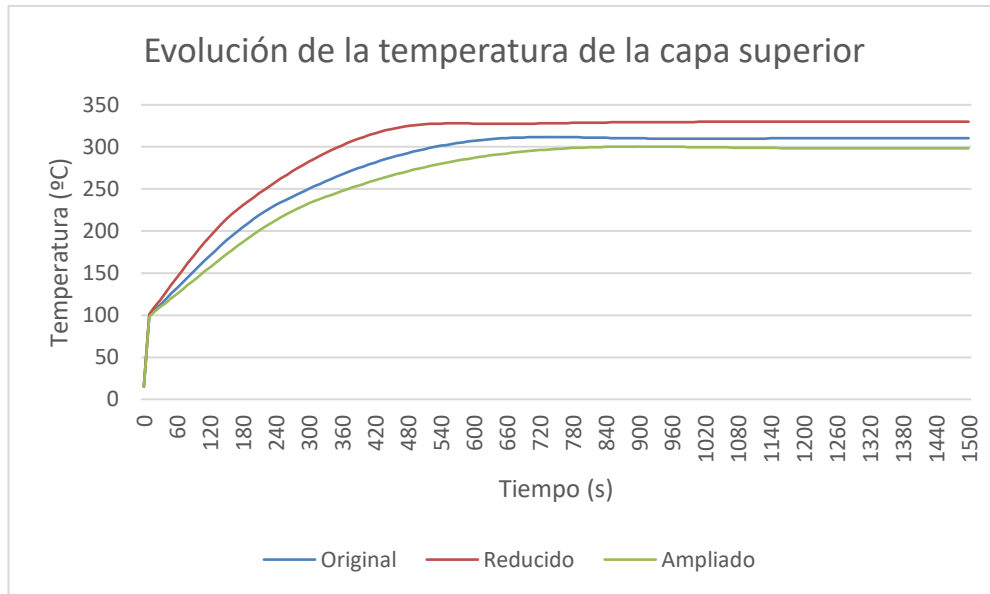
- Flujo de entrada



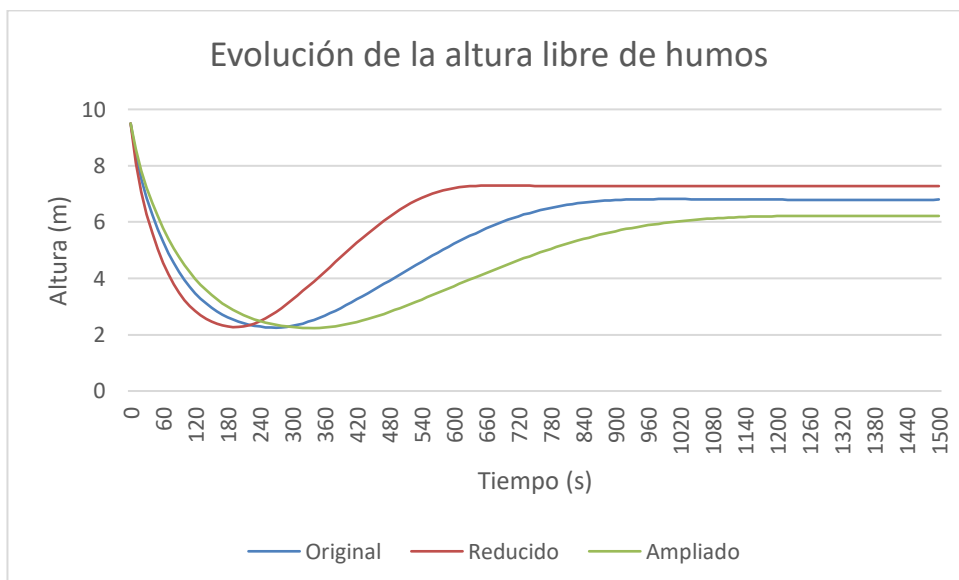
C.5 Comparativa de resultados ante variaciones en el tamaño del compartimento

Mostramos, a continuación, la evolución de las principales salidas, en función del tamaño del compartimento. s

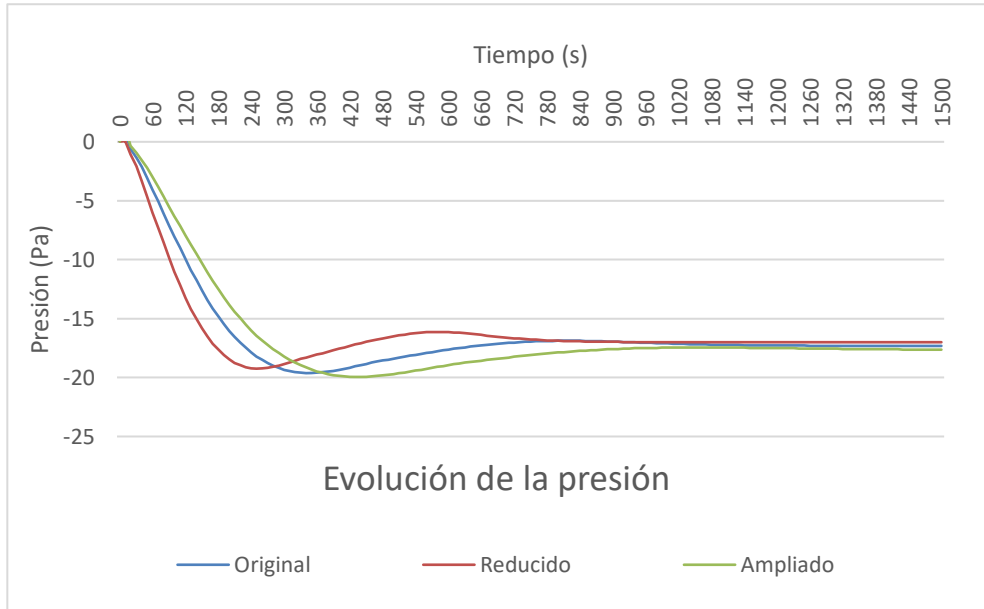
- Temperatura de la capa superior



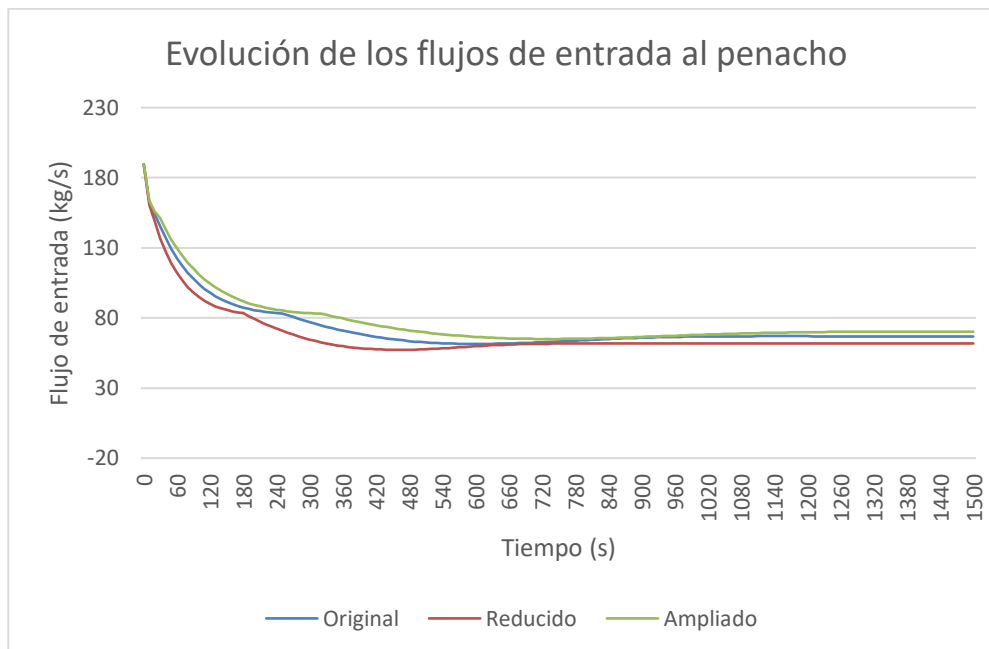
- Altura libre de humos



- Presión



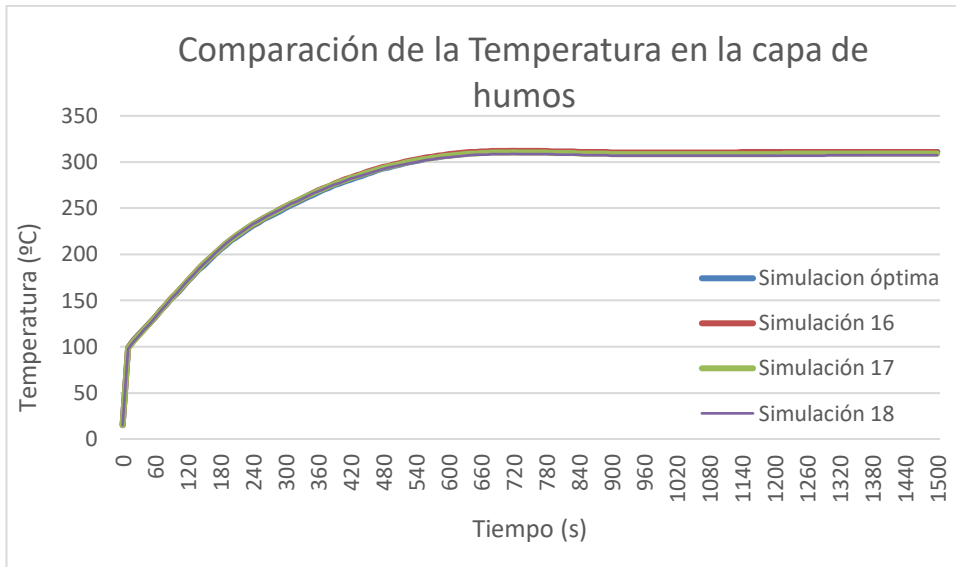
- Flujo de entrada al penacho



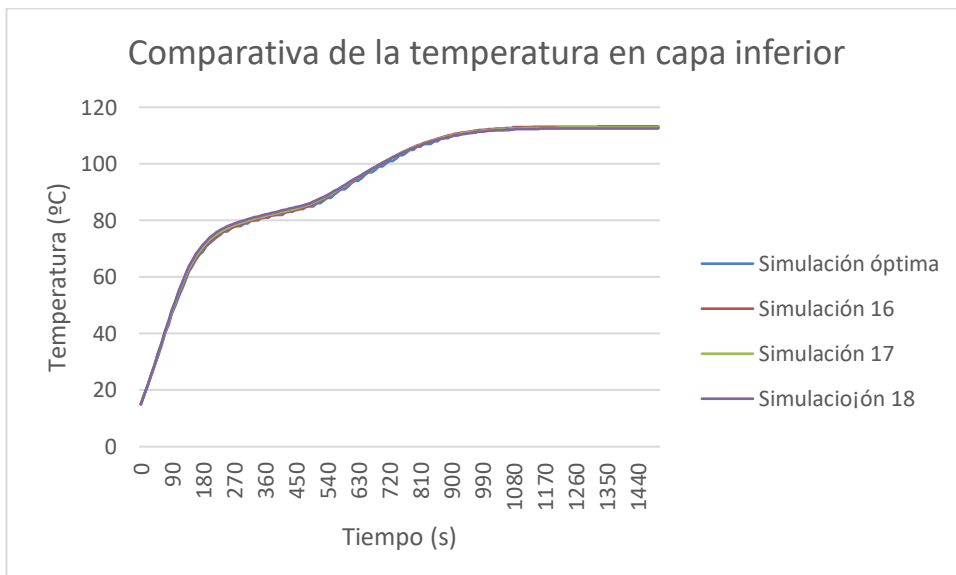
C.6 Comparativa de resultados antes variaciones en la posición del incendio

Mostramos, a continuación, la evolución de las principales salidas, en función de la posición del incendio dentro del compartimento.

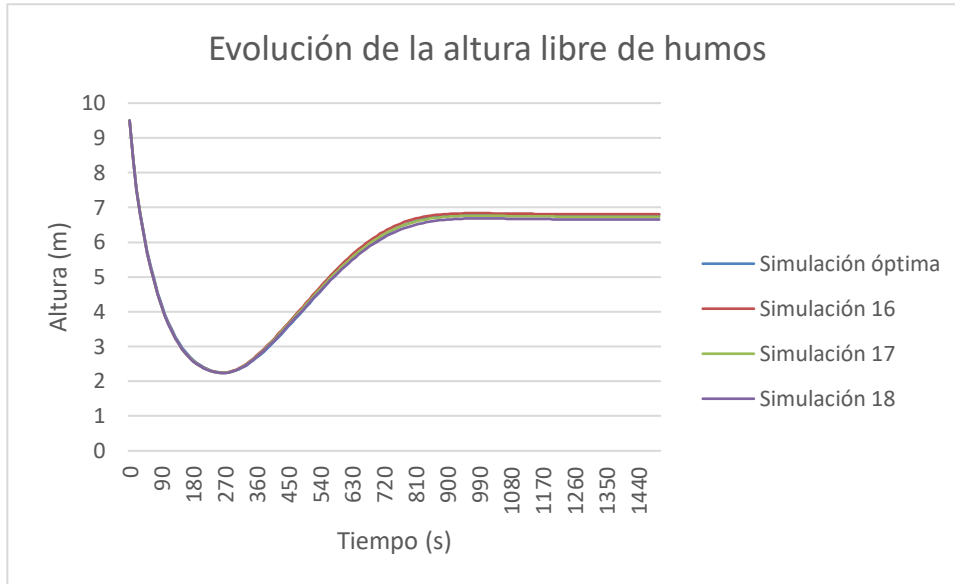
- Temperatura de la capa superior



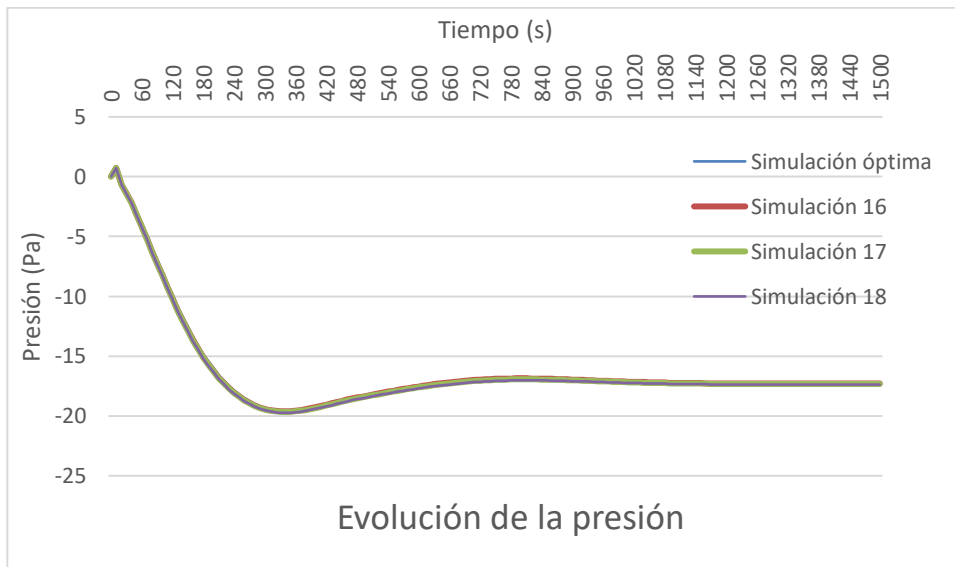
- Temperatura de la capa inferior



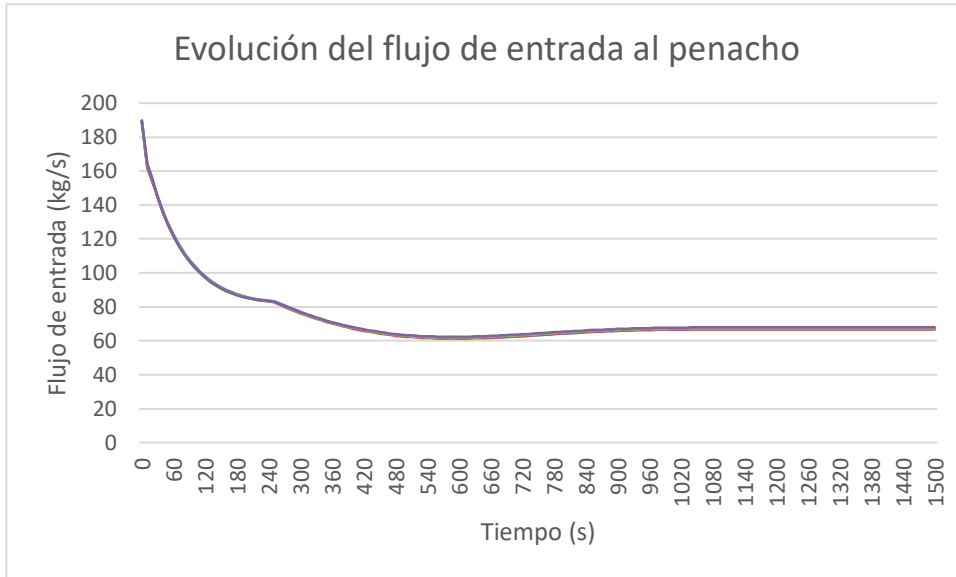
- Altura libre de humos



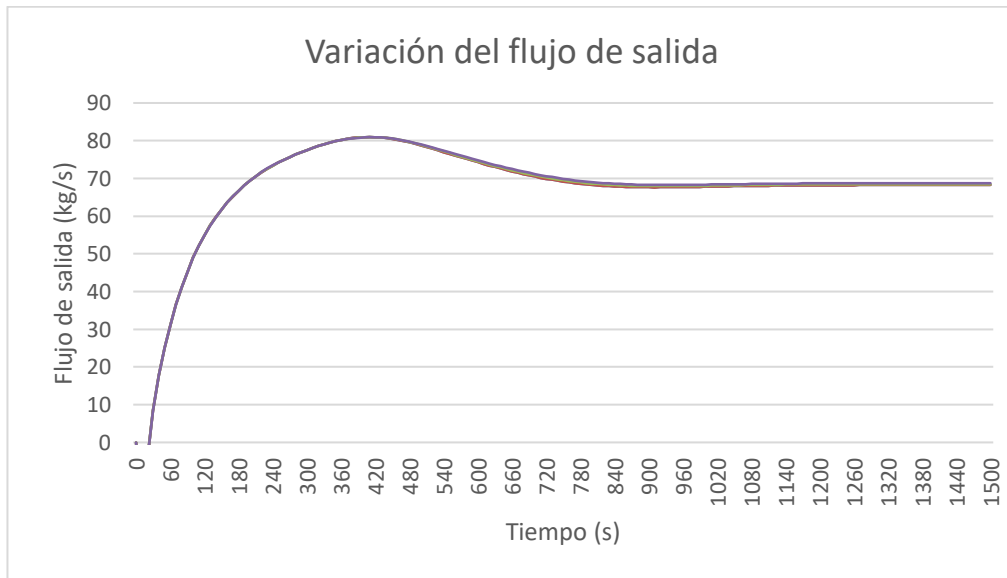
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



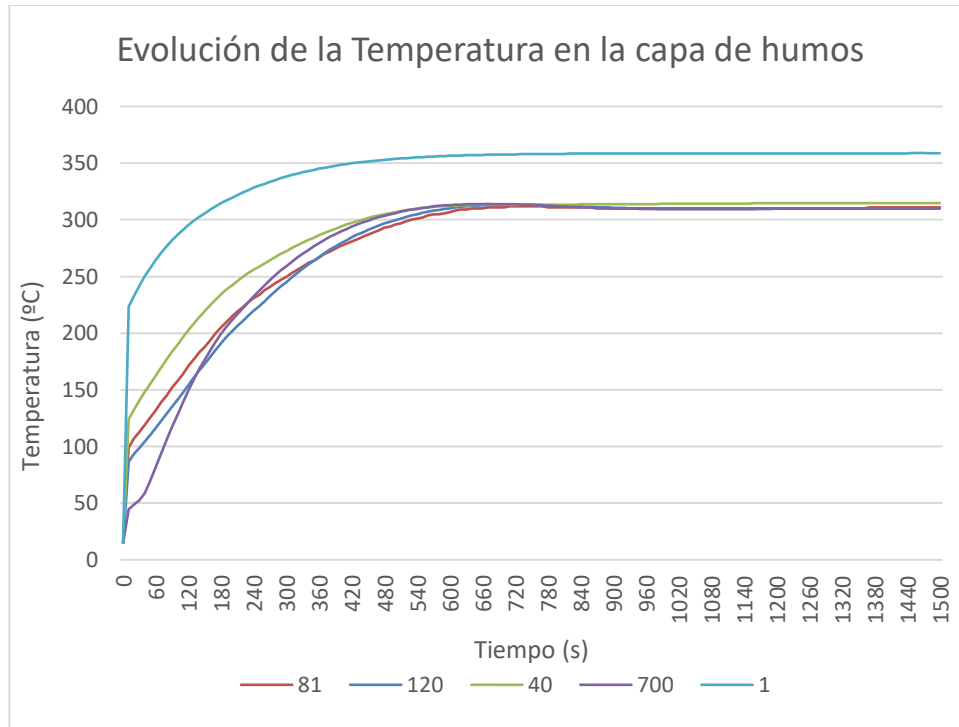
- Flujo de salida desde el compartimento



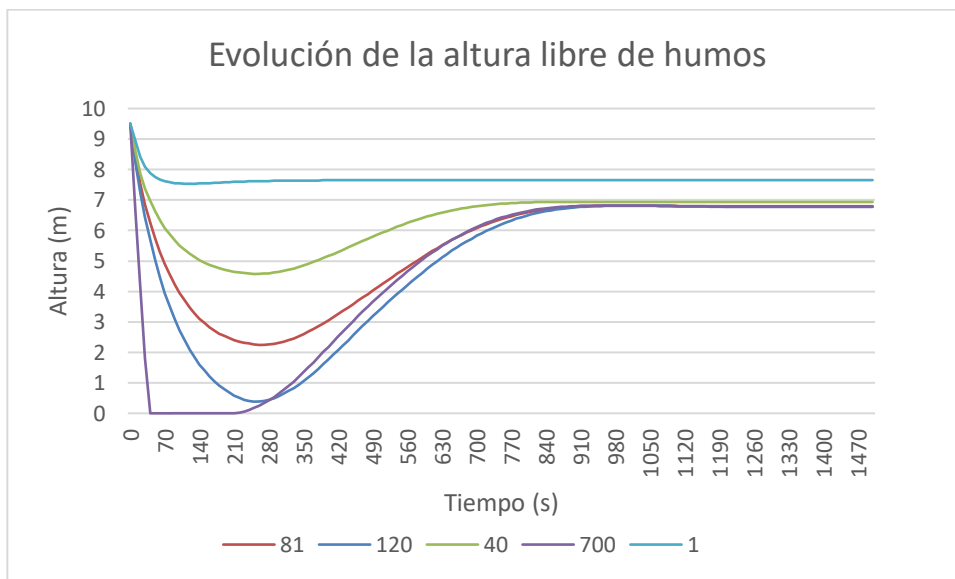
C.7 Comparativa de resultados ante variaciones en el área de incendio

En este punto del anexo, se compararán distintas situaciones en las que variamos el área del incendio. Concretamente, se analizan cinco situaciones que son (áreas en metros cuadrados): 81, 120, 40, 700, 1.

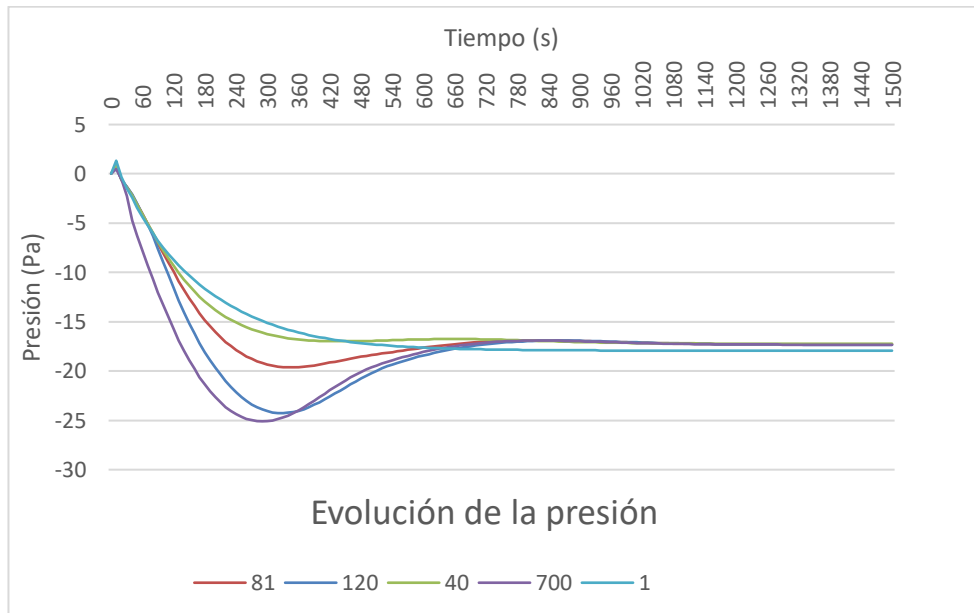
- Temperatura de la capa superior



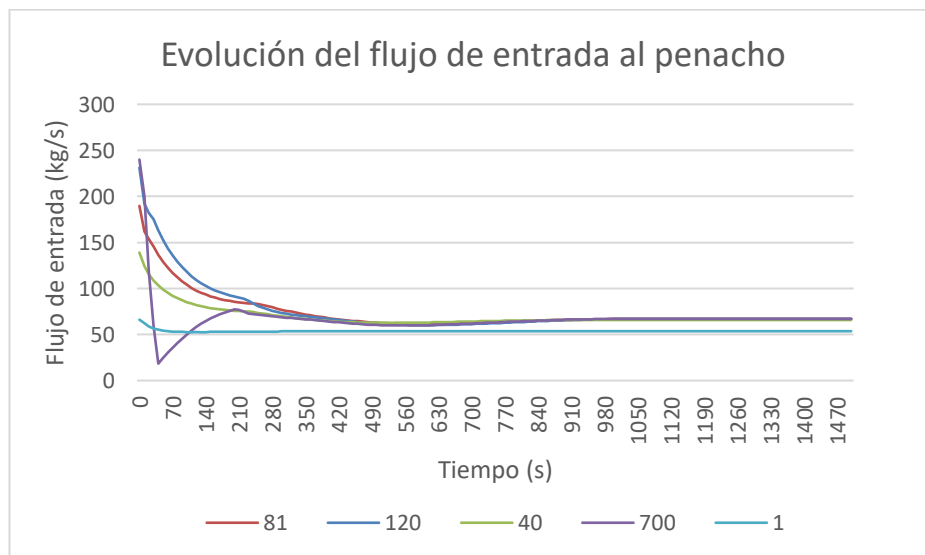
- Altura libre de humos



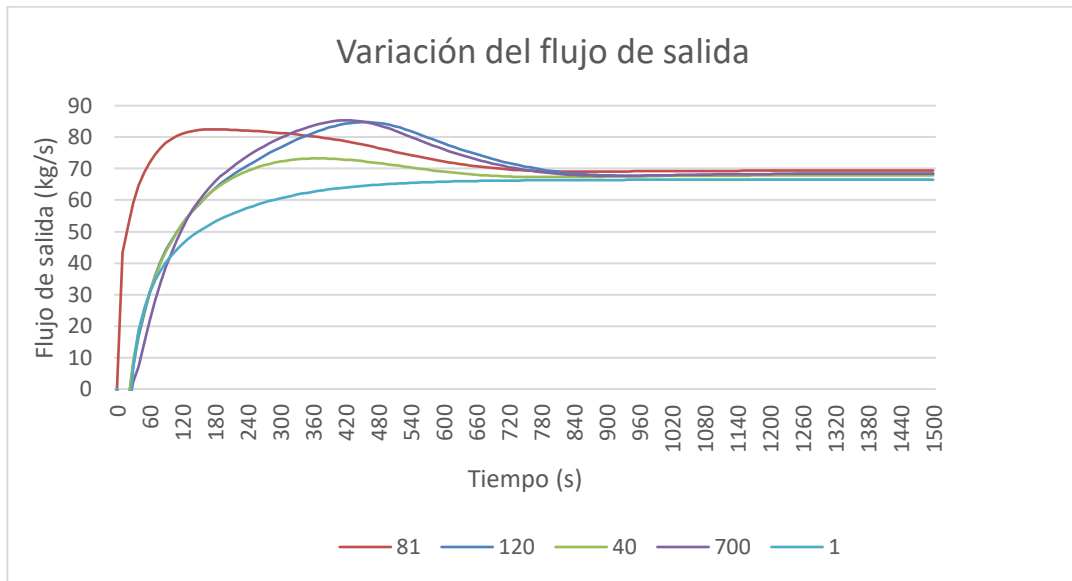
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



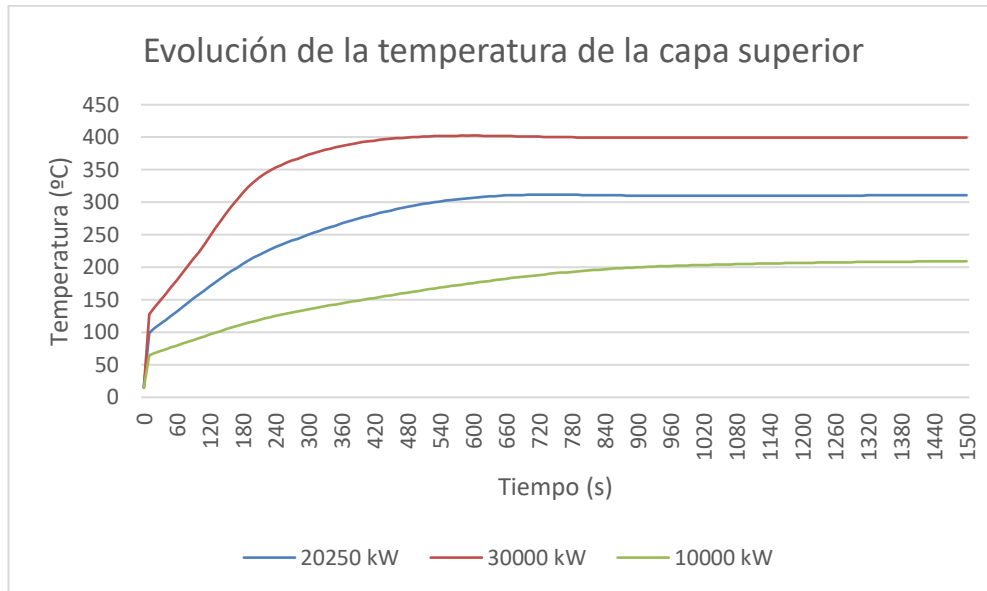
- Flujos de salida desde el compartimento



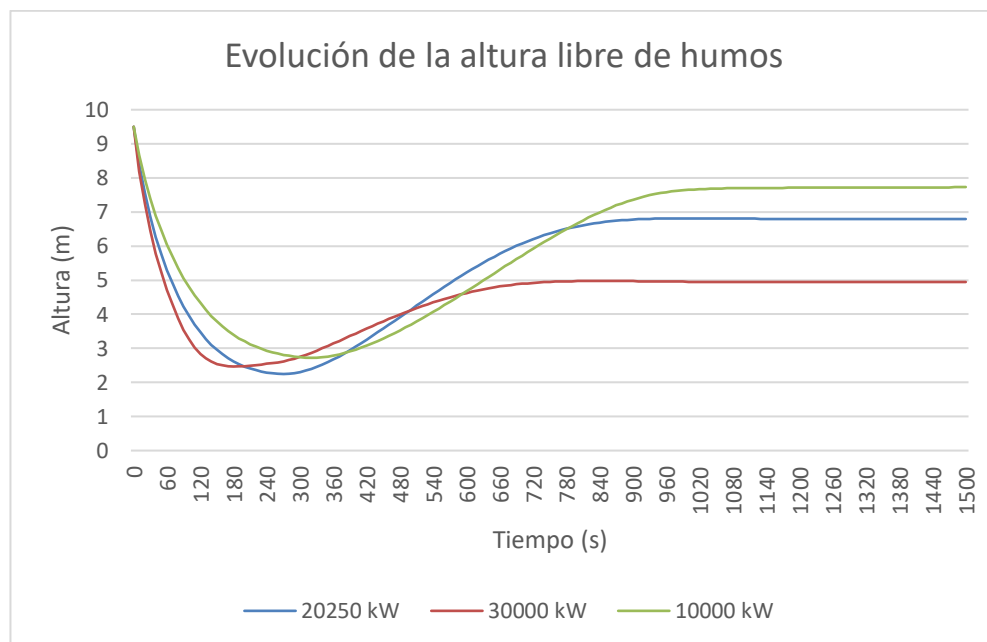
C.8 Comparativa de resultados ante variaciones el HRR

En este apartado del Anexo C, se añaden las gráficas de evolución temporal de las distintas salidas ante variaciones en valores del HRR.

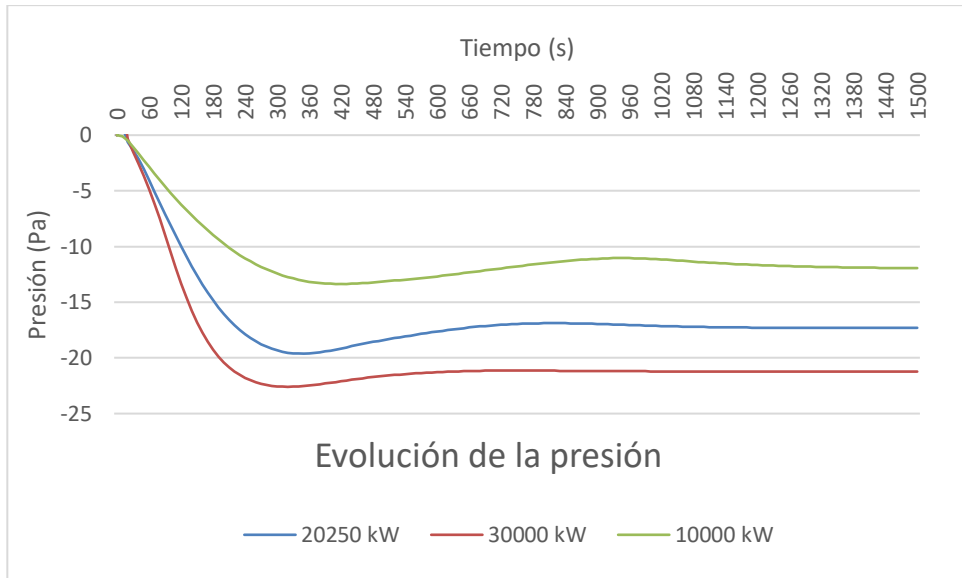
- Temperatura de la capa superior



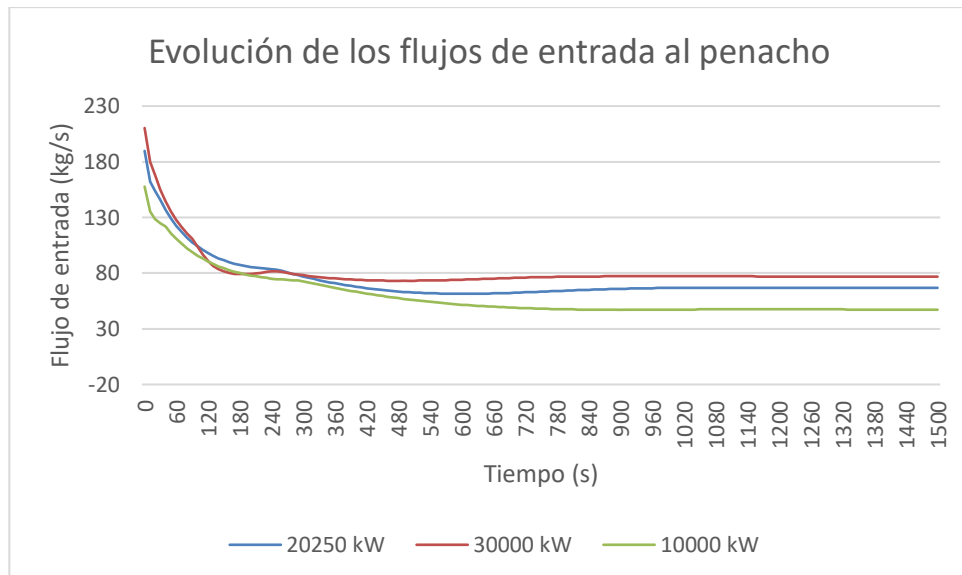
- Altura libre de humos



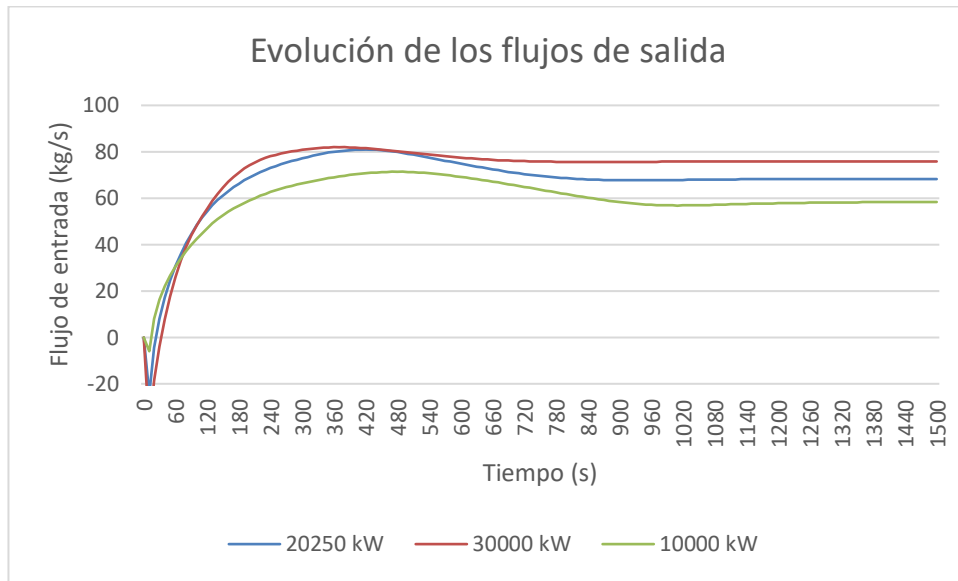
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



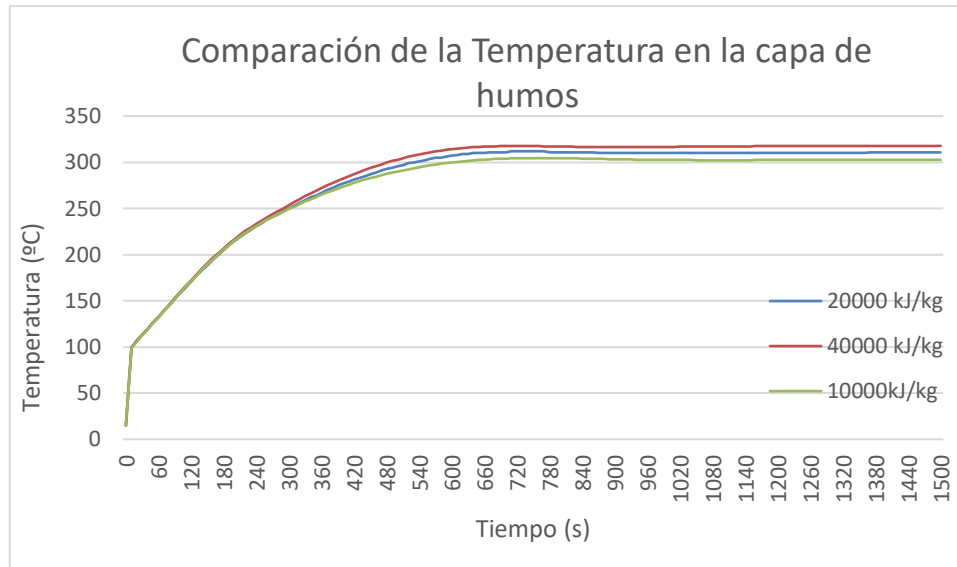
- Flujos de salida desde el compartimento



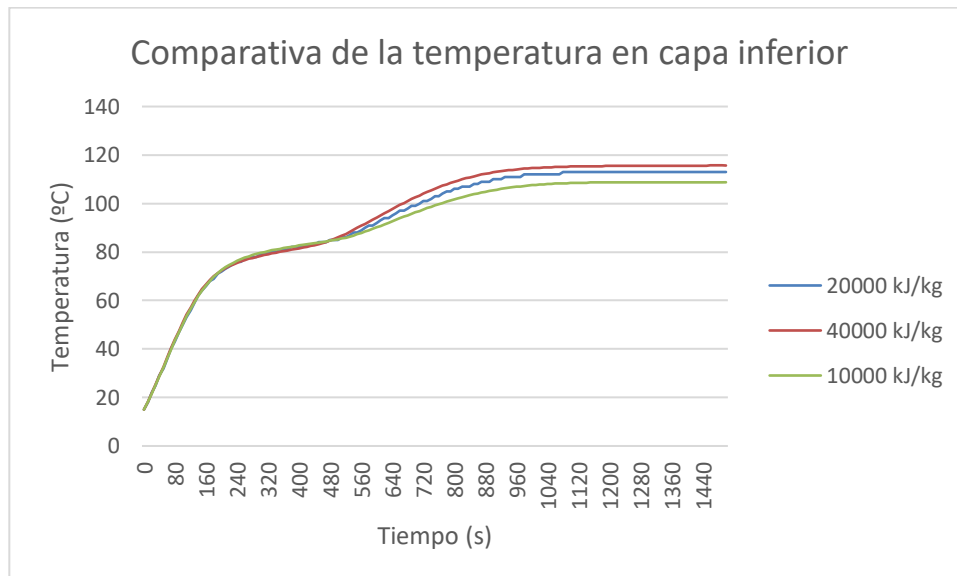
C.9 Comparativa de resultados ante variaciones en el calor de combustión

En este Anexo, se compara la evolución con respecto al tiempo de las distintas variables de entrada según el valor de calor de combustión definido.

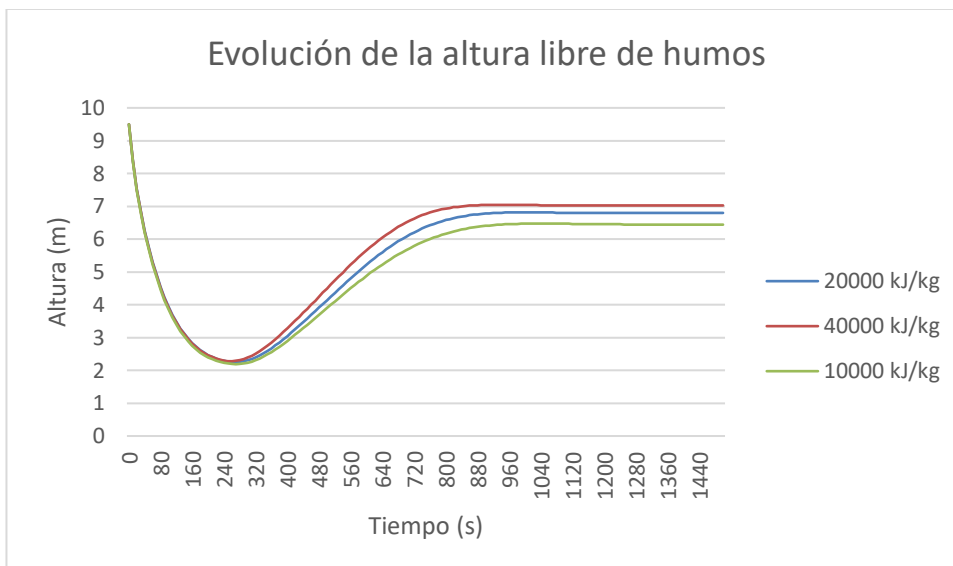
- Temperatura de la capa superior



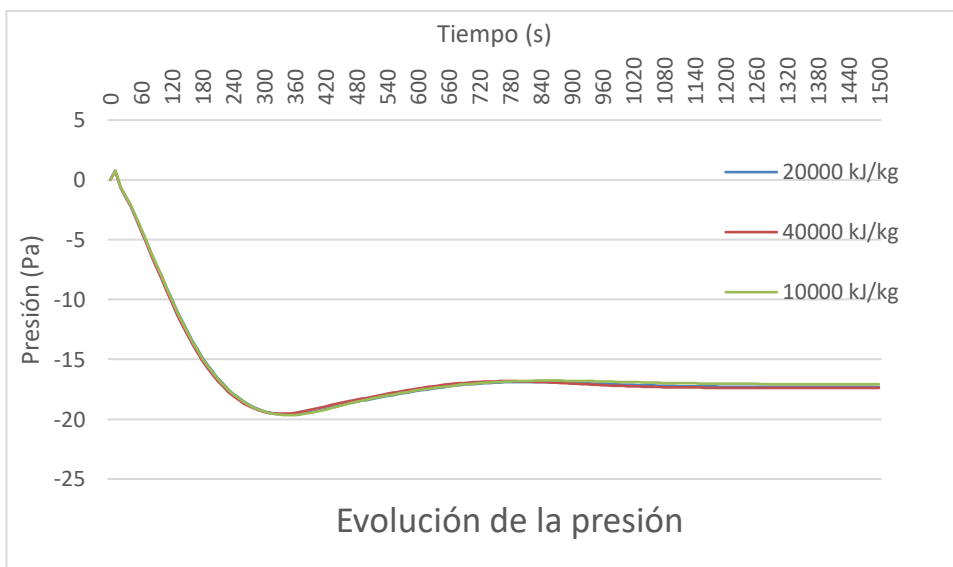
- Temperatura de la capa inferior



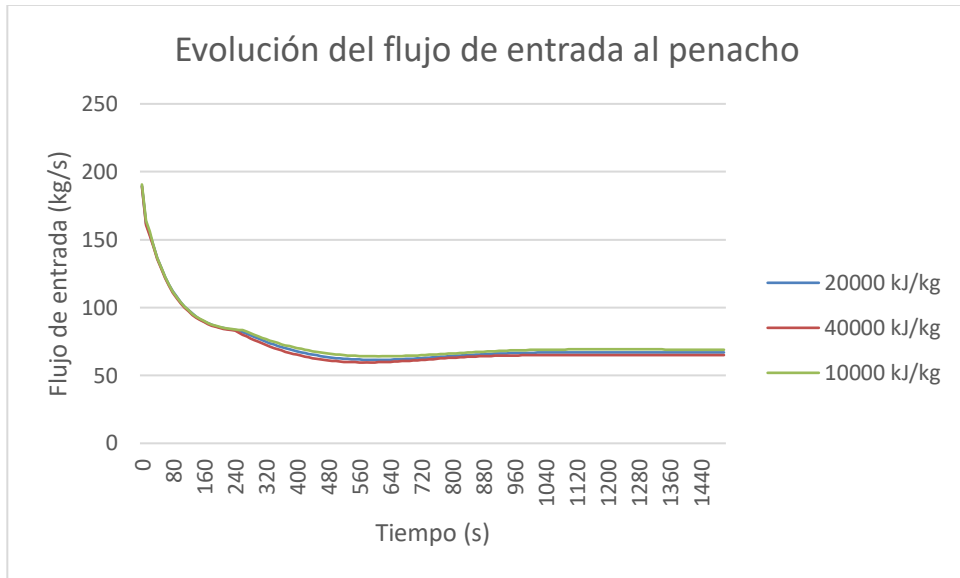
- Altura libre de humos



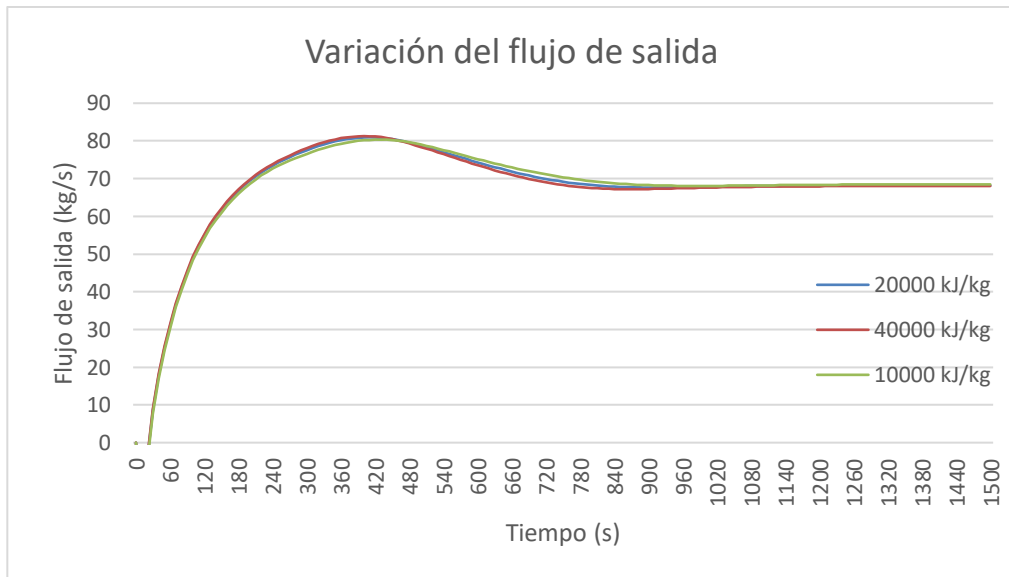
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



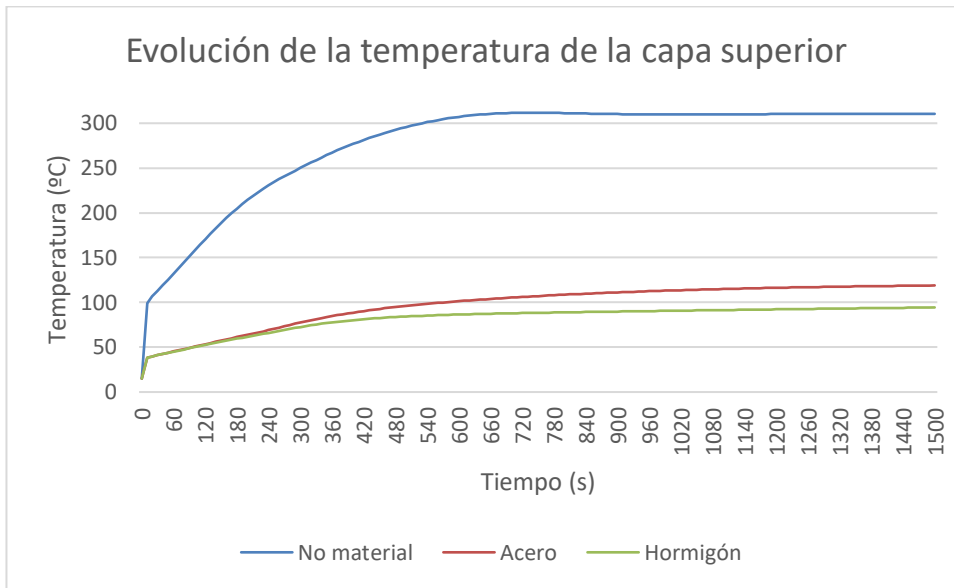
- Flujos de salida desde el compartimento



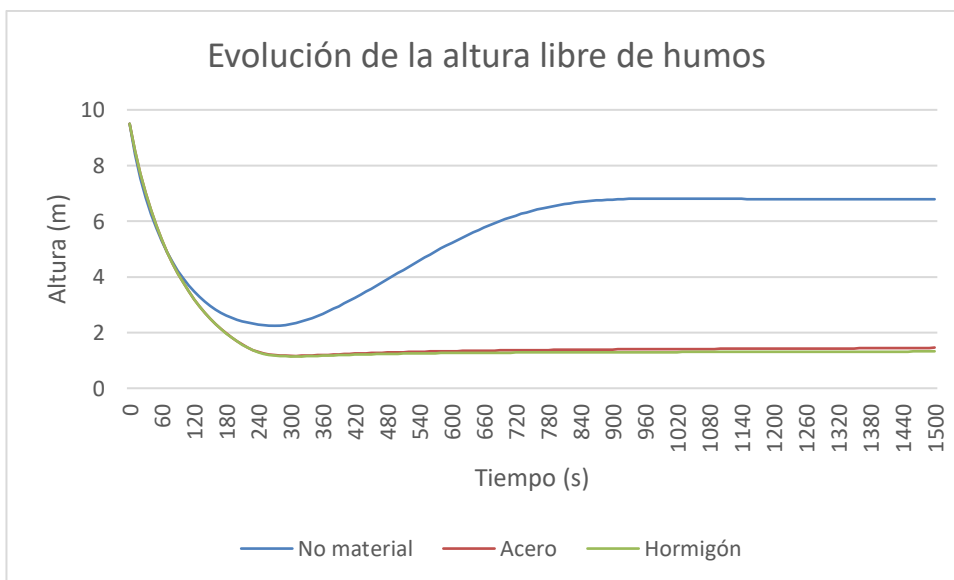
C.10 Comparativa de resultados con la introducción de los materiales de construcción

En este apartado, vamos a mostrar los resultados gráficos correspondientes a las simulaciones en que se incluye acero u hormigón en las superficies que limitan el compartimento, comparándolos con los que se obtenían cuando no se consideraban materiales de construcción.

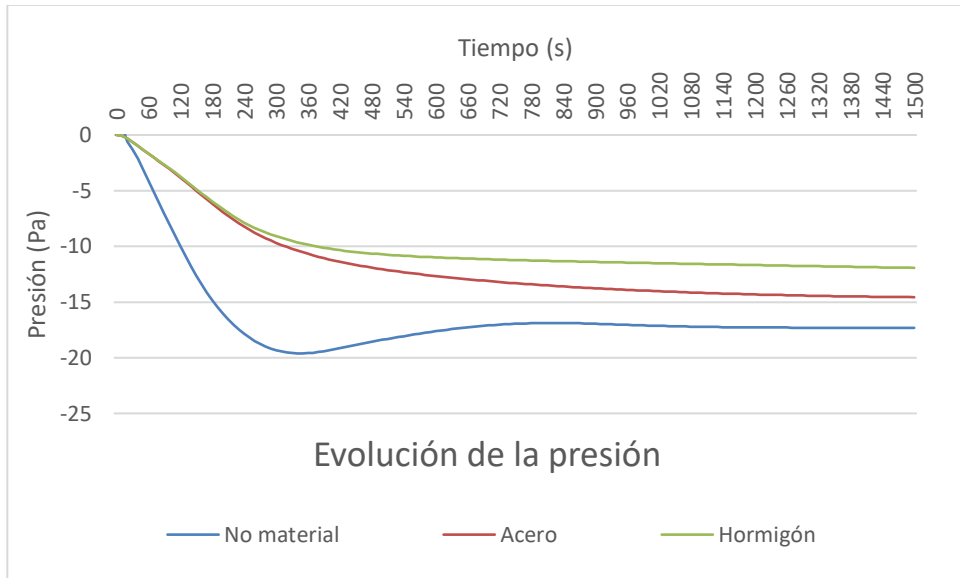
- Temperatura de la capa superior



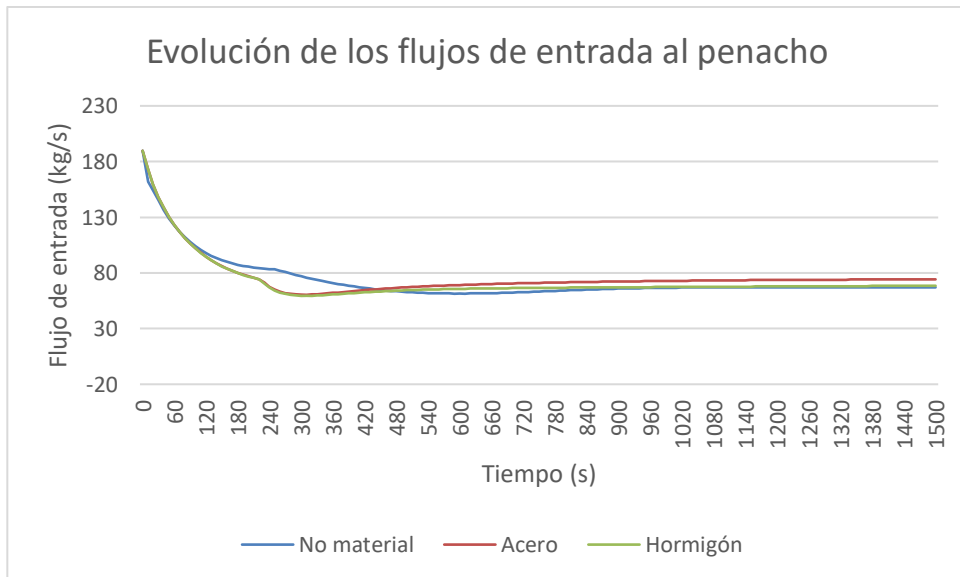
- Altura libre de humos



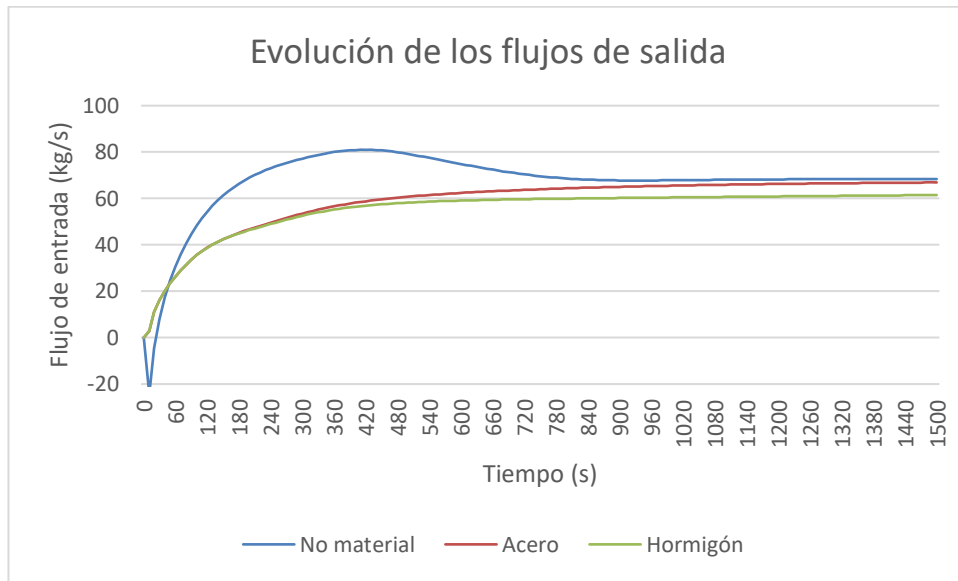
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



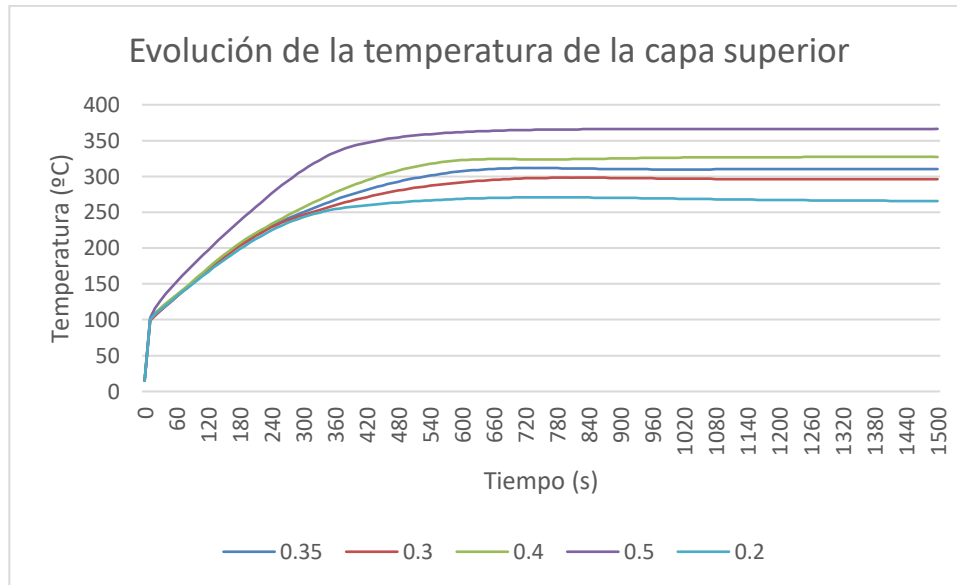
- Flujos de salida desde el compartimento



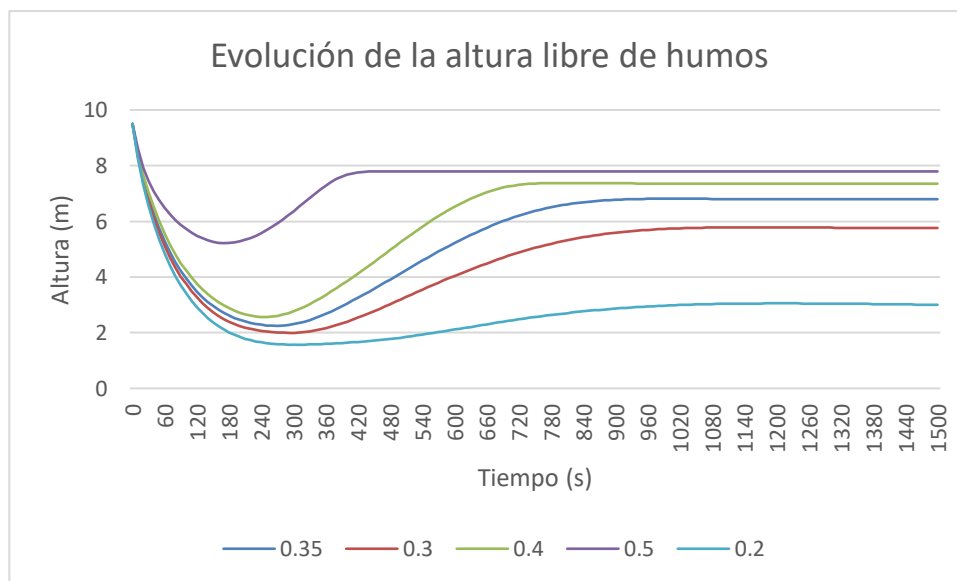
C.11 Comparativa de resultados ante cambios en el factor de radiación

En este punto, se incluyen las gráficas correspondientes a la variación de los resultados obtenidas cuando se varía el valor del factor de radiación según lo indicado en el apartado 7.2.8.1.

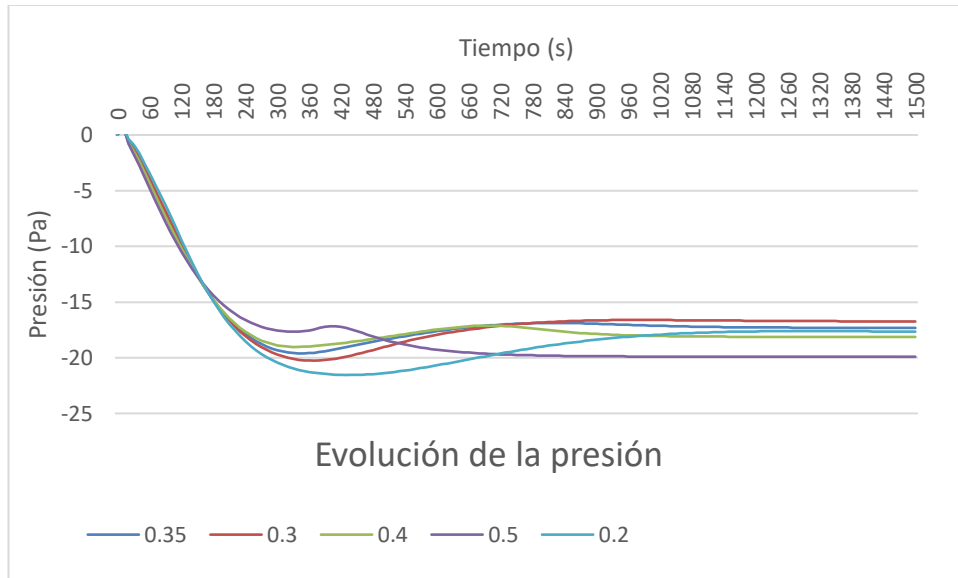
- Temperatura de la capa superior



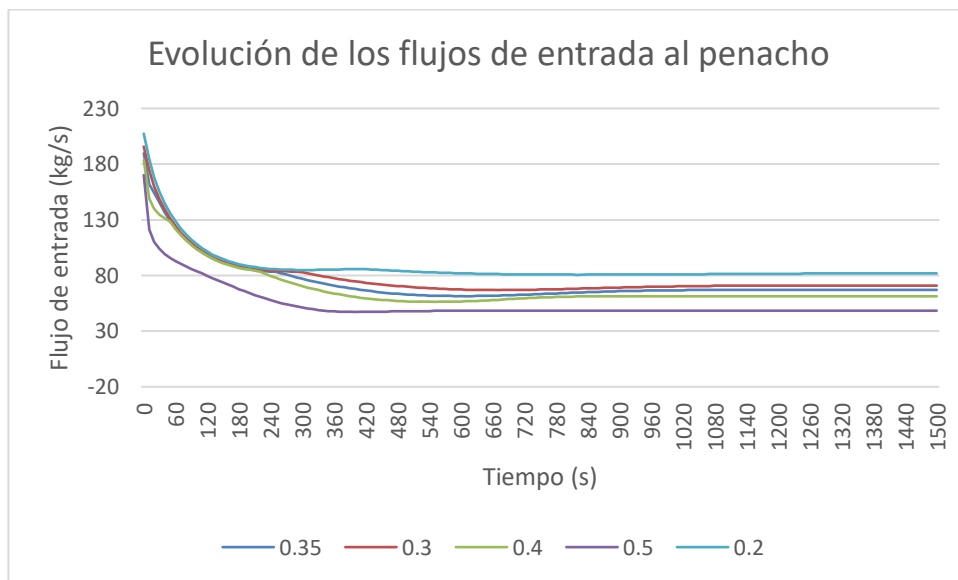
- Altura libre de humos



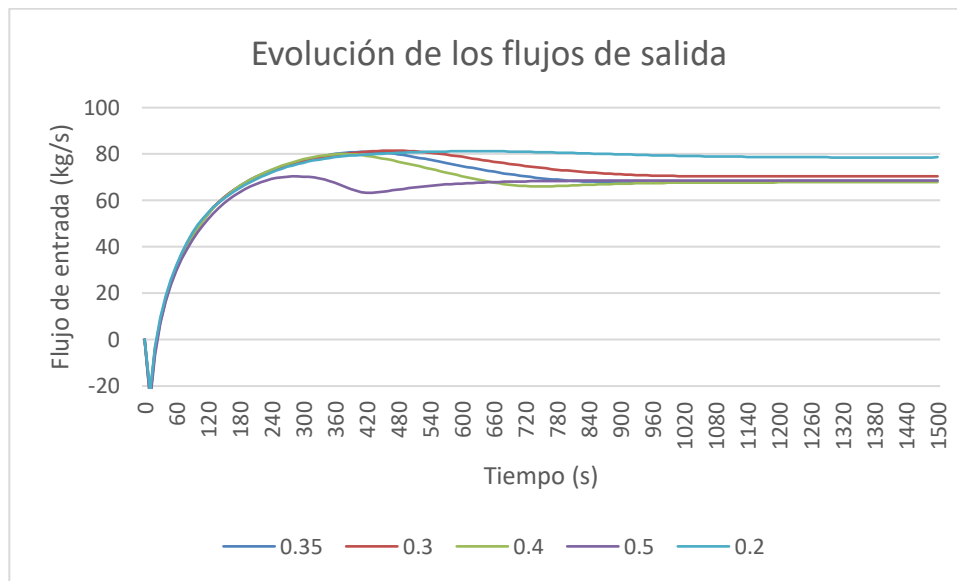
- Presión



- Flujo de entrada al penacho



- Flujos de salida desde el compartimento



REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, (2007), *Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales*.
- [2] AENOR, *UNE 23585*, (2017) España,
- [3] Alvear, D. Rein, G. Lázaro, M. Capote, J.A. Torero, J.L. Abreu, O.V., (2007), *Modelado y Simulación Computacional de Incendios en la Edificación*, Díaz de Santos.
- [4] National Institute of Standards and Technology, NIST, CFAST, User's Guide
- [5] José Miguel Lacosta Berna, (1998), *El control del humo en caso de incendio*
- [6] Néstor Adolfo Botta, (2011), *Movimiento y control del humo*
- [7] Tuomo Rinne, Jukka Hietaniemi & Simo Hostikka, 2007, *Experimental Validation of the FDS Simulations of Smoke and Toxic Gas Concentrations*.