

---

**Estudio y evaluación  
de la eficiencia de  
las protecciones contra incendios  
en construcciones tipo atrio**

---

**Alexis Cantizano González  
y col.**

**Ayudas a la investigación 2011**

## Investigador Principal

### **Alexis Cantizano González**

Ingeniero industrial mecánico doctorado por la Universidad Pontificia Comillas (ICAI)  
Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
e investigador del Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid

## Equipo Investigador

### **Pablo Ayala Santamaría**

Estudiante de doctorado del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)  
Universidad Pontificia Comillas (ICAI)  
Ingeniero Industrial

### **Candido Gutiérrez Montes**

Ingeniero industrial doctorado por la Universidad Politécnica de Cartagena  
Profesor Contratado Doctor del grupo de investigación de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Jaén

### **Gabriele Vigne**

Director en JWVA en Madrid. Ingeniero Mecánico

### **Guillermo Rein Soto-Yárritu**

Ingeniero mecánico, doctorado por la Universidad de California en Berkeley.

## Índice

	Página
1. OBJETO Y ALCANCE	4
2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	4
2.1. El proceso de llenado de humo	4
2.2. Sistemas de ventilación natural	4
2.3. Sistemas de ventilación mecánica	4
2.4. Penachos	5
2.5. Otros métodos para el control de humo	5
2.6. Modelos numéricos	5
2.6.1. FDS (Fire Dynamics Simulator)	5
2.6.2. FireFOAM	5
3. OBJETIVOS	5
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA	6
5. RESULTADOS	9
5.1. Modelos de zona	9
5.2. Modelos CFD	10
5.2.1. Relación base-altura	10
5.2.2. Versión del software	11
5.2.3. FireFOAM	11
5.3. Resultados experimentales	13
6. DISCUSIÓN	15
7. CONCLUSIONES	16
8. AGRADECIMIENTOS	17
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

## 1. OBJETO Y ALCANCE

El inicio de este proyecto surge de la colaboración entre la Asociación de Profesionales de Ingeniería de Protección contra Incendios (APICI) y la Universidad Pontificia Comillas (ICAI) para dar una formación sólida a la demanda de profesionales en el sector de la Ingeniería de Protección contra Incendios a través del Máster en Ingeniería de Protección Contra Incendios (MIPCI).

En este marco, la Universidad Pontificia Comillas, la Universidad de Jaén y el Imperial College of London -a través del profesor Guillermo Rein, de reconocido prestigio internacional en este campo- han establecido una sinergia para potenciar la investigación en la Ingeniería de Protección contra Incendios y ser referencia internacional. Para ello, actualmente dichas universidades están investigando el movimiento de humos en grandes espacios (atrios), elemento común en edificios singulares y prestigiosos, donde el número de personas que pueden verse afectadas puede ser muy elevado.

Sin embargo, el estudio del movimiento del humo en estos recintos, a través tanto de ensayos a escala real como de simulaciones numéricas, es costoso y difícil de realizar. Adicionalmente, existe la necesidad de verificar, validar y ampliar, mediante la mejora de los modelos implementados, el rango de aplicabilidad de los modelos CFD para predecir de manera precisa los ambientes inducidos, en caso de incendio, bajo circunstancias especiales. Por ello, esta investigación pretende documentar y resolver uno de los pilares del diseño de edificios en el ámbito de la seguridad y evacuación de las personas en construcciones tipo atrio.

## 2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El término castellano atrio proviene del término latino *atrium* que hacía referencia a un espacio abierto al cielo en el centro de una casa romana, aunque con el paso del tiempo se ha extendido su uso al de un gran espacio abierto creado por una apertura o serie de aperturas que conectan dos o más plantas (sin necesidad de estar abierto al cielo en su parte superior). Hoy en día, se ha convertido en un elemento común en las construcciones modernas, haciéndose notar en hoteles, centros comerciales, bloques de oficinas, estaciones de transporte público, terminales de aeropuerto y auditorios, entre otros.

Debido a la singularidad de este tipo de edificios, diferentes códigos de la edificación se refieren a ellos a través de requerimientos específicos. Con el fin de garantizar una evacuación exitosa en caso de incendio, el tratamiento de los humos generados por el mismo y su propagación es de gran importancia. Para ello, es necesario estudiar los sistemas de extracción de humos, así como los factores que afectan a la llama (la renovación del aire, materiales del incendio,...).

Se ha realizado una búsqueda exhaustiva bibliográfica para conocer el estado de la técnica del movimiento de humo en grandes volúmenes o atrios. Para ello, se ha revisado la literatura en los siguientes conceptos:

### 2.1. El proceso de llenado de humo

El periodo de llenado de humo incluye el estudio de los mecanismos que generan su propagación. Desde los años 80 se han realizado experimentos para el estudio del proceso de llenado, a escala real, en atrios [1], [2] incluyendo estudios de validación de correlaciones empíricas [3] o variando la posición del fuego como en [4].

Los métodos numéricos basados en dos zonas, como en [5] ó [6], resultaron no ser tan precisos y se propusieron los modelos de campo para predecir con mayor exactitud la altura de la capa de humos y su temperatura [7], [8] y [9]. Sin embargo, estos modelos de zonas son una herramienta muy útil a la hora de estimar de forma rápida la altura de la capa de humos y la temperatura generada por un fuego en un atrio.

Hay numerosos trabajos realizados en el Atrio PolyU/USTC, como el de [10] o el de [11] en los que se mide el tiempo de descenso de la capa de humo y la tasa de evaporación del combustible, además de estudios sobre la influencia de la temperatura exterior, como en [12]. Todos estos trabajos demuestran que existen limitaciones importantes en las expresiones analíticas propuestas para este tipo de recintos.

### 2.2. Sistemas de ventilación natural

En grandes volúmenes la temperatura del humo puede ser muy baja en caso de que la potencia del fuego no sea elevada. Por esta razón, en ciertos casos, la diferencia de presiones en las ventilaciones puede ser negativa, pudiendo llegar a producirse incluso una entrada de aire, como en [12]. Otros estudios, subrayan la importancia de la posición de las salidas de ventilación, como en [13], [14] y [15].

En [16] se confirma que el sistema de ventilación es muy dependiente de las condiciones ambientales, por lo que deberían ser consideradas en los modelos numéricos.

### 2.3. Sistemas de ventilación mecánica

Los primeros experimentos con ventilación mecánica se realizaron en [17], donde se describió la reducción de la eficiencia en la extracción debido al fenómeno de *plug-holing*. Posteriormente, se realizaron más estudios como en [18], [19], [20] y [21].

Además de los trabajos sobre *plug-holing*, también se ha investigado el impacto del penacho de humo sobre el sistema de ventilación, como en [21]. En los experimentos realizados en el atrio PolyU/USTC por [22] y [23], se ensayaron diferentes potencias de fuego. El efecto de la forma y el tamaño del atrio sobre el sistema de ventilación

se estudiaron en [24]. Posteriormente, en el Nave del Fuego del Centro Tecnológico del Metal de Murcia (España), según [25], [26], se realizaron experimentos y simulaciones numéricas variando el tamaño y la potencia del fuego, la tasa de extracción, su posición así como su tamaño.

Además, es importante tener en cuenta el efecto del aire de reposición en el desarrollo de la capa de humos, como en [27] y [28], así como la distancia de las entradas de aire al fuego y su velocidad, como en [29].

## 2.4. Penachos

La cuarta línea importante de investigación es la relacionada con los penachos y la dinámica del humo. Los diferentes tipos de penachos, incluyendo penachos de derrame, ensayados en [30] y [31] y los penachos adheridos en [32] y [33]. Además, se han propuesto correlaciones para los penachos de derrame como en [34] y en [35] y se han realizado ensayos a escala reducida como en [36] y [37]. Se puede encontrar una comparativa de penachos en [38].

Para tratar de comprender mejor el fenómeno de los penachos de derrame, la North American Codes and Standards, ASHRAE, ha llevado a cabo un proyecto de gran envergadura basado en experimentos a escala real, [39] y [40]. Además, hay numerosos trabajos relacionados con estos experimentos como los de [41], [42] y las simulaciones numéricas de [43].

## 2.5. Otros métodos para el control de humo

Se han realizado algunos estudios para el control de humo mediante presurización o despresurización como en [44], [45] y [46]. Asimismo, la influencia del viento sobre el atrio debe ser tomada en cuenta en el sistema de extracción de humos como se demuestra en [44] y [47].

## 2.6. Modelos numéricos

Como consecuencia de la tendencia hacia el diseño basado en prestaciones y gracias a la reducción en los procesos de tiempo de cálculo, se han desarrollado ciertas herramientas numéricas para estudiar el movimiento del humo. Sin embargo, su elección depende de la precisión que se requiera en el análisis. Por tanto, los modelos numéricos se han clasificado en modelos zonales ([48], [49], [50]) y de campo ([51], [52], [53], [54], [55]).

Los modelos de zona dividen el volumen en zonas con propiedades uniformes. Típicamente, se divide en dos zonas: la capa de humo superior y caliente y, la inferior de aire más frío. En cada zona se evalúan las ecuaciones de conservación de masa y energía para resolver el problema. Sin embargo, debido a la inactividad del flujo dentro de cada capa, la ecuación de momento se desprecia, [56]. Hay numerosas publicaciones usando este tipo de modelos, como en [57] y [5]. Sin embargo, en volúmenes grandes, la temperatura no es uniforme en cada capa, por

lo que el uso de estos códigos está delimitado para construcciones con tamaños y formas prescritos.

Por otro lado, los modelos de campo, resuelven en pequeños volúmenes, todas las leyes de conservación. De esta forma la solución es mucho más detallada, aunque se requieren ciertas simplificaciones para poder llegar a una solución numérica sin excesivo coste computacional. Existen estudios comparativos entre los modelos de zona y los de campos, para el estudio numérico de atrios, como en [58] y [9].

A través de toda la bibliografía revisada se comprueba que FDS (Fire Dynamics Simulator) es uno de los software más empleados hasta ahora. Sin embargo, actualmente hay una tendencia a usar FireFOAM dada la flexibilidad que ofrece y los buenos resultados que generan. Estas son las dos herramientas numéricas elegidas, la primera basada en el método numérico de las diferencias finitas y la segunda en el método numérico de los volúmenes finitos. Ambas herramientas emplean el método LES (Large Eddy Simulation) para tratar la turbulencia.

### 2.6.1. FDS (Fire Dynamics Simulator)

FDS es un software que emplea la dinámica computacional de los fluidos (CFD) para resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes de flujos a baja velocidad, sometidos a gradiente térmico y con especial énfasis en el humo y el calor generado por un incendio. Entre sus distintas aplicaciones, permite evaluar los productos de combustión del incendio, calcular la transferencia de calor por convección y radiación entre el gas y las superficies sólidas, estudiar la pirólisis y la activación de rociadores, detectores de calor y humo...

Fue desarrollado y sigue siendo actualizado por la Fire Research Division del BFRL (Building and Fire Research Laboratory) del NIST (National Institute of Standards and Technology). Hoy en día es una de las herramientas más usadas a la hora de estudiar la dinámica del humo.

### 2.6.2. FireFOAM

FireFOAM es un módulo de cálculo de fuego de OpenFOAM, una herramienta numérica de código abierto. Actualmente, entre otras aplicaciones, simula flujos turbulentos de flotación, procesos de combustión pre-mezcla, el movimiento de partículas lagrangianas, la radiación térmica...

FM Global desarrolla el código, aunque sin garantía y sin ningún soporte. Al ser de código abierto, tiene una elevada capacidad de adaptación a cualquier tipo de problema relacionado con la dinámica del humo.

## 3. OBJETIVOS

El estudio de la gestión y control de humos en construcciones tipo atrio dentro del diseño de los sistemas de

protección contra incendios es de vital importancia para salvaguardar la vida de los ocupantes en caso de incendio. Con el fin de garantizar un espacio libre de aire limpio es necesario extraer el humo de una forma rápida y eficiente. A partir de este proyecto se pretende profundizar en los sistemas de extracción mecánica de aire en instalaciones tipo atrio con el fin de mejorar los diseños de protección contra incendios. Para ello se realizará un estudio de la eficiencia de los extractores de humos en este tipo de construcciones.

Por tanto, bajo la situación actual del estado del arte en la ingeniería del fuego descrita con anterioridad, los principales objetivos científicos y tecnológicos del proyecto son:

- Estudiar la eficiencia de los sistemas de extracción mecánica de humos para garantizar la protección y evacuación de los ocupantes ante el humo.
- Evaluar la idoneidad de diferentes códigos numéricos para su uso en el análisis de un incendio y sus consecuencias en este tipo de recintos.

Además, dada la extensión y complejidad del proyecto, éste se complementará con los siguientes objetivos:

- Crear una base de datos experimentales a escala real de incendios en atrios.
- Estudiar y analizar los resultados para la obtención de conclusiones válidas acerca de la dinámica de los incendios en este tipo de recintos.
- Comparar y evaluar las correlaciones analíticas existentes para el estudio de incendios en atrios. Si fuera necesario, se propondría la modificación de las correlaciones analíticas existentes en los códigos de protección contra incendios para el cálculo de las condiciones inducidas por un incendio en un atrio.
- Poner a punto, validar, verificar y optimizar un modelo CFD para la simulación de incendios en recintos de gran volumen. El núcleo de estas herramientas estará formado por los códigos de CFD, FDS y FireFOAM.

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

El presente proyecto se ha realizado en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas (ICAI), en el Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Jaén (UJA), y parte en el Centro Tecnológico del Metal (CTM).

A partir de los resultados experimentales realizados en la Nave del Fuego, se han contrastado los modelos numéricos construidos con las herramientas numéricas descritas anteriormente. Además, se ha realizado un estudio comparativo de las correlaciones empíricas existentes en la literatura, con los modelos zonales. Para esta parte numérica, se han empleado los siguientes equipos:

- Dos clusters HPC, basado en Linux RedHat y CentOS. Ambos grupos suman un total de 500 núcleos

de computación en paralelo. Además, los grupos contienen un sistema redundante de almacenamiento de 67 Tb:

- 3×2 nodos Intel Xeon Dual-Core 3,00 GHz y FSB de 1333 MHz.
- 13×2 nodos Intel Xeon Quad-Core 2,93 GHz y FSB 1066 MHz.
- 32×2 Nodos Intel Westmere de seis núcleos de 3,00 GHz y FSB de 1333 MHz.

Y se han realizado los modelos numéricos con las siguientes herramientas:

- Modelos CFD:
  - FDS v4; FDS v5.
  - FireFoam 1.7.x (OpenFoam 1.7.x).
- Modelos de zona:
  - CFAST
  - Ozone
  - Branzfire

A través de los modelos numéricos en FDS y FireFOAM, se realizó un estudio de las temperaturas alcanzadas en las diferentes localizaciones del atrio para la planificación de los nuevos ensayos realizados durante este proyecto y, estudiar así el efecto de los sistemas de extracción mecánica.

En la figura 1, se muestra la Nave del Fuego del Centro Tecnológico del Metal de Murcia. Este atrio tiene unas dimensiones de 19.5 x 19.5 m y una altura de 17.5 m en la parte más baja del atrio y de 20 m en la parte más alta. Tiene cuatro extractores de humo en la parte superior del atrio situados a una altura aproximada de 19.5 m cuyo centro proyectado sobre un plano horizontal se encuentra situado a 1.5 m del centro del atrio. Además como entradas de aire dispone de 8 rejillas de 4.88 x 2.5 m en la parte inferior de la misma, distribuidas asimétricamente en las diferentes paredes tal y como se aprecia en la figura 2.



Figura 1. Nave del Fuego del Centro Tecnológico del Metal (Murcia).

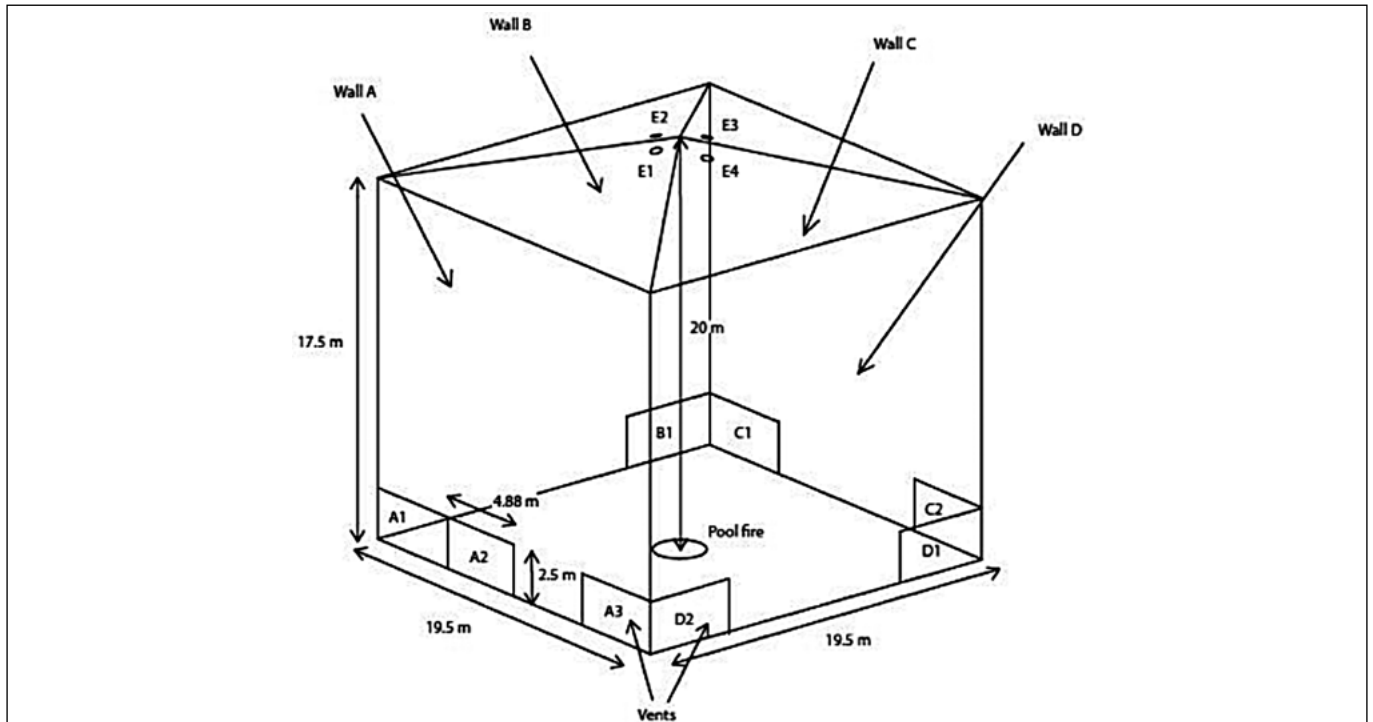


Figura 2. Esquema de la Nave del Fuego del Centro Tecnológico del Metal (Murcia).

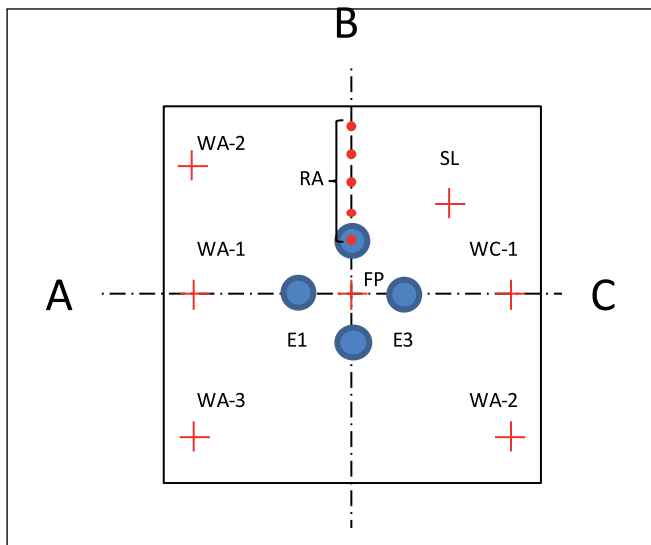


Figura 3. Vista en planta de la posición de las diferentes tiras de termopares.

La cantidad total de termopares a instalar ha sido de 59 unidades localizados en diferentes posiciones (figura 3).

Además en la tabla 1, se muestra la altura a la que se han situado los termopares en función de su posición.

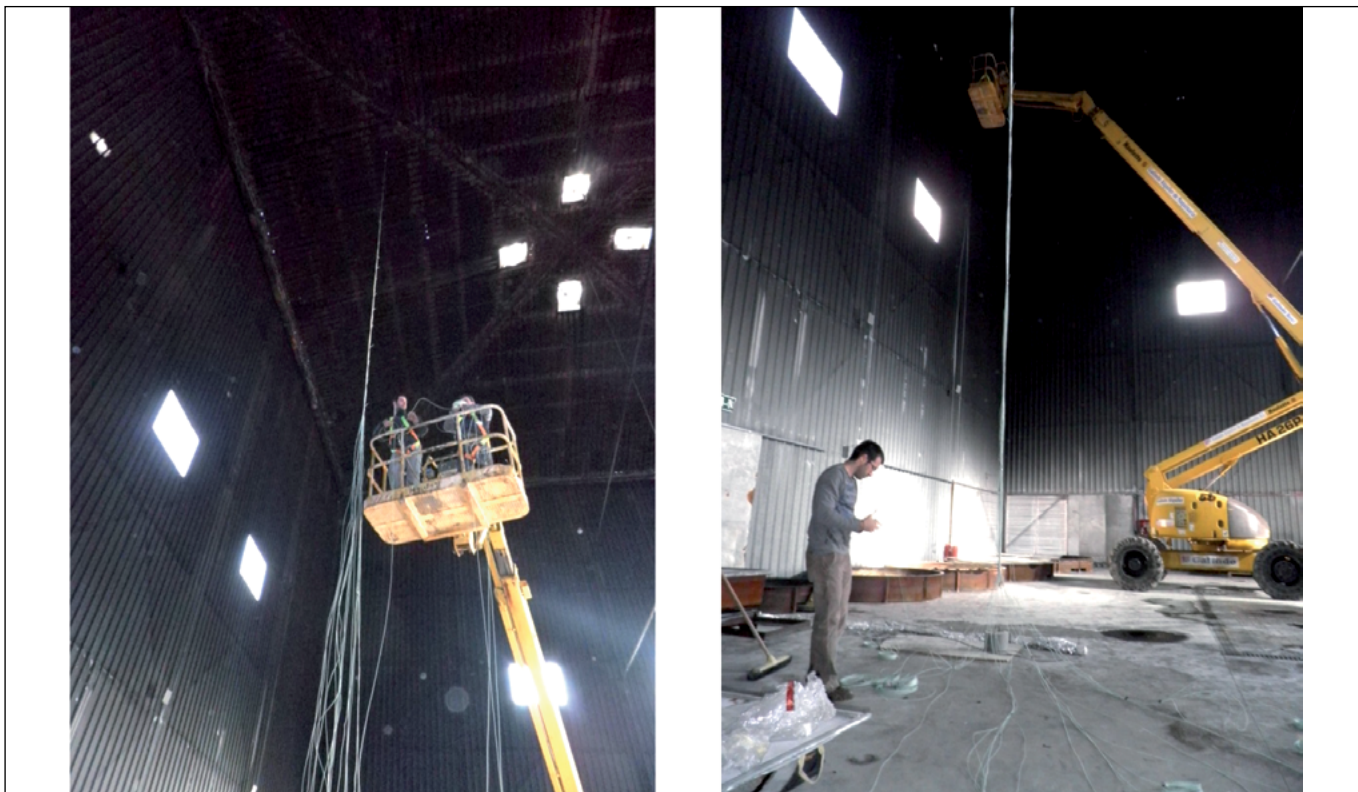
En las figuras 4a y 4b se muestran unas fotos del montaje de los termopares en el interior de la nave.

El acondicionamiento de la nave, además, requirió el cambio de los extractores por cuatro nuevos ventiladores helicoidales murales HC-80-4/8T/H, con motor IP55D y dos velocidades, donados por Sodeca SA. En las figuras 5 y 6, se muestran dos imágenes del proceso de montaje de los ventiladores.

Además, para tratar de controlar de forma efectiva el aire de reposición, ha habido que reparar los cierres de las rejillas. Y para la realización de las medidas, se han empleado los equipos descritos en la tabla 2.

Tabla 1. Localización de los termopares.

	Localización	Altura [m]	Termopares
FP	Penacho (Fire Plume)	5 – 7,5 – 10 – 12,5 – 15 – 17,5	6 uds
WA-1	Pared A (a 30 cm)	5 – 7,5 – 10 – 12,5 – 15 – 17,5	6 uds
WA-2, WA-3, WC-1 y WC-2	Pared A y Pared C (a 30 cm)	5 – 10 – 15	12 uds
SL	Capa de humos	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 5.5 – 6 – 6.5 – ...13.5 – 14 – 14.5 – 15 – 16 – 17 – 18	28 uds
E1 y E3	Extractores	18.5	2 uds
RA	Radial (Distancia al fuego)	2 - 4 – 6 – 8 – 9	5 uds



Figuras 4a y 4b. Instalación de los termopares en la rama SL (tabla 1).

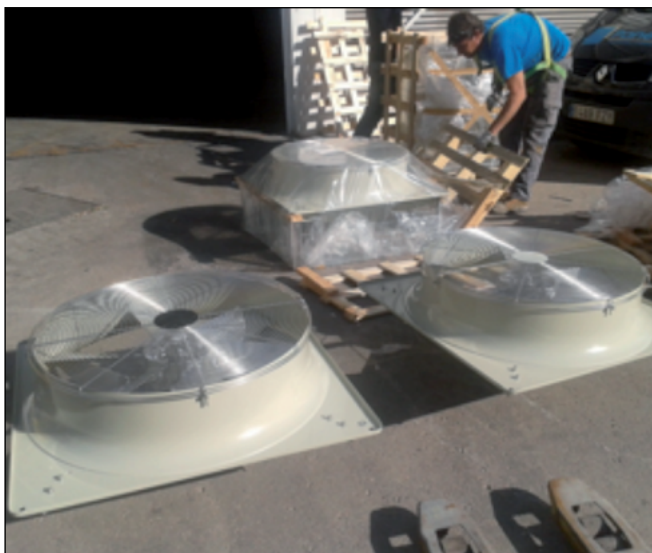


Figura 5. Nuevos ventiladores helicoidales murales, motor IP55D, HC-80-4/8T/H, con dos velocidades, donados por Sodeca SA.

En total se han realizado 15 ensayos. La potencia, la localización y las demás características de los mismos se muestran en la tabla 3.



Figura 6. Proceso de montaje de los ventiladores.



**Tabla 2.** Equipos necesarios para la realización de los ensayos en la Nave del Fuego.

Material	Fabricante	Descripción
3 unidades 1ZB-K (C76KX)	TC	Termopar K, unión expuesta, 10 metros de cable de hilos sólidos 2x0.5 mm aislado con fibra de vidrio.
56 unidades 1ZB-K	TC	Termopar K, unión expuesta, 10 metros de cable paralelo de hilo sólido 2x0.5 mm aislado individualmente con PVC.
Cable de compensación. 1760 m	TC	Cable de compensación para la medida con termopares.
3 Células CF K150 + soporte CF y apoyo Silent Block	Dinacell	Células de carga.
1 Caja de suma para tres células	Dinacell	Células de carga.
1 Acondicionador modelo ADS 420	Dinacell	Acondicionador de señal para la medida con las células de carga.
3 DT500.	Datataker.	Datalogger de 30 canales analógicos
3 CEM-S3.	Datataker.	Módulo expensor de canales para DT500
3 MC-4096P.	Datataker.	Tarjeta de memoria PCMCIA de 1.400.000 lecturas

**Tabla 3.** Ensayos realizados en la Nave del Fuego del CTM.

Material	1	2	3	4	5	6	7	8
Extracción	1/2	1/2-Max	1/2→Max	Max→1/2	1/2	1/2→Max	1/2	1/2
Rejillas abiertas	A1, A3, C1, C2.						C2, A1	C1, A3.
1 MW	c	c	-	-	-	-	-	c
2 MW	c, c	c	c	c	c	c	d	d
4 MW	c	c	c	-	-	-	-	-

donde 1/2 indica que todos los ventiladores están a baja velocidad; 1/2-Max: dos ventiladores a baja velocidad y dos a alta; 1/2→Max: todos los ventiladores a baja velocidad y a mitad del ensayo se pasan dos a alta; Max→1/2: dos ventiladores a máxima velocidad y dos a baja, y a mitad del ensayo se pasan los dos de alta a baja; c indica que el fuego se realiza en el centro del atrio y d, desplazado a 5 m de las paredes C y D.

parte donde se contrastan las medidas realizadas en el atrio, en [59], y [60], con modelos algebraicos y con modelos de zona. Una segunda parte, donde se realizan simulaciones numéricas con modelos CFD, usando el programa FDS, donde se valoran diferentes geometrías para ganar flexibilidad en el modelo numérico del atrio. Y por último, una tercera parte que incluye una batería de ensayos en la Nave del Fuego (tabla 3) y su contrastación numérica con los modelos desarrollados.

## 5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de este trabajo de investigación se han dividido principalmente en tres partes: una primera

### 5.1. Modelos de zona

Como se ha comentado anteriormente, los datos de los ensayos realizados entre el 2003 y el 2008 en el atrio, se han contrastado con modelos algebraicos y con modelos de zona. Usando, por tanto, las medidas de la tabla 4:

**Tabla 4.** Medidas realizadas en la Nave del Fuego bajo diferentes condiciones de ensayo.

Ensayo	MFA1	MFA2	MFA3	MFA4	MFA5
Fecha	17/11/2003	28/06/2005	01/07/2005	03/04/2008	04/04/2008
Diámetro del pan (m)	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Volumen de fuel (l)	44	52	52	52	52

Ensayo	MFA1	MFA2	MFA3	MFA4	MFA5
Tiempo de quemado (s)	837	883	1094	909	1010
Extracción (m3/s)	15.2	15.2	15.2	7.6	7.6
Temperatura (°C)	16.7	28.9	27.5	26.5	13
Presión (mbar)	1018	1008	1007	1011	1014
Tiempo	Nublado	Despejado	Despejado	Despejado	Nublado
Velocidad de viento (m/s)	-	-	-	2	0
Tasa de liberación de calor (MW)	1.58	1.77	1.43	1.72	1.55

Tabla 5. Medidas realizadas en la Nave del Fuego bajo diferentes condiciones de ensayo.

Ensayo	Tiempo requerido para alcanzar 15 m (s)									
	Medidas (N-%)			OZone				BRANZFIRE	CFAST	
	30%	20%	10%	Zukoski	Heskestad	Thomas (Hinkley)	McCaffrey	McCaffrey	Heskestad	McCaffrey
MFA1	99.5	72.3	47.8	68	75	152	35	20	60	40
MFA2	164.3	107.5	78	65	72	150	35	20	60	35
MFA3	164.9	118	79.3	70	65	162	35	20	75	55
MFA4	173.2	117.3	76.5	58	62	120	32	20	75	55
MFA5	101.6	75.6	54.6	42	45	78	28	20	75	55

Tal y como se muestra en la tabla 5, existe una variabilidad importante en los resultados de la altura de capa de humos al emplear los diferentes modelos.

### 5.2. Modelos CFD

La geometría de un modelo debe ser lo más realista posible para poder alcanzar los resultados esperados y poder reproducir con la precisión necesaria los ensayos experimentales. Por otro lado, el mallado del modelo requiere un determinado tamaño recomendado en la bibliografía [61], [51] y [62]. En el caso de FDS, se requiere que éste sea ortogonal lo que supone una fuerte restricción, sobre todo a la hora de tener que reproducir geometrías complejas o incluso en geometrías sencillas como un techo piramidal. Asimismo, hay que tener en cuenta que estos grandes volúmenes suelen tener techos con geometrías complejas como son los casos de túneles, aparcamientos o aeropuertos, [63], [64] y [65]. Por esta razón se decidió a elaborar un estudio sobre las posibles geometrías del atrio que permitieran el remallado y la elaboración de variaciones sobre el modelo de una manera más sencilla. Esto facilitaría el ajuste numérico necesario a la hora de optimizar el modelo final.

FDS permite el modelado de planos inclinados mediante una función denominada SAWTOOTH. Con esta, el plano inclinado se representa mediante una serie de escalones mínimos que dan lugar a la pendiente necesaria.

Esto implica además, que en las ecuaciones físicas que resuelve, se elimina el término de la vorticidad. De esta forma, la generación de vórtices o rotacionalidad del fluido cerca de estos escalones desaparece, acercándose su comportamiento al de una pared plana pero con la inclinación necesaria. Con el fin de evaluar su efecto y en la búsqueda de un modelo sencillo y fiable a la hora de comenzar a trabajar con los resultados experimentales, se ha realizado un estudio con varios modelos donde el número de escalones varía tal y como se describe a continuación:

- Modelo ST: Con la función SAWTOOTH del programa FDS. Escalones mínimos.
- Modelo ST5: Con 5 escalones, cuyas dimensiones se aprecian en la figura 7.
- Modelo ST9: Con 9 escalones, cuyas dimensiones se aprecian en la figura 7.
- Modelo ST0: con techo plano, pero elevado a 18.33 m, para preservar el volumen del atrio.

La geometría de estos cuatro modelos generados con FDS se pueden observar en la figura 8.

#### 5.2.1. Relación base-altura

Además de los modelos anteriores y con el objeto de extrapolar los resultados alcanzados a geometrías de diferente tamaño, se generaron dos modelos adicionales para los casos extremos ST y ST0, variando la relación de esbeltez del recinto.

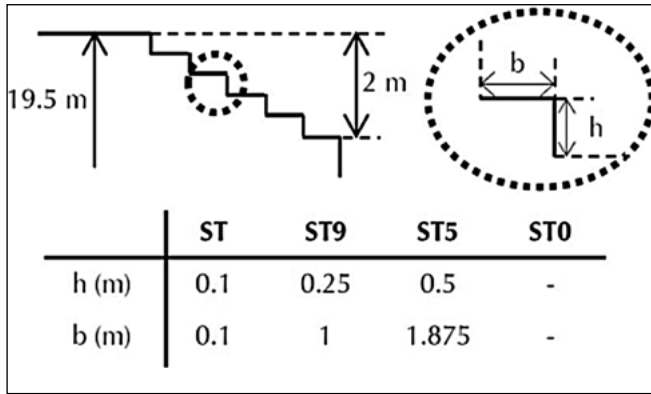


Figura 7. Detalle de los escalonamientos realizados en el techo de los cuatro modelos.

### 5.2.2. Versión del software

A la hora de realizar este estudio numérico también se ha verificado que la nueva versión de FDSv5 da resultados fiables en comparación con la anterior versión FDSv4.

Los modelos numéricos se contrastaron con los ensayos realizados en [26]. En las figuras 9 y 10, se muestran las temperaturas alcanzadas a diferentes alturas en el atrio y su comparación con los resultados numéricos con las geometrías diferentes de techo (Figuras 9 y 10).

### 5.2.3. FireFOAM

Con el software FireFOAM también se realizaron una serie de simulaciones, únicamente para el atrio con la geometría más simplificada, para tratar de verificar el buen comportamiento del programa. En la figura 11, se muestra la temperatura en un instante de la simulación. Se aprecia claramente la elevada temperatura de la llama, así como la altura de la capa de humos y su estratificación térmica (figura 11).

A continuación (en la figura 12) se muestran las temperaturas en el penacho de humo para diferentes alturas, para el caso de una tasa de liberación de calor de 2.3 MW.

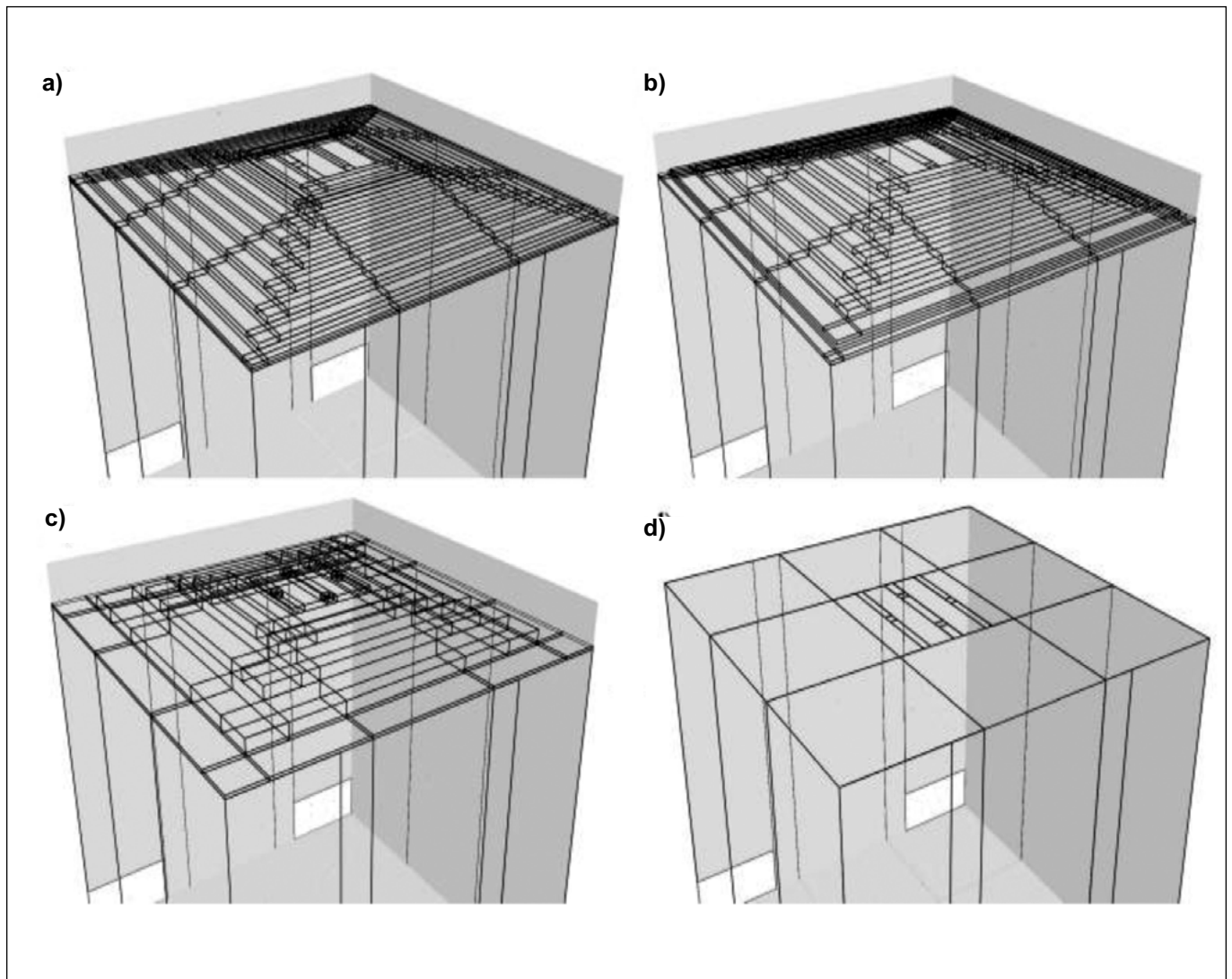


Figura 8. Atrios generados en FDS. a) ST. b) ST9. c) ST5. d) ST0.

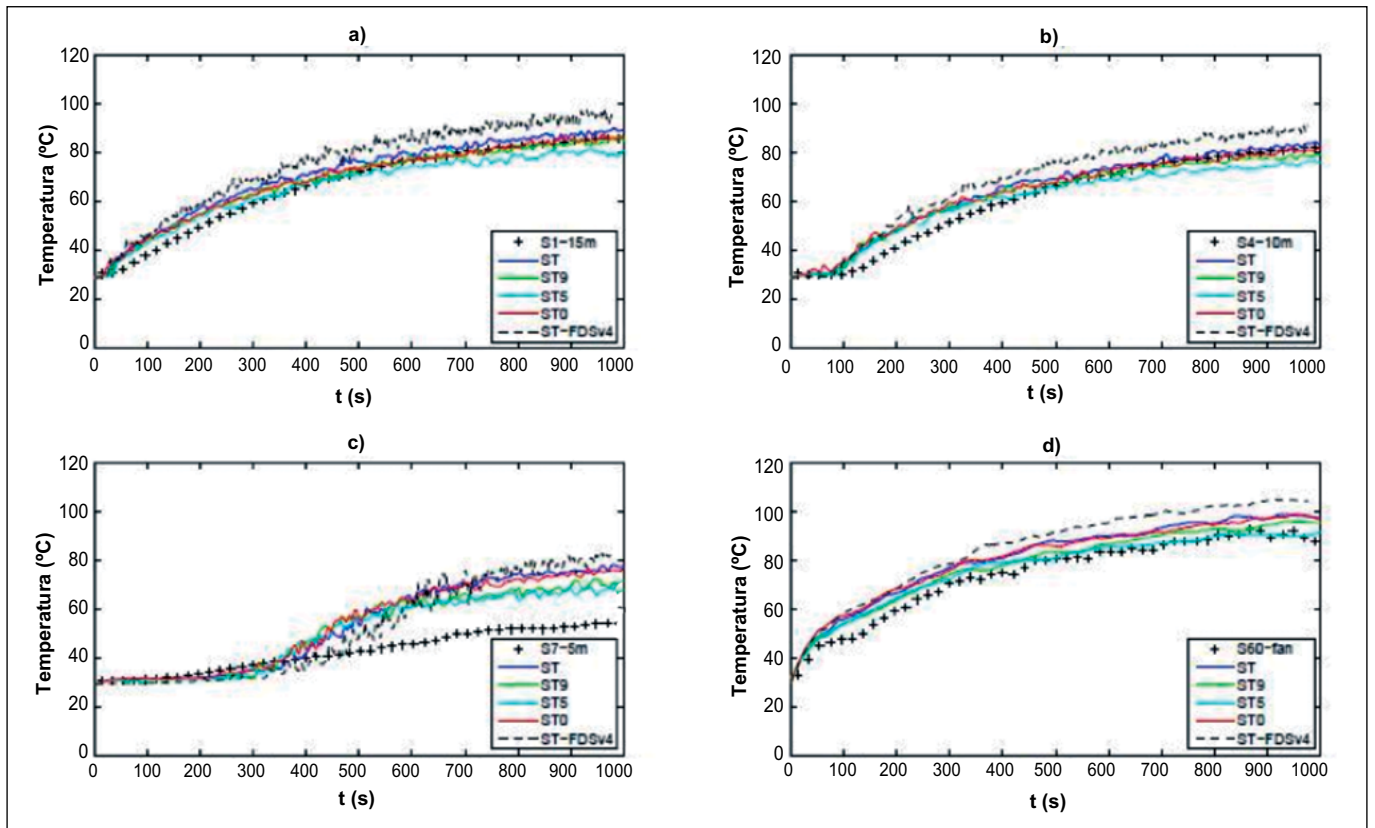


Figura 9. Comparación de temperaturas a 30 cm de la pared A, a diferentes alturas para un ensayo de 1.36 MW: a 15 m a), a 10 m b), a 5 m c), bajo el ventilador E3 d).

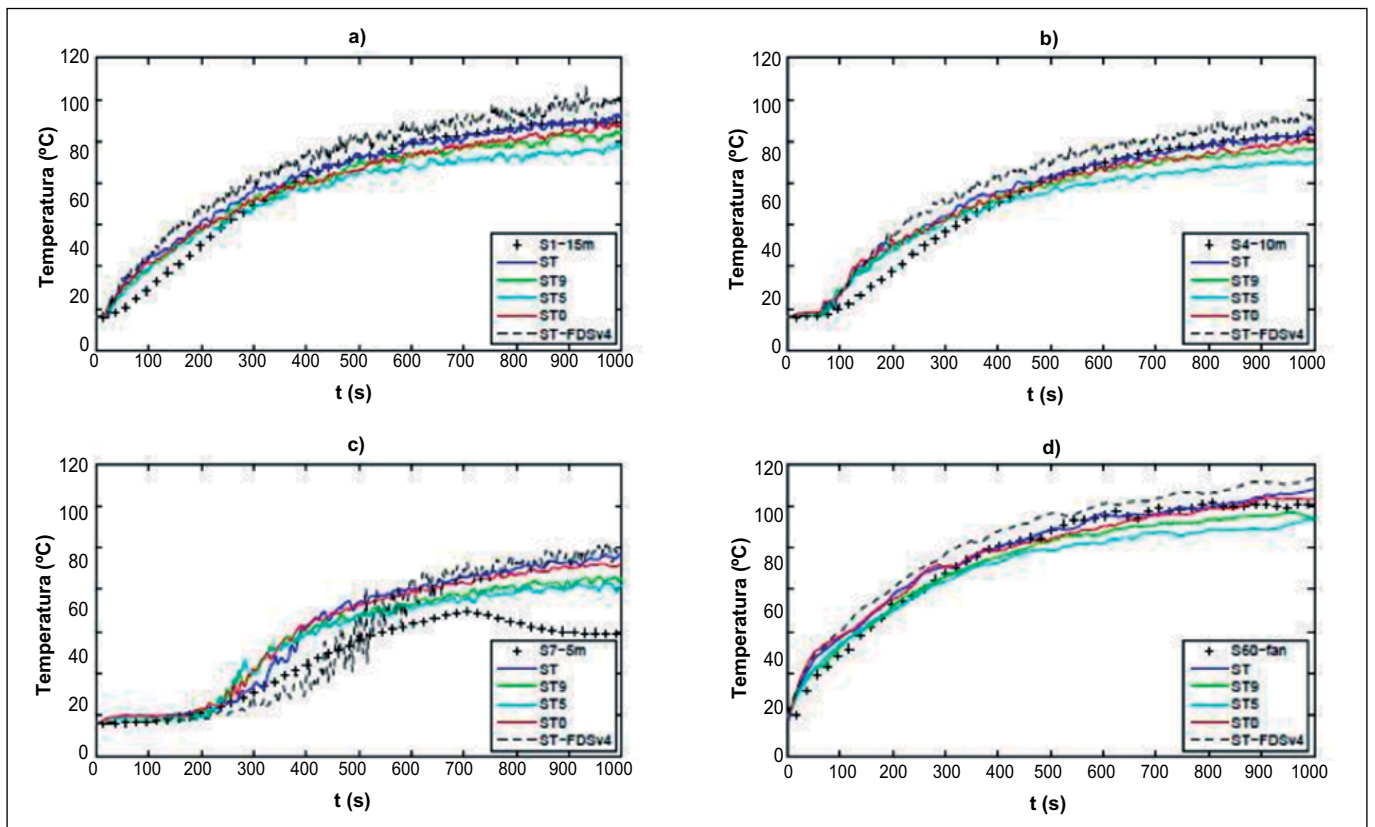


Figura 10. Comparación de temperaturas a 30 cm de la pared A, a diferentes alturas para un ensayo de 2.3 MW: a 15 m a), a 10 m b), a 5 m c), bajo el ventilador E3 d)

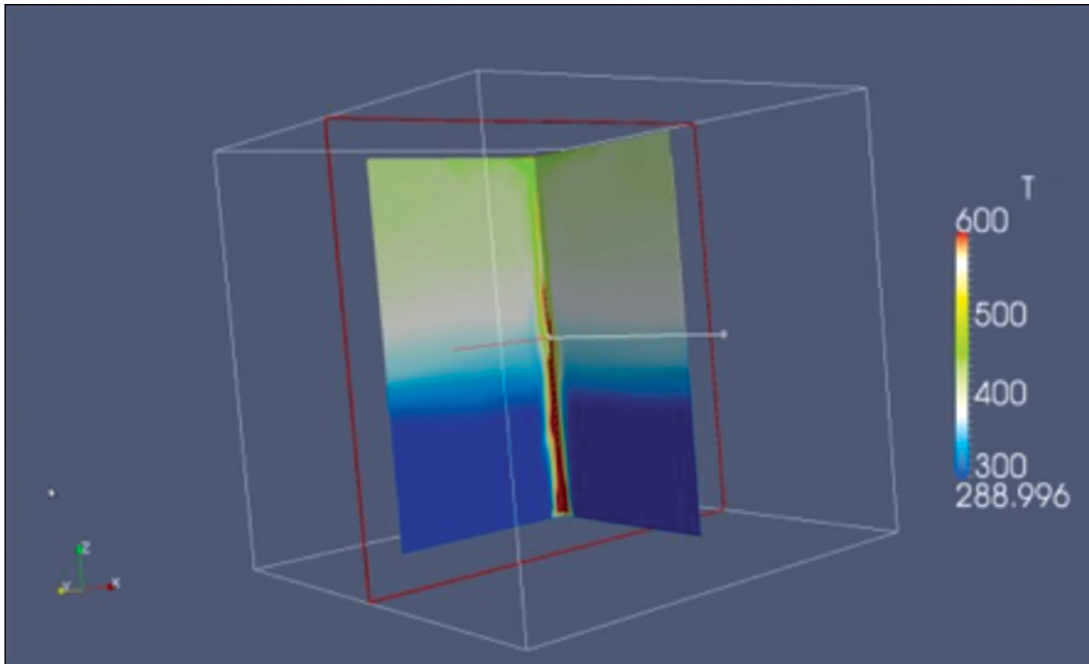


Figura 11. Rango de temperaturas para un instante de la simulación del modelo numérico del atrio.

### 5.3. Resultados experimentales

Los resultados experimentales obtenidos son principalmente las medidas de temperaturas en las diferentes posiciones del atrio mediante los termopares adquiridos para este proyecto. Para tratar de evaluar con precisión la tasa de liberación de calor, también se recogió la tasa de evaporación del combustible con las células de carga adquiridas. Adicionalmente, se ha usado un sistema de detección temprana de humo, gracias a la co-

laboración con Xtralis. En la figura 13, se muestra una foto durante el llenado de la bandeja de heptano, y donde se puede apreciar la posición de las células de carga.

Y en la figura 14, se muestran las medidas obtenidas por las células de carga durante el ensayo 1, obteniéndose de esta forma, la pérdida de combustible por instante de tiempo y permitiendo evaluar, con mucha más precisión, la tasa de liberación de calor.

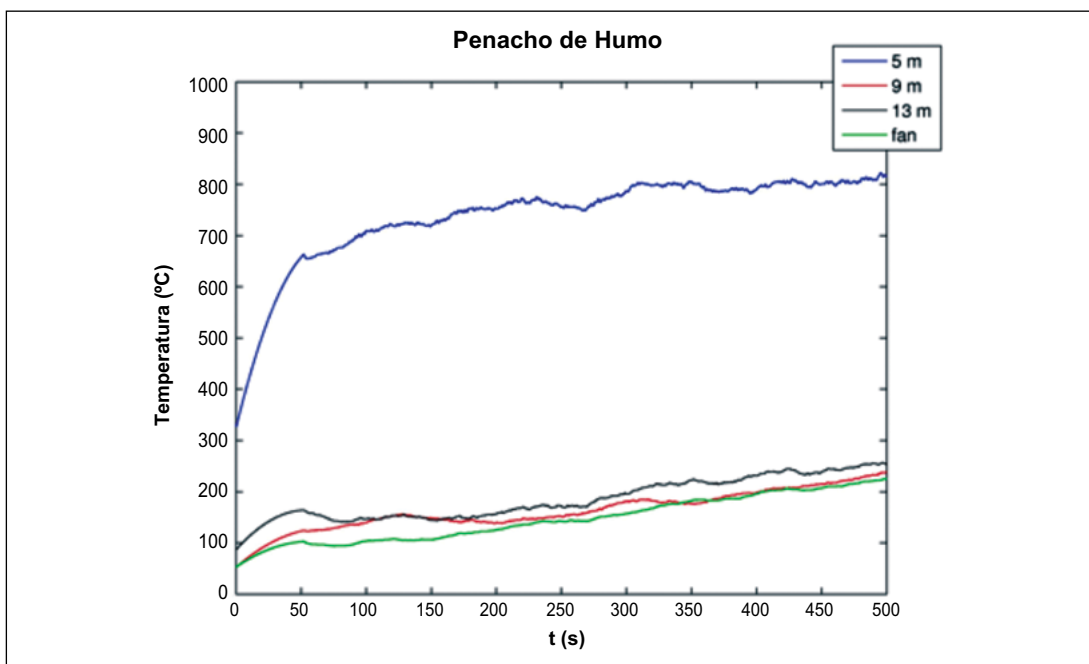


Figura 12. Rango de temperaturas en el penacho, para un ensayo de 2.3 MW. Modelo ST0.



Figura 13. Inicio del ensayo 3: 2.3 MW.

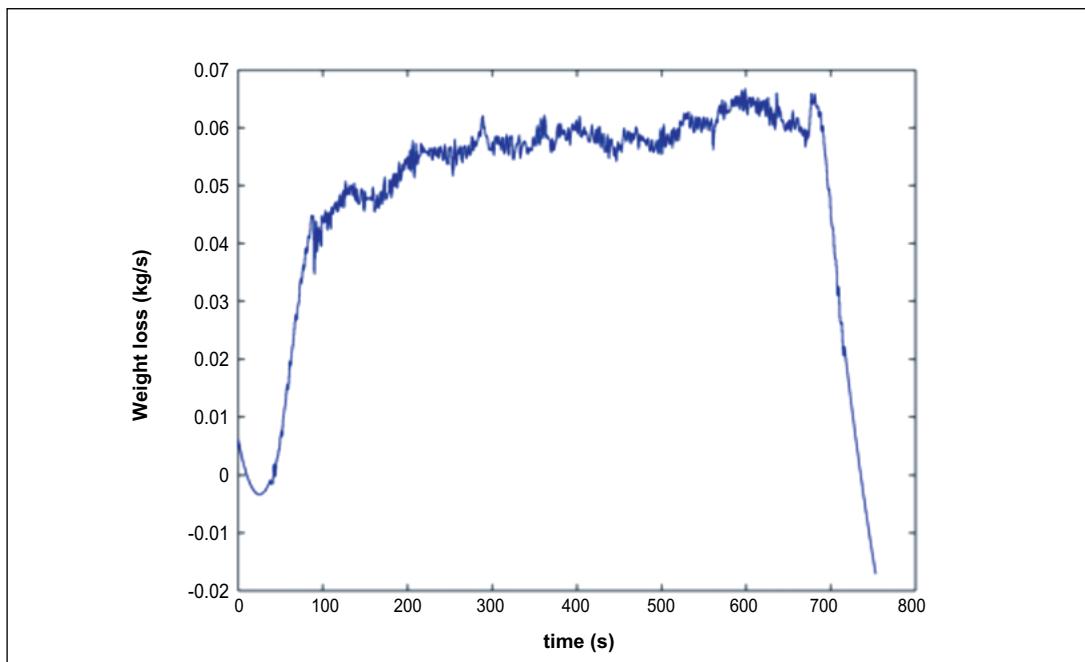
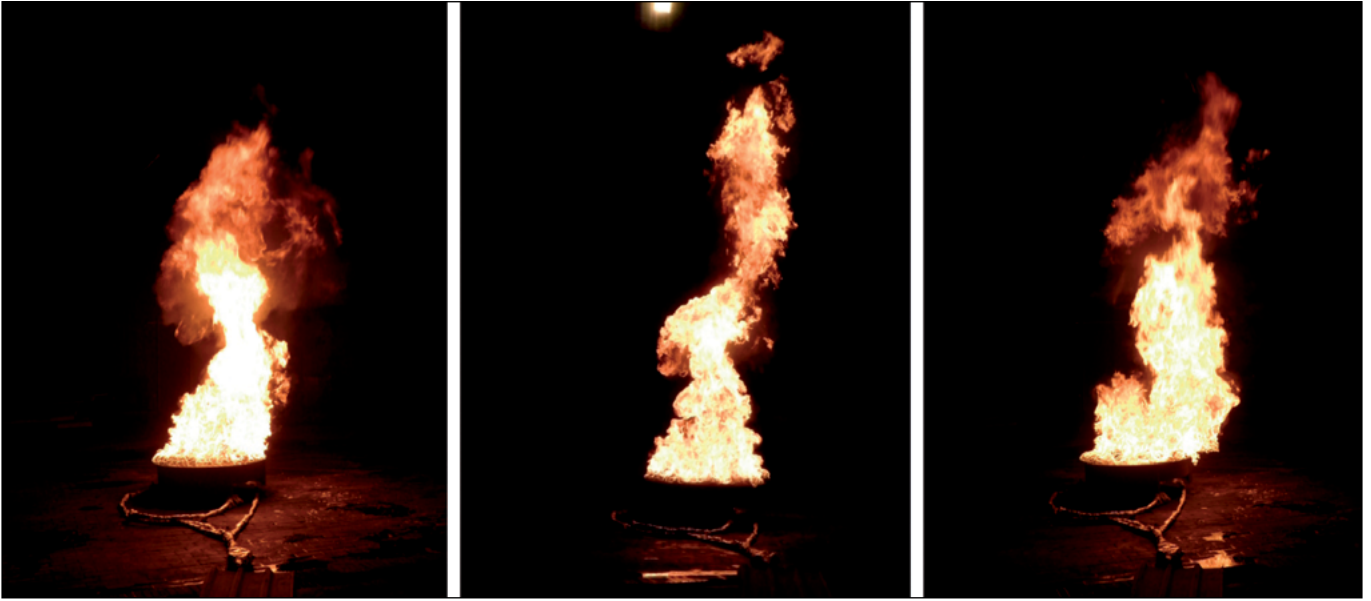


Figura 14. Variación de la masa de combustible por unidad de tiempo, durante el ensayo 1.

Se han grabado en vídeo los ensayos realizados, con el fin de comprobar también mediante inspección visual, el comportamiento de la llama que los modelos numéricos simulan. De esta forma, se puede comprobar cómo las entradas de aire afectan a la forma de la misma. En las figuras 15a, 15b y 15c, se muestran diferentes instantes del ensayo 1.

Los ensayos se han contrastado numéricamente y para el ensayo 1 se han obtenido, entre otras, la figura 16. En ella, se aprecian las temperaturas alcanzadas en la pared A a diferentes alturas, así como los resultados numéricos generados con FDS.



Figuras 15a, 15b y 15c. Llama generada durante el ensayo 1: 2.3 MW.

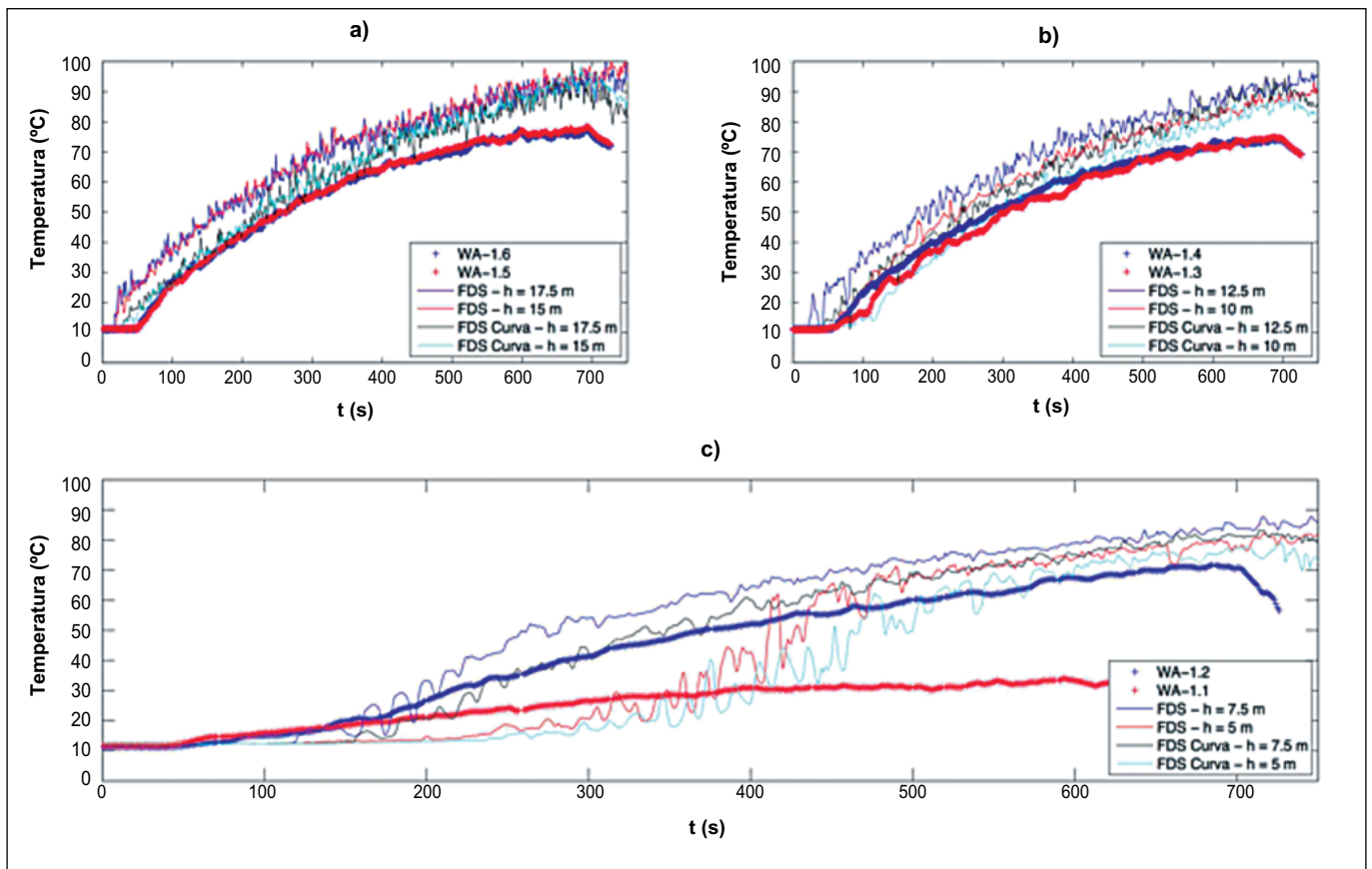


Figura 16. Comparación de temperaturas en la pared A, a diferentes alturas, durante el ensayo 1: 2.3 MW.

## 6. DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos mediante la comparación de los ensayos, realizados durante la campaña previa a este proyecto, con los modelos de zona, se ob-

serva una gran variabilidad en la altura de la capa de humos, con diferencias de hasta el 100% entre modelos. Además, también se puede apreciar cómo estos resultados no son conservativos, por lo que el valor de la altura la capa de humos es mayor que la medida. Por tanto, es

importante tener en cuenta que a la hora de emplear este tipo de modelos numéricos básicos en el diseño de los sistemas de control de humo en grandes volúmenes, se debe prestar especial atención. Habría por tanto que considerar el campo de aplicación de sus restricciones así como las simplificaciones que realiza cada modelo.

Los modelos de CFD permiten evaluar de forma mucho más precisa el comportamiento del humo en este tipo de recintos de gran volumen. Sin embargo, su gran desventaja radica en el alto coste computacional empleado a la hora de realizar los modelos con la suficiente precisión. Sin embargo, estos modelos numéricos siempre deben ser validados y contrastados con resultados experimentales, algo que no siempre se lleva a cabo. Además, la extrapolación de los resultados numéricos a escenarios diferentes, debe realizarse con especial cuidado debido a la complejidad de los fenómenos en estudio y a la dependencia de las numerosas variables que les afectan.

Por otro lado, las herramientas numéricas empleadas hoy en día tienen una serie de restricciones. Por ejemplo, el modelo numérico empleado en FDS requiere que la malla sea uniforme, algo que condiciona claramente la geometría de los modelos que intentan reproducir fielmente la realidad. En cambio, con FireFOAM, se pueden emplear mallas no uniformes, pero su manejo es mucho más complejo y dado su flexibilidad, requiere de una mayor precisión a la hora de definir los parámetros de entrada.

Para ganar flexibilidad a la hora de realizar los modelos numéricos del atrio en estudio, se evaluó en primer lugar, la necesidad de mantener la geometría piramidal del techo del recinto. De esta forma, los posibles remallados necesarios para ajustar la precisión de los resultados junto al tiempo de cálculo, se elaborarían de forma mucho más sencilla. Hay que tener en cuenta que la posición de los ventiladores en esta superficie, dificulta el mallado de la geometría, y de ahí, la búsqueda de este modelo mucho más sencillo. Así pues, en el estudio realizado con las geometrías diferentes del techo de la nave del fuego (ST, ST5, ST9, ST0), se aprecia cómo las temperaturas cerca de la pared, a distintas alturas, se reproducen fielmente con el modelo más simplificado (ST0). Se puede observar también, cómo la versión FDSv4 sobrepredice siempre las temperaturas medidas, alcanzándose un ajuste mucho mayor con la versión actual FDSv5, al menos, en el modelo más completo (ST) y también en el más simplificado (ST0). Este comportamiento se reproduce en las dos potencias ensayadas (1.36 MW y 2.3 MW), alcanzándose siempre unos valores más ajustados en el ensayo de mayor potencia, diferencia especialmente apreciable en los sensores del penacho. La discrepancia existente a la altura de 5 m es debido principalmente a su cercanía con las rejillas y la posible influencia del viento exterior sobre las medidas, algo que no queda contemplado en las simulaciones numéricas realizadas. Para extender este estudio, se ha analizado la influencia del techo sobre los resultados también en función del volu-

men del recinto. De esta forma, se ha variado la relación entre el área de la base del atrio con la altura, en dos nuevos modelos, observándose cómo de nuevo el modelo más simplificado (ST0) es capaz de reproducir con la suficiente precisión las temperaturas cercanas a la pared. Este análisis se ha elaborado únicamente con dos valores diferentes de volumen, lo cual exigiría un análisis más exhaustivo para una posible extrapolación de resultados. No obstante, los resultados obtenidos parecen indicar la utilidad de estos modelos sencillos, basados en el volumen equivalente, a la hora de analizar el comportamiento del humo en zonas alejadas del fuego. Esto, conllevaría a la búsqueda de métodos alternativos de simulación numérica donde no parece necesaria la reproducción fiel de las geometrías, y quizás, a simplificaciones adicionales que repercutieran de manera importante en los excesivos tiempos de cálculo que requieren este tipo de modelos.

Con respecto a los ensayos realizados durante este proyecto, los modelos numéricos elaborados siguen con la misma tendencia las medidas de temperatura durante cada uno de los ensayos. Tal y como se aprecia en la figura 16, el transitorio se predice muy bien con los modelos numéricos, principalmente debido a los datos obtenidos con las células de carga. Para los puntos más elevados el ajuste es bueno aunque será necesaria la realización de un estudio del tamaño de malla para obtener una mayor precisión. También habrá que estudiar el valor de la eficiencia del fuego, con el fin de simular correctamente los fenómenos de convección y de radiación existentes durante los ensayos.

Tal y como se ha descrito anteriormente, los datos evaluados en las posiciones inferiores del atrio son aquellos que más difieren, principalmente debido a la proximidad a las rejillas y a la influencia de las condiciones exteriores.

## 7. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha analizado y estudiado el movimiento del humo en construcciones tipo atrio. Esto se ha llevado a cabo a través de una revisión bibliográfica exhaustiva, donde se ha analizado el problema de llenado de humo, así como los estudios basados en los diferentes sistemas de ventilación. También, se han analizado los trabajos elaborados con distintos penachos y las herramientas numéricas principales que se emplean en este campo.

A partir de una serie de ensayos llevados a cabo en la misma nave, se ha evaluado el uso de los modelos de zona para el estudio de la altura de la capa de humos en este tipo de recintos. Debido a la gran variabilidad en los resultados obtenidos, se ha confirmado la necesidad de un estudio más exhaustivo en este campo, principalmente, mediante el uso de modelos basados en CFD.

Las herramientas numéricas basadas en CFD suponen un alto coste computacional a la hora de evaluar el comportamiento del humo en este tipo de construcciones.



Por esta razón, se ha analizado la influencia del uso de modelos numéricos basados en geometrías más sencillas y que permitan alcanzar valores lo suficientemente precisos. Los buenos resultados obtenidos demuestran la efectividad en el uso de modelos geométricos más simples a la hora de evaluar la temperatura en puntos alejados del fuego.

Por último, los modelos basados en CFD requieren de verificación y validación, para que mediante la mejora de los modelos implementados, su rango de aplicabilidad se amplíe y puedan predecir de manera precisa los ambientes inducidos, en caso de incendio, bajo circunstancias especiales. Esto generalmente se realiza a través de ensayos a escala real, lo cual es costoso y complejo. Y gracias a esta Ayuda a la Investigación de la Fundación Mapfre, se han podido llevar a cabo una serie de ensayos a escala real, en la Nave del Fuego del Centro Tecnológico del Metal en Murcia. Para ello, se ha adquirido el material necesario para instrumentar el atrio con sensores de temperatura y su registro para su posterior análisis. El acondicionamiento de la nave ha sido un trabajo complejo, pues ha requerido el cambio de los ventiladores de extracción, principalmente para que con las potencias ensayadas el humo permaneciera a alguna altura determinada. Como novedad en estos ensayos, también se ha medido la tasa de evaporación del combustible mediante unas células de carga para evaluar con mayor exactitud la tasa de liberación de calor en cada ensayo. Los resultados de los modelos numéricos elaborados, concretamente con FDS, reproducen fielmente la tendencia de las temperaturas, especialmente, en aquellos puntos alejados de la llama. Y la implementación de las medidas realizadas con las células de carga mejora notablemente el ajuste.

Esta campaña de ensayos nos ha proporcionado una base de datos de incendios a escala real de gran valor, que permitirá comprender mejor los fenómenos que aparecen en caso de incendio en un atrio y optimizar el diseño de sistemas de protección de incendios basados en prestaciones.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Aurelio Rojo Garrido, Andrés Pedreira Ferreño y Gabriel Santos Hernández, de la Asociación de Profesionales de Ingeniería de Protección contra Incendios su colaboración en el inicio de este proyecto, así como su apoyo durante la realización del mismo.

Asimismo quieren agradecer a Sodeca SA la donación de cuatro ventiladores para su instalación permanente en la Nave de Fuego. También a Xtralis, por su contribución en la medición de la altura de capa de humos. Ha sido también muy importante la colaboración y ayuda de Ignacio del Rey y de su equipo del Centro de Modelado de Ingeniería Mecánica (CMIM).

Y, por supuesto, a la Fundación Mapfre, así como al tutor del proyecto Jesús Vicente Hernández Hueros y a Yolanda Pastor por su disponibilidad y cercanía.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Tanaka and T. Yamana, "Smoke control in large scale spaces - Part 1." *Fire Science and Technology*, vol. 5, pp. 31-40., 1985.
- [2] T. Tanaka and T. Yamana, "Smoke control in large scale spaces - Part 2." *Fire Science and Technology*, vol. 5, pp. 41-54, 1985.
- [3] P. L. Hinkley, "Comparison of an establish method of calculation of smoke filling of large scale spaces with recent experiments," *Fire Science and Technology*, vol. 8, pp. 1-8, 1988.
- [4] B. Hagglund, R. Jansson and K. Nirens, "Smoke filling experiments in a 6 x 6 x 6 meter enclosure," In: FOA Report C20585; National Defence Research Establishment: Sundbyberg, Sweden, 1985.
- [5] W. K. Chow and E. Cui, "Plume equations for studying smoke-filling process in atria with a zone model," *Fire Mater.*, vol. 21, pp. 235-244, 1997.
- [6] W. K. Chow, "On the use of time constants for specifying the smoke filling process in atrium halls," *Fire Saf. J.*, vol. 28, pp. 165-177, 3, 1997.
- [7] D. Q. Duong, "The accuracy of computer fire models: Some comparisons with experimental data from Australia," *Fire Saf. J.*, vol. 16, pp. 415-431, 1990.
- [8] W. K. Chow, "A comparison of the use of fire zone and field models for simulating atrium smoke-filling processes," *Fire Saf. J.*, vol. 25, pp. 337-353, 11, 1995.
- [9] J. S. Rho and H. S. Ryou, "A numerical study of atrium fires using deterministic models," *Fire Saf. J.*, vol. 33, pp. 213-229, 10, 1999.
- [10] R. Huo, W. Fan, L. Yuan, H. Dong, W. K. Chow, N. K. Fong and P. L. Ho, "Construction of a large space experimental burning hall and preliminary tests," *Fire Safety Science*, vol. Vol. 7(1), pp. 8-13, 1998.
- [11] W. K. Chow, E. Cui, Y. Z. Li, R. Huo and J. J. Zhou, "Experimental Studies on Natural Smoke Filling in Atria," *J. Fire Sci.*, vol. 18, pp. 84-103, March 01, 2000.
- [12] W. K. Chow, Y. Z. Li, E. Cui and R. Huo, "Natural smoke filling in atrium with liquid pool fires up to 1.6 MW," *Build. Environ.*, vol. 36, pp. 121-127, 1/1, 2001.
- [13] W. K. Chow, "Simulation of Fire Environment for Linear Atria in Hong Kong," *J. Archit. Eng.*, vol. 3, pp. 80-88, June 1997, 1997.
- [14] T. X. Qin, Y. C. Guo, C. K. Chan and W. Y. Lin, "Numerical investigation of smoke exhaust mechanism in a gymnasium under fire scenarios," *Build. Environ.*, vol. 41, pp. 1203-1213, 9, 2006.
- [15] T. X. Qin, Y. C. Guo, C. K. Chan and W. Y. Lin, "Numerical simulation of the spread of smoke in an atrium under fire scenario," *Build. Environ.*, vol. 44, pp. 56-65, JAN, 2009.
- [16] G. Cox, "On adhered spill plume entrainment," *Fire Saf. J.*, vol. 45, pp. 400-401, 12, 2010.
- [17] G. D. Lougheed and G. V. Hadjisophocleous, "Investigation of Atrium Exhaust Effectiveness," *ASHRAE Trans*, vol. 103, 1997.
- [18] G. D. Lougheed, G. V. Hadjisophocleous, C. McCartney and B. C. Taber, "Large-scale physical model studies for an atrium smoke exhaust system," *ASHRAE Trans*, vol. 105, pp. 1-23, 1999.
- [19] G. D. Lougheed and G. V. Hadjisophocleous, "Smoke management: atriums and plugholes," *Canadian Consulting Engineer*, vol. 41, pp. 38, 2000.
- [20] G. D. Lougheed and G. V. Hadjisophocleous, "Smoke hazards from fires in high places," *ASHRAE J.*, vol. 43, pp. 34-46, 2001.
- [21] G. D. Lougheed and G. V. Hadjisophocleous, "The Smoke hazard from a fire in high spaces," *ASHRAE Trans*, vol. 107, pp. 720-729, 2001.
- [22] W. K. Chow and C. L. Chow, "Evacuation with smoke control for atria in green and sustainable buildings," *Build. Environ.*, vol. 40, pp. 195-200, 2, 2005.
- [23] W. K. Chow, L. Yi, C. L. Shi, Y. Z. Li and R. Huo, "Mass flow rates across layer interface in a two-layer zone model in an atrium with mechanical exhaust system," *Build. Environ.*, vol. 41, pp. 1198-1202, 9, 2006.

- [24] S. Hostikka, M. Kokkala and J. Vaari, "Experimental study of the localized room fires," NFSC2 Test Series, VTT Research Notes 2104; Technical Research Centre of Finland: Finland, 2001.
- [25] C. Gutiérrez-Montes, E. Sanmiguel-Rojas, A. S. Kaiser and A. Viedma, "Numerical model and validation experiments of atrium enclosure fire in a new fire test facility," *Build. Environ.*, vol. 43, pp. 1912-1928, 11, 2008.
- [26] C. Gutiérrez-Montes, E. Sanmiguel-Rojas, A. Viedma and G. Rein, "Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3 MW fires in a 20 m cubic atrium," *Build. Environ.*, vol. 44, pp. 1827-1839, 9, 2009.
- [27] L. Yi, R. Huo, Y. Z. Li and L. Peng, "Study on the effect of unsymmetric air supply to mechanical exhaust in large space fire," *Journal of University of Science and Technology of China*, vol. 33, pp. 579-585, 2003.
- [28] L. Yi, W. K. Chow, Y. Z. Li and R. Huo, "A simple two-layer zone model on mechanical exhaust in an atrium," *Build. Environ.*, vol. 40, pp. 869-880, 7, 2005.
- [29] S. Kerber and J. Milke, "Using FDS to Simulate Smoke Layer Interface Height in a Simple Atrium," *Fire Technol.*, vol. 43, pp. 45-75, 2007.
- [30] H. P. Morgan and N. R. Marshall, "Smoke Hazards In Covered, Multi-Level Shopping Mall: an experimental-based theory of smoke production," BRE CP48/75; Building Research Establishment: Borehamwood, UK, 1975.
- [31] H. P. Morgan and N. R. Marshall, "An Experimentally Based Theory for Smoke Production Smoke Control Measures in a Covered, Two-Level Shopping Malls," BRE CP48/75; Building Research Establishment: Borehamwood, UK, 1979.
- [32] H. P. Morgan, "The horizontal flow of buoyant gases toward an opening," *Fire Saf. J.*, vol. 11, pp. 193-200, 12, 1986.
- [33] H. P. Morgan, "Comments on "A note on smoke plumes from fires in multi-level shopping malls"," Letters to the Editor. *Fire Safety Journal*, vol. 12, pp. 83-84, 1987.
- [34] M. Law, "A note on smoke plumes from fires in multi-level shopping malls," *Fire Saf. J.*, vol. 10, pp. 197-202, 5, 1986.
- [35] H. P. Morgan and G. O. Hansell, "Atrium buildings: Calculating smoke flows in atria for smoke-control," *Fire Saf. J.*, vol. 12, pp. 9-35, 2, 1987.
- [36] G. O. Hansell, H. P. Morgan and N. R. Marshall, "Smoke flow experiments in a model atrium," BRE Occasional Paper OP55; Building Research Establishment: Borehamwood, UK, 1993.
- [37] R. Harrison, "Smoke Control in Atrium Buildings: A Study of the Thermal Spill Plume," Fire Engineering Research Report 04/1; University of Canterbury: Christchurch, NZ, 2004.
- [38] L. Fang, P. V. Nielsen and H. Brohus, "Investigation on smoke movement and smoke control for atrium in green and sustainable buildings," Department of Civil Engineering, Technical Report no.32; Aalborg University: Aalborg, Denmark, 2007.
- [39] IBC, "International Building Code," International Code Council, Inc: Falls Church, VA, 2003.
- [40] N. 92B, "Guide for smoke management systems in atria, covered malls, and large areas," National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 2005.
- [41] G. D. Loughheed and C. J. McCartney, "Balcony spill plumes: full-scale experiments, Part 1," *ASHRAE Trans*, vol. 114(1), pp. 329-343, 2008.
- [42] G. D. Loughheed and C. J. McCartney, "Balcony spill plumes: full-scale experiments, Part 2," *ASHRAE Trans*, vol. 114(1), pp. 355-368, 2008.
- [43] C. J. McCartney, G. D. Loughheed and E. J. Weckman, "CFD investigation of balcony spill plumes in atria," *ASHRAE Trans*, vol. 114, pp. 369-378, 2008.
- [44] G. O. Hansell and H. P. Morgan, "Smoke Control in Atrium Building Using Depressurisation. Part 1: Design Principles," *Fire Science & Technology*, vol. 10, pp. 11-26, 1990.
- [45] G. O. Hansell and H. P. Morgan, "Smoke Control in Atrium Building Using Depressurisation. Part 2: Considerations Affecting Practical Design," *Fire Science & Technology*, vol. vol. 10, pp. 27-41, 1990.
- [46] M. Hirota, H. Mizuochi and S. A. Kakegawa, "Demonstrational Test of Pressurization Smoke Control System at A Large-scale Shopping Store," *Fire Science and Technology*, vol. 25, pp. 213-237, 2006.
- [47] M. Poreh and S. Trebukov, "Wind effects on smoke motion in buildings," *Fire Saf. J.*, vol. 35, pp. 257-273, 10, 2000.
- [48] R. D. Peacock, W. Jones, P. A. Reneke and G. P. Forney, CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). User Guide. United States: National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [49] J. A. Milke and F. W. Mowrer, "A Design Algorithm for Smoke Management Systems in Atria and Covered Malls," Report FP93-04, University of Maryland, College Park, United States, 1993.
- [50] H. E. Mitler and J. A. Rockett, User's Guide to FIRST, A Comprehensive Single-Room Fire Model. now National Institute of Standards and Technology; United States: National Bureau of Standards, 1987.
- [51] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell and R. McDermott, Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. United States: National Institute of Standard and Technology, 2008.
- [52] S. V4.06, "User Guide," Computational Dynamics, 2008.
- [53] J. Ewer, F. Jia, A. Grandison, E. Galea and M. Patel, "SMARTFIRE V4.1. User Guide and Technical Manual," 2008.
- [54] ANSYS, User Manual. United Kingdom: 2008.
- [55] OpenFOAM-1.6.x, User Guide OpenFoam. Free Software Foundation: 2010.
- [56] C. Gutiérrez-Montes, G. Rein, E. Sanmiguel-Rojas and A. Viedma, "Smoke and fire dynamics in atria and large enclosures: An overview," in Anonymous Nova Science Publishers, Inc, 2009, .
- [57] W. K. Chow, "Application of Computational Fluid Dynamics in building services engineering," *Build. Environ.*, vol. 31, pp. 425-436, 9, 1996.
- [58] C. W.K., "A comparison of the use of fire zone and field models for simulating atrium smoke-filling processes," *Fire Saf. J.*, vol. 25, pp. 337-353, 11, 1995.
- [59] C. Gutiérrez-Montes, E. Sanmiguel-Rojas, A. S. Kaiser and A. Viedma, "Numerical model and validation experiments of atrium enclosure fire in a new fire test facility," *Build. Environ.*, vol. 43, pp. 1912-1928, 11, 2008.
- [60] C. Gutiérrez-Montes, G. Rein, E. Sanmiguel-Rojas and A. Viedma, "Smoke and fire dynamics in atria and large enclosures: An overview," in Anonymous Nova Science Publishers, Inc, 2009, .
- [61] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell and R. McDermott, Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. United States: National Institute of Standard and Technology, 2008.
- [62] C. Gutiérrez-Montes, E. Sanmiguel-Rojas, A. Viedma and G. Rein, "Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3 MW fires in a 20 m cubic atrium," *Build. Environ.*, vol. 44, pp. 1827-1839, 9, 2009.
- [63] A. Kashef, H. H. Saber and L. Gao, "Optimization of Emergency Ventilation Strategies in a Roadway Tunnel," *Fire Technol.*, vol. 47, pp. 1019-1046, 2011.
- [64] E. Kim, J. P. Woycheese and N. A. Dembsey, "Fire dynamics simulator (version 4.0) simulation for tunnel fire scenarios with forced, transient, longitudinal ventilation flows," *Fire Technol.*, vol. 44, pp. 137-166, 2008.
- [65] F. Colella, G. Rein, R. Borchiellini and J. Torero, "A Novel Multiscale Methodology for Simulating Tunnel Ventilation Flows During Fires," *Fire Technol.*, pp. 1-33, 2010.

#### Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este proyecto. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.