

Diseño y análisis de procedimiento de generación de agua nebulizada a baja presión

Autor: Roberto Santos García

Tesis Doctoral UDC - 2017

Directores: Alberto Arce Ceinos

Ángel Eduardo Varela Lafuente

Programa de Doctorado en Ingeniería Industrial (R.D. 1393/2007)



Gracias a todos
los que en este difícil camino
han tenido paciencia conmigo en *esos* momentos.

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	1
RESUMEN	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. OBJETIVO DE LA TESIS Y FASES DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1. OBJETIVO DE LA TESIS	8
1.2. FASES DE LA INVESTIGACIÓN	8
2. ANTECEDENTES	9
2.1. LA EVOLUCIÓN DE LA SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS	9
2.1.1. Evolución de la Normativa nacional	9
2.1.1.1. Desarrollo reglamentario	10
2.1.2. Aspectos sociológicos de la Seguridad	13
2.2. EL NUEVO ENFOQUE PRESTACIONAL EN SEGURIDAD	14
2.2.1. Ventajas del Diseño Basado en Prestaciones	15
2.2.2. Enfoque Prestacional en la Normativa Nacional	16
2.2.3. Métodos de Evaluación del Riesgo: MEREDICTE	18
2.2.4. Enfoque Prestacional en la Normativa Internacional	19
2.2.5. Otras entidades de reconocido prestigio	20
3. ESTADO DE LA TÉCNICA	23
3.1. EL AGUA COMO AGENTE EXTINTOR UNIVERSAL	23
3.1.1. La capacidad de extinción del agua	24
3.1.2. Limitaciones en su aplicación	25
3.2. INSTALACIONES DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS	26
3.2.1. Los sistemas de Rociadores Automáticos	27
3.2.1.1. Conceptos generales	27
3.2.1.2. Clasificación de los sistemas	28
3.2.1.2.1. Tubería Húmeda	29
3.2.1.2.2. Tubería Seca	29
3.2.1.3. Fiabilidad de las instalaciones de Rociadores Automáticos	30
3.2.2. UNE EN 12845: Criterios de diseño de sistemas de rociadores	31
3.2.2.1. Clasificación de Riesgos	32

3.2.2.2. Clasificación de Materiales y Tipologías de embalaje	34
3.2.2.3. Criterios Hidráulicos de Diseño	36
3.2.3. Los Rociadores ESFR	37
3.2.4. Los Rociadores Residenciales	39
3.3. EL AGUA NEBULIZADA EN PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS	40
3.3.1. Ventajas del agua nebulizada	40
3.3.2. Características de los sistemas de alta presión	41
3.3.3. Soluciones y tipologías de instalaciones de agua nebulizada	44
3.3.4. Normativa sobre los Sistemas de Agua Nebulizada	46
3.3.4.1. NFPA 750	46
3.3.4.2. UNE-CEN/TS 14972	47
3.4. GENERACIÓN DE AGUA NEBULIZADA A BAJA PRESIÓN	48
3.4.1. Sistemas de agua nebulizada a baja presión	49
3.4.2. Patentes	50
3.5. LOS MODELOS DE SIMULACIÓN EN PCI	52
3.5.1. Modelos de Zona	53
3.5.2. Modelos de Campo	55
3.5.3. Desarrollo de Modelos CFD	56
3.5.3.1. Pre-procesado: geometría	57
3.5.3.2. Pre-procesado: Mallado	57
3.5.3.3. Pre-procesado: Modelos físicos	58
3.5.3.4. Pre-procesado: Condiciones de contorno	59
3.5.3.5. Cálculo iterativo: Resolución de las Leyes de conservación	59
3.5.3.6. Cálculo iterativo: Modelos físicos implementados en el solver	61
3.5.3.7. Post-procesado de resultados	61
4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	62
4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO	62
4.1.1. Características del procedimiento propuesto	63
4.1.2. Novedad y aplicabilidad	64
5. METODOLOGÍA	65
5.1. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL MODELO PROPUESTO	65
5.2. ANÁLISIS DINÁMICO DEL MODELO PROPUESTO	65
6. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	70
6.1. HERRAMIENTA SELECCIONADA: ANSYS CFX	70

6.1.1. Características principales	70
6.1.2. Análisis Estacionario VS. Análisis Transitorio.....	71
6.1.3. Modelos empleados para el solver.....	73
6.1.3.1. Modelo de combustión	73
6.1.3.2. Modelo de generación térmica	74
6.1.3.3. Modelo multifásico:	75
6.1.3.4. Modelo de transferencia de calor	75
6.1.3.5. Modelo de turbulencia.....	76
6.1.3.6. Fluid Buoyancy Model: density difference.....	76
6.1.3.7. Modelo de radiación	77
6.1.3.8. Modelo de cambio de fase.....	77
6.1.4. Ecuaciones del Sistema.....	78
6.1.4.1. Ecuación de continuidad (conservación de la masa)	78
6.1.4.2. Ecuación del momento (cantidad de movimiento).....	78
6.1.4.3. Ecuación de la energía total (Total Energy).....	78
6.1.4.4. Ecuación de la energía térmica (Thermal Energy).....	78
6.1.4.5. Ecuaciones de estado	80
6.1.4.6. Ecuación de las propiedades de un gas real saturado de vapor	80
6.1.4.7. Ecuación de flotabilidad (buoyancy)	80
6.1.4.8. Ecuación de evaporación	81
6.1.4.9. Ecuación de turbulencia	82
6.2. SIMULACIONES REALIZADAS	83
6.2.1. Modelo Difusor Único (Combustión tipo 1 - Estacionario).....	84
6.2.1.1. Objetivo	84
6.2.1.2. Descripción del escenario	84
6.2.1.3. Resultados	89
6.2.1.4. Conclusiones.....	93
6.2.2. Modelo Difusor Único (Combustión tipo 2 - Estacionario).....	95
6.2.2.1. Objetivo	95
6.2.2.2. Descripción del escenario	95
6.2.2.3. Resultados	100
6.2.2.4. Conclusiones.....	105
6.2.3. Modelo Difusores Múltiples (ESTACIONARIO)	106
6.2.3.1. Objetivo	106

6.2.3.2. Descripción del escenario	107
6.2.3.3. Conclusiones.....	116
6.2.4. Modelo Difusores Múltiples (TRANSITORIO).....	120
6.2.4.1. Objetivo	120
6.2.4.2. Descripción del escenario	120
6.2.4.3. Conclusiones.....	143
6.3. RESULTADOS OBTENIDOS	144
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	145
8. PRÓXIMAS FASES DE LA INVESTIGACIÓN	147
ÍNDICE DE FIGURAS.....	148
ÍNDICE DE TABLAS	151
9. BIBLIOGRAFÍA.....	152
10. ANEXO A: ANÁLISIS DINÁMICO	160
11. ANEXO B: POSTPROCESADO GRÁFICO DE LAS SIMULACIONES	168

RESUMEN

Se ha propuesto en esta Tesis Doctoral un procedimiento (sistema) para la generación de agua nebulizada a baja presión, analizando la viabilidad del mismo en su aplicación para la extinción de incendios.

Para ello, se ha desarrollado en una primera etapa, un detallado estudio de la técnica para poder concretar algunos de los aspectos del diseño del sistema. Y además, posicionar este procedimiento de generación de agua nebulizada en su entorno, según los criterios técnicos y las soluciones existentes en el campo actual de la ingeniería de seguridad contra incendios. En una segunda etapa, se ha realizado el análisis dinámico y energético del comportamiento del agua en el proceso. Y por último, empleando herramientas de simulación computacional se ha realizado un análisis CFD para comparar el desempeño del sistema frente a un incendio, respecto al comportamiento que tendrían en el mismo escenario otros dos sistemas de extinción presentes actualmente en el mercado: los rociadores automáticos, y los sistemas de agua nebulizada a alta presión.

Tras el análisis de todos los resultados, se puede concluir que el sistema propuesto es viable, y además consigue para los escenarios de incendio simulados, unos resultados de refrigeración (y por tanto, de extinción) similares a los otros sistemas de extinción de incendios estudiados.

RESUMO

Propúxose nesta Tese Doctoral dun método (sistema) para a xeración de auga nebulizada mediante baixa tensión, analizando a súa viabilidade na súa aplicación para o lume de supresión de incendios.

Para este fin, desenvolveu-se nunha primeira etapa, un estudo detallado da técnica a fin de realizar algúns dos aspectos do proxecto do sistema. E tamén posicionando a rede de xerar auga nebulizada no seu ambiente, dacordo cos criterios técnicos e solucións existentes no campo actual da enxeñaría de seguridade contra incendios. Nunha segunda fase, foi feita a análise dinámica e enerxética do comportamento da auga no proceso. E, finalmente, empregando ferramentas de simulación computacional fíxose unha análise CFD para comparar o rendemento do sistema de incendio respecto ao comportamento que terían no mesmo escenario outros dous sistemas de extinción presentes actualmente no mercado: os rociadores automáticos, e os sistemas de auga nebulizada de alta tensión.

Tras o análisis de tódolos resultados, pódese concluir que o sistema proposto é viable, e ademáis chega a escenarios de incendio simulados, algúns resultados de refrixeración (e polo tanto, extinción) semellantes a outros sistemas de extinción estudados.

ABSTRACT

This PhD. Thesis describes a procedure (system) for low pressure water mist generation, analyzing its performance when used for fire suppression.

To achieve this goal, a detailed study on the state of the art has been developed in a first stage to specify some aspects of the system design. And also, position this water mist generation process in its environment, according to technical criteria and other existing solutions in fire safety engineering. In a second stage, a dynamic and energetic analysis of the water behavior throughout the process has been carried out. Finally, using computer simulation tools, a CFD analysis was developed to compare the performance of the system against a fire, with the behavior of two other extinction systems commercially available: automatic sprinklers, and high pressure water mist systems.

After analysis and discussion of all the data and results gathered, it can be concluded that the proposed system is feasible, and therefore for simulated fire scenarios the cooling obtained (and so extinction) results similar to the other fire extinction systems studied .

1. OBJETIVO DE LA TESIS Y FASES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. OBJETIVO DE LA TESIS

La evolución de la normativa de seguridad contra incendios en los últimos años ha supuesto un nuevo enfoque para los requisitos que exigimos a nuestros edificios. Al igual que sucede en otros ámbitos de la técnica, los sistemas de extinción de incendios evolucionan de forma similar adaptándose a las nuevas necesidades. En muchos casos, estas instalaciones ya no vienen definidas por los requisitos prescriptivos de la normativa de edificación existente en cada país, sino que se encuadran dentro del conocido como “enfoque prestacional”. Este enfoque obliga a evaluar los sistemas de forma que quede demostrado que son fiables y eficaces para los objetivos que persiguen, es decir, que consiguen las *prestaciones* esperadas.

Es en este ámbito del nuevo enfoque prestacional donde se han desarrollado en los últimos 25 años los sistemas de extinción por agua nebulizada. Se trata de sistemas que trabajan habitualmente a muy altas presiones, para poder lanzar las pequeñas gotas generadas hacia el incendio, y cumplir así su función de extinción. Las grandes ventajas que supone el agua nebulizada como sistema de extinción, frente a los sistemas convencionales (como los rociadores automáticos), se ven en ocasiones muy limitadas por los inconvenientes y requisitos de estos sistemas de alta presión (siendo el más importante el coste de primera instalación).

Es por ese motivo, que en el mercado se han ido desarrollando otros sistemas también basados en la extinción por agua nebulizada, pero que sean capaces de funcionar adecuadamente a presiones sensiblemente inferiores. **El objeto de esta tesis doctoral es proponer y analizar la viabilidad de un nuevo sistema de generación de agua nebulizada a baja presión, para su uso en la extinción de incendios.**

1.2. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio y desarrollo del análisis del modelo propuesto se ha desarrollado en tres etapas diferenciadas:

- ✓ Primera Fase de estudio documental de la técnica existente y las diferentes variantes para el sistema
- ✓ Segunda Fase de estudio analítico de la viabilidad del modelo propuesto
- ✓ Tercera Fase de Simulación computacional en la que se analizarán las principales variables que permitan evaluar la consecución de los objetivos para los que se diseña el sistema.

2. ANTECEDENTES

Puesto que la principal aplicación del sistema propuesto para la generación de agua nebulizada será la de extinción de incendios, como tal se realizará su análisis de viabilidad y la evaluación de su eficacia. Por lo tanto, es necesario comenzar describiendo y resumiendo los antecedentes y el estado de la técnica de este campo del conocimiento, para poder encuadrar adecuadamente el procedimiento propuesto, según toda la información recopilada de la extensa bibliografía consultada al efecto.

2.1. LA EVOLUCIÓN DE LA SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS

Para poder entender cómo ha evolucionado el diseño de sistemas de extinción de incendios a nivel mundial, y principalmente en nuestro país, es fundamental entender cómo han evolucionado los requisitos reglamentarios en esta materia. Por una parte, se emplearán las referencias reglamentarias nacionales e internacionales para explicar los requisitos exigibles a las edificaciones; y por otra, el cómo han evolucionado los requisitos solicitados a los propios sistemas de extinción de incendios.

2.1.1. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA NACIONAL

Actualmente la normativa Española en materia de protección contra incendios se encuentra al nivel del resto de países Europeos. Esta situación se ha alcanzado gracias al desarrollo y evolución de ordenanzas reguladoras, normas, reglamentos y leyes, desarrolladas durante las últimas décadas por los colectivos profesionales más implicados en la protección contra incendios, entre otros, Jefes de Bomberos de algunas ciudades como Madrid, Barcelona, o Zaragoza; Organismos públicos como algunos Ministerios, o como el Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC); y por supuesto, mediante la participación de empresas privadas, principalmente a través de los Comités específicos de normalización.

En la actualidad, la normativa de referencia en Edificación es el Código Técnico de la edificación (vigente desde su aprobación en 2006), que mediante sus documentos básicos DB-SI y DB-SUA [1], define las condiciones mínimas de seguridad para cualquier edificación que se quiera construir en nuestro país. Este documento, que ya se ha revisado en varias ocasiones desde su publicación, permite a los responsables que intervienen en la protección contra incendios (proyectistas, jefes de obra, técnicos municipales, compañías de seguros,...) conocer los criterios que cada establecimiento debe satisfacer, así como las responsabilidades derivadas de sus actuaciones, eliminando en parte algunas indefiniciones conflictivas de reglamentaciones anteriores.

Para completar la normativa de obligado cumplimiento en materia de seguridad contra incendios en nuestro país, también debemos conocer y aplicar el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales (RSCIEI) [2], que es el que permite evaluar los requisitos mínimos exigibles a los edificios de uso industrial o almacén. Y por último, y para definir los requisitos que deben cumplir todas las instalaciones y sistemas de protección contra incendios, se dispone del Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios (RIPCI) [3].

2.1.1.1. Desarrollo reglamentario

La evolución histórica en nuestro país demuestra el creciente interés por este aspecto de la seguridad, tanto a nivel social, como político durante las últimas décadas. La normativa de protección contra incendios no aparecerá hasta 1974 con la *Norma Tecnológica sobre Instalaciones de Protección contra el Fuego (NTE-IPF)*. Esta norma formaba parte del grupo de Normas Tecnológicas de la Edificación aprobadas por el Ministerio de la Vivienda. Se trataba del primer intento por normalizar los procesos de diseño, ejecución y el control de las obras, bajo un criterio unificado. Estas normas tecnológicas eran de marcado carácter voluntario, y como tal, fueron poco implantadas.

Desgraciadamente, en nuestro país no contamos con una cultura de la seguridad (ni como profesionales, ni como usuarios). Esto nos lleva a que la evolución de la normativa de PCI en España se caracterice por dos aspectos poco positivos:

- ✓ Primero: para poder conseguir los objetivos de calidad y seguridad en edificación, la normativa ha dejado cada vez menos aspectos de carácter voluntario (hoy en día la seguridad contra incendios y los requisitos urbanísticos son los dos aspectos más habituales para la denegación de una licencia).
- ✓ Segundo: haber evolucionado a medida que se han producido desastres, que mostraban la precariedad técnica y humana, en la actuación ante una emergencia. Algunos ejemplos son:
 - Incendio en el hospital de la ciudad sanitaria *Virgen del rocío* (Sevilla)
 - Incendio en el hotel *Corona de Aragón* (Zaragoza)
 - Incendio en las discotecas *Flying* (Zaragoza), o *Alcalá 20* (en Madrid)

Será a partir de estos graves accidentes mortales cuando se inicie el desarrollo de una normativa al respecto para evitar que se vuelvan a repetir. Se aprueban el Real Decreto RD 2177/78 de Protección Contra Incendios en Hospitales, clínicas o centros sanitarios y el 25 de septiembre de 1979 una orden ministerial sobre Protección Contra Incendios en Hoteles. Pero aún no se disponía de normativa nacional aplicable. Mientras se consigue su aprobación, los ayuntamientos más afectados, o con mayor

número de técnicos en la materia comienzan con la elaboración de Ordenanzas específicas, de alto nivel técnico, desarrolladas de forma independiente para cada municipio, lo que suponía una heterogeneidad, que se alejaba del objetivo principal de unificar los criterios de calidad mínima requeridos en materia de seguridad frente a incendios.

Finalmente no será hasta el 10 de abril de 1981 cuando el RD 2059/81, apruebe la Norma Básica de edificación: Condiciones de Protección Contra Incendios, en adelante (NBE-CPI-81), de ámbito nacional y en general con carácter de cumplimiento obligatorio. Se constituía así la primera herramienta nacional para PCI, que atendiendo a la clasificación de los edificios por usos, asignaba unos requisitos aplicables. Algunas dificultades en su aplicación (debidas principalmente a su eminente carácter voluntario), obligaron a que se revisara rápidamente y se publicara al año siguiente la NBE-CPI-82 (que sí era de carácter obligatorio). No será hasta la publicación del RD 279/91 por el que se aprobaba la NBE-CPI-91, cuando se disponga de una norma realmente aplicable y de marcado carácter obligatorio. Esta norma desarrollaba y concretaba más los requisitos exigidos, pero quedaba aún algo incompleta ya que nunca reguló ni el uso de espectáculos y actividades recreativas. Posteriormente, modificando algunos criterios, e incorporando las líneas marcadas por la Unión Europea se aprobará por RD 2177/96 la NBE-CPI-96. A partir de este momento la protección contra incendios en España, se había comenzaba a equiparar con la del resto de los países de la UE.

Finalmente, no será hasta 2006 con la aprobación RD 314/06 cuando se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) [1]. Sus Documentos Básicos DB-SI (Seguridad contra incendios) y DB-SUA (Seguridad de utilización y accesibilidad) especifican en la actualidad todos los requisitos necesarios para satisfacer los criterios de seguridad contra incendio de la nueva edificación moderna, así como de todas aquellas edificaciones que en su momento no era de aplicación pero son susceptibles de posibles modificaciones, cambios de uso, nuevas actividades,). La utilización de esta normativa ha implicado la adecuación normas UNE a las normas europeas EN, así como la aceptación de los Eurocódigos.

En el caso de los edificios de uso industrial, no será hasta 2001 cuando se aprueba El RD 786/01, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales (en adelante, RSCIEI), que al año siguiente de su publicación será derogado por defectos de forma en su tramitación. Una vez subsanadas, será mediante el RD 2267/04, de 3 de diciembre cuando se apruebe el Reglamento hoy en día vigente [2], y de carácter obligatorio.



FIGURA 2.1 CRONOLOGÍA DE LA NORMATIVA PCI EN ESPAÑA

Como último Reglamento nacional a mencionar se encuentra el conocido como RIPCI (Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios) [3], aprobado en el año 93 (RD 1942/93) donde se recogen los requisitos que deben cumplir las empresas mantenedoras e instaladoras; así como todos los requisitos de los equipos y sistemas de protección contra incendios durante su fabricación, montaje y mantenimiento. Lamentablemente, este Reglamento no se ha revisado desde su publicación, aunque parece que el Ministerio de Industria lo hará en breve. Al no haber evolucionado desde su publicación inicial, este Reglamento no recoge los requisitos de los principales sistemas que más han evolucionado en los últimos años: los sistemas de extinción por gas, y los sistemas de extinción por agua nebulizada. Como ya se detallará más adelante, los sistemas de gas se han ido desarrollando mediante familias de normas específicas (ISO, EN o UNE), por lo que los criterios aplicables para estos sistemas son ampliamente conocidos. Lamentablemente, para los sistemas de agua nebulizada no se han desarrollado estas familias de normas, por lo que resulta necesario darles un enfoque alternativo (basado en objetivos o prestaciones), del que también se explicará más adelante.

2.1.2. ASPECTOS SOCIOLOGICOS DE LA SEGURIDAD

La normativa en términos de protección contra incendios ha sufrido un cambio trascendental en los últimos años, tanto desde el punto de vista de la propia concienciación social sobre de los problemas que puede conllevar un incendio dentro de una industria o un edificio, como con relación a aspectos técnicos y ámbito de aplicación. Afortunadamente, hoy en día es uno de los aspectos fundamentales en el diseño y construcción de cualquier edificación.

Es importante considerar que la evolución de la normativa realmente surge de una necesidad social. Y, por tanto, proviene de cómo la sociedad se desarrolla y fijándose en aspectos antes no contemplados, comienza a requerir determinados requisitos de calidad a elementos presentes en su entorno. Esto no solo ha sucedido con la normativa de calidad y seguridad en edificación, sucede en todos los ámbitos. Es mucho más sencillo observar cómo han evolucionado los requisitos de seguridad en otros ámbitos. En el caso de los vehículos automóviles es curioso recordar cómo los coches de nuestros padres no sólo no disponían de cinturones de seguridad, sino que también era habitual hacer varios viajes al año llenando el coche con todos los miembros de la familia (en ocasiones en ubicaciones bastante singulares). Sin embargo, treinta años después, si por casualidad los agentes de la autoridad descubren que llevas a uno de tus niños sin los dispositivos de retención autorizados (y adecuados a su edad y peso), puedes recibir una sanción importante, te pueden inmovilizar el vehículo (... y casi te pueden quitar la custodia). Ahora mismo, nadie se plantea circular con un vehículo que no disponga de cinturones de seguridad, y si vamos a cambiar el coche, siempre miramos el número de airbags que tiene (aunque no se trate de un requisito obligatorio). Esta evolución es similar a la sucedida con la seguridad que pedimos a nuestros edificios. Los europeos del norte, que aún nos llevan algunos años de ventaja en la cultura de la seguridad contra incendios ("*safety*") no tienen ningún problema en anular una reserva cuando llegan a un hotel y observan aterrados como el edificio no está protegido por una instalación de rociadores automáticos. Para ellos es algo tan fundamental, como los cinturones de seguridad en los coches lo son para nosotros. Ese nivel de exigencia en la calidad (y la protección que ofrecen) es lo que definen nuestra reglamentación nacional.

Del mismo modo, también debemos ser conscientes de que el nivel de seguridad exigible a los edificios suele ser acorde al nivel de desarrollo de la propia sociedad. Es evidente que en cualquier población pequeña (del continente africano, por ejemplo), donde no hay calles asfaltadas, no hay redes de agua potable, o incluso la presencia de animales salvajes agresivos es habitual, los requisitos de seguridad contra incendios no van a estar reflejados en ninguno de los pensamientos de sus habitantes. Sencillamente, es una parte de la seguridad que aún no les preocupa.

2.2. EL NUEVO ENFOQUE PRESTACIONAL EN SEGURIDAD

Por lo tanto, la evolución actual y futura de la normativa de protección contra incendios pasa por el diseño basado en prestaciones. Actualmente la normativa Española (CTE) [1], permite el uso y aplicación de medidas análogas que satisfagan los criterios que establece la normativa, siempre que se justifique adecuadamente ante el órgano competente.

Artículo 5. Condiciones generales para el cumplimiento del CTE

5.1. Generalidades

3. Para justificar que un edificio cumple las exigencias básicas que se establecen en el CTE podrá optarse por:
 - a) adoptar soluciones técnicas basadas en los DB, cuya aplicación en el proyecto, en la ejecución de la obra o en el mantenimiento y conservación del edificio, es suficiente para acreditar el cumplimiento de las exigencias básicas relacionadas con dichos DB; o
 - b) soluciones alternativas, entendidas como aquéllas que se aparten total o parcialmente de los DB. El proyectista o el director de obra pueden, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a los que se obtendrían por la aplicación de los DB.

FIGURA 2.2 ARTÍCULO 5 DEL CTE. SOLUCIONES PRESTACIONALES

Sin embargo no existe a nivel nacional una descripción de los aspectos fundamentales que se deben desarrollar (definición de metas, criterios básicos y escenarios) que permitan lograr los objetivos de diseño necesarios.

Para aclarar estos conceptos, es necesario definirlos brevemente: “*Prescriptivo*” es aquello que prescribe, es decir, aquello que señala u ordena una cosa. Desde este punto de vista la normativa en general es prescriptiva, ya que obliga al proyectista a cumplir un conjunto de requisitos definidos expresamente en el articulado. Por lo tanto, se hablará de enfoque prescriptivo cuando el diseño analizado cumpla estrictamente los requisitos descritos en la normativa aplicable.

Sin embargo, “*Prestacional*” es aquel diseño (o reglamentación) que se fundamenta en las características cualitativas y cuantitativas (prestaciones) que se quieren alcanzar. Las prestaciones se fundamentan en las exigencias básicas de calidad para los edificios, que son aquellas características genéricas, funcionales y técnicas de los edificios que permiten satisfacer los requisitos básicos de la

edificación. Siendo estos últimos, aquellos objetivos derivados de la demanda social de calidad de los edificios y cuya consecución debe procurarse tanto en el proyecto como en la construcción, mantenimiento y conservación de los mismos. Por ello, lo que el diseño debe garantizar en el enfoque prestacional son los objetivos fundamentales (prestaciones) que la normativa recoge, aunque no se cumplan expresamente algunos de los requisitos detallados en la propia normativa.

El enfoque del proyectista históricamente ha ido siempre dirigido a cumplir los requisitos específicos definidos en la normativa prescriptiva. Las opciones de diseño se abren enormemente con el enfoque prestacional al posibilitar nuevos edificios, que se salen de la rigidez establecida en la reglamentación tradicional.

2.2.1. VENTAJAS DEL DISEÑO BASADO EN PRESTACIONES

El diseño basado en prestaciones (*Performance Based Design*, ó PDB) plasma esta nueva forma de diseñar lo que era inconcebible para la normativa tradicional, en determinadas ocasiones. En este tipo de diseño se establece el conjunto de medidas de PCI que aportan el grado final de seguridad contra incendios.

De esta forma y dado que el Código Técnico de la Edificación así lo menciona, el proyectista puede llegar a definir las exigencias a través de nuevas vías que no limitan el estudio a la consecución sistemática de los pasos marcados por la normativa, sino que le permite disponer de nuevas herramientas para enfocar el diseño en función de unos determinados objetivos, es decir, lo faculta para proponer soluciones técnicas alternativas con las que se alcance el mismo nivel, o superior, de seguridad contra incendios

Los diseños basados en prestaciones (PBD's) aportan las siguientes ventajas:

- Este enfoque se emplea cuando surge la necesidad de tratar aspectos o usos singulares de un edificio, así como cuando surgen necesidades específicas de las partes o instalaciones afectadas.
- Proporciona una base para el desarrollo y selección de opciones alternativas en términos de protección contra incendios basadas en las necesidades del proyecto.
- Permite la comparación entre los diferentes niveles de seguridad proporcionados por el diseño alternativo. Comparando diferentes opciones se puede proporcionar un mecanismo para determinar qué nivel de seguridad es el más adecuado y bajo qué coste es aceptable.
- Requiere la utilización en el análisis de una serie de herramientas, haciendo que se incremente el rigor de la ingeniería empleada y pudiendo así descartar otras opciones de diseño poco innovadoras.

- Da lugar a una estrategia en la que se combinan diferentes sistemas de protección contra incendios en lugar de un diseño independiente de cada una de las partes.

2.2.2. ENFOQUE PRESTACIONAL EN LA NORMATIVA NACIONAL

Analizando la evolución de la normativa aplicable a la Seguridad Contra Incendios durante las dos últimas décadas, podemos adelantar que hoy en día el proyectista dispone tanto de nuevas técnicas como de nuevas vías de desarrollo para dotar a los edificios e industrias de los niveles de seguridad requeridos. Así, se invita a definir y conseguir en los proyectos determinados niveles de seguridad contra incendios, en lugar de requisitos concretos o sistemas específicos de protección (enfoque tradicional prescriptivo).

En el año 1996 se aprobó la NBE-CPI-96, que a diferencia de su predecesora (la NBE-CPI-91), y a pesar de que seguía siendo una normativa de carácter prescriptivo, en su Artículo 3, apartado 3 ya indicaba:

...“Las entidades que intervengan preceptivamente en el visado técnico, la supervisión y el informe del proyecto, así como en la concesión de las autorizaciones y licencias preceptivas, podrán admitir soluciones diferentes a las establecidas en esta norma básica cuando juzquen suficientemente justificadas, técnica y documentalmente, su necesidad, derivada de la singularidad del proyecto, y su validez técnica en relación con la adecuada protección frente al riesgo de incendio, y siempre que se alcancen las condiciones de seguridad establecidas en esta norma básica.”

Es decir, incluía una "Cláusula de Seguridad Equivalente" que permitía al proyectista proponer soluciones técnicas alternativas en lugar de aplicar el código a un diseño concreto, aunque supeditadas a que con ellas se alcanzara el mismo, o superior, nivel de seguridad contra incendios que el obtenido con la aplicación directa del propio código. La carencia de bases científicas y la falta de conocimiento de criterios o metodologías para la elaboración y evaluación de las soluciones alternativas hicieron que la aplicación de esta cláusula se volviera en numerosas ocasiones no sólo difícil, sino incluso imposible.

Por otra parte y tal y como se ha mencionado anteriormente, con el fin de completar la regulación de las condiciones de protección contra incendios en los establecimientos industriales, el Real Decreto 786/2001 aprobó el Reglamento de Protección Contra Incendios en Establecimientos Industriales [2], estableciéndose, de acuerdo con la Ley 21/1992 de Industria, los instrumentos necesarios para su ejecución. El carácter meramente prescriptivo que mostraba esta primera versión de la normativa de protección contra incendios en establecimientos industriales se complementa con su segunda

publicación, en el RD 2267/2004, en la que, al igual que había sucedido con la NBE-CPI-96, se deja un campo abierto a la seguridad equivalente, indicando en su Artículo 1:

...“Las condiciones indicadas en este reglamento tendrán la condición de mínimo exigible según lo indicado en el artículo 12.5 de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria.

Estos mínimos se consideran cumplidos:

- a) Por el cumplimiento de las prescripciones indicadas en este reglamento.*
- b) Por aplicación, para casos particulares, de técnicas de seguridad equivalentes, según normas o guías de diseño de reconocido prestigio para la justificación de las soluciones técnicas de seguridad equivalente adoptadas, que deben aportar, al menos, un nivel de seguridad equiparable a la anterior. Esta aplicación de técnicas de seguridad equivalente deberá ser justificado debidamente por el proyectista y resueltas por el órgano competente de la comunidad autónoma.*

A partir del año 2006 el marco normativo cambia radicalmente con la aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE) [1]. La gran novedad que incluye el CTE radica en que, en su Artículo 5, apartado 1, sección B, se alinea con el denominado «enfoque basado en prestaciones» cuando dice:

“Para justificar que un edificio cumple las exigencias básicas que se establecen en el CTE podrá optarse por:

- a) adoptar soluciones técnicas basadas en los DB, cuya aplicación en el proyecto, en la ejecución de la obra o en el mantenimiento y conservación del edificio, es suficiente para acreditar el cumplimiento de las exigencias básicas relacionadas con dichos DB; o*
- b) soluciones alternativas, entendidas como aquéllas que se aparten total o parcialmente de los DB. El proyectista o el director de obra pueden, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a los que se obtendrían por la aplicación de los DB.*

Sin embargo, la situación en la que nos encontramos actualmente en España no es muy distinta de aquella en la que nos encontrábamos con la publicación de la NBE-CPI-96, ya que para garantizar una seguridad equivalente en cuanto a seguridad contra incendios, no contamos con metodologías

alternativas a las mostradas por los códigos, existiendo además una absoluta falta de información por parte de los ingenieros y arquitectos que elaboran proyectos que demandan este tipo de necesidades.

Ante tal situación, da la impresión de que no existe otra vía alternativa que no sea recurrir a las normativas internacionales, que sí que contemplan estos temas y que, a diferencia de nosotros, han avanzado enormemente en este campo. A nivel internacional, los distintos códigos basados en prestaciones o "*performance based codes*" comparten una misma filosofía: establecer los objetivos de seguridad contra incendios a obtener (prestaciones) y el modo de alcanzarlos, dando libertad al proyectista para seleccionar las medidas de protección que estime idóneas en cada caso concreto. De esta manera el proyectista puede acreditar técnica y documentalmente a la autoridad de control edificatorio que con las medidas propuestas se alcanzan o superan los niveles de seguridad establecidos en la normativa.

Es fundamental que las Escuelas de ingeniería de nuestro país adapten sus planes de formación para incluir los estudios específicos que este tipo de ingeniería demanda, al igual que sucede en países como Reino Unido, Suecia, Japón, o Finlandia. De otro modo, será imposible desarrollar y hacer aplicables los avances recogidos en la reciente normativa nacional, y que permiten una gran flexibilidad en los diseños (siempre que el resultado final garantice el cumplimiento de las exigencias básicas definidas).

2.2.3. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL RIESGO: MEREDICTE

En España sólo disponemos de una herramienta detallada para la evaluación de los criterios de seguridad equivalente (enfoque prestacional). Se denomina MEREDICTE (Método de evaluación del riesgo de incendio según los criterios del CTE). Es un método singular, que aunque no sirve para la evaluación de sistemas de extinción de incendios específicos, supone un avance crítico para los diseños prestacionales en nuestro país. MEREDICTE es un método de evaluación del riesgo de incendio en el marco del Código Técnico de la Edificación. Es un desarrollo realizado por Ingenieros Industriales españoles, que permite comparar los niveles de seguridad contra incendios de los diseños propuestos, frente a los niveles que se alcanzarían con el estricto cumplimiento del DB SI [1]. De este modo, disponemos de una herramienta que garantiza la equivalencia de soluciones alternativas, mediante métodos numéricos. Es una mejora del Método Gretener, del PURT, o el RISK; con la ventaja de que usa directamente los parámetros de referencia empleados en el DB SI [1].

Este método ya ha sido oficialmente definido como documento reconocido para el CTE DB SI [1] por el Ministerio de Fomento. Por lo tanto, los cálculos realizados con esta herramienta, serían directamente válidos, y ya no requerirían de la aprobación/negociación con la autoridad de control. Este tipo de

desarrollos y nuevas metodologías de análisis son las que permitirán la evolución futura del diseño mediante soluciones de enfoque prestacional.

2.2.4. ENFOQUE PRESTACIONAL EN LA NORMATIVA INTERNACIONAL

A nivel internacional, en los proyectos basados en prestaciones el proyectista no sólo debe afirmar, sino también demostrar, que con las medidas que propone se alcanzan o incluso se superan aquellos niveles de protección que se encuentran prefijados por la Legislación de cada país, por los códigos técnicos correspondientes, por las autoridades administrativas, o por cualquier otra entidad que sea competente para ello. La ingeniería de PCI basada en prestaciones (PBD) nace en el mundo anglosajón, USA, Reino Unido, Japón, Nueva Zelanda, Australia, etc., países en los que se lleva aplicando desde hace más de dos décadas, por lo que en estos países el proyectista dispone de un conjunto de guías, métodos y códigos "performance based" publicados por los correspondientes organismos normalizadores, como [13] publicada por la Society of Fire Protection Engineering (E.E.U.U.), que es uno de los documentos más reconocidos internacionalmente. A pesar de ello, tampoco en dichos países el uso de códigos PBD es una práctica generalizada.

En la actualidad, tanto en los Estados Unidos como en Europa la ingeniería de PCI se practica basándose en la eficacia, adoptándose tres metodologías distintas:

- Cláusula de Seguridad Equivalente a la que figura en los Códigos prescriptivos (como sucedía antes en España, siendo esta situación la más habitual).
- Códigos propiamente dichos basados en prestaciones ("*Performance Based Codes*"), como el "IBC Internacional Building Code" [4], aunque actualmente aún son de poca implantación.
- Códigos prescriptivos con una parte opcional para su uso basado en prestaciones (solución mixta), como el "NFPA 101 Life Safety Code" [5].

Las posibilidades de la nueva ingeniería de PCI basada en prestaciones se muestran de la mayor utilidad, e incluso se puede decir que son realmente imprescindibles, cuando se trata del diseño de edificios singulares tales como terminales aeroportuarias, transportes suburbanos, rascacielos, hospitales, salas de convenciones, palacios de muestras, edificios histórico-artísticos, museos, etc. y, en general, en todas aquellas situaciones en las que se deben combinar en perfecta armonía seguridad y funcionalidad. Un diseño basado en prestaciones será sin duda más laborioso y costoso que un diseño prescriptivo, pero sin duda, y a la larga, disminuirá los costes de los sistemas, proporcionará un nivel de seguridad mayor y

mejorará la funcionalidad de los edificios. Esta nueva filosofía tiene un impacto directo sobre el desarrollo de la ingeniería de protección de incendios. El proyectista no solo debe conocer los distintos códigos y reflejar en sus proyectos su cumplimiento, sino que también está obligado a conocer los aspectos técnicos de los sistemas proyectados, sus capacidades y limitaciones, su nivel de fiabilidad, pensar en los tipos de incendios que pueden producirse y sus condiciones de evolución, y en qué seguridad está aportando con su diseño.

2.2.5. OTRAS ENTIDADES DE RECONOCIDO PRESTIGIO

Es precisamente la flexibilidad que permiten los diseños con enfoque prestacional la que dificulta su revisión por la autoridad de control (municipal en el caso de las licencias edificatorias, y autonómica en el caso de las autorizaciones relativas a las instalaciones de protección contra incendios). Esa dificultad que supone el no disponer de criterios detallados de validación, hace que en muchos casos este tipo de diseño no llegue a conseguir las autorizaciones pertinentes.

El ingeniero/proyectista y las partes interesadas deben analizar los posibles conflictos de intereses que puedan surgir durante la elaboración del diseño de seguridad contra incendios basada en prestaciones, además de tomar las precauciones adecuadas para evitar dichos conflictos o manejar aquellos que no se hayan contemplado. Unos ejemplos de situaciones en las que se podrían presentar conflictos de interés pueden ser los siguientes:

- Situaciones en las que el ingeniero/proyectista es el único responsable de seleccionar los objetivos y parámetros del diseño, sin tener en cuenta a las partes interesadas.
- Situaciones en las que el ingeniero/proyectista tan solo actúa como un mero observador de otros proyectos que incluyen al cliente y a las partes interesadas.
- Situaciones en las que el ingeniero/proyectista tiene un trabajo independiente o una relación personal con el fabricante, proveedor o cualquier otra entidad que pueda tener influencia decisiva sobre su objetividad o sobre su capacidad de toma de decisiones.

Por tanto, parece necesario que para una implementación totalmente eficiente de este tipo de proyectos, su concepción se efectúe lo antes posible, bien sea durante la concepción del proyecto en el que se encuentre inmerso, o durante las fases iniciales de su desarrollo. Sin embargo, durante el desarrollo de proyecto esta metodología se puede utilizar en cualquier momento que se considere oportuno, siempre que se intenten evitar las posibles dificultades o conflictos de interés que puedan surgir como consecuencia de su elaboración.

En cualquier caso, los problemas principales suelen aparecer cuando la autoridad responsable tiene que aprobar un determinado diseño alternativo, siendo una práctica muy frecuente en los E.E.U.U. que los proyectos sean revisados por una "tercera parte", o un profesional o grupo profesional de naturaleza similar al proyectista inicial. Esta forma de actuar recibe el nombre de "peer review". En España no hay una solución definida para este procedimiento, y suele ser habitual encontrar reticencias por parte de la Autoridad de control en evaluar un proyecto con enfoque prestacional. Es muy evidente la falta de formación de alto nivel que estos proyectos requieren, no sólo entre los proyectistas, sino también entre los técnicos de la Administración que supervisan dichos proyectos.

Para facilitar el reconocimiento de la calidad y la fiabilidad de determinados sistemas y productos, hay a nivel internacional determinados organismos (principalmente laboratorios) que certifican el cumplimiento de determinados requisitos de calidad de dichos productos. En muchos casos, estos sistemas de aprobaciones para productos y sistemas tienen normativa y requisitos específicos, y son complejos de analizar y cumplir. El objetivo final es que los productos de seguridad verificados (aprobados) garanticen la fiabilidad esperada. Se recogen a continuación algunos de los organismos con más presencia internacional, y mayor prestigio:

- National Fire Protection Association (NFPA): desarrolla actividades de investigación, formación y redacción de sus publicaciones: Estándares y Códigos. Es una asociación en la que todos los interesados en los aspectos regulados pueden participar en los comités y aportar experiencias. Cubre además de la seguridad contra incendios, la seguridad en otras instalaciones, como las eléctricas. Su principal potencia (además del reconocimiento mundial) es la periodicidad en la revisión de sus documentos. Anualmente un comité reducido decide si hay motivos para revisar el texto analizado, y en caso afirmativo se organiza un comité abierto, para dicha revisión. NFPA es la referencia para la seguridad contra incendios en todos los países de Latinoamérica que aún no han desarrollado normativa específica.
- Factory Mutual (FM): el principal grupo asegurador mundial, especialista en riesgos industriales. Derivadas de las labores de inspección para el control de riesgos en sus empresas aseguradas, ha desarrollado un nivel de control sobre las instalaciones de PCI que han recogido en requisitos propios para dichas instalaciones. Son muy conocidas sus "*Data sheet*" para las instalaciones de rociadores automáticos. Si dichas instalaciones no cumplen sus requisitos, la entidad industrial no podrá ser asegurada en esta compañía.

- Loss Prevention Certification Board (LCPB, ahora también *BRE Certification*). Inició sus actividades como Laboratorio de ensayo hace más de un siglo. Sus actividades de certificación se han desarrollado
- **VDS**: Esta entidad alemana, nacida del sector asegurador, desarrolla actividades de ensayo, certificación y formación. Es uno de los principales Laboratorios de ensayo de sistemas de PCI dentro de la Unión Europea.
- **UL**: Underwriters Laboratories: Entidad norteamericana, que amplió sus actividades de ensayo hacia la certificación, consiguiendo ser una referencia internacional en la aprobación de productos y sistemas (se conocen como productos “listados” UL).

Estas entidades de certificación (y especialmente sus laboratorios de ensayo) serán los que deben validar que un sistema específico de extinción de incendios cumple las funciones para las que está diseñado, y tiene los requisitos de fiabilidad mínima que se consideren aceptables. Es importante destacar que en estos casos, el diseño prestacional de sistemas puede requerir pruebas y ensayos de un importante coste económico.

3. ESTADO DE LA TÉCNICA

Se recogen en este capítulo los aspectos más destacados de toda la bibliografía consultada, que nos permiten definir de forma detallada cuál es el estado de la técnica actual en materia de extinción de incendios por agua nebulizada (o sistemas similares). De este modo, se podrá analizar con mayor grado de detalle la adecuación del nuevo sistema propuesto a los objetivos marcados para el presente estudio.

3.1. EL AGUA COMO AGENTE EXTINTOR UNIVERSAL

De todos es sobradamente conocida la estructura de la reacción de la combustión, descrita ampliamente en [5] como el triángulo (o tetraedro) del fuego, mediante la interacción del combustible con el comburente, a través de la energía de activación (y la presencia de las reacciones en cadena que lo retroalimentan).

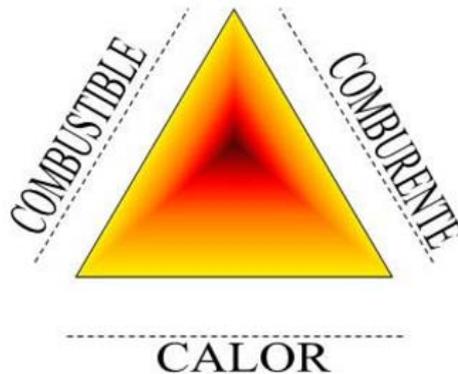


FIGURA 3.1 EL TRIÁNGULO DEL FUEGO

Todos los agentes extintores actúan sobre dichos elementos, para reducir o eliminar los efectos de dicha reacción de combustión. Básicamente existen cuatro métodos de extinción de un incendio:

- ✓ Separar físicamente la sustancia combustible de la llama.
- ✓ Reducir la cantidad de oxígeno (sofocación).
- ✓ Reducir la temperatura del combustible, o de la llama (refrigeración).
- ✓ Aplicar productos químicos adecuados que modifiquen la química de la combustión.

3.1.1. LA CAPACIDAD DE EXTINCIÓN DEL AGUA

El principal efecto (y más conocido) que el agua produce sobre el fuego, es directamente la refrigeración. Como todos sabemos, si partimos de un kilogramo de agua a 20°C y le aplicamos 80 kcal el agua llegaría a 100°C (su punto de ebullición cuando la presión es normal). A partir de ese punto, el agua continúa absorbiendo calor sin modificar su temperatura, hasta que se evapora completamente. En ese proceso de evaporación, un kilogramo de agua puede absorber unas 540 kcal, lo que implica que la capacidad refrigerante de un kilogramo de agua cuando se evapora totalmente partiendo de la temperatura ambiente son 620 kcal. Es evidente que si bien el agua en estado líquido dispone de una elevada capacidad de absorción calórica y, en consecuencia, un gran poder refrigerante, sólo en el cambio de estado (líquido-vapor) es cuando el agua pone de manifiesto su extraordinaria capacidad de enfriamiento.

En algunos informes se propone que la forma ideal de extinguir un fuego con agua es emplear exactamente la cantidad de agua que al evaporarse absorba suficiente cantidad de calorías como para enfriar la sustancia que se queme a una temperatura inferior a la de ignición. También se ha llegado a comentar, que un fuego no puede extinguirse a menos que la acción refrigerante del agua (es decir, su velocidad de absorción de calor) sea mayor que la velocidad a que el fuego genera calor.

La NFPA publicó en 1961 un estudio que se basa en la reducción al absurdo para desterrar la afirmación anterior. Se resume brevemente en la tabla 6.1, recogiendo los valores de algunas potencias térmicas disipadas en algunos incendios tipo, y el agua que sería necesaria para absorber todo el calor generado.

TABLA 6.1: POTENCIAS TÉRMICAS Y AGUA NECESARIA PARA EXTINCIÓN

Liberación total de calor en kcal por minuto y por metro cuadrado	Agua en litros/minuto/m ²	
	Cuando el agua se calienta desde 15 °C hasta 100 °C	Cuando se parte de 15°C y se produce vaporización total
Fuego estructural (promedio)	8.100 cal	97,5
Fuego estructural (máximo)	32.400 cal	390
Fuego en horno a carbón	32.400 cal	390
Fuego en tanque abierto	38.000 cal	455

Es muy sencillo de observar que resultan valores excesivos y fuera de la realidad de la extinción de incendios, tal como la experiencia demuestra. Según esta estimación para controlar un incendio producido en un edificio de 600 metros cuadrados, sería necesaria una descarga de agua de aproximadamente 30.000 litros por minuto. Todo ello, siempre y cuando no se derrame ni se perdiera nada de agua y toda su masa se convirtiera en vapor. Es sencillo llegar a la conclusión de que esta teoría de la extinción por absorción total del calor es insuficiente para explicar la realidad de la capacidad de

extinción del agua. Por otro lado, las técnicas de lucha contra incendios demuestran que alrededor de las dos terceras partes del agua que se aplica a un incendio normalmente, tienen poco o ningún efecto térmico. Por lo tanto, para poder aprovechar todo el potencial como agente extintor que tiene el agua, el calor debe ser eficientemente transferido desde el fuego hasta el agua. Ese es uno de los aspectos fundamentales que deberemos considerar para nuestra aplicación analizada.

3.1.2. LIMITACIONES EN SU APLICACIÓN

Evidentemente, quedan fuera de este estudio las limitaciones de aplicación del agua como agente extintor en aquellos riesgos en los que no resulte adecuado. Habitualmente esto sucede por tres motivos: porque la presencia de tensión eléctrica (voltajes elevados) hace peligrosa su utilización; porque los elementos en combustión son líquidos (sería muy sencillo producir un derrame y aumentar la propagación del incendio); o porque la propia actuación del agua podría dañar aquellos elementos que aún no se han visto afectados por el incendio (como sucede en recintos con equipos eléctricos o electrónicos de elevado valor).

La capacidad de refrigeración por gramo de agua es independiente del formato en el que esta se presenta, pero hemos comprobado que la teoría de extinción por “absorción total del calor” no sirve para explicar adecuadamente la capacidad real de extinción del agua. Es por este motivo, que debemos analizar otros valores que influyen directamente en esta capacidad:

- La velocidad de transmisión del calor es proporcional a la superficie expuesta del líquido. (Para un volumen dado de agua la superficie aumenta drásticamente si el agua se convierte en gotas).
- La velocidad de transmisión de calor depende de la diferencia de temperatura entre el agua y el material en combustión o el aire que lo rodea.
- La velocidad de transmisión de calor depende del contenido en vapor del aire.
- La capacidad de absorción de calor del agua depende de la distancia recorrida y de su velocidad en la zona de combustión.

Si consideramos que algunas de estas variables son definidas por el propio elemento en combustión, y la atmósfera que lo rodea, las podemos analizar de forma simplificada en dos (como elementos principales del agente extintor analizado):

- Tamaño de la gota de agua
- Velocidad de la gota de agua

Como se verá con detalle en capítulos posteriores de este estudio, estos dos parámetros no sólo son fundamentales para conseguir los objetivos de extinción marcados, sino que además están relacionados. Su aplicación en formatos diferentes presentarán ventajas e inconvenientes para cada tipo de instalación: descargar gotas mayores supone una mayor capacidad de refrigeración directa (más agua), y una mayor energía cinética (con lo que la gota tiene mayor alcance); por otro lado descargar gotas pequeñas (nebulizadas) supone mayor rapidez de refrigeración al evaporar más rápido, pero menor alcance (por tener menor energía cinética). Si las gotas nebulizadas alcanzan el foco del incendio además conseguiremos mucha capacidad de refrigeración indirecta (el vapor de agua generado crea un efecto de pantalla contra la radiación, y aumenta la sofocación junto al foco del incendio –separando combustible de comburente-).

3.2. INSTALACIONES DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

Las instalaciones de protección contra incendios son aquellas que nos permiten luchar contra el incendio, una vez que este accidente ha sucedido. Por este motivo se suelen denominar instalaciones de protección activa, frente a la protección pasiva (que es la que nos aportan los elementos inertes de la edificación: sectorización, recorridos de evacuación, disposición de salidas,...). Como ejemplos habituales de estas instalaciones presentes en la mayoría de nuestros edificios, podemos encontrar las de detección automática, los extintores portátiles, las bocas de incendio equipadas (BIE's), los rociadores automáticos,... Todas ellas están estrictamente reguladas desde su fabricación, en su instalación y montaje, y en su mantenimiento. El Reglamento nacional que lo regula es el Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios (RIPCI) [3].

Este Reglamento regula todos los requisitos exigibles para una instalación de protección contra incendios: fabricación de componentes, diseño del sistema, instalación y montaje, y mantenimiento. En algunos casos (como pueden ser las instalaciones de rociadores automáticos) existe una norma específica que regula cada una de dichas fases. Con carácter general, estas normas son de obligado cumplimiento por estar así recogidas en el propio RIPCI [3]. El motivo de este control tan exhaustivo es doble: en primer lugar porque estamos tratando con instalaciones que permiten asegurar la vida de las personas (ocupantes de nuestros edificios), y por otro lado porque estas instalaciones están diseñadas para que no funcionen de forma habitual. Eso significa que una instalación de protección contra incendios puede estar años sin actuar, pero cuando resulte necesario debe ser 100% funcional. En otras instalaciones de la edificación la operativa no es así: iluminación o climatización funcionan a diario, con lo que resulta muy sencillo detectar cuando hay un problema, y proceder a su reparación. Las

instalaciones de PCI no funcionan nada más que cuando hay un accidente incendio, por eso deben ser fiables (es el motivo para exigirles tanto control y regulación).

Por otro lado, la única manera de ver funcionar una instalación de PCI (que no sea durante un incendio) es el mantenimiento. El RIPCI [3] obliga a realizar verificaciones integrales de todas las instalaciones de PCI al menos una vez al año. Es la única manera de comprobar que la instalación está operativa, y que cumplirá su función cuando sea necesario. A pesar de lo que pueda parecer, el mantenimiento es una actividad crítica para las instalaciones de PCI. Si no se realiza adecuadamente, con el paso de los años, nuestras instalaciones perderán eficacia.

Por último, también es importante distinguir la fiabilidad de las instalaciones que se denominan “manuales” frente a las “automáticas”. El nivel de protección que puede aportar una instalación de BIE’s (mangueras) nunca podrá ser equivalente al de una instalación de rociadores automáticos. En las instalaciones manuales la eficacia del sistema depende de la destreza del operario. No siempre es sencillo disponer de personal formado adecuadamente para el manejo de estas instalaciones. O incluso se puede dar el caso de no tener personal disponible en ese momento (lo que puede suceder si tenemos una instalación de activación manual –aunque sea en remoto-). Los requisitos exigibles a las instalaciones automáticas siempre serán mucho mayores, pero también será mucho mayor el nivel de protección que nos aportan.

3.2.1. LOS SISTEMAS DE ROCIADORES AUTOMÁTICOS

De todas las instalaciones de extinción automáticas, sin duda la más extendida es la de rociadores automáticos. Sus características y fiabilidad hacen de ellas una garantía de seguridad avalada por años de experiencia, y son muy bien valoradas por todos los colectivos implicados en el control de la seguridad contra incendios en los edificios: proyectistas, autoridades de control, cuerpos de bomberos,...

3.2.1.1. Conceptos generales

La extinción mediante rociadores automáticos es uno de los medios de extinción activa, más antiguos que existen y que más han evolucionado adaptándose a las necesidades actuales, convirtiéndose en el mejor y más fiable sistema de protección activa contra incendios, dada su validez en la gran mayoría de tipologías de edificación, su bajo coste en comparación con otras instalaciones, y su alta efectividad y sus propiedades ni tóxicas ni corrosivas.

El objetivo de las instalaciones por rociadores, es la extinción y el control del incendio en sus fases iniciales, así como evitar la propagación a otras zonas o materiales mediante la descarga de agua, siendo

su principal medio extinción el enfriamiento y sus mecanismos secundarios, la sofocación y la dilución (aprovechando las propiedades termodinámicas y físicas del agua). Los sistemas de extinción por rociadores actúan de forma automática, lo que minimiza el tiempo de actuación y por tanto los efectos del fuego. Como ya se comentó en apartados anteriores, esta actuación automática permite evitar las incertidumbres asociadas al operario, y por tanto mejora la fiabilidad de la instalación.

Los sistemas de rociadores se diseñan en base a la clasificación de usos (y por tanto, clases de riesgo) atendiendo a condiciones de:

- Tipología del edificio
- Productos combustibles
- Distribución y la posición de los materiales combustibles

Según estas características las instalaciones de rociadores automáticos podrán ser diseñadas para las siguientes clases de riesgos:

- Riesgo Ligero (RL)
- Riesgo Ordinario (RO)
- Riesgo Extra de Proceso (REP)
- Riesgo Extra de Almacenamiento (REA)

Estos riesgos y los parámetros que se deben cumplir están definidos a nivel nacional en la UNE EN-12845 [6], y también se pueden encontrar en otras normativas de reconocido prestigio internacional como el código NFPA 13 [7].

3.2.1.2. Clasificación de los sistemas

La clasificación de los sistemas de rociadores se puede hacer atendiendo a la presencia de agua permanente en las tuberías; o según el mecanismo de activación de la instalación. En base a estos criterios tendremos:

Instalaciones convencionales: el rociador actúa también como detector (de activación térmica):

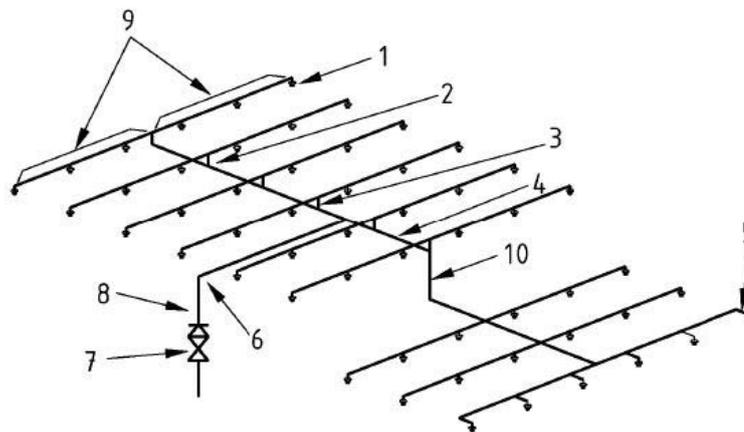
- ✓ Instalaciones mojadas (tubería húmeda)
- ✓ Instalaciones secas (tubería seca)

Instalaciones controladas por sistemas de detección automática

- ✓ Instalaciones de acción previa (con rociadores cerrados)
- ✓ Instalaciones cíclicas

3.2.1.2.1. Tubería Húmeda

Se consideran instalaciones de tubería húmeda aquellas en las que se mantienen en carga todas las líneas de la instalación con agua a presión. Es la tipología más utilizada por su eficacia y baja dificultad de instalación. El sistema actúa exclusivamente sobre el área de operación (allí donde se hayan activado los fusibles de los rociadores). Cuando en la zona afectada por el incendio se alcanza una determinada temperatura, los sistemas de apertura de los rociadores (fusible metálico eutéctico, o de ampolla de vidrio) se abren provocando la descarga de agua y una depresión en la línea que libera el sistema de cierre de la válvula de alarma. Esta depresión provoca el arranque del sistema de bombeo que enviará el agua a la instalación mientras siga descargando. Se activarán térmicamente todos los rociadores necesarios (hasta el máximo calculado como Área de Operación). Todos estos parámetros se ajustan al riesgo a proteger, y vienen muy detallados en las normas de diseño [6], [7].



Leyenda

- | | |
|-------------------|----------------------|
| 1 Rociador | 6 Colector principal |
| 2 Subida | 7 Puesto de control |
| 3 Punto de diseño | 8 Subida |
| 4 Subcolector | 9 Ramales |
| 5 Antena | 10 Bajada |

FIGURA 3.2 ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN DE ROCIADORES AUTOMÁTICOS

3.2.1.2.2. Tubería Seca

A diferencia de la instalación húmeda, las instalaciones de tubería seca a partir de la válvula de alarma y control se llenan de aire o gas a presión. Esta diferencia provoca que el tiempo que transcurre entre la apertura del rociador y la descarga de agua aumente y por lo tanto a igualdad de condiciones, el área afectada por el incendio será mayor. Por este motivo, estas instalaciones tienen muchas limitaciones en su aplicación. Por el contrario, estas tipologías de instalaciones evitan problemas en aquellas instalaciones donde se prevé la congelación del agua (zonas exteriores, etc.).

Al igual que en la tipología húmeda, por efecto de la temperatura los rociadores se disparan lo que provoca que escape el gas a presión contenido en la línea, consiguiendo que la presión disminuya hasta la activación de la válvula permitiendo que el agua inunde las líneas de descarga y los dispositivos de alarma.

Los Sistemas de Acción Previa (o los cíclicos): Se diferencian de las instalaciones de tubería seca normales en que se requiere de la activación previa de un elemento de detección, para que envíe la señal a la válvula (puesto de control), permitiendo que el agua entre en la instalación antes de que se active el primer fusible. Esto supone una mejora en la funcionalidad respecto a las instalaciones de tubería seca, pero también requieren de una mayor inversión. La ventaja final de las cíclicas es que permiten el vaciado de la instalación (y vuelta al estado previo a la alarma) sin necesidad de actuaciones manuales.

3.2.1.3. Fiabilidad de las instalaciones de Rociadores Automáticos

Los rociadores automáticos son con diferencia la instalación de protección contra incendios de mayor fiabilidad, y por ello, son también la instalación de extinción automática con mayor presencia a nivel mundial. Es en aquellos países donde la construcción en madera sigue siendo una de las principales soluciones constructivas empleadas, en los que la protección frente al incendio es más importante, y por ello, los rociadores están muy presentes en todas las tipologías edificatorias. Por ello, E.E.U.U. es la principal referencia documental respecto a la regulación y el uso de los rociadores automáticos.

Según recoge un informe de la NFPA publicado en 2013 [8], sobre la experiencia en la utilización de los rociadores automáticos en E.E.U.U., en 2009 tan solo un 4,6 % de las viviendas americanas disponía de esta instalación. El informe muestra en sus resultados que en 2011, se había multiplicado casi en 5 veces la cantidad de hogares que disponían de un sistema de extinción por rociadores, hasta alcanzar la cifra de un 18,5%. Este incremento es debido en principalmente a la obligación para vivienda nueva impuesta por las autoridades federales. Esta decisión se tomó, entre otras causas, debido a que E.E.U.U. está especialmente afectado por este tipo de accidentes –incendios- en los que se provocan el 80% de las muertes que suceden en viviendas (según indica la NFPA, en 2003) [9].

La fiabilidad de los sistemas de extinción automática por rociadores ha sido objeto de estudio por varios autores de distintos países [8], [9], [59], [64]. De todos los estudios desarrollados para determinar la fiabilidad de los sistemas de extinción automática por rociadores destacan los resultados obtenidos y publicados por John R. Hall, en [8]. Se describe la eficacia de los rociadores automáticos en incendios ocurridos entre 2007 y 2011. El estudio mostró que los rociadores actuaron en el 91 % de los casos que

fueron necesarios, dando un claro orden de magnitud de la fiabilidad que presenta el sistema derivada de su robustez técnica y sencillez de aplicación. Además, el estudio fue más allá, identificando en cuántos de esos casos la actuación de los rociadores además de producirse fue eficaz en el cumplimiento de sus objetivos de diseño: la extinción, el control y la disminución de la propagación del fuego. En la Figura 3.3, se recogen los diferentes tipos de fallos encontrados durante su funcionamiento.

Los datos revelaron que el 96 % de las actuaciones fueron eficaces, y que como se puede observar las principales causas de fallos en los sistemas de rociadores son la falta de conocimientos y/o formación, la realización de mantenimientos ineficientes y falta de detección de componentes dañados, lo que demuestra que el sistema no presente problemas internos, sino que los errores provienen de aspectos externos y que además incluso contando con esta tipología de fallos el rendimiento de la instalación es eficaz en un 87 %, siendo por ello el sistema de extinción de incendios activo más fiable (salvo casos en los que el agua no sea el agente extintor más indicado por sus propiedades físico-químicas) y el más utilizado en los últimos 100 años de historia.

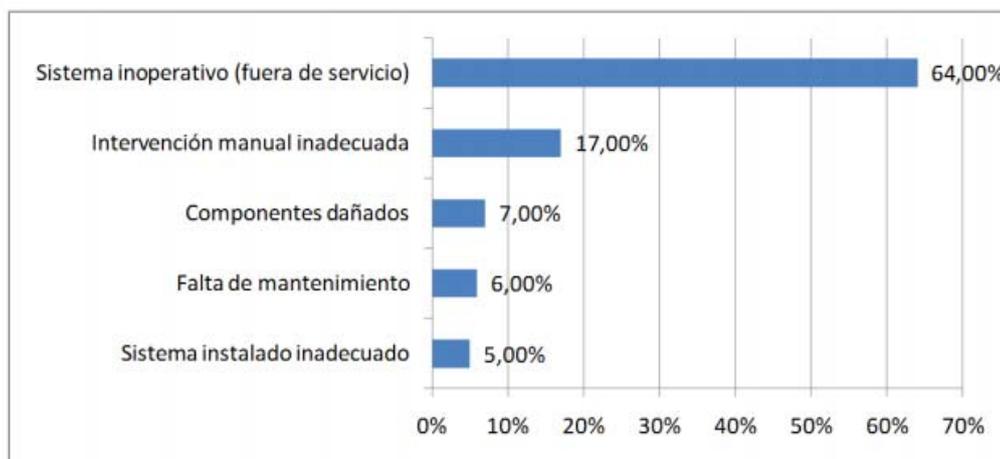


FIGURA 3.3 CAUSAS DE FALLO EN INSTALACIONES DE ROCIADORES

3.2.2. UNE EN 12845: CRITERIOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE ROCIADORES

La extinción automática por rociadores es una medida activa de seguridad contra incendios que permite disminuir los factores de riesgo existentes en una edificación o zona hasta límites tolerables. El diseño de sistemas de extinción automática se define según el riesgo que implican las actividades que se desarrollan en las zonas protegidas. Algunas actividades como la de almacenamientos suponen un riesgo que no se podría minimizar sino se utilizara una protección específica, preferiblemente de forma

automática. La adecuación de los sistemas de protección automática permite disminuir las consecuencias humanas, económicas, y materiales derivadas en caso de incendio.

En España la normativa que establece dichos criterios es la UNE-EN 12845:2005+A2 2010 [6]. Ha sido elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 191, de Sistemas fijos de lucha contra Incendios, y tiene el rango de norma nacional. En los siguientes apartados se describen los principales factores para definir el diseño del sistema de extinción, atendiendo al concepto de riesgo, que como se verá más adelante, es determinante para obtener los valores críticos de funcionamiento, diferenciando dos fases. Una primera fase de identificación de riesgo (actividad y materiales) y una segunda fase de cálculo hidráulico en base al riesgo seleccionado.

3.2.2.1. Clasificación de Riesgos

Las instalaciones de sistemas de extinción automática por rociadores definidas en [6] ó [7] se diseñan según cada uso y el riesgo que la actividad desarrollada en cada uso tiene asociado. La primera fase del diseño de un sistema de rociadores, es la determinación de este riesgo.

Las normas de fabricación y diseño de sistemas de rociadores llevan décadas evolucionando. Esto ha permitido que su fiabilidad sea enorme, siempre que se respeten dichos criterios. En la actualidad, y de obligado cumplimiento en la Unión Europea, es la norma UNE-EN 12845:2005 [6] la que los regula. Así, entre otros muchos aspectos, clasifica en tres tipos de riesgo diferentes los requisitos para cada instalación (en función de la combustibilidad, y la carga de fuego asociadas al uso):

- Riesgo Ligero – RL
- Riesgo Ordinario – RO
- Riesgo Extra – RE

Dentro del riesgo Extra se distinguen otros dos tipos:

- o Riesgo extra de producción
- o Riesgo extra de almacenamiento

Se describen en la tabla 3.1 todas las tipologías definidas en la normativa [6] de acuerdo a los usos, la combustibilidad y las cargas de fuego, que se muestran con un ejemplo de aplicación.

TABLA 3.1.RESUMEN DE RIESGOS.

TIPO DE RIESGO	COMBUSTIBILIDAD	EJEMPLOS DE APLICACIÓN	
Riesgo Ligero (RL) -Superficies reducidas - Separados de otros usos por elementos resistentes al fuego	BAJA	Escuelas, prisiones	
Riesgo ordinario (RO) -Usos con poco procesado o fabricación. -Esta tipología de diseño se subdivide en los siguientes grupos RO1, RO2, y RO3	MEDIA	Cementerías, Metal	
		Industria cárnica, aparcamientos	
		Centros comerciales, salas de máquinas	
		Cines, teatros	
Riesgo Extra (RE) - de proceso - de Almacenamiento (según sea la actividad principal) - Usos donde se puede favorecer la rápida propagación y la alta intensidad del fuego	ALTA	REP1, Riesgo Extra Proceso Grupo 1	Imprentas, fábricas de cauchos
		REP2, Riesgo Extra Proceso Grupo 2	Fábricas de encendedores
		REP3, Riesgo Extra Proceso Grupo 3	neumáticos de caucho para coches y camiones
		REP3, Riesgo Extra Proceso Grupo 4	fábricas de fuegos de artificio
		REA1, Riesgo Extra Almacenamiento Categoría I	Cerveza
		REA2, Riesgo Extra Almacenamiento Categoría II	Baterías, pila seca
		REA3, Riesgo Extra Almacenamiento Categoría III	Tejido sintético
		REA4, Riesgo Extra Almacenamiento Categoría IV	Cartón (almacenado verticalmente)

3.2.2.2. Clasificación de Materiales y Tipologías de embalaje

Los riesgos asociados a las actividades de almacenaje según establece la norma UNE EN 12845 [6], deberán seguir una metodología específica basada en la categorización de los productos almacenados, Dichas categorías se obtienen en función del factor de material, que clasifica el producto en función de contenido energético, y la configuración de almacenamiento que clasifica el producto según exposición en caso de incendio. A continuación se describen ambos factores: factor de material y configuración del almacenamiento.

La norma [6] subdivide el factor material en 4 niveles en función del contenido energético que resulta de la relación entre:

- Combustibilidad de producto y el envoltorio.
- El tipo de material que se está almacenando

Una vez determinado el factor de material, se asigna la configuración de almacenamiento (que indica el tipo de embalaje empleado y la presencia de plásticos). En [6] se definen las configuraciones recogidas en la tabla 3.2:

TABLA 3.2 CONFIGURACIONES DE ALMACENAMIENTO

TIPO DE SUPERFICIE	DESCRIPCION
Recipiente expuesto de plástico con contenido no combustible	Recipientes de plástico que contienen <ul style="list-style-type: none"> - Líquidos no combustibles - Sólidos en contacto directo con el recipiente.
Superficie expuesta de plástico sin expandir	El producto tiene superficies expuestas de plástico significativas
Superficie expuesta de plástico expandido	El producto tiene plásticos expandidos expuestos
Estructura abierta	El producto tiene elevada superficie, y fácil acceso del aire
Material en bloques sólidos	El producto tiene baja relación superficie a volumen o masa.
Material en grano o en polvo	El producto tiene tendencia a derramarse durante un incendio y sofocar el fuego.
Sin configuración especial	No se corresponden con las categorías anteriores

Con estos datos, podremos determinar la categoría del material que se va a proteger de acuerdo a la Tabla de productos almacenados. Y una vez clasificado el Factor de material se evalúa el tipo de almacenaje empleado.

TABLA 3.3 CATEGORÍA DE PRODUCTOS ALMACENADOS

Configuración de almacenamiento	Factor de material			
	1	2	3	4
Recipiente expuesto de plástico con contenido no combustible	Cat. I, II, III	Cat. I, II, III	Cat. I, II, III	Cat. IV
Superficie expuesta de plástico sin expandir	Cat. III	Cat. III	Cat. III	Cat. IV
Superficie expuesta de plástico expandido	Cat. IV	Cat. IV	Cat. IV	Cat. IV
Estructura abierta	Cat. II	Cat. II	Cat. III	Cat. IV
Material en bloques sólidos	Cat. I	Cat. I	Cat. II	Cat. IV
Material en grano o en polvo	Cat. I	Cat. II	Cat. II	Cat. IV
Sin configuración especial	Cat. I	Cat. II	Cat. III	Cat. IV
NOTA Véanse los apartados B.3.2. a B.3.8 para explicaciones sobre las configuraciones de almacenamiento.				

TABLA 3.4 CLASIFICACIÓN DE ALMACENAMIENTOS

TIPOLOGÍA DEL ALMACENAMIENTO	DESCRIPCIÓN
ST1	Libre o en bloques
ST2	Paletas auto-portantes en filas sencillas(pasillos inferiores a 2,4 m)
ST3	Paletas auto-portantes en filas múltiples
ST4	Estantería paletizada
ST5	Estantes sólidos o abiertos (ancho < 1 m)
ST6	Estantes sólidos o abiertos (ancho entre 1 – 6m)

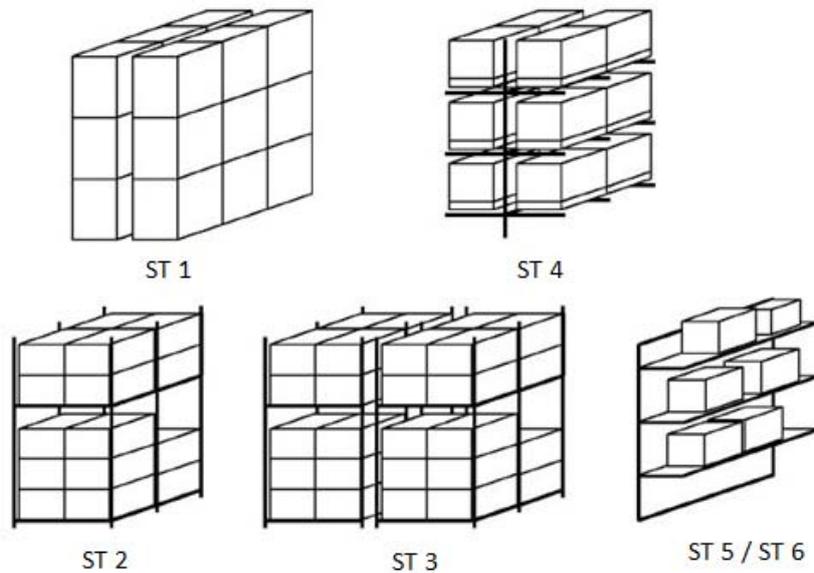


FIGURA 3.4 TIPOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO

Por lo que queda muy claramente demostrado que el diseño de la instalación de rociadores no sólo dependerá de la actividad desarrollada, sino de la forma de embalar y almacenar los materiales presentes. Si no se caracteriza adecuadamente el incendio, es posible que el dimensionado hidráulico de la instalación no sea suficiente para el control de incendio.

3.2.2.3. Criterios Hidráulicos de Diseño

Conocido el riesgo (y la categoría del producto en caso de tratarse de almacenamientos), la segunda fase de diseño de los sistemas de extinción automática con rociadores es determinar los requisitos hidráulicos de la instalación, entre otros:

- ✓ **ÁREA DE OPERACIÓN:** que se define como el área máxima sobre la que se supone, para efectos de diseño, que se abrirán los rociadores en caso de incendio.
- ✓ **DENSIDAD DE DISEÑO:** Está definida para el área de operación y dependerá del riesgo elegido indicando el caudal ($\text{mm}/\text{min}=\text{l}/\text{min m}^2$) que deberá suministrar la instalación.

La norma UNE EN 12845 [6], para la obtención de estos parámetros, tabula en función del riesgo, la tipología de la instalación, el área de operación y la densidad de diseño los requisitos para riesgo ligero, ordinario, riesgo extra de producción, como se muestra en la Tabla de Criterios de Diseño.

TABLA 3.5 CRITERIOS DE DISEÑO PARA INSTALACIONES RL, RO, Y REP

Clase de riesgo	Densidad de diseño mm/min	Área de operación m ²	
		Mojada o acción previa	Seca o alterna
RL	2,25	84	No se permite Se usa ROI
RO1	5,0	72	90
RO2	5,0	144	180
RO3	5,0	216	270
RO4	5,0	360	No se permite Se usa REP1
REP1	7,5	260	325
REP2	10,0	260	325
REP3	12,5	260	325
REP4	diluvio (véase la nota)		
NOTA Requiere consideración especial. Los sistemas de diluvio no están cubiertos por esta norma.			

Sin embargo, la metodología aplicada anteriormente no contempla los riesgos derivados de almacenamiento. Por ello dado su mayor peligrosidad, [6] establece una metodología específica para el diseño hidráulico de las instalaciones de extinción automática destinadas a proteger este tipo de riesgo. Además de los criterios descritos anteriormente para riesgo ordinario, riesgo extra de producción y riesgo ligero, incluye los criterios de diseño específicos para proteger el riesgo de almacenamiento. El resultado es una tabla donde se muestran el área de operación y la densidad de diseño, específicas para este uso.

El abastecimiento es unos puntos críticos del diseño. Según la norma deben ser capaces de suministrar automáticamente las condiciones mínimas requeridas de presión y caudal del sistema. para las siguientes duraciones mínimas:

- ✓ RL 30 min
- ✓ RO 60 min
- ✓ REP 90 min
- ✓ REA 90 min

Este requisito será el que determine el tamaño mínimo del depósito de abastecimiento que debe garantizar el agua para nuestra instalación de rociadores.

3.2.3. LOS ROCIADORES ESFR

Como ejemplo de una de las últimas evoluciones que se han desarrollado en las instalaciones de PCI, se puede citar la de los ESFR (*Early Suppression Fast Response*). Los rociadores ESFR proporcionan una respuesta rápida actuando un número pequeño de rociadores que proporcionan un gran caudal (entre

460 y 673 l/min) y con un tipo de descarga en forma de cono. Éstas prestaciones les confieren un alto rendimiento que les permite no solo controlar un incendio, sino que además extinguirlo (supresión). La temperatura de la ampolla suelen estar entre 68°C y 93°C. Otro dato a destacar el factor de descarga (K) nominal que se presenta en un rango entre 200 y 360.



FIGURA 3.5 ROCIADOR ESFR

Básicamente se trata de rociadores que descargan unos caudales enormes de agua, y permiten la protección de almacenes mediante la instalación de rociadores sólo en cubierta. Lo habitual en grandes almacenes es que resulte necesario la instalación de rociadores convencionales en niveles intermedios (entre las estanterías). Esto no sólo encarece mucho la primera instalación, sino que también dificulta las labores de mantenimiento anual.

Por ese motivo, se han convertido en una solución muy habitual, que permite simplificar la instalación de rociadores. Ahora bien, como se trata de conseguir una funcionalidad específica (prestación), se deben respetar todos los criterios de diseño requeridos por el fabricante (o por la entidad de certificación que realizó los ensayos). Y por tanto, este sistema tiene una serie de requisitos fundamentales (limitaciones). Los techos deben cumplir:

- ✓ Pendiente no mayor de 170 mm/m.
- ✓ Continuos y sin ninguna abertura permanente.
- ✓ Construcción incombustible.
- ✓ Capaces de soportar carga de 150 N/m²

Por otro lado, el empleo de los rociadores ESFR no es recomendable en almacenes con:

- ✓ Recipientes combustibles abiertos.
- ✓ Recintos donde no se sabe qué tipo de productos se van a almacenar.

- ✓ Riesgos como aerosoles, líquido inflamable, licores alcohólicos.
- ✓ Almacenamientos en recipientes de polipropileno y polietileno.
- ✓ Neumáticos de caucho.

Y otros requisitos adicionales que se deben verificar en la norma de diseño correspondiente. Si no se siguen todos los parámetros requeridos, el diseño del sistema no será válido y no conseguiremos los objetivos deseados. De hecho, al tener también limitaciones en cuanto a la altura máxima de la nave, y la altura máxima del producto almacenado, son requisitos que se deben tener en cuenta desde el inicio del proyecto. Si no se hace así, es posible que esta aplicación no sea viable, teniendo que realizar la instalación de rociadores en niveles intermedios (ya comentada).

3.2.4. LOS ROCIADORES RESIDENCIALES

Una vez que comentada la fiabilidad de los sistemas de rociadores automáticos, y lo complejas que son sus normas de diseño (en las que se basa su fiabilidad), se va a identificar otra aplicación derivada de dicha instalación, pero con objetivos simplificados. Se trata de los “rociadores residenciales” y su aplicación está extendida únicamente en Estados Unidos. NFPA ha desarrollado su Código específico (el 13D) y tienen como objetivo la protección de viviendas unifamiliares.

Las tipologías constructivas habituales en Estados Unidos de este tipo de viviendas se caracterizan por disponer de parcela alrededor e incluir mucho material estructural combustible (sobre todo, madera). Además, las estadísticas de las compañías de seguros demuestran que en ese país más del 60% de las muertes por incendio se producen en viviendas. Es evidente que disponer de un sistema automático de extinción mejoraría mucho las condiciones de seguridad en el hogar, pero cumplir todos los requisitos reglamentarios para una instalación de rociadores sería económicamente inviable. Por este motivo, se desarrolló su normativa específica, ajustando los objetivos a las prestaciones realmente necesarias (aún a costa de reducir algo la fiabilidad final del sistema).

La NFPA 13D [10], que se publicó por primera vez en 1975, establece una serie de requisitos “reducidos” para instalaciones domésticas:

- ✓ La densidad de diseño es de 2.4 l/min m²
- ✓ El área de diseño es de dos rociadores o aproximadamente 107 l/min
- ✓ el abastecimiento de agua es de apenas 10 minutos

La instalación típica se completa con un tanque de 1.100 litros y una bomba eléctrica de 1 CV y con un flujo nominal de 155 l/min, a una presión de 2 bar. Y la instalación de tubería se hace con CPVC (que se puede pegar, lo que simplifica el montaje). De este modo, conseguimos una instalación de rociadores,

bastante adaptada al riesgo a proteger, y que supone una inversión inferior al 1% del precio de construcción de la vivienda. Cada vez más Estados dentro de E.E.U.U. están regulando para que sea obligatorio proteger las viviendas de esta tipología con este tipo de rociadores. De este modo, se puede conseguir una protección adecuada al riesgo (y a los objetivos definidos).

3.3. EL AGUA NEBULIZADA EN PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

A principios de los años 90, cuando el fabricante finlandés Marioff (que actualmente pertenece al grupo UTC) comenzó a comercializar su sistema denominado Hi-Fog no había ninguna referencia internacional para este tipo de sistemas. Desde entonces las referencias internacionales han avanzado, tomando siempre como referencia este sistema. De hecho, comenzaron por probar la fiabilidad de sus sistemas realizando cientos de ensayos en laboratorios de reconocido prestigio. Hoy en día muchos de estos ensayos siguen el mismo procedimiento que se desarrolló hace más de veinte años, ya que estos sistemas requieren de una validación mediante ensayos a escala real. No existe a nivel internacional ninguna norma que establezca criterios de diseño para estos sistemas (ubicación de boquillas, caudales mínimos, ...). Se considera que es un sistema suficientemente complejo como para que sea necesario demostrar su fiabilidad en cada uno de los riesgos que se quieren proteger.

3.3.1. VENTAJAS DEL AGUA NEBULIZADA

La mayoría de los fabricantes de los sistemas de agua nebulizada a alta presión conoce muy bien las ventajas de estos sistemas (en algunos casos son ventajas algo difíciles de comprender). Casi todos están de acuerdo en que las ventajas de estos sistemas son muy importantes (este listado se puede encontrar en distintas versiones en cualquier folleto técnico de los fabricantes de estos sistemas):

- *Económicos. Se trata de un agente extintor con un coste reducido*
- *Ecológico. No perjudica al medio ambiente*
- *No conductor de electricidad*
- *Eficaz para fuegos líquidos inflamables*
- *Inocuidad para los equipos protegidos y para las personas*
- *Limita los daños por agua*
- *Reducción drástica de la temperatura del recinto*
- *Mantenimiento del nivel de oxígeno*
- *Lavado de humos y gases tóxicos*
- *Previene la reignición*

El criterio económico es difícil de justificar. Este tipo de sistemas, debido a las presiones de trabajo que requiere nunca son una opción de extinción barata. Además del coste por boquilla y los grupos de presión (son caros), toda la instalación se debe realizar con tubería en acero inoxidable y soportación especial en aluminio (tipo *STAUFF*).



FIGURA 3.6 DIFUSOR AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN EN DESCARGA

Sin embargo, el resto de ventajas sí son importantes: no conduce la electricidad (la vaporización del agua contribuye a hacer desaparecer su efecto conductor); limita los daños por agua (que pueden darse en sistemas que descargan mayores caudales); no supone reducción del nivel de oxígeno (por lo que no hay peligro para los ocupantes del recinto); y realiza un lavado de humos y gases (provocando la absorción de partículas dañinas para equipos y personas).

Algunas de estas ventajas son únicas de este sistema de extinción, lo que hace que pueda resultar el más adecuado para muchos de los riesgos que se pueden proteger en edificación. Rociadores automáticos, sistemas de extinción por agentes gaseosos y sistemas de agua nebulizada son los sistemas de extinción más habituales. Será función del ingeniero/proyectista evaluar los riesgos a proteger, y en función de los parámetros o variables objetivos, aplicar el sistema más adecuado en cada caso. Una vez elegido el sistema, serán las normas de diseño las que nos permitan garantizar la fiabilidad del sistema.

3.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE ALTA PRESIÓN

Los sistemas de agua nebulizada deben su eficacia a dos conceptos básicos:

- ✓ las descargas a alta presión a través de los difusores
- ✓ y su capacidad de convertir el agua en microgotas (nebulización)



FIGURA 3.7 DIFUSORES AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN

Los sistemas de alta presión funcionan con presiones de trabajo entre los 35 y los 210 bar, descargando gotas de muy pequeño diámetro y alta velocidad. Estos sistemas de extinción de incendios emplean como agente extintor agua desmineralizada y hacen que el agua se descargue en forma de niebla. La alta velocidad de las gotas hace que la niebla pueda penetrar en el conjunto de gases calientes y alcance la superficie de combustión, incluso en fuegos grandes y resguardados de la acción directa de la descarga. Los sistemas de extinción por agua nebulizada de alta presión basan su principio de extinción y control del fuego en la combinación de cuatro acciones diferentes:

- ✓ Enfriamiento del combustible y del espacio circundante
- ✓ Desplazamiento del oxígeno en la base del fuego
- ✓ Atenuación de la transmisión de calor por radiación
- ✓ Lavado y decantación de los humos y gases tóxicos

El efecto de enfriamiento se optimiza al máximo, por la división del agua aplicada en gotas extremadamente pequeñas (60-200 μ m), lo que resulta en un incremento enorme de la superficie de absorción de calor. Un alto porcentaje de estas gotas pequeñas pasa a estado gaseoso, retirando del combustible el calor necesario para su evaporación y desplazando al oxígeno de la base del fuego (el agua aumenta una 1700 veces el volumen al evaporarse). Este proceso de vaporación enfría y sofoca la reacción de combustión, reduciendo la emisión de los vapores inflamables, y finalmente produciendo la extinción. Es importante resaltar el hecho de que el efecto de sofocación se limita al entorno del fuego, que es donde el agua nebulizada se convierte en vapor. El recinto permanece con niveles de oxígeno genéricos, superiores al 17-19%, lo que hace que la atmósfera permanezca por encima de los niveles hipóxicos.

Los sistemas de agua nebulizada a alta presión fueron desarrollados por Marioff (HI-Fog), pero hoy en día existen muchos fabricantes que disponen de sistemas similares: SIEX-WMS, Aguilera-MicroAqua, ...Y su funcionamiento tiene siempre una estructura parecida:

- ✓ Depósito de reserva
- ✓ Sistema de presurización
- ✓ Red de tuberías
- ✓ Difusores de descarga

El depósito de reserva (puede ser construido en acero inoxidable, o simplemente ser un grupo de botellas de agua) garantizará la cantidad de agua suficiente para que el sistema mantenga las condiciones de descarga durante el tiempo requerido. Debido a los requisitos del sistema, el agua será siempre desmineralizada (evitando incrustaciones, y problemas de descarga en el futuro).

El sistema de impulsión (bombeo) es el que permite obtener un tamaño de gota adecuado. Para ello es necesario realizar la atomización descargando el líquido a alta velocidad, para lo cual se presuriza el agua con presiones altas del orden de 150 - 200 bar. Existen dos formas de propulsar el agua a estas presiones:

- Mediante un equipo de bombeo de alta presión, accionado por motor diesel, o eléctrico (incluso por aire comprimido, o nitrógeno).
- Presurizando el agua directamente mediante un gas (habitualmente, nitrógeno que se almacena en cilindros).



FIGURA 3.8 GRUPO ELÉCTRICO AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN

La red de tuberías debe soportar las altas presiones del sistema. Es por ello que tiene muchos requisitos (tanto en fabricación, como en montaje). Al no poderse producir ningún tipo de costra (por oxidación), la tubería siempre será inoxidable (normalmente AISI 304 ó 316). La gran ventaja de esta instalación es que se puede adaptar perfectamente a edificios existentes: por un lado requiere de diámetros muy pequeños, y por otro lado se pueden realizar codos y curvas según necesidad (las altas presiones de trabajo no se van a ver tan afectadas como sucede en otros sistemas –en los que hay que recalcular con los codos y tes definitivos-).

Por último, los difusores, que conseguirán descargar el caudal requerido para cada aplicación, y que tendrán una distribución acorde a lo necesario para la protección del riesgo. Al igual que en otras instalaciones, los hay abiertos y cerrados (con fusible térmico). También estarán diseñados para conseguir el tamaño de gota adecuado, y la velocidad y ángulo de descarga serán apropiados al riesgo a proteger. Los difusores trabajarán a altas presiones (entre 40 y 90 bar) para conseguir estos efectos.

3.3.3. SOLUCIONES Y TIPOLOGÍAS DE INSTALACIONES DE AGUA NEBULIZADA

Si descartamos las diferentes tipologías de sistemas de impulsión, y consideramos que el trazado de tuberías, y los depósitos de reserva de agua serán en la mayoría de casos similares; el principal elemento diferenciador de las distintas tipologías de instalaciones de agua nebulizada será el difusor. Por lo tanto, podemos distinguir las siguientes tipologías:

- Difusor cerrado: La principal ventaja de los difusores cerrados es que permiten la protección selectiva de un riesgo protegiendo al mismo tiempo toda la sala, ya que la descarga solo se produce a través de los difusores alcanzados por las altas temperaturas del fuego, manteniendo inalteradas las zonas en las que la temperatura no indique riesgo. Estos difusores se pueden emplear en instalaciones:
 - De Tubería Húmeda: al igual que en una instalación de rociadores automáticos, cuando está en reposo, el sistema mantiene la tubería cargada con agua a una determinada presión. Cuando se produce la detección a través del bulbo térmico de un difusor, éste se abre dando lugar a la descarga de agua nebulizada únicamente en la zona del recinto donde se halla el riesgo.
 - De Tubería Seca: En este sistema, la red de tuberías se encuentra presurizada con aire o nitrógeno, previniendo la congelación a la que se expone el agua en ciertos entornos. Cuando se produce un fuego y éste rompe el bulbo térmico de un difusor, la red se despresuriza y acciona la descarga de agente en la zona del recinto donde se encuentra el riesgo.

- De Preacción (acción previa): El sistema de preacción precisa de una activación doble para iniciar la descarga de agente, con el fin de evitar activaciones accidentales en entornos de bienes muy sensibles. En reposo, las tuberías no retienen agua, y sólo se llenan tras el positivo de un sistema de detección electrónico; sin embargo, la descarga no se iniciará todavía, hasta que la rotura del bulbo térmico de los difusores confirme que no se trata de una falsa alarma.
- Difusor abierto: De esta forma, los difusores abiertos para sistemas de diluvio consiguen proteger una mayor superficie utilizando un menor caudal y sin inundarla, refrigerando rápidamente el riesgo y favoreciendo la vaporización del agua, protegiendo así los bienes sobre los que actúa. Este sistema se emplea para recintos de menor tamaño, o donde existan equipos que necesiten de una refrigeración simultanea conjunta.



FIGURA 3.9 DIFUSOR ABIERTO AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN

- Microdifusor: Los microdifusores son diseñados para proteger aquellos lugares con un espacio comprometido, cerrado o mínimo. Su única boquilla apunta directamente al foco de riesgo, logrando una aplicación local rápida y efectiva. Algunas de sus aplicaciones son las siguientes: campanas de cocina, falsos suelos, escaleras mecánicas,...

Los difusores térmicos se activan automáticamente al alcanzarse temperaturas predeterminadas comprendidas entre 57-141°C (temperaturas de tarado del fusible de activación). El área de cobertura por difusor/sprinkler varía habitualmente entre los 14-16m², funcionando con una presión mínima de trabajo de 60 bar. Las densidades de diseño oscilan entre los 0,5-1,5 l/min/m². La capacidad de los depósitos de reserva de agua se diseña habitualmente para tiempos de descarga de 10-30 minutos. Los sistemas pueden ser divididos en secciones, y cada sección es equipada en ese caso con una válvula selectora (que es la que controla la descarga en dicha zona), y el número adecuado de sprinklers o boquillas atomizadoras.

3.3.4. NORMATIVA SOBRE LOS SISTEMAS DE AGUA NEBULIZADA

Al igual que para los sistemas de sprinklers, donde se han ido desarrollado diferentes normas de diseño, instalación y uso: EN12845 [6], NFPA 13 [7], CEA4001,... en los sistemas de agua nebulizada también resulta imprescindible la normalización. Al tratarse de sistemas con parámetros de diseño propio para cada fabricante y riesgo a proteger, la normalización desarrollada en los últimos años ha ido más guiada hacia la verificación de la efectividad de la solución propuesta, mediante la realización de complejos ensayos de incendio a escala real.

3.3.4.1. NFPA 750

[11] Es la principal referencia internacional desde su primera publicación en 1996 (la edición actualmente vigente es la 2015). Es una norma de marcado carácter prestacional, es decir indica cuáles son los objetivos a conseguir pero deja su demostración a la realización de ensayos a escala real, para garantizar la fiabilidad del sistema en cada tipología de riesgo a proteger. Además incluye una serie de definiciones importante, para contribuir a la normalización de los sistemas de extinción por agua nebulizada.

De acuerdo con NFPA 750 [11] los sistemas de agua nebulizada se limitan a aquellos en los que el 99% del volumen total del líquido está distribuido en gotas de un diámetro inferior a 1000 micras, medido en un plano a 1 m de la salida de la boquilla, trabajando a su mínima presión de diseño. Según la presión de descarga, se clasifican en tres tipos:

- ✓ Alta presión: Los equipos están diseñados para presiones de trabajo de 500 PSI (34,5 bar) o superiores.
- ✓ Media presión: Presiones comprendidas entre 175 PSI (12,1 bar) y 500 PSI (34,5 bar).
- ✓ Baja presión: Presiones inferiores o iguales a 175 PSI (12,1 bar).

Según NFPA 750 [11], el agua nebulizada se obtendrá por uno de los siguientes métodos:

- ✓ Descargando el líquido a altas velocidades, de forma que la diferencia de velocidades entre el líquido y el aire circundante, disperse el líquido en finas gotas.
- ✓ Descargando el líquido sobre una superficie fija, de tal manera que el impacto rompa la corriente del fluido en pequeñas gotas.
- ✓ Formando pequeñas gotas por la acción de atomizadores ultrasónicos o electrostáticos.
- ✓ Calentando el líquido por encima de su punto de ebullición, en un depósito presurizado y liberándolo súbitamente a la atmósfera.

Los sistemas habituales de alta presión emplean la primera de las alternativas expuestas. La norma también incluye (en las últimas versiones) los métodos de verificación y ensayo que se deben emplear para validar la fiabilidad de estos sistemas, en función del riesgo a proteger.

Esta norma también define cuál puede ser el objetivo para el que se diseña el sistema (prestación). Identificarlo adecuadamente influirá en cuáles serán los resultados aceptables en los ensayos para validar la fiabilidad del sistema.

- ✓ **Control del incendio:** Consiste en la limitación del crecimiento y propagación de un incendio, premojando los materiales combustibles adyacentes y controlando las temperaturas de los gases de combustión en el techo. Ésta es la aplicación más habitual (equivalente a la de los sistemas de rociadores automáticos).
- ✓ **Supresión del incendio:** La reducción sustancial y rápida de los factores que acompañan al incendio, desprendimiento de calor y emisión de gases, durante el tiempo de duración de la descarga.
- ✓ **Extinción del incendio:** La completa supresión del incendio hasta la desaparición total de materiales en combustión. Es la aplicación típica para la sustitución de los sistemas de extinción por gas (CO₂, gases inertes, etc.).

3.3.4.2. UNE-CEN/TS 14972

[12] es la especificación técnica europea (cuya última versión fue publicada en septiembre de 2014) para el Diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de agua nebulizada. Se espera que el nuevo Reglamento de Instalaciones de PCI ya incluya esta norma como referencia para el diseño de este tipo de sistemas de extinción (ya que el actual no tiene ningún requisito para ellos, lo que supone un vacío reglamentario que genera situaciones no deseadas en el mercado).

Es el equivalente europeo a la NFPA 750 [11] (aunque es mucho más reciente). También tiene un marcado carácter prestacional (remite a las aprobaciones de los fabricantes para cada uno de los sistemas). Y también incluye varios protocolos de ensayo para diferentes riesgos, que desarrolla con detalle en los anexos. A modo de ejemplo, se incluyen algunos detalles del Protocolo de ensayo de fuego en oficinas Riesgo Ordinario 1 (Ensayo de eficacia comparada frente a rociadores instalados de acuerdo a la norma EN 12845 [6]):



FIGURA 3.10 ENSAYO DE EFICACIA PARA RIESGO ORDINARIO

Se detallan la distribución y materiales que se deben emplear en los ensayos. Se aplican los criterios de diseño de la Norma UNE EN 12845 [6] para rociadores, y después se vuelve a ensayar para el criterio y el sistema propuestos por el fabricante. Se realizan ensayos bajo la descarga de un difusor automático, y también bajo cuatro. Se evalúan los resultados de forma comparativa, para garantizar que el sistema es al menos tan eficaz como el de rociadores equivalente. Se miden las temperaturas en varios puntos de control, así como en el techo de la habitación; y también la afección del incendio (carbonización) de los elementos existentes en el ensayo. Es una forma muy interesante de evaluar resultados y así poder analizar la eficacia de un sistema de extinción.

3.4. GENERACIÓN DE AGUA NEBULIZADA A BAJA PRESIÓN

Durante los últimos años (10-12 como máximo) se han desarrollado otros sistemas de extinción mediante agua nebulizada con menores presiones de trabajo. Algunos fabricantes, como Minimax-Minifog, Pefipresa-Econaqua, ... ya trabajaban con sistemas de alta presión; e intentaron “mejorar” el sistema. En realidad el objetivo no era tanto el conseguir un mejor sistema de extinción, sino el conseguir uno de fiabilidad equivalente, a un menor coste de instalación (que los sistemas de alta presión). No obstante, la empresa de referencia en el sector (Marioff) no ha modificado el diseño de sus sistemas, y sigue manteniéndose fiel a la alta presión.

3.4.1. SISTEMAS DE AGUA NEBULIZADA A BAJA PRESIÓN

Las características de estos sistemas quedan hidráulicamente a medio camino entre los sistemas de rociadores automáticos, y los sistemas de alta presión. Algunas de sus características habituales son:

- ✓ Promedio del tamaño de gota: 250 μm

Esta gota es al menos 4 veces menor que las gotas generadas por rociadores automáticos convencionales, pero también 3-4 veces mayor que el tamaño de gota de los sistemas de alta presión. Por lo tanto, sus características físicas darán un rendimiento “intermedio” a efectos de rapidez en la extinción (para un mismo caudal).

- ✓ Presión en operación: max. 16 bar

Esta característica es fundamental para conseguir uno de los objetivos del sistema (abaratarse el coste del sistema de impulsión). Al tratarse de presiones bajas, se pueden conseguir con bombas similares a las de instalaciones de rociadores automáticos. Esto consigue un ahorro estimable, pero también reduce las aplicaciones en las que las pérdidas de carga puedan ser importantes (lo que no suponía ningún problema para las instalaciones de alta presión).

- ✓ Densidad de diseño: 1,9 mm/min

La cantidad de agua descargada es menos de la mitad de la requerida por la instalación de rociadores. Se queda a medio camino entre ambas, puesto que es casi el doble que la requerida por la instalación de alta presión.



FIGURA 3.11 DIFUSOR DE AGUA NEBULIZADA A BAJA PRESIÓN VS. ROCIADOR AUTOMÁTICO

Como se puede ver en la figura 3.11, el diseño del nebulizador para estos sistemas de baja presión (izquierda) es mucho más parecido a los rociadores convencionales (derecha); ya que no es necesario romper la gota en partículas tan pequeñas (lo que simplifica mucho su diseño y fabricación). Como ventajas adicionales, no se requieren tuberías de acero inoxidable; y no es necesario tanto control sobre la calidad del agua (ya que según el fabricante, en este sistema, no hay posibilidad de obstrucciones en los difusores). Los fabricantes han desarrollado criterios hidráulicos de diseño propios (muy similares a los rociadores automáticos), estableciendo caudales, áreas de operación y requisitos de reserva de agua, que permiten garantizar la fiabilidad del sistema.

3.4.2. PATENTES

Marioff dispone de más de 1.300 patentes que protegen la mayoría de los elementos de sus instalaciones a nivel mundial. Se patentan los sistemas de bombeo, las válvulas de control, algunos soportes específicos, pero... sobre todo, los difusores. Es importante recordar que al tratarse de una instalación que debe diseñarse específicamente para cada tipo de riesgo a proteger, el difusor adecuado cambia para cada aplicación. Ese es el motivo por el que la mayoría de patentes son de difusores (nebulizadores).

Por otro lado, las compañías que han invertido más en investigación y desarrollo de estos sistemas (ya sea en alta o baja presión) han intentado proteger sus productos de la competencia mediante las correspondientes patentes. Se incluyen a continuación algunos ejemplos de patentes de este tipo de elementos:

- ✓ Boquilla nebulizadora (Sprinkler) patentada por Marioff (izquierda), frente a otro patentado por Grinnell (derecha). Siendo la primera muy habitual en sistemas de alta presión, y la segunda más parecida al rociador convencional (y aplicable, por tanto, en sistemas de baja presión)

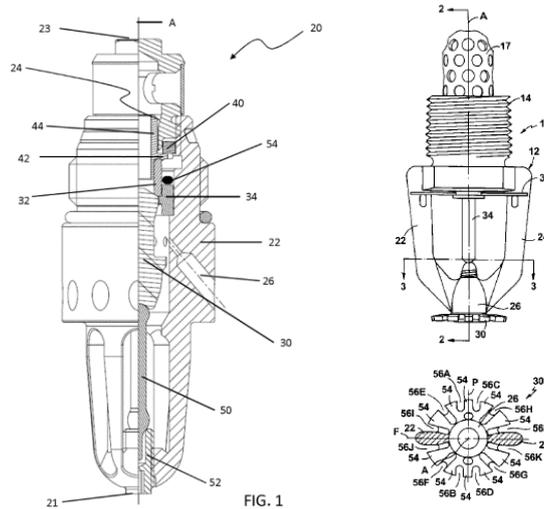


FIGURA 3.12 PATENTES DE BOQUILLAS NEBULIZADORAS (MARIOFF Y GRINELL)

- ✓ Boquilla nebulizadora sencilla, muy empleada en otros usos (como el riego, o la climatización), que utiliza un mecanismo de descarga similar y aprovecha la energía de un resorte para la rotura del tamaño de la gota



(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication** (10) **Pub. No.: US 2008/0006721 A1**
 Huang (43) **Pub. Date: Jan. 10, 2008**

(54) **MIST NOZZLE**

(52) **U.S. Cl. 239/383; 239/464; 239/491; 239/571**

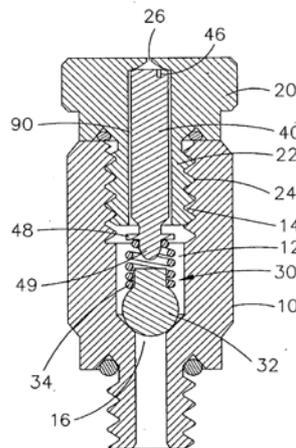


FIGURA 3.13 PATENTE DE BOQUILLA NEBULIZADORA (OTROS USOS)

- ✓ Sistema de generación de agua nebulizada ultrafina, aplicable para sistemas de extinción. Esta patente no se ha llegado a comercializar en el mercado.

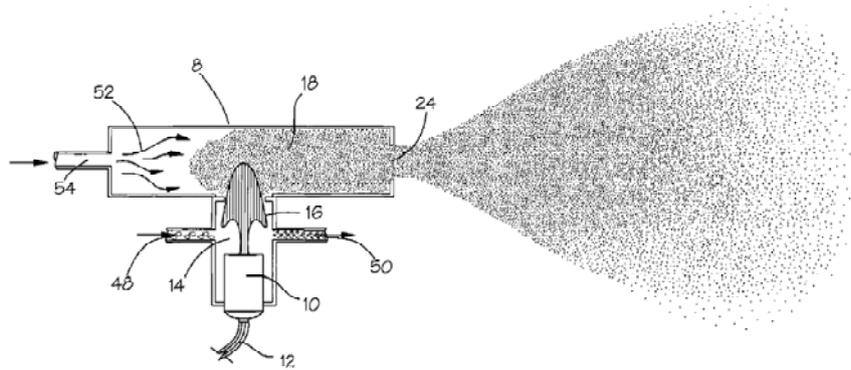
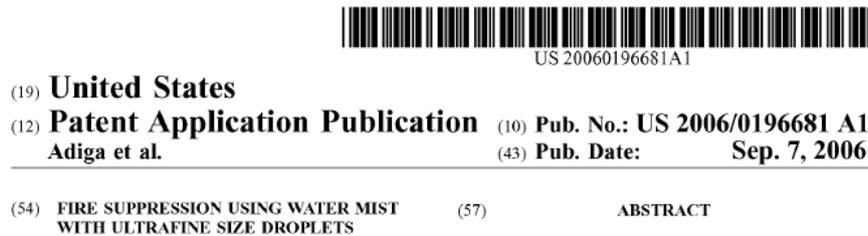


FIGURA 3.14 PATENTE DE SISTEMA DE GENERACIÓN DE GOTAS ULTRAFINAS PARA EXTINCIÓN

3.5. LOS MODELOS DE SIMULACIÓN EN PCI

Una de las herramientas asociadas al desarrollo de esta nueva forma de hacer ingeniería (enfoque prestacional) es la modelización computacional de los fenómenos que concurren en un fuego y las técnicas relacionadas con él, la ventilación, evacuación de personas, control del humo, descargas de gases o de agua y su evolución en presencia de diferentes escenarios de incendio.. En muchos casos los resultados de la simulación computacional son aceptados por las autoridades como método justificativo de la consecución de un determinado objetivo de seguridad, y del criterio de eficacia correspondiente. Pero sin duda, la utilización de un modelo debe hacerse con el mayor conocimiento de causa, así como de su validez para el entorno de aplicación.

No existen modelos que nos permitan, a modo de aplicación informática, la introducción directa de los parámetros de un riesgo a proteger, obteniendo las soluciones aceptables. Solamente a través del conocimiento y metodología adecuados se pueden conseguir resultados coherentes. El conocimiento de las técnicas de simulación computacional, sus aplicaciones y limitaciones, y la validación de sus resultados es un área que debe conocer imprescindiblemente el ingeniero de protección de incendios

A continuación se enumeran los problemas más habituales con los que nos enfrentamos al aplicar los modelos de incendios en simulación. Muchas de estas dificultades suelen ser comunes a los modelos, tanto zonales como de campo.

- Fiabilidad de las ecuaciones de transferencia.
- Insuficiente número de zonas (zonales).
- Fiabilidad de los datos de entrada:
 - Propiedades de los materiales.
 - Disposición de los elementos.
 - Formas geométricas y constructivas.
 - Condiciones climatológicas y ambientales.
- Métodos de integración numérica:
 - Convergencia.
 - Tiempo de cálculo.
 - Gran número de variables

3.5.1. MODELOS DE ZONA

Los Modelos de Zona son modelos de cálculo que dividen el dominio en varios volúmenes de control. El más común es el de dos zonas que representa el desarrollo del incendio diferenciando una capa fría inferior y otra caliente donde están los humos y gases de la combustión. En estos Modelos de Zona realizan importantes simplificaciones en las ecuaciones de gobierno de forma que se permiten considerables ahorros en el coste computacional de los cálculos. En ellos se obtienen valores de magnitudes medias en las distintas zonas en que se divide el dominio de cálculo. Los modelos zonales dan menos detalle del incendio, pero son menos costosos numéricamente que los de campo.

En estos modelos, se divide el dominio en zonas, y en cada una se calculan propiedades medias. Para ello, se consideran las ecuaciones globales de conservación para cada zona, que suelen ser ecuaciones diferenciales ordinarias para calcular la evolución temporal del incendio. Se deben hacer distintas suposiciones sobre los flujos e intercambio de propiedades a través de cada zona, que permitan hacer las simplificaciones suficientes.

Se incluye a continuación un ejemplo sencillo de modelo para un objeto que arde en una habitación, obtenido de [20]. En él, se observa cómo se eleva hacia el techo un penacho que en su parte más baja es una llama. Los gases calientes se depositan debajo del techo formando una capa caliente que es alimentada por dicho penacho. La capa caliente crece en espesor hasta que rebasa el marco superior de

una abertura (puerta o ventana), de donde escapa hacia el exterior debido a la flotabilidad, debida al menor peso de los gases calientes. Los gases calientes se propagan a las habitaciones contiguas o al exterior. Entre el objeto que arde, el penacho, la capa caliente, otros objetos de la habitación, las paredes, suelo, techo y otros elementos similares de otras habitaciones, hay intercambios de masa y energía, y también cantidad de movimiento (aunque este último sea menos relevante). Cada uno de los elementos antes mencionados será una de las zonas en que se divide el dominio. Y será la variación de sus propiedades, por ejemplo la temperatura de la capa caliente, la que se relacione con los intercambios másicos y energéticos con los otros módulos. En cualquier caso, este tipo de modelos también requiere del uso del ordenador, aunque como ya se ha comentado, el procesado es mucho más sencillo que en los modelos de campo.

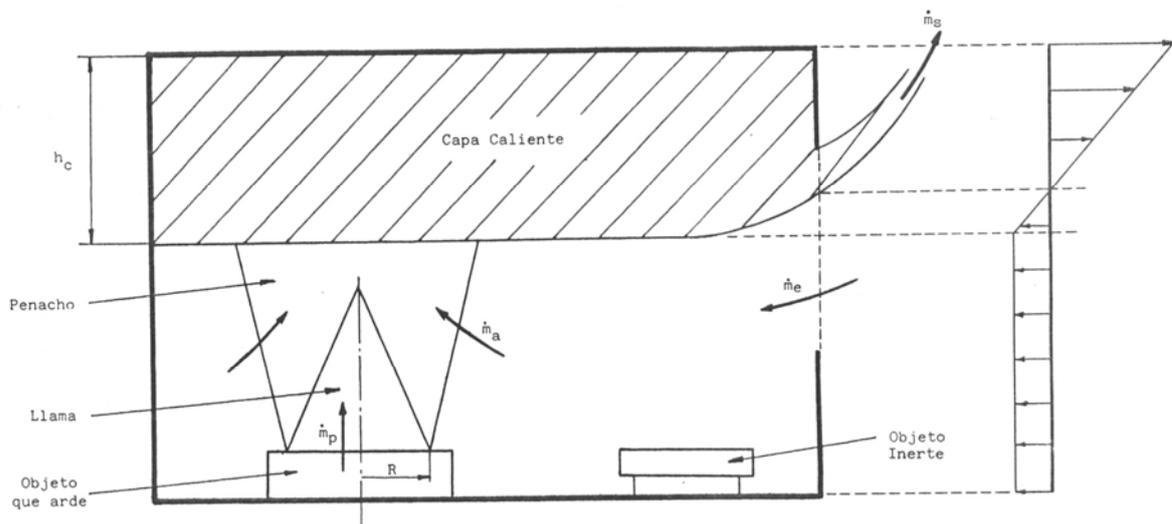


FIGURA 3.15 ESQUEMA MOSTRANDO UN MODELO ZONAL

Dos ejemplos de modelos zonales que han sido ampliamente utilizados:

- ✓ **OZONE** es un programa desarrollado por el “*Department of Mechanical Material and Structure*” de la Universidad de Liege. Incluye modelos de cálculo de una zona y de dos zonas con un criterio de transición. El usuario puede definir la curva de desarrollo del incendio, la composición de las paredes, la ventilación y además permite calcular el comportamiento de los elementos estructurales de acero por medio de fórmulas extraídas de los Eurocódigos.
- ✓ **CFAST** es un modelo de dos zonas que calcula la distribución de los humos, los gases del incendio y la temperatura en los compartimentos de un edificio durante un incendio. Se trata de un modelo multi-compartimento, en el que se pueden considerar más de 30 recintos. El usuario

puede definir varios escenarios de incendios en diferentes compartimentos, incluyendo sistemas de Protección contra Incendios, tales como sistemas de rociadores automáticos y sistemas de detección, así como sistemas de ventilación. La geometría incluye relaciones variables de área/altura, ignición de múltiples objetos presentes en el recinto, tales como, elementos decorativos y de mobiliario. Se incluye en la información del modelo una extensa base de datos con propiedades termodinámicas y de pirólisis de diferentes combustibles.

3.5.2. MODELOS DE CAMPO

Los Modelos de Campo son aquellos en los que se realiza un cálculo detallado de las magnitudes termofísicas requeridas en cada punto de una malla. Estos son los conocidos como modelos de dinámica de fluidos computacional (Computational Fluids Dynamics – CFD). La alta capacidad de cálculo de los procesadores actuales permiten dividir el dominio computacional del recinto estudiado en un gran número de volúmenes elementales de control (desde cientos de miles a varios millones de celdas). Estos modelos básicamente resuelven ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes dependientes del tiempo para cada volumen de control, de forma que permiten realizar un análisis mucho más detallado, y complejo. En este tipo de modelos las simplificaciones necesarias para los escenarios de incendio a considerar pueden ser mucho menores, y además se pueden conseguir geometrías mucho más adaptadas a la realidad.

Ventajas y desventajas de los modelos zonales y de campo. Algunas características que diferencian el rango de validez y utilidad de los modelos zonales y de campo son:

- Por definición, los modelos zonales proporcionan información limitada sobre el escenario del incendio. Las variables de interés están promediadas sobre zonas con escalas espaciales significativas con lo cual la resolución espacial es pequeña y los efectos locales no pueden ser detectados. Además requieren de grandes simplificaciones, por lo que la fiabilidad de sus resultados solo es buena para escenarios pequeños y simples.
- Una gran desventaja de los modelos zonales es que necesitan a priori un conocimiento teórico importante de la estructura de los flujos. Esto implica que la validez de las hipótesis de partida debería ser confirmada necesariamente en cada caso particular. Por lo tanto habrá muchas situaciones en que no se pueda separar el modelo zonal correspondiente de la necesidad de los estudios experimentales.

- En los modelos zonales se refleja la física del problema de una forma mucho más limitada que en los de campo. En algunas fases, la diferenciación entre varias zonas puede no ser suficientemente clara, lo que puede invalidar el propio concepto de modelo zonal.
- En la actualidad los modelos de campo deben incluir algunas suposiciones que permitan concretar algunas etapas del cálculo en lo relativo a la turbulencia, cinética, radiación y otros procesos físicos importantes. Un buen diseño y aplicación del modelo de campo siempre aporta una información más completa que uno zonal equivalente. Esto es especialmente válido en geometrías complejas donde los CFD son la única aproximación posible.
- La gran diferencia computacional de ambos tipos de modelos es el tiempo de cálculo que implican, y la potencia de procesado que precisan. Es necesario analizarlo previamente, antes de tomar una decisión sobre el enfoque más adecuado. De otro modo, se estarán malgastando días de trabajo y procesado computacional, que no llegarán a darnos los resultados esperados.

3.5.3. DESARROLLO DE MODELOS CFD

Como ya se ha indicado, un análisis CFD consiste en la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos y transferencia de calor (conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, etc.) en un dominio de cálculo. Los pasos a realizar en todo análisis CFD son:

- Pre-procesado:
 - Construcción de la geometría del dominio de cálculo
 - Generación del mallado: subdivisión del dominio de cálculo en volúmenes de control
 - Definición de modelos físico-químicos a utilizar: turbulencia, combustión, radiación, etc.
 - Definición de condiciones de contorno: paredes, entradas/salidas de aire, etc.
 - Definición de las condiciones iniciales, en especial para análisis transitorios donde la solución en cada paso temporal depende de las condiciones del flujo en el paso temporal anterior.
- Cálculo iterativo: resolución del sistema de ecuaciones mediante métodos numéricos.
- Post-procesado: Análisis de resultados:
 - Gráfico: Campos de temperaturas, radiación, concentración de humos, opacidad, imágenes, animaciones, etc.
 - Cuantitativo: tablas, valores numéricos, etc.

A continuación se detallan brevemente cada una de las etapas de este proceso de análisis CFD.

3.5.3.1. Pre-procesado: geometría

El objetivo inicial es generar una malla computacional sobre la que definir las condiciones y la física del problema. Para generar dicha malla es necesario crear una geometría cerrada del dominio de interés. Se debe considerar que una de las grandes dificultades del modelado de incendio es la incorporación de las geometrías del edificio a estudiar en la aplicación informática de modelización CFD a utilizar. Estas geometrías suelen ser complejas y requieren un esfuerzo importante para ser generadas en la aplicación CFD que estemos empleando. Lo que suele suceder habitualmente es que los planos iniciales creados por arquitectos y proyectistas suelen ser en su mayoría en 2D (al menos en nuestro país), pero el código CFD requiere la definición de la geometría en 3D. Esto implica dedicar muchas horas de trabajo únicamente a la generación de la geometría en el formato adecuado para la herramienta CFD.

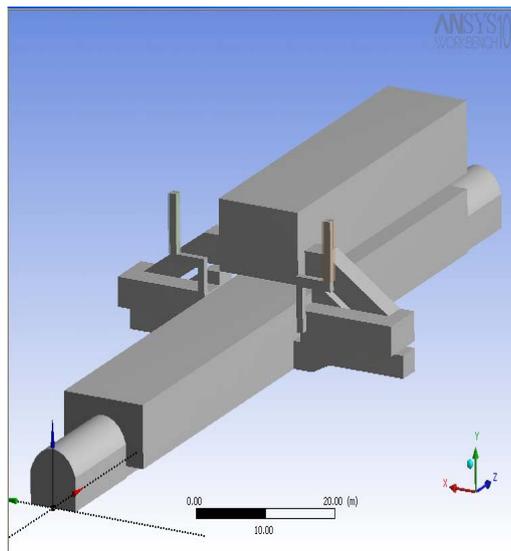


FIGURA 3.16 GEOMETRÍA CFD DE ESTACIÓN DE METRO (CORTESÍA DE ANALISIS-DSC)

3.5.3.2. Pre-procesado: Mallado

El mallado consiste en la subdivisión del dominio 3D de cálculo en celdas o elementos, también llamados volúmenes de control. Será en cada uno de los elementos -o en los vértices de los elementos- (según el código CFD sea centrado en los elementos, o en los nodos) donde se resuelven las variables a calcular. Por ello es necesario que el mallado tenga una resolución adecuada para poder capturar con precisión las características del flujo, como gradientes de temperatura, concentración de humos, etc. Por otra parte, debemos considerar que al aumentar el número de elementos aumenta el tiempo de cálculo y la cantidad de recursos computacionales necesarios para la resolución del problema (CPU, RAM). Por lo

tanto el número de elementos suele estar condicionado por los recursos disponibles, el tiempo de cálculo, y la precisión requerida en los resultados. Es muy importante contar con la experiencia previa para distribuir los elementos adecuadamente (por ejemplo, con mayor densidad de elementos en zonas particularmente importantes o donde se prevén gradientes elevados, y menor densidad de elementos en zonas de menor importancia).

El mallado puede estar constituido por diferentes tipos de elementos:

- ✓ **Mallado hexaédrico:** normalmente ofrece mejor control sobre la generación del mallado y resultados algo más precisos en el solver, siempre que se mantengan los parámetros de calidad. Sin embargo es complicado de utilizar para geometrías complejas.
- ✓ **Mallado tetraédrico:** se adapta muy bien a todo tipo de geometría, aunque los resultados pueden tener menor precisión si no se utilizan los esquemas de discretización adecuados en el solver (difusión numérica)
- ✓ **Mallado híbrido:** normalmente tetraedros con capas de prismas en las paredes con objeto de capturar correctamente la capa límite y su efecto en el flujo (turbulencia). También son posibles las combinaciones de diferentes tipos de elementos en diferentes zonas del dominio.

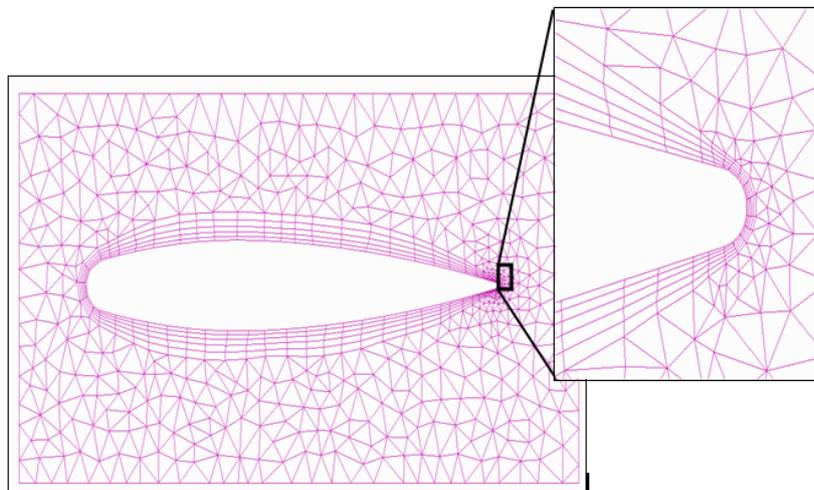


FIGURA 3.17 EJEMPLO DE MALLADO CFD HÍBRIDO PARA CAPA LÍMITE (CORTESÍA DE ANALISIS-DSC)

3.5.3.3. Pre-procesado: Modelos físicos

Una vez obtenida la malla se debe especificar cuáles son los fenómenos físicos que están teniendo lugar y que se van a resolver, además de especificar con qué materiales (líquidos, gases, partículas sólidas, sólidos) se va a trabajar. Los fenómenos más típicos a modelar son la turbulencia, flotabilidad, combustión, mezcla y difusión de especies químicas (humos) y la radiación térmica. Muchos de estos

fenómenos se pueden resolver mediante diferentes modelos, o aproximaciones, cada una con sus ventajas, inconvenientes, y rango de validez. La labor del experto es conocer en detalle estos modelos y ser capaz de utilizarlos convenientemente para la resolución correcta del problema.

Como se ha especificado, sobre el dominio de cálculo se resuelven las ecuaciones de Navier Stokes (conservación de masa, energía y cantidad de movimiento) y las adicionales específicas del modelo (turbulencia, flotabilidad, transmisión de calor, etc.) en cada una de las celdas que conforman el mallado del dominio. Esta resolución puede ser en régimen permanente (estacionario) o en régimen transitorio, para el caso en que se desea analizar la evolución temporal de las variables consideradas.

3.5.3.4. Pre-procesado: Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno especifican las características del flujo en los contornos del dominio. Imponer estas condiciones es necesario para especificar correctamente el problema. Las condiciones de contorno pueden ser de varios tipos:

- ✓ Entradas/Salidas: donde se especifica el caudal, flujo másico, presión, temperatura de entrada, fracción másica de humos, etc.
- ✓ Paredes: se pueden imponer valores de temperatura, flujos de calor, coeficientes de convección, emisividad, etc.
- ✓ Simetría: condición utilizada para simplificar el problema y reducir tiempo de cálculo en los casos en que una parte del problema es la repetición de otra invertida.

3.5.3.5. Cálculo iterativo: Resolución de las Leyes de conservación

Una vez que el problema está definido y especificado se debe resolver. El conjunto de ecuaciones implementadas en los códigos CFD son las ecuaciones de transporte de Navier-Stokes en su forma conservativa.

Las ecuaciones instantáneas de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía son:

- ✓ Ecuación de Continuidad o de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

- ✓ Ecuaciones de Conservación de la Cantidad de Movimiento (una en cada dirección x,y,z del espacio):

$$\frac{\delta(\rho U)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

Donde p es la presión estática, τ es el tensor de tensiones, que vienen dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = \mu \left[(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U \right] \quad (3)$$

- ✓ Ecuación de Conservación de la Energía:

$$\frac{\delta(\rho h_{TOT})}{\delta t} - \frac{\delta(p)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U h_{TOT}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (4)$$

Donde h_{TOT} es la entalpía total, relacionada con la entalpía estática $h(T, p)$ según la ecuación:

$$h_{TOT} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (5)$$

En estas cinco ecuaciones hay siete incógnitas y el sistema se cierra con la adición de dos ecuaciones algebraicas de la termodinámica:

- ✓ La Ecuación de Estado, que relaciona la densidad con la presión y la temperatura

$$\rho = \rho(p, T) \quad (6)$$

- ✓ y la Ecuación Constitutiva, que relaciona la entalpía con la temperatura y la presión.

$$C_p = C_p(T) \quad (7)$$

Existen soluciones analíticas para las ecuaciones de Navier Stokes, pero únicamente para flujos muy simples y en condiciones ideales. Para obtener soluciones para flujos reales, o de escenarios más complejos es necesario adoptar algoritmos que apliquen métodos numéricos, donde las ecuaciones diferenciales son reemplazadas por ecuaciones algebraicas, resolubles por computador, que se resuelven iterativamente. El método de Volúmenes Finitos para la resolución de las ecuaciones requiere la discretización del dominio espacial en volúmenes de control utilizando una malla. Las ecuaciones se integran en cada volumen de control, asegurando que las variables (masa, cantidad de movimiento, energía) se conservan en cada volumen de control. El conjunto de estas ecuaciones para todos los volúmenes de control constituye el sistema completo de ecuaciones lineales algebraicas, que se resuelven en el solver de forma iterativa.

3.5.3.6. Cálculo iterativo: Modelos físicos implementados en el solver

Existe una amplia implementación de modelos físicos que permiten la resolución de diferentes aplicaciones en la industria. Muchos de estos modelos están relacionados con fenómenos como:

- ✓ Flotabilidad
- ✓ Combustión
- ✓ Flujo Multifásico (con o sin cambio de fase como condensación, y evaporación)
- ✓ Radiación térmica
- ✓ Reacciones Químicas
- ✓ Turbulencia

3.5.3.7. Post-procesado de resultados

Es la fase que nos permite analizar los resultados, para evaluar las variables calculadas durante el análisis CFD. Se puede realizar desde el enfoque que resulte más adecuado (unas veces es más importante la presentación, y en otros casos lo es la precisión de los resultados).

- ✓ Gráfico: Campos de temperaturas, intensidad de radiación, concentración de humos, opacidad, imágenes, animaciones, etc.
- ✓ Cuantitativo: tablas, valores numéricos, etc.

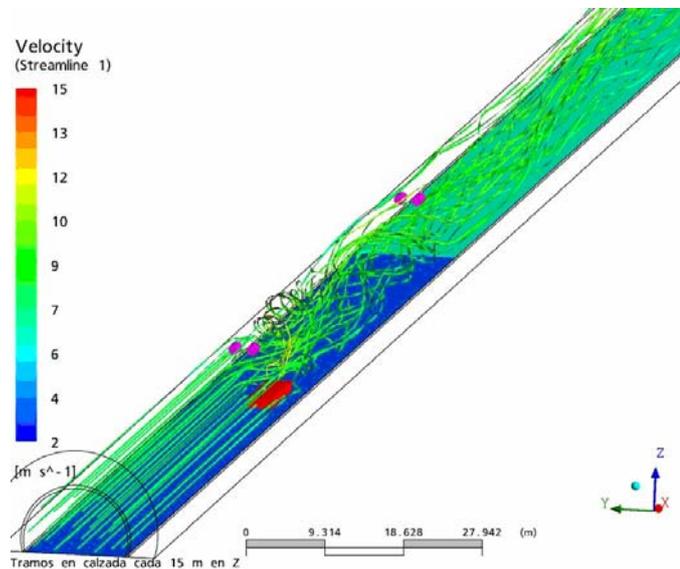


FIGURA 3.18 LÍNEAS DE CORRIENTE PRODUCIDAS POR JET-FAN EN TÚNEL (CORTESÍA DE ANALISIS-DSC)

Las dos herramientas más habituales para el desarrollo de este tipo de estudios CFD (ya sea en el ámbito del incendio o en otros) son ANSYS-CFX, OPENFOAM y FDS. Esta última herramienta se desarrolló específicamente para el análisis computacional de los escenarios asociados al incendio. Se comentarán y compararán brevemente sus características en el capítulo 6 del presente estudio.

4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio será el de analizar y validar la viabilidad de un nuevo procedimiento (sistema) de generación de agua nebulizada a baja presión, que permita aprovechar la energía del agua a presión para conseguir dos efectos: por una parte nebulizar el agua en la salida, y por otra impulsar el aire alrededor, generando un chorro de impulsión adicional que acabe consiguiendo arrastrar las gotas en la dirección adecuada.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

Se incluye a continuación un pequeño esquema descriptivo del sistema. Los elementos que lo componen son:

- 1) Tubería de entrada de agua desde la red
- 2) Sistema de aprovechamiento energético (turbina o similar)
- 3) Sistema de impulsión del aire (ventilador o similar)
- 4) Nebulizador

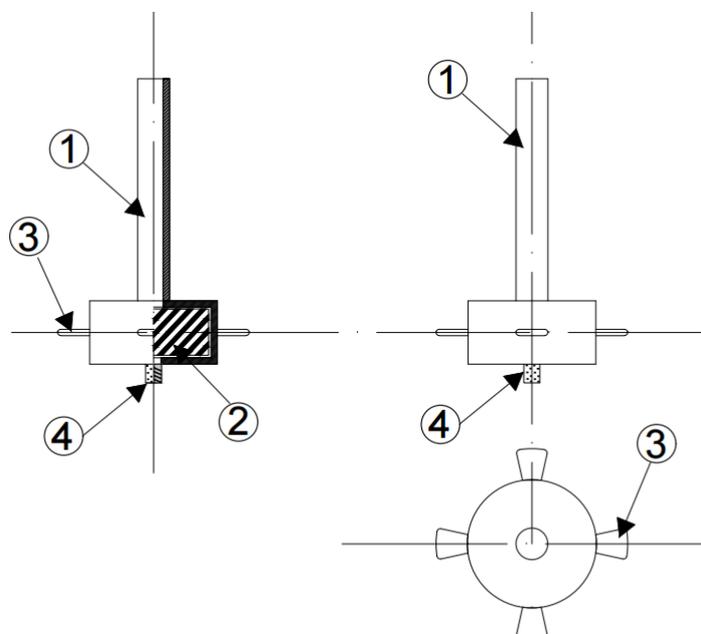


FIGURA 4.1 ESQUEMA DEL SISTEMA PROPUESTO

4.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO

Para la aplicación definida en el objeto de esta tesis, el nuevo procedimiento (sistema de generación de agua nebulizada) se basará en el nebulizador descrito en el apartado 4.1. Se denominará Nebulizador Autónomo de Baja Presión (NABP), y normalmente estará instalado en el techo (o cubierta), y formará parte de una instalación fija, que deberá ubicarse en los recintos de los edificios que queramos proteger. Esta instalación será similar a las existentes actuales para otros sistemas (rociadores automáticos) y requerirá de un sistema de reserva de agua, de donde la tomará el sistema de impulsión (bombeo), para hacerla llegar a través de una red de tuberías, hasta los difusores de descarga (NABP). La configuración más habitual será la de tubería mojada, y descarga por activación del elemento fusible. Todos estos detalles, quedan fuera del alcance del presente estudio, donde se persigue el objetivo concreto de validar su aplicación como sistema de extinción.

La generación de gotas de agua nebulizada es un proceso muy sencillo. Basta diseñar el difusor con unos recorridos finales de salida que consigan romper el agua en gotas suficientemente pequeñas. Esta parte del proceso es la que más desarrollada está, habiendo en el mercado cientos de soluciones diferentes: desde complejas boquillas que emplean resortes mecánicos para conseguir el efecto, hasta sencillos difusores que emplean giros en los recorridos de salida para conseguir el mismo efecto (como los empleados para el riego automático). Algunas de las boquillas nebulizadoras de Marioff (para alta presión) incluyen más de cuarenta piezas diferentes (para formar un nebulizador de unos 6 cm de tamaño). En nuestro caso, este elemento (4) será el más sencillo y los requisitos se limitarán a conseguir un tamaño de gota adecuado para la aplicación que vayamos a hacer (en este caso, la extinción de incendios).

La principal característica de nuestro sistema es que para generar la velocidad final de nuestras partículas de agua nebulizada, vamos a emplear la impulsión del aire cercano. Lo que se propone es emplear un elemento (2) rotor-turbina que traslade la energía del agua que fluye por la tubería de descarga hacia el elemento de impulsión-ventilador (3). A pesar de que estos sistemas siempre tienen un rendimiento medio-bajo, es la diferencia de densidades entre los fluidos afectados (agua-interior, aire-exterior) la que facilita que los resultados puedan ser positivos. Será por tanto, necesario comprobar que la gota realmente se ve empujada por el chorro de aire, y finalmente alcanza su objetivo.

Para todo ello, se deberá conseguir el efecto deseado, empleando presiones a la entrada que sean clasificadas como “baja presión”. Esto simplificará mucho los requisitos de la instalación (tanto en tubería, y soportación), y sobre todo los requisitos del sistema de impulsión (bombeo). Con ello, el coste final de la instalación se verá considerablemente reducido, multiplicando sus posibilidades de aplicación real.

4.1.2. NOVEDAD Y APLICABILIDAD

Por un lado, se puede comparar el nuevo procedimiento con los sistemas de agua nebulizada ya estudiados (tanto de alta, como de baja presión). Estos sistemas se basan en que toda la presión se genera en los sistemas de impulsión, con el objetivo de dar suficiente velocidad (presión) a las partículas de agua en su salida de los difusores. El nuevo sistema supone una diferencia importante, ya que las velocidades de salida de las partículas nebulizadas serán muy bajas junto al difusor. Será el propio sistema el que impulse el aire alrededor, para conseguir trasladarlas hasta donde deben cumplir su función (refrigeración del incendio).

Por otra parte, se puede comparar el nuevo procedimiento con otros sistemas de generación de agua nebulizada empleados en climatización (mediante refrigeración evaporativa). En este caso, lo habitual es encontrarnos con sistemas de ventiladores que impulsan el aire (y arrastran las gotas) Pero son ventiladores alimentados eléctricamente; mientras que nuestro sistema es autoimpulsado (aprovechará la energía del agua, para poder impulsar el aire), y conseguir un efecto similar. Por lo tanto, se trata de un procedimiento novedoso, y que puede resultar de aplicación en otros campos (además de en seguridad contra incendios).

5. METODOLOGÍA

Debido a las dificultades que presenta el estudio:

- ✓ complejidad del problema analizado: combustión, multifase, transitorio,...
- ✓ incertidumbres asociadas a la simulación computacional (por las simplificaciones asumidas en los modelos aplicados, que generan la necesidad de validación posterior)

Tras un análisis dinámico y energético previo, se propone evaluar la idoneidad del sistema propuesto mediante el análisis comparativo con los principales sistemas de extinción por agua presentes en el mercado: rociador automático y el agua nebulizada a alta presión. La principal variable de análisis será la temperatura, aunque durante las simulaciones se recogerán muchos otros parámetros.

5.1. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL MODELO PROPUESTO

Una vez realizado el análisis documental del modelo propuesto, se desarrollarán las dos etapas siguientes:

- Segunda Fase de estudio analítico de la viabilidad del modelo propuesto: en esta fase se analizará dinámicamente el comportamiento de las gotas descargadas por el nebulizador, para verificar su viabilidad.
- Tercera Fase de simulación computacional en la que se analizarán las principales variables que permitan evaluar la consecución de los objetivos para los que se diseña el sistema. La estructura de esta última fase se desarrollará en dos etapas, y se explica con más detalle en el capítulo siguiente de este documento.

5.2. ANÁLISIS DINÁMICO DEL MODELO PROPUESTO

Se analiza en este apartado el comportamiento dinámico de las partículas de agua nebulizada generadas a muy baja velocidad (junto al nebulizador), que serán arrastradas por las corrientes de aire creadas por nuestro propio ventilador. El objetivo es demostrar que al menos en la posición de descarga vertical (desde el techo) el empuje de la corriente de aire es suficiente para arrastrar las partículas de agua hacia el conato del incendio ubicado más abajo.

Se han empleado las ecuaciones que definen tanto el comportamiento de las partículas de agua pulverizadas como las que permiten determinar la influencia del chorro sobre las mismas. En el presente apartado se incluyen únicamente los aspectos más reseñables del estudio analítico realizado. El

desarrollo completo de las ecuaciones propuestas, así como el resto de información gráfica obtenida, se encuentran en el ANEXO A de este documento.

Para definir adecuadamente la dinámica de las partículas se parte de la ecuación de conservación de masa, a la que aplicamos las condiciones del movimiento del aire, y de la gota en estudio. Una vez particularizada se ha obtenido la ecuación que define la velocidad de dicha gota es:

$$U = Ua \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \quad (8)$$

Donde:

$$\tau_0 = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^2}{6 \cdot k \cdot \mu} \quad (9)$$

Que se puede reflejar en la gráfica de la figura 5.1:

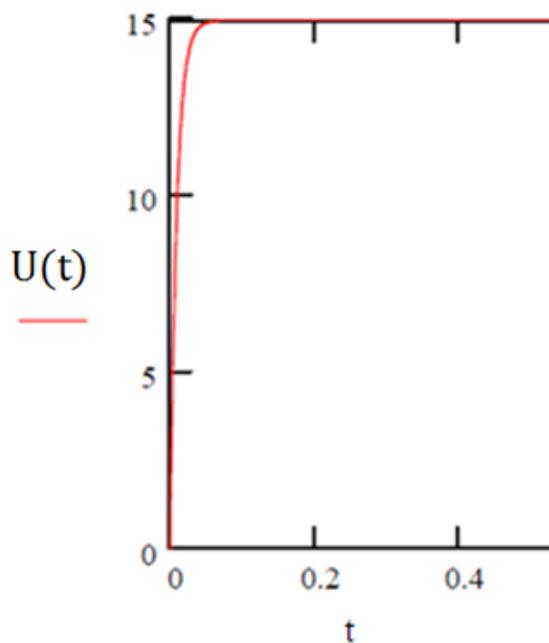


FIGURA 5.1 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR LAS PARTÍCULAS DE AIRE

En vista de los resultados obtenidos se puede comprobar en la Figura 5.1, que la velocidad de la gota adquiere de forma casi instantánea (en menos de una décima de segundo) la velocidad de la corriente a la que está sometida, que en este caso se ha considerado de 15 m/s. Además, se comprueba que una vez ha alcanzado la velocidad de flujo de aire, la velocidad de la partícula se mantiene constante e igual a la del flujo.

Una vez descrita la dinámica de las gotas en estudio se procede a estudiar la dinámica del flujo de la descarga de agua (como chorro de agua nebulizada). Se han formulado las ecuaciones que definen tanto la variación en la velocidad como la altura del chorro en función del tiempo y se han obtenido los siguientes resultados

- **Altura del chorro** en función tiempo

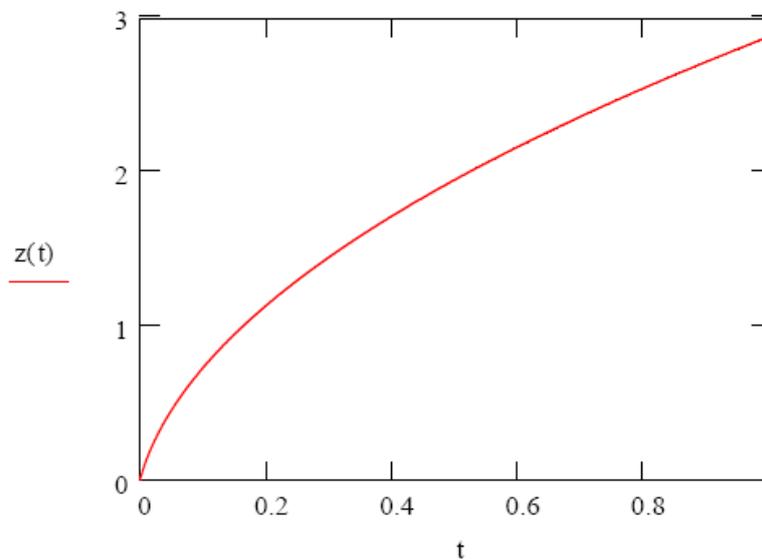


FIGURA 5.2 EVOLUCIÓN (AVANCE) DEL CHORRO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

- **Distancia recorrida** frente a la **altura** del chorro del agua donde se puede comprobar que prácticamente no hay desviaciones y la partícula recorre la misma distancia que el chorro una vez adquiere su velocidad

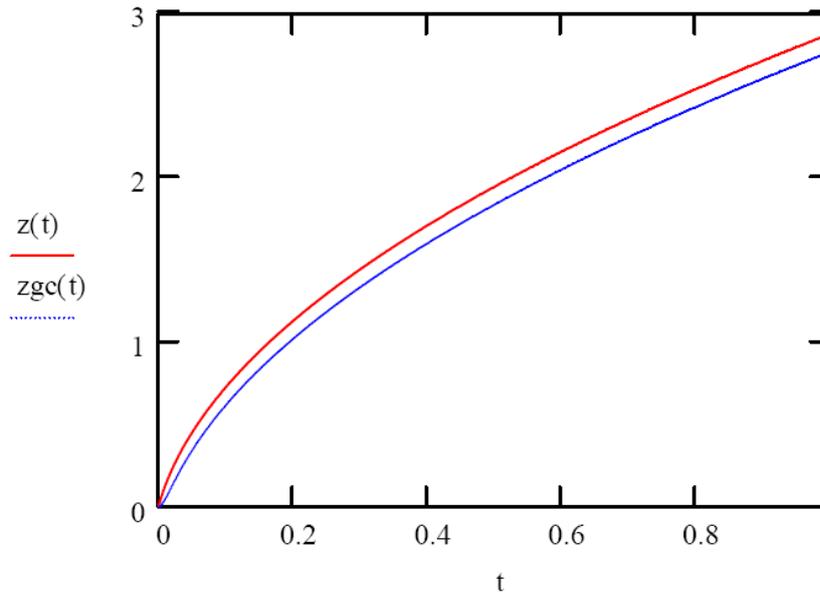


FIGURA 5.3 DISTANCIAS RECORRIDAS POR AIRE Y GOTA

Por último datos se ha comparado la evolución de la **velocidad** de las partículas arrastradas frente a la **distancia recorrida** y que se muestra en la gráfica de la figura 5.4:

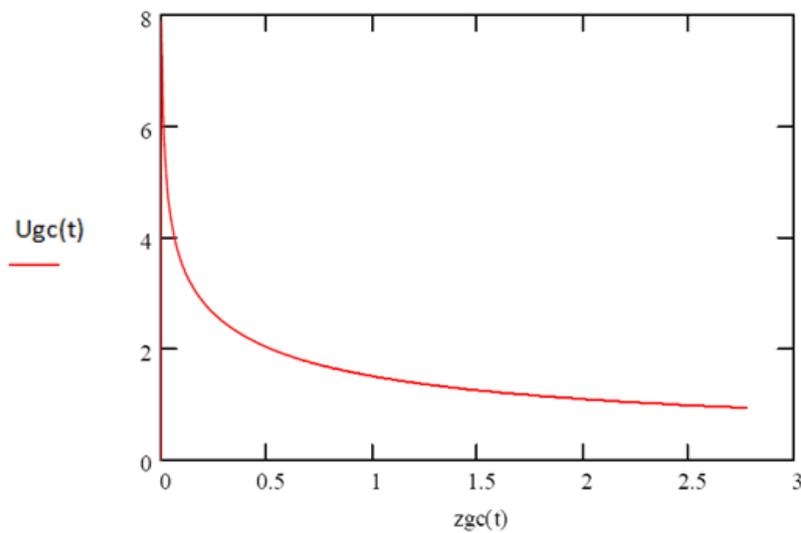


FIGURA 5.4 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR LAS PARTÍCULAS DE AIRE

Esta gráfica de la Figura 5.4 muestra como varía la velocidad de la partícula una vez que se incorpora al chorro. Se puede observar como la máxima velocidad se obtiene en los instantes iniciales de la incorporación al chorro (sube prácticamente en la misma vertical del eje Y), y que a medida que nos alejamos (según aumenta z_{gc} en cada instante), esta va disminuyendo según la gráfica mostrada. **Se concluye por tanto que las gotas serán arrastradas por las corrientes de aire, pero será necesario evaluar si este empuje puede resultar suficiente para vencer las corrientes convectivas generadas por el incendio.**

Se ha realizado también un breve estudio energético del comportamiento del modelo. Las conclusiones han sido simples, a mayor requerimientos exigidos por la aplicación (por el caudal demandado, o la velocidad necesaria para la impulsión del aire), es mayor la presión requerida a la entrada del nebulizador. Por lo tanto, energéticamente el diseño del sistema es viable, pero el rango de presiones requeridos a la entrada dependerá de la aplicación concreta que estemos analizando.

6. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

6.1. HERRAMIENTA SELECCIONADA: ANSYS CFX

Las herramientas CFD más habituales para la simulación de problemas como el analizado son OPENFOAM, ANSYS-CFX y FDS. En el proceso de selección realizado previamente a la realización de este trabajo de investigación, se descartó OPENFOAM porque es la menos empleada en simulaciones de escenarios de incendio.

Respecto a FDS (*Fire Dynamics Simulator*), es una herramienta desarrolladas por el NIST (National Institute of Standards and Technology, USA). Cuenta con su propio visualizador gráfico *Smokeview* (SMV), y es de libre distribución por lo que es muy empleado en muchas universidades y centros de investigación en todo el mundo. Eso supone una gran ventaja, ya que hay mucha bibliografía que detalla estudios e investigaciones aplicando esta herramienta [23],[24],[25],[42],[50],[97], incluso validando sus resultados con ensayos realizados a escala real. Ha crecido muchísimo su uso durante los últimos años, incluso entre los profesionales de la ingeniería de seguridad contra incendios (que la emplean en proyectos de diseño para edificación singular donde se requieren soluciones prestacionales). Lamentablemente, esta herramienta tiene dos inconvenientes principales: por un lado, no dispone de una interfaz gráfica de introducción de datos (ni de una expresión analítica de resultados) que sea útil y sencilla para el usuario, por lo que requieren de otras herramientas para su uso. Y por otro lado, en algunos problemas complejos de simular (como es nuestro caso), los modelos realizan algunas simplificaciones adicionales para facilitar la convergencia, lo que implica una menor fiabilidad de los resultados obtenidos.

Por lo tanto, y considerando que ANSYS CFX es además la única herramienta de simulación computacional que permite un análisis estacionario en un problema tan complejo como el que estamos analizando (multifásico con generación térmica por combustión), este fue el software CFD seleccionado para realizar esta investigación. El hecho de poder avanzar resultados mediante análisis estacionario, acorta muchísimo los plazos de simulación, y en proyectos con tantas baterías de escenarios a simular, es un aspecto clave para conseguir los objetivos propuestos.

6.1.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Se recogen a continuación algunas de las características principales de la herramienta CFD elegida, como son la característica de análisis transitorio, los modelos empleados en el solver, y las ecuaciones de comportamiento (y sus simplificaciones) asociadas a dichos modelos.

6.1.2. ANÁLISIS ESTACIONARIO VS. ANÁLISIS TRANSITORIO

ANSYS CFX permite el procesado y cálculo bien en estado estacionario, o bien en estado transitorio. Es importante aprovechar esta potente característica de la herramienta informática para mejorar los tiempos de cálculo, y conseguir resultados de la forma más sencilla y rápida. Las simulaciones realizadas en estado estacionario (“steady state” en inglés, -ss-) nos dan una aproximación al estado en el que el sistema se encontraría en equilibrio. En estas simulaciones se obtendrá un único resultado para cada variable calculada, la correspondiente al estado de equilibrio o estado estacionario. Por lo tanto, los resultados obtenidos se corresponden con los que el sistema interpreta como “de equilibrio”, y no corresponden necesariamente con un momento real de la evolución del problema analizado. Es por ello que las conclusiones obtenidas de las mismas serán evaluadas como resultados aproximados, y por tanto permitirán alcanzar únicamente conclusiones parciales.

Según se describe en las Guías de ANSYS [14] la simulación en estado estacionario ignora muchos términos cruzados y algunos términos de elevado orden relacionados con el tiempo. Este tipo de simulaciones supone el valor cero a todos estos términos, por lo que las simulaciones en estado estacionario convergen de manera más fácil. Esto es debido a que tiene menor número de parámetros que manejar y a que ignora algunas no-linealidades de los términos transitorios. Como criterio de convergencia general adoptado, se ha elegido que el error residual medio no supere 10^{-4} en ninguna de las ecuaciones.

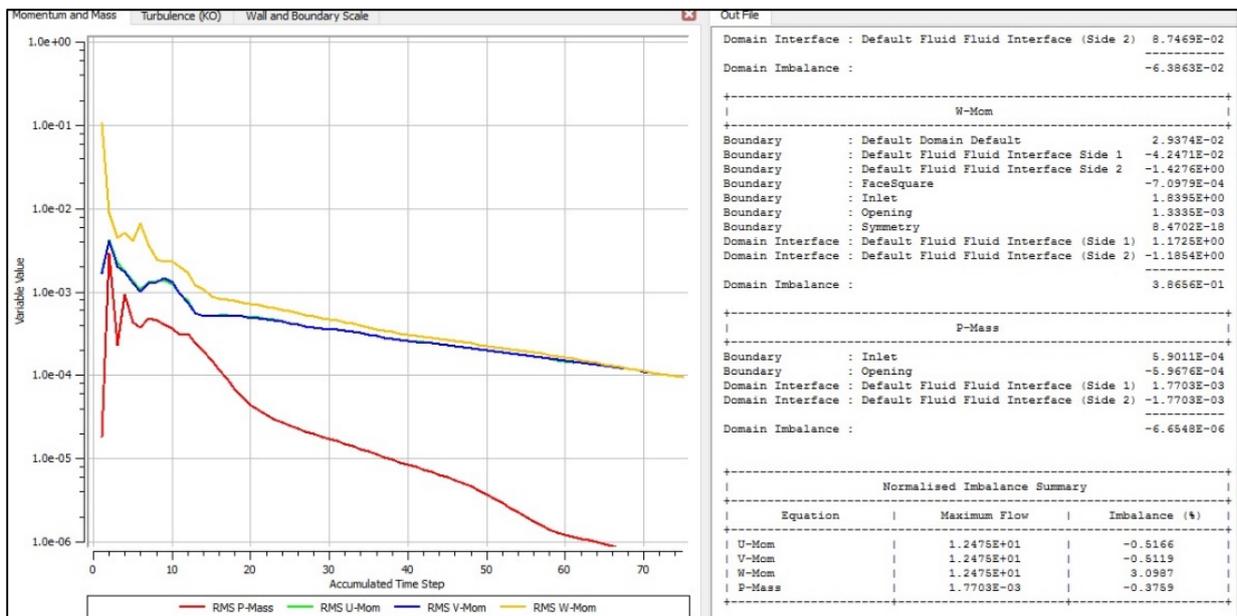


FIGURA 6.1 EJEMPLO DE CONVERGENCIA PARA UNA SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

Las simulaciones en transitorio (“transient” en inglés, -tr-) van a representar el sistema en función del tiempo, y lo van a calcular desde un instante inicial ($t = 0s$). El proceso de cálculo es mucho más lento y complejo, y por ello habrá que definirle un paso de tiempo (o time step) adecuado. El software calculará cada una de las variables requeridas, para cada paso de tiempo. El paso de tiempo debe ser lo suficientemente pequeño para que la simulación sea estable, pero lo suficientemente grande como para que los tiempos de cálculo y procesado no sean exageradamente elevados. Para ello se ha elegido un paso de tiempo adaptativo, que vaya cambiando según las condiciones del medio. El parámetro que define la estabilidad de la simulación en estos casos es el número de *Courant*, y en función de él se evaluará la conveniencia del paso de tiempo elegido.

Estas simulaciones transitorias obtendrán siempre sus resultados en función del tiempo. La herramienta de simulación registrará los resultados calculados (para cada paso de tiempo). La duración total a simular será otro parámetro a definir. Es complejo decidir cuál es el tiempo total simulado más adecuado, ya que dependerá de las condiciones de cada simulación. Por ello será fundamental interpretar adecuadamente las simulaciones previas, para poder acotarlo adecuadamente; y en cualquier caso, se desarrollarán el tiempo suficiente para poder analizar los resultados obtenidos. Las simulaciones transitorias de problemas complejos como el nuestro requieren de una gran capacidad de cálculo y tiempo de procesado, por ese motivo no se puede pretender que sean infinitas. En algunos casos, el propio programa de cálculo puede llegar a encontrar una situación conflictiva (que no puede resolver) y no podría seguir avanzando. Si eso sucede sin haber conseguido la información necesaria será imprescindible modificar las condiciones del problema (geometrías, mallados, tiempos de paso,...) para poder realizar los cálculos.

Este tipo de simulaciones presenta una peor convergencia y una menor estabilidad que las simulaciones en estado estacionario. Esto es debido a que, al tener en cuenta las variaciones temporales, se introducen en el sistema algunas no-linealidades asociadas al paso del tiempo. Además de que estas simulaciones manejan un mayor número de parámetros, por lo que el tiempo de cálculo será superior al de las simulaciones en estado estacionario. En nuestras simulaciones, como norma general se recogerán los resultados cada 0,5 segundos. El tiempo total simulado dependerá de las condiciones y la estabilidad de cada simulación.

Los criterios de convergencia adoptados han sido elegidos para que el error residual medio no supere 10^{-4} en ninguno de los parámetros; excepto para los parámetros relacionados con la turbulencia (k y ϵ) en los que se fija en 10^{-3} . Esto se debe a que los parámetros que mayores dificultades presentaron para converger fueron precisamente estos parámetros de la turbulencia (k y ϵ), por lo que se decidió disminuir las exigencias de convergencia.

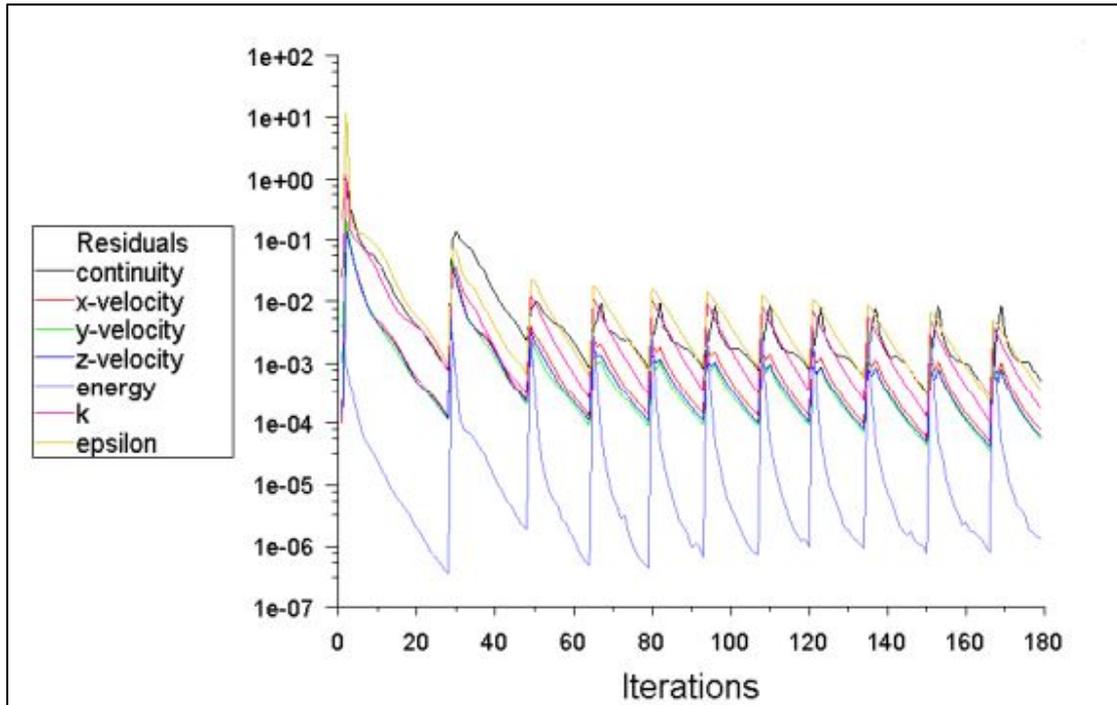


FIGURA 6.2 EJEMPLO DE CONVERGENCIA PARA UNA SIMULACIÓN EN TRANSITORIO.

6.1.3. MODELOS EMPLEADOS PARA EL SOLVER

6.1.3.1. Modelo de combustión

El modelo de incendio se plantea mediante la simulación de la combustión de una corriente de metano (CH_4). Este combustible es el muy usado para simular incendios, junto con diesel o el petróleo. La combustión se realiza mediante la inyección de un combustible (metano, CH_4) y un comburente (O_2) en proporción estequiométrica.

El modelo de combustión empleado es el modelo *Eddy Disipation Model*, ya que es el que aconseja el manual de ANSYS CFX en el caso de querer simular incendios en HVAC (*Heating, Vventilating and Air Conditioning*). Es un modelo turbulento que supone una muy rápida reacción entre los reactivos. Este modelo supone una combustión completa, por lo que sobrestima las temperaturas alcanzadas en el incendio. En situaciones reales, es muy habitual que no haya comburente suficiente para la reacción, lo que deja combustiones incompletas, y nunca se alcanzan las temperaturas máximas (de reacción teórica)

Se elige el conjunto de reacciones *Methane Air WD2* el cual se compone de dos reacciones: *WD2 Methane Oxidation* (reacción de oxidación del metano para dar CO), y la reacción *WD2 CO Oxidation* (reacción de oxidación del CO a CO₂):



6.1.3.2. Modelo de generación térmica

Otra forma de simular un incendio es mediante una generación de energía térmica, en una zona concreta del volumen de control.

Esto se realiza creando un subdominio o *subdomain*, en el cual se aplica una generación de energía térmica. Dicho subdominio debe ser un volumen, no es posible hacerlo en una superficie. Puede introducirse un valor total de energía liberada (en W/m³) o introducir una función para que la energía liberada dependa de factores como tiempo, temperatura, etc.

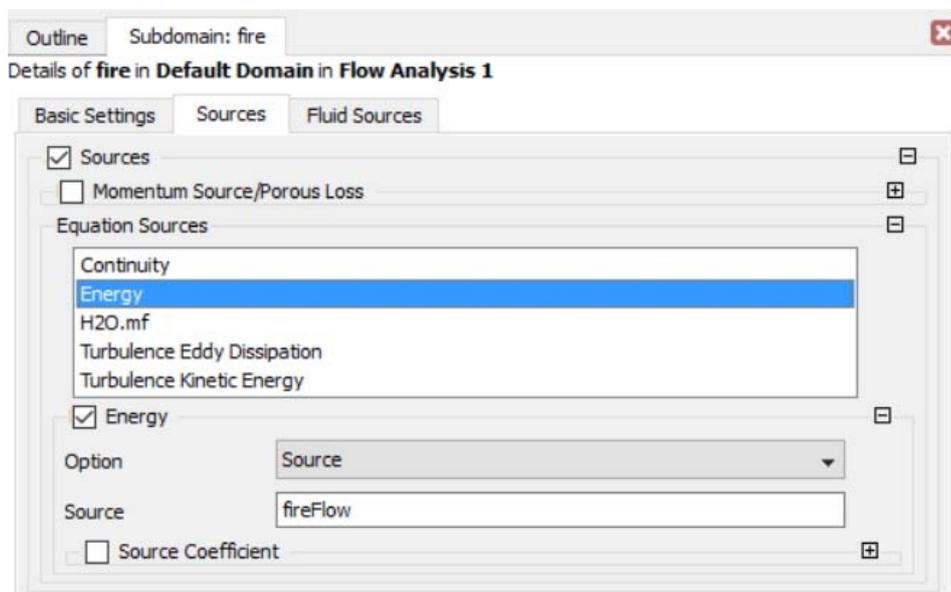


FIGURA 6.3 PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA

En el caso de introducir una cantidad total de energía liberada, el incendio simulado no podría apagarse nunca. Por lo tanto la eficiencia del dispositivo dependerá de la capacidad que este tenga para contener la temperatura y hacer que esta no se mueva del lugar donde se genera. En el caso de que el dispositivo logre contener el incendio lo que ocurre es que la energía no puede propagarse por lo que se concentra en un punto elevando su temperatura, lo que provocaría una mayor evaporación de agua.

Una alternativa puede ser introducir una función de celda (o *cell function*) en función de la temperatura en el volumen que ocupa el incendio. En este estudio, y cuando se aplique este modelo de combustión, se empleará la siguiente *cell function*:

$$fireFlow = 6000 \left[\frac{W}{m^3} \right] + 650 \left[\frac{W}{K \cdot m^3} \right] \cdot T \quad (12)$$

De esta manera la intensidad del incendio dependerá de la temperatura en el interior de la celda.

6.1.3.3. Modelo multifásico:

El **modelo multifásico** empleado será el modelo *PTM (Particle Tracking Model)* ya que ha sido usado en otros estudios similares para realizar simulaciones de extinción de incendios.

Este modelo entiende al fluido líquido como una agrupación de partículas. Es posible introducir un diámetro de partícula o bien introducir una distribución de tamaño de partícula (con valor máximo, mínimo y principal de tamaño de partícula, así como la desviación estándar). Además este modelo permite realizar inyecciones de partículas en un solo punto con forma de cono o esfera. Esto nos permitirá definir geoméricamente los difusores – tanto de agua nebulizada, como los rociadores- de una forma relativamente sencilla.

6.1.3.4. Modelo de transferencia de calor

Principalmente, las guías de uso de ANSYS CFX [14] recomiendan dos modelos de transferencia de calor:

- *Particle temperature*: Es el modelo que usa ANSYS CFX para reproducir la transferencia de calor en partículas. Este modelo tiene en cuenta la transferencia de calor en la interfase. El modelo *Total Energy* no es válido para simulaciones multifásicas.

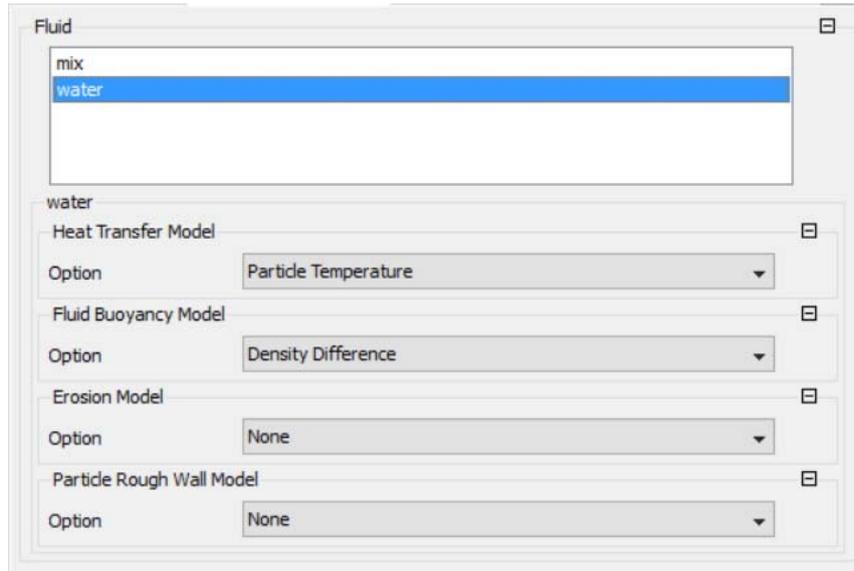


FIGURA 6.4 SELECCIÓN DE MODELOS EMPLEADOS EN LA FASE WATER (GOTAS DE AGUA LÍQUIDA)

- *Thermal energy*: Es el modelo de transferencia de calor que se recomienda emplear en ANSYS CFX en problemas multifásicos.

6.1.3.5. Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia empleado es el *modelo k-ε* ya que es el que se recomienda en [14] para las aplicaciones en estos escenarios de simulación. La bibliografía desarrolla este modelo ampliamente, siendo un modelo de dos ecuaciones dentro de los modelos de turbulencia de viscosidad turbulenta. Este modelo cuenta con dos parámetros: la *k* o energía cinética turbulenta y la *ε* o la disipación de energía turbulenta.

6.1.3.6. Fluid Buoyancy Model: density difference

Se elige el modelo *Density difference* para que se calculen las corrientes de convección en función de la densidad del fluido. Se activa la opción *Buoyant Model* para tener en cuenta el efecto de la gravedad y las corrientes de convección. La gravedad introducida tiene un valor de $9,8\text{m/s}^2$ y la densidad de referencia se toma la del aire ($1,29\text{Kg/m}^3$).

6.1.3.7. Modelo de radiación

El modelo de radiación empleado es el *P1*, ya que es el que se recomienda en [14] en el caso de simulaciones de combustión. En el caso de utilizar el modelo de generación de calor no se emplea modelo de radiación, ya que ANSYS CFX no lo permite.

6.1.3.8. Modelo de cambio de fase

Hay que emplear un modelo de cambio de fase entre el agua líquida y el vapor de agua. Se realiza con el modelo *Liquid Evaporation Model* tomándose un calor latente de vaporización de 2.250.000 J/Kg.

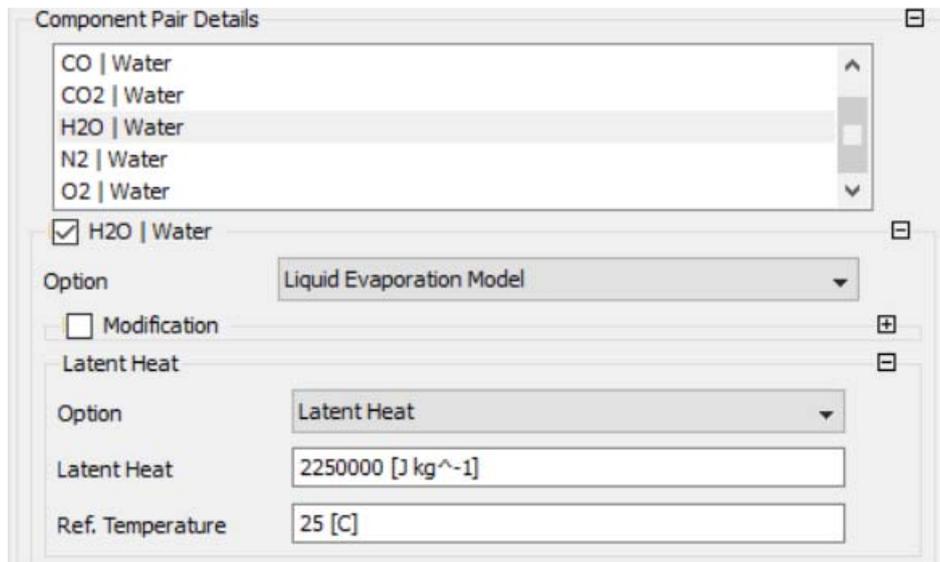


FIGURA 6.5 – PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DEL MODELO DE EVAPORACIÓN

6.1.4. ECUACIONES DEL SISTEMA

Se describen brevemente las ecuaciones empleadas por el sistema ANSYS CFX para los modelos ya comentados, así como algunas de las simplificaciones que pueden ser consideradas.

6.1.4.1. Ecuación de continuidad (conservación de la masa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

6.1.4.2. Ecuación del momento (cantidad de movimiento)

$$\frac{\delta(\rho U)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

Donde p es la presión estática, τ es el tensor de tensiones, que vienen dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = \mu \left[(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U \right] \quad (3)$$

6.1.4.3. Ecuación de la energía total (Total Energy)

$$\frac{\delta(\rho h_{TOT})}{\delta t} - \frac{\delta(p)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U h_{TOT}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (4)$$

Donde h_{TOT} es la entalpía total, relacionada con la entalpía estática $h(T, p)$ según la ecuación:

$$h_{TOT} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (5)$$

El término $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ representa el trabajo realizado por las tensiones viscosas y se denomina el término de trabajo viscoso. El término $U \cdot S_M$ representa el trabajo debido a fuentes externas y normalmente no se tiene en cuenta.

6.1.4.4. Ecuación de la energía térmica (Thermal Energy)

Esta es una forma alternativa de la ecuación de la energía, la cual es válida para flujos lentos. Para aplicar esta ecuación es necesaria una ecuación para definir la energía mecánica, K :

$$K = \frac{1}{2} U^2 \quad (13)$$

La ecuación de la energía mecánica se deriva tomando el producto de U con la ecuación del momento:

$$\frac{\delta(\rho K)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U K) = -U \cdot \nabla p + U \cdot (\nabla \cdot \tau) + U \cdot S_M \quad (14)$$

Si se sustrae esta ecuación 14 de la ecuación 4 de la energía total , se obtiene la ecuación de la energía térmica:

$$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t} - \frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + U \cdot \nabla p + \tau : \nabla U + S_E \quad (15)$$

Donde el término $\tau : \nabla U$ es siempre positivo y se denomina la disipación viscosa. Esto modela la calefacción interna por viscosidad en la masa de fluido. Es despreciable en la mayoría de los casos.

Con diferentes suposiciones se obtiene finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E \quad (16)$$

Esta ecuación] se deriva de la anterior mediante los dos siguientes conjuntos de suposiciones:

- Si h se interpreta como energía interna

$$e = h - \frac{p}{\rho} \quad (17)$$

Entonces, quedaría

$$\frac{\delta(\rho e)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U e) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - p \cdot \nabla U + \tau : \nabla U + S_E \quad (18)$$

La cual es equivalente a la ecuación anterior si se desprecia el término $- p \cdot \nabla U$ y se interpreta h como e . Esta interpretación es válida para líquidos, donde los efectos de la densidad son despreciables.

- Pero $\frac{\delta p}{\delta t}$ y $U \cdot \nabla p$ se pueden despreciar sólo para flujos con bajo número de Mach en gases compresibles.

La ecuación de energía térmica, a pesar de ser una simplificación, puede ser muy útil tanto para gases como para líquidos. Empleando esta ecuación es posible evitar problemas de estabilidad con la ecuación de la energía total. Esta ecuación es muy útil para simulaciones de líquidos transitorios. Por otro lado, si se necesita reproducir fielmente el efecto de las propiedades acústicas, o para flujos a elevada velocidad, entonces sería necesaria la resolución de la ecuación de energía total.

6.1.4.5. Ecuaciones de estado

Las ecuaciones de transporte descritas anteriormente necesitan ser ampliadas mediante el uso de ecuaciones de estado para la densidad y la entalpía con el fin de configurar un sistema cerrado. Las ecuaciones para los casos generales son:

$$\rho = \rho (T, p) \quad (6)$$

$$dh = \left. \frac{\delta h}{\delta p} \right|_p dT + \left. \frac{\delta h}{\delta p} \right|_T dp = C_p dT + \left. \frac{\delta h}{\delta p} \right|_T dp \quad (19)$$

$$C_p = C_p (T, p) \quad (7)$$

6.1.4.6. Ecuación de las propiedades de un gas real saturado de vapor

Esta ecuación hay que resolverla cuando se tiene condensación o evaporación de líquidos. Para ello el software necesita conocer la curva de presión de vapor. Para ello ANSYS-CFX utiliza la formulación de la curva de presiones de vapor proporcionada por Poling et al

$$\log_{10} \left(\frac{P_v}{P_c} \right) = \frac{7}{3} (1 + \omega) \left(1 - \frac{T_c}{T} \right) \quad (20)$$

Las propiedades del vapor saturado se calculan evaluando la ecuación de estado y su relación con la curva de saturación.

6.1.4.7. Ecuación de flotabilidad (buoyancy)

Para los cálculos de flotabilidad, se añade el término de generación a la ecuación de conservación del momento:

$$S_{M,bouy} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (21)$$

La diferencia de densidades, $\rho - \rho_{ref}$, se evalúa usando el modelo "Full Buoyancy" o bien con el modelo Boussinesq. En este caso se emplea el modelo "Full Buoyancy" ya que es el que utiliza ANSYS CFX para flujos multi-componentes, multifásicos o cuando la densidad del fluido depende de la presión. En este modelo la diferencia de densidades, $\rho - \rho_{ref}$, se evalúa directamente.

6.1.4.8. Ecuación de evaporación

Los modelos de evaporación de líquidos son modelos de partículas con transporte de materia y de energía. El modelo utiliza dos correlaciones de transferencia de materia dependiendo si la partícula está por encima o por debajo de la temperatura de ebullición.

La temperatura de ebullición se calcula mediante la ecuación de Antoine:

$$P_{\text{vap}} = P_{\text{scale}} \exp\left(A - \frac{B}{T_p + C}\right) \quad (22)$$

Donde A, B y C son coeficientes introducidos por el usuario, que dependerán del tipo de fluido. La partícula entra en ebullición si su presión de vapor, P_{vap} , es superior a la presión ambiental del gas, P_{ambient} .

Cuando la partícula está por encima del punto de ebullición, la transferencia de masa se evalúa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dm_p}{dt} = \frac{Q_C + Q_R}{V} \quad (23)$$

Donde V es el calor latente de evaporación de la partícula, y Q_C y Q_R son la transferencia de calor convectiva y por radiación respectivamente.

Cuando las partículas están por debajo del punto de ebullición, el transporte de materia viene dado por la siguiente expresión:

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho D Sh \frac{W_C}{W_G} \ln\left(\frac{1 - X_S^V}{1 - X_{\text{vap}}^V}\right) \quad (24)$$

Donde d_p es el diámetro de partículas, ρD es la difusividad dinámica de los componentes en la fase continua y Sh es el número de Sherwood. W_C y W_G son los pesos moleculares del vapor y de la mezcla en la fase continua. X_S^V es la fracción molar en el equilibrio del componente evaporado en la superficie de la partícula y X_{vap}^V es la fracción molar del componente evaporado en la fase gaseosa.

La generación másica en la fase continua se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{dm_p}{dt} \quad (25)$$

6.1.4.9. Ecuación de turbulencia

Para representar las turbulencias del sistema se ha decidido emplear el modelo k- ϵ . Este es un modelo de dos ecuaciones dentro de los modelos de turbulencia de viscosidad turbulenta. Este modelo cuenta con dos parámetros: la k o energía cinética turbulenta, y la ϵ o la disipación de energía turbulenta.

Este modelo introduce dos nuevas variables al sistema de ecuaciones. Entonces la ecuación de continuidad queda así:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} (\rho U_i U_j) = 0 \quad (26)$$

Y la ecuación del momento quedaría:

$$\frac{\delta(\rho U_i)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\delta p'}{\delta x_i} + \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\delta U_i}{\delta x_j} + \frac{\delta U_j}{\delta x_i} \right) \right] + S_M \quad (27)$$

Donde S_M es la suma de las fuerzas, μ_{eff} es la viscosidad efectiva de la turbulencia y p' es la presión modificada.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (28)$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\delta U_k}{\delta x_k} \quad (29)$$

El último término $\frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\delta U_k}{\delta x_k}$, hace referencia a la divergencia de la velocidad. Este término es despreciado por ANSYS CFX, por lo que solo es válida para fluidos incompresibles.

6.2. SIMULACIONES REALIZADAS

Como se ha explicado en el capítulo de metodología, las simulaciones se organizarán en dos etapas, caracterizadas por escenarios diferentes:

- Etapa I: en la que se estudiarán las simulaciones en un escenario con **un único punto de descarga** de agua (rociador/nebulizador) en el recinto. Para agilizar los tiempos de cálculo y procesado, esta primera etapa se analizará únicamente en estado **estacionario**.
- Etapa II: en la que se estudiarán simulaciones en un escenario con **4 puntos de descarga** de agua en el recinto. Esta segunda etapa se desarrollará en simulación **estacionaria y transitoria**.

Como ya se ha explicado con anterioridad, se analizarán distintas variables, aunque la principal característica a estudiar sea la temperatura (efecto de refrigeración y control del incendio). Por otro lado, el análisis será comparativo, entre el nuevo modelo de generación de agua nebulizada propuesto (NABP) y los principales existentes en el mercado (rociador automático –RA–, y nebulizador de alta presión –NAP–).

Es importante recordar que esta estructura de ensayos (primero con un único punto de descarga, y luego con 4 en una aplicación similar a las situaciones reales) es una metodología similar a las empleadas para ensayos a escala real que se realizan para conseguir las aprobaciones internacionales de sistemas de extinción basados en prestaciones [12], [16],[17], [18].

6.2.1. MODELO DIFUSOR ÚNICO (COMBUSTIÓN TIPO 1 - ESTACIONARIO)

6.2.1.1. Objetivo

El objetivo de este grupo de simulaciones es caracterizar el efecto extintor del NABP (Nebulizador Autónomo de Baja Presión) evaluando los efectos térmicos causados sobre el incendio característico empleado.

Se ha desarrollado una batería de simulaciones en estado estacionario para una evaluación comparativa de los resultados. Se han realizado las siguientes simulaciones:

- ✓ recinto con el incendio,
- ✓ recinto con el incendio y el rociador automático (ROC),
- ✓ recinto con el incendio y el nebulizador de alta presión (NAP) descargando a 10m/s y 20 m/s,
- ✓ recinto con el NABP (sin ventilador) y,
- ✓ recinto con NABP con ventilador.

6.2.1.2. Descripción del escenario

Se ha empleado un recinto (volumen de control) con un único difusor centrado en la parte superior, y con el incendio también en el centro, en la parte inferior. EL volumen de control es un cilindro de 4m de altura y 3m de radio con el difusor (spray) en el centro del volumen, en la parte superior del mismo. El incendio se coloca igualmente en el centro del volumen de control, en la parte inferior. Es importante recordar que el objetivo es analizar un sistema de extinción, por lo que se han empleado dimensiones geométricas muy habituales en edificación. La geometría axial del recinto permite una simplificación del proceso de cálculo (lo que inicialmente supone una ventaja).

A continuación, se realiza una descripción de las características de cada uno de los sistemas de extinción simulados (y sus condiciones hidráulicas), para su determinación se han empleado datos seleccionados de [25], [42], [79]:

- Rociador automático: se emplean características ya comentadas en el análisis de normativa aplicable y la bibliografía analizada. El caudal de descarga será de 10 l/s, el ángulo de salida será de 60º, la velocidad de salida de 8 m/s, y para caracterizar el diámetro de gota se emplea una distribución normal cuyo diámetro principal serán 1000 micras, el diámetro máximo serán 1500 micras, y el diámetro mínimo 500 micras.

- Nebulizador Alta Presión: se emplean características ya comentadas en el análisis de normativa aplicable y la bibliografía analizada. El caudal de descarga será de 5 l/s, el ángulo de salida será de 60°, la velocidad de salida de 20 m/s, y para caracterizar el diámetro de gota se emplea una distribución normal cuyo diámetro principal serán 80 micras, el diámetro máximo serán 100 micras, y el diámetro mínimo 50 micras.
- Nebulizador Autónomo de Baja Presión: El caudal de descarga será de 5 l/s, el ángulo de salida será de 120°, la velocidad de salida de 0,01 m/s, y para caracterizar el diámetro de gota se emplea una distribución normal cuyo diámetro principal serán 100 micras, el diámetro máximo serán 150 micras, y el diámetro mínimo 80 micras. No olvidemos que las partículas serán arrastradas por el aire generado, que caracterizaremos más adelante.

Modelo de combustión

El modelo de incendio se realiza mediante la simulación de la combustión de una corriente de metano (CH_4). Este combustible es el muy usado para simular incendios, junto con diesel o el petróleo. La combustión se realiza mediante la inyección de un combustible (metano, CH_4) y un comburente (O_2) en proporción estequiométrica. Se inyecta un caudal de mezcla de 0,05 Kg/s, suficiente para conseguir las temperaturas requeridas (equivalentes a un incendio doméstico). El dominio geométrico donde se coloca el incendio estará ubicado en el suelo, y tiene un diámetro de 0,8m.

El modelo de turbulencia empleado es el modelo *Eddy Disipation Model*, ya que es el que aconseja el manual de ANSYS CFX [14] en el caso de querer simular incendios en HVAC (heating, ventilating and air conditioning). Es un modelo de combustión turbulento que supone una muy rápida reacción entre los reactivos. Este modelo supone una combustión completa, por lo que sobrestima las temperaturas alcanzadas en el incendio. En situaciones reales, es muy habitual que no haya comburente suficiente para la reacción, lo que deja combustiones incompletas, y nunca se alcanzan las temperaturas máximas (de reacción teórica)

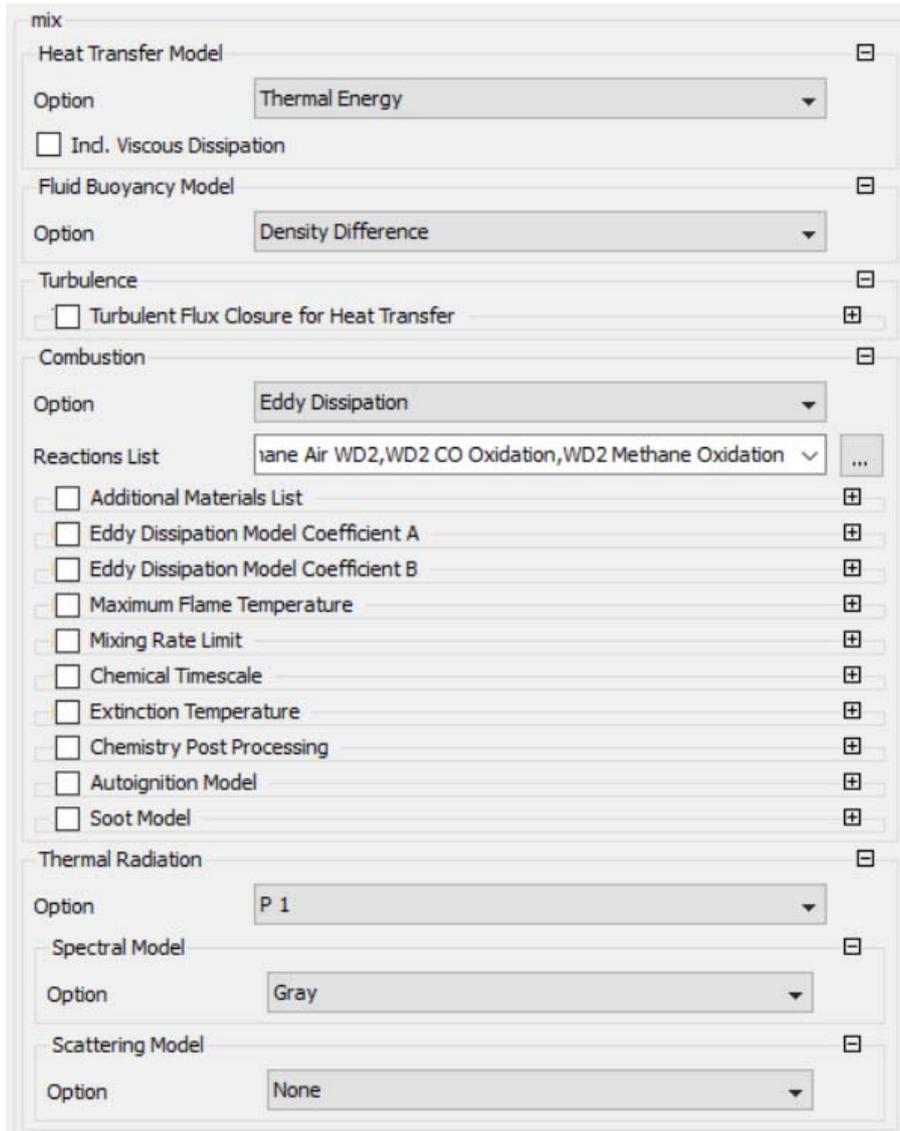


FIGURA 6.6 PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIÓN

Se elige el conjunto de reacciones *Methane Air WD2* el cual se compone de dos reacciones: *WD2 Methane Oxidation* (reacción de oxidación del metano para dar CO), y la reacción *WD2 CO Oxidation* (reacción de oxidación del CO a CO₂):



En todas las simulaciones, las condiciones iniciales son 1 atm y 300K.

Las características del mallado son las siguientes:

TABLA 6.1 CARACTERISTICAS DEL MALLADO

Nº de celdas	Sk _{MAX}	Sk _{min}	Sk _{medio}
1.179.689	0,793	$1,18 \cdot 10^{-5}$	0,215

Siendo Sk el "skewness" o el grado de achatamiento de las celdas. Cuanto menor sea este valor, mejor será la calidad de la malla.

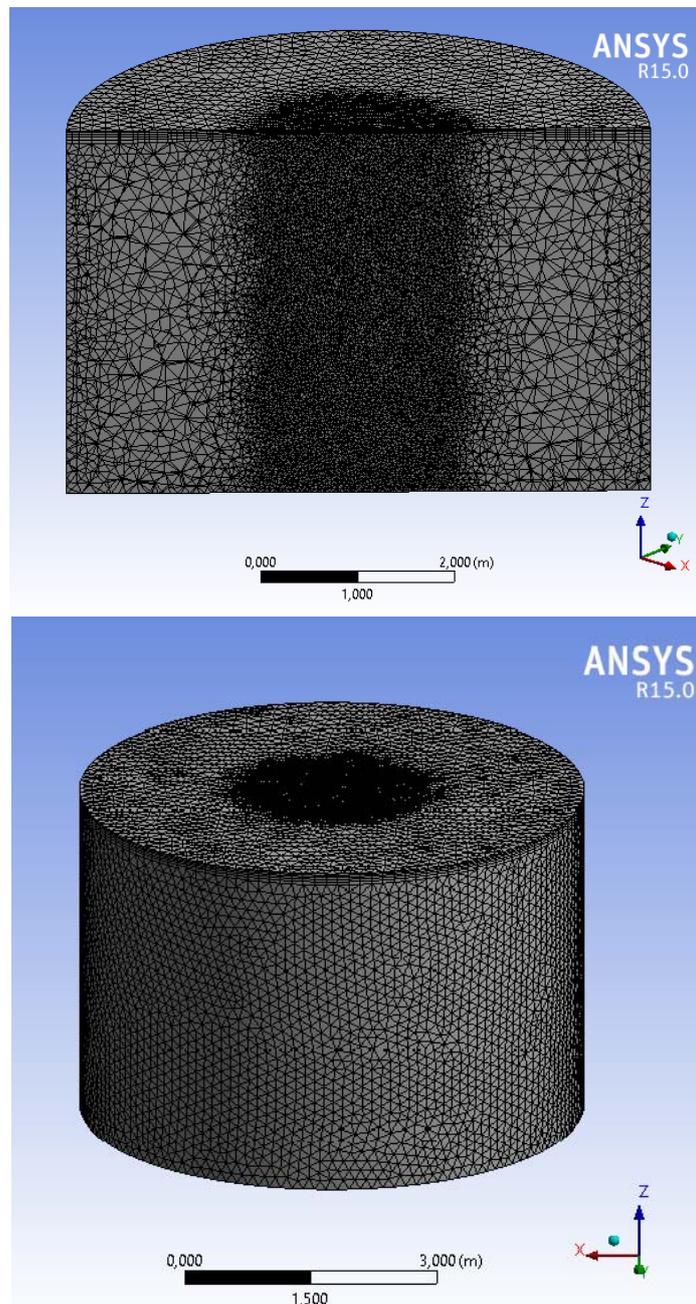


FIGURA 6.7 MALLADO DEL RECINTO

Todas las simulaciones realizadas se hacen en estado estacionario para realizar así un análisis preliminar y reducir así los tiempos de cálculo.

Se crean diferentes superficies para introducir las diferentes condiciones de contorno (boundary conditions). Estas superficies son:

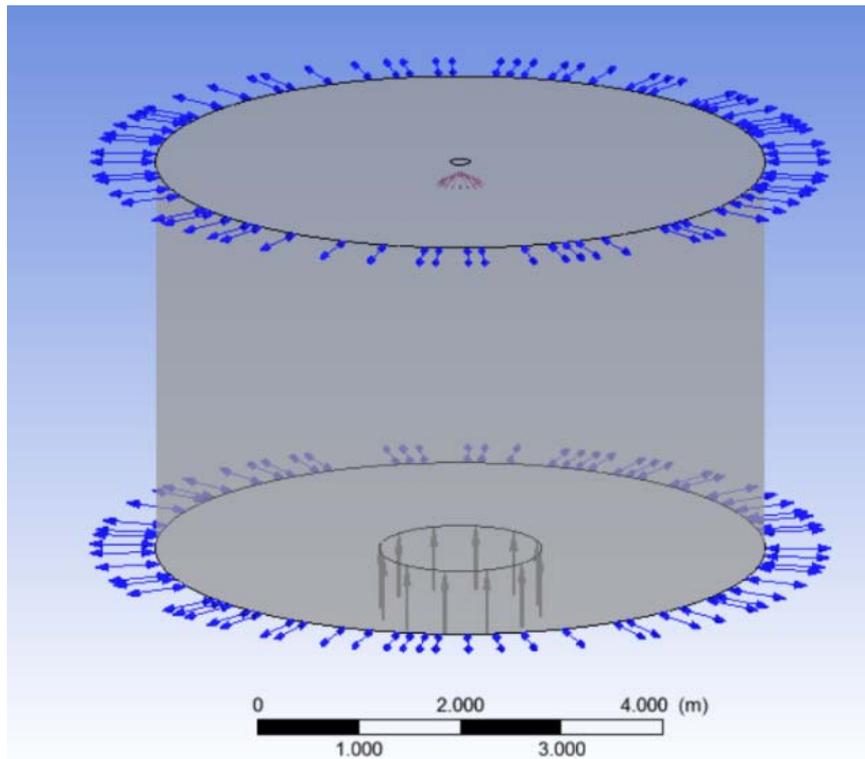


FIGURA 6.8 CONDICIONES DE CONTORNO

- **Fire:** Zona del incendio, en el centro del volumen de control. En el caso de emplear modelos de combustión se trata de una superficie por la cual se inyecta la mezcla de combustible y comburente.
- **Open:** es el perímetro de la sala, se modela como opening para representar una zona abierta con una presión exterior de 1atm y 25°C de temperatura.
- **Fan:** está colocado justo encima del difusor. Tiene un radio de 5cm y para que el aire salga en forma de cono (según nuestro diseño) se propone simularlo como una superficie esférica. La velocidad del aire es de 5 m/s. Se modela como una entrada (inlet) de aire y solo se emplea en las simulaciones del NABP.

- **Default faces:** se trata de las superficies que cierran el recinto (techo y suelo). En este caso se modelan como paredes (Wall) en las que no hay deslizamiento (no Split), no permiten ni intercambio de materia, ni de energía (esta suposición no supone limitación en los resultados de nuestras simulaciones y simplifica el proceso de cálculo).

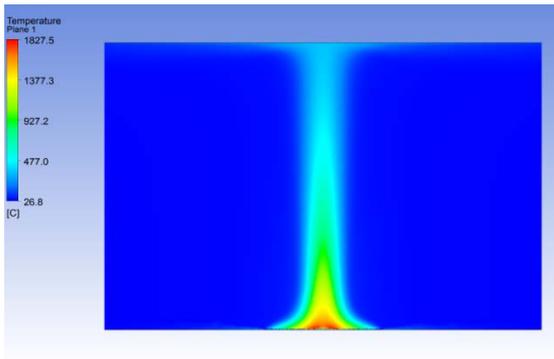
TABLA 6.2 CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO DE COMBUSTIÓN

	NABP	ROC	NAP
fire	Inlet	Inlet	Inlet
open	Opening	Opening	Opening
fan	Inlet	-	-
Default Domain	Wall	Wall	Wall
spray	Particle injection	Particle injection	Particle injection

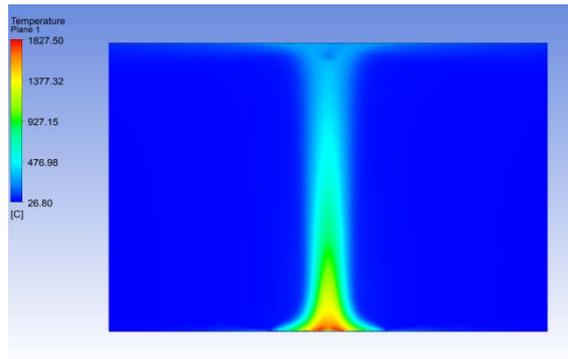
Para modelar el efecto del techo se realiza una capa límite (inflation) para recoger bien los fenómenos cercanos a la pared. El modelo de turbulencia empleado en todas las simulaciones es el modelo k-ε.

6.2.1.3. Resultados

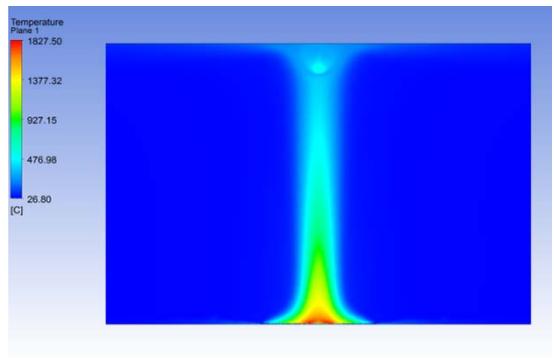
Los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas se presentan a continuación de forma reducida (se pueden ver con mayor detalle en los anexos del presente documento):



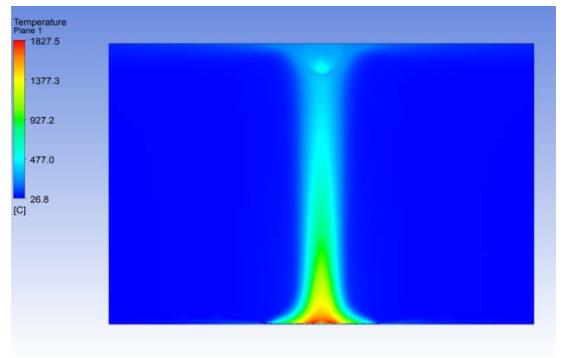
Perfil de Temperaturas del Incendio



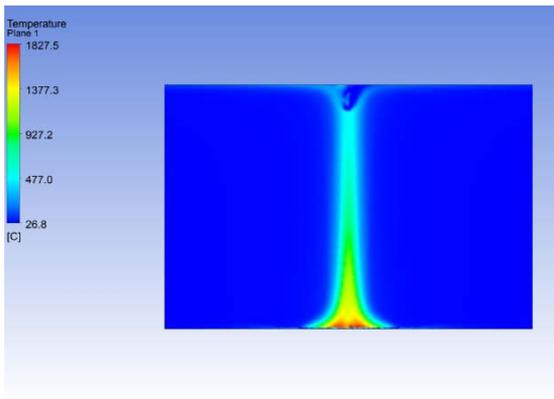
Perfil de Temperaturas del Incendio + ROC



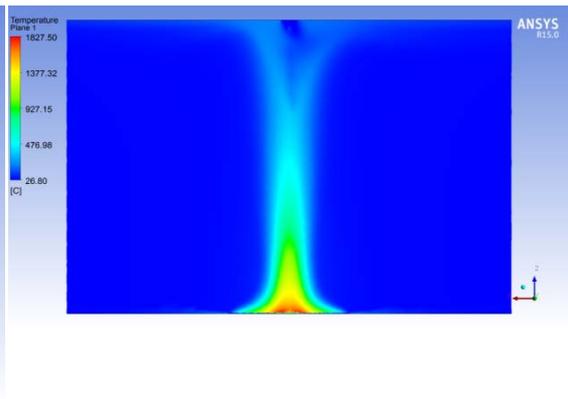
Perfil de Temperaturas del incendio + NAP a 10m/s



Perfil de Temperaturas del incendio + NAP a 20m/s



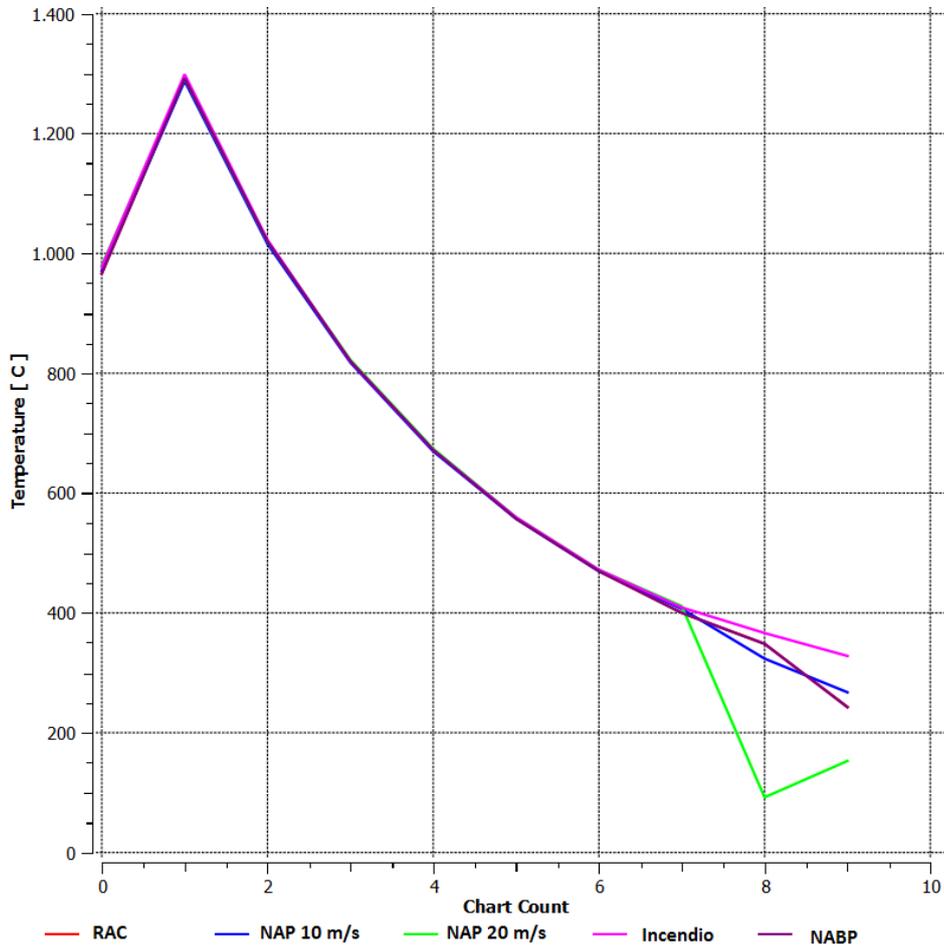
Perfil de Temperaturas del incendio + NABP sin ventilador



Perfil de Temperaturas del incendio + NABP con ventilador

FIGURA 6.9 COMPARACION DE PERFILES DE TEMPERATURA PARA ROC-NABP-NAP

Como puede apreciarse en los perfiles de temperatura, ninguno de los sistemas propuestos es capaz de sofocar o controlar el incendio.

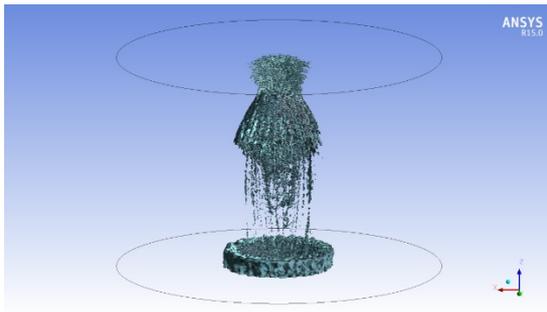


Evolución de la temperatura con la altura para los diferentes sistemas contra incendios para el modelo de combustión

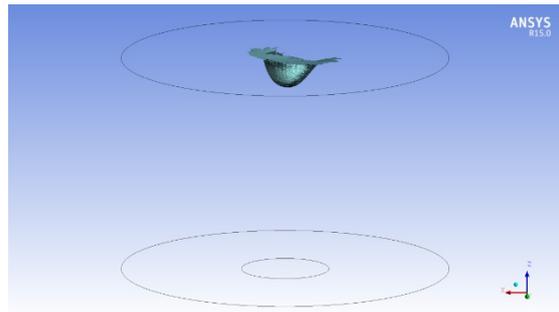
FIGURA 6.10 GRÁFICA COMPARTIVA DE PERFILES DE TEMPERATURA PARA ROC-NABP-NAP

Como puede verse en la gráfica de la figura 6.10, **la actuación de los sistemas de extinción apenas afecta al perfil de temperaturas**. Todas las curvas calculadas se solapan. Únicamente aparece una ligera refrigeración final en el caso del NAP a 20m/s.

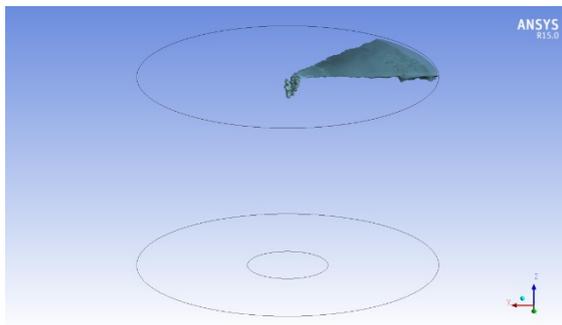
A continuación se recogen en la Figura 6.11 las imágenes de la fracción másica de agua líquida, que nos permiten ver donde llega el agua en estado líquido (para que pueda cumplir su objetivo de extinción).



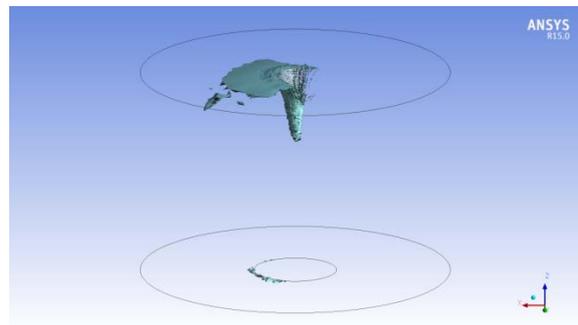
Fracción másica agua líquida del ROC



Fracción másica agua líquida del NAP a 20m/s



Fracción másica agua líquida del NABP sin ventilador

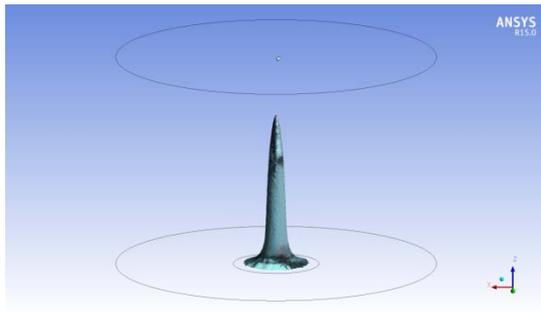


Fracción másica agua líquida del NABP con ventilador

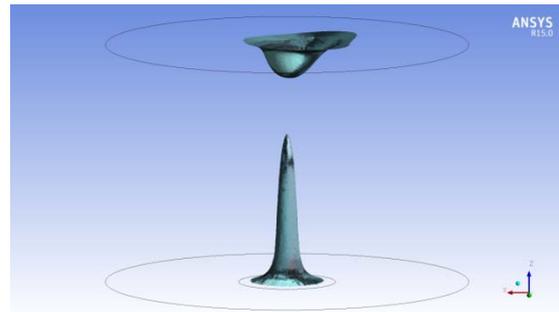
FIGURA 6.11 FRACCION MÁSCICA DE AGUA LIQUIDA PARA DISTINTOS SISTEMAS DE EXTINCION

Las imágenes de la Figura 6.11 muestran como el ROC es el que más cerca llega del incendio, por lo que es el que mejores efectos debería conseguir. El NABP con ventilador es el siguiente que mayor empuje consigue. Finalmente, el NAP y el NABP sin ventilador no consiguen vencer en ningún momento a las corrientes ascendentes de aire caliente. Sus partículas son arrastradas por las corrientes convectivas del incendio desde el primer momento.

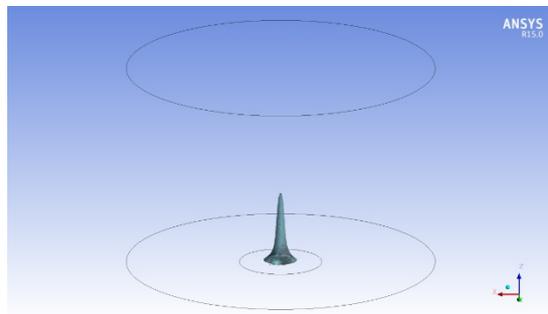
A continuación en la Figura 6.12 se recogen las imágenes de la fracción másica de vapor de agua, que nos permiten ver donde se ha producido el cambio de fase (y el agua está consiguiendo cumplir su objetivo de refrigeración por cambio de fase).



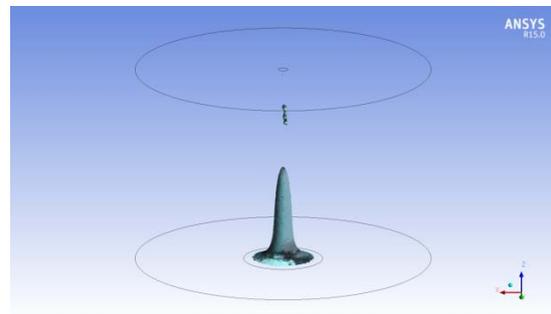
Fracción másica de Vapor de agua del ROC



Fracción másica de Vapor de agua del NAP a 20m/s



Fracción másica de Vapor de agua del NABP sin ventilador



Fracción másica de Vapor de agua del NABP con ventilador

FIGURA 6.12 FRACCION MÁSCICA DE AGUA VAPOR PARA DISTINTOS SISTEMAS DE EXTINCION

En todos los casos parece evidente que se forma vapor de agua junto a la base del incendio. Aunque su presencia no es tan abundante como se esperaría, si los sistemas estuviesen consiguiendo un adecuado control térmico del incendio.

6.2.1.4. Conclusiones

En primer lugar, y según lo ya comentado, las simulaciones realizadas son en estado estacionario, por lo tanto, los resultados deben considerarse parciales (o aproximados).

Es evidente que ninguno de los sistemas de extinción consigue el efecto de refrigeración esperado. Las corrientes convectivas son demasiado fuertes y arrastran hacia afuera a las partículas de líquido en la mayoría de los casos. Y aún en el caso del rociador automático (que sí llega a la base del incendio), no consigue hacer descender la temperatura.

Si consideramos que estos sistemas (NAP y ROC) son empleados en la actualidad con el objetivo de lograr la extinción (o el control del incendio), parece razonable pensar que hay algún error en el modelo que hemos simulado.

Por un lado, parece que la reacción química propuesta como modelo de combustión no se ve afectada por la refrigeración del agua (generando además temperaturas muy altas, por tratarse de reacción teórica perfecta). Además, nos encontramos con un posible empuje debido a la energía cinética de la propia inyección de combustible. Es decir, que el metano y el oxígeno que se inyectan ya llevan asociada una velocidad que empuja hacia arriba a las partículas de aire. Este empuje, sumado a las corrientes de convección generan una velocidad ascendente suficiente como para arrastrar las partículas de agua.

Por lo tanto, el modelo de combustión empleado no permite analizar los efectos de refrigeración, por lo que se propone sustituirlo por un modelo de generación térmica.

Por último, y aunque parezca evidente, el efecto del ventilador en el sistema propuesto (NABP) es imprescindible para que el aire no arrastre las partículas. Sin ese empuje adicional del aire desde arriba, es imposible conseguir que el agua llegue a la base del incendio. Por lo que, se descarta cualquier opción de diseño en baja presión sin ventilación adicional.

6.2.2. MODELO DIFUSOR ÚNICO (COMBUSTIÓN TIPO 2 - ESTACIONARIO)

Como se vio en la primera batería de simulaciones, resultó necesaria la elección de un nuevo modelo de combustión. De entre las opciones posibles, se eligió la de aplicar una generación térmica a un volumen dentro del recinto de control. Esta caracterización es muy habitual en seguridad contra incendios, ya que el Heat Release Rate (HRR), es uno de los parámetros más habituales para definir el comportamiento del incendio y su caracterización.

6.2.2.1. Objetivo

Tras comprobar la invalidez del modelo de combustión, el objetivo de este nuevo conjunto de simulaciones es conseguir caracterizar el efecto extintor del NABP, evaluando los efectos térmicos causados sobre el incendio característico empleado.

Se ha desarrollado una batería de simulaciones en estado estacionario para una evaluación comparativa de los resultados. Se han realizado las siguientes simulaciones:

- ✓ recinto con el incendio,
- ✓ recinto con el incendio y el ROC,
- ✓ recinto con el incendio y el NAP a 20 m/s y
- ✓ recinto con el NABP con ventilador

6.2.2.2. Descripción del escenario

Las simulaciones se realizaron en un volumen de control de 3m de radio y 4m de altura. Se trata de la misma geometría empleada en el primer conjunto de simulaciones.

Las características de las inyecciones de partículas son las siguientes:

TABLA 6.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS

	NABP	ROC	NAP
Velocidad de las partículas (m/s)	0,01	8	20
Ángulo (°)	120	60	60
Diámetro máximo (micras)	150	1500	100
Diámetro mínimo (micras)	80	500	50
Diámetro principal (micras)	100	1000	80
Caudal (l/s)	5	10	5

De nuevo, el diámetro de partículas se considera que sigue una distribución normal.

Este **Nuevo Modelo de combustión (por generación térmica)** se realiza creando un subdominio en el recinto de control, en el cual se aplica una generación de energía térmica. Dicho subdominio debe ser un volumen, ya que no resulta posible aplicarlo en una superficie. Puede introducirse un valor total de energía liberada (en W/m^3) o introducir una función para que la energía liberada dependa de factores como tiempo, temperatura, etc.

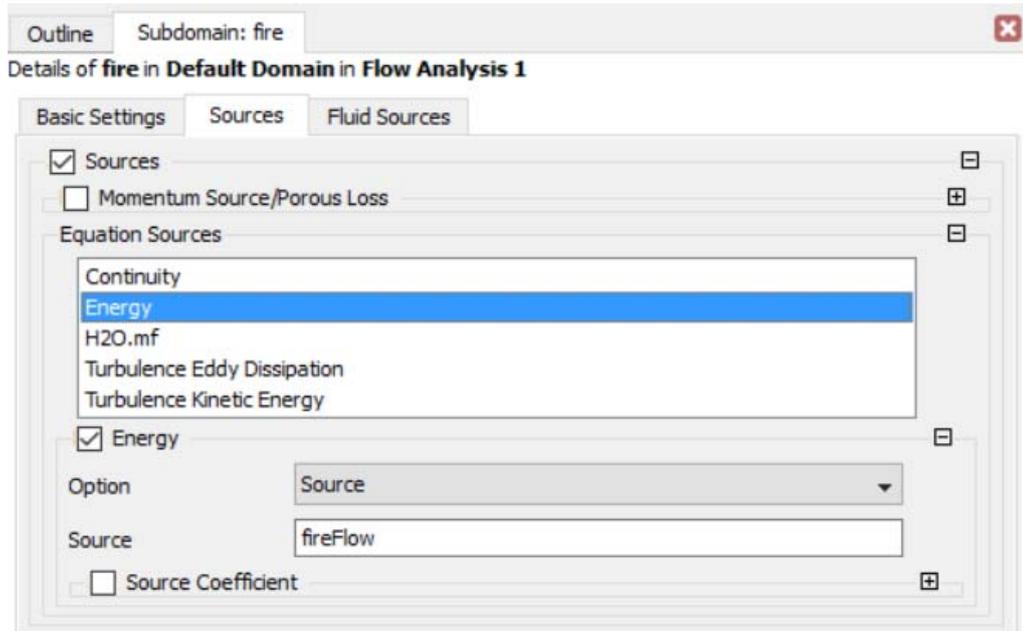


FIGURA 6.13 PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA

Para poder evaluar los efectos térmicos de los sistemas de extinción, se optó por introducir una función de celda o *cell function* en función de la temperatura en el volumen que ocupa el incendio. En este caso:

$$fireFlow = 6000 \left[\frac{W}{m^3} \right] + 650 \left[\frac{W}{K \cdot m^3} \right] \cdot T \quad (12)$$

De esta manera la intensidad del incendio dependerá de la temperatura en el interior de la celda. Lo que permitirá evaluar la variable temperatura de forma adecuada. De nuevo, las condiciones iniciales son 1 atm y 300k.

Las características del mallado son las siguientes:

Se ha mejorado el refinado del mallado (más celdas) puesto que los tiempos de cálculo de la primera batería de simulaciones se consideran aceptables. Se ha multiplicado por tres el número de celdas.

TABLA 6.4 CARACTERISTICAS DEL MALLADO

Nº de celdas	Sk _{MAX}	Sk _{min}	Sk _{medio}
3.477.270	0,798	1,05 · 10 ⁻⁵	0,213

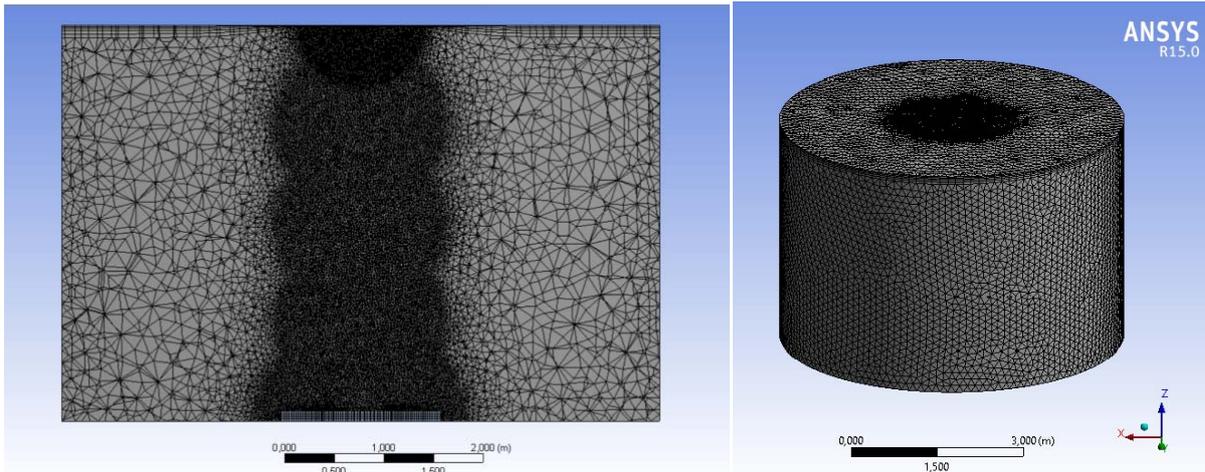


FIGURA 6.14 MALLADO DEL RECINTO

Se crean diferentes superficies para introducir las diferentes condiciones de contorno (boundary conditions). Estas superficies son:

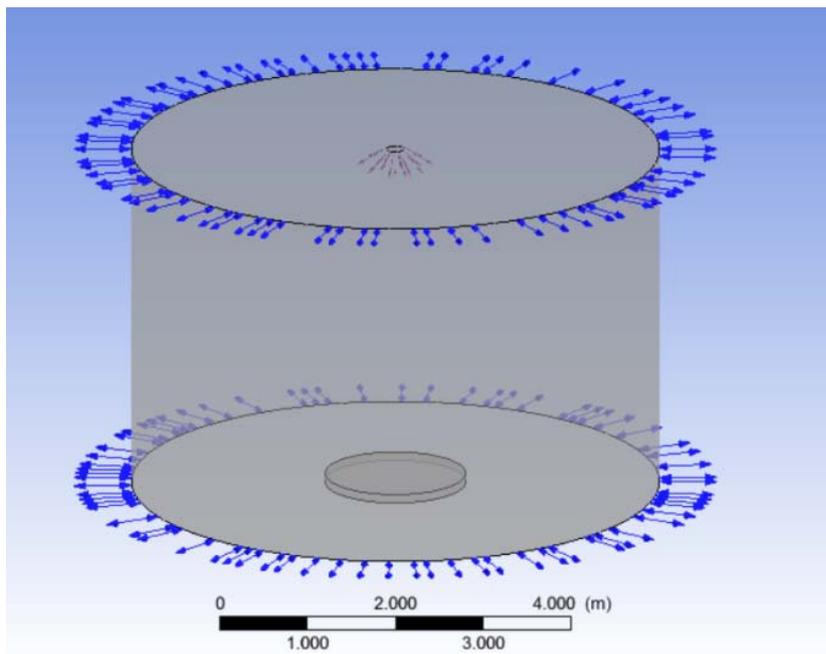


FIGURA 6.15 CONDICIONES DE CONTORNO

- **Open:** es el perímetro de la sala, se modela como opening para representar una zona abierta con una presión exterior de 1atm y 25°C de temperatura.
- **Fire:** Zona del incendio, en el centro del volumen de control. En el modelo de generación térmica se trata de un volumen, de 10cm de altura y 0,8m de diámetro.

- **Fan:** está colocado justo encima de cada difusor. Tiene un radio de 5cm y para que salga en forma de cono se hace una superficie estérica. La velocidad del aire es de 5 m/s. Se modela como una entrada (inlet) de aire y solo se emplea en las simulaciones del NABP.
- **Default faces:** se trata de las superficies que sobran por definir (techo y suelo). En este caso se modelan como paredes (Wall) en las que no hay deslizamiento (no Split).

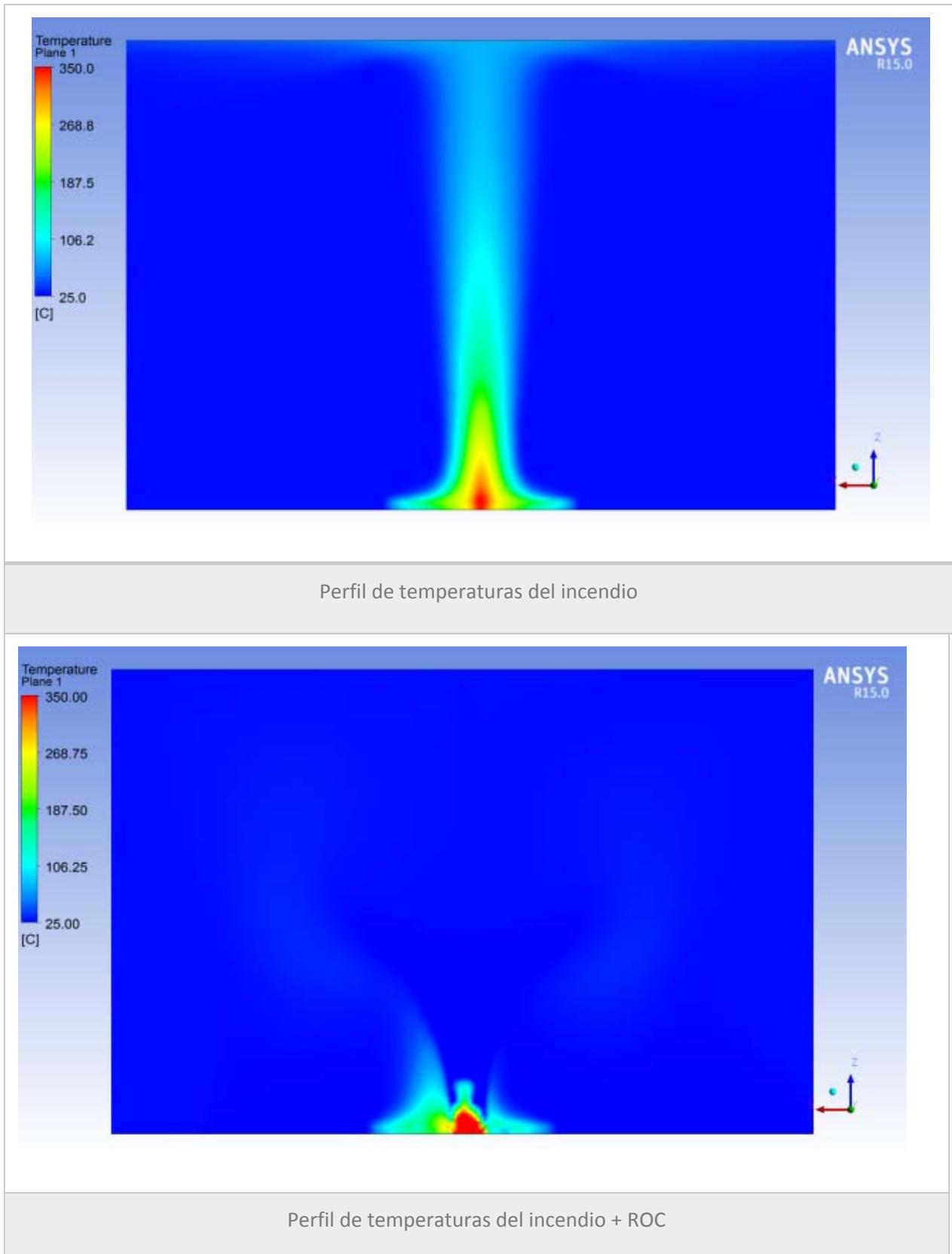
TABLA 6.5 CONDICIONES DE CONTORNO PARA LOS MODELOS DE GENERACIÓN TÉRMICA

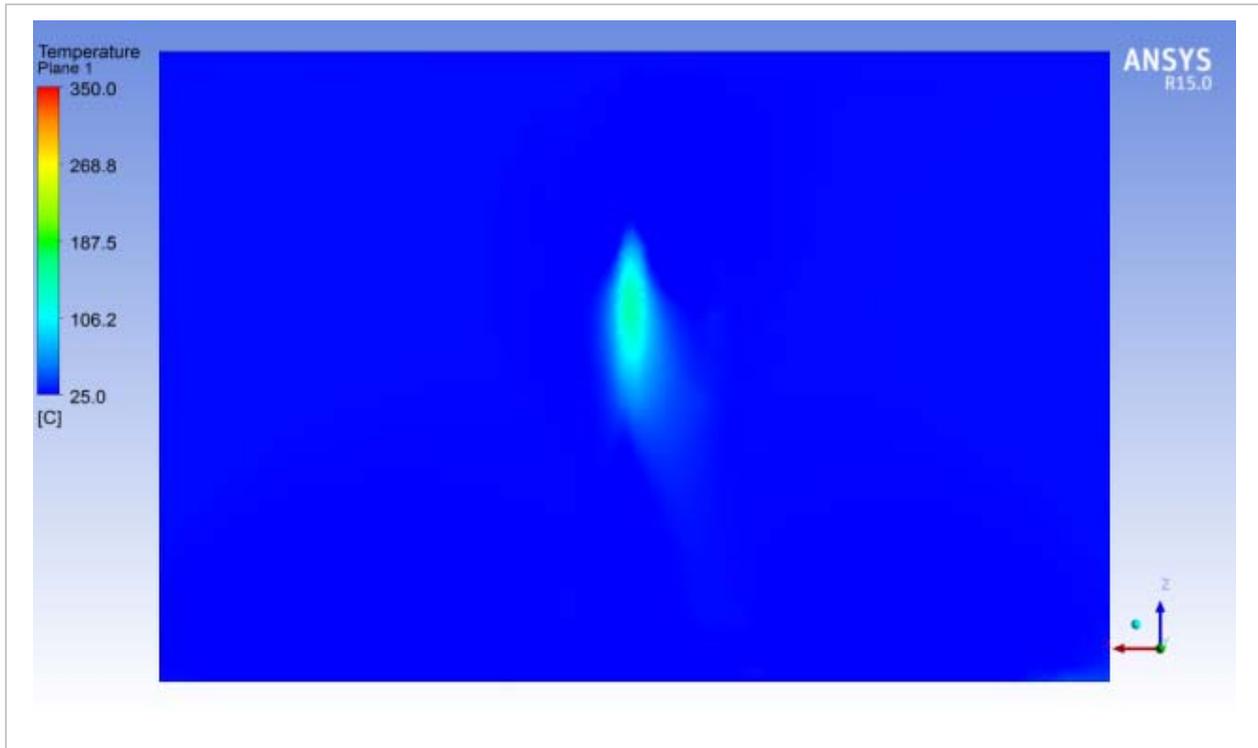
	NABP	ROC	NAP
fire	Subdomain	Subdomain	Subdomain
open	Opening	Opening	Opening
fan	Inlet	-	-
Default Domain	Wall	Wall	Wall
spray	Particle injection	Particle injection	Particle injection

Para modelar el efecto del techo se realiza una capa límite (inflation) para recoger bien los fenómenos cercanos a la pared. El modelo de turbulencia empleado en todas las simulaciones es el k-ε.

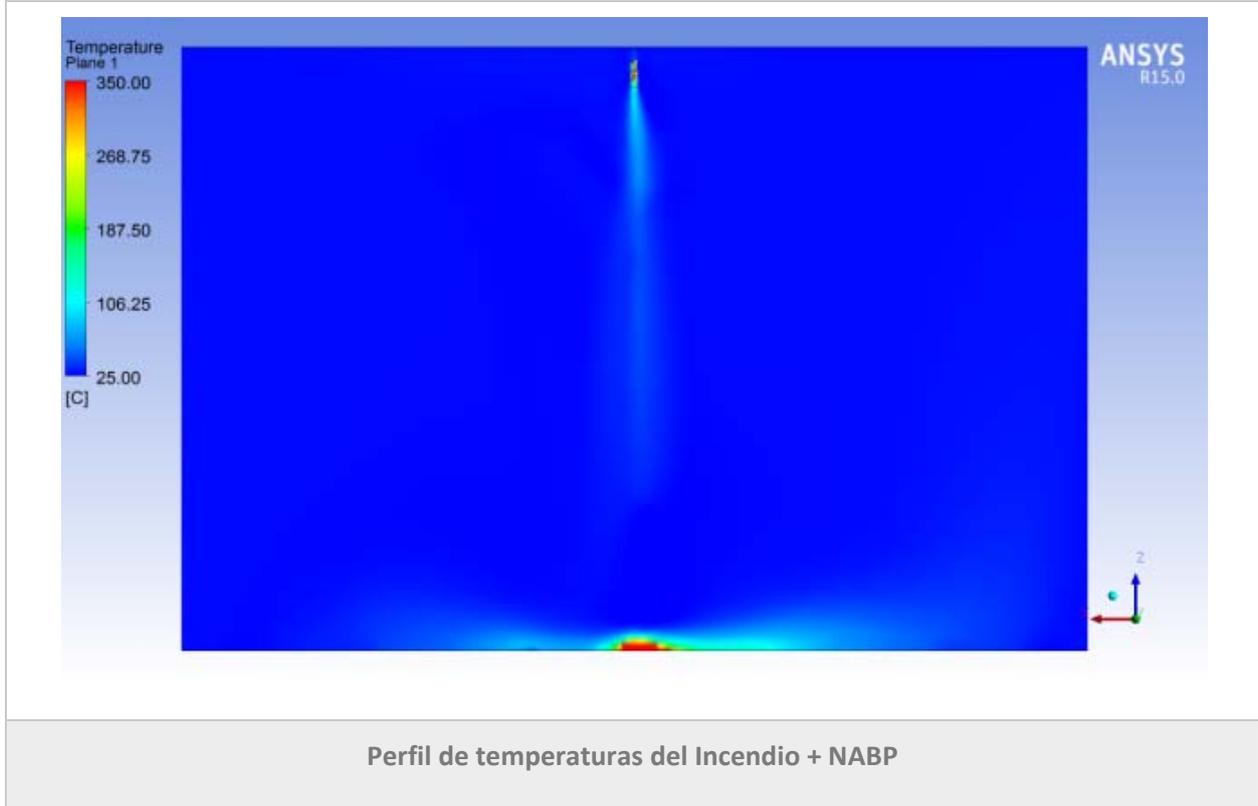
6.2.2.3. Resultados

A continuación, en la Figura 6.16 se muestran los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones:





Perfil de temperaturas del Incendio + NAP



Perfil de temperaturas del Incendio + NABP

FIGURA 6.16 PERFILES DE TEMPERATURAS PARA ROC, NAP,NABP

En este caso, por las imágenes de la Figura 6.16 puede apreciarse como todos los difusores consiguen un efecto refrigerador sobre el incendio. En el caso de NAP aparece un efecto singular, la temperatura asciende a media altura, lo cual no parece razonable. Además, según la simulación realizada, parece que el NAP apaga completamente el incendio, lo que inicialmente es imposible ya que la generación de calor propuesta en el modelo nunca se detiene. **Al haber definido una función de generación térmica, lo máximo que se podría lograr sería controlarlo.** Es importante identificar estas posibles desviaciones, para que no provoquen conclusiones erróneas (mucho más cuando aún estamos evaluando simulaciones en régimen estacionario).

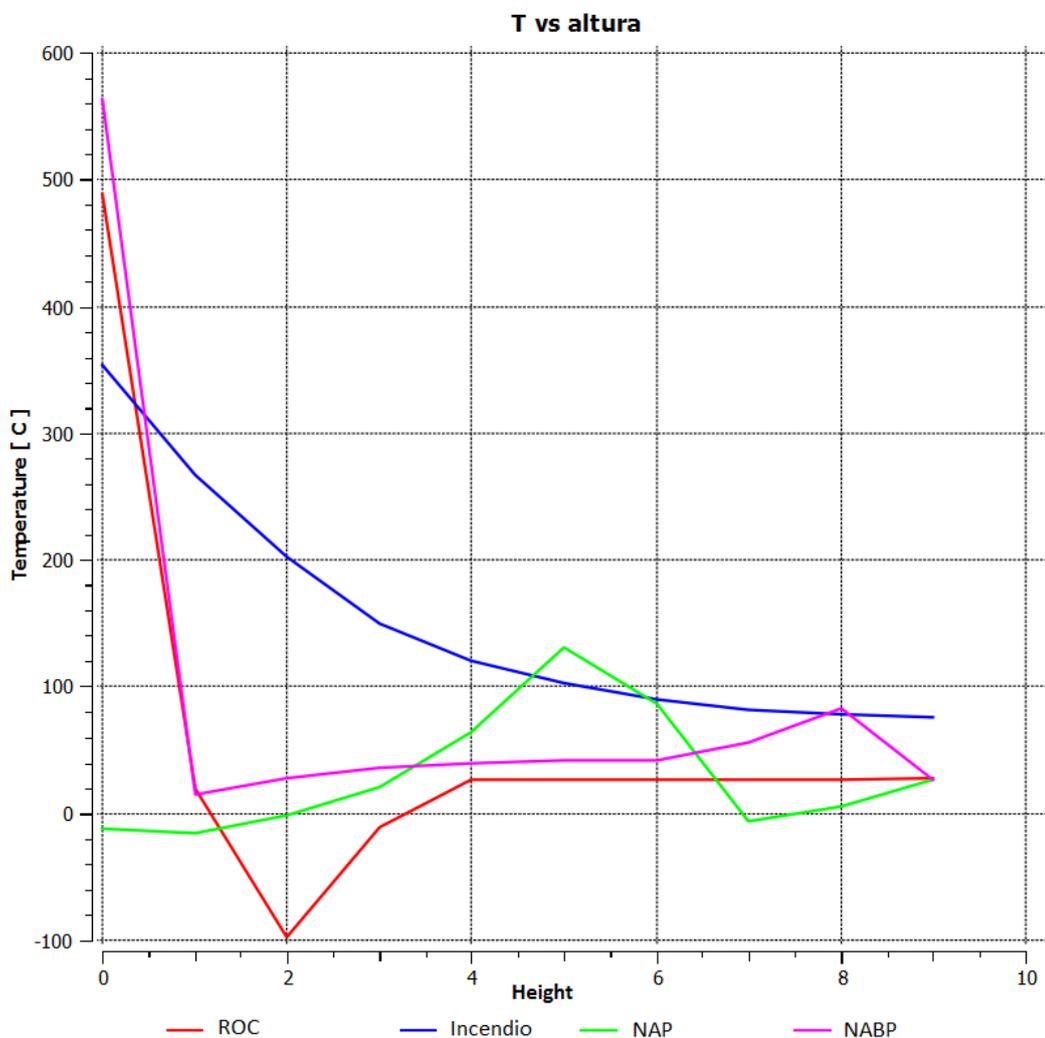
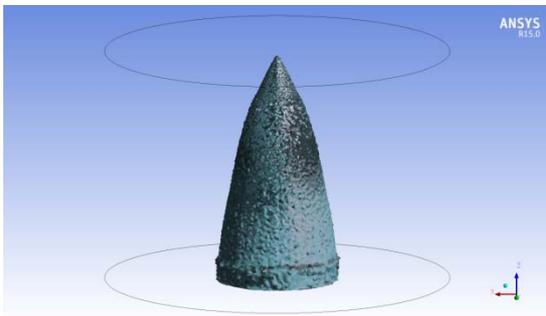


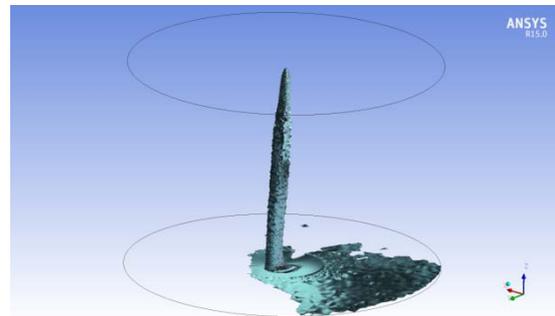
FIGURA 6.17 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC, NAP, NABP

En esta gráfica de la figura 6.17 se muestra la distribución de la temperatura con la altura, en el centro de la sala. La línea azul representa el incendio, que lógicamente evoluciona en descenso con la altura. La línea verde representa el NAP, donde se ve una subida de temperatura a media altura, que resulta ilógica. El NABP y el ROC reflejan una mayor temperatura en la base, pero enseguida desciende y se estabiliza. Eso supone un control efectivo del incendio.

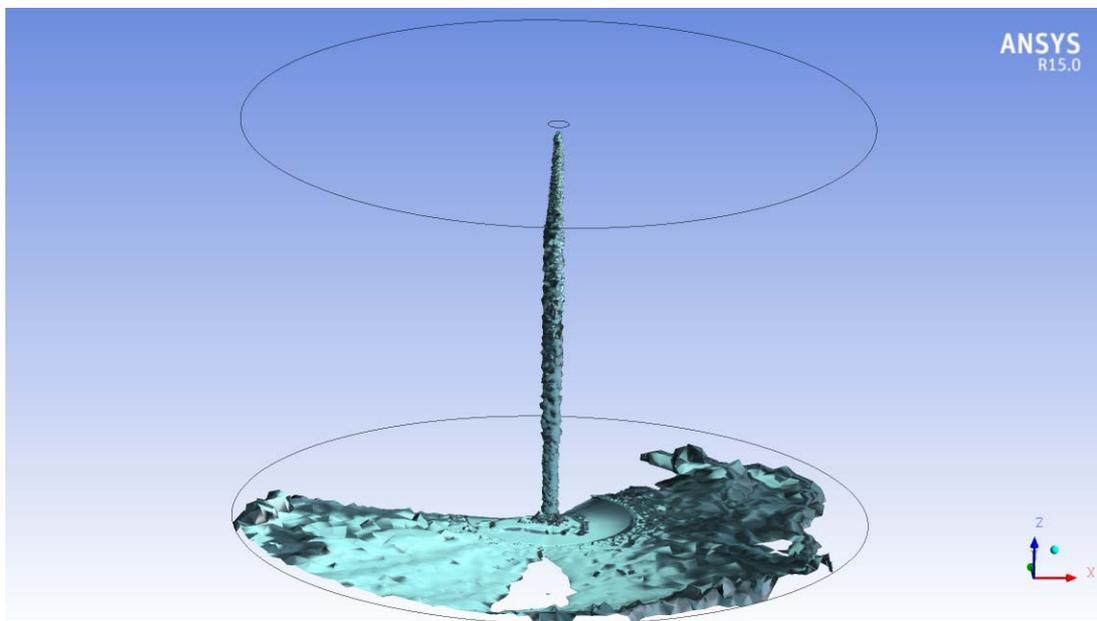
A continuación se recogen en la Figura 6.18 las imágenes de la **fracción másica de agua líquida**, que nos permiten ver donde llega el agua en estado líquido (para que pueda cumplir su objetivo de extinción).



Fracción másica agua líquida del ROC



Fracción másica agua líquida del NAP

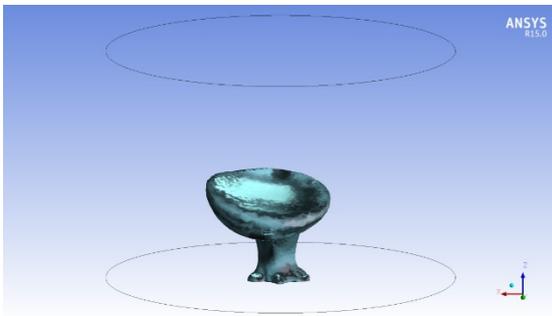


Fracción másica agua líquida del NABP

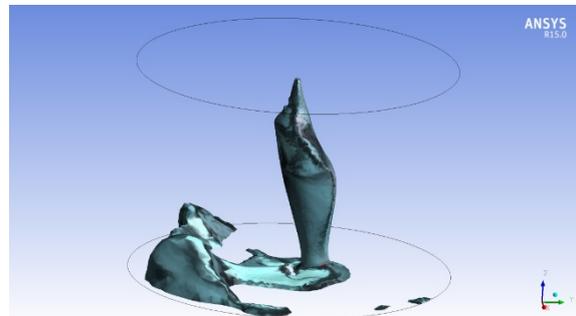
FIGURA 6.18 FRACCION MASICA DE AGUA LÍQUIDA PARA ROC, NAP, NABP

En las imágenes de la Figura 6.18 donde vemos agua en fase líquida puede apreciarse como los 3 sistemas consiguen llegar con las partículas de agua hasta la base del incendio. Los 3 sistemas consiguen vencer las corrientes convectivas con éxito.

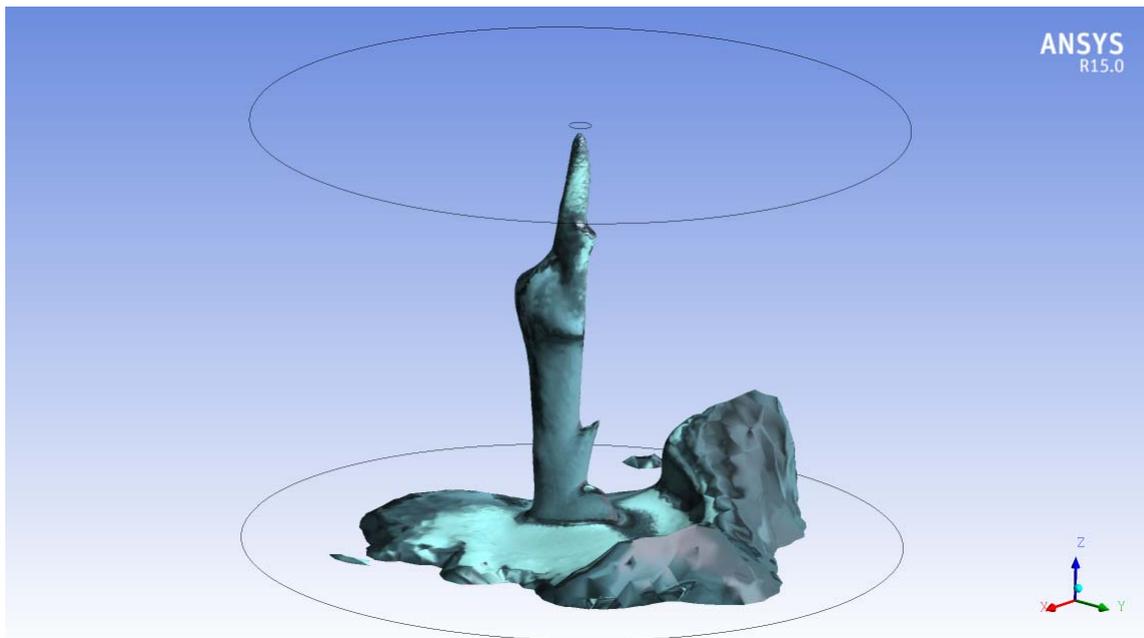
A continuación en la figura 6.19 se recogen las imágenes de la **fracción másica de vapor de agua**, que nos permiten ver donde se ha producido el cambio de fase (y el agua está consiguiendo cumplir su objetivo de extinción).



Fracción másica de Vapor de agua del ROC



Fracción másica de Vapor de agua del NAP



Fracción másica de Vapor de agua del NABP

FIGURA 6.19 FRACCION MASICA DE VAPOR DE AGUA PARA ROC, NAP, NABP

Estas imágenes de la figura 6.19 muestran el vapor de agua formado a causa de la evaporación de las partículas de agua. Gracias a la evaporación de las partículas de agua se consigue disipar el calor generado controlando así el incendio en todos los casos. Además el vapor de agua generado en la base del incendio provoca un efecto pantalla sobre la radiación, contribuyendo a que el incendio no se propague (la evaluación de este parámetro queda inicialmente fuera del presente estudio, aunque no se descarta para fases posteriores).

6.2.2.4. Conclusiones

Al igual que en la primera batería de simulaciones realizadas (con el modelo de combustión), los resultados de estas simulaciones se deben considerar aproximados (o parciales), ya que se han realizado en estado estacionario.

El modelo de generación térmica empleado sí permite evaluar los efectos termodinámicos de la refrigeración de una manera satisfactoria. Como puede observarse en los perfiles de temperatura, todos los modelos de difusores consiguen controlar el incendio de forma satisfactoria (o razonable). Comparativamente el NABP consigue efectos térmicos aún más favorables que el rociador automático.

También se puede apreciar como el software trabaja mejor con tamaños mayores de partículas, obteniéndose los resultados más detallados (en la zona del incendio) para el ROC, ya que es el que descarga partículas de agua de mayor tamaño. Mientras que con las partículas de menor tamaño aparecen fenómenos inicialmente poco razonables.

No obstante, parece claro que la posición del difusor es demasiado favorable, lo que implica que los resultados no son suficientemente representativos, ya que está colocado justo encima del incendio. Este posicionamiento tan ideal causa que (hasta por el efecto de la propia gravedad) las partículas de agua tengan más sencillo llegar al incendio.

6.2.3. MODELO DIFUSORES MÚLTIPLES (ESTACIONARIO)

6.2.3.1. Objetivo

El objetivo de estas simulaciones es caracterizar el efecto extintor del NABP, evaluando los efectos térmicos causados sobre un incendio que en esta ocasión será caracterizado para ajustarse más a las condiciones de una situación real. Se empleará un recinto con 4 difusores repartidos de forma simétrica, con el incendio en el medio de los mismos.

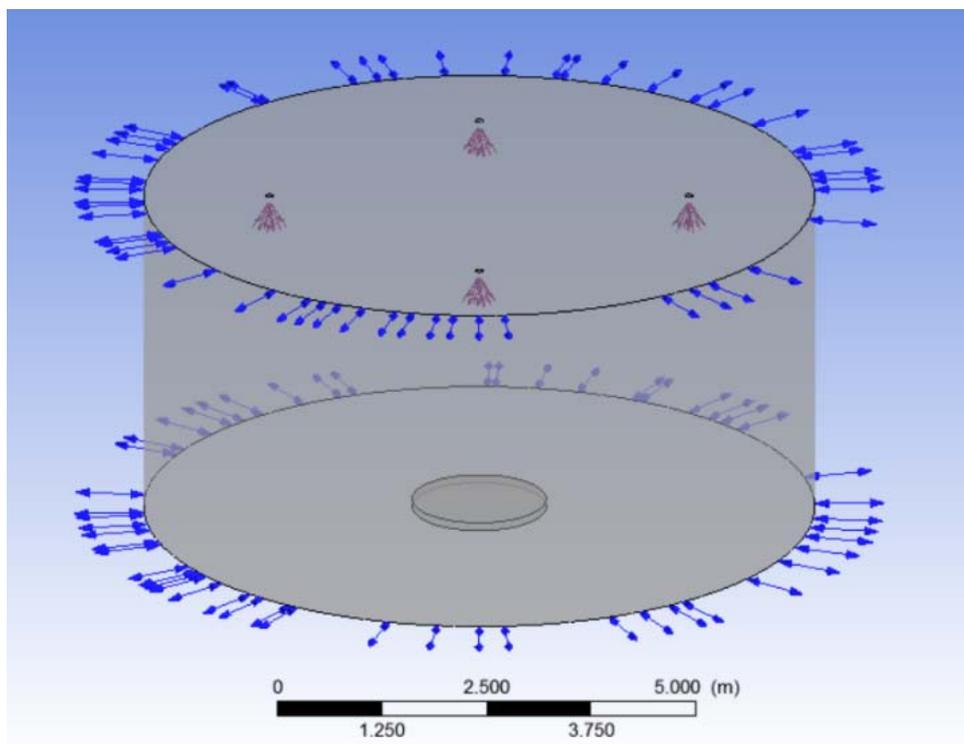


FIGURA 6.20 CONDICIONES DE CONTORNO

Se realizará un modelado comparativo en estado estacionario para una evaluación previa de los resultados. Se han realizado las siguientes simulaciones:

- ✓ recinto con el incendio,
- ✓ recinto con el incendio y el ROC,
- ✓ recinto con el incendio y el NAP a 20 m/s y
- ✓ el recinto con el incendio y el NABP

6.2.3.2. Descripción del escenario

Las simulaciones se realizaron en un nuevo volumen de control de 4m de radio y 4m de altura. Ha sido necesario aumentar el tamaño del volumen de control para adecuarlo a una geometría más real, similar a los recintos habituales en edificación. El sistema de extinción constará de 4 difusores repartidos de manera simétrica por el techo del recinto, y con el incendio centrado en la superficie inferior. La separación entre los difusores es 4m (a 2m del centro de la sala, en forma de cruz). Esta distribución de rociadores/difusores es muy habitual en instalaciones existentes, ya que es exigida por normativas de obligado cumplimiento [12], [15], [16] (por ejemplo en el caso de la instalación de rociadores automáticos para proteger riesgos clasificados como Riesgo Ordinario).

Las características de las inyecciones de partículas se recogen en la siguiente Tabla 6.6:

TABLA 6.6 CARACTERISTICAS DE LAS INYECCIONES DE PARTICULAS

	NABP	ROC	NAP
Velocidad de las partículas (m/s)	0,01	8	20
Ángulo (º)	120	60	60
Díametro máximo (micras)	150	1500	100
Diámetro mínimo (micras)	80	500	50
Diámetro principal (micras)	100	1000	80
Caudal (l/s)	5	10	5

La distribución del diámetro de partícula sigue una distribución normal.

La combustión se realiza mediante una generación de calor que cumple la siguiente ecuación lineal:

$$FireFlow = 6000 + 650T \quad (12)$$

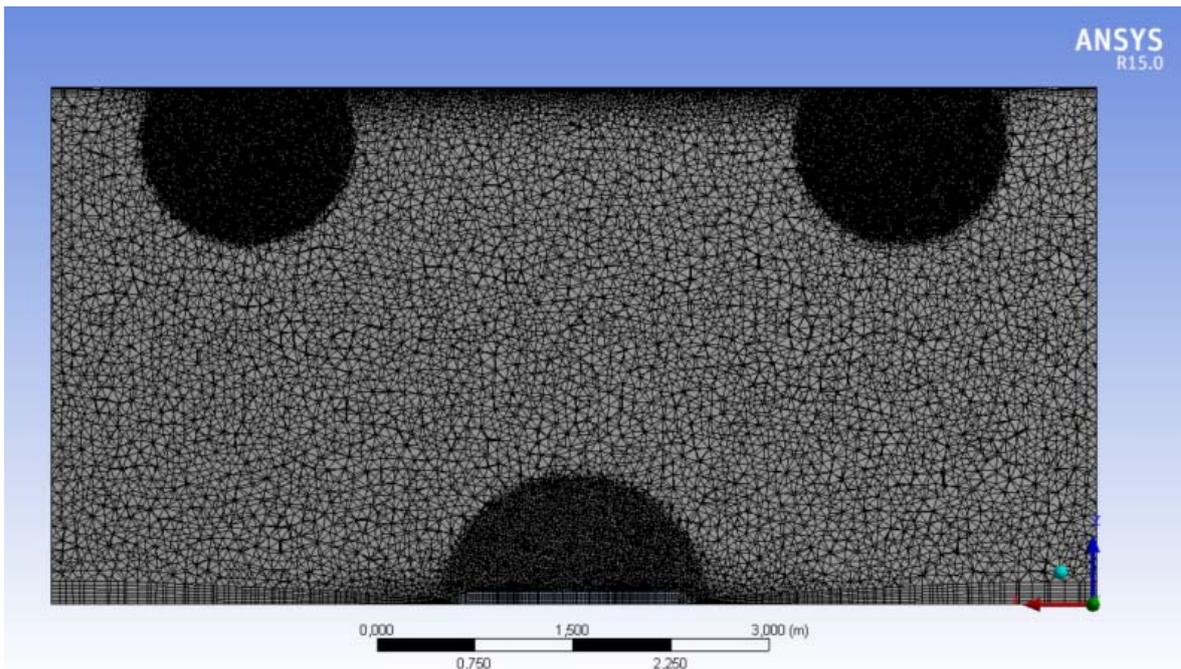
El incendio tiene un diámetro de 0,8m y una altura de 10cm. En todas las simulaciones, las condiciones iniciales son 1 atm y 300K.

Las características del **mallado** son las siguientes (es importante destacar que se pasa en este nuevo escenario a disponer de 11 millones de celdas):

TABLA 6.7 CARACTERISTICAS DEL MALLADO

Nº de celdas	Sk _{MAX}	Sk _{min}	Sk _{medio}
11.081.209	0,844	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,222

Siendo Sk el “skewness” o el grado de achatamiento de las celdas. Cuanto menor sea este valor, mejor será la calidad de la malla.



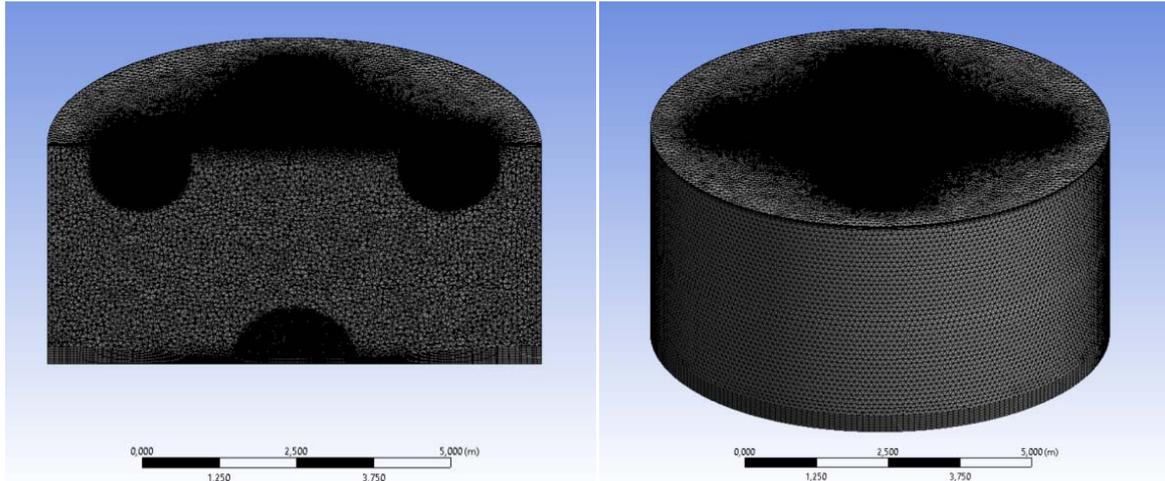


FIGURA 6.21 MALLADO DEL RECINTO

Todas las simulaciones realizadas se hacen en **estado estacionario** para realizar así un análisis preliminar y reducir así los tiempos de cálculo.

Se crean diferentes superficies para introducir las diferentes **condiciones de contorno** (boundary conditions). Estas superficies son:

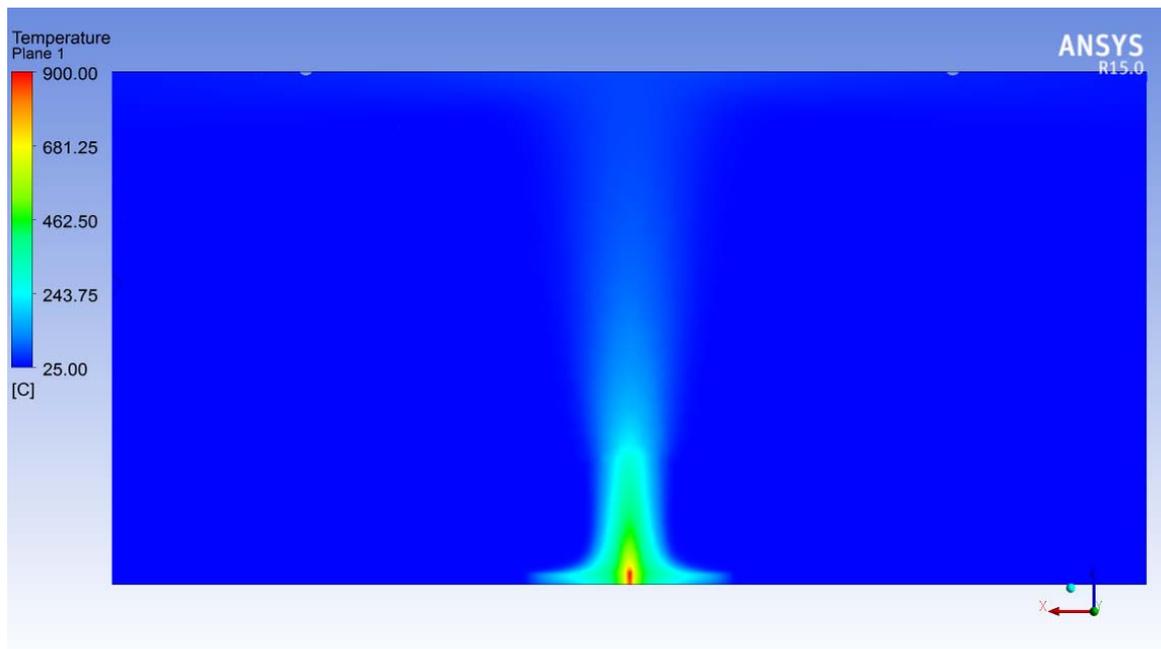
- **Open:** es el perímetro de la sala, se modela como opening para representar una zona abierta con una presión exterior de 1atm y 25°C de temperatura.
- **Fire:** Zona del incendio, en el centro del volumen de control. En el modelo de generación térmica se trata de un volumen, de 10cm de altura y 0,8m de diámetro.
- **Fan:** está colocado justo encima de cada difusor. Tiene un radio de 5cm y para que salga en forma de cono se hace una superficie estérica. La velocidad del ventilador es de 5m/s. Se modela como una entrada (inlet) de aire y solo se emplea en las simulaciones del NABP.
- **Default faces:** se trata de las superficies que sobran por definir (techo y suelo). En este caso se modelan como paredes (Wall) en las que no hay deslizamiento (no Split)

TABLA 6.8 CONDICIONES DE CONTORNO PARA LOS MODELOS DE GENERACIÓN TÉRMICA

	NABP	ROC	NAP
fire	Subdomain	Subdomain	Subdomain
open	Opening	Opening	Opening
fan	Inlet	-	-
Default Domain	Wall	Wall	Wall
spray	Particle injection	Particle injection	Particle injection

Para modelar el efecto del techo y en el suelo se realiza una capa límite (inflation) para recoger bien los fenómenos cercanos a la pared. El modelo de turbulencia empleado en todas las simulaciones es el k-ε.

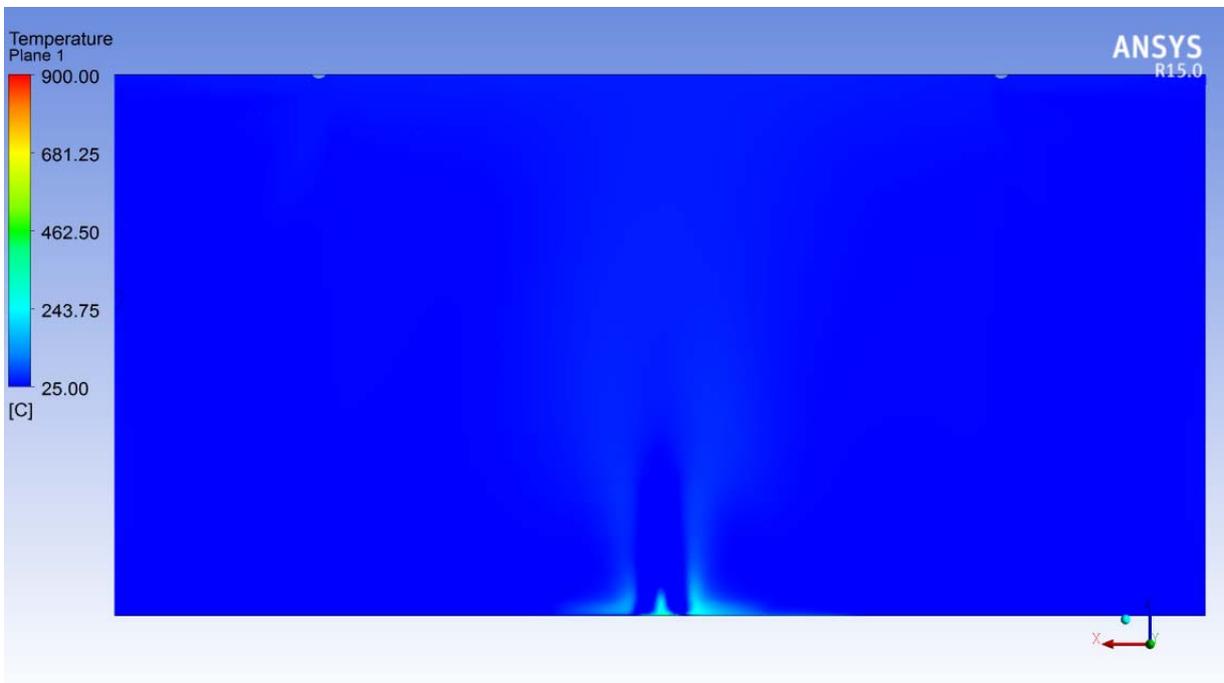
A continuación, se presentan en la Figura 6.22 los **resultados térmicos obtenidos** en las simulaciones (las imágenes reflejan un corte del volumen de control que pasa por el eje del cilindro, y por la posición de dos de los cuatro difusores existentes):



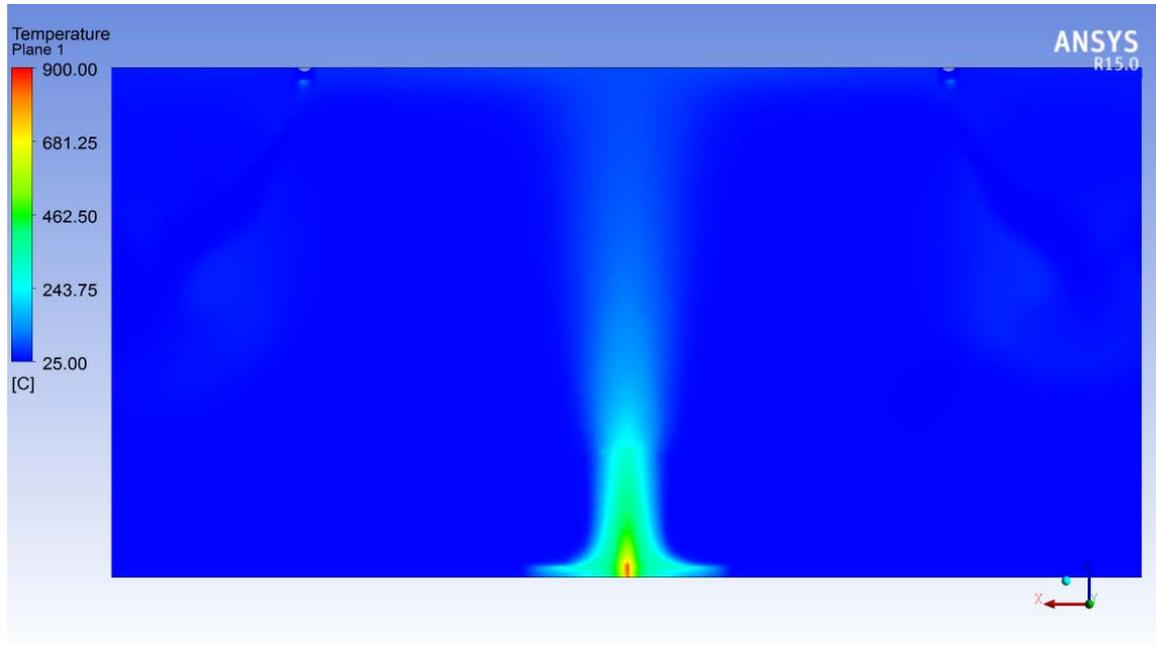
Perfil de temperaturas del incendio (4 difusores SS)



Perfil de temperaturas del incendio + ROC (4 difusores SS)



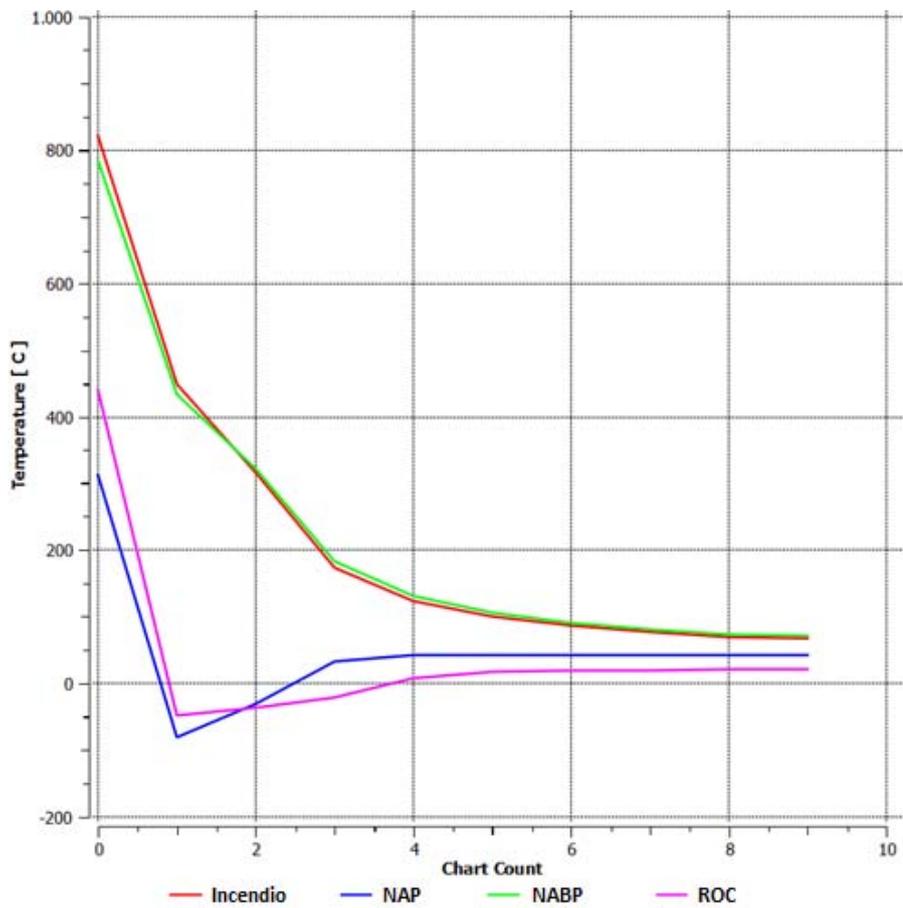
Perfil de temperaturas del Incendio + NAP (4 difusores SS)



Perfil de temperaturas del Incendio + NABP (4 difusores SS)

FIGURA 6.22 PERFILES DE TEMPERATURAS PARA ROC, NAP,NABP

Como puede apreciarse en los perfiles de temperatura de la Figura 6.22 tanto el ROC como el NAP consiguen controlar los efectos térmicos del incendio simulado. Por el contrario, **el NABP no es capaz de hacerlo**. Esto puede deberse a la baja velocidad del ventilador, que sumado al pequeño tamaño de las partículas, hace que las corrientes convectivas arrastren el agua, alejándolo del incendio.



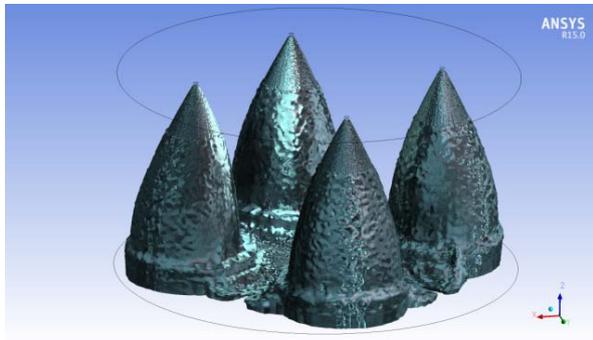
Evolución de la temperatura con la altura para los diferentes sistemas contra incendios.
(NABP 5m/s)

FIGURA 6.23 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC, NAP, NABP

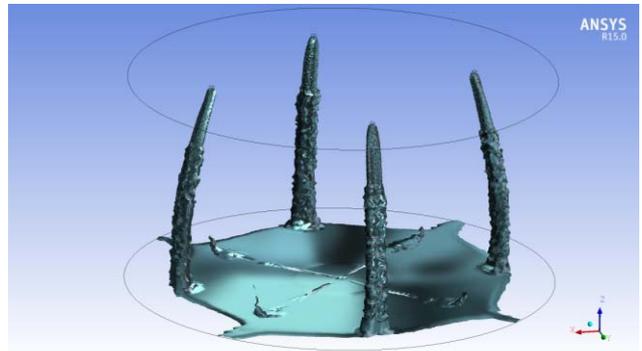
En esta gráfica de la Figura 6.23 se muestra la distribución de la temperatura con la altura, en el centro de la sala. La línea roja representa el incendio. La línea verde del NABP prácticamente refleja la misma distribución de temperaturas. Esto quiere decir que este sistema no afecta en absoluto a la temperatura del incendio. Por lo tanto, este sistema no consigue controlar el incendio.

Las líneas rosa y azul representan ROC y al NAP respectivamente. En ambos casos los incendios consiguen controlarse. De nuevo, observamos efectos “singulares”, ya que las temperaturas obtenidas están por debajo de los 0°C en algunas zonas, lo que resulta imposible (y debe de tratarse de algún defecto de cálculo del modelo simulado).

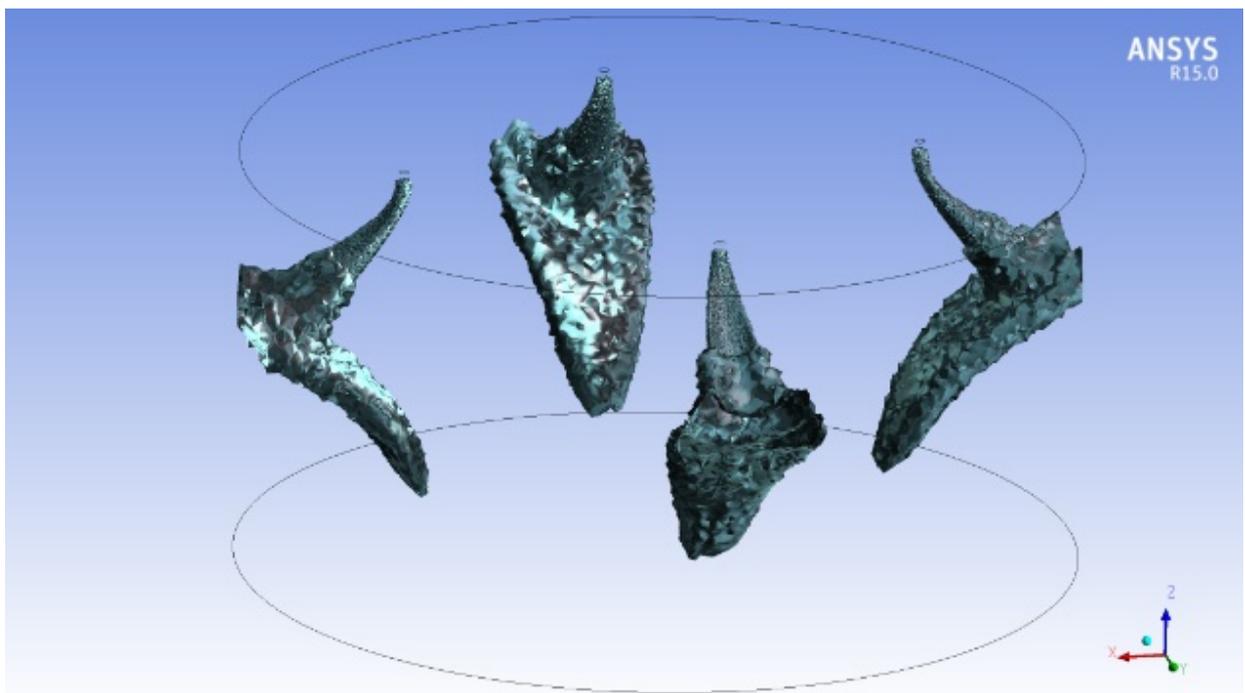
A continuación se recogen las imágenes de la figura 6.24 representan la **fracción másica de agua líquida**, que nos permiten ver donde llega el agua en estado líquido (para que pueda cumplir su objetivo de extinción).



Fracción másica agua líquida del ROC



Fracción másica agua líquida del NAP



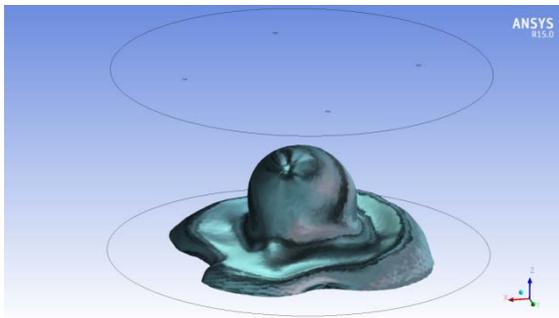
Fracción másica agua líquida del NABP

FIGURA 6.24 FRACCION MASICA DE AGUA LIQUIDA PARA ROC, NAP, NABP

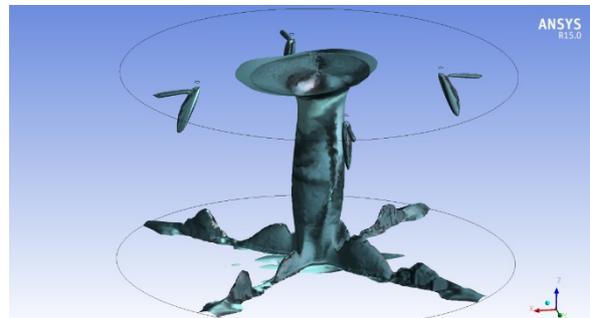
En estas imágenes puede apreciarse como los chorros de agua del ROC y del NAP llegan a la base del incendio, por lo que pueden sofocarlo. Por otro lado, el chorro del NABP es arrastrado por las corrientes convectivas hacia fuera sin llegar a la zona ocupada por el incendio. Si las partículas de agua no llegan al incendio, es casi imposible que el incendio sea controlado.

En la imagen inferior de la Figura 6.24 se observa que los chorros del NABP hacen un efecto extraño, salen hacia fuera y luego vuelven al centro. Este recorrido no resulta posible, puesto que hemos definido como abierto el perímetro de nuestro recinto. Puede ser que se generen corrientes de convección de entrada (para igualar presiones), y que sea esta entrada de aire la que modifica el recorrido de las partículas de agua (según nuestro modelo). En cualquier caso, es un efecto que nunca observaremos en la realidad.

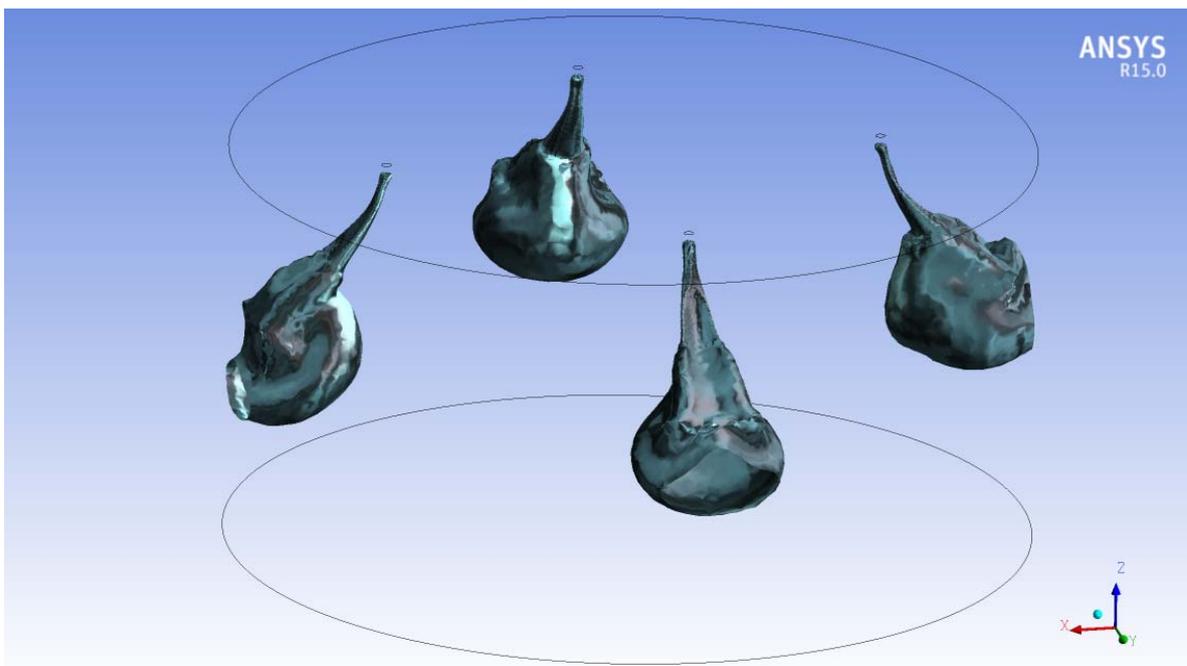
A continuación se recogen en la Figura 6.25 las imágenes de la fracción másica de vapor de agua, que nos permiten ver donde se ha producido el cambio de fase (y el agua está consiguiendo cumplir su objetivo de extinción).



Fracción másica de Vapor de agua generado por el ROC



Fracción másica de Vapor de agua generado por el NAP



Fracción másica de Vapor de agua generado por el NABP

FIGURA 6.25 FRACCION MASICA DE VAPOR DE AGUA LIQUIDA PARA ROC, NAP, NABP

El vapor de agua generado en el ROC y en el NAP se concentra en la zona del incendio, indicando que las partículas de ambos rociadores llegan con éxito al incendio (donde se produce el cambio de fase). Por el contrario, las únicas partículas evaporadas en la simulación del NABP se concentran en la salida del spray y son arrastradas por las corrientes de convección. Esto indica que las partículas de agua no llegan al incendio, por lo que no consiguen controlarlo.

6.2.3.3. Conclusiones

Al igual que en las simulaciones anteriores, los resultados obtenidos en estas simulaciones son considerados como parciales, ya que las mismas se han realizado en estado estacionario (SS). Los resultados obtenidos indican que el ROC y el NAP son capaces de controlar el incendio (mediante una importante refrigeración que reduce la temperatura en todo el recinto), mientras que **el NABP no consigue sofocarlo**. Esto es debido a que el sistema no consigue vencer las corrientes ascendentes de aire caliente, que arrastran las partículas de agua lejos de su objetivo (la base del incendio).

Por lo tanto, resulta necesario modificar los parámetros de diseño del NABP. Ya que el caudal no tiene por qué resultar insuficiente (los otros sistemas de agua nebulizada tienen caudales similares), parece que 5m/s es una velocidad insuficiente del aire de empuje. Por lo tanto, se realiza un cambio de diseño del ventilador, duplicándose la velocidad del mismo a 10m/s.

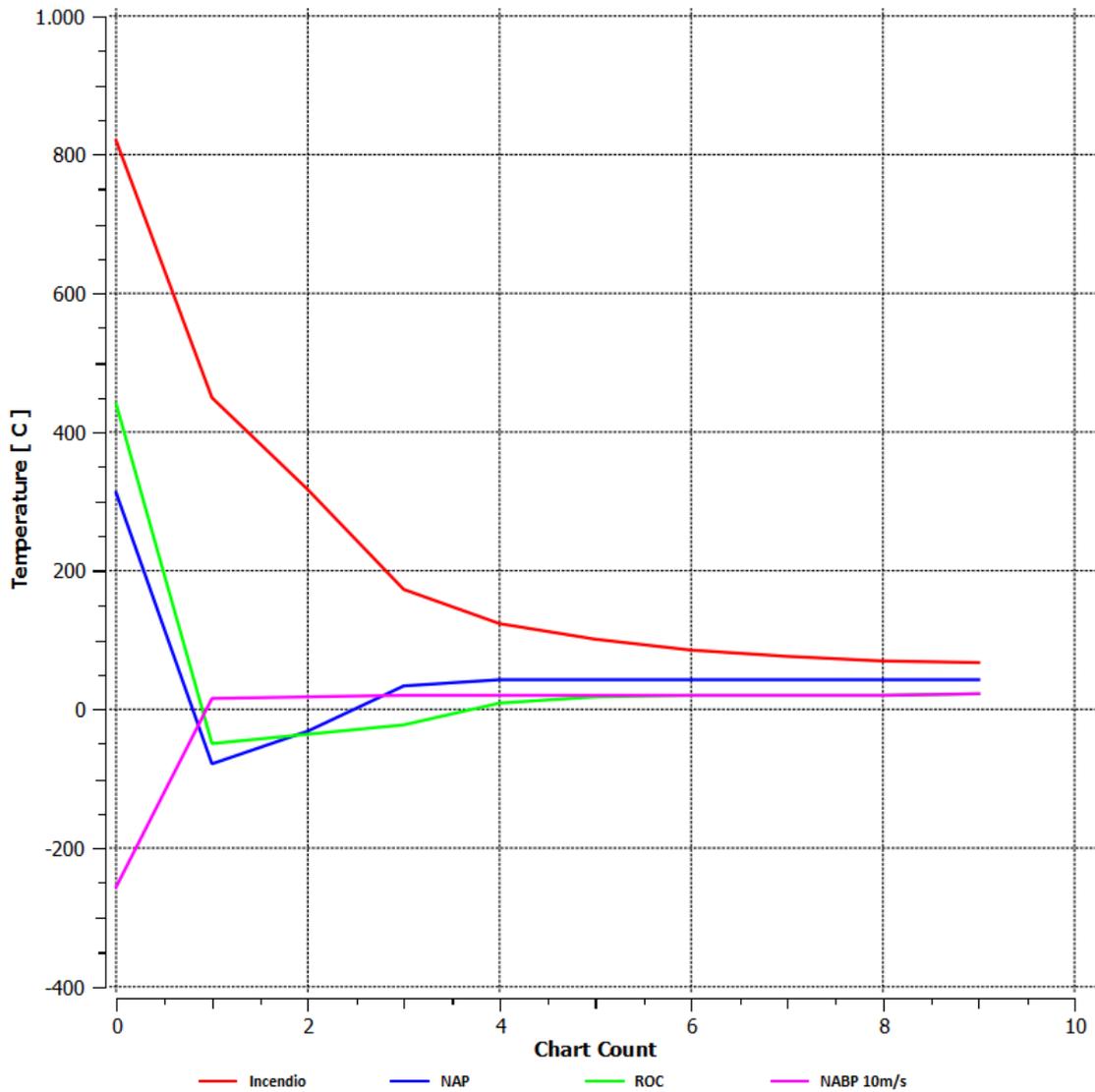
Para no aumentar en exceso el tamaño de este documento, se incluyen a continuación en la Figura 6.26 los resultados de la simulación estacionaria (sólo para el NABP), ya realizada con el nuevo parámetro de velocidad de impulsión del aire:



Perfil de Temperaturas del NABP a 10m/s

FIGURA 6.26 PERFIL DE TEMPERATURA DEL NABP A 10 M/S

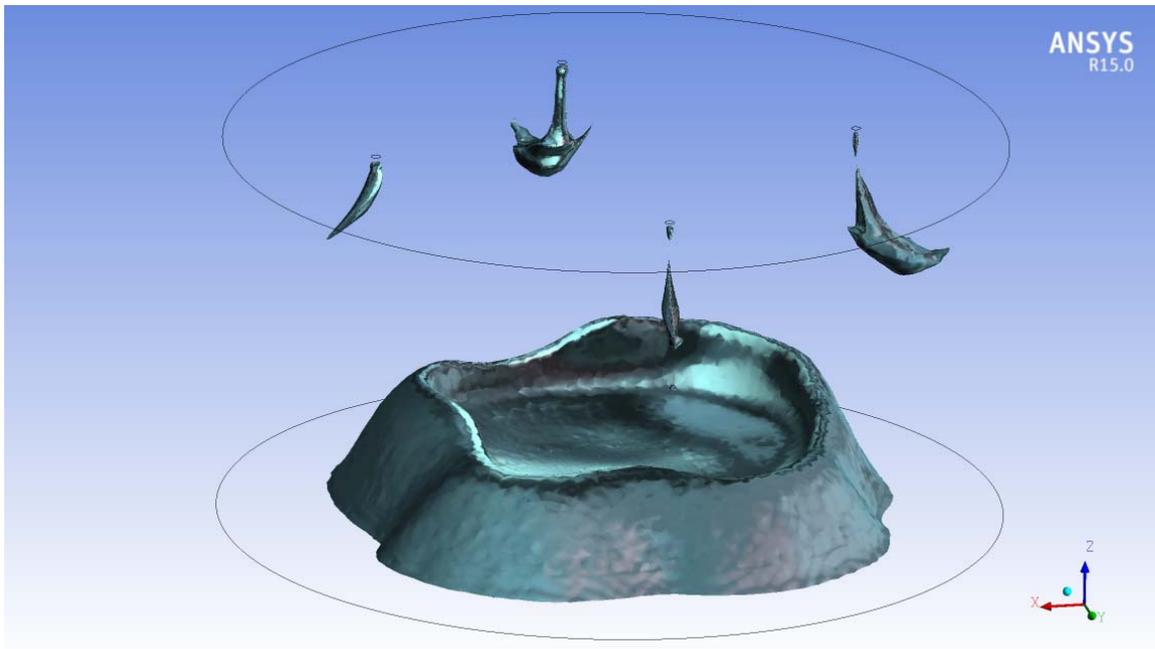
En el perfil de temperaturas de la Figura 6.26 puede observarse como **el incendio queda totalmente controlado**. Observamos que parece apreciarse un ligero aumento de temperatura (respecto del ambiente) en la descarga a la salida de los difusores. Esto puede deberse a que se inyectan muchas partículas por un espacio pequeño, por lo que el software debe considerar que se aumenta la temperatura (como consecuencia de la fricción, o de algún efecto similar). Este efecto debería contrastarse, y seguramente no aparezca en un ensayo real con las mismas características.



Evolución de la temperatura con la altura para los diferentes sistemas contra incendios. **(NABP 10m/s)**

FIGURA 6.27 GRÁFICA TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC NAP NABP

Como puede verse en la gráfica de la figura 6.27 el incendio (línea roja) ahora queda ya diferenciado del resto. EL NAP y el ROC (líneas azul y verde respectivamente) tienen un efecto muy similar. Ambos consiguen sofocar el incendio, en el aspecto térmico. El NABP tiene un efecto de refrigeración ligeramente más pronunciado. Por otro lado, hay que comentar que en la gráfica del NABP aparece un dato de temperatura por debajo de los 0°C, lo cual es imposible. Aunque estamos en fase de análisis estacionario, y los resultados deben considerarse aproximaciones, este efecto deberá analizarse con más detalle en futuras simulaciones.



Fracción másica de Vapor de agua formado por las partículas del NABP a 10m/s

FIGURA 6.28 FRACCION MASICA DE VAPOR DE AGUA FORMADO POR NABP A 10 M/S

Por último, en esta imagen recogida en la figura 6.28 puede apreciarse como se forma vapor de agua en torno a la zona de la base del incendio, lo que refleja que el cambio de fase se está realizando en la zona adecuada, y por lo que se logra disipar el calor de este, controlándolo. Este efecto de vaporización en la base del incendio será uno de los aspectos fundamentales que potencian el efecto extintor del agua nebulizada, aunque queda fuera del alcance del presente estudio su análisis detallado.

6.2.4. MODELO DIFUSORES MÚLTIPLES (TRANSITORIO)

6.2.4.1. Objetivo

El objetivo de estas simulaciones es caracterizar el efecto extintor del NABP, evaluando los efectos térmicos causados sobre un incendio caracterizado para ajustarse a las condiciones de una situación real. Se empleará un recinto con 4 difusores repartidos de forma simétrica, con el incendio en el medio de los mismos.

Se realizará una batería de simulaciones en régimen transitorio (TR) para una evaluación comparativa de los resultados. Estas simulaciones nos podrán aportar mayor cantidad de información (evolución con el tiempo), pero debido a esa dependencia del tiempo los procesos de cálculo se alargan enormemente.

Se han realizado las siguientes simulaciones:

- ✓ recinto con el incendio,
- ✓ recinto con el incendio y el ROC,
- ✓ recinto con el incendio y el NAP a 20 m/s
- ✓ y recinto con el incendio y el NABP a 10 m/s

6.2.4.2. Descripción del escenario

La geometría es la misma que en la batería de simulaciones estacionarias anteriores. Las simulaciones se realizaron en un volumen de control de 4m de radio y 4m de altura. El volumen constará de 4 difusores repartidos de manera simétrica por el techo del volumen con el incendio en el centro de los mismos. La separación entre los difusores es 4m.

No obstante, y para aprovechar la evolución temporal que permite el análisis transitorio, se realiza una programación de eventos para que la simulación sea aún más parecida a la situación real de incendio. Se comenzará únicamente con el desarrollo del incendio (se recuerda que es una función creciente con la temperatura, con lo que aumentará inicialmente), y el inicio de la descarga de de partículas de agua se fija en el segundo 3. De este modo, es de esperar que se produzca una fuerte subida inicial de la temperatura, y a partir de la descarga del agua, podamos comprobar el efecto térmico de los distintos sistemas.

Las características de las partículas empleadas se indican en la siguiente Tabla 6.9:

TABLA 6.9 CARACTERISTICAS DE LAS INYECCIONES DE PARTICULAS

	NABP	ROC	NAP
Velocidad de las partículas (m/s)	0,01	8	20
Ángulo (º)	120	60	60
Diámetro máximo (micras)	150	1500	100
Diámetro mínimo (micras)	80	500	50
Diámetro principal (micras)	100	1000	80
Caudal (l/s)	5	10	5

Al igual que en simulaciones anteriores, la distribución del diámetro de partícula sigue una distribución normal. La combustión se realiza mediante una generación de calor que sigue la siguiente ecuación lineal: $FireFlow = 6000 + 650T$. El incendio tiene un diámetro de 0,8m y una altura de 10cm. En todas las simulaciones, las condiciones iniciales son 1 atm y 300K.

Las características del mallado son las siguientes:

TABLA 6.10 CARACTERÍSTICAS DEL MALLADO

Nº de celdas	Sk _{MAX}	Sk _{min}	Sk _{medio}
11.081.209	0,844	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,222

Siendo Sk el “skewness” o el grado de achatamiento de las celdas. Cuanto menor sea este valor, mejor será la calidad de la malla.

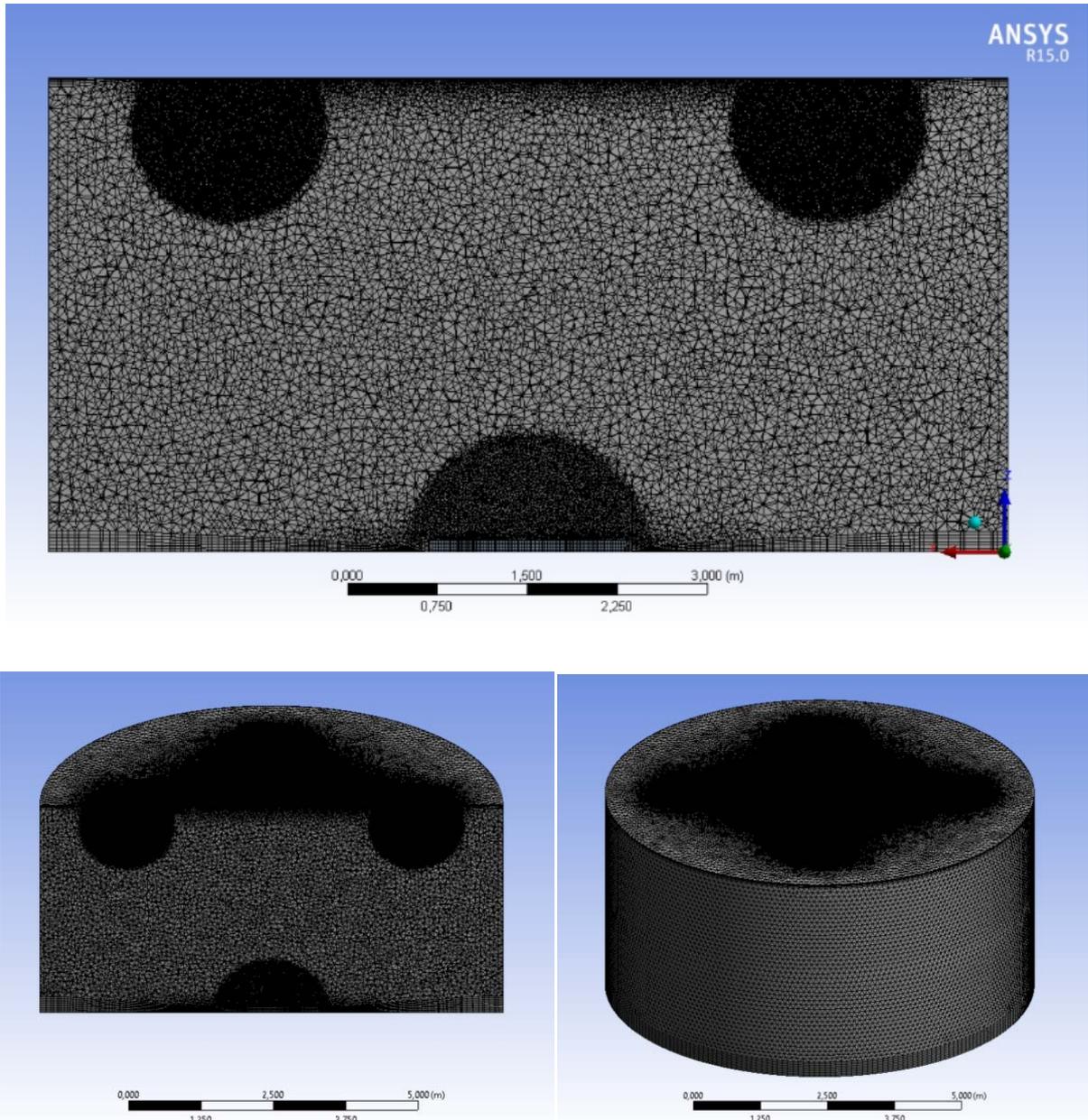
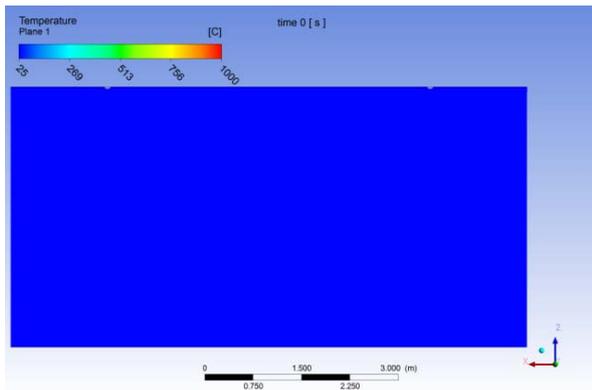


FIGURA 6.29 MALLADO DEL RECINTO

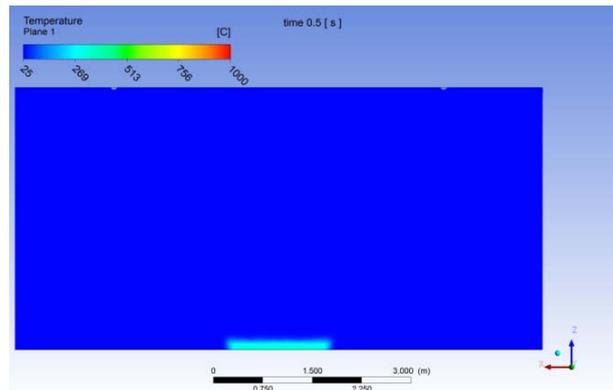
Estas simulaciones se realizarán en régimen transitorio, lo cual proporciona mejores resultados a costa de un mayor coste computacional. Los tiempos de cálculo y procesado para alguno de los escenarios han durado hasta 3 semanas, con los equipos disponibles para esta fase del estudio.

La inyección de las partículas se realiza en el segundo 3, por lo que todas las simulaciones serán iguales hasta ese momento.

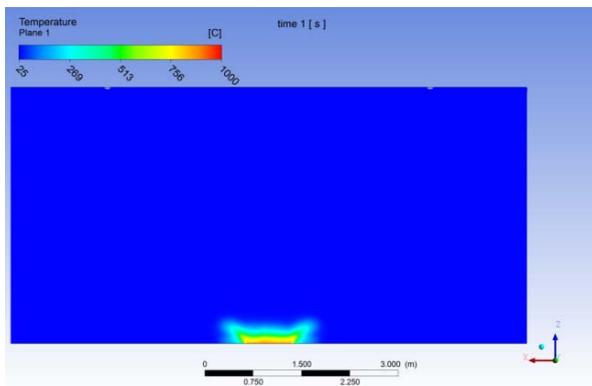
A continuación, se muestran en la Figura 6.31 los **resultados de temperaturas** obtenidos para los 3 primeros segundos de simulación, los cuales son comunes a las 3 simulaciones (las imágenes son planos verticales que cortan el centro del recinto y pasan por dos difusores):



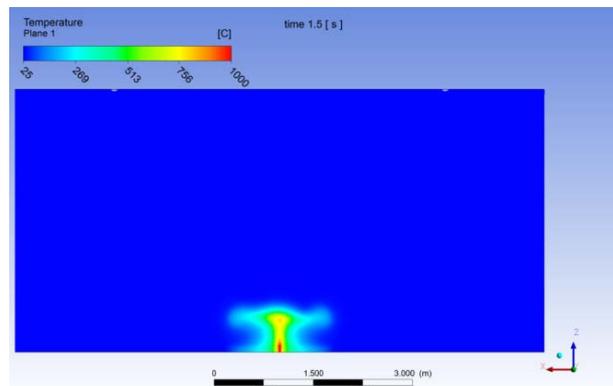
t=0s



t=0,5s



t=1s



t=1,5s

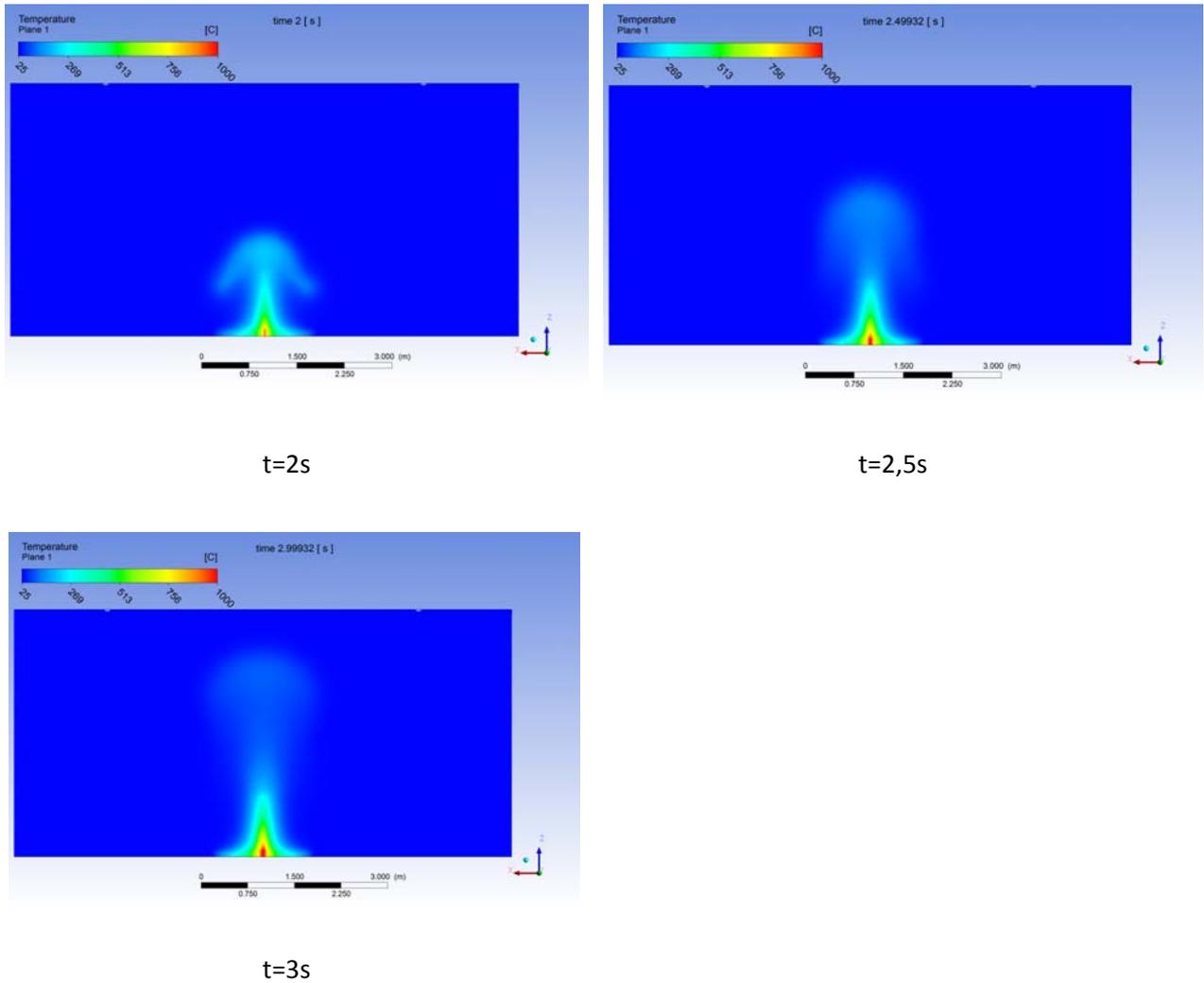
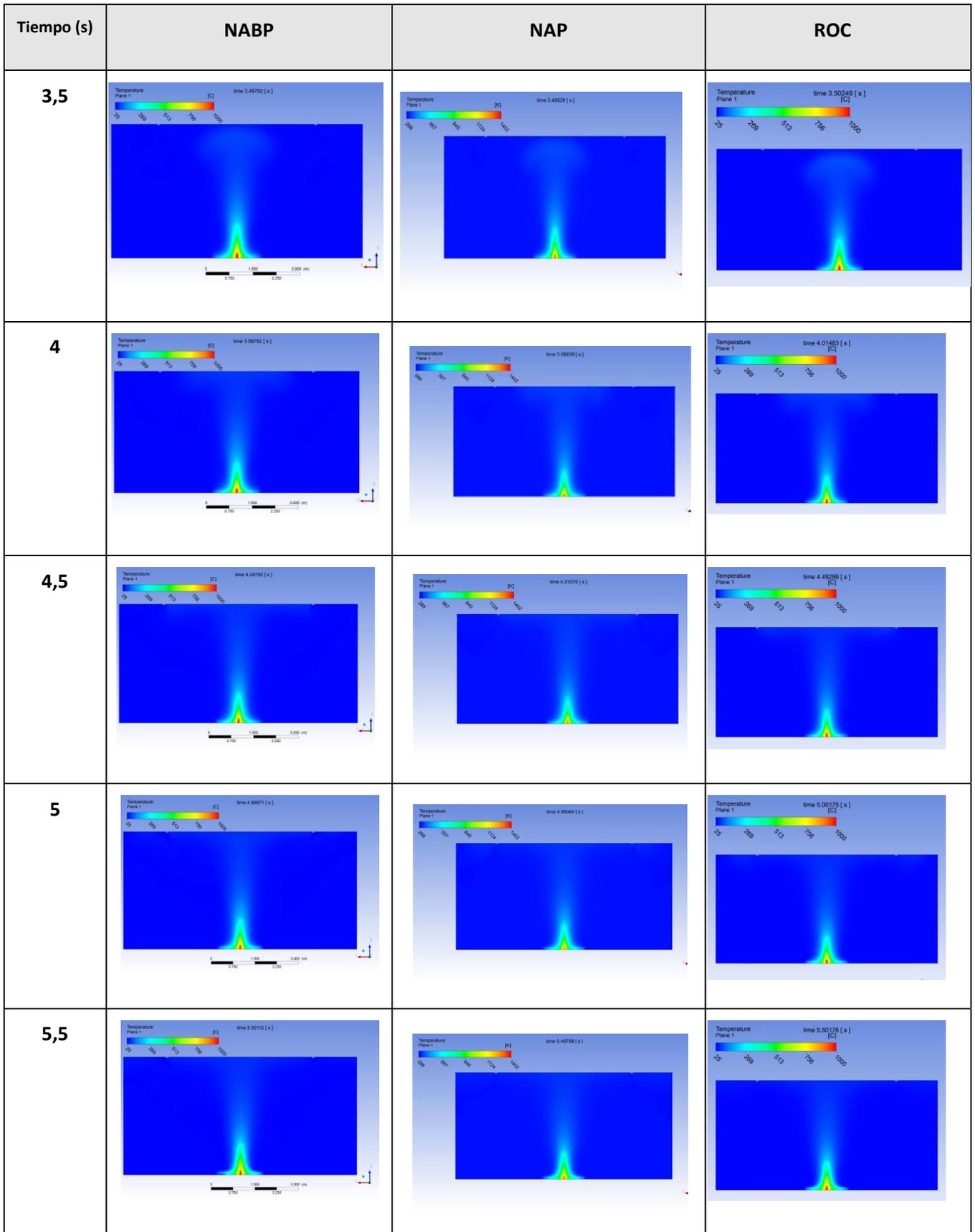


FIGURA 6.31 EFECTOS TÉRMICOS INICIALES DEL INCENDIO (TR)

En estas imágenes de la Figura 6.31 se puede apreciar la evolución inicial del efecto térmico del incendio. En ellas se muestra como empieza a modificarse la temperatura en el volumen del incendio. En el primer instante se genera de manera homogénea, en todo el volumen al que hemos asignado el incendio (junto al suelo del recinto). Posteriormente la evolución convectiva hace que el calor adquiera una forma de cono, que luego se mantiene estable.

A continuación, en la figura 6.32 se muestran los perfiles de temperatura de las simulaciones realizadas:



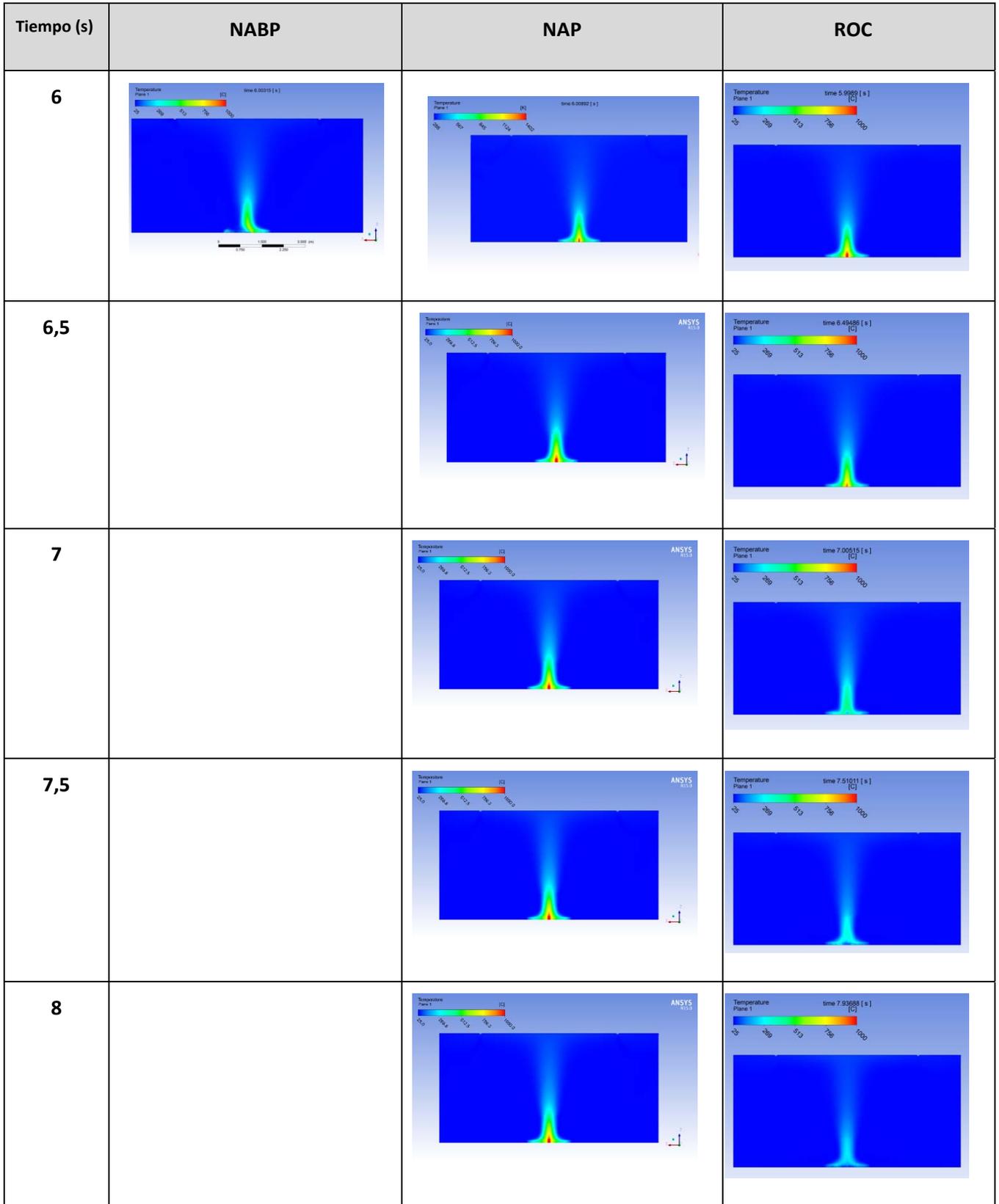
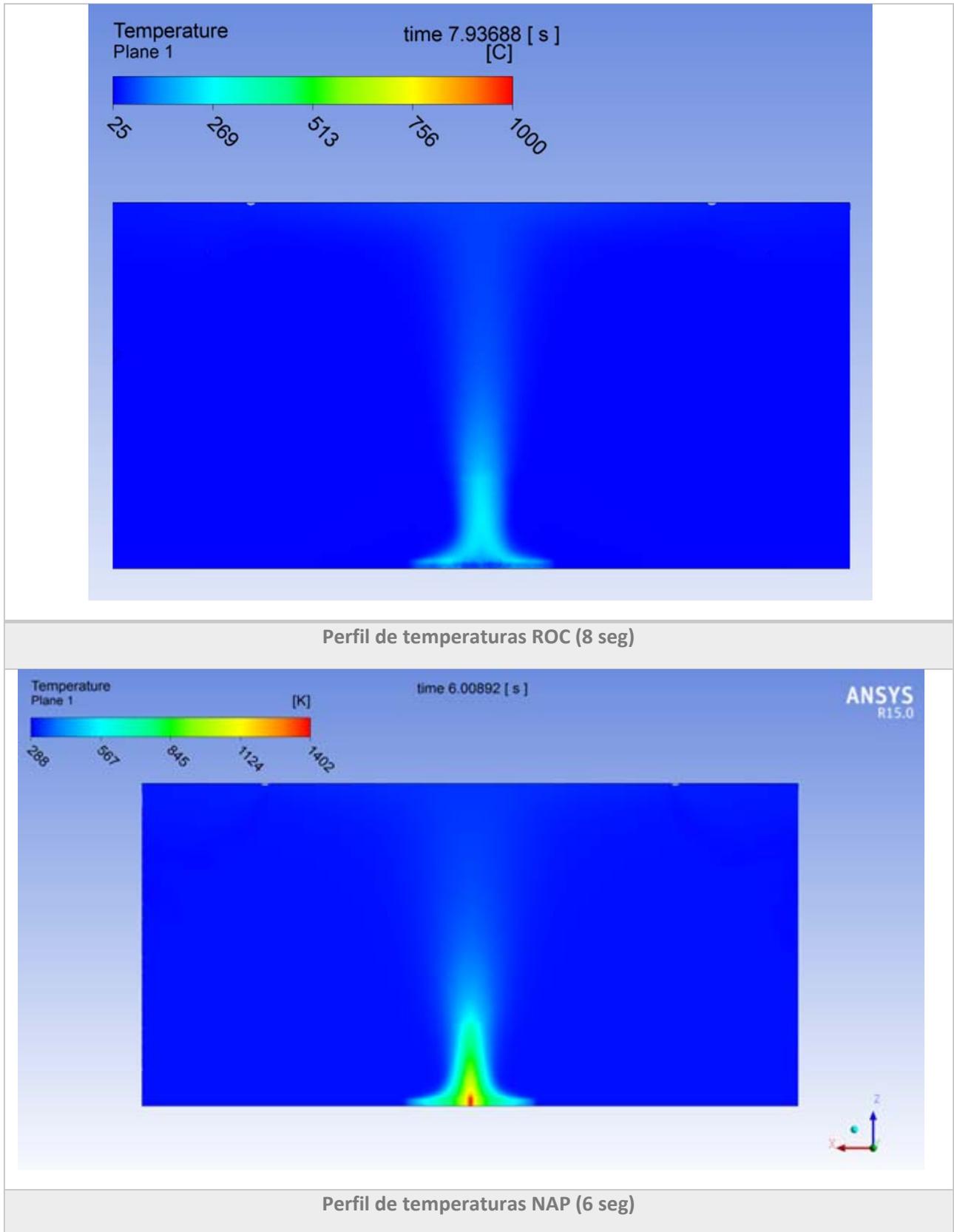
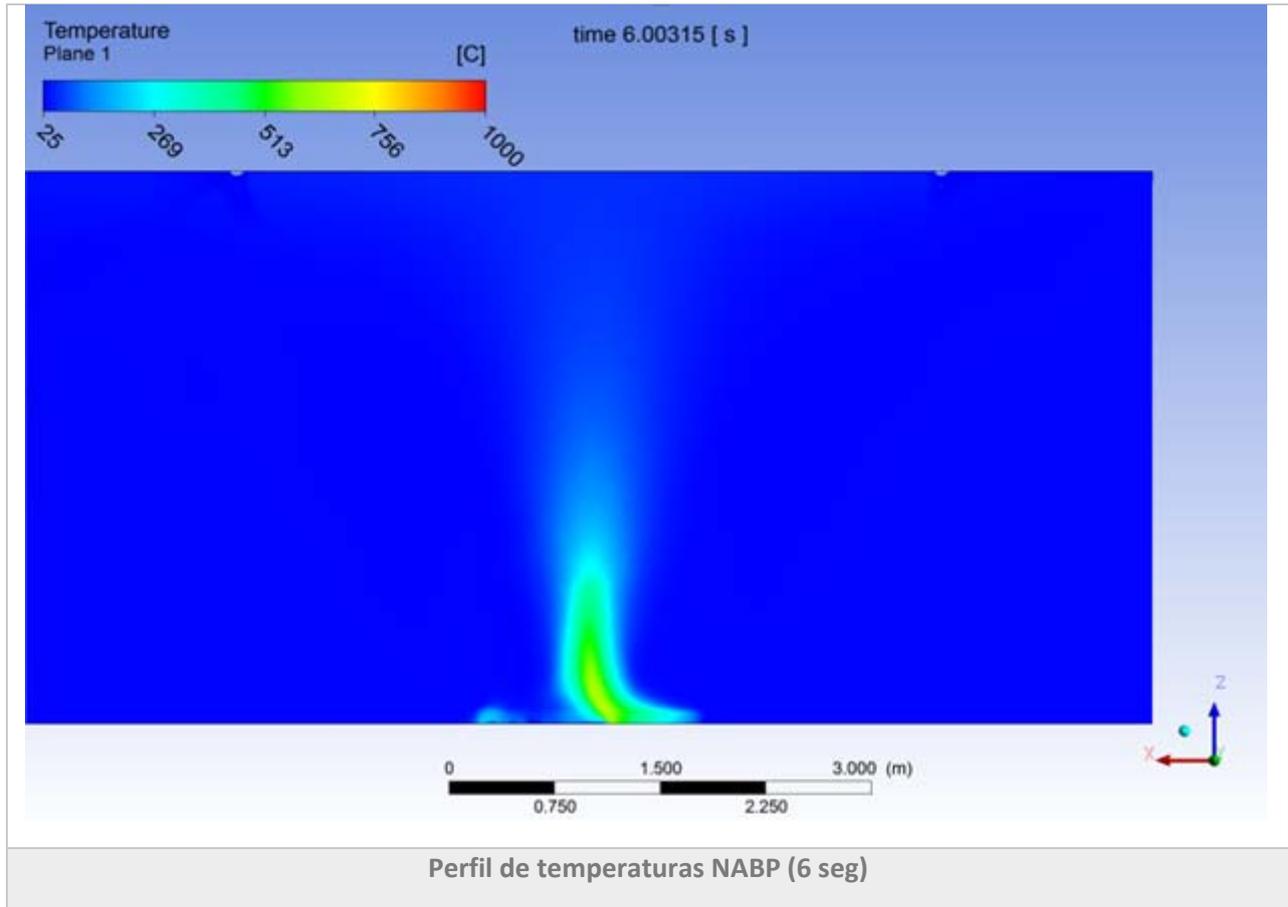


FIGURA 6.32 PERFILES DE TEMPERATURA PARA NABP NAP Y ROC

Seleccionamos (por su interés) las últimas imágenes que recogemos ampliadas:





Antes de comentar los detalles observados en estas baterías de simulaciones transitorias, se deben destacar dos aspectos importantes:

- ✓ La activación de los sistemas de extinción se ha producido a los 3 segundos del inicio del incendio. Esto persigue el objetivo de simular realmente un disparo de sistemas de extinción que actuarán bien por activación térmica, o bien por detección de humos (y en cualquier caso, después del inicio del incendio). Esto tiene implicaciones importantes, ya que el desarrollo progresivo del incendio aumenta los niveles de temperatura y eso afectará a la eficiencia de los sistemas de extinción empleados.
- ✓ La simulación transitoria del Nebulizador Autónomo de Baja Presión (NABP) no pudo avanzar más allá de los 6 segundos recogidos en las imágenes anteriores. Problemas de convergencia ,imposibles de solucionar sin realizar simplificaciones adicionales del problema, detuvieron la simulación en ese instante, haciendo imposible recuperar esa posición para avanzar a posteriori. Por lo tanto, sólo se ha podido evaluar la información obtenida hasta el segundo 6.

Como era de esperar, esta batería de simulaciones transitorias nos aporta resultados nuevos. En primer lugar, el control del incendio ya no es similar en los tres sistemas de extinción analizados:

- En los perfiles de temperatura puede notarse como el NAP no consigue controlar el nivel térmico del incendio en los 6 segundos que dura la simulación realizada (ni en los 3-4 segundos que se continuó la simulación de forma posterior). No obstante, antes de evaluar la posible eficacia del sistema por esta información, se deben considerar dos factores que son importantes: por un lado no parece razonable que el sistema no cumpla su función, puesto que estas instalaciones se comercializan con ese objetivo; y por otro lado, no se puede olvidar que la simulación estacionaria realizada anteriormente para este sistema reflejaba resultados térmicos muy satisfactorios . Es posible que el efecto convectivo sea importante y debido a que las corrientes de aire caliente desvían el chorro de partículas, este sistema tarde algunos segundos adicionales en cumplir su función de refrigeración.
- Por otro lado, el ROC tarda unos tres segundos en comenzar a refrigerar el incendio, y lo hace muy rápidamente hasta controlarlo (y estabilizarlo).
- Y por último, el NABP actúa con mayor rapidez que el rociador, y provoca una rápida disminución de la temperatura en la región del incendio.

Por otro lado, se debe considerar adicionalmente que el retraso en la actuación de los sistemas penaliza principalmente a los que generan gotas de menor tamaño. Es decir, el desarrollo inicial del incendio eleva las temperaturas iniciales, y aumenta las corrientes convectivas. Eso debería dificultar la actuación de los dos nebulizadores, y no debería afectar al rociador automático. Sin embargo, el NABP no se ve claramente afectado por este posible efecto adverso.

A continuación, se muestran en la Figura 6.33 las gráficas de la **evolución de la temperatura frente al tiempo a 10cm del suelo:**

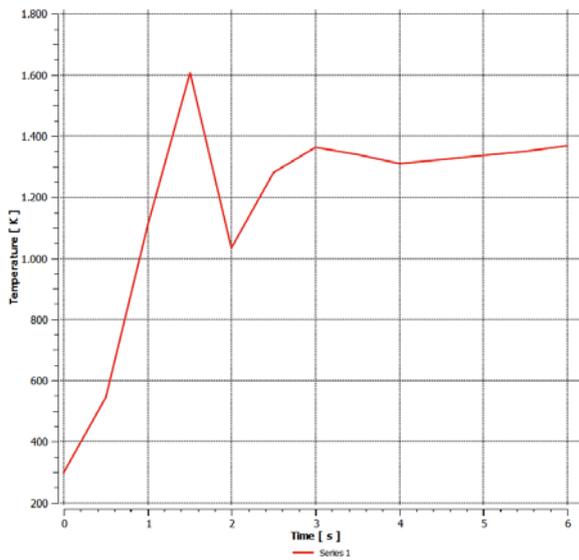


Gráfico de la temperatura frente al tiempo para el Incendio

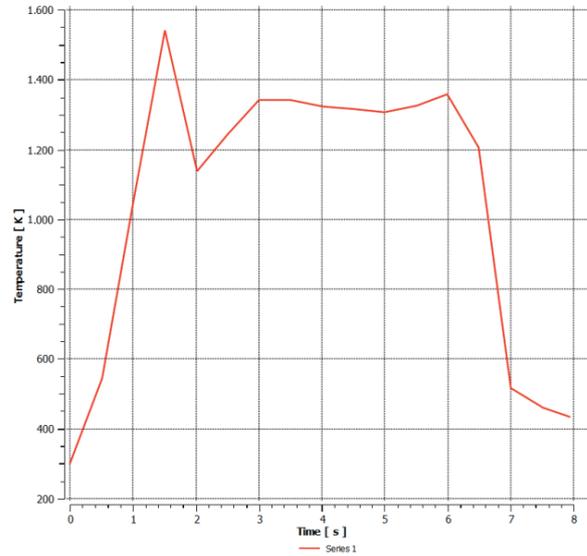


Gráfico de la temperatura frente al tiempo para el ROC

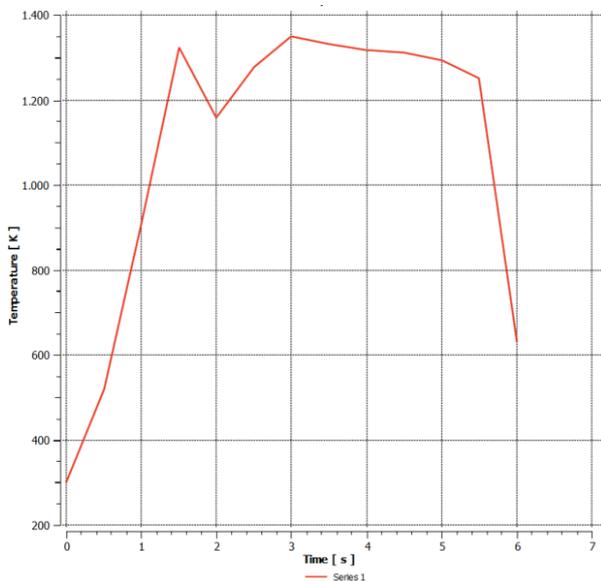


Gráfico de la temperatura frente al tiempo para el NABP

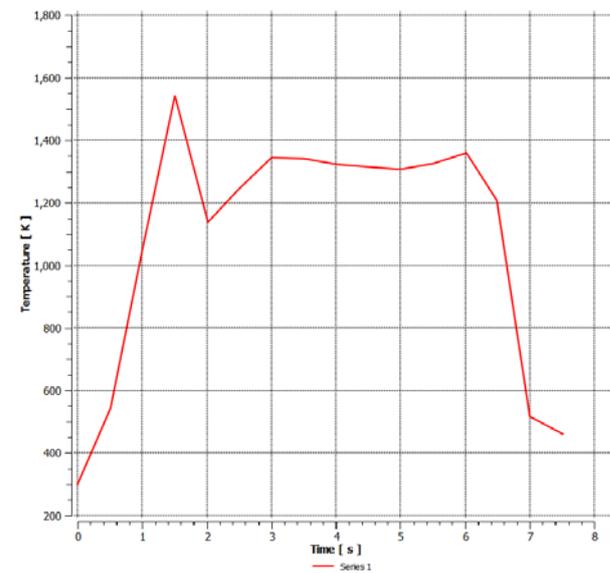


Gráfico de la temperatura frente al tiempo para el NAP

FIGURA 6.33 GRÁFICAS TEMPERATURA VS TIEMPO PARA INCENDIO, ROC, NAP, Y NABP

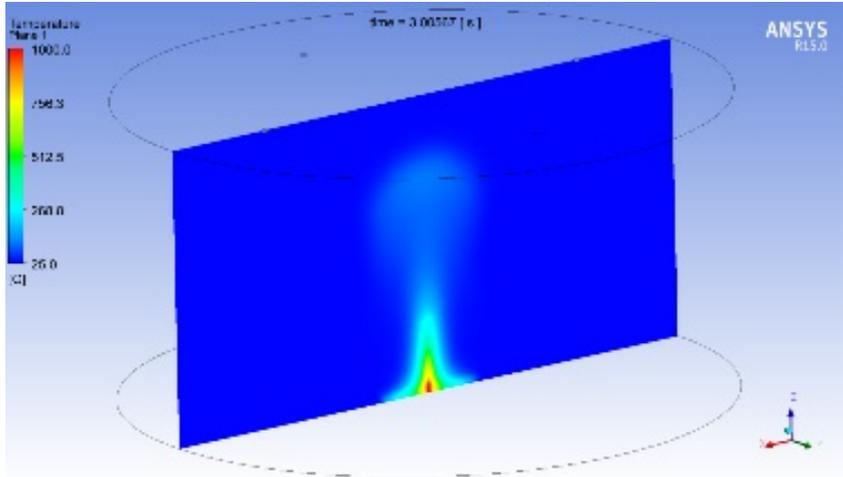
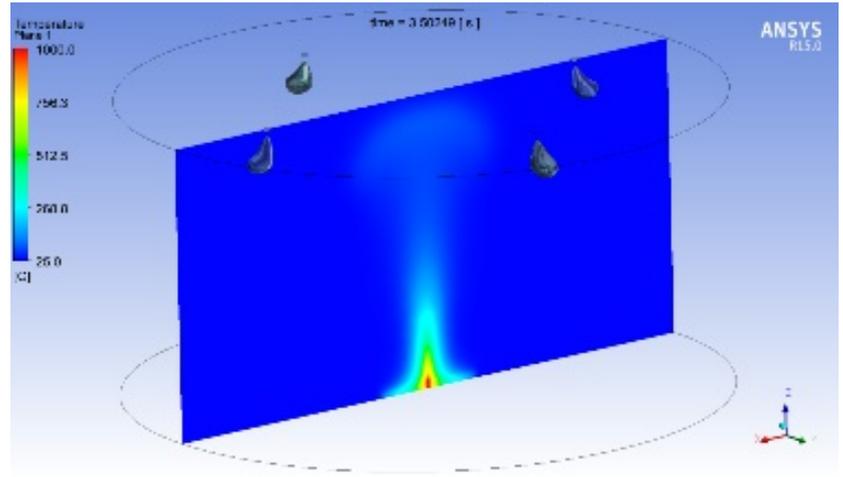
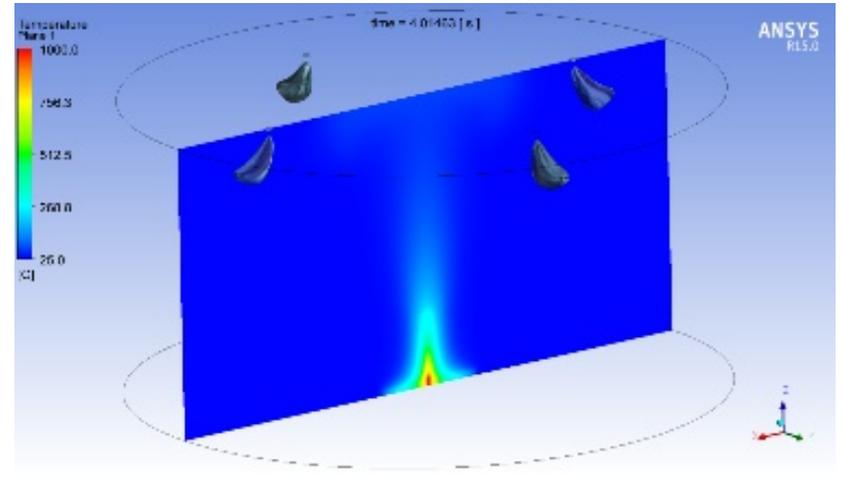
Se puede observar en la primera imagen de la Figura 6.33 (simulación del incendio sin actuación de ningún sistema de extinción) la temperatura aumenta hasta alcanzar un estado cuasi-estacionario a los 3 segundos aproximadamente. Desde ese momento la temperatura oscila ligeramente pero permanece estable en torno a los 1.300K.

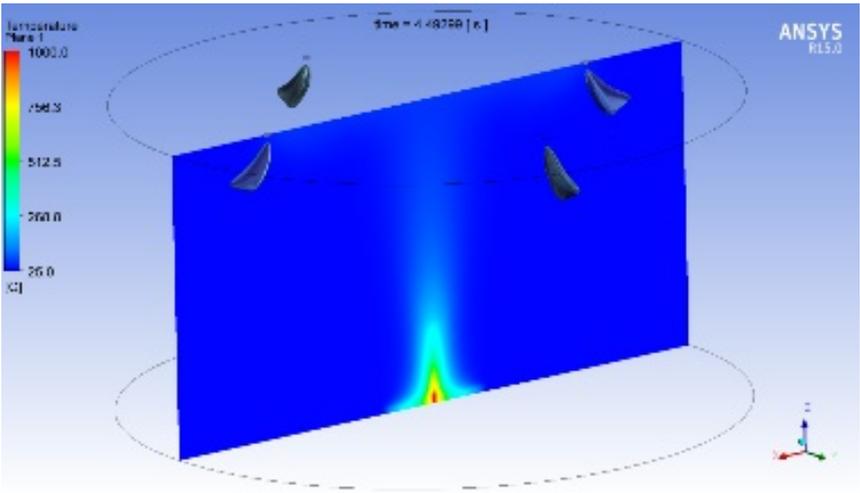
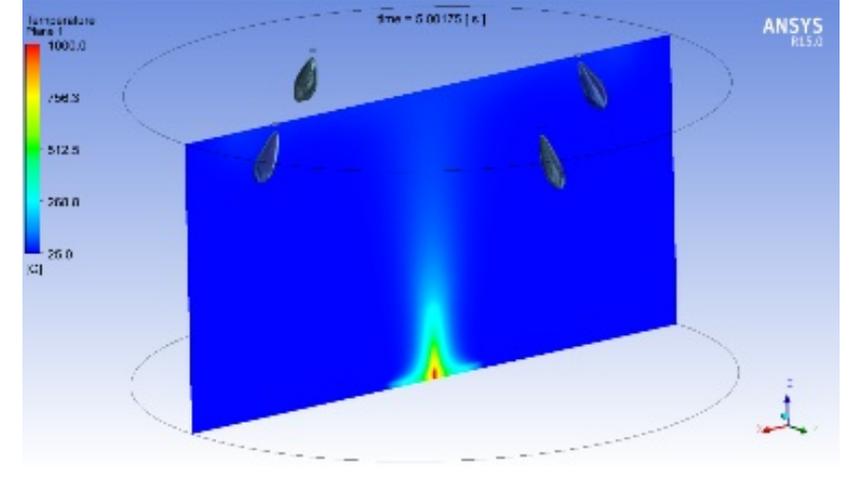
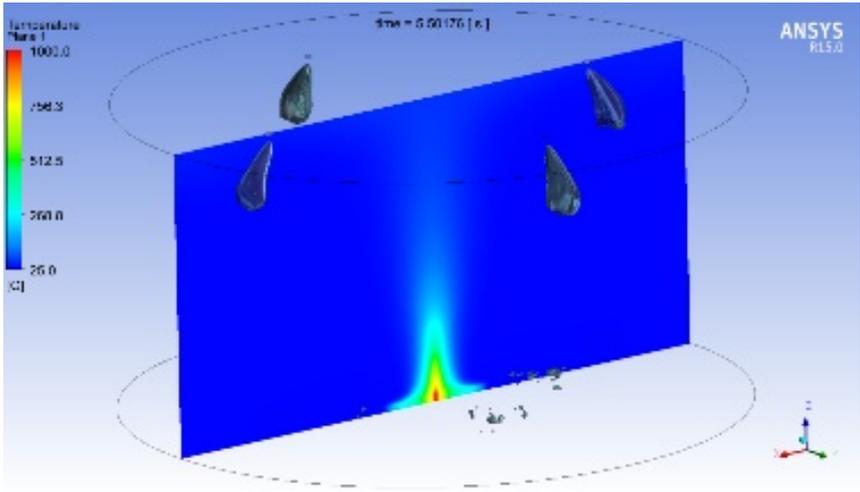
Analizando los tiempos de respuesta, se puede detectar que el NABP consigue su efecto de refrigeración más rápido que el ROC, ya que el NABP provoca el inicio del descenso térmico en el segundo 5,5 mientras que el RA lo hace en el segundo 6. Esto puede deberse al menor tamaño de partículas generadas por el NABP.

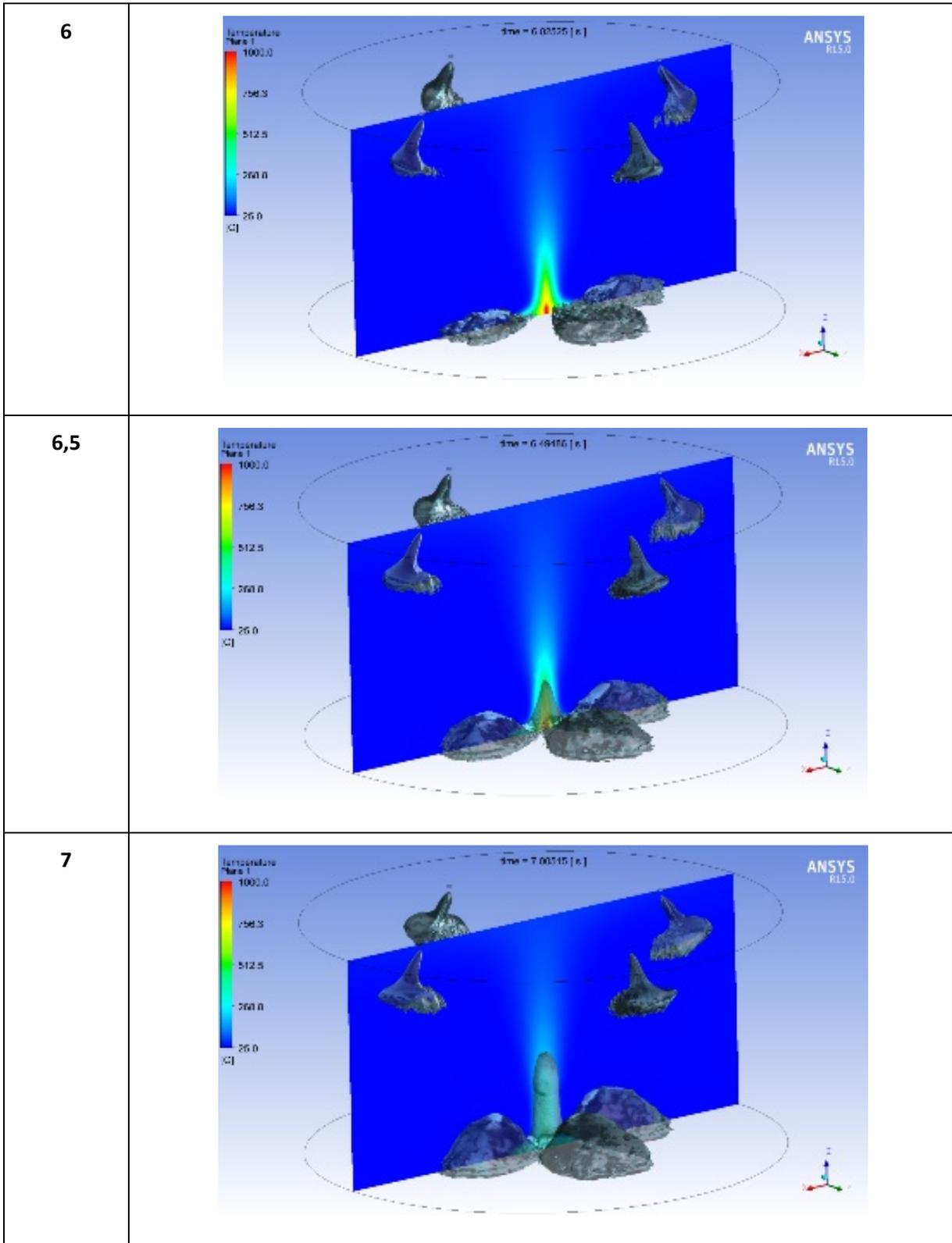
Lamentablemente, y según lo comentado anteriormente, NO SE PUDO SIMULAR MÁS ALLÁ DEL SEGUNDO 6 LA EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE EXTINCIÓN MEDIANTE EL NABP porque el modelo transitorio daba errores de convergencia. La simulación realizada permite comprobar cómo se alcanzan resultados de enfriamiento equivalentes al ROC, pero no se ha podido determinar si el enfriamiento continuaría después del segundo 7, o se estabilizaría a esa temperatura (como sucede con el ROC). Para resolver este problema sería necesario replantear las condiciones de la simulación, o buscar financiación externa que permita emplear equipos más potentes, lo que se deja para fases posteriores de la investigación, si se considera oportuno.

Por otro lado, aparece un efecto no esperado, y es que se puede ver que el NAP no consigue controlar térmicamente el incendio en los 8 segundos simulados. Si se considera que se trata de sistemas fiables, que se instalan con el objetivo de extinguir incendios en todo el mundo, y además, en la simulación estacionaria previa el efecto era positivo, se puede afirmar que posiblemente lo único que suceda es que el sistema es más lento en producir el enfriamiento que sus competidores. Y por eso el efecto térmico esperado no ha aparecido en los 8 primeros segundos. Esto puede deberse a la fuerza de las corrientes convectivas que arrastra las partículas de agua, potenciado por el efecto adverso que supone el retraso en la actuación de los sistemas de extinción.

A continuación se muestran en las Figuras 6.34, 6.35, y 6.36 los resultados completos (para cada paso de tiempo 0,5s) de los tres sistemas de extinción simulados

Perfiles de temperatura y fracción másica de vapor de agua	
Tiempo (s)	ROC
3	
3,5	
4	

<p>4,5</p>	
<p>5</p>	
<p>5,5</p>	



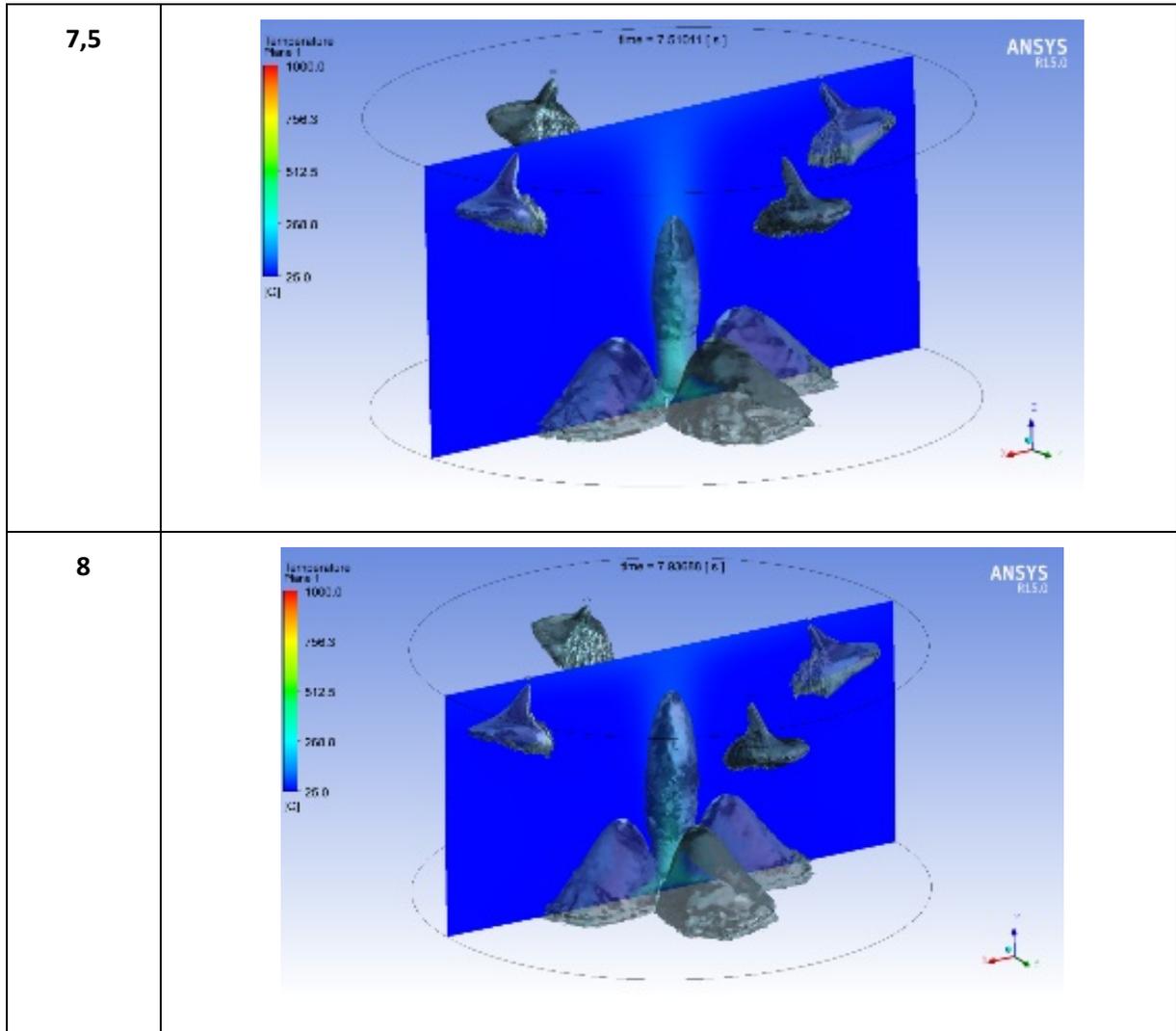
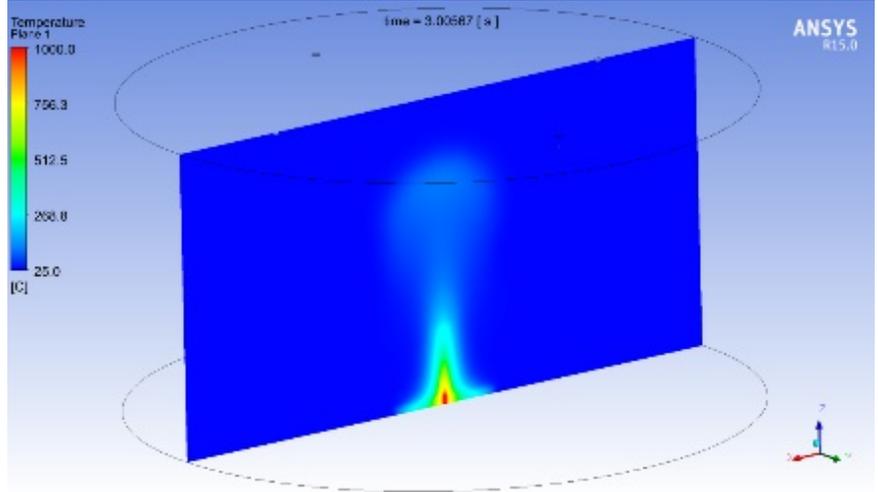
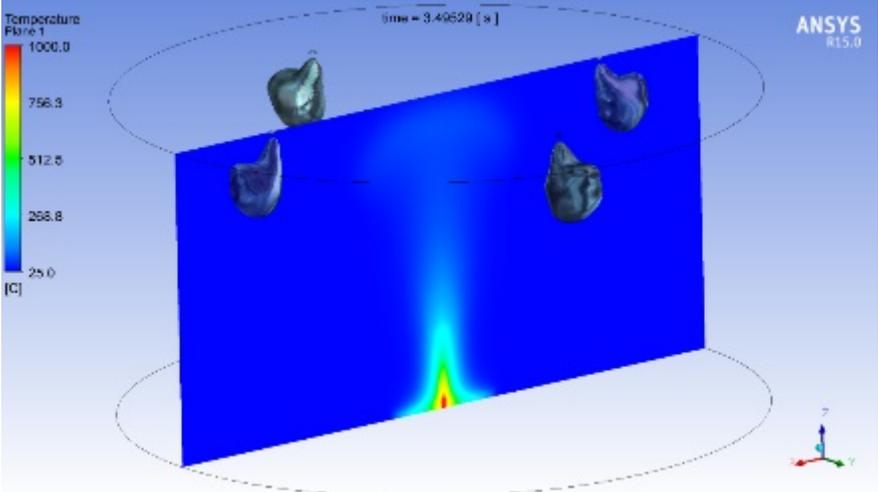
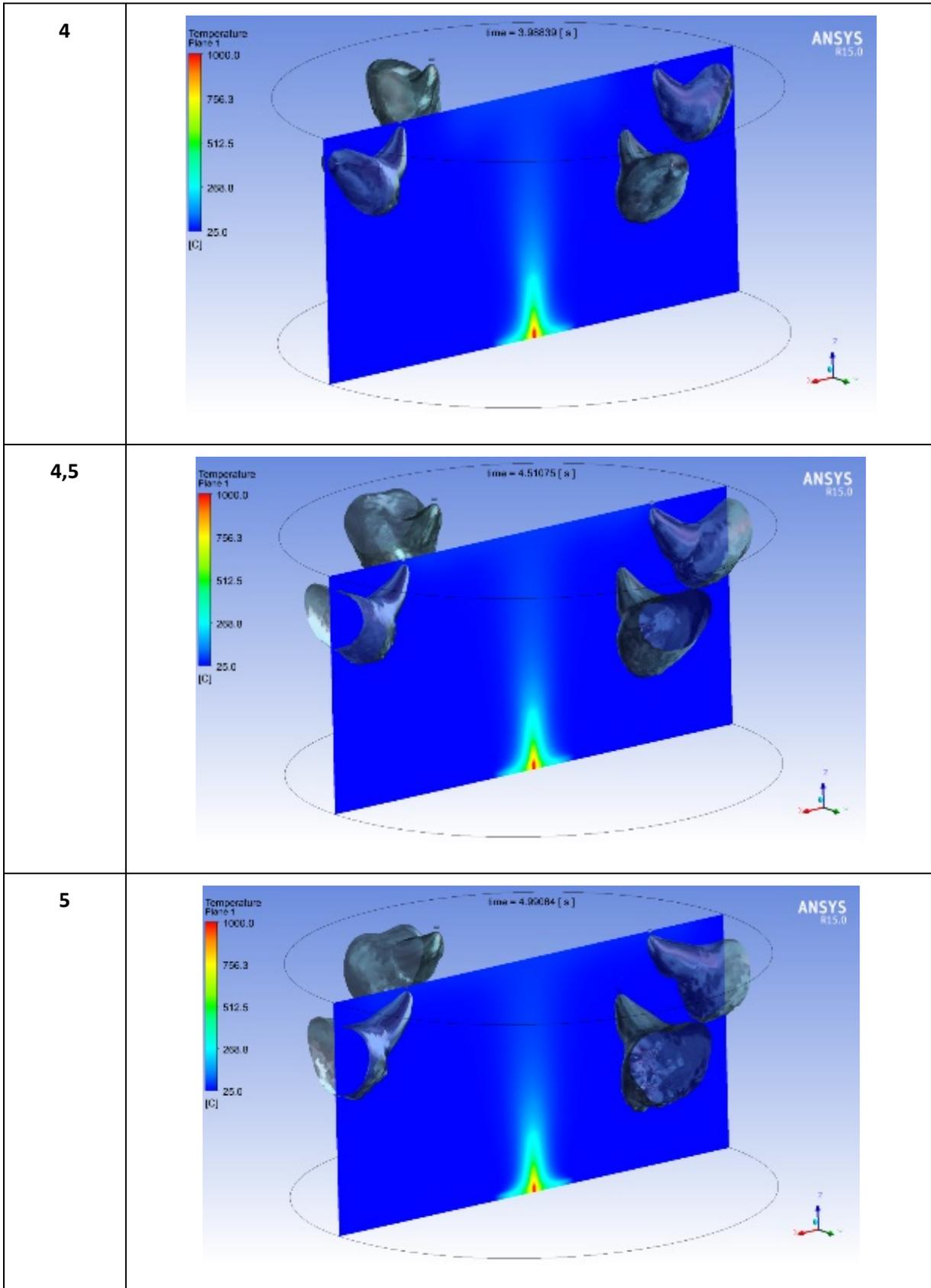
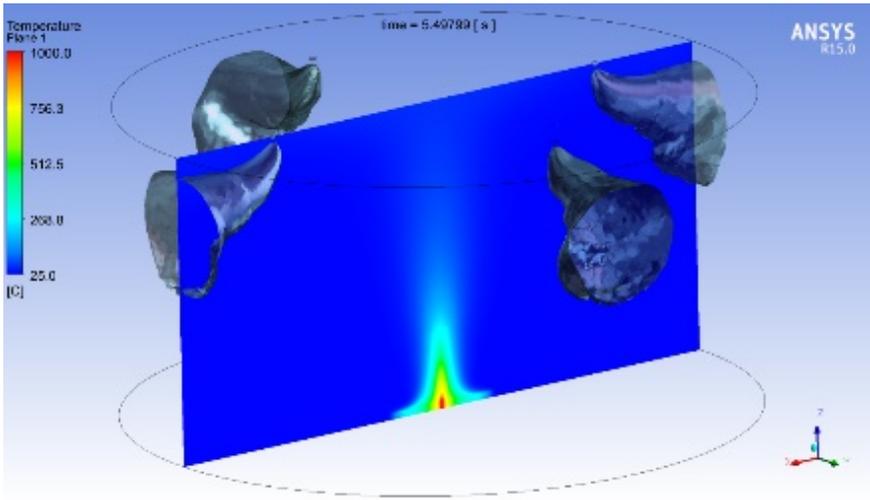
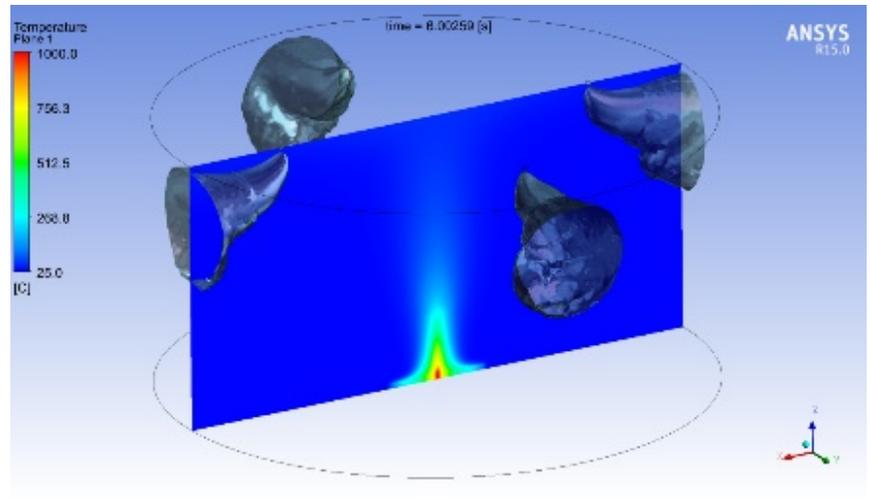
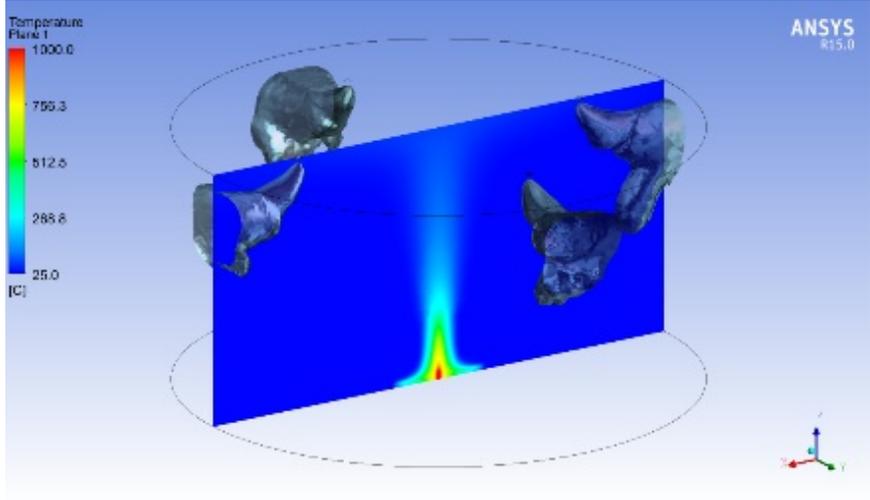


FIGURA 6.34 PERFILES DE TEMPERATURA Y FRACCIÓN MÁSCA DE VAPOR DE AGUA PARA ROC

Perfiles de temperatura y fracción másica de vapor de agua	
Tiempo (s)	NAP
3	
3,5	



<p>5,5</p>	
<p>6</p>	
<p>6,5</p>	

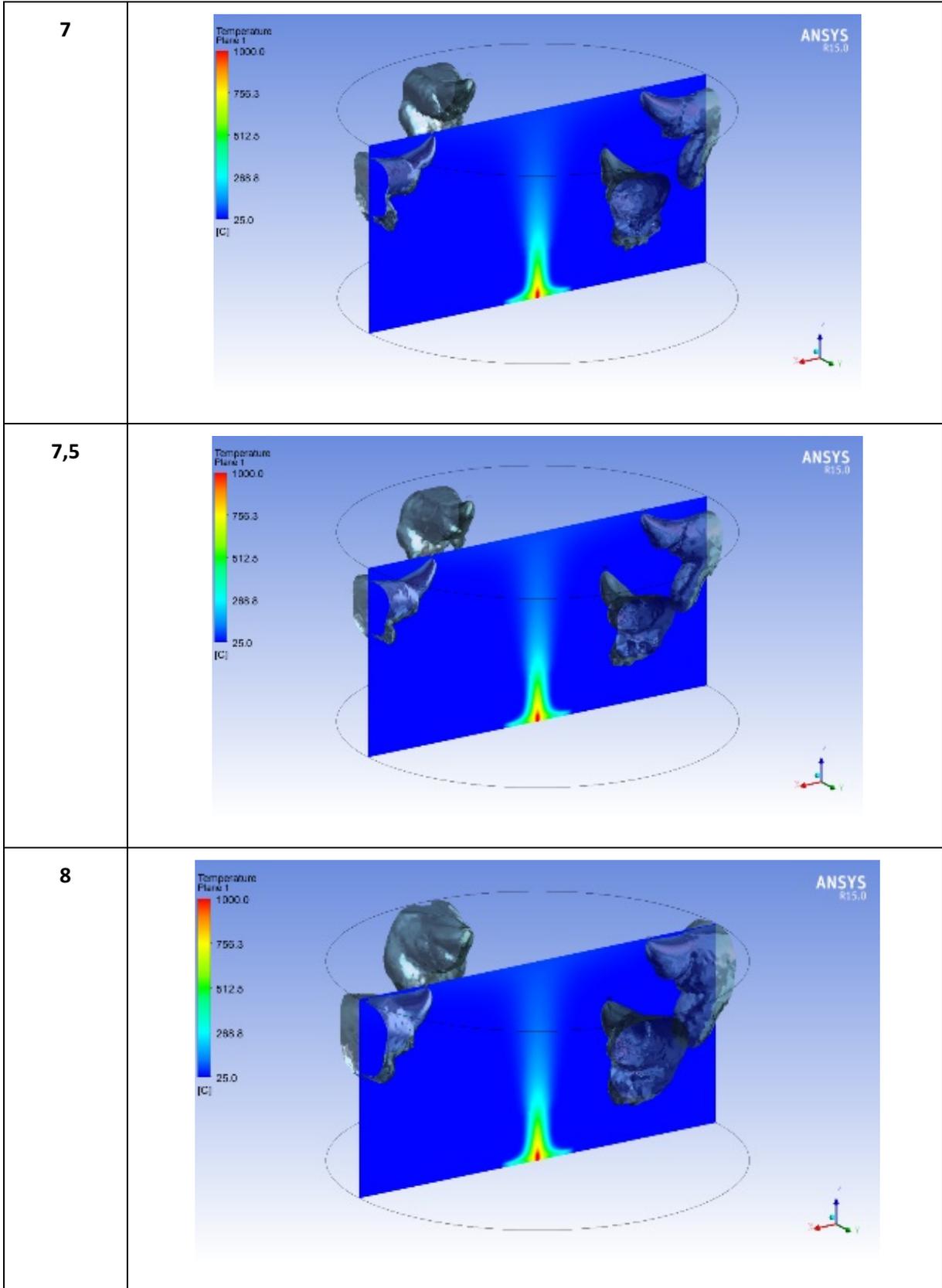
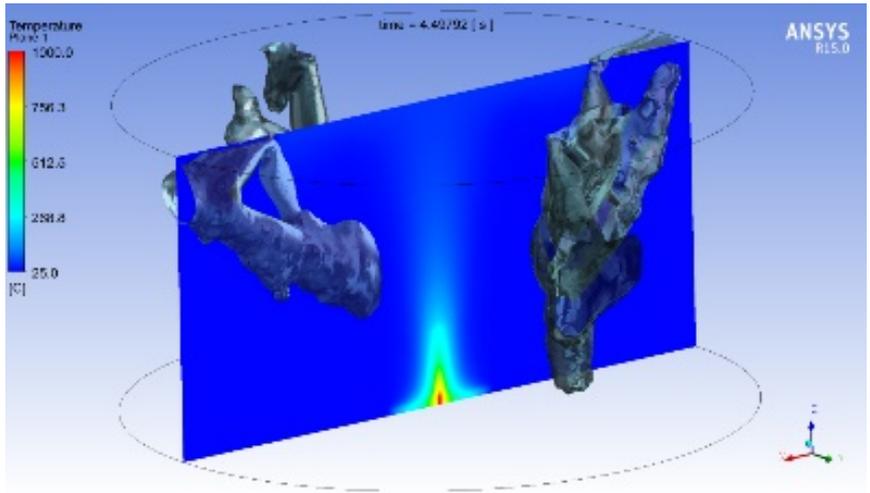
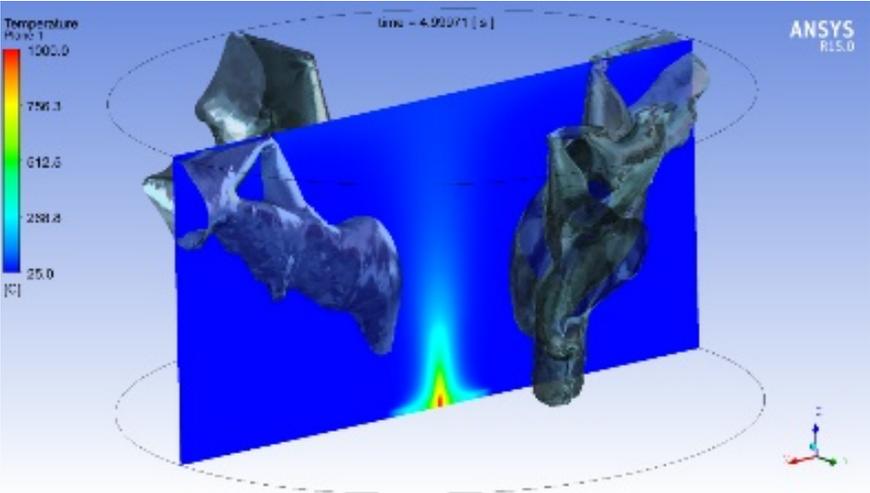
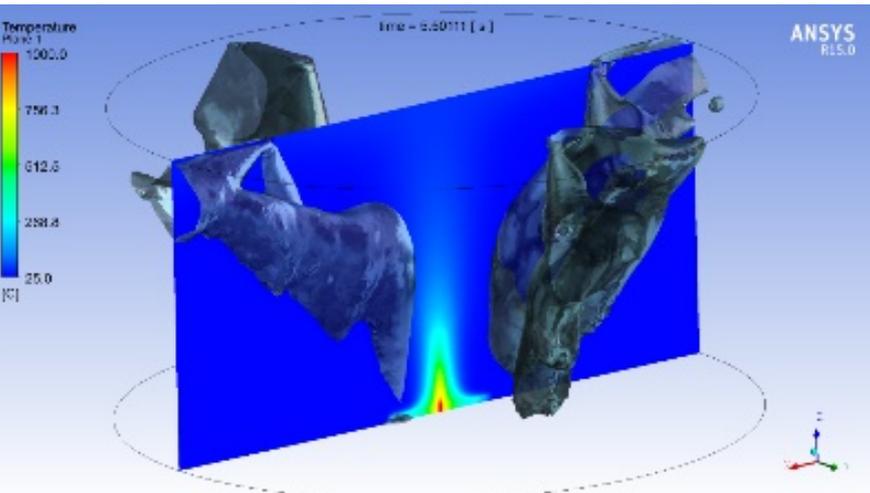


FIGURA 6.35 PERFILES DE TEMPERATURA Y FRACCIÓN MÁSCICA DE VAPOR DE AGUA PARA NAP

Perfiles de temperatura y fracción másica de vapor de agua	
Tiempo (s)	NABP
3	
3,5	
4	

<p>4,5</p>	
<p>5</p>	
<p>5,5</p>	

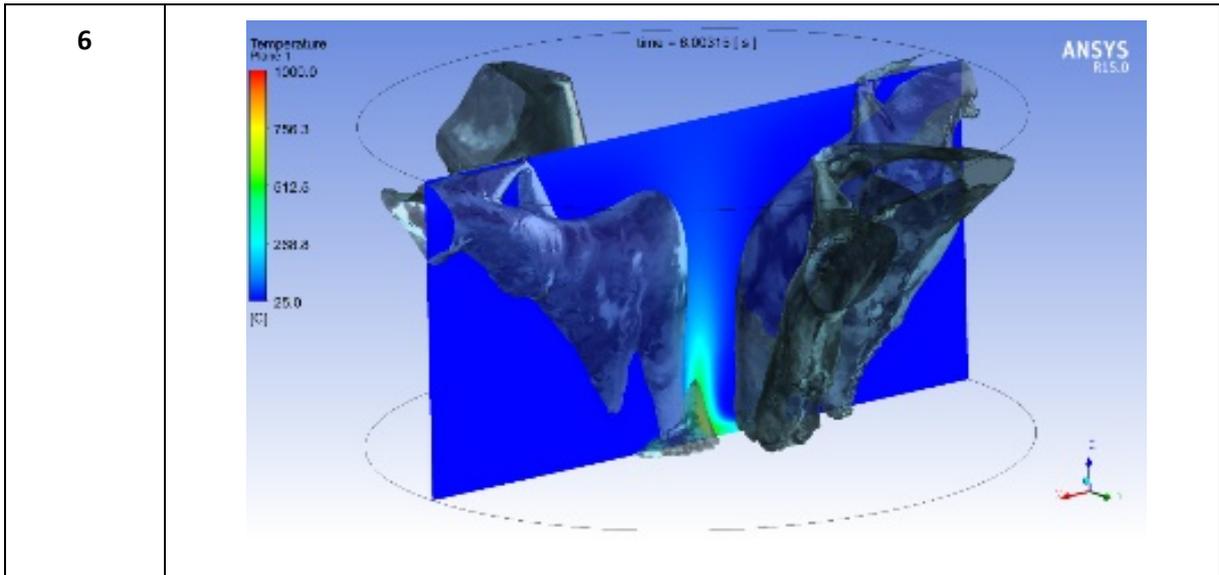


FIGURA 6.36 PERFILES DE TEMPERATURA Y FRACCIÓN MÁSCICA DE VAPOR DE AGUA PARA NABP

Estas imágenes de la Figura 6.36 muestran la formación de vapor como consecuencia de la evaporación de agua líquida. Puede verse como cuanto menores son las partículas más rápido se forma el vapor. En el segundo 3,5 puede apreciarse como el NAP y el NABP forman más vapor que el ROC, lo que puede implicar una refrigeración más rápida. El NAP tiene partículas muy pequeñas que parece que no son capaces de vencer a las corrientes de convección, por lo que son arrastradas hacia afuera sin llegar a sofocar el incendio. El NABP forma mucho vapor, lo que indica una mayor disipación de calor. El vapor llega al incendio en el segundo 6, provocando un descenso de la temperatura. Por último, el ROC tarda más en llegar al foco del incendio, pero lo hace de una manera más homogénea.

6.2.4.3. Conclusiones

En los resultados puede apreciarse como tanto el ROC como el NABP son capaces de controlar el incendio (efecto térmico), mientras que el NAP no lo consigue controlar. Como ya se ha comentado los sistemas de nebulización a alta presión se instalan habitualmente, y son considerados muy fiables. Lo más probable es que el efecto de las corrientes convectivas ascendentes retrase el efecto de refrigeración de este sistema. Tal y como se vio en la simulación en régimen estacionario, el NAP sí consigue controlar el incendio, por lo que sería deseable prolongar esta simulación en transitorio en fases próximas de este estudio.

La principal conclusión obtenida de la última batería de simulaciones (en estado transitorio) es la confirmación de que con las condiciones de diseño definidas para el Nebulizador Autónomo de Baja Presión puede generar una refrigeración y control del incendio similar a la de un sistema de rociadores automáticos.

6.3. RESULTADOS OBTENIDOS

Las simulaciones estacionarias han permitido (una vez ajustado el modelo de combustión adecuado) modificar el Diseño del Nebulizador Autónomo de Baja Presión (NABP), para ajustar sus características de modo que sus prestaciones sean las deseadas.

Ante la complejidad del modelo, el análisis por comparación con otros sistemas de extinción existentes en el mercado ha resultado muy adecuado, ya que ha permitido contrastar eficacias, y detectar y descartar posibles errores del modelo de simulación.

Se ha seguido una estrategia de baterías de simulaciones similares a las baterías de ensayos que se realizan a escala real para las aprobaciones de sistemas de extinción por agua nebulizada a alta presión.

Los resultados térmicos del NABP han sido muy favorables (al menos es tan efectivo como el sistema de rociadores automáticos para la misma configuración). Lamentablemente el Nebulizador de Alta Presión (NAP) no ha arrojado datos suficientemente fiables como para usarlos de referencia. Las limitaciones de tiempo para desarrollar todas las simulaciones de este estudio han impedido que se pueda evaluar el posible retraso en la actuación de este sistema. Se propone continuar la simulación en régimen transitorio para evaluarlo, en caso de que se considere necesario para próximas fases de este estudio.

Respecto a los aspectos no analizados, es importante destacar la generación y distribución de vapor de agua que se produce con el NABP. El cambio de fase es muy rápido (por tratarse de partículas de reducido tamaño), y además, tienden a ubicarse junto a la base del incendio. Esto potencia los efectos de extinción del sistema de agua nebulizada a baja presión (mediante la sofocación –desplazamiento del oxígeno en las cercanías del incendio- y el efecto de pantalla frente a la radiación).

Sería deseable poder analizar estos efectos en estudios posteriores. Al igual que sería muy interesante poder validar los resultados del enfriamiento obtenido por el NABP, para ver si el efecto es aún mayor con el paso de los segundos.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha propuesto en esta Tesis Doctoral un procedimiento (sistema) para la generación de agua nebulizada a baja presión, analizando la viabilidad del mismo en su aplicación para la extinción de incendios.

Para ello, se ha desarrollado en una primera etapa, un detallado estudio de la técnica para poder concretar algunos de los aspectos del diseño del sistema. Y además, posicionar este procedimiento de generación de agua nebulizada en su entorno, según los criterios técnicos y las soluciones existentes en el campo actual de la ingeniería de seguridad contra incendios. En una segunda etapa, se ha realizado el análisis dinámico y energético del comportamiento del agua en el proceso. Y por último, empleando herramientas de simulación computacional se ha realizado un análisis CFD para comparar el desempeño del sistema frente a un incendio, respecto al comportamiento que tendrían en el mismo escenario otros dos sistemas de extinción presentes actualmente en el mercado: los rociadores automáticos, y los sistemas de agua nebulizada a alta presión.

Tras el análisis de todos los resultados, se puede concluir que el sistema propuesto es viable, y además consigue para los escenarios de incendio simulados, unos resultados de refrigeración (y por tanto, de extinción) similares a los otros sistemas de extinción de incendios estudiados. El uso del agua nebulizada, descargada mediante el nuevo sistema propuesto supone además algunas ventajas adicionales que pueden contribuir de forma significativa para conseguir la extinción deseada. Principalmente se trata del efecto que provoca la evaporación del agua junto a la base del incendio (muy potenciado según los resultados obtenidos) que por un lado permite realizar un efecto pantalla contra la propagación por radiación, y por otro, además supone un potente efecto de sofocación frente a la combustión.

Lamentablemente estos dos efectos han quedado fuera del alcance del presente estudio, al igual que otro efecto importante para confirmar la eficacia del nuevo sistema: la posibilidad de sobreventilación del incendio (y por tanto, aceleración de la combustión) provocada por las corrientes de aire generadas por el nebulizador. Según las referencias consultadas, este efecto no debería aparecer principalmente porque los incendios en fase temprana como los simulados (actuación del fusible a 70-80°C) suelen ser siempre muy ventilados (sobra O₂). Por lo tanto, en estos casos, no debería existir mejora estequiométrica en las reacciones de combustión por aumentar la ventilación.

Por último, tampoco se ha podido evaluar otro efecto favorable como es la alta dilución de partículas de humo en las pequeñas gotas generadas por el sistema de agua nebulizada. Este efecto está presente en otros sistemas de extinción por agua nebulizada, pero no se ha analizado en esta investigación para simplificar el estudio y las simulaciones computacionales. Sería deseable analizarlo posteriormente, puesto que este efecto aumenta mucho la seguridad de las personas (evitando efectos adversos por toxicidad, y facilitando la evacuación al mejorar la visibilidad).

8. PRÓXIMAS FASES DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio ha desarrollado los objetivos definidos en su alcance inicial, pero que al haber obtenido resultados positivos, y resultar posible su aplicación (en este y otros ámbitos), sería deseable poder continuar la investigación para poder completar algunos aspectos. Para finalizar el análisis de los aspectos relacionados con la dinámica del sistema y su eficacia en la refrigeración del incendio, sería deseable emplear otras herramientas de simulación CFD, para poder validar los resultados obtenidos en el presente estudio. De entre las alternativas existentes, FDS y OPENFOAM son buenas opciones que se deben considerar.

Por otro lado, se puede continuar y profundizar en el análisis de los aspectos que no se han desarrollado con detalle en este estudio, y que permitirían definir la capacidad de extinción completa del sistema de agua nebulizada a baja presión (con todas sus ventajas). Principalmente, se trataría de estudiar:

- ✓ El efecto de sofocación que produce el agua en fase de vapor ubicada justo sobre el incendio (efecto muy favorable para la extinción)
- ✓ El efecto que ejerce ese vapor junto a la base del incendio como pantalla contra la radiación (efecto muy favorable para evitar la propagación)
- ✓ El fenómeno de absorción de partículas generadas por el incendio (inquemados y otros restos de combustión, así como gases que podrían resultar tóxicos). Se trata de un efecto muy favorable, ya que minimiza los posibles daños generados por el incendio (sobre materiales y productos ubicados en las cercanías –sin haber sido afectados térmicamente por el incendio- y, sobre todo, para la seguridad de las personas).
- ✓ El posible efecto de aceleración de la combustión, generado por la sobreventilación que pueden producir las corrientes de aire generadas por el sistema de agua nebulizada a baja presión. Este efecto puede resultar desfavorable, si realmente afecta al proceso de combustión (aunque inicialmente no parece probable, ya que el escenario de incendio considerado estaba bien ventilado, y eso difícilmente genera reacciones parciales de combustión que pudieran verse afectadas por una ventilación adicional).

Y por último, y si todos los análisis previos siguen resultando favorables, desarrollo de un prototipo y propuesta para realización de ensayos a escala real.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 CRONOLOGÍA DE LA NORMATIVA PCI EN ESPAÑA	12
FIGURA 2.2 ARTÍCULO 5 DEL CTE. SOLUCIONES PRESTACIONALES	14
FIGURA 3.1 EL TRIÁNGULO DEL FUEGO	23
FIGURA 3.2 ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN DE ROCIADORES AUTOMÁTICOS	29
FIGURA 3.3 GRÁFICO DE CAUSAS DE FALLO EN INSTALACIONES DE ROCIADORES	31
FIGURA 3.4 TIPOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO.....	36
FIGURA 3.5 ROCIADOR ESFR	38
FIGURA 3.6 DIFUSOR AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN EN DESCARGA.....	41
FIGURA 3.7 DIFUSORES AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN.....	42
FIGURA 3.8 GRUPO ELÉCTRICO AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN.....	43
FIGURA 3.9 DIFUSOR ABIERTO AGUA NEBULIZADA ALTA PRESIÓN	45
FIGURA 3.10 ENSAYO DE EFICACIA PARA RIESGO ORDINARIO	48
FIGURA 3.11 DIFUSOR DE AGUA NEBULIZADA A BAJA PRESIÓN VS. ROCIADOR AUTOMÁTICO	49
FIGURA 3.12 PATENTES DE BOQUILLAS NEBULIZADORAS (MARIOFF Y GRINELL)	51
FIGURA 3.13 PATENTE DE BOQUILLA NEBULIZADORA (OTROS USOS)	52
FIGURA 3.14 PATENTE DE SISTEMA DE GENERACIÓN DE GOTAS ULTRAFINAS PARA EXTINCIÓN	52
FIGURA 3.15 ESQUEMA MOSTRANDO UN MODELO ZONAL	54
FIGURA 3.16 GEOMETRÍA CFD DE ESTACIÓN DE METRO (cortesía de ANALISIS-DSC)	57
FIGURA 3.17 EJEMPLO DE MALLADO CFD HÍBRIDO PARA CAPA LÍMITE (cortesía de ANALISIS-DSC)	58
FIGURA 3.18 LÍNEAS DE CORRIENTE PRODUCIDAS POR JET-FAN EN TÚNEL (cortesía de ANALISIS-DSC) .	61
FIGURA 4.1 ESQUEMA DEL SISTEMA PROPUESTO	62
FIGURA 5.1 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR LAS PARTÍCULAS DE AIRE	66
FIGURA 5.2 EVOLUCIÓN (AVANCE) DEL CHORRO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	67
FIGURA 5.3 DISTANCIAS RECORRIDAS POR AIRE Y GOTA	68
FIGURA 5.4 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR LAS PARTÍCULAS DE AIRE	68
FIGURA 6.1 EJEMPLO DE CONVERGENCIA PARA UNA SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO	71
FIGURA 6.2 EJEMPLO DE CONVERGENCIA PARA UNA SIMULACIÓN EN TRANSITORIO.....	73
FIGURA 6.3 PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA	74
FIGURA 6.4 SELECCIÓN DE MODELOS EMPLEADOS EN LA FASE WATER (GOTAS DE AGUA LÍQUIDA).....	76
FIGURA 6.5 – PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DEL MODELO DE EVAPORACIÓN	77

FIGURA 6.6 PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIÓN	86
FIGURA 6.7 MALLADO DEL RECINTO	88
FIGURA 6.8 CONDICIONES DE CONTORNO	88
FIGURA 6.9 COMPARACION DE PERFILES DE TEMPERATURA PARA ROC-NABP-NAP	90
FIGURA 6.10 GRÁFICA COMPARTIVA DE PERFILES DE TEMPERATURA PARA ROC-NABP-NAP.....	91
FIGURA 6.11 FRACCION MÁSCICA DE AGUA LIQUIDA PARA DISTINTOS SISTEMAS DE EXTINCION.....	92
FIGURA 6.12 FRACCION MÁSCICA DE AGUA VAPOR PARA DISTINTOS SISTEMAS DE EXTINCION.....	93
FIGURA 6.13 PESTAÑA PARA ACTIVACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA	97
FIGURA 6.14 MALLADO DEL RECINTO	98
FIGURA 6.15 CONDICIONES DE CONTORNO	98
FIGURA 6.16 PERFILES DE TEMPERATURAS PARA ROC, NAP,NABP	101
FIGURA 6.17 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC, NAP,NABP	102
FIGURA 6.18 FRACCION MASICA DE AGUA LÍQUIDA PARA ROC, NAP,NABP	104
FIGURA 6.19 FRACCION MASICA DE VAPOR DE AGUA PARA ROC, NAP,NABP	105
FIGURA 6.20 CONDICIONES DE CONTORNO	106
FIGURA 6.21 MALLADO DEL RECINTO	109
FIGURA 6.22 PERFILES DE TEMPERATURAS PARA ROC, NAP,NABP	112
FIGURA 6.23 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC, NAP,NABP	113
FIGURA 6.24 FRACCION MASICA DE AGUA LIQUIDA PARA ROC, NAP,NABP	114
FIGURA 6.25 FRACCION MASICA DE VAPOR DE AGUA LIQUIDA PARA ROC, NAP,NABP	116
FIGURA 6.26 PERFIL DE TEMPERATURA DEL NABP A 10 M/S	117
FIGURA 6.27 GRÁFICA TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC NAP NABP	118
FIGURA 6.28 FRACCION MASICA DE VAPOR DE AGUA FORMADO POR NABP A 10 M/S	119
FIGURA 6.29 MALLADO DEL RECINTO	122
FIGURA 6.30 CONDICIONES DE CONTORNO	123
FIGURA 6.31 EFECTOS TÉRMICOS INICIALES DEL INCENDIO (TR)	125
FIGURA 6.32 PERFILES DE TEMPERATURA PARA NABP NAP Y ROC	127
FIGURA 6.33 GRÁFICAS TEMPERATURA VS TIEMPO PARA INCENDIO, ROC, NAP, Y NABP	131
FIGURA 6.34 PERFILES DE TEMPERATURA Y FRACCIÓN MÁSCICA DE VAPOR DE AGUA PARA ROC.....	136
FIGURA 6.35 PERFILES DE TEMPERATURA Y FRACCIÓN MÁSCICA DE VAPOR DE AGUA PARA NAP	140
FIGURA 6.36 PERFILES DE TEMPERATURA Y FRACCIÓN MÁSCICA DE VAPOR DE AGUA PARA NABP.....	143
FIGURA 10.1 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR AIRE	162

FIGURA 10.2 ESQUEMA FLUJO DESCARGA DE AGUA.....	162
FIGURA 10.3 EVOLUCIÓN (AVANCE) DEL CHORRO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	164
FIGURA 10.4 VELOCIDAD VS TIEMPO DE LA GOTA DE AGUA.....	164
FIGURA 10.5 COMPARACIÓN ALTURA VS TIEMPO PARA CHORRO ALTA PRESIÓN Y CORRIENTE AIRE .	165
FIGURA 10.6 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA GOTA CON EL TIEMPO	165
FIGURA 10.7 VELOCIDAD DEL CHORRO DE AGUA.....	166
FIGURA 10.8 DISTANCIA RECORRIDA POR EL CHORRO DE AGUA.....	167
FIGURA 10.9 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR AIRE	167
FIGURA 11.1 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC, NAP,NABP	169
FIGURA 11.2 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T=3S	170
FIGURA 11.3 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T=4.0S	170
FIGURA 11.4 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T=5.0S	170
FIGURA 11.5 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T= 6.0 S	171
FIGURA 11.6 GRÁFICA COMPARATIVA DE TEMPERATURA VS ALTURA DESDE T=3S HASTA T=6S	171
FIGURA 11.7 CAMPO DE VELOCIDADES INCENDIO (4 DIFUSORES SS).....	172
FIGURA 11.8 CAMPO DE VELOCIDADES RA (4 DIFUSORES SS).....	173
FIGURA 11.9 CAMPO DE VELOCIDADES NABP (4 DIFUSORES SS)	173
FIGURA 11.10 CAMPO DE VELOCIDADES NAP (4 DIFUSORES SS)	174
FIGURA 11.11 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD INCENDIO (4 DIFUSORES SS).....	175
FIGURA 11.12 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD RA (4 DIFUSORES SS).....	175
FIGURA 11.13 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD NABP (4 DIFUSORES SS)	176
FIGURA 11.14 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD NAP (4 DIFUSORES SS)	177
FIGURA 11.15 CAMPO DE VELOCIDADES + VAPOR NAP (4 DIFUSORES SS)	178
FIGURA 11.16 CAMPO DE VELOCIDADES + VAPOR RA (4 DIFUSORES SS).....	179
FIGURA 11.17 CAMPO DE VELOCIDADES + VAPOR NABP (4 DIFUSORES SS).....	180
FIGURA 11.18 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NAP (4 DIFUSORES SS)	181
FIGURA 11.19 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY RA (4 DIFUSORES SS).....	182
FIGURA 11.20 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NABP (4 DIFUSORES SS)	182
FIGURA 11.21 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NAP (4 DIFUSORES SS)	183
FIGURA 11.22 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY RA (4 DIFUSORES SS).....	186
FIGURA 11.23 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NABP (4 DIFUSORES SS)	186

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1.RESUMEN DE RIESGOS	33
TABLA 3.2 CONFIGURACIONES DE ALMACENAMIENTO	34
TABLA 3.3 CATEGORÍA DE PRODUCTOS ALMACENADOS.....	35
TABLA 3.4 CLASIFICACIÓN DE ALMACENAMIENTOS.....	35
TABLA 3.5 CRITERIOS DE DISEÑO PARA INSTALACIONES RL, RO, Y REP	37
TABLA 6.1 CARACTERISTICAS DEL MALLADO	87
TABLA 6.2 CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO DE COMBUSTIÓN	89
TABLA 6.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS.....	96
TABLA 6.4 CARACTERISTICAS DEL MALLADO	97
TABLA 6.5 CONDICIONES DE CONTORNO PARA LOS MODELOS DE GENERACIÓN TÉRMICA.....	99
TABLA 6.6 CARACTERISTICAS DE LAS INYECCIONES DE PARTICULAS	107
TABLA 6.7 CARACTERISTICAS DEL MALLADO.....	108
TABLA 6.8 CONDICIONES DE CONTORNO PARA LOS MODELOS DE GENERACIÓN TÉRMICA.....	110
TABLA 6.9 CARACTERISTICAS DE LAS INYECCIONES DE PARTICULAS	121
TABLA 6.10 CARACTERÍSTICAS DEL MALLADO	121

9. BIBLIOGRAFÍA

NORMAS, GUÍAS Y REGLAMENTOS

- [1] Código Técnico de la Edificación (R.D.314/2006). Documento Básico SI, Seguridad en caso de Incendio y Documento Básico SUA: Seguridad de Utilización y Accesibilidad. (Revisión de febrero de 2010, Real Decreto 173/2010)

- [2] R.D. 2267/2004, Reglamento de Seguridad contra Incendios en los Establecimientos Industriales

- [3] R.D. 1942/93, Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios (RIPCI)

- [4] International Building Code (2009 Edition)

- [5] NFPA 101 - LIFE SAFETY CODE

- [6] UNE-EN 12845:2005 Diseño e instalación de sistemas de rociadores automáticos

- [7] NFPA 13 - Standard for the installation of Sprinkler systems

- [8] NFPA U.S. Experience with sprinklers. John R. Hall (Junio 2013)

- [9] NFPA. (2003). Fire Reports: US Fire Loss

- [10] NFPA 13D-2010: Standard for the Installation of Sprinkler Systems in One- and Two-Family Dwellings and Manufactured Homes

- [11] NFPA 750 – Standard on Water Mist Fire Protection Systems

- [12] UNE-CEN/TS 14972: Diseño de sistemas de agua nebulizada

- [13] Guía de ingeniería SFPE de protección contra incendios basada en la eficacia, análisis y diseño de edificios (SFPE - Society of Fire Protection Engineers)

- [14] ANSYS CFX Reference Guide, ANSYS Inc. 2013. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. ANSYS Inc. 2013. ANSYS CFX-Pre User's Guide. ANSYS Inc. 2013.

- [15] Building Research Establishment (BRE) "Fire suppression in buildings, using water mist, fog or similar systems" 2005

[16] FACTORY MUTUAL “ANSI / FM 5560. American National Standard Water Mist Systems”. Diciembre 2007

[17] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO) “MSC/Circ.1165- Revised guidelines for the approval of equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces and cargo pump-rooms” June 2005

[18] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO) “MSC/Circ.913 - Guidelines for the approval of fixed water-based local application” June 1999

[19] New Zealand Government 2008: Effectiveness of fire systems for use in quantitative (Risk Assessment Commission, N. Z.)

[20] MODELO ZONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE HUMOS Y GASES CALIENTES EN INCENDIOS: APLICACIÓN A TÚNELES DE CARRETERA (TESIS DOCTORAL). Emilio Migoya Valor - UPM 2002

[21] Aplicaciones de la hidrodinámica suavizada de las partículas al estudio de fenómenos hidráulicos (TESIS DOCTORAL). David López Gómez - UPM 2010

[22] Análisis del proceso de descarga de fluidos sometidos a altas presiones y temperaturas (TESIS DOCTORAL). Eusebio Valero Sánchez - UPM 1998

[23] DINAMICA DEL INCENDIO EN EDIFICIOS MEDIANTE MODELADO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL: CFAST, OZONE, FDS. Jorge Capote, Daniel Alvear, Mariano Lázaro. Universidad de Cantabria, Grupo GIDAI

[24] WATER MIST FIRE PROTECTION – RESEARCH ON A NUMERICAL TOOLBOX FOR SYSTEMS EFFECTIVENESS ASSESSMENT. Luca Iannantuoni, Giovanni Manzini. Politecnico di Milano - Department of Energy

[25] Numerical simulations on the performance of water-based fire suppression systems. VTT TECHNOLOGY 54 BROCHURE. Jukka Vaari, Simo Hostikka, Topi Sikanen & Antti Paajanen

ARTÍCULOS Y OTRAS PUBLICACIONES

	NOMBRE	TITULO	REVISTA / EDITORIAL / CONFERENCIA	FECHA
[26]	A. DVORJETSKI, J.B. GREENBERG	Theoretical analysis of polydisperse water spray extinction of opposed flow diffusion flames	Fire Safety Journal.	2004
[27]	ADIGA, K.C., HATCHER JR, R.F., SHEINSON, R.S., WILLIAMS, F.W. and AYERS, S.	A computational and experimental study of ultra fine water mist as a total flooding agent	Fire Safety Journal, 42(2), pp. 150-160.	2007
[28]	ALIREZA ALIZADEH ATTAR, M. P.	Experimental study and CFD simulation of pool fires.	International journal of computer Applications, 70(11), 9-15.	2013 May
[29]	B.H. CONG, G. L.	Review of modeling fire suppression by water sprays by computational fluid dynamics.	International journal on engineering performance-based fire codes, 35-56.	2005
[30]	BEARD, A.N.,	Major fire spread in a tunnel with water mist: A theoretical model.	Tunnelling and Underground Space Technology, 53, pp. 22- 32	2016
[31]	BJARNE PAULSEN HUSTED, G. H.	The physics behind water mist systems	IWMA conference, (págs. 1-15). Rome.	2004
[32]	CAI, F., WANG, P., ZHOU, J. and LI, C.,	Inerting characteristics of entrained atomized water on premixed methane-air flame	International Journal of Mining Science and Technology, 25(6), pp. 997-1002.	2015
[33]	CHANDRA, S. DI MARZO, M. QYAIQ, Y.	Effect of liquid-solid contact angle on droplet evaporation	Fire Safety Journal	1996
[34]	CHELLIAH, H.K.,	Flame inhibition suppression by water mist: Droplet size surface area, flame structure, and flow residence time effects.	Proceedings of the Combustion Institute, 31(2), pp. 2711-2719.	2007
[35]	CHEN, C., HSIEH, W., HU, W., LAI, C. and LIN, T.,	Experimental investigation and numerical simulation of a furnished office fire.	Building and Environment, 45(12), pp. 2735-2742.	2010
[36]	CHOW, W.K. GAO, Y. DONG, H. ZOU, G., MENG, L.	Will water mist extinguish a liquid fire rapidly?	Architectural Science Review.	2003 June

- [37] DOMBROVSKY, L.A., DEMBELE, S. and WEN, J.X., A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists. International Journal of Heat and Mass Transfer, 96, pp. 199-209. 2016
- [38] DOWNIE, B., POLYMERPOULOS, C. AND GOGOS, G., Interaction of a water mist with a buoyant methane diffusion flame. Fire Safety Journal, 24(4), pp. 359-381. 1995
- [39] DR. CORINNE WILLIAMS and DR. LOUISE JACKMAN. An independent guide on water mist systems for residential Buildings BRE Guides 2006
- [40] DR. JOACHIM BÖKE Water spray mist extinguishing system for machinery protection: Particle board presses Viking Group. 2006 August
- [41] DUBAY, CHRISTIAN; MAWHINNEY, JACK Water mist technology evolves NFPA Journal. November 1999
- [42] FERNG, Y. AND LIU, C., Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS code. Nuclear Engineering and Design, 241(8), pp. 3142-3148. 2011
- [43] G. TANNER, W. K. Computational Study of Effects of Drop Size Distribution in Fire Suppression Systems II.ASS-Americas 22nd Annual Conference on liquid atomization and spray systems, págs. 1-10. 2010 May
- [44] GEORGES LEFORT, A. W. Evaluation of Surfactant Enhanced water mist performance. (S. Science, Ed.) Fire Technology(45), 341-354 2009
- [45] GUILLAUME, E., DIDIEUX, F., THIRY, A. and BELLIVIER, A., Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment Fire Safety Journal, 70, pp. 81-97. 2014
- [46] GUPTA, M., PASI, A., RAY, A. and KALE, S.R., An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression. Experimental Thermal and Fluid Science, 44, pp. 768-778. 2013
- [47] GUPTA, M., RAJORA, R., SAHAI, S., SHANKAR, R., Experimental evaluation of fire suppression characteristics of twin fluid water mist system. Fire Safety Journal, 54, pp. 130-142. 2012
- [48] H. MONTAZERI, B. B. Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. Building and environment, 1-20 2014

[49]	HESKESTAD, G.,	Extinction of gas and liquid pool fires with water sprays.	Fire Safety Journal, 38(4), pp. 301-317.	2003
[50]	HOSTIKKA, S.	Water Mist Spray Modeling with FDS	Fire and evacuation modeling conference (págs. 1-20). VTT.	2011
[51]	HUANG, X., WANG, X.S. and LIAO, G.X.,	Characterization of an effervescent atomization water mist nozzle and its fire suppression tests.	Proceedings of the Combustion Institute, 33(2), pp. 2573-2579.	2011
[52]	HUSTED, B. P.	Experimental measurements of water mist systems and implications for modelling in CFD. University, Sweden.	Department of fire safety engineering, Lund	2007
[53]	JENFT, A., COLLIN, A., BOULET, P., PIANET, G.,	Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist.	Fire Safety Journal, 67, pp. 1-12.	2014
[54]	JINSONG HUA, KURICHI KUMAR, BOO CHEONG KHOO, HONG XUE.	A numerical study of the interaction of water spray with a fire plume	Fire Safety Journal	2002
[55]	JUKKA VAARI, S. H.	Numerical simulations on the performance of waterbased fire suppressions systems.	VTT Expo	2012
[56]	JUN YOU, W., HYUN KO, G. and RYOU, H.S.,	A study on the unsteady flow characteristics in a vestibule for an injection and pressurization smoke-control system	Fire Safety Journal, 70, pp. 112-120.	2014
[57]	JY-CHENG CHANG, CHIH-MING LIN, SHENG-LUNG HUANG.	Experimental study on the extinction of liquid pool fire by water droplet streams and sprays	Fire Safety Journal.	2007
[58]	K.C. ADIGA, ROBERT F. HATCHER JR, RONALD S. SHEINSON, FREDERICK W.	A computational and experimental study of ultra fine water mist as a total flooding agent	Fire Safety Journal	2007
[59]	KHALID MOINUDDIN, IAN THOMAS, and SAMINA CHEA	Estimating the Reliability of Sprinkler Systems in Australian High-rise Office Buildings	FIRE SAFETY SCIENCE– PROCEEDINGS OF THE NINTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM, pp. 515-526	2008
[60]	KIM, M.B., JANG, Y.J. AND YOON, M.O.,	Extinction limit of a pool fire with a water mist.	Fire Safety Journal, 28(4), pp. 295-306.	1997

- [61] KIM, S.C. and RYOU, H.S., The Effect of Water Mist on Burning Rates of Pool Fire. Journal of Fire Sciences, 2004 22(4), pp. 305-323.
- [62] KIM, S.C. and RYOU, H.S., An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure. Building and Environment, 38(11), pp. 1309-1316. 2003
- [63] L.W. PAN, Q. L. Preliminary experimental study and numerical simulations on suppressing spray bitumen fire with water mist in a confined space. Fire safety science-proceedings of the ninth international symposium, (págs. 565-576). 2008
- [64] MAKSIMOVIC, T. Data on reliability of sprinkler systems. 2011
- [65] MAN, C., SHUNBING, Z., LITAO, J. and XIAOLI, W., Surfactant-containing Water Mist Suppression Pool Fire Experimental Analysis. Procedia Engineering, 84, pp. 558-564. 2014
- [66] MANZINI, L. I. Research on a numerical toolbox for systems effectiveness assessment. Water mist fire protection, 1-6. 2009
- [67] MARTÍNEZ, A. C. Fluid mechanics Madrid: Paraninfo. 2012
- [68] MCGRATTAN, K.B., BAUM, H.R. and REHM, R.G., Large eddy simulations of smoke movement. Fire Safety Journal, 30(2), pp. 161-178. 1998
- [69] NDUBIZU, C.C., ANANTH, R., TATEM, P.A. and MOTEVALLI, V., On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame. Fire Safety Journal, 31(3), pp. 253-276. 1998
- [70] NEW ZEALAND GOVERNMENT Effectiveness of fire systems for use in quantitative Risk Assessment. Commission, N. Z. 2008
- [71] NMIRA, F., CONSALVI, J.L., KAISS, A., FERNANDEZ-PELLO A numerical study of water mist mitigation of tunnel fires. Fire Safety Journal, 44(2), pp. 198-211. 2009
- [72] NOTARIANNI, K. A. Water Mist Fire Suppression Systems Technical Symposium on Halon Alternatives. (SFPE). 1994 June
- [73] PRASAD, K., PATNAIK, G. and KAILASANATH, K., A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires. Fire Safety Journal, 37(6), pp. 569-589. 2002

- [74] R. HARISH, K. V. Mathematical modeling and computation of fire induced turbulent flow in partial enclosures. Applied mathematical modelling, 9732-9746. 2013
- [75] RÜDIGER KOPP. High Pressure Water Mist - Library and Archive Protection". International Water Mist Conference, Amsterdam April 2002
- [76] S. HOSTIKKA, K MCGRATTAN Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays Fire Safety Journal 2006
- [77] S. SCHÄLIKE, K.-D. W. CFD simulation to predict the thermal radiation of large LNG pool fires Proceedings of the European combustion meeting 2011, 1-6. 2011
- [78] SANTANGELO, P.E. and TARTARINI, P., Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: A temperature-based analysis of water-mist systems. Applied Thermal Engineering, 45-46, pp. 99-107. 2012
- [79] SANTANGELO, P.E., Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion. Experimental Thermal and Fluid Science, 34(8), pp. 1353-1366. 2010
- [80] SANTANGELO, P.E., JACOBS, B.C., REN, N., SHEFFEL, J.A., CORN, M.L. Suppression effectiveness of water-mist sprays on accelerated wood-crib fires. Fire Safety Journal, 70, pp. 98-111. 2014
- [81] W.K. CHOW AND L.Y. CHAN, Possibility of using water mist fire suppression system in Hong Kong Journal of Eng, Design and Tech, 9(2), pp. 157-163. 2011
- [82] WANG, X., ZHU, P., LI, Y., NI, X. and FAN, M., Effect of low ambient air pressure on spray characteristics of water mist. Experimental Thermal and Fluid Science, 66, pp. 7-12. 2015
- [83] WEI YAO, J. Y. Numerical modeling of liquid n-heptane pool fires based on heat feedback equilibrium The 9th Asia-Occania Symposium on fire science and technology (págs. 377-388). Procedia Engineering. 2013
- [84] XU, Y., WANG, L., YU, M., WAN, S., SONG, Z. and WANG, S., Study on the characteristics of gas explosion affected by induction charged water mist in confined space. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 40, pp. 227-233. 2005 July
- [85] Y. SINAI, P. STOPFORD, M. EDWARDS, S. WATKINS CFD Modelling of FIRE supresión by water spray: sensitivity and validation for a pool fire in a room. Eighth International IBSA Conference. Eindhoven, Netherlands. 2003

- [86] YANG, D., HU, L.H., JIANG, Y.Q., HUO, R., ZHU, S. and ZHAO, X.Y., Comparison of FDS predictions by different combustion models with measured data for enclosure fires. *Fire Safety Journal*, 45(5), pp. 298-313. 2010
- [87] YANG, P., LIU, T. and QIN, X., Experimental and numerical study on water mist suppression system on room fire. *Building and Environment*, 45(10), pp. 2309-2316. 2010
- [88] YANG, P., TAN, X. and XIN, W., Experimental study and numerical simulation for a storehouse fire accident. *Building and Environment*, 46(7), pp. 1445-1459. 2011
- [89] YINSHUI, L., ZHUO, J., DAN, W. and XIAOHUI, L., Experimental research on the water mist fire suppression performance in an enclosed space by changing the characteristics of nozzles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52, pp. 174-181. 2014
- [90] YOSHIDA, A., KASHIWA, K., HASHIZUME, S. and NAITO, H., Inhibition of counterflow methane air diffusion flame by water mist with varying mist diameter. (*Fire Safety Journal*, 71, pp. 217-225. 2015
- [91] YOSHIDA, A., OKAWA, T., EBINA, W. and NAITO, H., Experimental and numerical investigation of flame speed retardation by water mist. *Combustion and Flame*, 162(5), pp. 1772-1777. 2015
- [92] ZHANG, P., TANG, X., TIAN, X., LIU, C. and ZHONG, M., Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*, 94, pp. 706-714. 2016
- [93] ZHIBIN CHEN, J. W. Large eddy simulation of a medium-scale methanol pool fire using the extended eddy dissipation concept *International journal of heat and mass transfer*, 389-408 2014
- [94] ZHIGANG LIU, and KIM, A.K., A Review of Water Mist Fire Suppression Systems- Fundamental Studies. *Journal of Fire Protection Engineering*, 10(3), pp. 32-50. 1999
- [95] ZHIGANG LIU. ANDREW K. KIM. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems *Fundamental Studies" SAGE JOURNALS* 1999
- [96] ZHU, P., WANG, X., WANG, Z., CONG, H. and NI, X., Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain. *Journal of Fire Sciences*, 33(4), pp. 269-289. 2015
- [97] ZU-MING, L. D.-P. Numerical simulation of water mist fire suppression technology *The 5th conference on PBD and fire protection engineering (págs. 205-209) Procedia Engineering* 2011

10. ANEXO A: ANÁLISIS DINÁMICO

Inicialmente se pretende calcular la velocidad que adquiere una gota de agua pulverizada en el seno de un chorro de aire que la arrastra a alta presión. Para ello, se parte de la ecuación de conservación de la masa:

$$\rho \frac{d\vec{U}}{dt} + \rho \vec{U} \nabla \vec{U} = \rho \vec{k}_n - \nabla P + \mu \cdot \nabla \vec{U} \quad (30)$$

Teniendo en cuenta que:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (31)$$

Siendo:

ρ = Densidad

U = Velocidad media

D = Diámetro de la gota

μ = Viscosidad dinámica del aire

Para los valores característicos de nuestra gota, se obtiene que $Re \ll 1$ por lo tanto se puede considerar que:

$$\frac{\Delta P}{D} \sim \mu \cdot \frac{U}{D^2} \quad (32)$$

y como :

$$F \sim \Delta P \cdot D^2 \quad (33)$$

Entonces la fuerza que experimenta la gota para una determinada velocidad relativa será:

$$F = \mu \cdot U \cdot D \quad (34)$$

Para conocer la aceleración de la gota

$$m \frac{dU}{dt} = gm + (U_a - U)k \mu UD \quad (35)$$

Siendo:

U_a = Velocidad del aire

U = Velocidad de la gota

ρ = densidad de la gota

Sustituyendo los valores asociados a la geometría esférica de la gota en la ecuación 35 se obtiene:

$$\rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \frac{dU}{dt} = g \frac{4}{3} \pi \rho \left(\frac{D}{2}\right)^3 + (U_a - U) k \mu U D \quad (36)$$

Y despejando, obtenemos el valor de la aceleración de la gota como sigue:

$$\frac{dU}{dt} = g + \frac{6k\mu}{\pi\rho} \frac{1}{D^2} \quad (37)$$

$$\text{Si } g \ll \frac{6 \cdot k \cdot U_a}{\pi \cdot \rho} \cdot \frac{1 \cdot U_a}{D^2} \quad (38)$$

$$\sqrt{\frac{6 \cdot k \cdot U_a}{\pi \cdot g}} \gg D \quad (39)$$

Se define entonces k' como:

$$k' = \frac{6 \cdot k \cdot \mu}{\pi \cdot \rho} \cdot \frac{1}{D^2} \quad (40)$$

Sustituyendo en la ecuación inicial de aceleración se obtiene que:

$$U = U_a (1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}) \quad (8)$$

Siendo:

$$\tau_0 = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^2}{6 \cdot k \cdot \mu} \quad (9)$$

La gráfica de la velocidad de la gota (en función del tiempo) obtenida es la siguiente:

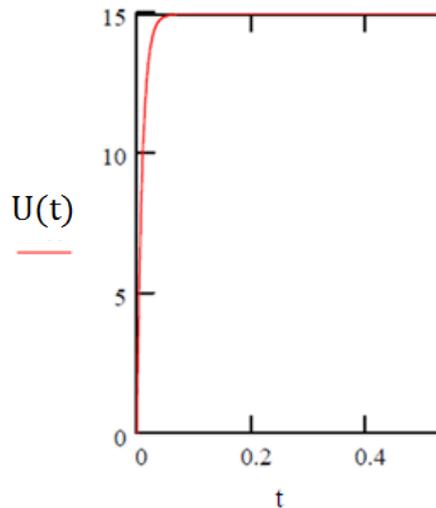


FIGURA 10.1 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR AIRE

En la gráfica descrita se puede observar cómo aumenta la velocidad de la gota hasta alcanzar la velocidad de la corriente (definida inicialmente para 15 m/s).

Se analiza a continuación el flujo de la descarga de agua (chorro de agua nebulizada). Partimos del siguiente esquema que refleja de forma esquemática el avance del chorro de agua:

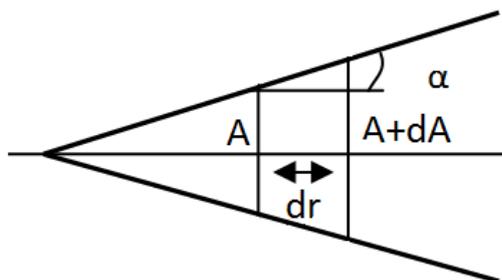


FIGURA 10.2 ESQUEMA FLUJO DESCARGA DE AGUA

Donde se puede considerar que:

$$\rho U^2 dA = \rho (U + dU)^2 \cdot (dA + A) \quad (41)$$

$$\text{Si } A = \pi r^2 \text{ entonces } \frac{dA}{A} = \frac{2 \cdot dr}{r} \quad (42)$$

Sustituyendo en la ecuación 41 se obtiene que:

$$U^2 \cdot \frac{dA}{A} = -2 \cdot U \cdot AdU \quad (43)$$

$$U^2 \cdot \frac{dr}{d \cdot \rho \cdot r} = -U \cdot \frac{dU}{d\rho} \quad (44)$$

$$\frac{dU}{dx} = -\frac{U}{r} \operatorname{tg}(\alpha) \quad (45)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{r}{x} \rightarrow x = \frac{r}{\operatorname{tg}(\alpha)} \quad (46)$$

$$\ln \frac{U}{U_0} = -\ln \frac{x}{x_0} \quad (47)$$

Y por tanto:

$$U = U_0 \frac{\frac{r_0}{\operatorname{tg} \alpha}}{x' + \frac{r_0}{\operatorname{tg} \alpha}} \quad (48)$$

Para obtener la altura z (t) se tiene que:

$$\frac{dZ}{dt} = U_0 \frac{x_0}{Z+x_0} \quad (49)$$

Y despejando obtenemos que:

$$Z = -x_0 \pm \sqrt{x_0^2 + 2U_0 x_0 t} \quad (50)$$

A continuación se muestra la gráfica que describe el alcance (m) del chorro de agua frente al tiempo

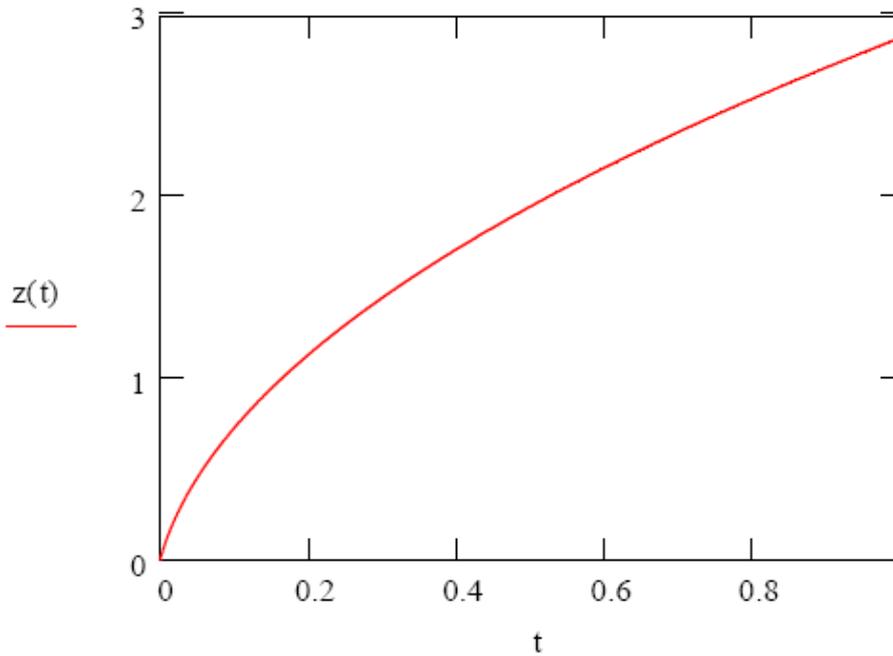


FIGURA 10.3 EVOLUCIÓN (AVANCE) DEL CHORRO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Y la gráfica para la velocidad (en función del avance) queda:

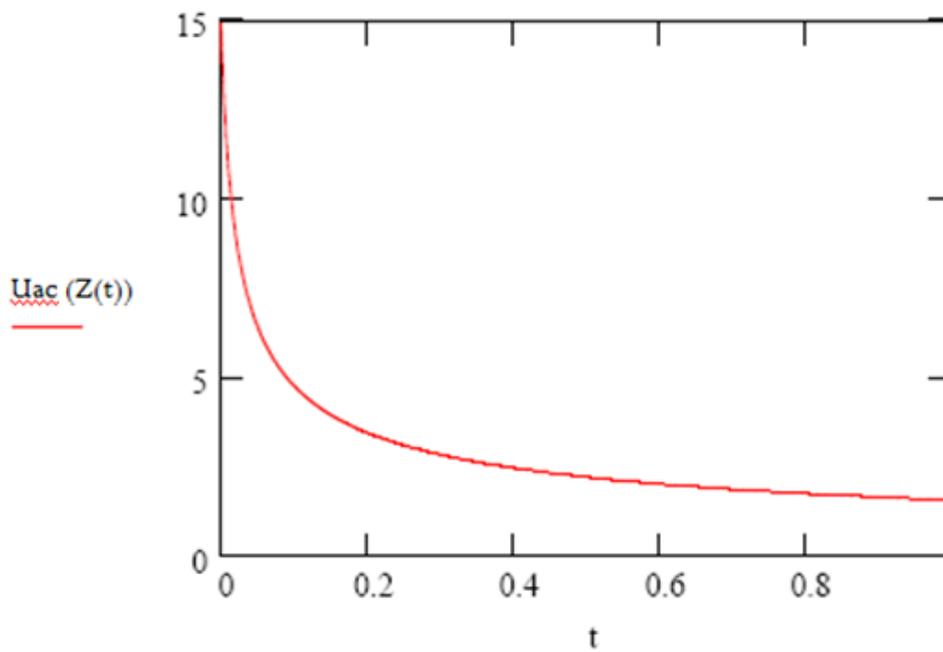


FIGURA 10.4 VELOCIDAD VS TIEMPO DE LA GOTA DE AGUA

Puesto que la gota se adapta al chorro de baja velocidad casi de forma instantánea a continuación se comparan el alcance cuando tenemos una corriente de aire a alta presión (rojo) como la de baja presión (azul).

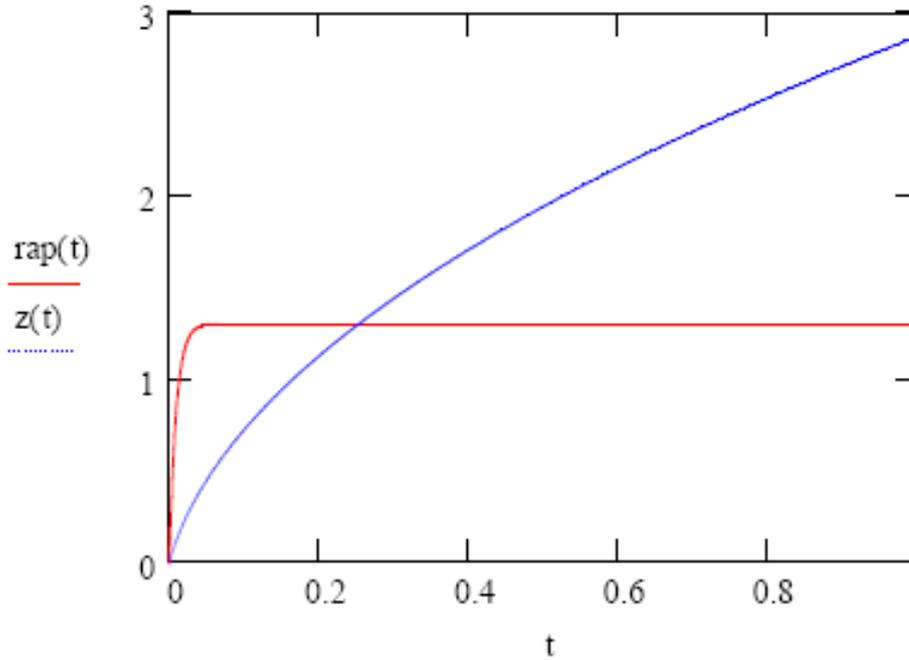


FIGURA 10.5 COMPARACIÓN ALTURA VS TIEMPO PARA CHORRO ALTA PRESIÓN Y CORRIENTE AIRE

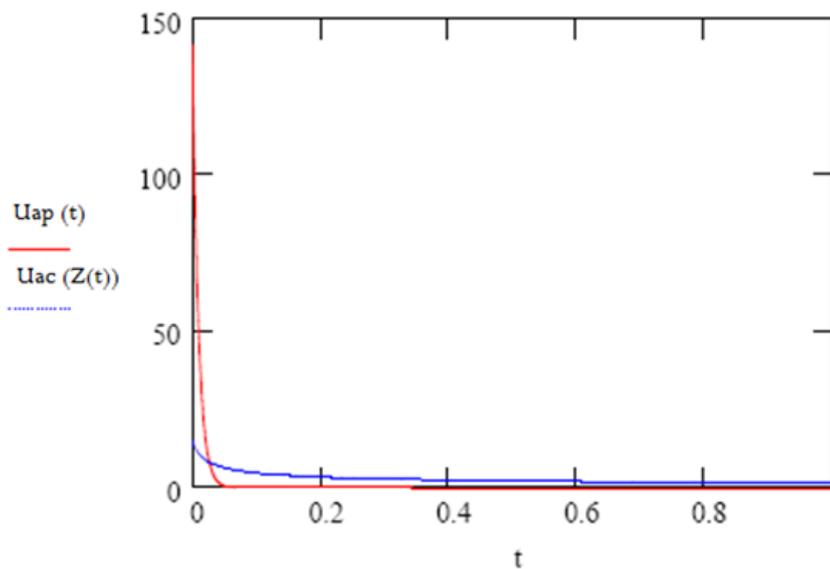


FIGURA 10.6 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA GOTA CON EL TIEMPO

Para describir la relación entre velocidad y distancia se puede combinar el efecto de la aceleración para arrastre y bajada de velocidad del chorro:

$$Ugc(t) = Uc(t) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}}\right) \quad (51)$$

Para calcular la distancia recorrida se utilizará: $Uc(t)$

$$zgc(t) = \int_0^1 Ugc(t) dt \quad (52)$$

A continuación se describe gráficamente:

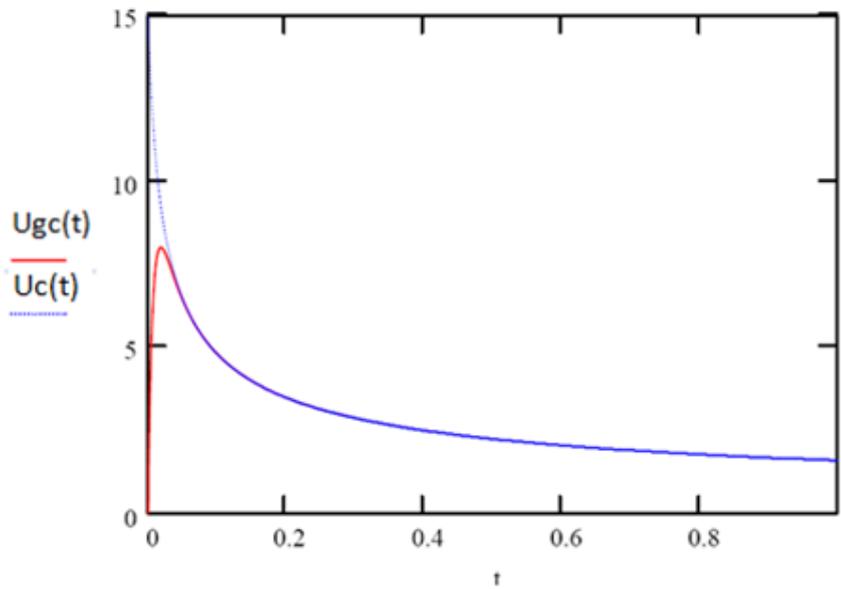


FIGURA 10.7 VELOCIDAD DEL CHORRO DE AGUA

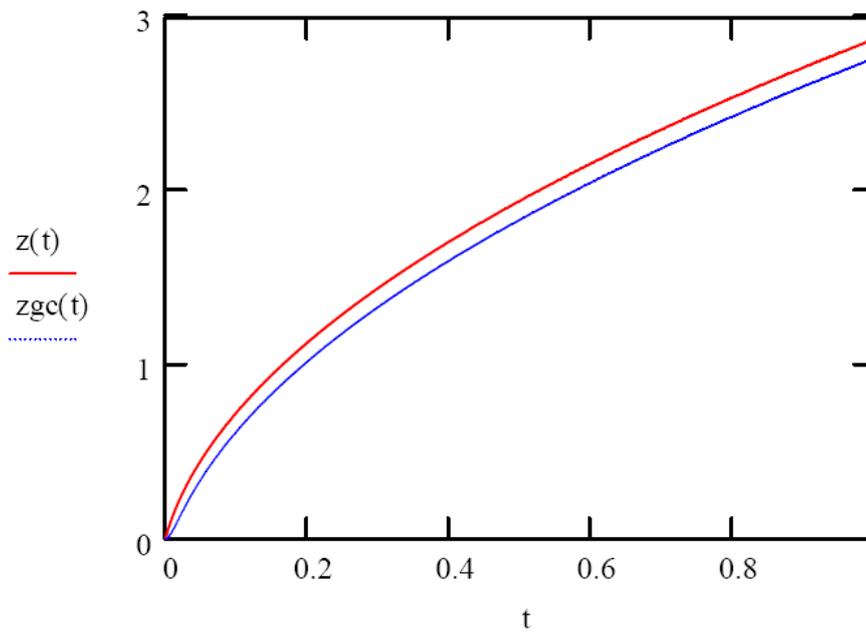


FIGURA 10.8 DISTANCIA RECORRIDA POR EL CHORRO DE AGUA

A continuación se muestra la velocidad de las partículas de agua arrastradas por la corriente de aire frente a la distancia recorrida:

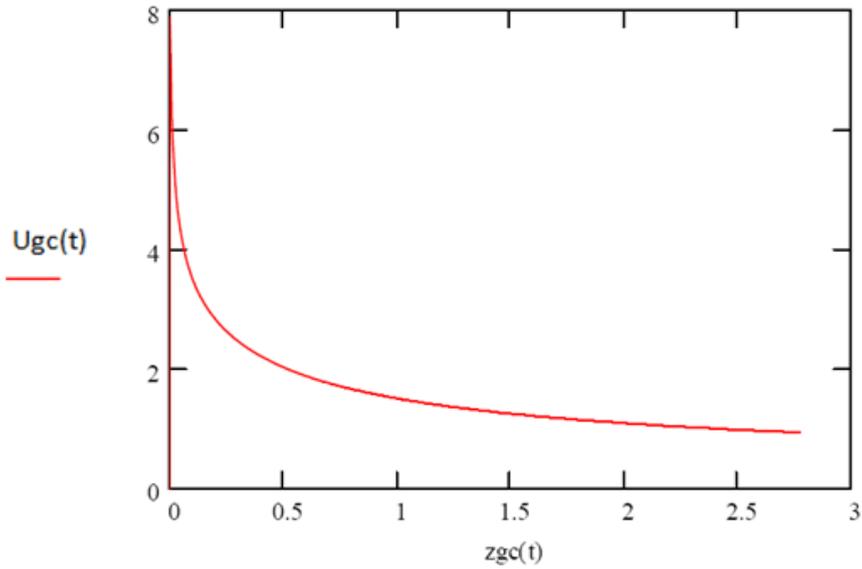


FIGURA 10.9 EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA GOTA ARRASTRADA POR AIRE

Se aprecia que el modelo de agua arrastrada por corriente penetra más pero con una velocidad menor que el de alta presión. Se deberá comprobar si esta velocidad es suficiente en un incendio frente a los movimientos convectivos.

11. ANEXO B: POSTPROCESADO GRÁFICO DE LAS SIMULACIONES

[Name]

Line 1 in Case NBP fan 10ms

[Data]

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,58E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	2,88E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	2,92E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	2,93E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	2,93E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	2,93E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	2,93E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	2,94E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	2,94E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	2,95E+02

[Name]

Line 1 in Case RA

[Data]

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,14E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	2,24E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	2,37E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	2,52E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	2,82E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	2,91E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	2,93E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	2,93E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	2,94E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	2,95E+02

[Name]

Line 1 in Case Fire

[Data]

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,09E+03
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	7,23E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	5,89E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	4,46E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	3,98E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	3,74E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	3,59E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	3,50E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	3,44E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	3,42E+02

[Name]

Line 1 in Case NAP

[Data]

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,85E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	1,93E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	2,42E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	3,07E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	3,15E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	3,16E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	3,16E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	3,16E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	3,15E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	3,16E+02

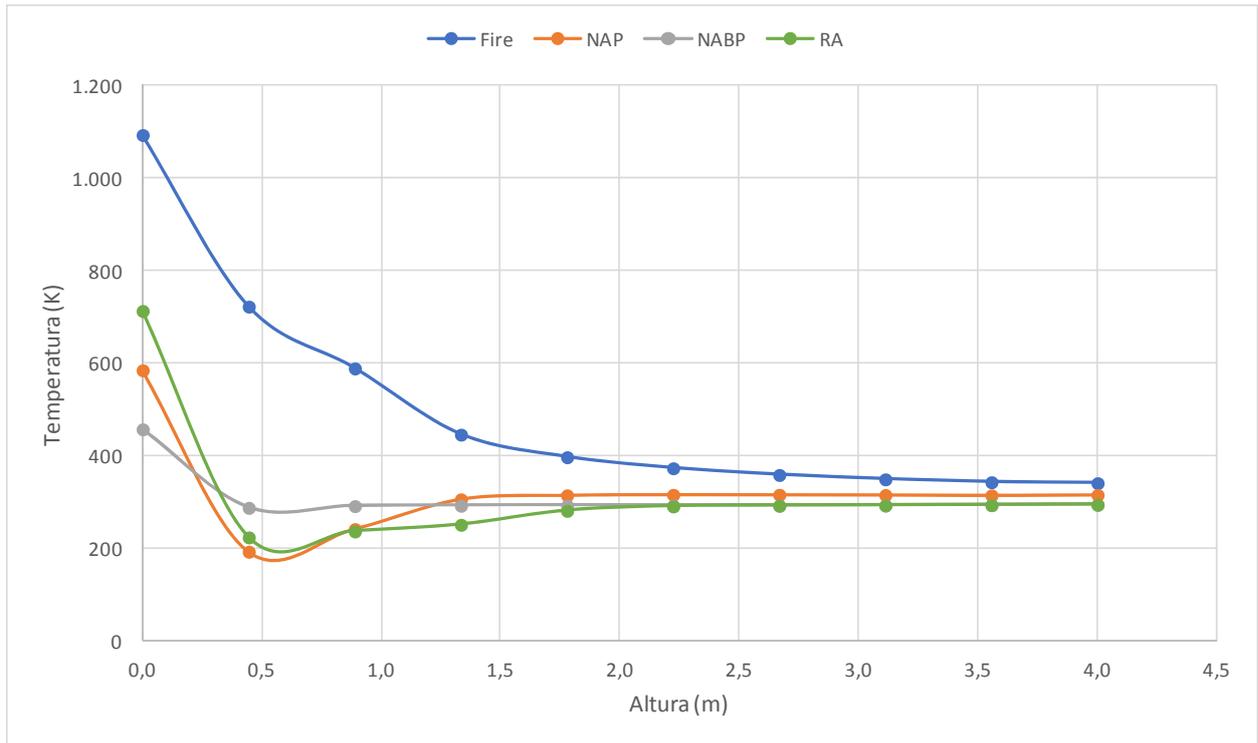


FIGURA 11.1 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA ROC, NAP, NABP

t=3.0s

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E+03
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	8,59E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	5,77E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	4,13E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	3,71E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	3,60E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	3,63E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	3,61E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	3,04E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	3,00E+02

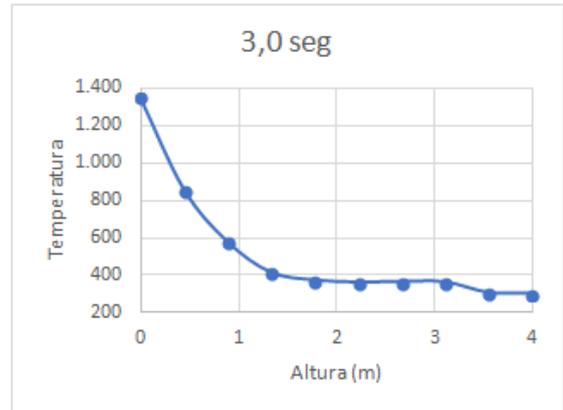


FIGURA 11.2 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T=3S

t=4.0s

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,31E+03
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	8,35E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	5,71E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	4,24E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	3,82E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	3,60E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	3,47E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	3,38E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	3,35E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	3,38E+02

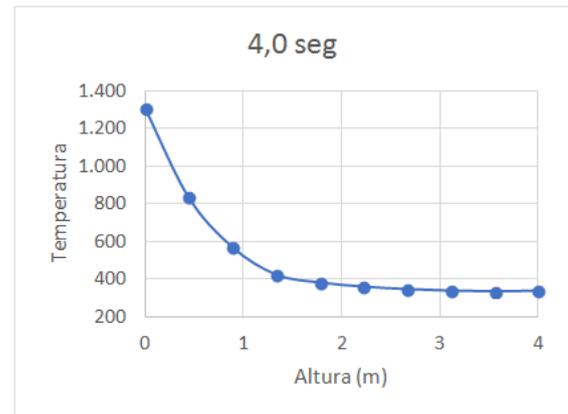


FIGURA 11.3 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T=4.0S

t=5.0s

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,29E+03
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	8,30E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	5,79E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	4,23E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	3,78E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	3,56E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	3,44E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	3,37E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	3,34E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	3,33E+02

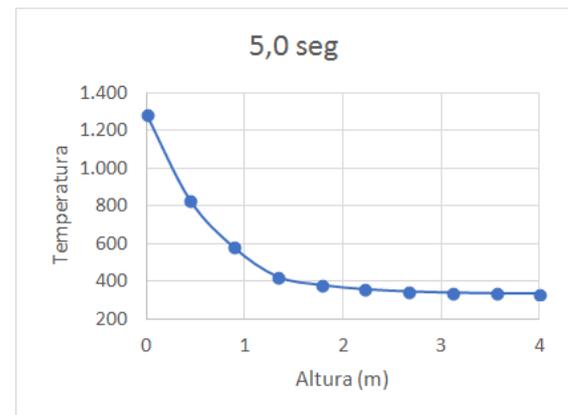


FIGURA 11.4 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T=5.0S

t=6.0s

X [m]	Y [m]	Z [m]	Temperature [K]
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,41E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,44E-01	8,41E+02
0,00E+00	0,00E+00	8,89E-01	7,07E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	4,78E+02
0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	4,03E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,22E+00	3,68E+02
0,00E+00	0,00E+00	2,67E+00	3,50E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,11E+00	3,40E+02
0,00E+00	0,00E+00	3,56E+00	3,34E+02
0,00E+00	0,00E+00	4,00E+00	3,31E+02

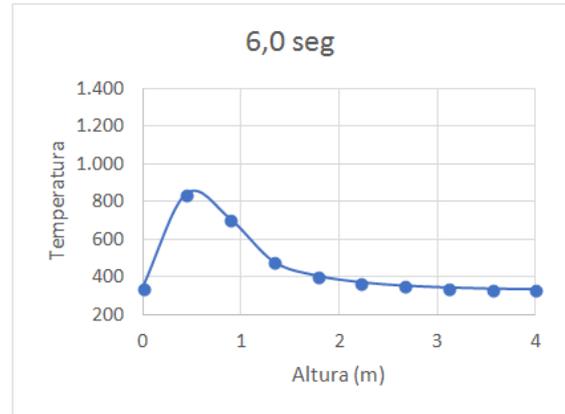


FIGURA 11.5 GRÁFICA DE TEMPERATURA VS ALTURA PARA T= 6.0 S

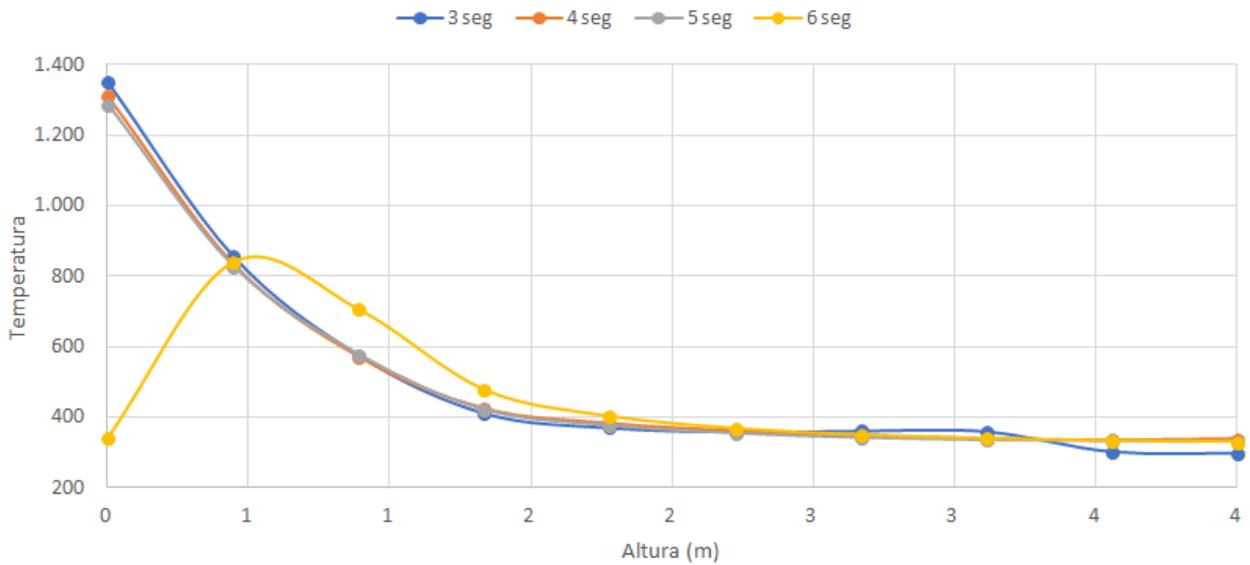


FIGURA 11.6 GRÁFICA COMPARATIVA DE TEMPERATURA VS ALTURA DESDE T=3S HASTA T=6S

Campo de velocidades

Perfiles de velocidad

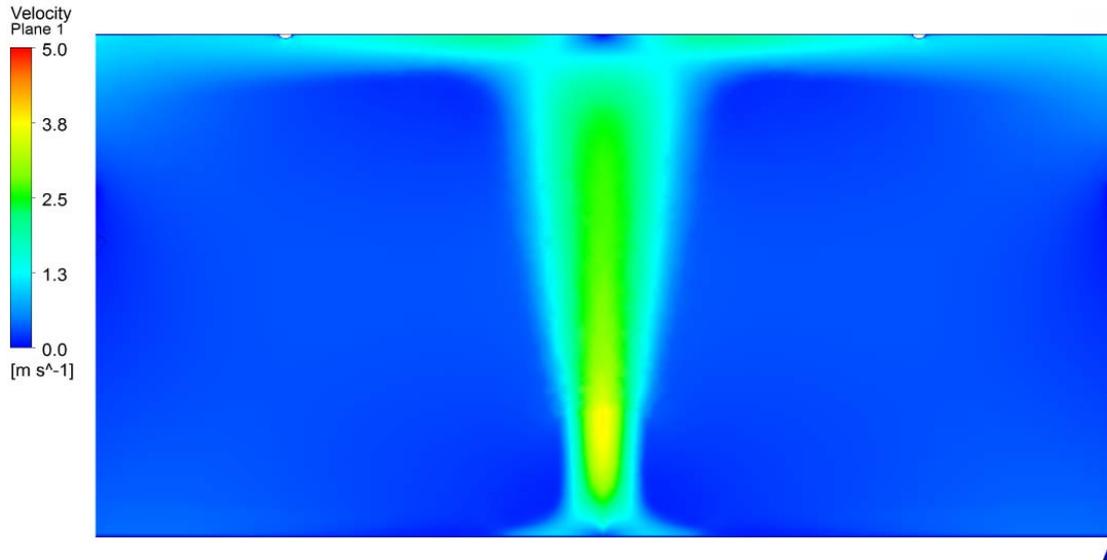


FIGURA 11.7 CAMPO DE VELOCIDADES INCENDIO (4 DIFUSORES SS)

Puede observarse como en la imagen del incendio, la velocidad es superior en la mitad inferior del incendio y va disminuyendo a medida que se asciende. Este efecto es generado por las corrientes de convección, que provocan mayor capacidad ascensional al fluido donde hay mayores temperaturas.

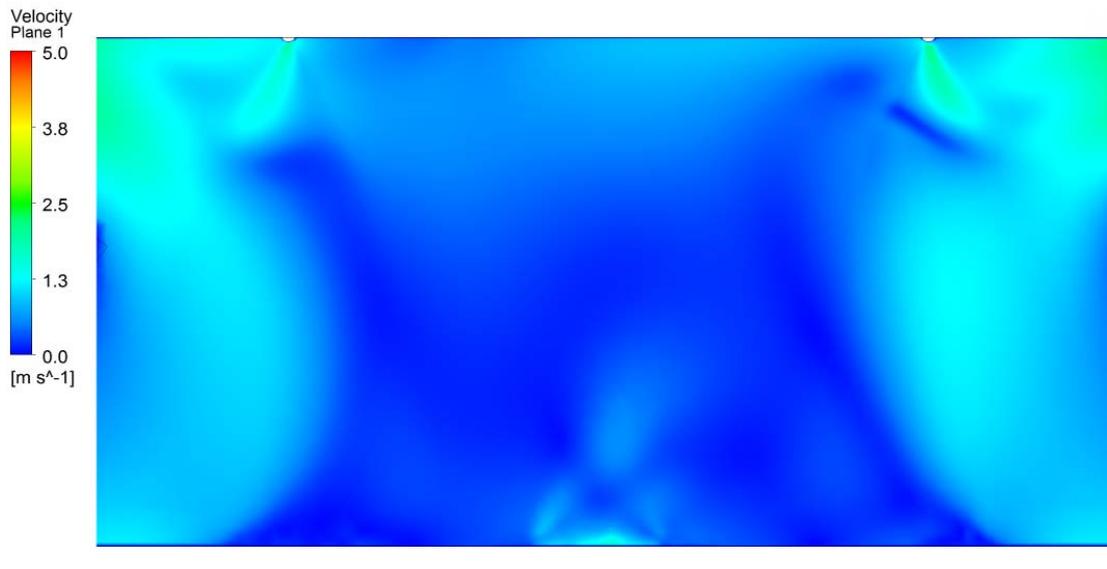


FIGURA 11.8 CAMPO DE VELOCIDADES RA (4 DIFUSORES SS)

El rociador automático presenta menores velocidades, esto es debido a que las partículas son descargadas a una menor velocidad. Además, al conseguir disipar el incendio, se frenan las corrientes de convección que se aprecian en la imagen del incendio.

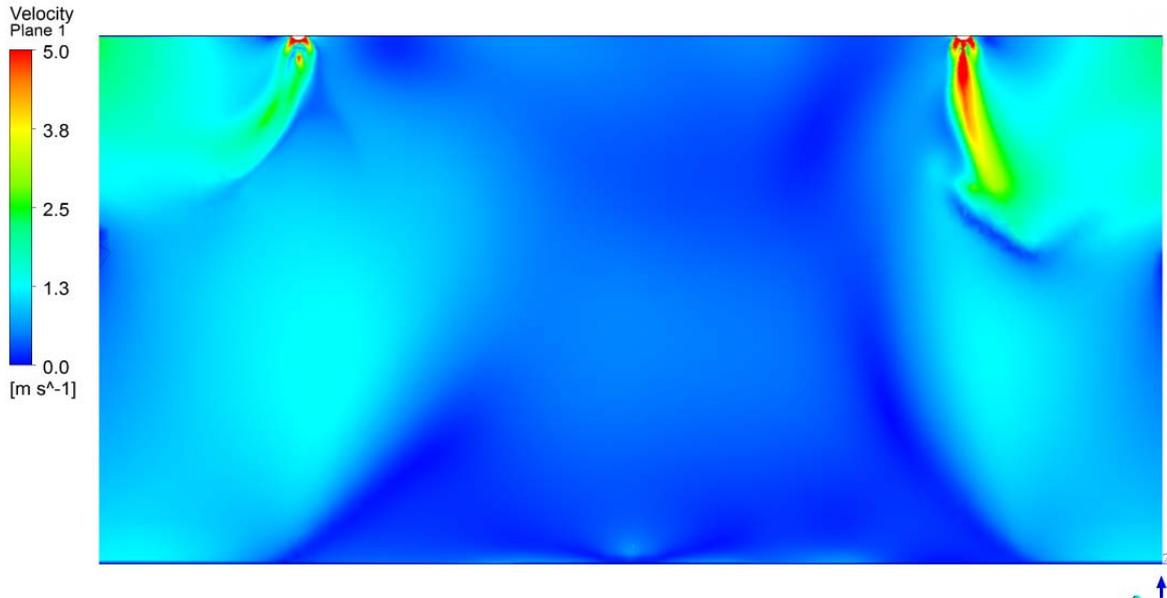


FIGURA 11.9 CAMPO DE VELOCIDADES NABP (4 DIFUSORES SS)

El NABP presenta unas mayores velocidades, especialmente en la zona próxima al nebulizador. Esto es debido al efecto del ventilador. La velocidad con la que el ventilador (10 m/s) empuja es superior a la velocidad de las corrientes de convección (en transitorio se ve que alcanzan los 4 m/s). Al apagarse en incendio (estado estacionario mostrado en esta imagen) las corrientes de convección desaparecen, al igual que en el caso anterior.

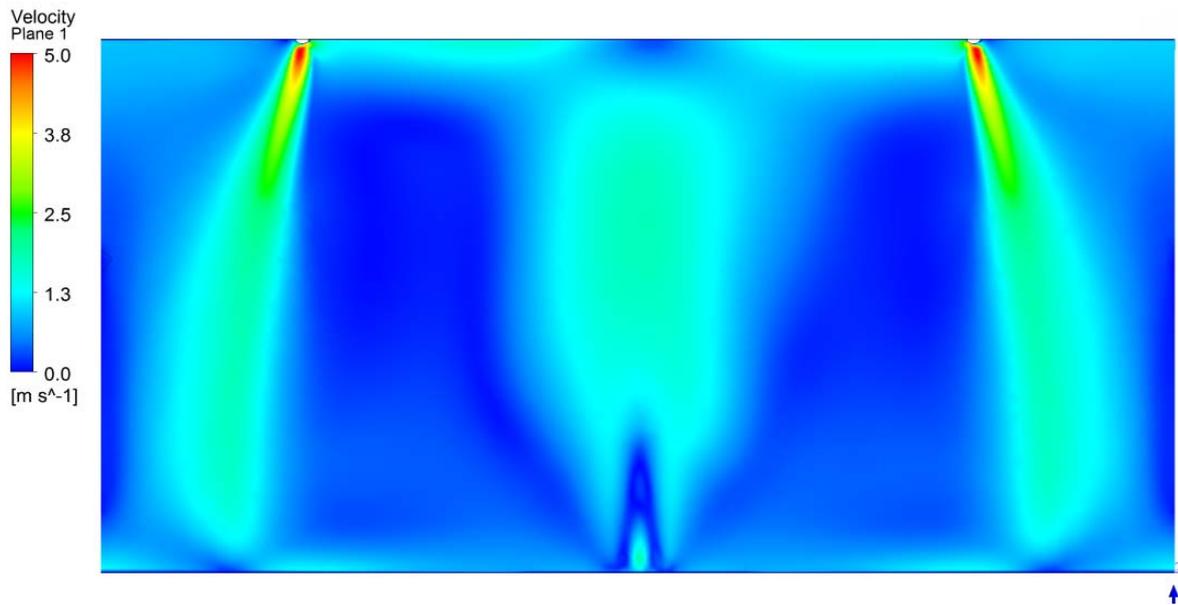


FIGURA 11.10 CAMPO DE VELOCIDADES NAP (4 DIFUSORES SS)

Por último, el NAP presenta las mayores velocidades justo en el nebulizador aunque se prolongan bastante en su trayectoria. Esto es debido a la elevada velocidad con la que se inyectan las partículas. Este sistema no consigue disipar todo el calor generado, ya que siguen apareciendo velocidades en el centro de la sala, debidas a las corrientes de convección del agua evaporada. Sin embargo este sistema consigue controlar el incendio, ya que aparece una franja estática justo encima del incendio. Esta es la zona donde el agua se evapora y asciende en forma de vapor.

Vectores de velocidad

Estas imágenes representan el campo de velocidades mediante vectores, los cuales muestran la dirección del flujo mezcla de aire y el vapor de agua en cada zona (no se muestra la velocidad de las partículas). Los vectores están coloreados en función de su velocidad.

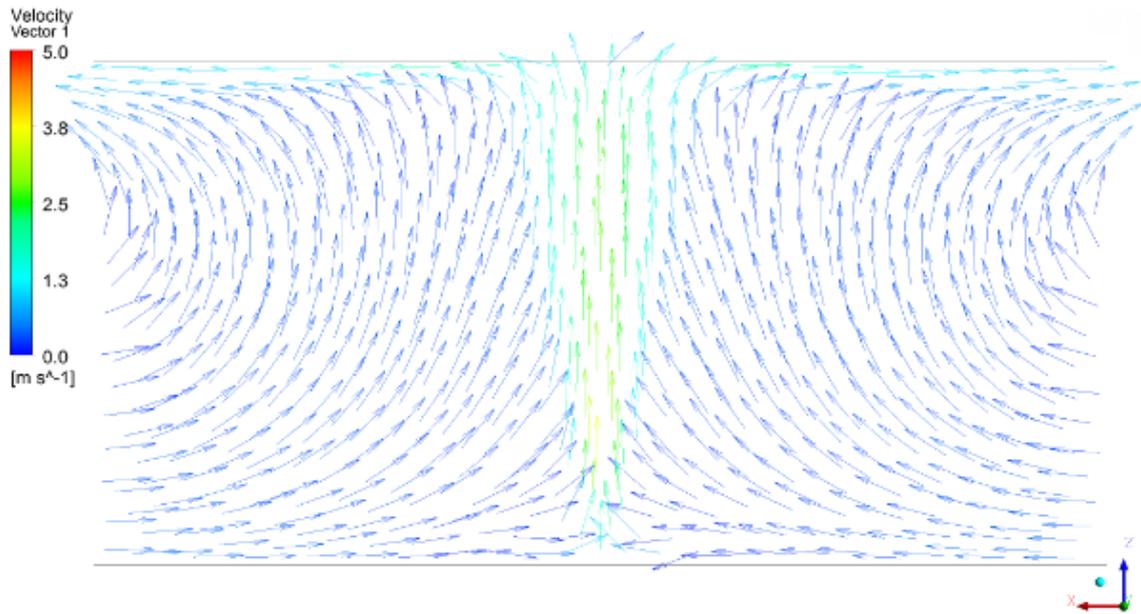


FIGURA 11.11 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD INCENDIO (4 DIFUSORES SS)

La imagen del incendio muestra como el aire caliente asciende hasta el techo, donde choca y se va hacia afuera del volumen de control. Como consecuencia de este movimiento se genera una presión inferior en la base de la sala. Por esta diferencia de presiones entra aire de fuera del volumen de control por la parte baja de la sala.

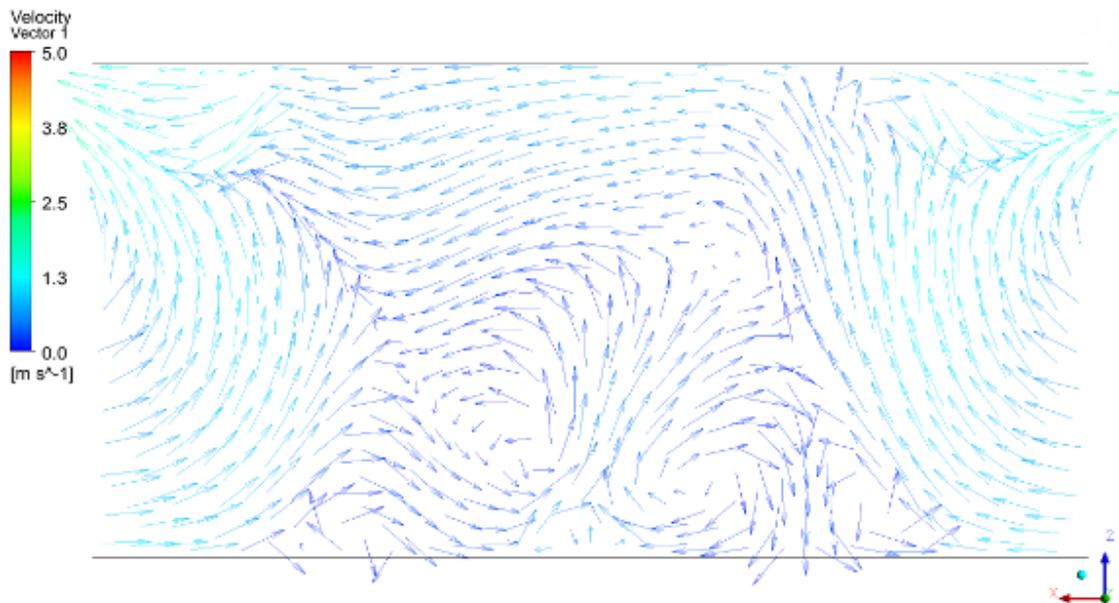


FIGURA 11.12 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD RA (4 DIFUSORES SS)

En el caso del RA las velocidades son muy bajas. Estas pueden ser debidas al empuje del chorro de aire y a la subida del vapor de agua formado.

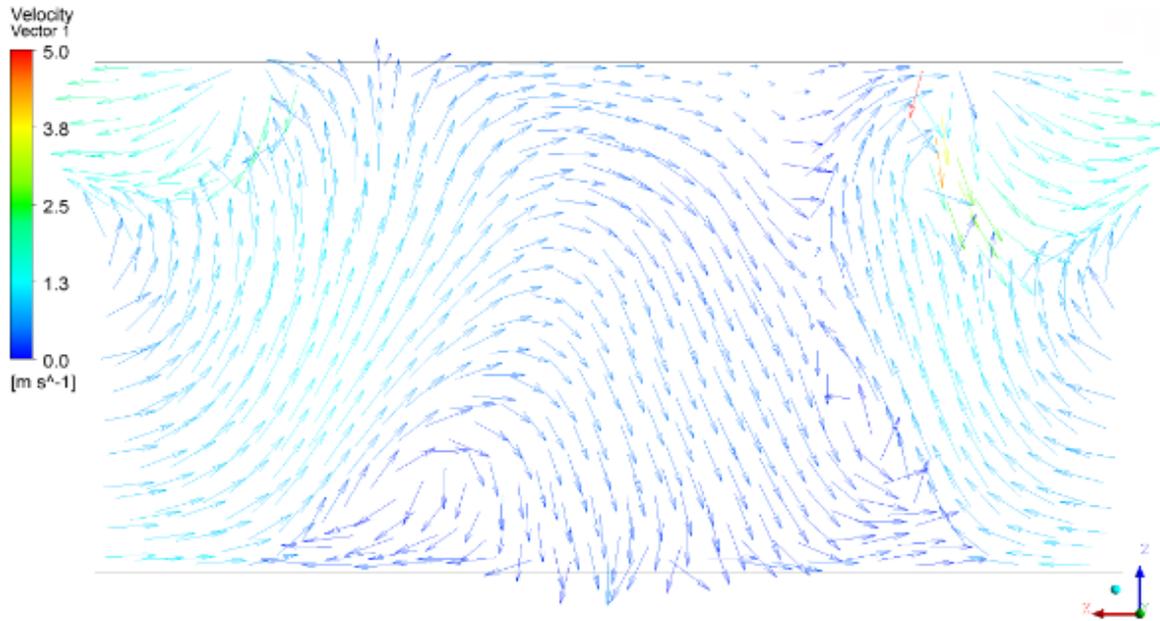


FIGURA 11.13 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD NABP (4 DIFUSORES SS)

El NABP presenta unos vectores muy similares a los del RA, salvo por una mayor velocidad en la zona de los difusores. Esta mayor velocidad es debida al efecto de los ventiladores que impulsan el aire desde el propio difusor.

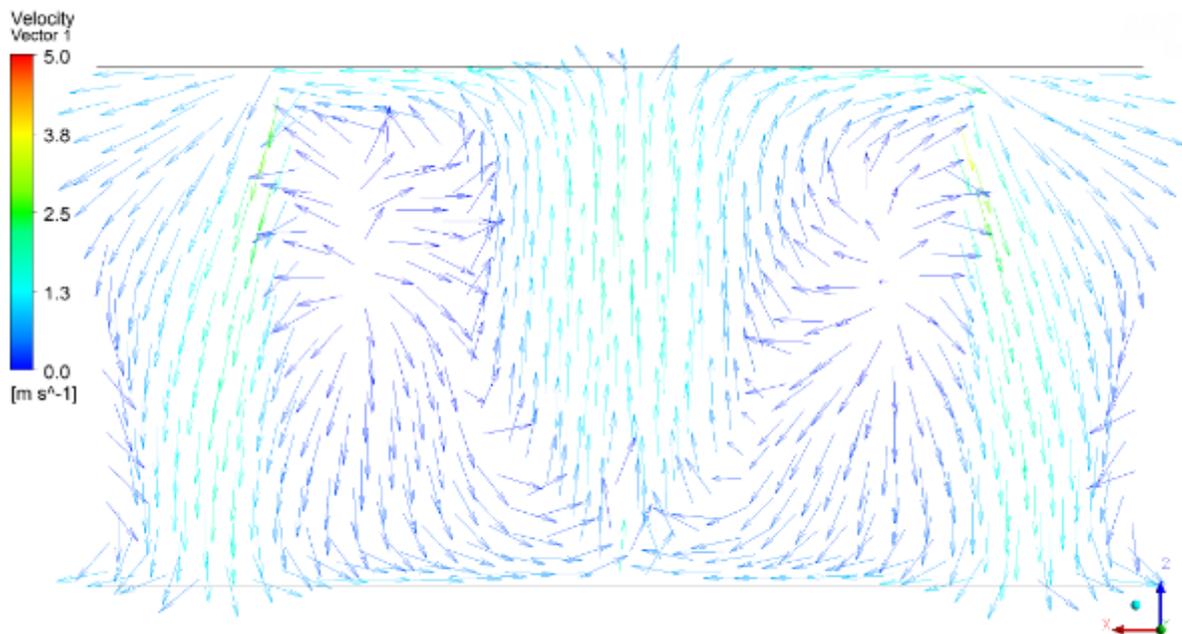


FIGURA 11.14 CAMPO VECTORES DE VELOCIDAD NAP (4 DIFUSORES SS)

En NAP presenta unas mayores velocidades en los laterales y en el centro. Las mayores velocidades en los laterales son debidas al empuje de las partículas de agua, mientras que en el centro se debe a la corriente ascendente de vapor de agua.

Perfiles de velocidad y vapor formado

Estas imágenes combinan el perfil de velocidades con el vapor formado. Para representar la nube de vapor se hace una iso-surface. Esta superficie representa la capa de espacio con una concentración de vapor. El interior de la nube presentará una concentración superior, mientras que el exterior presenta una menor concentración. Estas imágenes han sido realizadas con un valor de fracción másica de vapor de agua de 0,02 (2%). Las concentraciones de vapor válidas para realizar la iso-surface, con la que se representa el vapor, son las siguientes:

Fracción másica de vapor	Forma de la nube de vapor
0,5	Apenas se aprecia vapor y aparece en el suelo en la zona del incendio.
0,05	Hay más vapor, pero aparece concentrado en la zona del incendio.
0,02	Se aprecia la forma de la nube y su localización
0,15	La forma de la nube es demasiado grande, apenas se aprecia su forma
0,01	La figura se sale de la geometría

A continuación, se muestran las imágenes obtenidas:

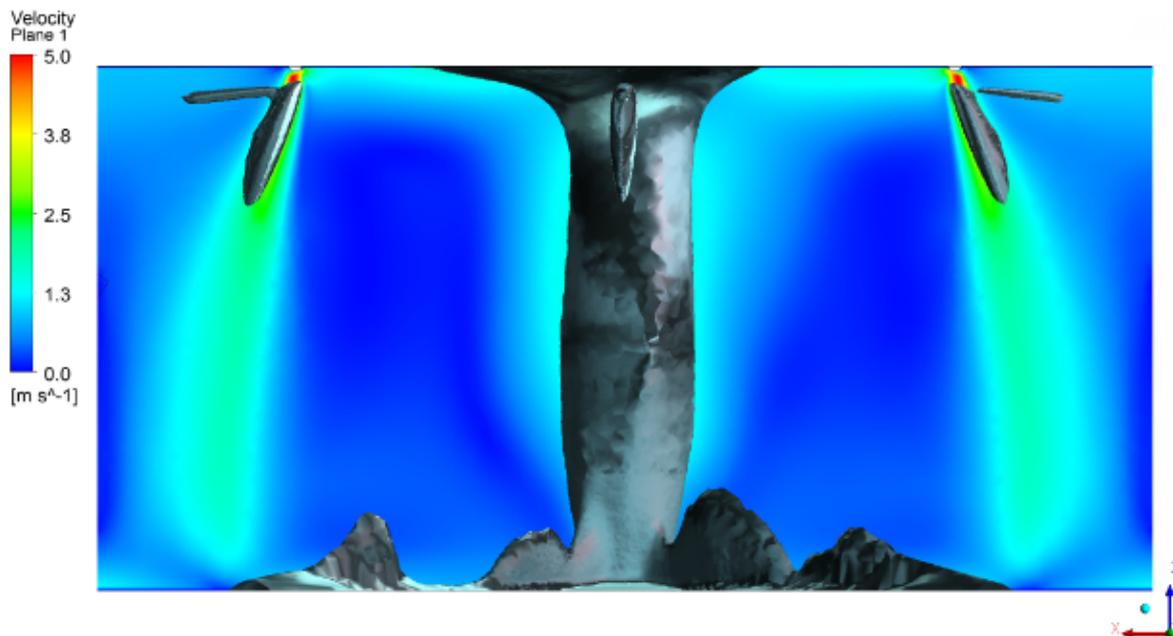


FIGURA 11.15 CAMPO DE VELOCIDADES + VAPOR NAP (4 DIFUSORES SS)

Las imágenes del NAP muestran como casi todo el vapor está en el centro de la sala. Esto puede ser debido a que el agua llega a la zona del incendio. Aquí se evapora y asciende debido a su mayor temperatura. Se aprecia algo de vapor formado en la salida del difusor, debido posiblemente a la fricción entre las partículas de agua. Este efecto puede ser generado porque las gotas más pequeñas (o las ubicadas en el perímetro exterior del chorro) en seguida se vaporizan. El resto no se evaporan hasta que no llegan más abajo y ganan temperatura.

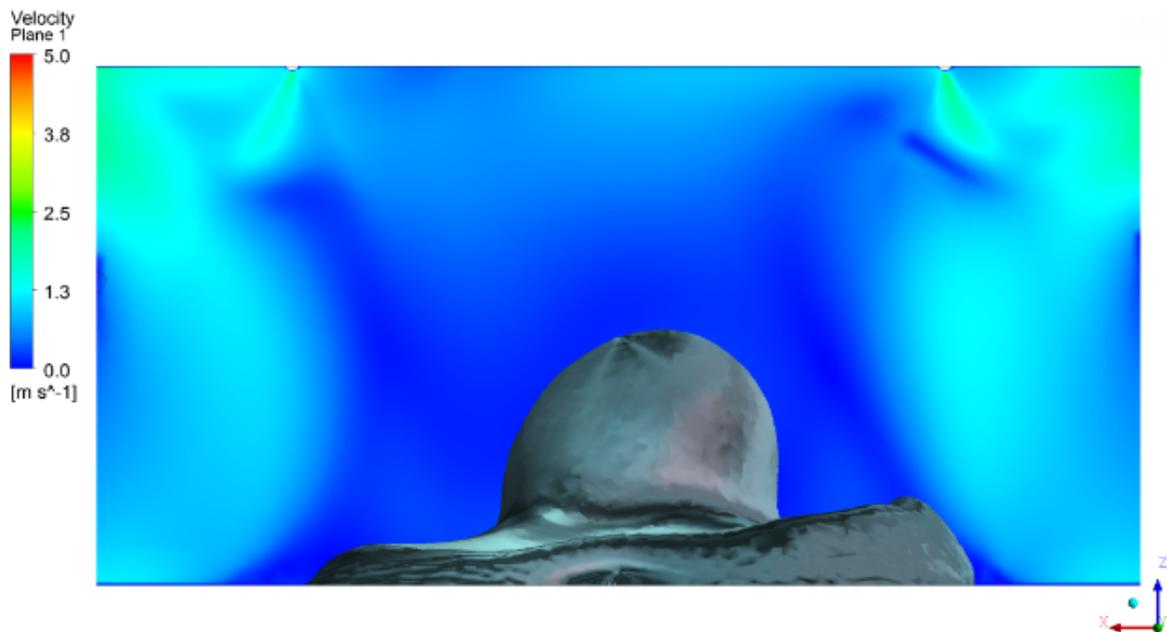


FIGURA 11.16 CAMPO DE VELOCIDADES + VAPOR RA (4 DIFUSORES SS)

En la imagen del RA todo el vapor está formado en la zona del incendio, formando una nube. Esto es debido a que las gotas de agua llegan a la zona del incendio evaporándose. El incendio queda totalmente controlado ya que no se aprecian corrientes de convección.

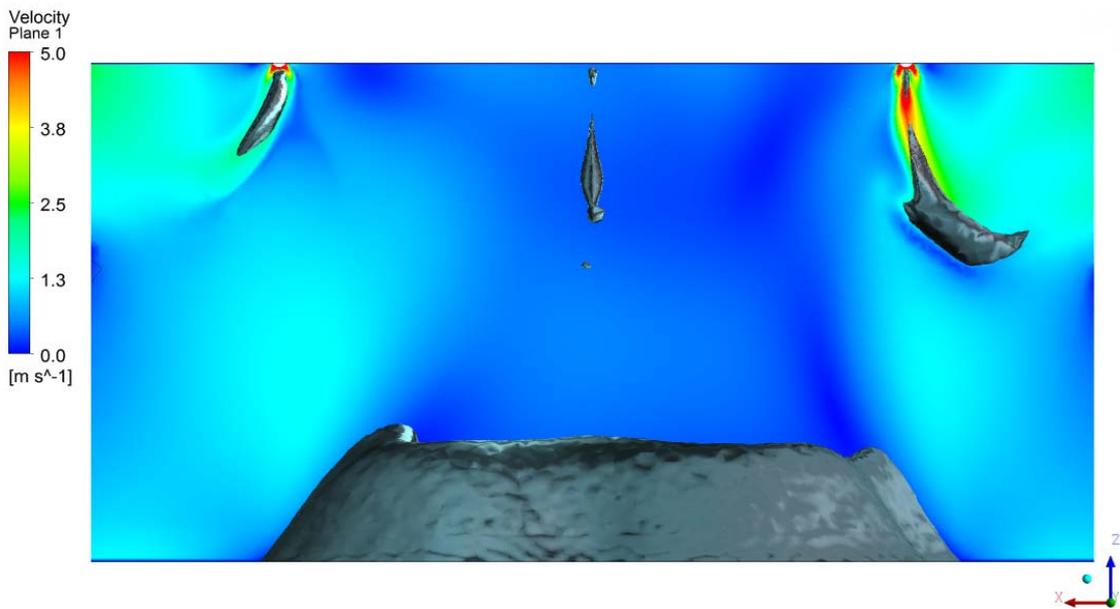


FIGURA 11.17 CAMPO DE VELOCIDADES + VAPOR NABP (4 DIFUSORES SS)

Por último, el NABP, como el RA, concentra todo el vapor en el centro de la sala. Sin embargo, la forma de la nube es más aplanada. Esto puede deberse a las corrientes de aire de los ventiladores, que modifican la forma de la nube. Aparece el mismo efecto de evaporación temprana junto a los difusores, debido al pequeño tamaño de las gotas.

Vectores de velocidad y spray de agua.

Al igual que para el vapor de agua, la nube de partículas se representa mediante una iso-surface. A partir de $1E-4$ apenas se aprecian las nubes de partículas, por su menor concentración.

Iso-surface: water particle mass fraction: $1E-5$

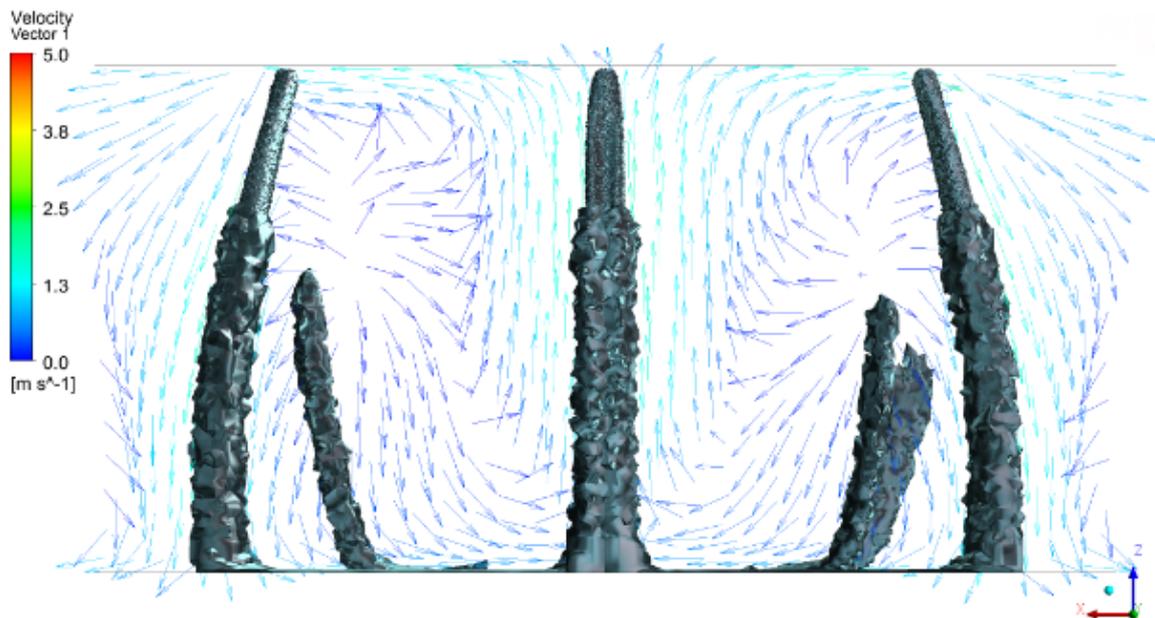


FIGURA 11.18 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NAP (4 DIFUSORES SS)

En estas imágenes puede apreciarse mejor como afectan las corrientes de aire a los chorros de agua. En el caso del NAP los chorros de aire levantan la nube de gotas de agua alejándola del centro. Esta puede ser la razón por la que no se consigue apagar del todo el incendio, ya que parte de las gotas se expulsan del sistema sin evaporarse. Este arrastre es ocasionado por el menor tamaño de sus gotas.

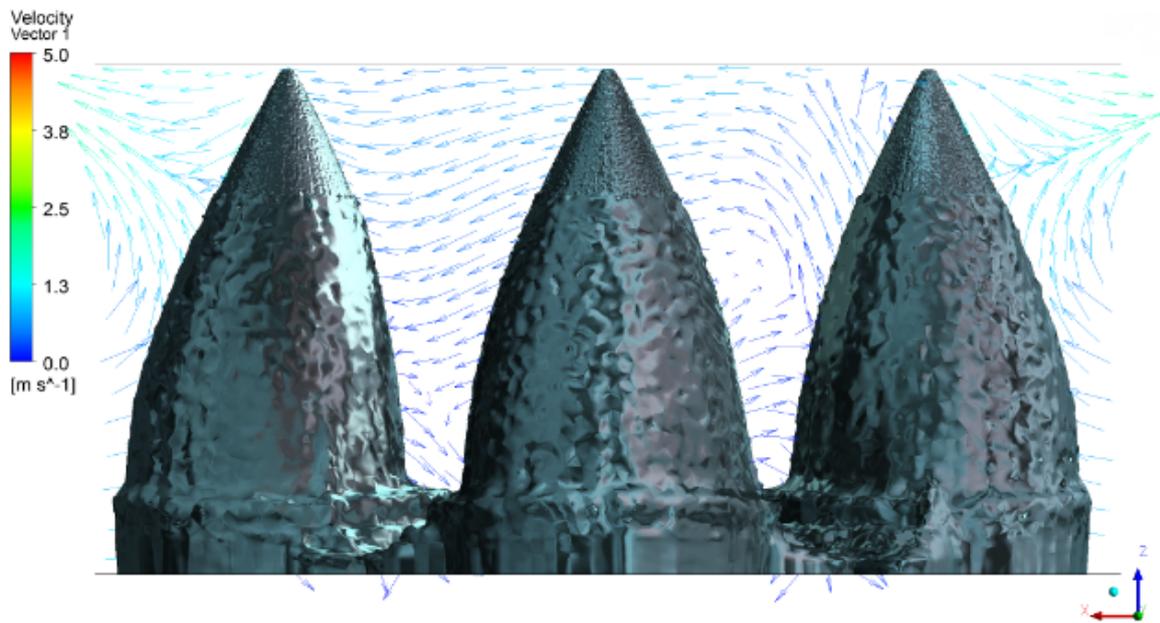


FIGURA 11.19 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY RA (4 DIFUSORES SS)

En el caso del RA la nube de gotas rodea totalmente el incendio, ocasionando un apagado perfecto.

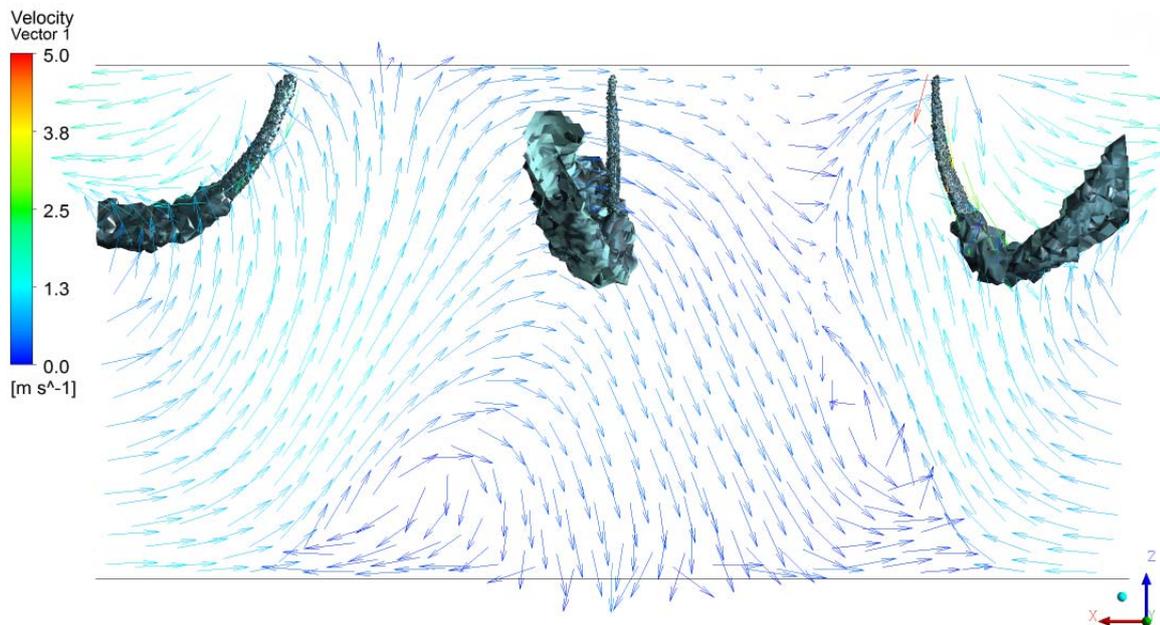


FIGURA 11.20 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NABP (4 DIFUSORES SS)

El NABP presenta unos chorros de gotas pequeños y que se expulsan del sistema. Sin embargo, este sistema consigue controlar perfectamente el incendio. Esto puede ser debido a que el empuje de los ventiladores provoca una mayor dispersión de las gotas, por lo que no aparecen en las iso-surfaces.

Iso-surface: water particle mass fraction: 1E-4

Estas imágenes han sido realizadas con un mayor valor de concentración de las partículas de agua, por lo que las figuras son de menor tamaño.

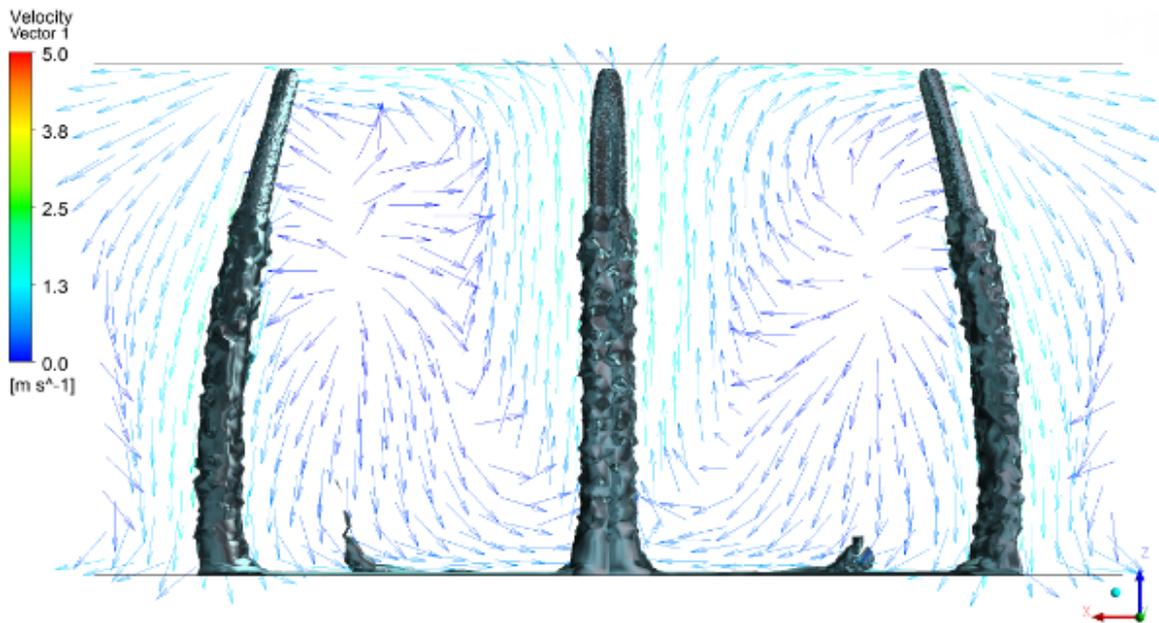


FIGURA 11.21 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NAP (4 DIFUSORES SS)

En el caso del NAP puede apreciarse como solo se aprecian las gotas que descienden, pero no las gotas arrastradas por las corrientes de aire. Esto es debido a que esas corrientes arrastradas tienen menor concentración por lo que no aparecen en la iso-surface.

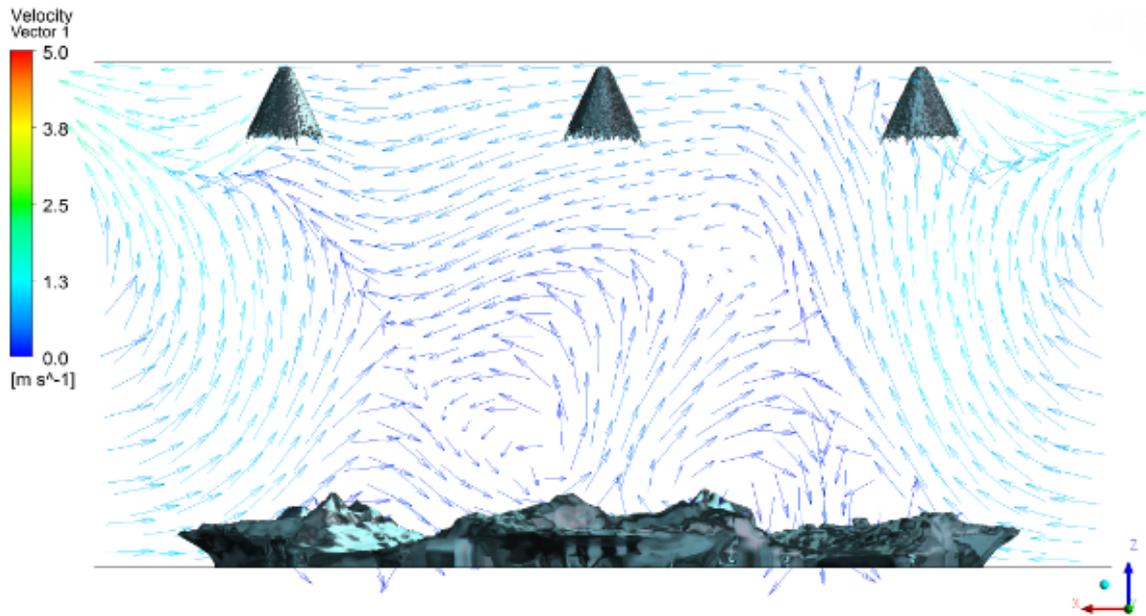


FIGURA 11.22 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY RA (4 DIFUSORES SS)

El RA presenta únicamente partículas en la salida de los difusores y en el suelo. Esto es debido a que hay mayor concentración de partículas en la salida del difusor, lógicamente, ya que después se dispersan. En el suelo aparece una nube, posiblemente debido a que es la zona de impacto del agua por lo que aumenta la concentración de agua.

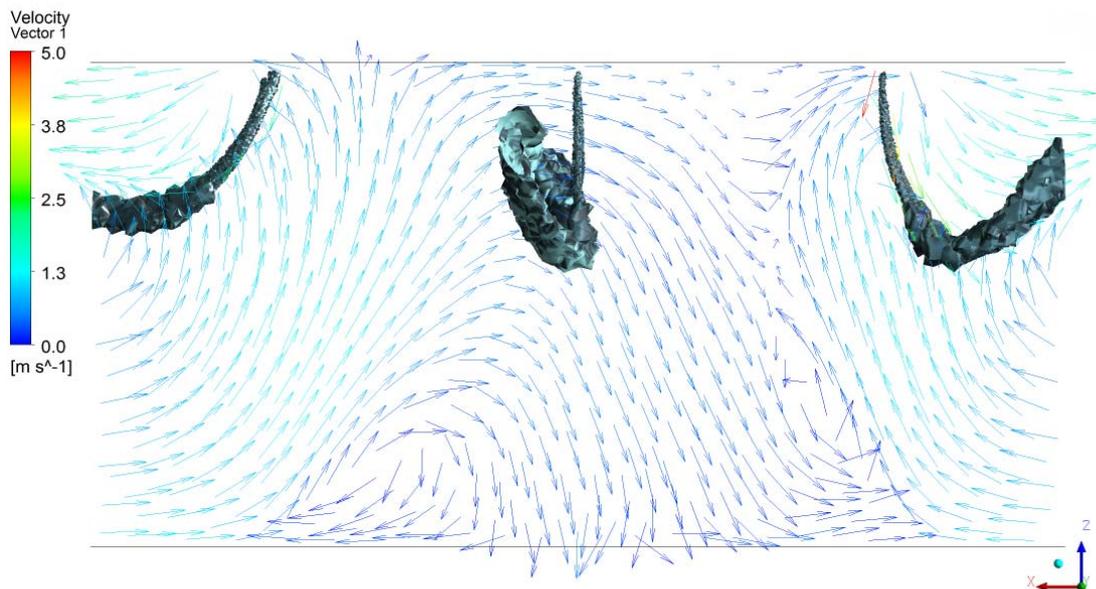
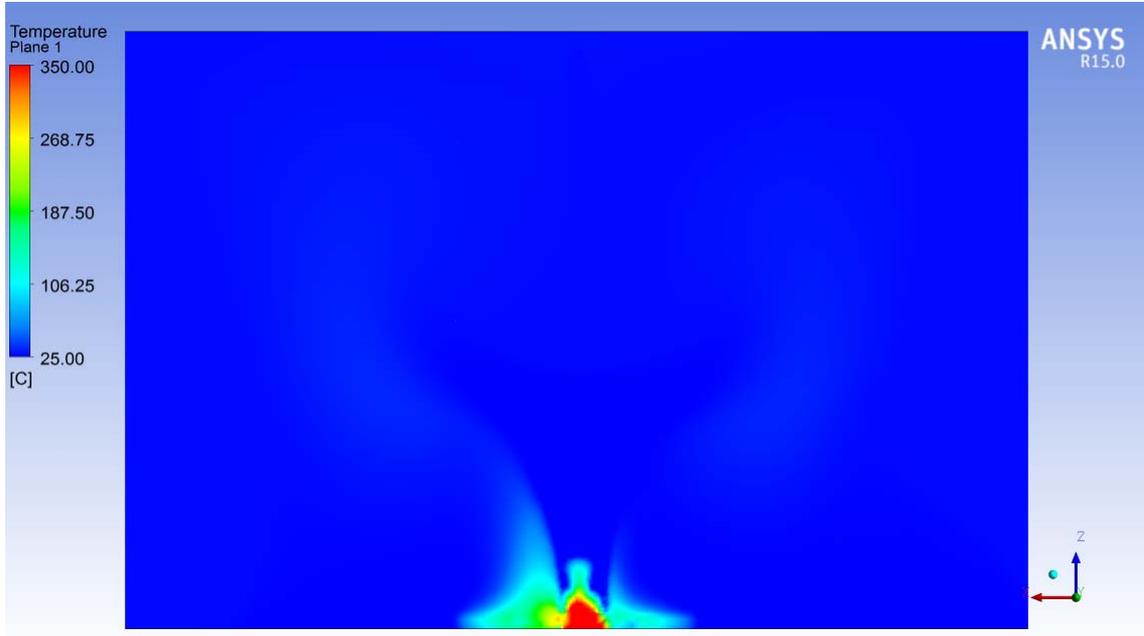


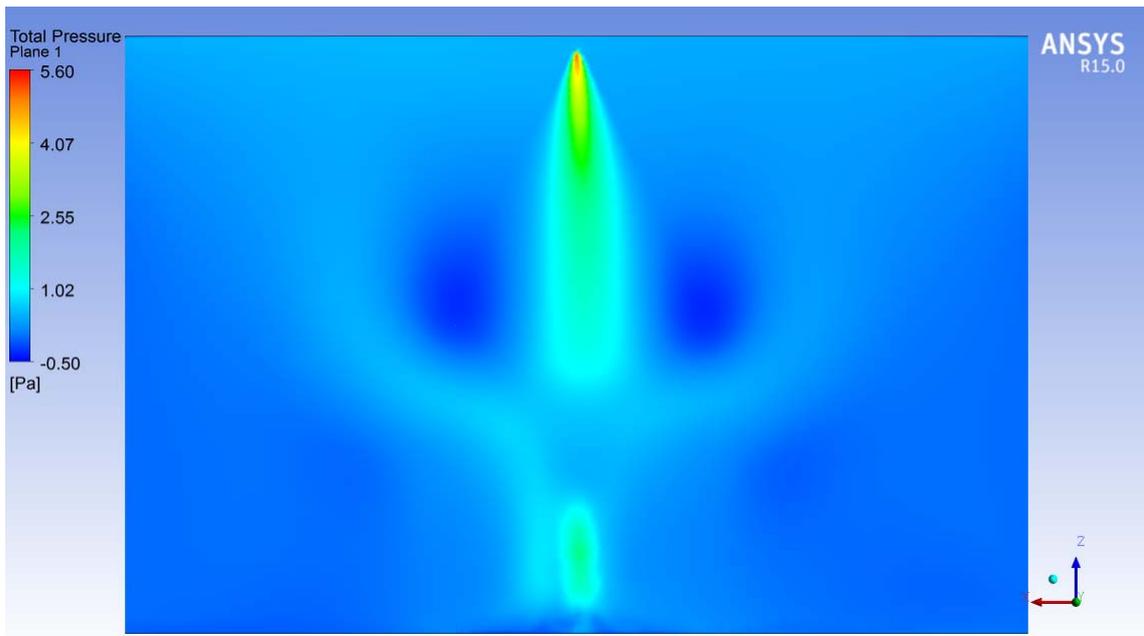
FIGURA 11.23 CAMPO DE VELOCIDADES + SPRAY NABP (4 DIFUSORES SS)

Simulaciones ROCIADOR AUTOMÁTICO DIFUSOR ÚNICO (MODELO COMBUSTIÓN 2 – SUBDOMAIN-) SS

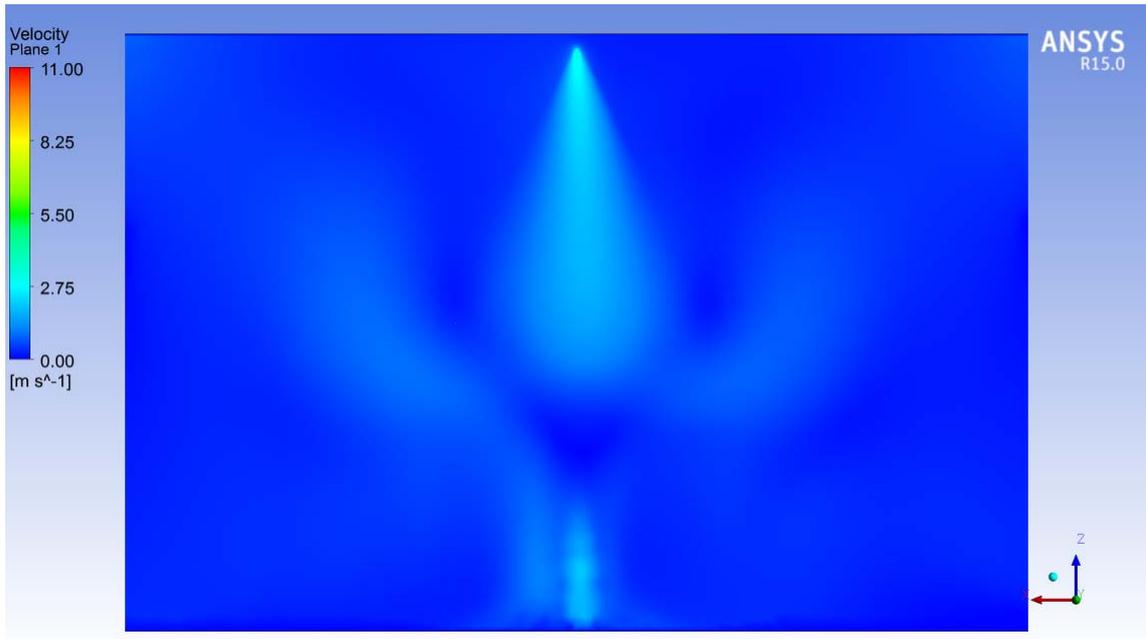
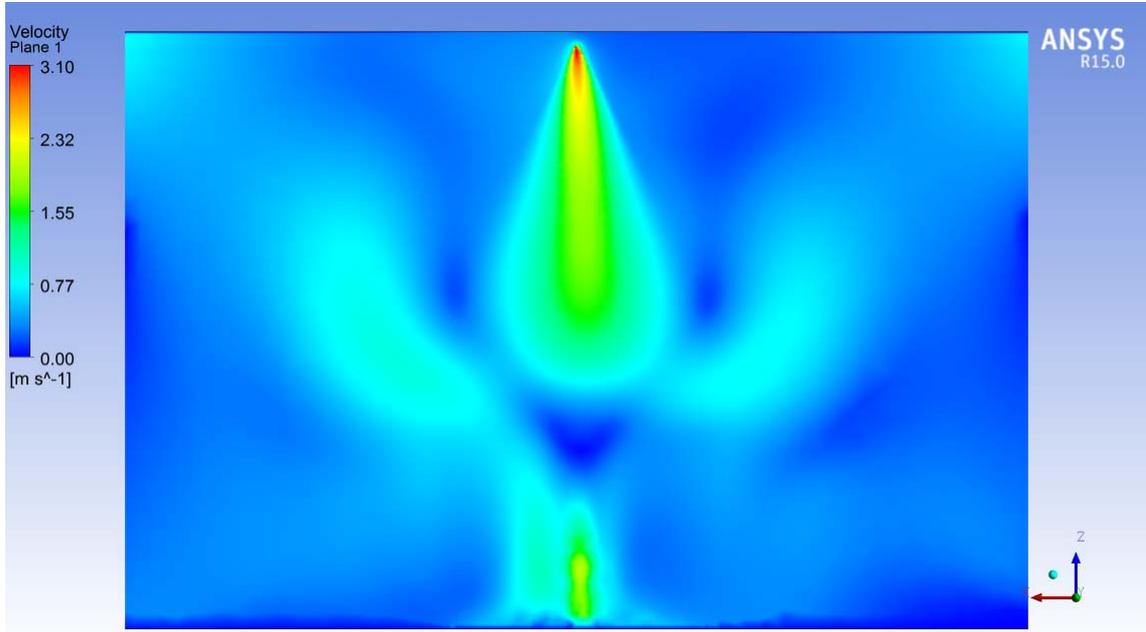
Perfil de **Temperatura** en plano vertical



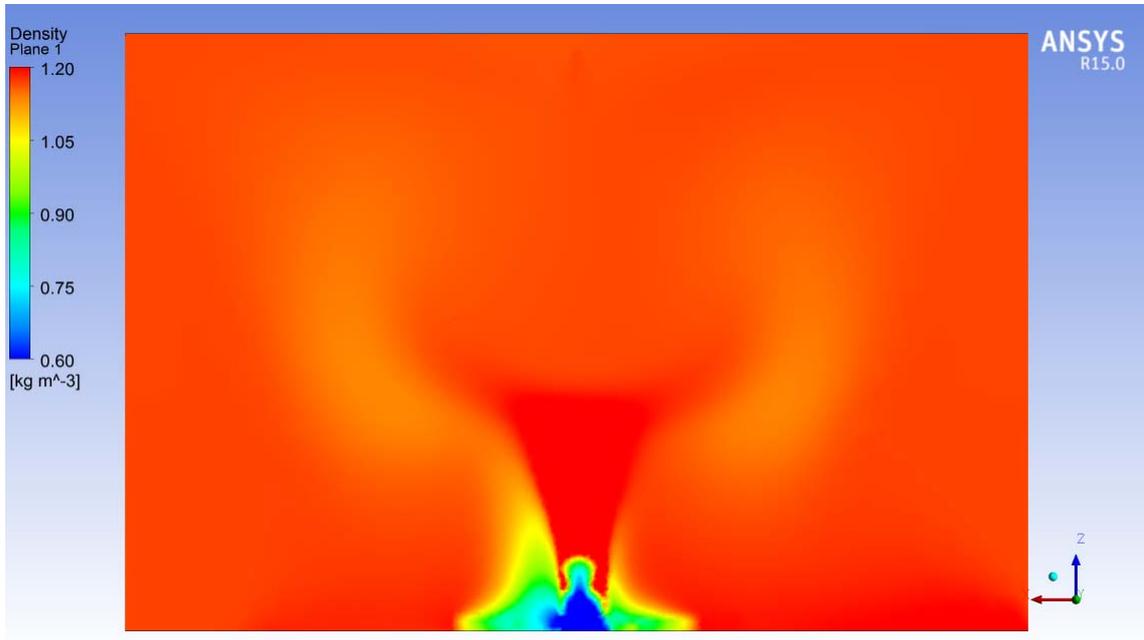
Perfil de **Presión Total** en plano vertical



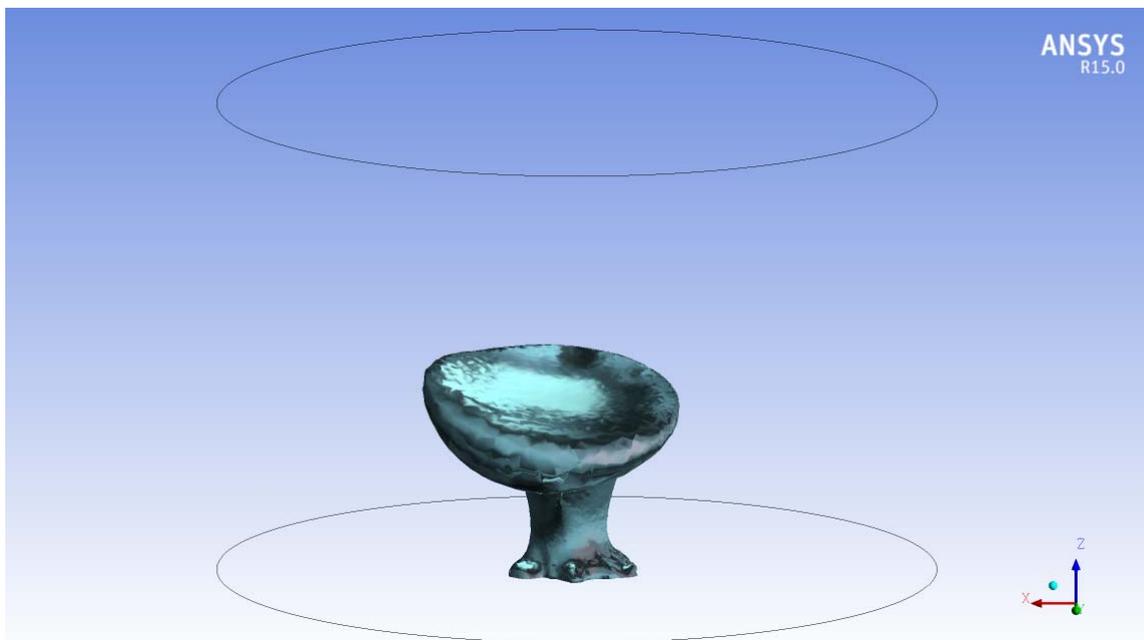
Perfil de **Velocidades** en plano vertical (con 2 escalas diferentes)



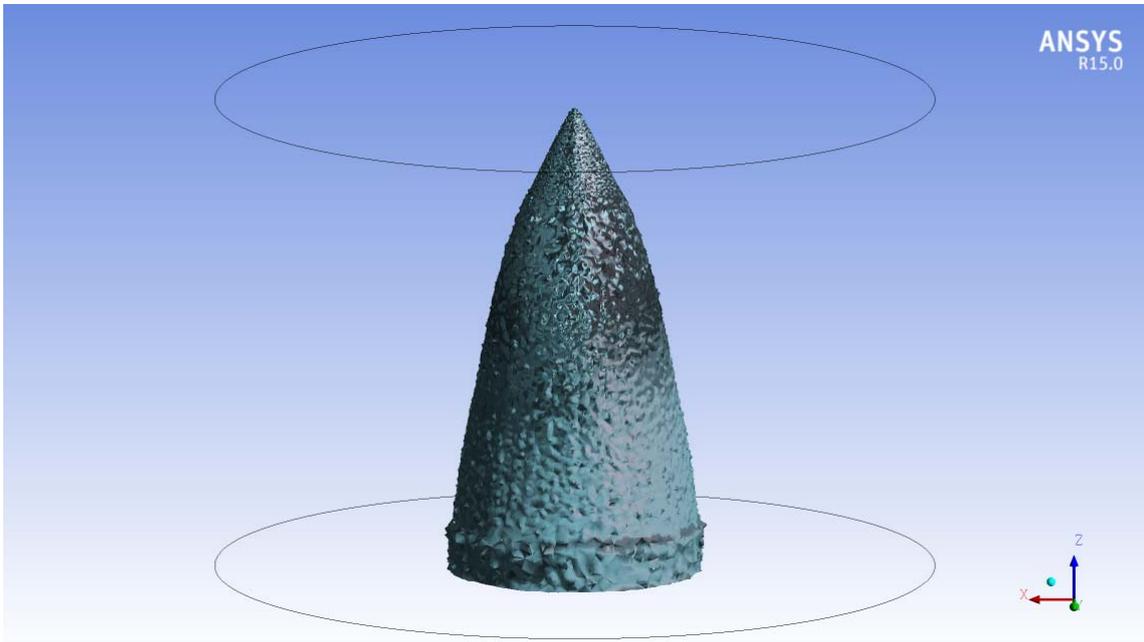
Perfil de **Densidad** en plano vertical



Vapor de Agua 3D

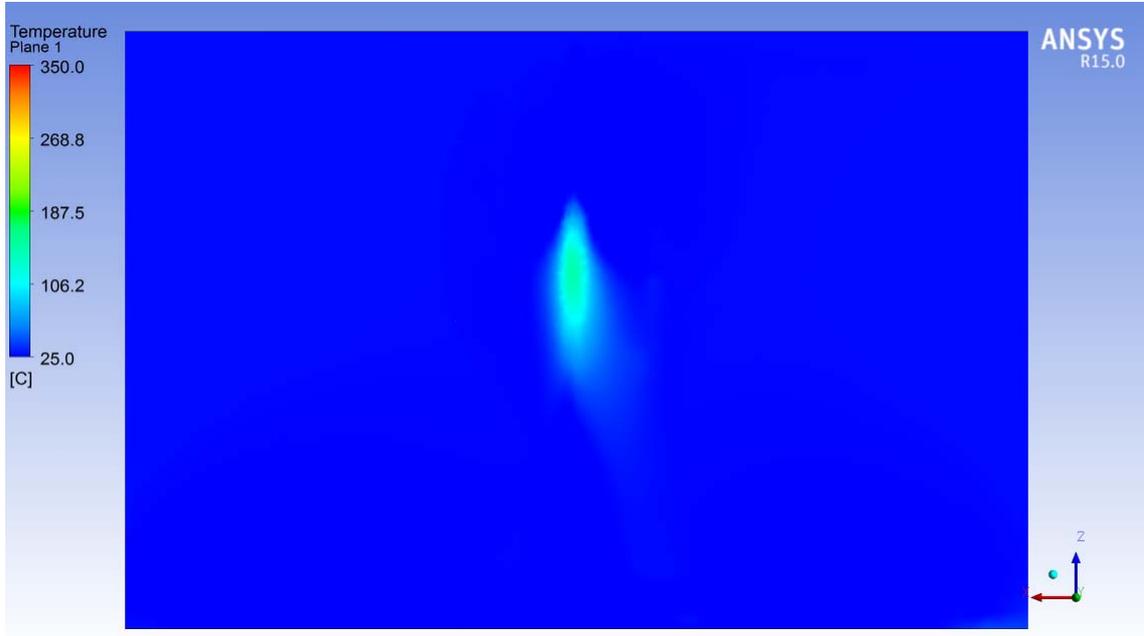


Agua líquida 3D

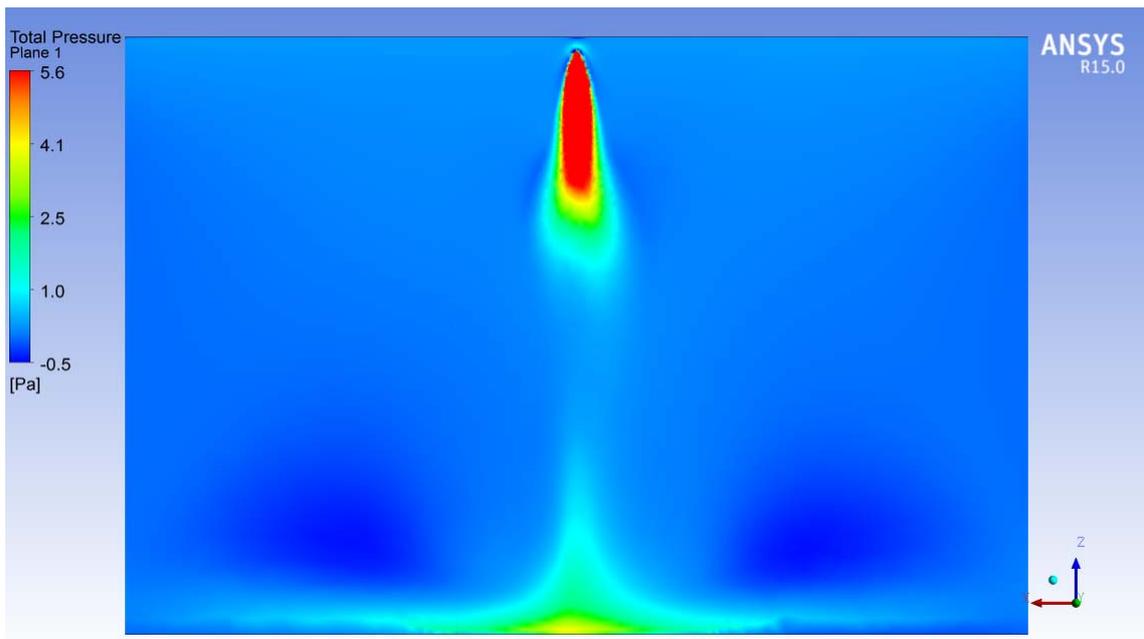


Simulaciones NAP DIFUSOR ÚNICO (MODELO COMBUSTIÓN 2 – SUBDOMAIN-) SS

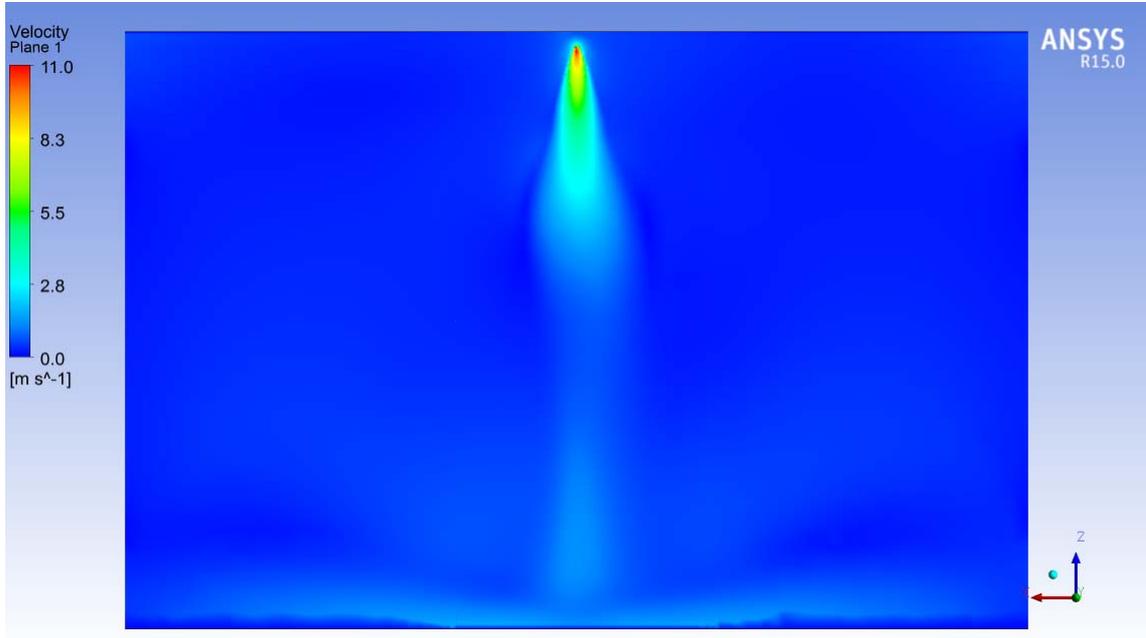
Perfil de **Temperatura** en plano vertical



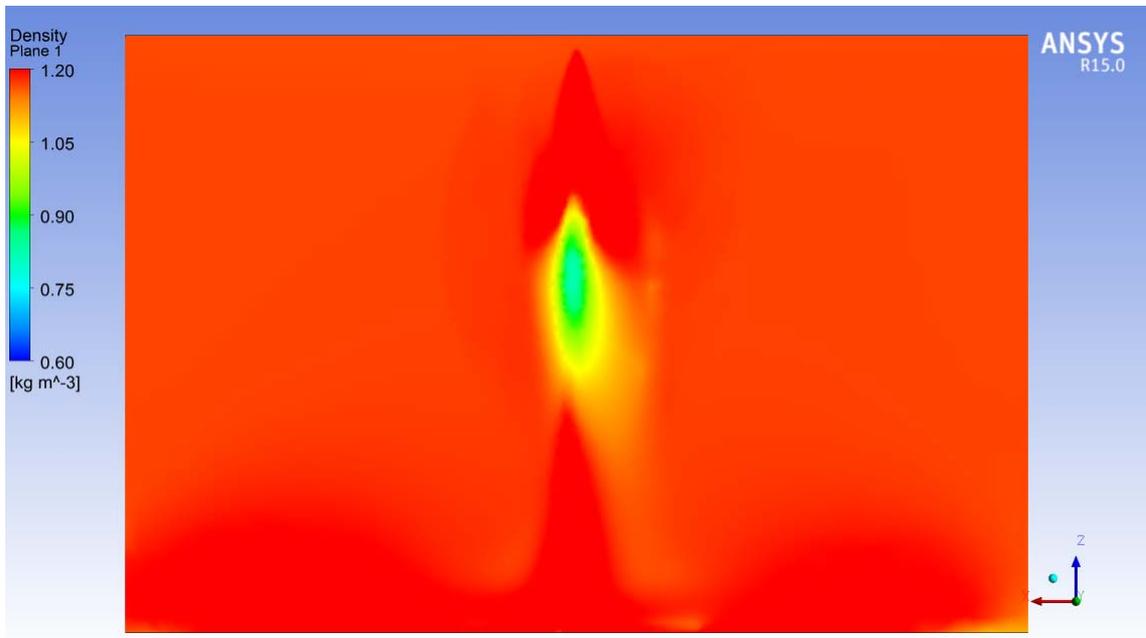
Perfil de **Presión Total** en plano vertical



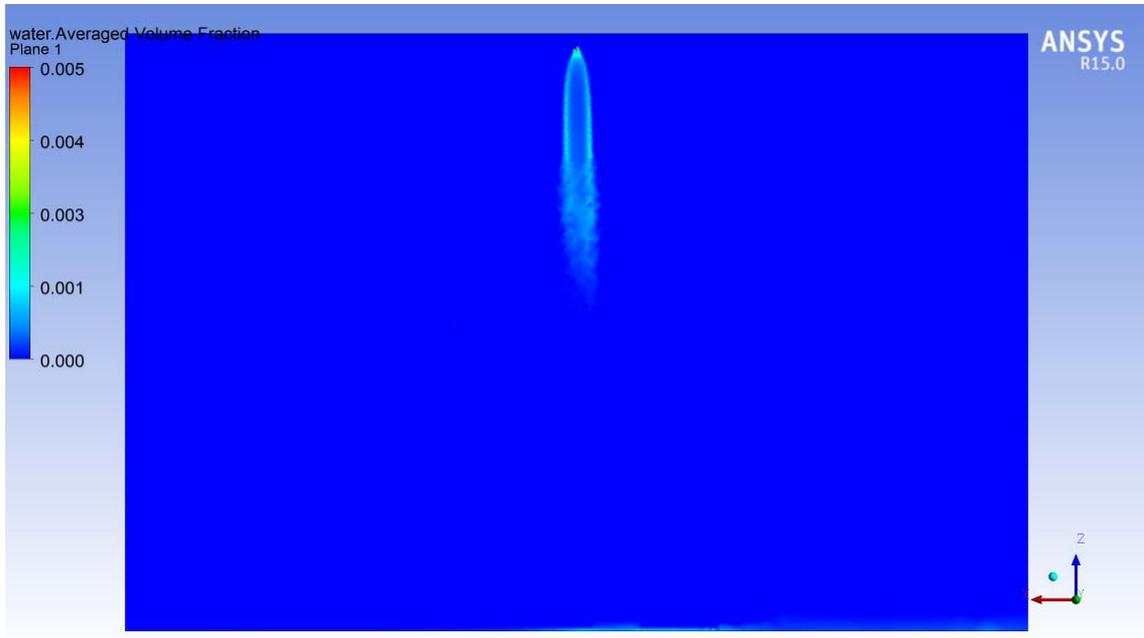
Perfil de **Velocidades** en plano vertical



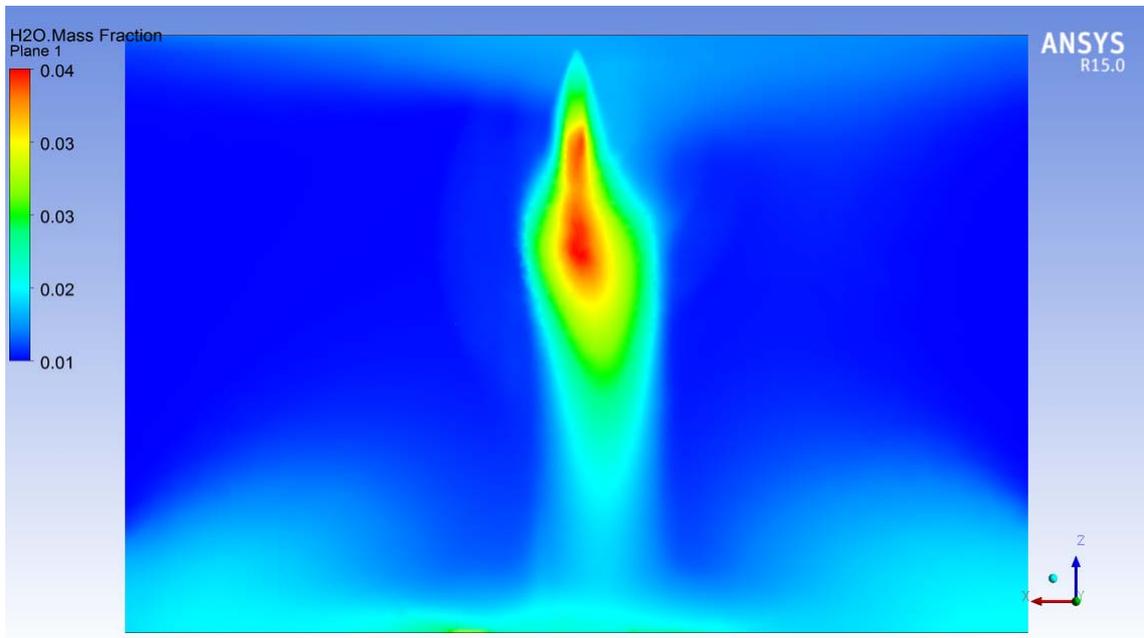
Perfil de **Densidad** en plano vertical



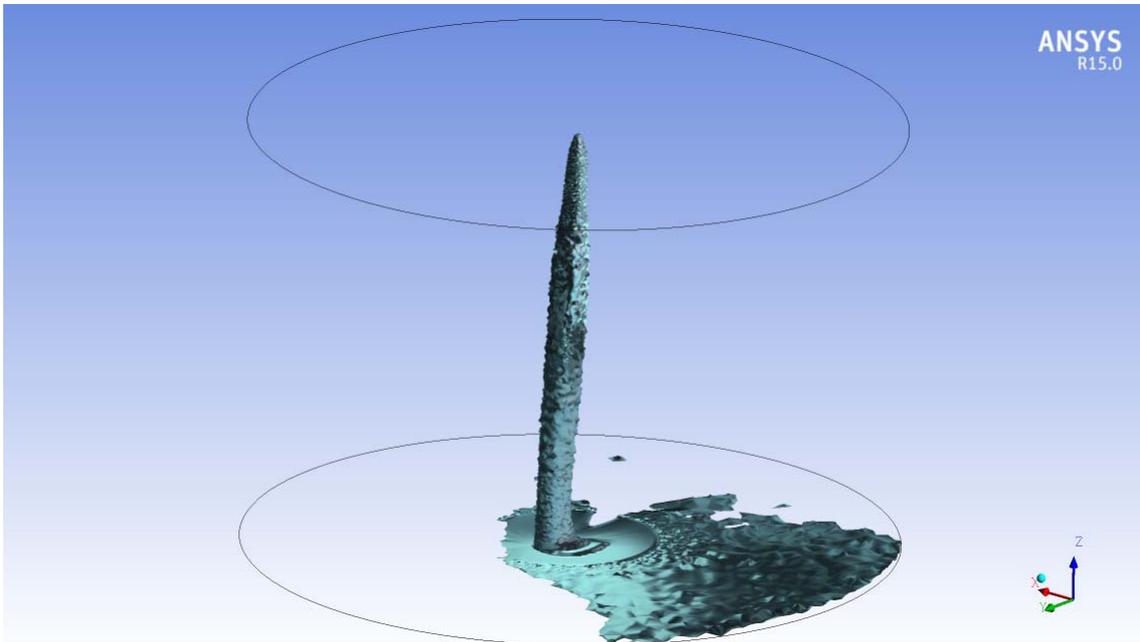
Perfil de **Agua Líquida** en plano vertical



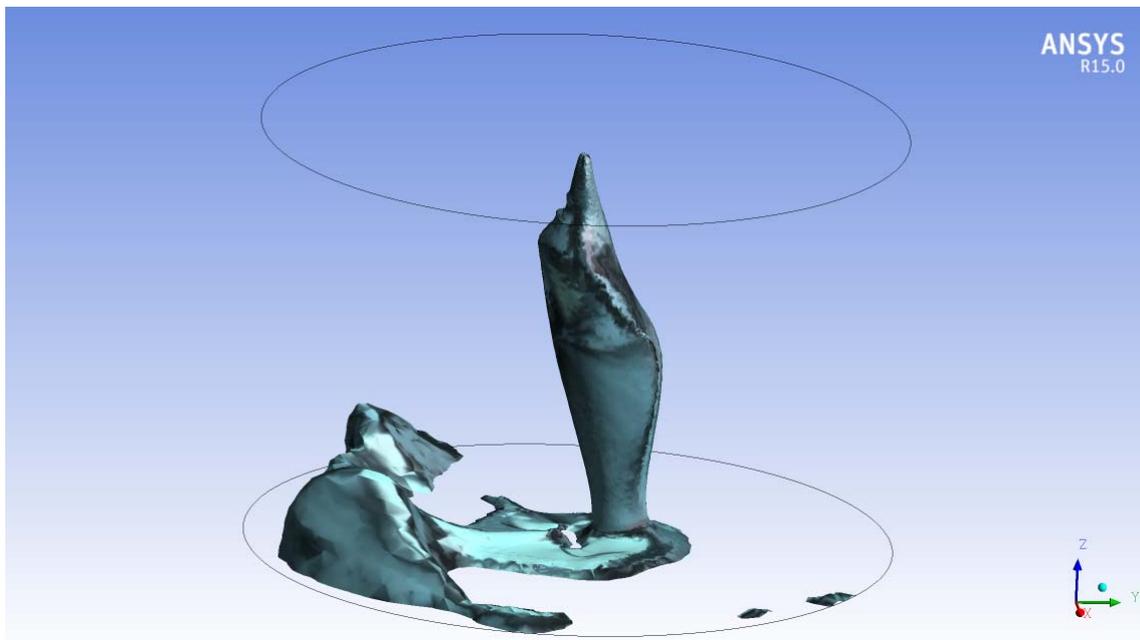
Perfil de **Vapor de Agua** en plano vertical



Agua líquida 3D

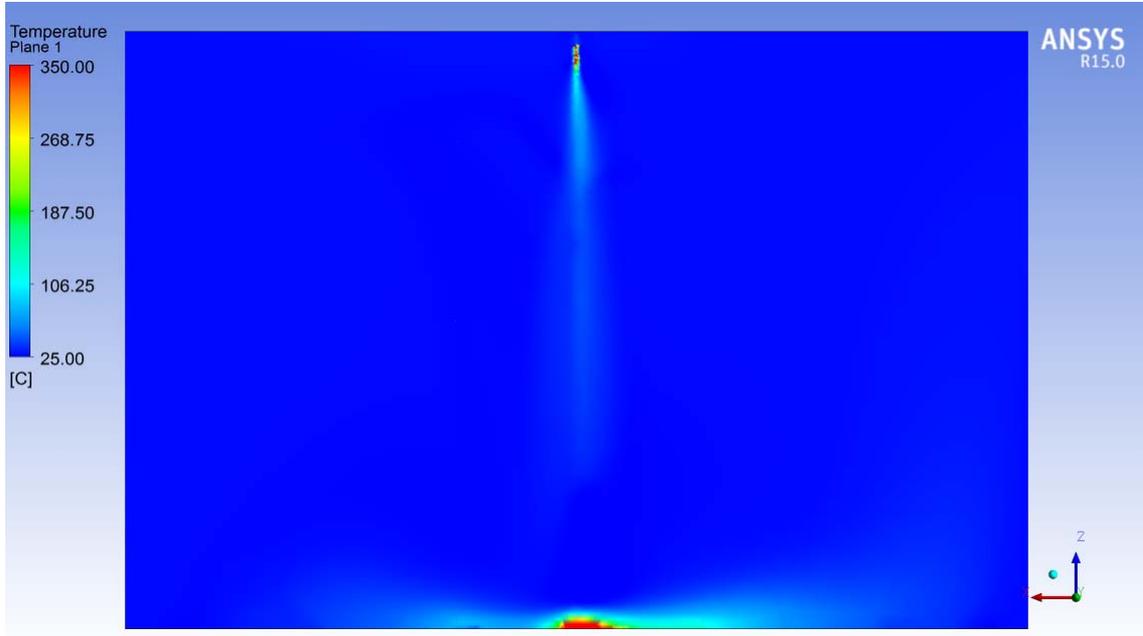


Vapor de agua 3D

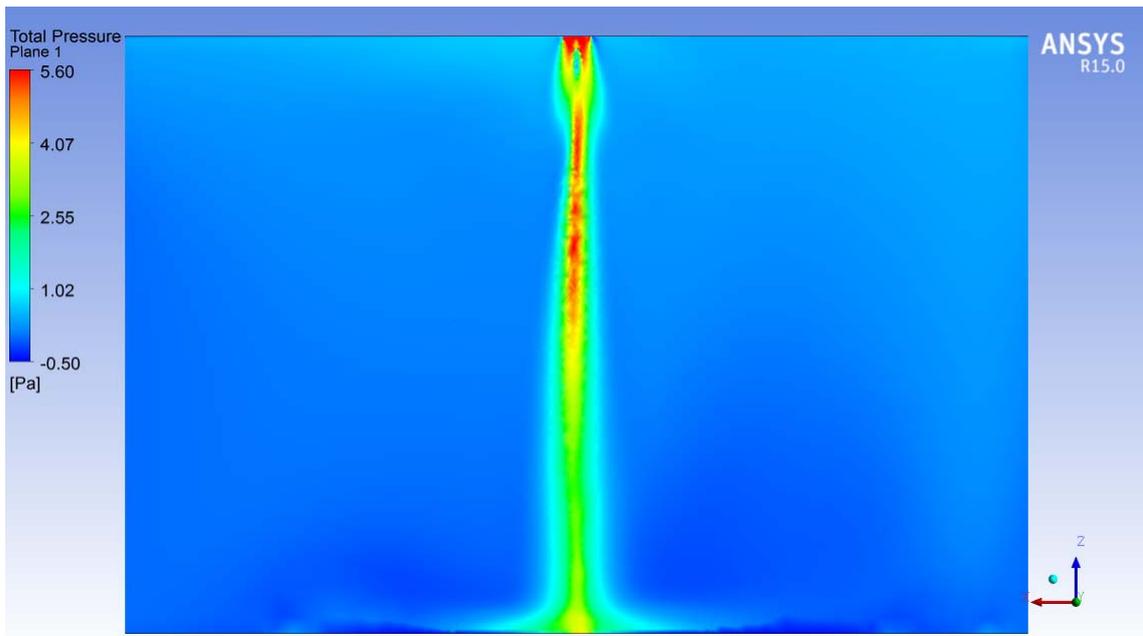


Simulaciones NABP@10m/s DIFUSOR ÚNICO (MODELO COMBUSTIÓN 2 – SUBDOMAIN-) SS

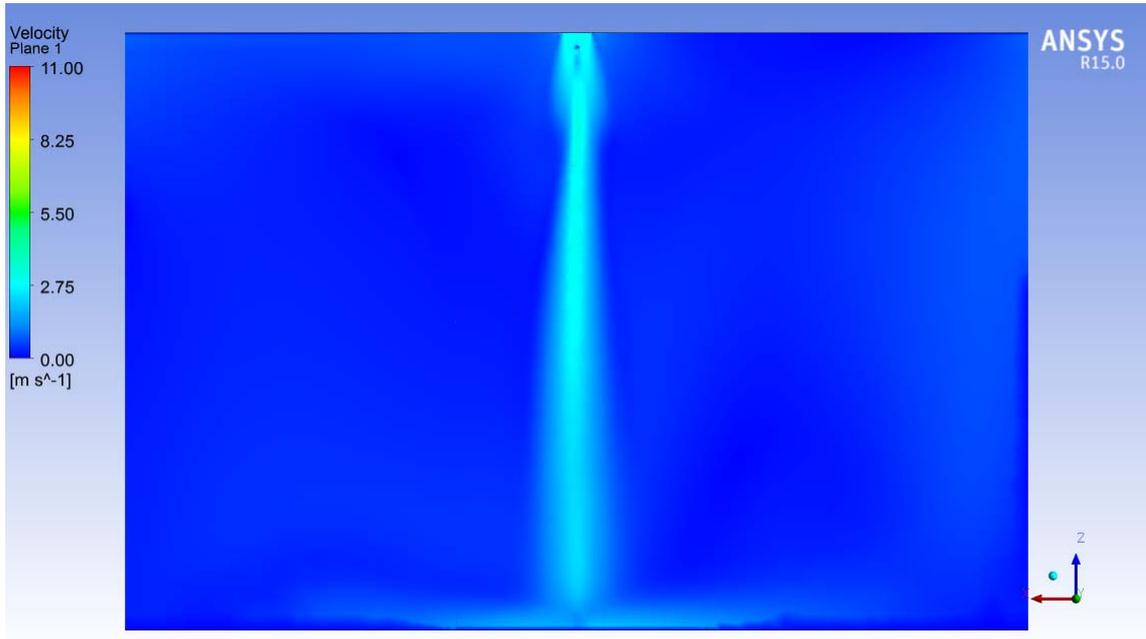
Perfil de **Temperatura** en plano vertical



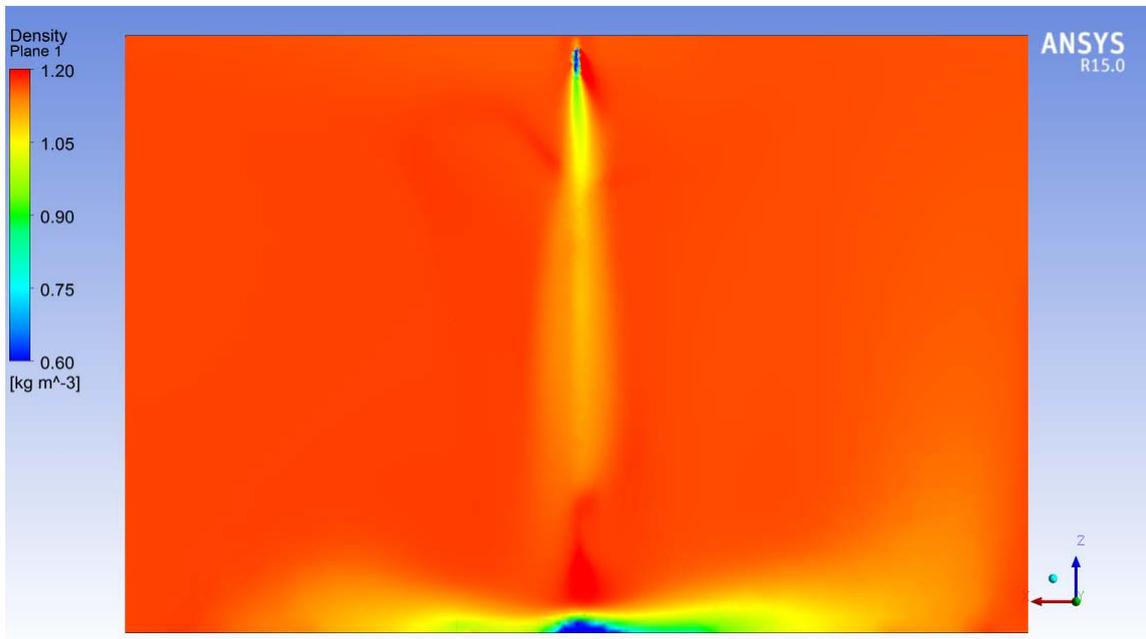
Perfil de **Presión Total** en plano vertical



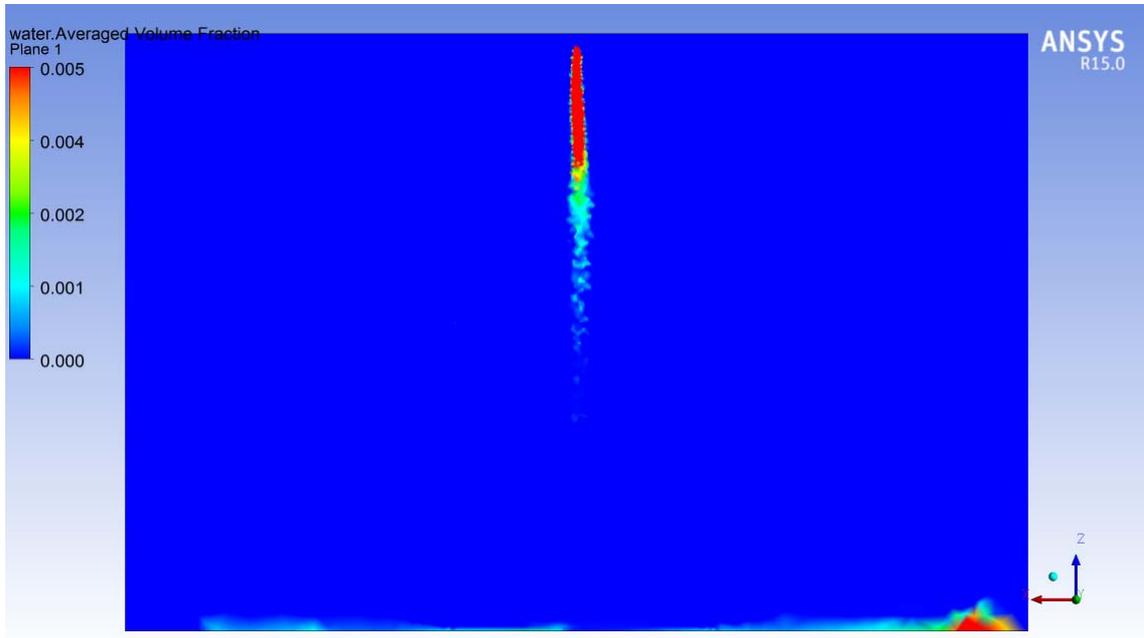
Perfil de **Velocidades** en plano vertical



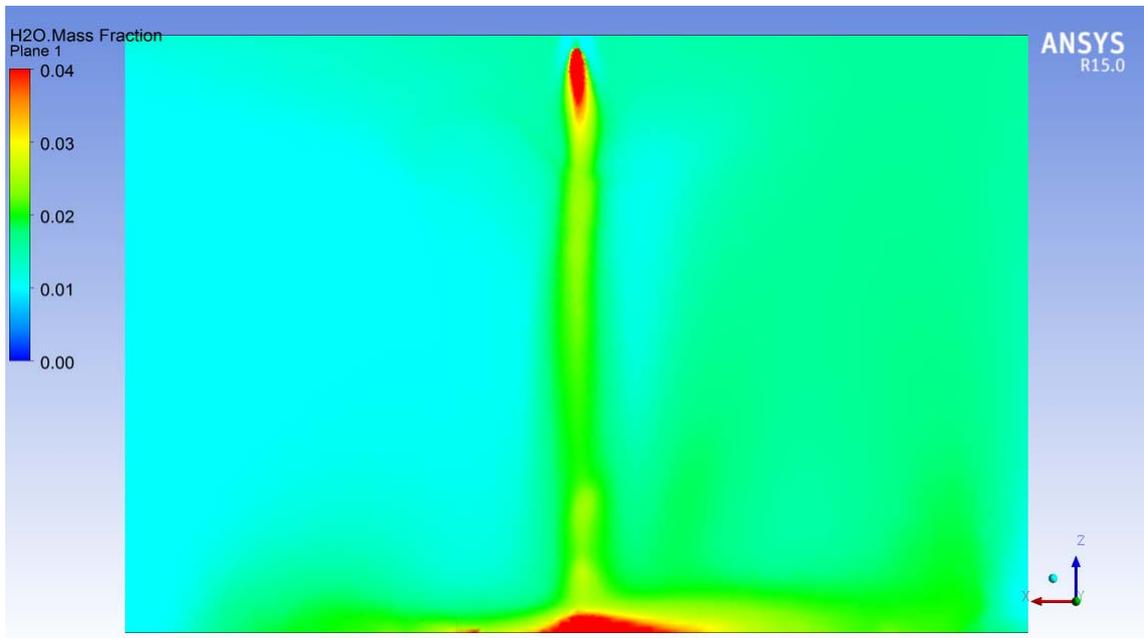
Perfil de **Densidad** en plano vertical



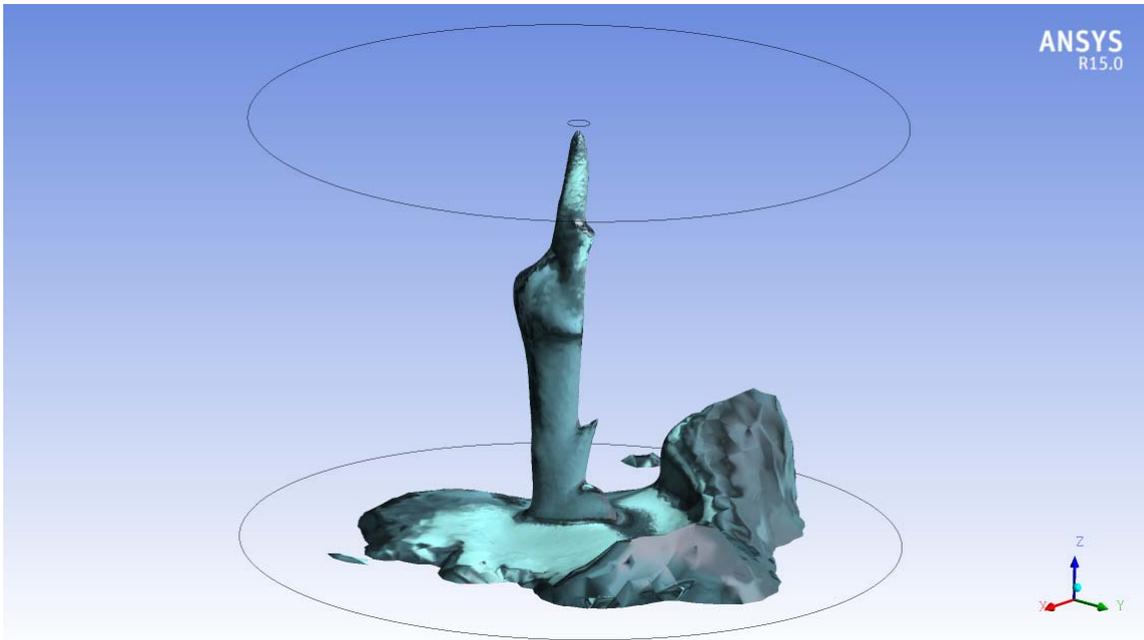
Perfil de **Agua Líquida** en plano vertical



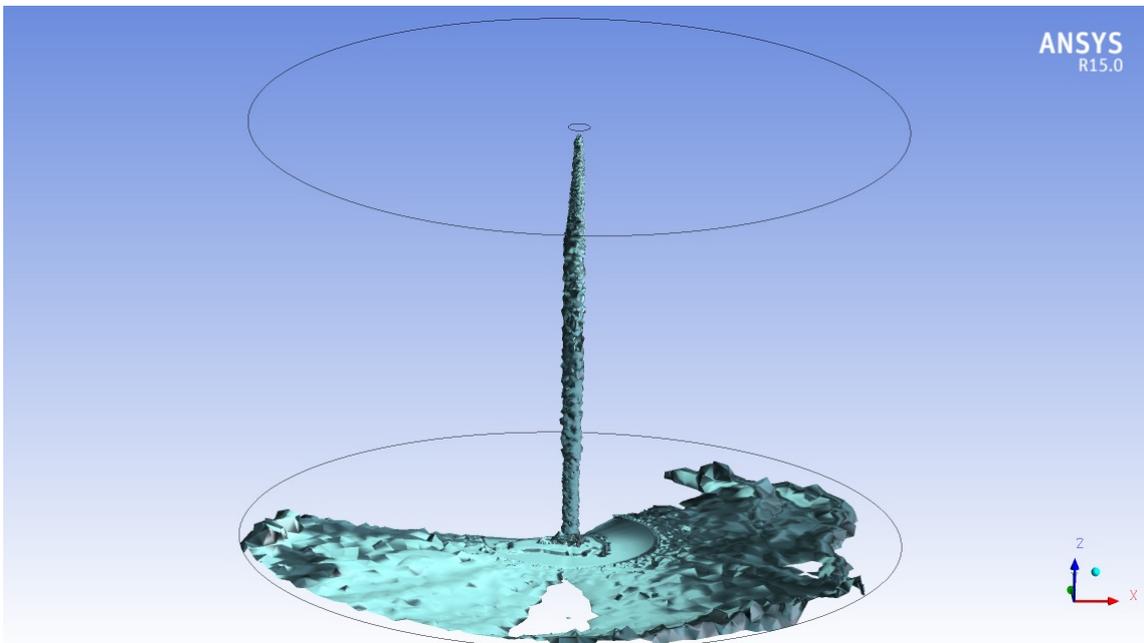
Perfil de **Vapor de Agua** en plano vertical



Vapor de Agua 3D



Agua líquida 3D



Perfiles de temperatura y partículas de agua de los 3 sistemas simulados (TR)			
Tiempo (s)	NABP	NAP	ROC
3			
3,5			
4			

