



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

*Modelado de una lancha de instrucción para el estudio de  
propagación y extinción de incendios*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Borja Carrín Beamud

**DIRECTORES:** Roberto Bellas Rivera

Miguel Ángel Gómez Rodríguez

**CURSO ACADÉMICO:** 2015-2016

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado de una lancha de instrucción para el estudio de  
propagación y extinción de incendios*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

Desde la Segunda Guerra Mundial, la investigación en el ámbito de la seguridad contra incendios ha progresado hasta llegar, en la actualidad, a la simulación computacional de incendios. Por ello el presente trabajo realiza un estudio de simulación computacional de incendios en las lanchas de instrucción Rodman-66 con el fin de comparar dichos resultados con ensayos reales realizados por laboratorios internacionales o US NAVY. Este objetivo se ha conseguido gracias a la elaboración de una metodología basada en el estudio de los diferentes modelos de simulación y de las teorías de la combustión, aplicándolo en el software de simulación por modelo de zona CFAST (*Consolidated Model os Fire Growth and Smoke Transport*), desarrollado por el NIST (*National Institute of Standars and Technology*).

Los datos obtenidos han sido analizados llegando a la conclusión de la utilidad de este tipo de softwares de simulación en el estudio de incendios en buques de la Armada.

Al mismo tiempo se desarrolla un modelado CAD de la geometría en Siemens NX para su uso en modelos de simulación por campo, como FDS. Quedando abierto este tipo de simulaciones a líneas futuras de investigación.

## **PALABRAS CLAVE**

Simulación, CFAST, Incendio, Modelado, NX, Fuego, Ensayos, Lancha, Buque



# AGRADECIMIENTOS

Quiero brindar mi más sincero agradecimiento a los tutores de este proyecto, el Sr Roberto Bellas Rivera y el Sr. Miguel Ángel Gómez Rodríguez por haberme ayudado, desde el comienzo hasta el final, en el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado.

Además, agradezco a mis amigos, compañeros de promoción y a familia, en especial a mi madre por el apoyo recibido durante estos cinco años, ya que sin ellos no habría sido posible llegar hasta donde hoy estoy.  
¡BZ!

**Borja Carrín Beamud**

*“Elige un trabajo que te guste y no tendrás que trabajar ni un día de tu vida”*

***Confucio***



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Objetivos del TFG.....	8
1.3 Metodología del Proyecto .....	9
1.4 Organización de la memoria .....	9
2 Estado del arte .....	11
2.1 Teoría de la combustión .....	11
2.1.1 Proceso de combustión .....	11
2.1.2 Transferencia de calor y fases del crecimiento del incendio .....	13
2.1.3 Flashover.....	15
2.2 Estudio de la combustión y los incendios .....	16
2.2.1 Ensayos de incendios .....	16
2.2.2 Diseño Basado en prestaciones.....	17
2.2.3 Simulación .....	18
2.3 Introducción a MSC- Modelos de simulación computacional de incendios .....	19
2.3.1 Conceptos básicos de los MSC.....	19
2.3.2 Aplicaciones de la simulación de incendios .....	20
2.4 MSC- Modelos de simulación computacional de incendios.....	21
2.5 Modelos de zona .....	22
2.5.1 Herramienta CFAST y limitaciones .....	23
2.5.2 Descripción de los modelos, ecuaciones principales .....	23
2.6 Modelos de campo .....	25
2.6.1 Herramienta FDS y limitaciones .....	26
2.6.2 Descripción de los modelos, ecuaciones que tienen en cuenta.....	27
2.7 Sistemas CAD- Diseño Asistido por Computador.....	28
3 Desarrollo del TFG.....	30
3.1 Modelado de la Geometría.....	30
3.1.1 Descripción del programa NX 8.0 de SIEMENS y entorno de trabajo .....	30
3.1.2 Operaciones principales de modelado utilizadas .....	32
3.1.3 Modelado de Casco.....	35
3.1.4 Modelado de Superestructura .....	39

3.2 Simulación de incendios .....	41
3.2.1 Simulación de incendios cámara de máquinas .....	41
3.2.2 Simulación en camarotes-acomodación .....	49
4 Resultados / Validación / Prueba.....	54
4.1 Resultados de simulación de incendio (500 kW) en cámara de máquinas sin extinción.....	54
4.1.1 Temperaturas .....	56
4.1.2 Humos y gases .....	58
4.2 Resultados de simulación de incendio (500kW) en cámara de máquinas con extinción.....	59
4.2.1 Temperaturas .....	61
4.2.2 Humos y gases .....	64
4.3 Resultados de simulación de incendios (250 kW) en cámara de máquinas sin extinción .....	66
4.4 Resultados de simulación de incendio en camarotes-acomodación sin extinción .....	67
4.4.1 Temperaturas .....	68
4.4.2 Humos y gases .....	69
4.4.3 HRR .....	71
4.5 Resultados de simulación de incendios en camarote-acomodación con extinción.....	72
4.5.1 Temperaturas .....	72
4.5.2 Humos y gases .....	73
5 Conclusiones y líneas futuras .....	75
6 Bibliografía.....	77
Anexo I: Normas de seguridad contra incendios y directrices del código imo fss fire safety systems, ssci sistemas de seguridad contra incendios.....	79
Anexo II: Planos Lancha de instrucción Rodman-66.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Flujos de energía en un material en combustión [7].....	12
Figura 2-2 Fases del desarrollo de un incendio [9] .....	14
Figura 2-3 Esquema de un penacho con entrada de aire [9] .....	15
Figura 2-4 Descripción Flashover [11] .....	16
Figura 2-5 Ejemplo de ensayo en laboratorio a pequeña escala [11].....	17
Figura 2-6 Metodología PBD [4] .....	18
Figura 2-7 Esquema Metodología MSCI [17].....	19
Figura 2-8 Representación del Modelo de Zona [20].....	22
Figura 2-9 Penacho y entrada de aire [17] .....	24
Figura 2-10 Fenómeno de <i>Celing jet</i> [5] .....	25
Figura 2-11 Representación modelo de campo en FDS [22] .....	26
Figura 2-12 Mallado de la lancha de instrucción en FDS .....	27
Figura 2-13 Formas de descripción de elementos en CAD.....	29
Figura 3-1 Entornos de trabajo en NX 8.0 .....	31
Figura 3-2 Interfaz entorno Modelo .....	31
Figura 3-3 Historial de modelos .....	32
Figura 3-4 Sistemas de coordenadas .....	32
Figura 3-5 Icono de Plano Datum .....	32
Figura 3-6 Icono Croquis .....	33
Figura 3-7 Iconos de la herramienta Curva .....	33
Figura 3-8 Icono Línea .....	33
Figura 3-9 Icono Arco .....	33
Figura 3-10 Icono Spline .....	34
Figura 3-11 Icono Extrusión.....	34
Figura 3-12 Icono Redondeo .....	34
Figura 3-13 Icono Chaflán .....	34
Figura 3-14 Icono Simetría.....	34
Figura 3-15 Icono Mover .....	34
Figura 3-16 Icono de Barrido .....	35
Figura 3-17 Secciones Transversales y Horizontales [24] .....	35
Figura 3-18 Tetraedro de trabajo.....	36
Figura 3-19 Tetraedro con planos de secciones .....	36
Figura 3-20 Cuadernas proyectando el volumen de carena .....	37

Figura 3-21 Semi-manga generada por barrido.....	37
Figura 3-22 Casco Lancha de instrucción R66 proa .....	38
Figura 3-23 Proa Lancha de instrucción R66.....	38
Figura 3-24 Casco Lancha de instrucción R66 quilla .....	38
Figura 3-25 Eslora Lancha de instrucción R66.....	38
Figura 3-26 Croquis superestructura .....	39
Figura 3-27 Modelo CAD Lancha de instrucción R66 .....	39
Figura 3-28 Modelo CAD Lancha de instrucción R66 .....	40
Figura 3-29 Lancha de instrucción R66 .....	40
Figura 3-30 Modelado de lancha de instrucción R66 en CFAST .....	41
Figura 3-31 Ventana tiempos de simulación.....	42
Figura 3-32 Geometría y componentes del volumen de control de la cámara de máquinas.....	43
Figura 3-33 Propiedades Termo físicas de los materiales en la cámara de máquinas.....	43
Figura 3-34 Ventana de Termopares cámara de máquinas .....	44
Figura 3-35 Condiciones ambientales de la simulación en CFAST.....	45
Figura 3-36 Evolución del HRR con el tiempo [18] .....	46
Figura 3-37 Elementos de combustión en el heptano.....	46
Figura 3-38 Propiedades de inflamabilidad de combustibles líquidos [10] .....	47
Figura 3-39 Representación de HRR frente al tiempo en una balsa de heptano 500kW .....	47
Figura 3-40 Evolución del fuego frente al tiempo .....	48
Figura 3-41 Ventana de detección y rociadores de CFAST.....	48
Figura 3-42 Flujos en aberturas verticales [20].....	50
Figura 3-43 Geometría del volumen de control del camarote de S3.....	51
Figura 3-44 Propiedades Termo físicas de los materiales en camarotes-acomodación .....	51
Figura 3-45 HRR y $t^2$ -fire [30].....	51
Figura 3-46 Evolución teórica del incendio .....	52
Figura 3-47 Elementos de la combustión del poliuretano.....	52
Figura 3-48 Representación de HRR frente al tiempo en una cama de poliuretano .....	52
Figura 3-49 Rociador de agua en camarote 1 .....	53
Figura 4-1 Incendio de 500kW de heptano en Máquinas, segundo 50 .....	54
Figura 4-2 Incendio de 500kW de heptano en Máquinas, segundo 170 .....	55
Figura 4-3 Incendio de 500kW de heptano en Máquinas, segundo 510 .....	55
Figura 4-4 Evolución de la $T^a$ en Cámara de Máquinas sin extinción .....	56
Figura 4-5 Evolución de la $T^a$ en Tanques sin extinción.....	56
Figura 4-6 Evolución de la $T^a$ en Servo sin extinción.....	57
Figura 4-7 Evolución de la $T^a$ en Sentina sin extinción .....	57

Figura 4-8 Concentración de gases en Máquinas sin extinción .....	58
Figura 4-9 Altura de separación de capa en los diferentes compartimentos sin extinción .....	58
Figura 4-10 Incendio de 500 kW de heptano en Máquinas con extinción, segundo 40.....	59
Figura 4-11 Incendio de 500 kW de heptano en Maquinas con extinción, segundo 170.....	59
Figura 4-12 Incendio de 500 kW de heptano en Máquinas con extinción, segundo 460.....	60
Figura 4-13 Incendio de 500 kW de heptano en Máquinas con extinción, segundo 660.....	60
Figura 4-14 Evolución de la T <sup>a</sup> en Máquinas con extinción .....	61
Figura 4-15 Evolución de la T <sup>a</sup> en Servo con extinción.....	62
Figura 4-16 Evolución de la T <sup>a</sup> de la Sentina con extinción .....	62
Figura 4-17 Evolución de la T <sup>a</sup> en Tanques con extinción.....	63
Figura 4-18 Ensayo conforme a IMO MSC 1165 bandeja de heptano de 7x3 m en cámara de máquinas de 19x19x12 realizado en laboratorios VID, DK. ....	63
Figura 4-19 Concentración de gases capa superior en Máquinas con extinción.....	64
Figura 4-20 Concentración de gases capa inferior en Máquinas con extinción.....	64
Figura 4-21 Altura de separación de capa en los compartimentos con extinción .....	65
Figura 4-22 Visibilidad en metros en cámara de máquinas .....	65
Figura 4-23 Incendio de 250 kW de heptano en Máquinas sin extinción, segundo 40.....	66
Figura 4-24 Incendio de 250 kW de heptano en Máquinas sin extinción, segundo 270.....	66
Figura 4-25 Incendio de 250 kW de heptano en Máquinas sin extinción, segundo 570.....	66
Figura 4-26 Incendio en Camarote1 sin extinción, segundo 60 .....	67
Figura 4-27 Incendio en Camarote1 sin extinción, segundo 460 .....	67
Figura 4-28 Incendio en Camarote1 sin extinción, segundo 700 .....	68
Figura 4-29 Evolución de T <sup>a</sup> en Camarote1 sin rociador .....	68
Figura 4-30 Ensayo número 100028-02.....	69
Figura 4-31 Concentración de gases capa superior en Camarote1 sin extinción .....	69
Figura 4-32 Concentración de gases capa inferior de camarote1 sin rociador.....	70
Figura 4-33 Altura separación capas en Camarote1 sin extinción .....	70
Figura 4-34 Concentración de CO y de HCN en la capa superior de S3 .....	71
Figura 4-35 HRR de colchón en Camarote1 sin extinción.....	71
Figura 4-36 Evolución de la T <sup>a</sup> en Camarote1 con extinción.....	72
Figura 4-37 Evolución de la T <sup>a</sup> en Pasillo con extinción .....	72
Figura 4-38 Concentración de gases capa superior en Camarote1 con extinción .....	73
Figura 4-39 Concentración de gases capa inferior en Camarote1 con extinción .....	73
Figura 4-40 Altura separación de capas en camarote1 con rociador.....	74
Figura 4-41 Visibilidad en metros en camarote1 .....	74
Figura 4-42 Visibilidad en metros en pasillo .....	74

Figura 5-1 .....76

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

El estudio de los elementos del fuego, sus causas y su comportamiento ha sido desde hace décadas un tema de desarrollo e investigación muy importante y que hoy en día mueve millones de euros, debido a las pérdidas materiales y humanas que puede producir y especialmente si nos referimos al mundo naval, que siempre conlleva un plus de dificultad y peligrosidad.

En el transporte marítimo como en otros sectores, las normativas reguladoras no suelen aparecer hasta que no se producen accidentes con pérdidas humanas. En 1914, dos años después del hundimiento del Titanic, se celebró la primera Convención Internacional para la Seguridad de la Vida en la Mar. De dicha convención surge el SOLAS (*International Convention for the Safety of Life at Sea*), que especifica una serie de normas mínimas para mejorar la seguridad en la construcción, el equipamiento y funcionamiento de los buques. En 1948 se crea la IMO (*International Maritime Organization*) como agencia de las Naciones Unidas, cuya finalidad era desarrollar el marco normativo por el que se rige la navegación marítima. La IMO crea diferentes comités y subcomités para los diferentes intereses. Dentro de estos comités aparece el MSC (*Maritime Safety Committe*) encargado de los aspectos de la navegación [1].

En el siglo XX con el impulso de las nuevas tecnologías, la simulación computacional se ha convertido en una herramienta fundamental en el mundo de la ingeniería, la ciencia de prevención contra incendios no podía ser menos, por lo que el uso de estas nuevas tecnologías está permitido para el estudio del fuego como parte de los diseños de seguridad contra incendios.

Los modelos informáticos de simulación de incendios (MSCI) comenzaron su desarrollo en la década de los años 70 y se perfeccionaron en los años 80, a ello ha contribuido el desarrollo de los conocimientos físico-químicos de los incendios, el desarrollo de la dinámica de fluidos computacional (CFS) y mejora de la potencia computacional. Gracias a estos avances se ha conseguido resolver de forma computacional las ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía en flujos turbulentos dentro de un compartimento, desarrollando inicialmente el *Zone Model* (modelo de zona) y más tarde al *Field Model* (modelos de campo), modelos especializados en el estudio del comportamiento del fuego. Aunque no se puede olvidar que hasta los años setenta también se realizaban cálculos de protección contra incendios, pero de forma manual, mediante herramientas matemáticas como el uso de correlaciones. El uso de los sistemas de simulación de incendios proporciona una serie de ventajas con respecto a la experimentación física a escala real o reducida; reducción de costes, ensayos ilimitados o eliminación de factores de peligrosidad reales como: emisión de gases tóxicos, reducción de visibilidad en el compartimento que impida la evacuación del personal,

daños humanos y materiales y sobre todo evitar la destrucción de la instalación a estudiar. Además, el ingeniero puede analizar detenidamente los factores que desee y los diseños propuestos o empleados. Estos modelos también pueden ser utilizados como herramienta de diseño para estudiar la efectividad de cierto grupo de medidas contra incendios (detectores de humo, temperatura, rociadores de agua, etc.) o minimizar sus consecuencias, y así mejorar las medidas preventivas como la sustitución de materiales combustibles por otros incombustibles en escenarios físicamente inexistentes y ver la efectividad también de una forma ilimitada; aunque, en los buques siempre se encontrarán materiales que puedan arder en circunstancias especiales.

Los medios de prevención y extinción a aplicar en cada caso dependen de la normativa vigente: NFPA [2] o normas UNE en aplicaciones terrestres y normas IMO [3] en aplicaciones marítimas (Anexo I). Aunque la detección siempre será el único sistema que permita ganar en la evolución del incendio y que, de forma patente, se tiene que incluir en los métodos de prevención de incendios a bordo. La detección se puede dividir en dos clases: humana y automática. La primera basada en la detección visual u olfativa del incendio sin que entre a funcionar ningún medio mecánico, se complementa con la detección automática que suplen a los humanos por su constante y permanente vigilancia. Las instalaciones automáticas mantienen su eficacia e incluso en presencia humana, por razón, la alarma es inmediata y sin dilaciones. Esta alta operatividad que ofrecen los sistemas automáticos se ve mejorada si, además de las alarmas, la detección activa algún tipo de sistemas fijos de extinción. A sí mismo, de un tiempo a esta parte, en la ciencia de prevención contra incendios se ha impuesto la metodología PBD (*Performance Based Design*) o Diseño Basado en Prestaciones frente al Enfoque Prescriptivo [4]. El PBD en la prevención contra incendios, se entiende como la forma de flexibilizar los sistemas y soluciones de protección con respecto a los que nos indican los códigos prescriptivos, que en la mayoría de los casos son normas genéricas y no se centran en casos particulares, en el uso de las instalaciones etc., es decir, mediante herramientas PBD y el uso de ensayos computacionales validados por ensayos reales podemos reducir o aumentar las medidas contra incendios que vienen prescritas buscando soluciones a medida y alcanzando los niveles de seguridad contra incendios efectivos en cada caso.

Con la simulación se demuestra que pueden encontrarse nuevas soluciones que no contempladas en la normativa, la autoridad competente o el asegurador, pero que son igual de efectivas e incluso más económicas, funcionales y seguras.

## 1.2 Objetivos del TFG

En este trabajo de fin de grado de Ingeniería Mecánica del Centro Universitario de la Defensa de Marín, el objetivo principal es el estudio del desarrollo de un incendio en la lancha de instrucción Rodam-66 de la Escuela Naval Militar, por medio de simulaciones computacionales con el software CFAST (*Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*), para ello se han planteado unos objetivos secundarios que son la base del desarrollo del trabajo:

- Modelado de la geometría de la lancha de instrucción, por medio del software NX 8.0 de Siemens PLM. Este modelado, es la base para futuros proyectos de simulación mediante otras herramientas de simulación de incendios, como puede ser FDS. Y certifica la posibilidad de mallado de buques.
- Simulación del incendio con distintas herramientas, centrándose en el software CFAST. Mediante la simulación de incendios en el modelado de la lancha se calculan gráficas de temperaturas, gases y tiempos.
- Análisis de resultados, para poder llegar a unas conclusiones similares a otros estudios realizados por *U.S. Coast Guard*, la *U.S. NAVY* y el laboratorio DFL (*Danish Fire Laboratories*).

- Certificación de la utilidad del uso del software CFAST para el estudio de incendios en busques de la Armada española para desarrollar medidas de detección, actuación y extinción de incendios.

### 1.3 Metodología del Proyecto

Para la consecución del objetivo principal se ha seguido la siguiente metodología desarrollada en varias fases:

- i. Estudio del Estado del Arte, centrándose en los diferentes tipos de Ensayos de Incendios y modelos de Simulación de Incendios. Para ello se revisará la bibliografía existente sobre esta temática.
- ii. Estudio de la embarcación: Se pedirá información al astillero Rodman sobre planos de dimensiones y líneas de agua. Esta información se completará con la toma de medidas “in situ” en la embarcación.
- iii. Modelación de la geometría de la lancha: Se utilizará una herramienta gráfica de diseño en tres dimensiones: NX 8.0 de Siemens PLM., para el modelado se utilizará la documentación facilitada por el astillero y se combinará con técnicas de construcción naval.
- iv. Elección de los incendios tipo que se pueden producir en una embarcación y sus características más relevantes, basándose en la normativa IMO [3].
- v. Simulación de incendio mediante herramientas de modelo de zona y modelo de campo, se centrará en el software de modelo de zona CFAST del NIST y será este el que se desarrolle en el desarrollo del trabajo.
- vi. Estudio de los resultados y validación: Las herramientas de simulación producen salidas en forma de ficheros de datos, se organizarán y estudiarán estos datos. Se validarán contrastándolos con resultados de simulaciones realizadas en laboratorios IMO y otras instituciones gubernamentales citadas anteriormente.

### 1.4 Organización de la memoria

Esta memoria está estructurada en seis capítulos acompañados de XXX anexos, según se indica a continuación:

En el Capítulo 1 se realiza una introducción al proyecto, se expone el objetivo principal al que se quiere llegar y se explican los objetivos secundarios en los que se basa el trabajo. Para ello se desglosa la metodología empleada para la consecución de los objetivos propuestos. Por último aparece la organización de la memoria.

En el Capítulo 2 se desarrolla el estado del arte:

- En primer lugar, se realiza una breve explicación de la teoría de la combustión, tratando temas tan importantes para la seguridad como el Flashover.
- En segundo lugar, se explican las diferentes formas que hay para el estudio de la combustión y los incendios.
- En tercer lugar, se presentan los Modelos de Simulación Computacional de Incendios y los diferentes tipos que hay.
- Por último, se hace referencia a los sistemas CAD-Diseño Asistido por Computador.

En el Capítulo 3 se desarrolla el trabajo realizado, quedando dividido en dos partes diferenciadas:

- En primer lugar, se explica el proceso llevado para el modelado de la geometría en 3D de la lancha de instrucción
- En segundo lugar, se desarrollan las diferentes simulaciones de incendio realizadas, explicando los diferentes parámetros que intervienen en cada una de ellas.

En el Capítulo 4 están volcados los datos obtenidos tras la simulación de incendios sin sistema de extinción y con sistema de extinción en, cámara de máquinas y camarote-acomodación, con diferentes tipos de combustible.

En el Capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del presente proyecto así como las líneas futuras de investigación y mejora de la simulación de incendios en buques de la Armada.

La última sección incluye las referencias bibliográficas y los recursos web consultados para la ejecución del proyecto.

Por último, se adjuntan dos anexos con la normativa de seguridad contra incendios y los planos utilizados para el modelado de la geometría en NX.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Teoría de la combustión

El estudio y análisis de la dinámica de un incendio es el primer paso para poder llegar a entender y efectuar una simulación computacional efectiva. En el presente punto se describirá brevemente los fenómenos que aparecen en la combustión y en la propagación del fuego, al igual que las leyes que lo rigen. La información del presente apartado se basa en [5].

#### 2.1.1 Proceso de combustión

Siempre que se habla de un incendio es entendida la combustión como el fenómeno más importante, despreciando al resto de fenómenos que afectan de igual manera al desarrollo y crecimiento del mismo y que tienen la misma capacidad devastadora, es así, que no se puede comprender un incendio sin la *degradación*.

Un incendio se produce cuando un combustible entendiéndolo como una sustancia sólida, líquida o gaseosa, entra en ignición, desencadenando una reacción con el oxígeno presente en el aire y emitiendo calor al medio y otras especies gaseosas producto de la reacción [6]. Los materiales comenzarán a degradarse produciendo más combustible y más calor, aunque su degradación no tiene por qué estar ligada a la combustión, ya que muchas veces se producen cambios estructurales o químicos, como en el caso del acero. Fuera de las zonas más próximas al fuego, los procesos de pirolisis y combustión desaparecen y la transferencia de calor y la mecánica de fluidos dominan la propagación del humo.

La llama normalmente está asociada a la combustión, y es un fenómeno de fase gas que implica la transformación del combustible sólido a la forma gaseosa produciéndose una descomposición química o pirolisis que hace alcanzar un peso molecular bajo a los productos por lo que se volatilizan. Además existen unos límites de inflamabilidad que hacen que por debajo o por encima de esas concentraciones de gas la propagación no es posible. El margen entre los límites inferior y superior se le llama margen explosivo. Pero una vez el combustible sólido pase a estar en forma gaseosa, este se quemará en función de dos regímenes diferentes: Pre mezcla o Difusión. En el primero, el combustible se mezcla con el oxígeno antes de quemarse a diferencia del segundo, que el combustible y el oxígeno están separados inicialmente, pero se queman al mezclarse [5].

En este trabajo se trata la combustión por Difusión, ya que esta es la que se produce entre los flujos de gas y los combustibles sólidos y gaseosos, es decir, la combustión que se produce en los incendios de compartimentos. Durante las fases iniciales de un incendio, la combustión queda



### 2.1.2 *Transferencia de calor y fases del crecimiento del incendio*

La transferencia de calor es otro de esos factores que hacen que un incendio en un compartimento incremente y se haga cada vez mayor. Su transmisión es la responsable del comienzo de la mayor parte de los incendios ya que se transfiere de un cuerpo a otro mediante tres formas [6]:

- i. **Conducción:** El calor se transfiere entre los cuerpos mediante contacto directo o por un medio conductor siempre que exista entre ellos un gradiente de temperatura. El calor se transmite desde la región de mayor temperatura a la de menor. La transmisión de calor de esta forma en los gases no es independiente de la presión, a bajas presiones es prácticamente nula y en el vacío no se transmite. La conducción la podemos expresar como:

$$\dot{q}_x^n = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Donde,  $x$ ,  $\dot{q}_x^n$  es la dirección del calor transmitido;  $T$  es la temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $x$  la dirección del flujo de calor (m) y  $k$  la conductividad térmica ( $\text{W/m } ^{\circ}\text{K}$ ).

- ii. **Convección:** Es un modo de transferencia de calor por medio de un fluido en movimiento que al ponerse en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura diferente se transfiere calor. Normalmente la dirección de transmisión de calor por convección es ascendente, aunque la corriente de aire la puede transmitir en cualquier dirección. Se puede escribir como:

$$\dot{q}^n = h \cdot \Delta T \quad \text{W/m}^2 \quad (3)$$

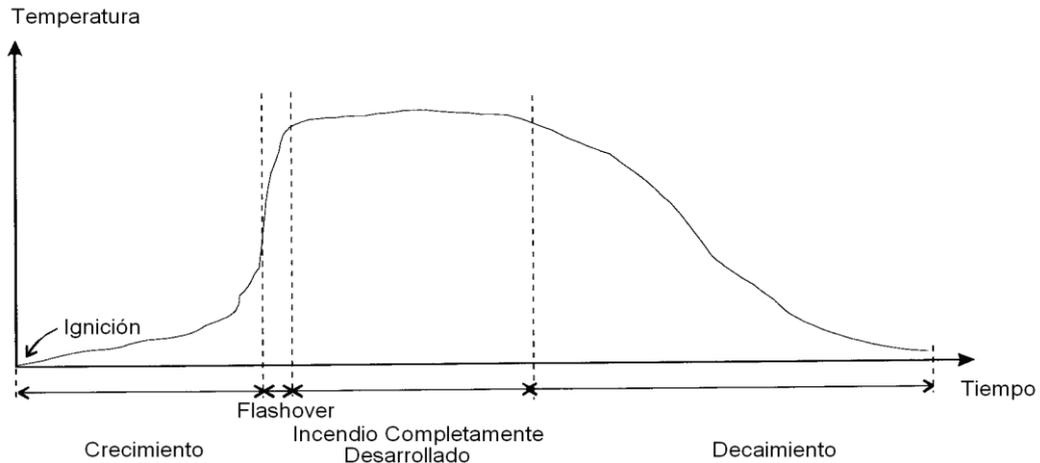
Donde,  $h$  es el coeficiente de transmisión de calor por convección en interfase líquido-sólido.

- iii. **Radiación:** A diferencia que la convección y la conducción que solo transfieren el calor por un medio material, la radiación puede transportar el calor por un fluido o en el vacío. La energía que es radiada viaja a la velocidad de la luz y al llegar a un cuerpo, éste la absorbe, la refleja o la transmite [6]. El estudio de la radiación es muy complejo ya que no solo implica la temperatura sino que requiere conocimientos de las concentraciones de gases al igual que las propiedades ópticas de los elementos; por ejemplo, si la superficie receptora es oscura, absorbe el calor pero si es de color claro y pulido lo refleja. La expresión más simple de la radiación:

$$\dot{q}^n = \phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4)$$

Donde  $\phi$  es el factor de forma. La presencia de hollín en la fase gaseosa y las altas temperaturas harán que sea necesario la inclusión de la ecuación integro diferencial completa de transformación de calor [5].

Una vez explicadas las formas en las que se puede transferir el calor, se tiene que entender cómo se comporta un incendio, es decir, sus fases y para ello en el presente trabajo solo se explicará las etapas que se producen en incendios tipo *Compartment Fire*, incendios en el interior de un recinto cerrado.



**Figura 2-2 Fases del desarrollo de un incendio [9]**

Como muestra el gráfico de la Figura 2-2 un incendio se divide en cinco fases:

- **Ignición:** La ignición es la fase que da comienzo al incendio y está considerada como una reacción exotérmica. Puede ocurrir por una transferencia de calor por parte de otra fuente, o por ignición espontánea.
- **Crecimiento:** Se produce un incremento de la energía debido a la propagación de la llama. En esta etapa el recinto y sus materiales no afectan prácticamente nada al desarrollo del incendio debido a que aún no se han alcanzado temperaturas de degradación, sigue habiendo oxígeno en excedencia y la temperatura del compartimento aún es baja. Aún se considera que el incendio está controlado por el combustible.
- **Flashover:** Es un fenómeno que ocurre en un periodo de tiempo muy corto. Es desarrollado más adelante.
- **Incendio completamente desarrollado:** Como característica de esta etapa se refleja que un incendio aún latente sigue produciendo una gran cantidad de gases tóxicos, aunque la velocidad de cesión de calor sea baja.
- **Decaimiento:** etapa final del incendio en la que tanto la temperatura como la velocidad de cesión son reducidas a mínimos.

La velocidad de crecimiento está en función de tres variables: combustión, naturaleza del combustible e interacción con el medio. Por ejemplo, en el caso que el combustible sea muy inflamable y haya suficiente oxígeno se producirá un crecimiento muy rápido produciendo una rápida propagación y por lo tanto causará una ignición en otros materiales. Así, un incendio puede producir grandes cantidades de gases tóxicos muy peligrosos en poco tiempo [10] .

La temperatura de los gases es el factor en el que los modelos de simulación contra incendios se basan para sus cálculos. En las etapas iniciales se divide el espacio en dos zonas en función de la temperatura de los gases presentes. Una zona de altas temperaturas cerca del techo y una de bajas temperaturas en la zona de entrada del aire Figura 2-3. La zona caliente irá creciendo en función del tiempo ya que el penacho cada vez introduce más humo y aumenta la temperatura. Asimismo, por medio de radiación de los elementos del recinto que están calientes se transmite más calor al combustible que originó el incendio, esto aumenta la velocidad de combustión y propaga aún más el incendio por el compartimento.

Este aumento de la zona caliente bien por la propagación de las llamas o como se ha mencionado antes por la ignición de otros combustibles secundarios que han sido producto de la transmisión de calor, reduce la zona fría, reduciendo el volumen de aire para calentar, pero manteniendo el mismo calor generado. La velocidad y la temperatura del flujo del penacho en el techo que genera un flujo circular (*ceiling jet*) [5] es fundamental porque al conocerlo se mejoran las medidas de detección y extinción y se reducen los tiempos de reacción.

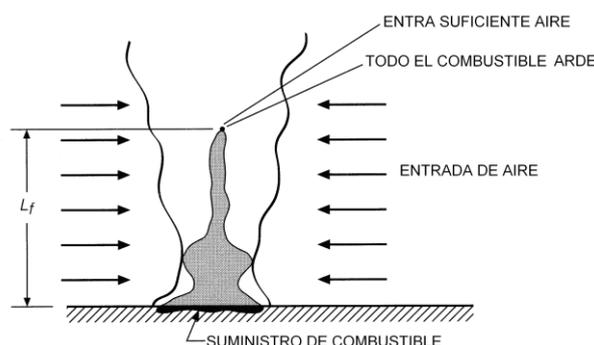


Figura 2-3 Esquema de un penacho con entrada de aire [9]

Pero el comportamiento de un incendio y el desarrollo de sus fases en un recinto cerrado no siempre son iguales, y en cada escenario se producen unas características especiales y particulares. En concreto los factores principales que hay que ver para luego más tarde realizar los modelos adecuados son [5]:

- Tamaño y localización de la fuente de ignición, pueden variar desde 5 kW en un cigarrillo a un incendio en una cama.
- Tipo, cantidad posición espaciado, orientación y área expuesta al incendio.
- Geometría del recinto.
- Tamaño y localización de las aperturas.
- Propiedades de los materiales del contorno del recinto.

### 2.1.3 Flashover

En este punto se desarrollará brevemente las condiciones necesarias para que ocurra dentro de un compartimento. Su importancia en la Seguridad Interior de los buques de la Armada españoles es capital; puesto que es poco probable que el personal que no haya abandonado el compartimento cuando ocurre, sobreviva [6].

Es un fenómeno que ocurre en un periodo de tiempo muy corto entre la etapa de crecimiento y la de fuego desarrollado (Figura 2-4). El fenómeno del *flashover* a diferencia del *rollover* implica que todo el combustible del compartimento está ardiendo y no solo los gases que al mezclarse con el aire fresco de la parte superior generan esa cortina de fuego tan rápida. Las temperaturas que tienen que darse para que suceda según estudios experimentales son de 600°C en el humo de la capa superior y el flujo de calor radiado de 20 kW/m<sup>2</sup>. En cualquier caso, además de las llamas sobre el elemento combustible se tienen que dar otras fuentes de calor por radiación como el de las superficies calientes de la parte superior del techo. En resumen, el flashover en un recinto sólo podrá alcanzarse si el incendio ha crecido a un tamaño suficiente como para crear en la capa caliente unas condiciones de flujos de calor que hagan esa súbita expansión de las llamas a todos los materiales combustibles del compartimento con una velocidad de combustión mayor de 40 g/s.

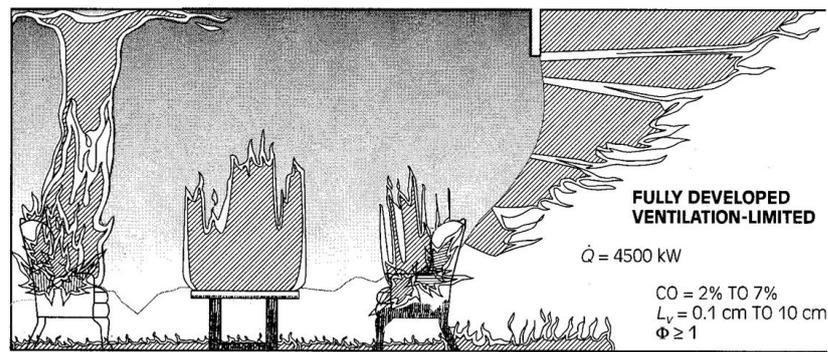


Figura 2-4 Descripción Flashover [11]

## 2.2 Estudio de la combustión y los incendios

El estudio de los incendios desde que comenzara en los años de la Segunda Guerra Mundial no ha parado. Desde esa época, se han ido desarrollando diferentes metodologías de ensayo que a lo largo de los años han ido evolucionando hasta alcanzar lo que hoy en día se conocen como ensayos computacionales. A continuación se explica los ensayos más importantes que están teniendo lugar en el ámbito naval.

### 2.2.1 Ensayos de incendios

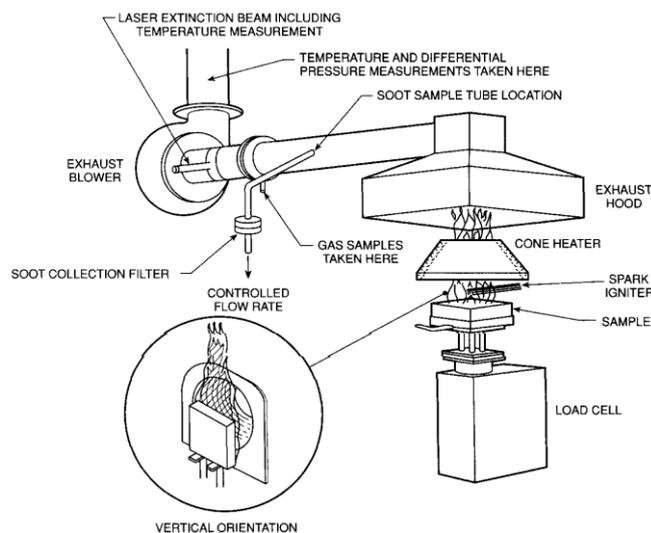
Los ensayos de incendios son aquellos que se realizan con fuego real bajo condiciones establecidas por ciertas normas con el objeto de certificar productos que se utilizarán en la construcción o bien medios de protección contra incendios.

Los organismos más conocidos que realizan ensayos de incendios son:

- Underwriters Laboratories Inc. (UL) es una organización de EEUU para certificación de productos sin fines de lucro e independiente que viene sometiendo productos a prueba desde hace más de 110 años. UL somete a pruebas a más de 18.850 tipos de productos anuales y más de 19.000 millones de marcas UL aparecen sobre los productos cada año. La red UL incluyen 60 laboratorios, además de instalaciones para efectuar pruebas y emitir certificaciones.
- Factory Mutual Global (FM), ubicada en Boston, E.U. es una compañía de seguros comerciales que certifica que los productos (aparatos y dispositivos eléctricos) e industrias (por ejemplo una empresa de fabricación de automóviles) cumplan con los requisitos de FM en lo que respecta a la seguridad, centrándose en los incendios.
- IMO (*International Maritime Organization*) ubicada en Londres, su Comité de Seguridad Marítima (MSC) establece las reglas y normas para realizar ensayos que se realizan con fuego real y sirven para certificar elementos constructivos y medios de protección contra incendios en buques. Para la elaboración de los protocolos de actuación y normalización de los sistemas contra incendio a bordo, el subcomité de seguridad contra incendios de la IMO está asistido por diferentes laboratorios e instituciones como la NFPA de Estados Unidos o el CEN en Europa. Los laboratorios para poder realizar estos ensayos tienen que estar acreditados por la IMO, en Europa existen varios: VTT (Finlandia), SP (Suecia), SINTEF (Noruega), DAFILA (Dinamarca), BRE (Inglaterra), la mayoría de laboratorios

escandinavos es consecuencia de su gran flota naviera y la importancia de sus universidades de Ingeniería Naval.

Los trabajos en los laboratorios se centran en certificar la reacción al fuego, la resistencia al fuego de los materiales, sistemas y equipos. Estos ensayos físicos reales aportan una capacidad de validación de los ensayos por simulación y proporcionan datos reales que son después útiles para estudios de desarrollo de productos. Pero como todo ensayo físico tiene un gasto económico importante y al tratarse de fuego los materiales utilizados no pueden ser reutilizados.



**Figura 2-5 Ejemplo de ensayo en laboratorio a pequeña escala [11]**

La metodología empleada en cualquier ensayo para el ámbito naval queda regulada por el código PEF (*Procedimientos de Ensayo de Exposición al Fuego*) de 2010 [12] y de obligado cumplimiento por los buques españoles. Es en esta norma donde viene regulada la validación de las simulaciones computacionales para los ensayos de previsión de incendios.

### 2.2.2 Diseño Basado en prestaciones

El Diseño Basado en Prestaciones (PBD) como se ha comentado anteriormente se centra en flexibilizar los sistemas y soluciones de protección con respecto a los códigos prescriptivos (normas IMO, UL, FM, ISO y otras). Para ello se definen inicialmente los objetivos generales de seguridad en caso de incendio, es decir, unas metas que son de obligado cumplimiento si se quieren alcanzar los objetivos. Estas metas son intenciones de alto nivel relacionadas con la seguridad de las personas, la protección de bienes etc. Una vez estén fijadas se buscará objetivos específicos y será generados criterios que puedan ser calculados mediante herramientas físicas o matemáticas, para poder atestiguar que se cumplen los objetivos iniciales, por ejemplo temperaturas, visibilidad con humos. En esta etapa será propuesto el tipo de escenario en el que va a ocurrir el incendio, esto marcará la toma de decisiones que deban realizar más adelante. Este punto es muy importante ya que, por ejemplo el CTE (*Código Técnico de Edificación*) al igual que otras normas no especifica el tipo de escenario dejando la norma generalizada. El [2] incluye ocho escenarios diferentes. Más adelante será fijado el nivel general de riesgo, este nivel es en función del uso, la ocupación etc. En [13] viene recogido los diferentes niveles en función de los parámetros anteriormente expuestos.

Una vez estén todos estos parámetros, se confeccionará una matriz que contenga objetivos, escenarios, magnitud del evento e impacto. Al finalizar esta matriz, se analizará mediante modelado y simulación computacional de incendios los escenarios con los ajustes y modificaciones que en cada

caso correspondan para la consecución de los objetivos específicos de seguridad aprobados. Por último será elaborado un informe con la documentación del estudio. [14] (Figura 2-6)

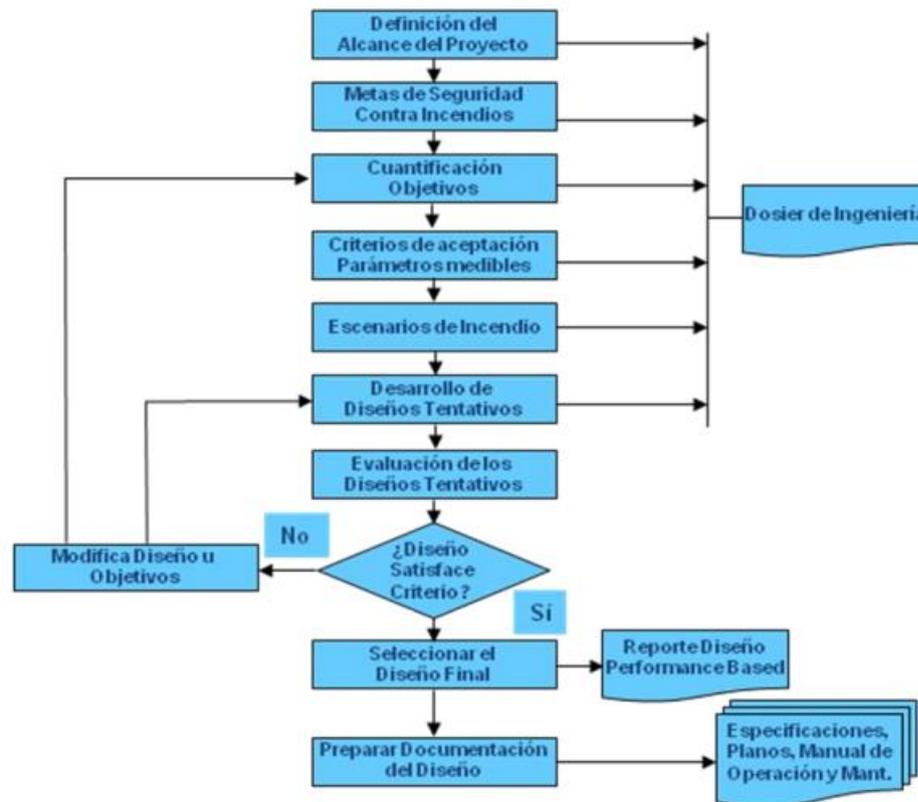


Figura 2-6 Metodología PBD [4]

Las incertidumbres al igual que los posibles fallos que se puedan cometer durante el proceso de diseño, se tendrán en cuenta, por ello habrá que realizar un dosier estructurado en el que se documenten de forma correcta todos los aspectos involucrados durante los pasos de la metodología. Así mismo un diseño prestacional de cierta complejidad debería pasar siempre por un proceso “peer review” en el que un grupo de expertos del mismo nivel que el diseñador, haga una revisión completa del proyecto paso a paso añadiendo su conformidad al diseño o estableciendo sus discrepancias y cautelas adicionales. [15]

### 2.2.3 Simulación

Los esquemas metodológicos capaces de fijar de manera consecutiva los pasos a seguir para poder realizar una simulación efectiva han sido desarrollados por diferentes especialistas a lo largo de los últimos años. Por ejemplo DoD Modeling & Simulation VV&A [16] presenta un modelo llamado “Metodología de siete pasos para conducir un estudio de simulación exitoso” en el que resume en siete pasos, preguntándose antes de pasar al siguiente si se cumple lo especificado y si no, volviendo al paso anterior para volver a plantearlo. La VV&A viene de verificación, validación y acreditación; tres puntos clave en cualquier metodología.

Cunningham por el contrario desarrolla su metodología en lo que llamará “Etapas del proceso de desarrollo del modelo” [17]; él no se basa en un esquema de preguntas en las que si se cumplen se avanza, su modelo se basa en una serie de puntos caracterizados por la definición de un problema y buscar un modelo que se adapte a él, más tarde diseñará con las características específicas un nuevo modelo, recopilará datos y pasará a las etapas finales de verificación y validación del modelo.

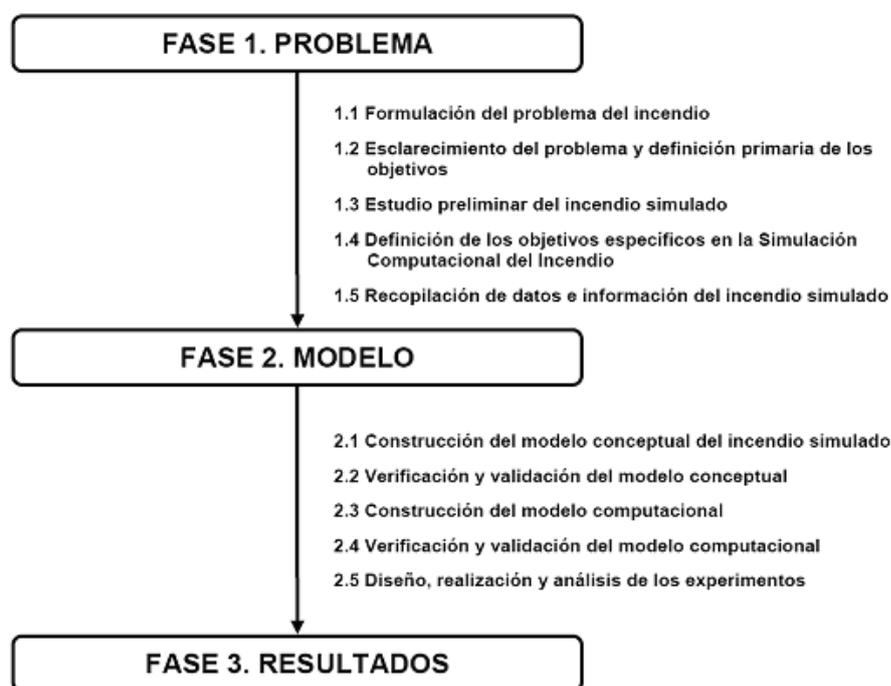


Figura 2-7 Esquema Metodología MSCI [17]

Pero la metodología elegida para los MSCI (Modelos de Simulación Computacional de Incendios) es la expuesta en la Figura 2-7. Ya que es la que más se ajusta para definir una simulación de incendios. Está desarrollada semánticamente en [17]. Como particularidades, la metodología se divide en tres fases con diferentes subfases, convirtiéndola en la más rigurosa porque es más específica que las anteriores al dividir en más subfases consiguiendo dejar menos aspectos sin tratar. Como se ha mencionado anteriormente, con una VV&A eficaz y exhaustiva se consigue una mayor confianza en la simulación y por lo tanto mayor certeza a la hora de toma de decisiones. Alcanzando una metodología adecuada y apta para la simulación de incendios.

## 2.3 Introducción a MSCI- Modelos de simulación computacional de incendios

### 2.3.1 Conceptos básicos de los MSC

Como se ha explicado anteriormente en las teorías de la combustión, un incendio se trata de un fenómeno complicado a la hora de ser estudiado y son necesarios unos previos conocimientos de mecánica de fluidos, transmisión de calor, termoquímica y química. Su descripción matemática es conocida pero si se ponen todas sus expresiones juntas para buscar una solución rigurosa aparece un complejo sistema de ecuaciones que requiere de potentes ordenadores para lograr la solución, de ahí la importancia del modelado y la simulación de incendios mediante computadores.

Dentro de los MSC, el *concepto de sistema* que se quiere simular se refiere al problema que se aborda y es definido como el conjunto de componentes organizados para llegar a la función deseada. También el concepto de *modelo* se define como la representación simplificada y lógica de un sistema o fenómeno y que intenta describir cómo funciona [17].

Hay tres tipos de modelos, que por su naturaleza pueden ser: *físicos*, *gráficos* o *matemáticos*; los primeros manifiestan a escala las propiedades físicas del sistema real que se desea modelar. Son una

forma muy extendida de modelado, aunque a veces realizar experimentación a dimensión real es muy caro, difícil e incluso a imposible, por lo que gracias a las nuevas tecnologías, las cuales han supuesto un gran avance de otros modelos, están empezando a dejarse a un lado [18]. Los segundos están constituidos por gráficos que describen la estructura a alto nivel. Y por último los matemáticos, son un conjunto de expresiones matemáticas o lógicas que expresan las relaciones existentes dentro del sistema y que pueden utilizarse para predecir el comportamiento del sistema real; pudiendo llegar a ser complementarios con los físicos.

En los modelos de simulación computacional que se van a utilizar en el presente trabajo, se considerarán únicamente los modelos matemáticos que puedan ser implementados como programas informáticos (software). Los modelos matemáticos pueden ser resueltos tanto por métodos analíticos como por métodos numéricos. Ambos métodos son complementarios, aunque, los métodos numéricos están más extendidos hoy en día puesto que aportan soluciones mucho más complejas, pero no significa que los modelos analíticos se hayan dejado de utilizar en la simulación, ya que muchas veces son necesarias soluciones numéricas para ganar claridad y poder tener la veracidad de que lo simulado corresponde con la realidad [10]. Para poder acabar de definir el proceso de desarrollo del incendio dentro de un *modelo de simulación*, se tiene que tener presente y definir claramente el entorno con el cual interactúa el incendio, es decir, su frontera. Esto depende de las características del escenario a simular y de los objetivos que se busquen en la simulación. Aquí es donde entra la capacidad creativa y artística del personal que realiza la simulación, sus conocimientos científico-técnicos, habilidad y experiencia para poder definir con precisión que se busca y poder así llegar a unos resultados lo más eficientemente posibles, ya que una misma simulación se puede realizar de muchas maneras, pero unos resultados serán más aproximados que otros gracias a ese “*arte*” del especialista o equipo que la realice.

### 2.3.2 Aplicaciones de la simulación de incendios

La simulación de incendios mediante software se ha convertido en los últimos veinte años en la herramienta de trabajo más común para el estudio de la propagación del fuego y de la implementación de medidas contra incendios.

Las aplicaciones pueden ser divididas en dos grupos de herramientas: [10]

- i. **Herramientas de análisis:** Pueden ser usadas después de que ocurra una incidencia real y se busquen las causas, su evolución, actuaciones o consecuencias. O bien, antes de que ocurra un incendio, para poder predecir las consecuencias y así comprobar si el escenario cumple los requisitos especificados en la normativa. Gracias a esta herramienta se puede ver como realmente reaccionan e interactúan las variables de un incendio entre ellas y cuáles son las más importantes en la evolución, pudiendo mejorar las medidas prescritas por las entidades reguladoras. Este tipo de simulaciones se han llegado a utilizar en incendios tan importantes como el edificio Windsor en Madrid o el World Trade Center de Nueva York.
- ii. **Herramienta de diseño:** con esta herramienta se consigue saber la efectividad de las medidas contra incendios que se instalarán en un escenario hipotético. Con ello se contesta a la pregunta relacionada con la seguridad en las instalaciones, ahorrando así a las navieras en medidas de prevención, extinción y salvamento, principio de PBD.

Ambas aplicaciones tienen unas ventajas que las convierten en herramienta básica a la hora de los cálculos de incendios, pero también tienen aspectos negativos pero que pueden ser reducidos si se aumentan la experiencia y los conocimientos del personal que trabaje con la MSCI.

Ventajas:

- La simulación de incendios computacional es mucho más económica que la experimentación física. Puesto que se ahorra en materiales, instalaciones, medidas de seguridad etc.
- Una vez diseñado un modelo, este puede ser utilizado tantas veces como sea necesario para analizar diferentes factores y casos.
- Para poder ensayar en casos hipotéticos y extremos, la simulación computacional es el único medio disponible. Además se puede eliminar factores restrictivos que limiten, simulando escenarios de mayor complejidad.

Desventajas:

- Los resultados de una simulación de incendios pueden llegar a ser difíciles de interpretar.
- El empleo y desarrollo de los programas de simulación de incendios puede necesitar demasiado tiempo.
- La toma de decisiones basadas en simulaciones mal hechas o analizadas por personal sin suficientes conocimientos, puede llegar a ser contraproducente y aportar malos resultados.

## 2.4 MSCI- Modelos de simulación computacional de incendios

A la hora del modelado y simulación de un incendio es imprescindible saber de forma clara y asequible cuales son los objetivos que se quieren estudiar a partir de la simulación, una vez los estén definidos se podrá saber qué aspectos hay que tener en cuenta en un incendio real, para trasladarlos al incendio simulado.

En esta etapa los MSCI pueden tener diferentes problemas como son, la gran cantidad de escenarios posibles debido a la naturaleza fortuita del incendio, el hecho de que los combustibles en un incendio no estén destinados a serlo, motiva que no se disponga de los modelos matemáticos y datos necesarios o incluso sean insuficientes los conocimientos sobre ellos, dificultando aún más su simulación. Como se ha referido anteriormente, en los MSCI se utilizarán los modelos matemáticos del fuego, que pueden dividirse en dos grupos: modelos de fuego probabilista, y modelos de fuego determinista [17] [11].

- Modelo de fuego probabilista:** Este modelo analiza todos los parámetros que afectan en un incendio, función del compartimento, aberturas horizontales o verticales, resistencia de los materiales, distribución del compartimento y por lo tanto situación de los posibles combustibles y origen del fuego. Con todos estos datos evalúa la probabilidad de un incendio dando los resultados mediante estadísticas. Es decir, se basa en la naturaleza aleatoria del fuego. Este tipo de modelos no son capaces de predecir la distribución de los productos de combustión.
- Modelo de fuego determinista:** El modelo busca una relación entre los fenómenos que ocurren en el incendio para poder llegar a saber cuáles serán sus consecuencias. Este tipo de modelos son los más usados por las ingenierías contra incendios, ya que o bien pueden ser muy sencillos y necesitar poco tiempo de cálculo, o ser más complejos y necesitar incluso días de procesado. Este tipo de modelo será el utilizado para la simulación del presente trabajo [19].

## 2.5 Modelos de zona

Un modelo de zona es, en esencia, un modelo unidimensional que estudia los efectos del desarrollo de un incendio dentro de un cierto volumen en función del tiempo [17]. El volumen a estudiar no está totalmente cerrado ya que incluye la existencia de puertas, ventanas y ventilaciones en los cálculos y las tiene en cuenta para la variación de presión y movimiento de los flujos. Este tipo de modelos es utilizado para predecir el comportamiento del incendio y la propagación del humo en compartimentos divididos en dos volúmenes simples, al igual que, la temperatura y la concentración de especies de gases (oxígeno, dióxido de carbono, etc.) en función del tiempo. Se podría decir, que son una idealización de la realidad ya que la temperatura de los gases calientes es uniforme y del resto del recinto también, el motivo está fundamentado en que la diferencia de temperaturas que pueda existir entre las dos zonas es muy superior a la diferencia que puede existir dentro de una misma zona.

La aproximación divide cada compartimento en dos zonas: la zona superior de humo caliente y la zona inferior de aire frío, donde tiene su origen el aire para la combustión. Dentro de cada una de estas zonas resuelve las leyes pertinentes de conservación en forma de ecuaciones matemáticas y asume que las condiciones dentro de estas zonas son uniformes. Los tamaños de las zonas van variando en función del tiempo y de la velocidad de cesión de calor del incendio. Los gases calientes que ascienden forman un penacho, estos tienen una gran variedad de fenómenos turbulentos y forman importantes remolinos (Figura 2-8). Se tiene que tener en cuenta que la variación de densidad en el penacho es muy pequeña con respecto a las de las condiciones ambientales.

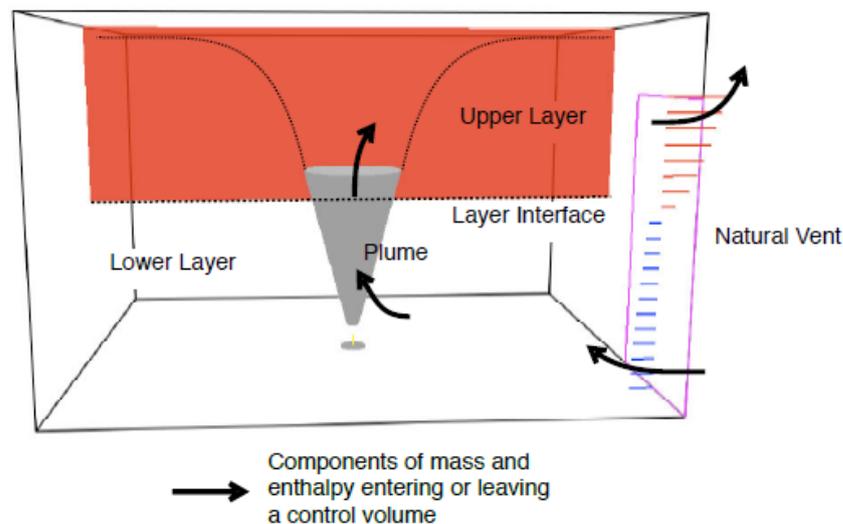


Figura 2-8 Representación del Modelo de Zona [20]

La principal ventaja de un modelo de zona es su relativa simplicidad y tiempo de procesado, teniendo más recursos disponibles en el ordenador para ampliar el alcance del modelo. De forma que los casos pueden calcularse de forma más rápida y barata sin necesidad de una gran inversión en ordenadores.

Para poder desarrollar una correcta simulación, hay que tener en cuenta el tamaño y la localización del incendio, puesto que las posibilidades pueden ser infinitas, desde fuentes de calor de pequeña potencia (5 KW) a una superficie caliente o una gran llama, siendo un parámetro clave la velocidad de cesión de calor (HRR). La geometría del recinto al igual que su utilidad es fundamental ya que el área superficial expuesta al incendio y a los combustibles es diferente y cambia el resultado de las once variables que describen el comportamiento del gas en modelos de dos zonas. Los factores que se definen son tales como, las propiedades de los materiales del contorno, los elementos del mobiliario, revestimientos o incluso el tamaño y localización de las aberturas, puesto que estas afectan a la presión

interior del compartimento, considerando la presión como atmosférica tanto en la capa superior como inferior en los casos que haya fugas o ventilaciones.

Una vez se añadan todos estos parámetros de entrada (*input*), el programa calcula unos parámetros de salida (*output*) para realizar el análisis del incendio; Estos resultados son, la situación del punto de contacto entre las dos zonas, es decir, la altura de la capa de humo, el flujo de humo que entra y sale por las aberturas o la ventilación, las concentraciones de gases, la temperatura de cada zona y el flujo de calor hacia un blanco, en función del tiempo.

Ejemplos de modelos de zona son CFAST, OZONE, COMPBRN-III, MAGIC y FLAMME-S.

### 2.5.1 Herramienta CFAST y limitaciones

CFAST (*Consolidated Model os Fire Growth and Smoke Transport*) es un Modelo de Zona desarrollado por el NIST (*National Institute of Standars and Technol.*) del *Technology Administration U.S. Department of Commerce*, de gran aplicación hoy en día por investigadores de incendios, arquitectos, ingenieros etc.; para calcular el movimiento del humo, sus gases y temperatura en las dos zonas del compartimento en las que es dividido proporcionando así estimaciones de las consecuencias más probables en un incendio en un recinto cerrado. El modelo es capaz de simular en compartimentos desde  $1\text{m}^3$  hasta espacios de  $1000\text{m}^3$  [17].

La primera versión 1.0 fue publicada en junio de 1990, esta versión fue una reestructuración del FASTLite que incluía las lecciones aprendidas del Modelo de Zona CCFM. Desde entonces se ha ido mejorando y desarrollando, la diferencia entre las diferentes versiones es la mejora en la velocidad de cálculo, la mejora en la geometría y caracterización del dominio, propiedades en los elementos combustibles e incluso la posibilidad de introducir detectores de humo, ventilación para estudiar su efectividad. La última versión 7 corresponde a 2015 e incluye un nuevo interface para Windows. El código en el que está escrito es FORTAN 90 y es posible su descarga gratuita en la web del NIST. [21]

Como particularidades el modelo CFAST calcula predicciones en función del tiempo de la presión, la altura de la capa de humo y las temperaturas de las zonas, mediante sistemas de ecuaciones diferenciales determinadas a partir de las ecuaciones de conservación de la masa, de la energía y de la ecuación fundamental de los gases ideales. Al solo dividir el compartimento en dos zonas, cada una de las propiedades mencionadas anteriormente es aproximada a un valor medio para todo ese volumen de control. Además las ecuaciones fundamentales se pueden expresar en función de la masa o la entalpía por lo que se es capaz de ver las variaciones que se producen en ambas zonas según sucedan los acontecimientos (penachos de humo, ventilación, transferencias de calor de una zona a otro etc.)

Al igual que en casi todos los modelos de zona, este emplea once variables físicas, siete constantes como son la densidad, el volumen y la energía interna de las capas caliente y fría, y la presión en el compartimento y cuatro variables diferenciales, la masa y la temperatura de la zona fría y caliente estas son obtenidas mediante un balance entre las dos zonas de las ecuaciones de conservación de la masa y energía. Además de las ecuaciones principales, CFAST hace una diferenciación entre los fenómenos que se producen durante el incendio y los divide en submodelos facilitando el cálculo de la simulación.

### 2.5.2 Descripción de los modelos, ecuaciones principales

Este subapartado describe a grandes rasgos los diferentes submodelos en los que CFAST se basa para el modelo de simulación y así familiarizar al lector con los conceptos de cada uno de ellos y sus particularidades. La información presente en este punto ha sido extraída de [17] [21].

- i. **Submodelo de incendio:** el incendio es entendido como una masa combustible que cede energía y crea productos de combustión mientras este se quema. La combustión puede

tener lugar en la capa inferior o en la capa superior o en un *Door jet*. El modelo es capaz de simular diferentes focos de calor en un mismo compartimento o varios, teniendo como inconveniente que los trata como independientes sin tener interacción sus penachos o intercambio de radiación entre incendios. La velocidad de pirolisis tiene que ser definida por el usuario ya que CFAST no tiene un modelo de pirolisis que pueda predecir el incendio.

- ii. **El penacho:** los penachos se forman sobre cualquier objeto que este ardiendo (Figura 2-9) y actúan como canal de intercambio de masa y entalpía entre las dos zonas. Para poder calcular esta entrada de aire, CFAST se basa en los trabajos de McCaffrey y Heskestad [17].

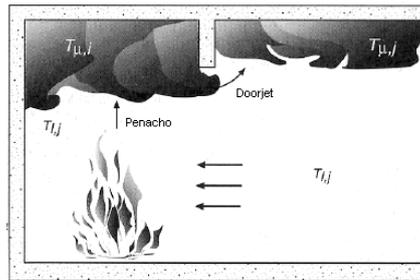


Figura 2-9 Penacho y entrada de aire [17]

- iii. **Flujo a través de aperturas:** Solo reconoce dos tipos de flujo; vertical a través de aberturas horizontales (escotillas) o horizontal a través de aberturas verticales (puertas). Para determinar los flujos horizontales usa diferencia de presiones en la abertura. En los flujos que están a una cierta altura calcula la diferencia de presiones en esa altura mediante la ecuación de Bernoulli, y así saber la presión de cada lado de la abertura con la presión del suelo, la altura del suelo y densidad. Los flujos pueden ser tanto naturales como forzados.
- iv. **Flujo por los pasillos:** Al determinar una estancia como un pasillo, el modelo no genera una capa caliente instantáneamente al producirse el incendio, ya que el volumen de control comparado con un compartimento típico es mayor, por lo que espera un tiempo de retardo hasta que el flujo llene toda la estancia. Para calcular el retardo de formación de la capa caliente se usan dos parámetros relacionados con el flujo: el tiempo que tarda el flujo en recorrer todo el techo y la distribución de temperaturas debajo del pasillo. Estas correlaciones son el producto de experimentos desarrollados con el Modelo de Campo FDS (*Fire Dynamics Simulator*) del NIST. Gracias a este submodelo el flujo no entra en los compartimentos conectados al pasillo automáticamente, si no que espera el retardo que le indica que ya ha pasado.
- v. **Transferencia de calor:** CFAST reconoce las transferencias de calor por radiación, convección y conducción entre los gases de las zonas y el dominio (techo, paredes y suelo). Además también asume que el gas intercambia energía de forma convectiva y radiactiva con el entorno. En este submodo es donde indicaremos las propiedades térmicas de los materiales del dominio, siendo asumidas como constantes por el modelo.
- vi. **Flujos por el techo (*Ceiling jet*):** En las fases iniciales del incendio, los flujos por el techo y la transferencia de calor convectiva que generan puede incrementar la propagación del humo entre compartimentos e incluso activar las medidas de detección contra incendios. Para calcularlos Cooper [17] detalla un modelo y un algoritmo que no solo tiene en cuenta estas transferencias de calor, también estima las transferencias que se producen entre los flujos del techo que van hacia los flujos de la pared. Se asume que el recinto es un paralelepípedo rectangular y, las temperaturas en el techo son uniformes.

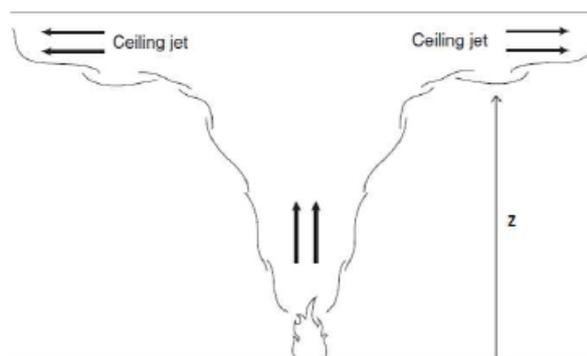


Figura 2-10 Fenómeno de *Celing jet* [5]

Además de estos submodelos se pueden añadir nuevos parámetros mediante opciones que pueden ser definidas por el usuario, como son la instalación de *sprinklers* (bocas de agua nebulizada), termopares, etc. O incluso definir algunos parámetros de salida, como es la altura de la llama.

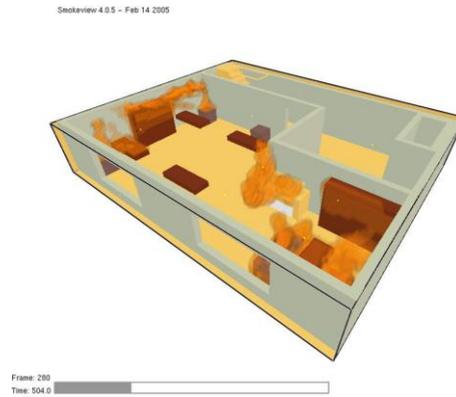
## 2.6 Modelos de campo

Al igual que los modelos de zona, estos son empleados para modelar el desarrollo de un incendio en uno o varios compartimientos. La gran diferencia es en el número de veces que es dividido el espacio, mientras que los modelos de zona dividen el compartimento en dos regiones, los modelos de campo lo dividen en miles o millones de celdas (volúmenes de control), cuanto mayor sea el número de celdas, más precisa será la solución, puesto que resolvió las ecuaciones de conservación en cada uno de ellas en función del tiempo, evitando así las simplificaciones que se realizaban anteriormente dándonos resultados más precisos en comparación con los modelos de fuego en zona.

Estos modelos están basados en CFD (*Computational Fluids Dynamics*) (Figura 2-11), es decir, emplean métodos de volúmenes finitos para resolver problemas de fluidos, como son la temperatura, la velocidad y la concentración de gas, es decir, representan los movimientos de los fluidos. Esto es una gran ventaja con respecto a los modelos de zona [17].

Los modelos de campo dan información muy detallada, pero para conseguirla también necesita mucha más información de entrada, más recursos computacionales para poder modelar el incendio y por lo tanto más tiempo de procesado. Son apropiados para geometrías complejas donde las zonas no describen con exactitud el incendio y además pueden ser utilizados fuera de recintos cerrados, como por ejemplo en el incendio de un depósito de combustible que se encuentra en el exterior. Pero para un mayor rendimiento de las simulaciones con los modelos de campo basados en CFD se tendrá que incluir entre otros las condiciones meteorológicas si se encuentra en el exterior o si es en el interior información sobre la ventilación, temperatura inicial etc. Además cuando haya que seleccionar el tamaño de las celdas se intentará que sean más pequeñas cuanto más próximas a la zona del incendio.

El desarrollo de los modelos de campo y su uso en el estudio del fuego ha ido creciendo exponencialmente en los últimos años debido a la capacidad computacional de los ordenadores junto a la aparición de aplicaciones de dinámica de fluidos CFD, aunque no quiere decir que los modelos de zona ya no se sigan aplicando.



**Figura 2-11 Representación modelo de campo en FDS [22]**

También se tiene que tener en cuenta los problemas que presenta los modelos de campo aplicados al incendio, como son; el gran número de escenarios a considerar, todos ellos casi siempre con geometrías complejas. La complejidad del problema que tiene que solucionar el modelo, ya que se incluyen fenómenos de turbulencia, de transporte de masa, de transporte de energía etc. El tratamiento de aproximado de la turbulencia, particularmente los grandes remolinos asociados a los penachos y el intercambio térmico por radiación entre los elementos del fuego y las superficies del compartimento (dominio).

Por otra parte, los principales organismos internacionales dedicados a la investigación en el campo del fuego, como por ejemplo el NIST, han desarrollado modelos de campo para poder analizar y valorar los incendios y sus contramedidas, estos programas entre otro son FDS, SOFIE o JASMINE.

### 2.6.1 Herramienta FDS y limitaciones

FDS (*Fire Dynamics Simulator*) se trata de un modelo de simulación de incendios mediante CFD para modelos de campo desarrollado por el *Building and Fire Research Laboratory* del NIST con colaboración del VTT *Building and Transport* de Finlandia; está programado también en Fortran 90 y es necesario el programa *Smokeview* para poder generar las imágenes y animaciones. Fue desarrollado como herramienta de estudio de la dinámica del incendio y la combustión. A nivel internacional y dentro de la ingeniería contra incendios es uno de los más utilizados ya que puede ser usado en escenarios complejos y su manejo es relativamente sencillo. Se podrá hacer con el software de forma gratuita y descargarlo en la web del NIST [21].

El modelo se basa en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para aplicaciones con bajo número de Mach y flujo térmico, dando importancia al humo y transporte de calor que deriva del incendio. Una vez son aproximadas por diferenciales finitos las derivadas parciales de las ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía en la misma malla que la solución del flujo se muestra en función del tiempo en una malla rectilínea de tres dimensiones, es decir, se divide en miles de cubos ya que también la radiación se aproxima por volúmenes finitos [17]. El uso de rociadores y su interacción con el medio, y simular el movimiento del humo este modelo de campo lo calcula mediante partículas langrangianas. Como ya se ha mencionado anteriormente, FDS es una herramienta de estudio y predictiva del comportamiento de un incendio mediante CFD que calcula la temperatura, presión, velocidad, densidad, composición química, flujo de calor y tasa de pérdida de masa en cada una de las celdas en las que está dividido el espacio. Otra de las diferencias con respecto a un modelo de zona, es la división del volumen en miles de celdas (Figura 2-12) y cientos de miles de escalones en el tiempo. Tiene en cuenta la fase gas y analiza la temperatura, la velocidad de los fluidos, la concentración de especies presentes, cuantía de la visibilidad en función de la concentración de humos, entre otros. De la misma forma, permite predecir las variables asociadas a la interacción entre la fase gas y fase sólida.

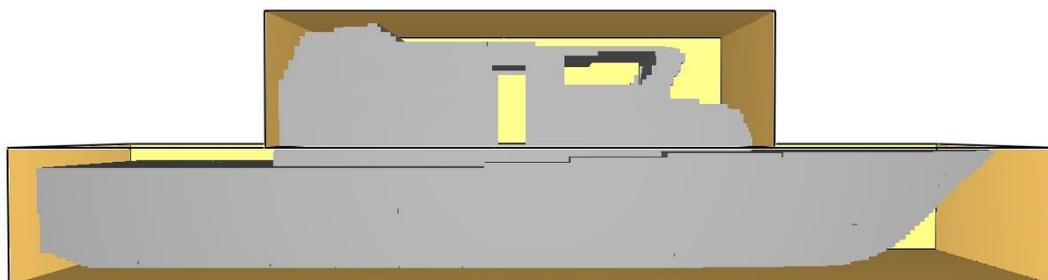


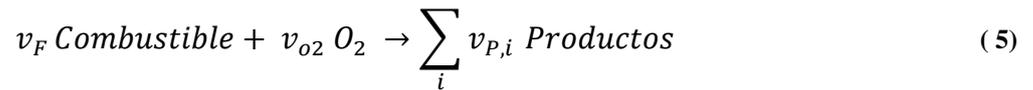
Figura 2-12 Mallado de la lancha de instrucción en FDS

Esta herramienta no solo está limitada con los flujos de baja velocidad, sino que también está limitada por la geometría, es decir, como la división del espacio se realiza en cubos rectilíneos, a veces partes del espacio no pueden adaptarse a esta división y queda mal representado. Para mitigar el problema se utilizan el efecto *sawtooth* de las obstrucciones que representa objetos no rectangulares. La forma de definir los escenarios por parte del usuario es mediante dos tipos de archivos de entrada en texto. En el primero se encuentran todos los datos necesarios como pueden ser condiciones ambientales, geometría, propiedades de los materiales etc. El segundo archivo es opcional ya que sus parámetros pueden ser introducidos en el primero.

### 2.6.2 Descripción de los modelos, ecuaciones que tienen en cuenta

FDS resuelve cada elemento de la simulación del incendio en función de unas ecuaciones predeterminadas y un algoritmo principal con esquema predictivo-corrector explícito, de segundo orden de exactitud en el espacio y en el tiempo [17].

- i. **Modelo hidrodinámico o de las turbulencias:** En FDS las turbulencias producidas por ejemplo por los penachos en las capas altas del compartimento se pueden resolver por dos modelos; por la Simulación de Grandes Remolinos (*Large Eddy Simulation*, LES) de Smagorinsky [10] que viene como forma predefinida por el programa. Este procedimiento primero aplica un filtrado espacial y después resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes. En función del tamaño de la rejilla será la resolución de la escala de turbulencia. El otro modelo es la Simulación Directa Numérica (*Direct Numerical Simulation*, DNS), se usa si la rejilla numérica es muy fina. La limitación de este modelo es el tiempo que se necesita para resolverlo. FDS no es capaz de solucionar las ecuaciones por el método de *Reynolds Averaged Navier-Stokes* [10]. Para espacios grandes con buena ventilación la teoría de fracción mezcla es aceptada, pero en nuestro caso para compartimentos pequeños como puede ser servo de un buque en el que los sistemas de extinción suelen ser agua nebulizada o CO<sub>2</sub> el combustible y el oxígeno se mezclarán pero no se quemarán.
- ii. **Modelo de combustión:** Para la caracterización y cálculo de resultados se utiliza un modelo de combustión de fracción de mezcla. La fracción mezcla se define como: *la fracción de gas en un punto dado del campo fluido combustible* [17]. Asume que la combustión está controlada por la mezcla esto hace que todos los productos de la combustión se puedan poner en función de una variable que es la de fracción mezcla. La reacción del combustible y el oxígeno es infinitamente rápida; obteniéndose las proporciones de esta mezcla mediante relaciones estequiométricas:



Donde,  $v$  e  $i$  son coeficientes estequiométricos de la combustión. “F” es el combustible que actúa como *reactante* y  $O_2$  es el comburente, ambos producen *productos*.

- iii. **Modelo de transferencia de calor:** la transferencia de calor por radiación se soluciona resolviendo la ecuación de la transmisión de calor por radiación para un gas que no se dispersa. Para ello se utiliza un método parecido al de volúmenes finitos (*Finite Volume Method*, FVM). Este método de aproximación para el cálculo de la transferencia de calor tiene muchas limitaciones.

Las ventajas del uso de FDS como modelo de campo con respecto a otros programas de simulación de incendios:

- **Combustión en múltiples pasos:** Hace un cálculo más exacto de la velocidad de cesión de calor (HRR). No solo considera una única forma de combustión, sino que prevé diferentes casos.
- **Materiales de múltiples capas:** Análisis de las diferentes capas de material que componen la frontera de nuestro modelo, con el cual el incendio interactúa.
- **Zonas de presión:** Considera escapes, ventilación y otros fenómenos similares.
- **Efectos de chimenea:** Se calcula por medio de la Ley de Pascal.

## 2.7 Sistemas CAD- Diseño Asistido por Computador

Todo proceso de desarrollo un producto está dividido en dos fases: diseño y fabricación. Y es en la primera fase donde están enmarcados los sistemas CAD. Los sistemas CAD (*Computer Aided Design*) consisten en la utilización de un ordenador para la creación, modificación, análisis y optimización de un diseño por parte del diseñador, es decir, realizar lo mismo que se hace con lápiz, escuadra y cartabón pero con la integración de métodos computacionales y de ingeniería.

El desarrollo de los programas CAD se produce en los años 1950 con la evolución del software de diseño computacional gráfico. El término Diseño asistido por ordenador aparecerá en 1959 gracias a Douglas Ross y Dwight Baumann más tarde el ingeniero Ivan Sutherland de *Sketchpad system* demostró la posibilidad de crear y dibujar objetos interactivos en un CRT [23].

La principal tarea de los programas CAD será la de definir la geometría del diseño, con posibilidad de representar las partes mecánicas, ensambles, circuitos electrónicos, distribución etc. La mayor ventaja de este software es el ahorro de tiempo y reducción de errores causados por la redefinición de la geometría cada vez que es necesario.

Estos programas han ido desarrollándose y evolucionando a una mayor integración con programas CAM (*Computer Aided Manufacturing*) y CAE (*Computer Aided Engineering*) consiguiendo realizar un proyecto desde la fase de diseño hasta la producción del mismo.

Existen diferentes sistemas CAD que permiten especificar de diferente forma una pieza o un sistema:

- **CAD 2D:** Se trabaja mediante líneas de 2D para el diseño de planos tanto de edificación como mecánicos. Este modelo es muy utilizado en arquitectura. Estos sistemas una vez se diseñe en 2D puede realizarse una representación en 3D pero solo mostrando las aristas de las piezas; pero no son compatibles con programas de cálculo de elementos finitos

- **Modelado geométrico 3D:** Son aquellos que trabajan con sólidos. Este tipo de sistemas tiene muchas ventajas ya que una vez diseñado en 3D podemos obtener sus planos mediante proyecciones del mismo, vistas, cortes e incluso podemos añadir propiedades a las piezas, datos másicos etc. para más tarde poder utilizar estos modelos en análisis de elementos finitos gracias a la capacidad de mallado que incorpora. Las formas de describir un elemento en los sistemas CAD son: por Alambre, Superficie y Sólido.



**Figura 2-13 Formas de descripción de elementos en CAD**

Existen una gran variedad de programas CAD en el mercado, cada uno de ellos especializado en un ámbito del diseño o de la ingeniería. Los más utilizados son, AutoCAD, ArchiCAD, 3D Max, TurboCAD etc. Con todos ellos se consigue una mayor productividad, flexibilidad y estandarización. Consiguiendo en muchos casos crear imágenes realistas en movimiento con capacidad de verlas desde diferentes puntos de vista, comprobando aspectos como interferencias entre elementos, pesos, inercias entre otros.

En el presente trabajo, el programa elegido para realizar el diseño de la lancha de instrucción es el NX.8 de la empresa Siemens PLM software. El motivo de su elección es el interfaz sencillo que presenta y la disponibilidad de las licencias por el centro universitario. Este programa se caracteriza por su versatilidad y que integra los principios de diseño industrial, modelado geométrico, simulación gráfica y de ingeniería concurrente. NX da la posibilidad de desarrollar figuras no solo mediante las herramientas de extrusión, agujero, redondeos o ensambles, sino que también permite realizar volúmenes mediante herramientas como barrido.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Modelado de la Geometría

Como se ha expuesto en la introducción, el presente proyecto tiene como uno de los objetivos el modelado de la geometría de la lancha de instrucción Rodman-66 para que pueda ser utilizado en otros estudios con modelos de campo, como FDS. A continuación se expone los pasos realizados para la consecución de este objetivo.

#### 3.1.1 Descripción del programa NX 8.0 de SIEMENS y entorno de trabajo

NX 8.0 de Siemens PLM software es un programa de diseño asistido por computador desarrollado para empresas de ingeniería para diseñar mejores productos, con mayor rapidez, y menores costes. Como programa de diseño mecánico permite la elaboración de planos en 2D como proyección de figuras diseñadas en geometría 3D. Una de las mayores ventajas y facilidades que aporta este software CAD es su capacidad de integración y trabajo con documentos de otros programas como si fueran propios, pudiendo así importar documentos en función de las necesidades de trabajo y diseño. Así mismo también integra herramientas CAM y de simulación.

Dependiendo del tipo de trabajo que se desee realizar con el programa, se elegirá una plantilla u otra, el programa facilita diferentes entornos con diferentes herramientas en función de las necesidades (Figura 3-1) y dependiendo de la licencia adquirida estarán habilitadas unas u otras. El entorno *modelo* permite el diseño de elementos combinando comandos como *croquis*, *curvas*, *superficies* etc. El entorno *chapa de NX* permite diseños de chapa de doblado directo y el entorno *Shape studio* es el específico de diseño industrial. También es posible realizar análisis de movimientos cinemáticos al igual que de elementos finitos desde *simulación* con aplicaciones como NX Nastram.

Nombre	Tipo	Unidades	Relación	Propietario
Modelo	Modelado	Milímetros	Independiente	NT AUTH...
Ensamble	Ensamblados	Milímetros	Independiente	NT AUTH...
Shape Studio	Shape Studio	Milímetros	Independiente	NT AUTH...
Chapa de NX	Chapa de NX	Milímetros	Independiente	NT AUTH...
Chapa aeroespac...	Chapa aeroes...	Milímetros	Independiente	NT AUTH...
Enrutamiento lógi...	Enrutamiento ...	Milímetros	Independiente	NT AUTH...
Enrutamiento elé...	Enrutamiento ...	Milímetros	Independiente	NT AUTH...
Pieza en bruto	Módulo de en...	Milímetros	Independiente	ninguno

Figura 3-1 Entornos de trabajo en NX 8.0

Para este trabajo el entorno de trabajo utilizado es el de *modelo*, en él vienen todas las herramientas y operaciones necesarias para el modelado de la lancha Rodman-66 [23]. El motivo de la utilización de este entorno se basa en que solo se busca un modelado de la lancha sin ensamblados ni se va a realizar ningún análisis de sus elementos, para ello se utiliza otro tipo de software de simulación de incendios.

Al ejecutar el entorno *modelo* se abre la pantalla de inicio con diferentes herramientas y operaciones de modelado y dibujo. En la imagen Figura 3-2 vienen marcadas las principales zonas en las que se puede dividir el interfaz del entorno de *modelo*.

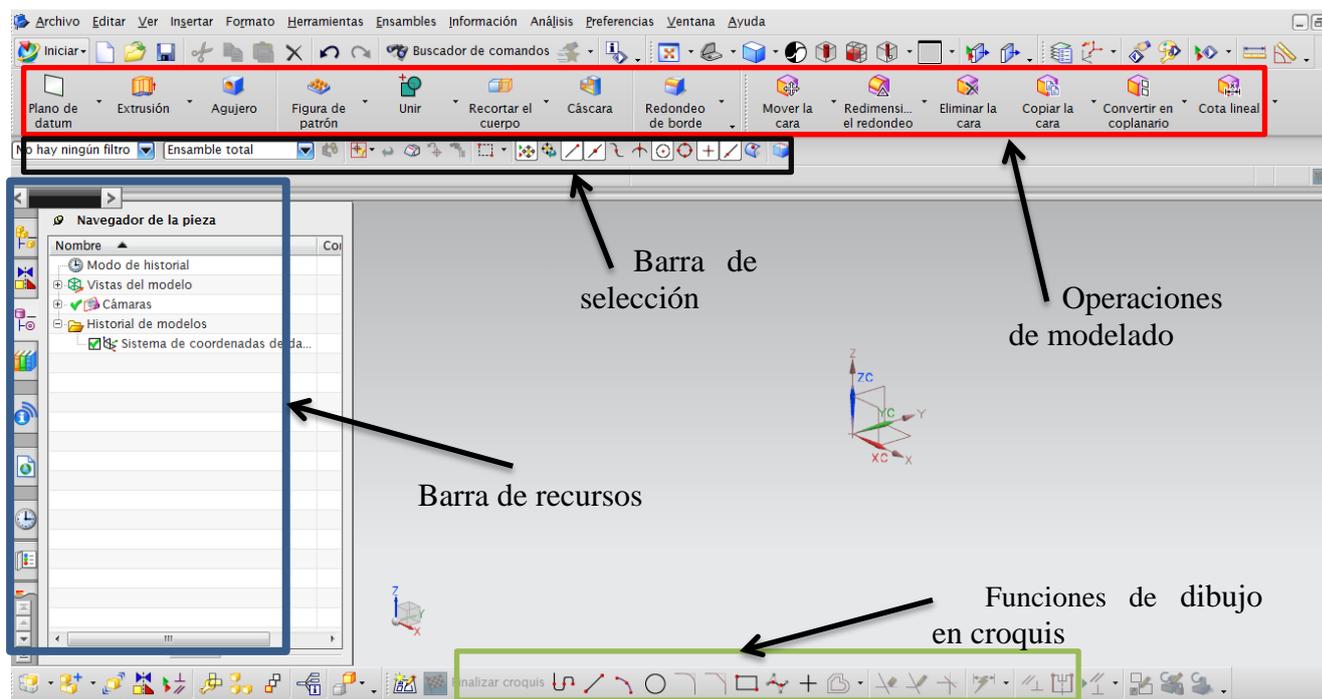


Figura 3-2 Interfaz entorno Modelo

- **Barra de recursos:** En esa zona se visualiza la información de lo que se está realizando; historial, roles, capas, plantillas. Es imprescindible en casos en los que sean utilizados muchas operaciones para llevar un control de las mismas ya que están ordenadas por orden de ejecución.

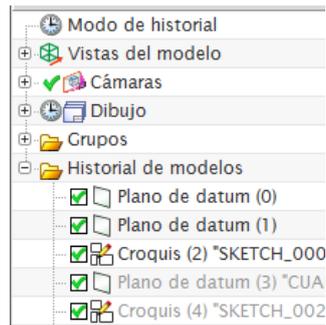


Figura 3-3 Historial de modelos

- **Barra de selección:** Proporciona métodos de filtrado para la selección de objetos.
- **Operaciones de modelado:** Son las principales operaciones que se utilizan en un modelado. Si es necesario se puede adaptar a las necesidades propias, añadiendo o quitando elementos.
- **Funciones de dibujo en croquis:** Elementos de dibujo cuando un croquis esté activo. Principalmente está compuesto por las herramientas de representación de curvas.

Dentro del entorno *modelo* uno de los puntos más importantes que se tienen que tener presentes mientras se modele es *Sistema de coordenadas* y el *Plano Datum* de trabajo, la localización y orientación de los objetos que se quiera representar será en función de estos dos elementos.

- Sistemas de coordenadas:** Los sistemas de coordenadas en este entorno se dividen a su vez en tres sistemas diferentes según su referencia: Sistemas de coordenadas absoluto, de referencia, de trabajo y de croquis (Figura 3-4). El más utilizado es el de *trabajo* (SCT) puesto que solo hay un sistema de coordenadas local que puede localizarse u orientarse en cualquier lugar del espacio, mediante las funciones de SCT dinámico o de cambio de origen y dirección.

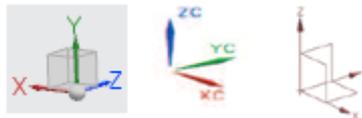


Figura 3-4 Sistemas de coordenadas

- Plano Datum:** Proporciona la capacidad de generar nuevos planos en el espacio, ya sea a una distancia, por punto y dirección, deducido, tangente a dos rectas etc. Sin este elemento el modelado del casco sería imposible ya que mediante diferentes planos se pueden construir las cuadernas en función de las líneas de agua.



Figura 3-5 Icono de Plano Datum

### 3.1.2 Operaciones principales de modelado utilizadas

Este apartado describe brevemente las operaciones, curvas y otros elementos principales han sido utilizados durante el modelado de la lancha de instrucción Rodman-66, para que el lector entienda los pasos que se siguen, para ello se basa en el manual práctico de NX 8.0 [23]:

- Croquis:** Es un conjunto de curvas y puntos localizados en un determinado plano (existente o creado en el momento) (Figura 3-6). Es asociativo a las figuras creadas en él. Esta herramienta es muy útil para generación de figuras para mediante operaciones de

modelado generar cuerpos o superficies. Entre otros los croquis pueden estar restringidos o ser usados por capas. Se pueden un número ilimitado de croquis en la elaboración de un modelo.



Figura 3-6 Icono Croquis

- ii. **Curvas:** Las curvas son un elemento fundamental en el modelado y generación de la mayoría de las partes del presente trabajo. El programa facilita múltiples formas de crearlas y utilizarlas. En la mayoría de los casos se ha usado las funciones de *línea*, *arco* y especialmente *Spline*. (Figura 3-7)



Figura 3-7 Iconos de la herramienta Curva

- **Línea:** Permite crear líneas asociativas definiendo las restricciones para los puntos inicial y final (Figura 3-8). Para seleccionar o crear el punto inicial y punto o dirección final tenemos múltiples opciones. Siempre que se genera una línea es necesario un plano soporte, que puede estar ya creado o ser definido en ese momento. Es la función más simple de generación de curvas básicas por la unión de dos puntos.



Figura 3-8 Icono Línea

- **Arco:** Los arcos pueden ser asociativos y se pueden generar mediante: *arco por o dos puntos*, *arco o circulo desde centro* o *arco tangente* (Figura 3-9). Los valores pueden introducirse por radio del arco, ángulo inicial y final, diámetro o tangencia. Con arcos se pueden conseguir redondeos entre curvas llegando incluso a crear círculos.



Figura 3-9 Icono Arco

- **Spline:** Es una curva suave de forma libre que está definida por segmentos matemáticamente asociados a polinomios. Para generar este tipo de líneas se realiza mediante *puntos*, o *por polos* y *puntos pasantes* (Figura 3-10). Como característica este tipo de línea puede ser asociativa o no asociativa a los puntos de paso. Para definir las se tiene que parametrizar y asignar un tipo de restricción a la curvatura en los puntos de definición. Las restricciones son de tangencia, curvatura o flujo. En la parametrización se define el grado del *spline*, siempre uno menor que el número total de polos. Otra ventaja de este tipo de curva es, su capacidad asociativa, es decir, permite convertir un *spline* en asociativo y relacionarlo paramétricamente con las figuras madres creando así una nueva figura. Este tipo de curva es la más utilizada para el modelado, debido a su capacidad de micro posicionamiento de los puntos, su ajuste de la curvatura por segmentos y la facilidad de parametrización. Todo ello haciendo posible generar así las curvas de la lancha lo más reales posibles.



Figura 3-10 Icono Spline

iii. **Operaciones de modelado:** Este tipo de operaciones se basan en la previa realización de un croquis, ya sea interno cuando desee asociar el croquis con una sola figura o externo cuando son visibles y accesibles desde cualquier lugar dentro de una pieza. El modelado del casco no ha sido específicamente realizado con este tipo de operaciones pero si está apoyado en ellas, pero sí el de la superestructura.

- **Extrusión:** Permite crear un cuerpo mediante el barrido de una sección de curvas en una dirección lineal especificada y a una distancia (Figura 3-11). Tiene capacidad booleana (crear, unir, sustraer o intersecar) con otras figuras.



Figura 3-11 Icono Extrusión

- **Redondeo:** Permite realizar redondeos de aristas vivas (Figura 3-12). Tanto quitando material, como añadiéndolo.



Figura 3-12 Icono Redondeo

- **Chaflán:** Lleva a cabo diferentes tipos de chaflanes, tanto quitando como poniendo material. Tiene cinco tipos para elegir dependiendo de las medidas introducidas, pero el resultado es el mismo.(Figura 3-13)



Figura 3-13 Icono Chaflán

- **Simetría:** Esta operación (Figura 3-14) permite crear modelos simétricos mediante la simetría de las figuras seleccionadas en base a un plano de referencia o cara plana.



Figura 3-14 Icono Simetría

- **Mover:** esta opción (Figura 3-15) permite mover un elemento a una nueva ubicación. No es válida si la localización ha sido delimitada usando dimensiones de posicionamiento.



Figura 3-15 Icono Mover

iv. **Generación de superficies:** Las superficies generadas para el modelado del casco y cubierta se han realizado mediante superficies por barrido, debido a su disminuido número de restricciones:

- **Superficies por barrido:** Los cuerpos creados por las superficies por barrido están definidos por una o más cadenas seccionales que efectúan un barrido a lo largo de una cadena guía mediante un movimiento prediseñado (Figura 3-16). Tanto la cadena guía como la de sección pueden estar constituidos por uno o varios segmentos. Todos los segmentos tienen que ser continuos y tener una curva suave. En general esta es la función más potente de generación de superficies que se encuentra en NX 8.0.



Figura 3-16 Icono de Barrido

### 3.1.3 Modelado de Casco

El presente punto describe el proceso de modelado paso a paso del casco de la lancha de instrucción Rodman-66 de la Escuela naval militar. Este proceso de modelado se ha llevado a cabo según los planos originales facilitados por el astillero Rodman (Anexo II).

Para comenzar con el modelado con un programa CAD es necesario al igual que de la forma tradicional el *Plano de Formas del Buque*, este define la superficie multi-curva de la forma exterior del casco del buque. Se representa mediante curvas de nivel equidistantes y paralelas a los planos de referencia, es decir son las intersecciones del exterior del casco con los tres planos de referencia [24]. Por las características y singularidades de la lancha de instrucción el modelado se ha realizado mediante las secciones transversales, es decir, las cuadernas; y con las secciones horizontales, las líneas de agua. Para la cubierta se ha basado en la sección longitudinal.

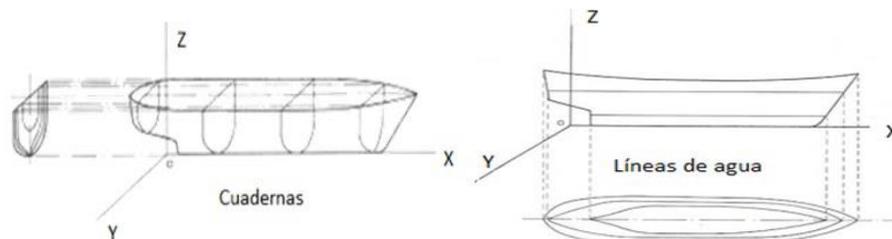
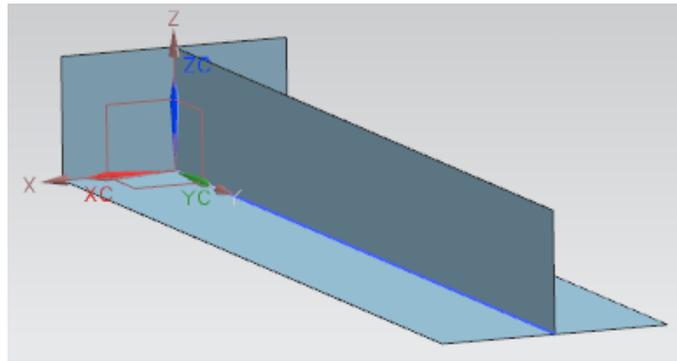


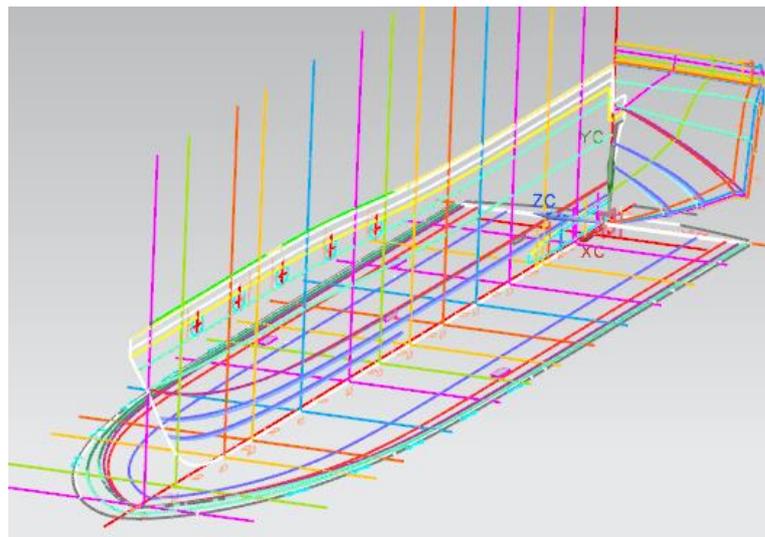
Figura 3-17 Secciones Transversales y Horizontales [24]

En el entorno *modelo*, para conseguir la proyección de los planos de estas secciones, inicialmente se construye un tetraedro en el espacio (Figura 3-18), de esta forma las distancias se referencian con respecto al plano de la popa, se ha considerado para efectos del modelado una popa plana y el punto de referencia la quilla.



**Figura 3-18 Tetraedro de trabajo**

En el tetraedro de trabajo se insertará en el plano XZ la Caja de cuadernas, es decir, plano con las secciones transversales separadas entre sí aproximadamente a una misma distancia, exceptuando la cámara de máquinas que por su interés la distancia es mayor. La lancha de instrucción por su singularidad constructiva, la proa tiene una mayor curvatura con respecto al resto del buque, por lo que se reduce la distancia en sus cuadernas comparada con el resto. En el plano YZ se insertarán las secciones vertical longitudinal, paralelas al plano de crujía. Las líneas de agua, que son el plano más representativo del buque, se han proyectado en el plano XY (Figura 3-19). Estos planos son importados desde AutoCAD.



**Figura 3-19 Tetraedro con planos de secciones**

A partir de esta figura, se proyectará cada cuaderna a la distancia que marca el plano horizontal. Como es un buque simétrico con respecto al plano de crujía, solo se realizará las cuadernas de babor (Figura 3-20) para este proceso es utilizado el *Spline*. Posteriormente cuando toda la semi-manga a un lado de la línea central esté modelada, se utilizará la operación *simetría* para realizar el lado de estribor. En este caso no será necesario representar disposiciones asimétricas puesto que la lancha no las tiene.

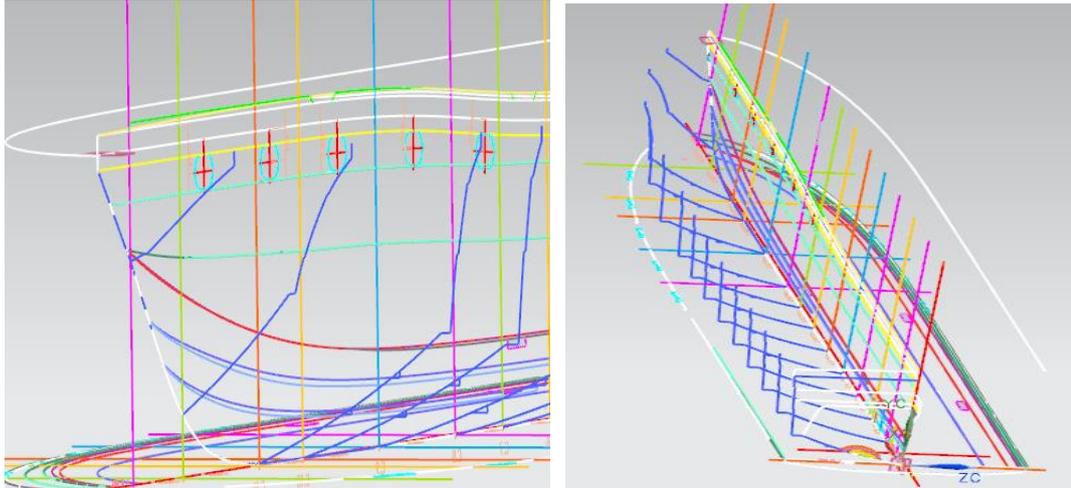


Figura 3-20 Cuadernas proyectando el volumen de carena

Una vez estén proyectadas todas las cuadernas mediante curvas *Spline*, la forma exterior del buque quedará definida por una superficie generada por *barrido*. El barrido se irá generando entre cuadernas ya que la curvatura del casco hace imposible una aproximación de las guías en la operación barrido (Figura 3-21), cada barrido podría considerarse un bloque estructural independiente si no fuera porque el modelo real de la lancha está construido en fibra de vidrio en un único bloque. El material de construcción hace también que se considere el exterior del casco como superficie de trazado.

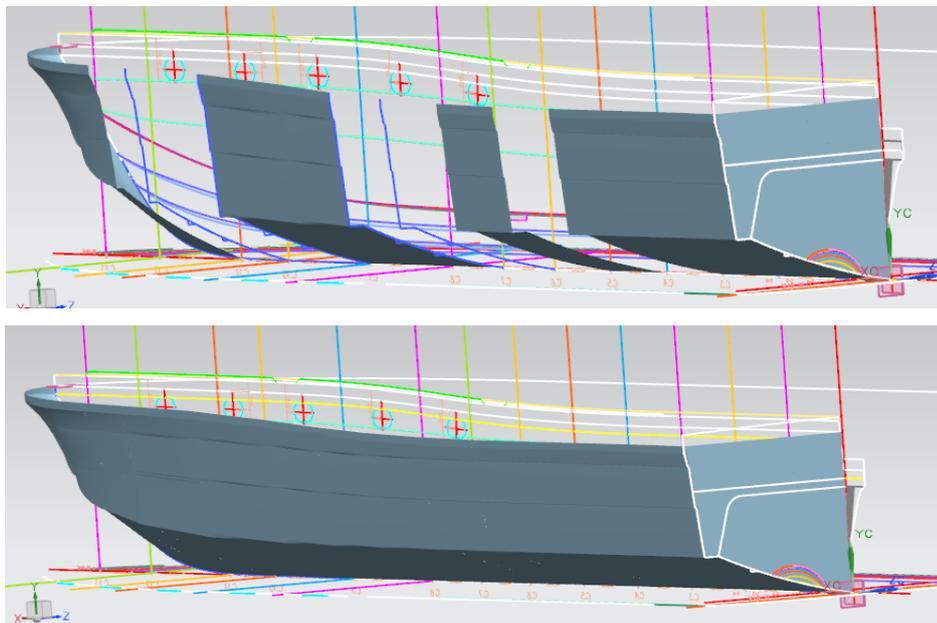


Figura 3-21 Semi-manga generada por barrido

Finalmente, se realiza una copia del lado de babor simétrica para estribor, generando completamente el casco y cerrando el volumen de carena. En la Figura 3-22 se puede ver el casco desde proa donde se han dejado, para la imagen, las cuadernas y así pueda diferenciarse los diferentes bloques. Como simplificación de la lancha real, el modelo simulado ha sufrido una simplificación en la zona de toldilla, donde se encuentra la lancha semirrígida. Esta simplificación no afecta para los modelos de simulación de incendios, ya que son zonas de protección. La cubierta se realiza por un barrido de las líneas superiores generadas por los barridos del casco. No representa el arrufo exacto de la lancha pero está basado en él.

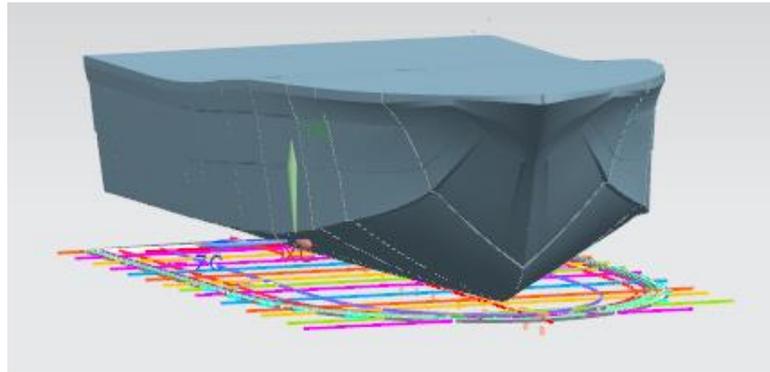


Figura 3-22 Casco Lancha de instrucción R66 proa



Figura 3-23 Proa Lancha de instrucción R66

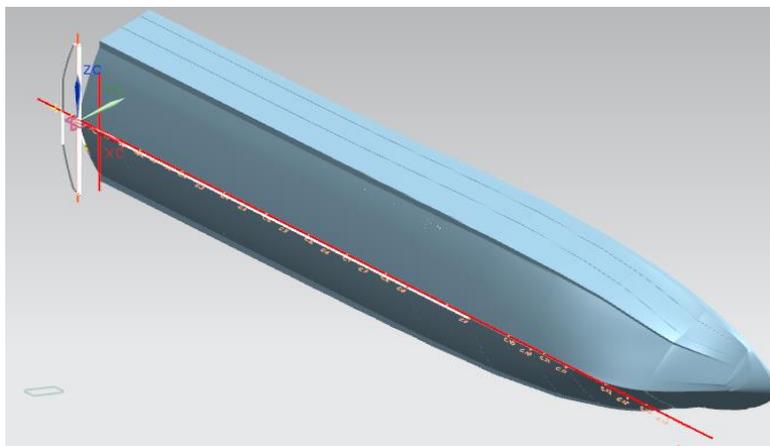


Figura 3-24 Casco Lancha de instrucción R66 quilla

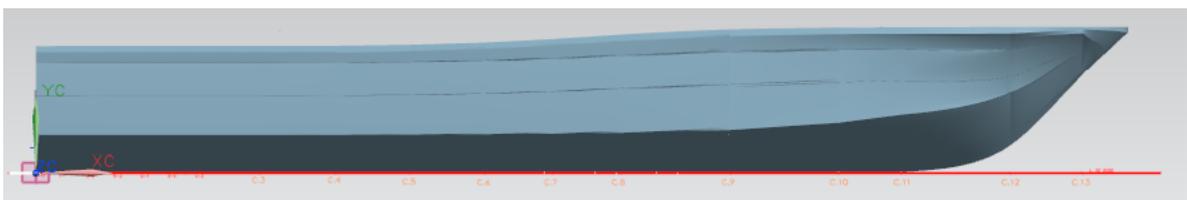


Figura 3-25 Eslora Lancha de instrucción R66

### 3.1.4 Modelado de Superestructura

A diferencia del casco, la superestructura se ha modelado a partir de una extrusión de un croquis generado a partir de un plano longitudinal. El motivo por el que se realiza mediante esta operación y no por barrido responde a su geometría. La superestructura es en este caso un cubo colocado encima del casco al cual se le han ido haciendo “recortes” para adaptarlo a las necesidades.

El primer paso es realizar el croquis de la súper estructura, para ello se utiliza el plano existente de la línea de crujía y el plano horizontal para una vista de alzado que será también utilizada en el croquis, y así al extraerlo será simétrico. Estas curvas serán también *Spline* por las características anteriormente explicadas.

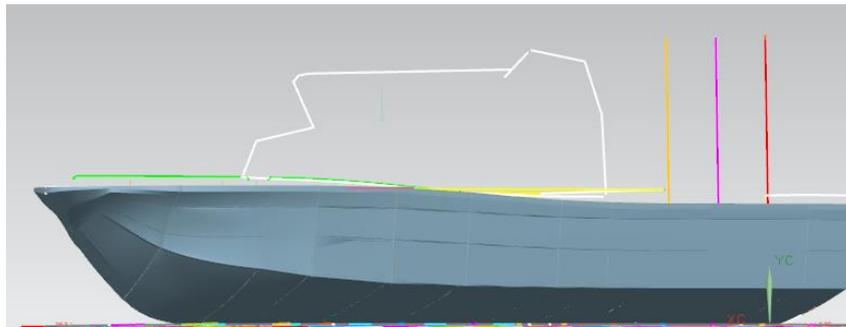


Figura 3-26 Croquis superestructura

El croquis realizado será primero extruido, y después se realizará un vaciado. Para ello el compartimento del puente de gobierno será vaciado mediante un booleano de sustraer aplicado a la figura extruida anteriormente que hará de cubierta exterior de la superestructura. Para acabar el modelado se realizarán las puertas y ventanas del puente mediante el mismo procedimiento que el habitáculo. Primero un croquis que será extruido y sustraído. Finalmente se puede examinar el resultado comparando la lancha de instrucción modelada frente a la R66 real.

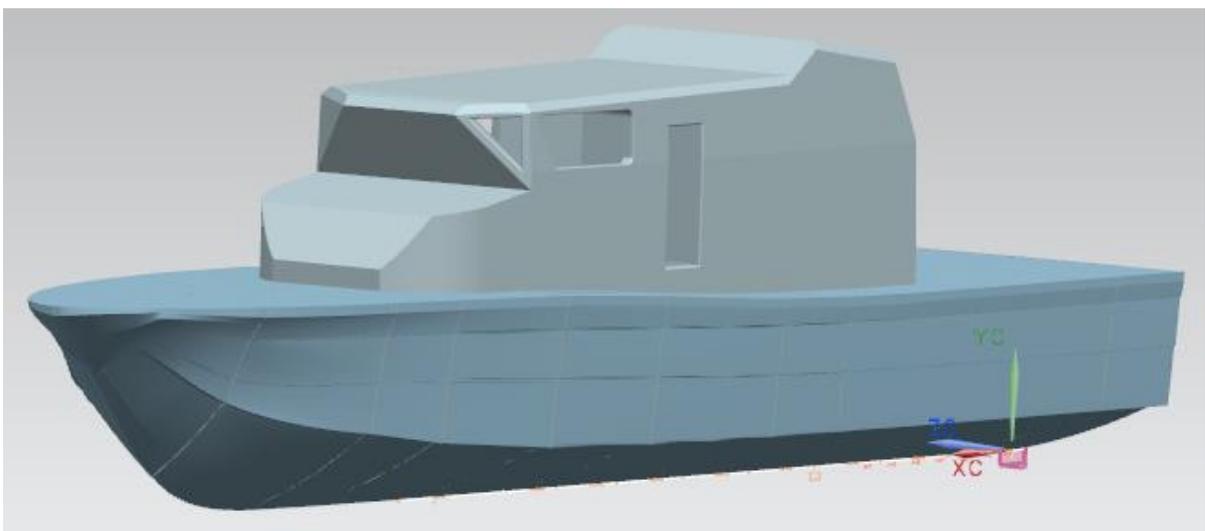


Figura 3-27 Modelo CAD Lancha de instrucción R66

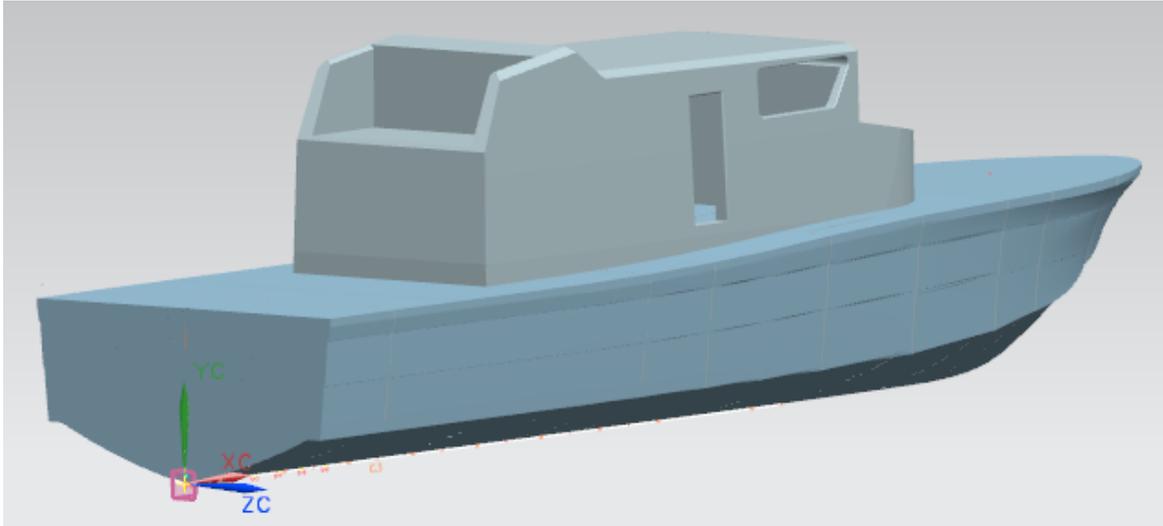


Figura 3-28 Modelo CAD Lancha de instrucción R66



Figura 3-29 Lancha de instrucción R66

### 3.2 Simulación de incendios

Existen dos áreas principales de trabajo en los que el modelado computacional de incendios puede llegar a ser bueno para la Armada española. Teniendo en cuenta que los requerimientos impuestos por estas aplicaciones son diferentes y, en algunos aspectos, complementarios. La primera aplicación, el diseño de buques, requiere una capacidad para llevar a cabo simulaciones detalladas para entornos complejos. Para esta aplicación no se tiene restricción de tiempo computacional para obtener resultados. La segunda aplicación, predicción en tiempo real del comportamiento de un incendio en un compartimento. El modelo tiene que ser capaz de ir más rápido que el tiempo real, para así activar antes las reacciones, aunque las predicciones pueden ser menos detalladas. En el caso de simulación en la lancha, un barco ya construido, el estudio será de predicción del comportamiento de un incendio.

A continuación se desarrolla la segunda parte del trabajo, simulación de incendios en la lancha de instrucción Rodman-66. La simulación se ha realizado mediante CFAST, un software de modelo de zona anteriormente explicado (2.5.1) que su tiempo computacional es mucho menor que los de modelos de campo. Este tiempo no es gratuito ya que se pierde información, pero para el estudio que se va a realizar no es el grado de profundización que se busca. Este programa ha sido seleccionado como herramienta de simulación además de por su tiempo computacional, porque ya ha sido probado anteriormente en estudios de la *United States Navy* [25] en los submarinos de la clase USS Los Ángeles, comprobando su utilidad y capacidad de modelado, con resultados aceptables. Además otro argumento que confirma el uso de este software es su disponibilidad gratuita.

Se tiene que tener en cuenta que en todas las simulaciones realizadas se ha simplificado el mobiliario, los objetos, y la maquinaria etc. presente en la lancha y que los incendios simulados son solo producto del combustible indicado y no productos de transferencia de calor, que conllevarían a incendios de dimensiones aún mayores. Todas las simulaciones realizadas se han efectuado en un ordenador Intel Core 5 a 3GHz con una memoria RAM de 4GB.

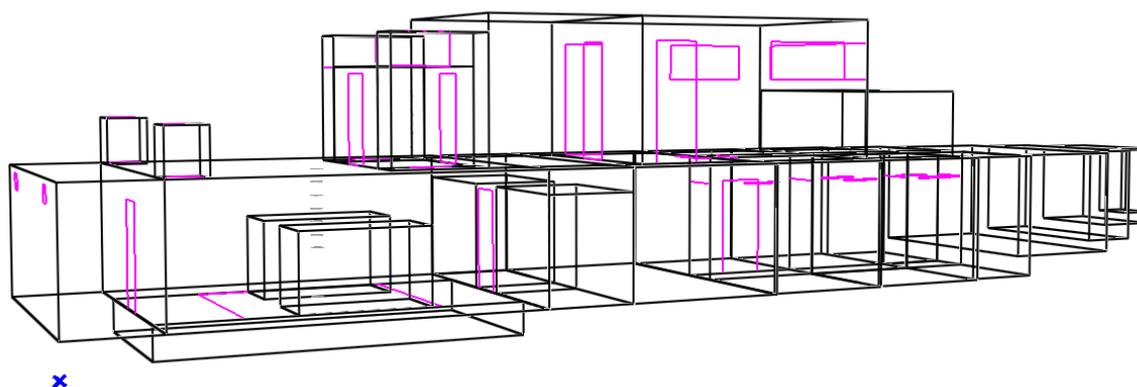


Figura 3-30 Modelado de lancha de instrucción R66 en CFAST

La geometría utilizada para el desarrollo de la simulación se muestra en la Figura 3-30. El modelo CAD anteriormente desarrollado se simplifica en este conjunto de cajas conectadas entre sí para que los cálculos puedan ser viables. Otro tipo de modelado no es posible en CFAST.

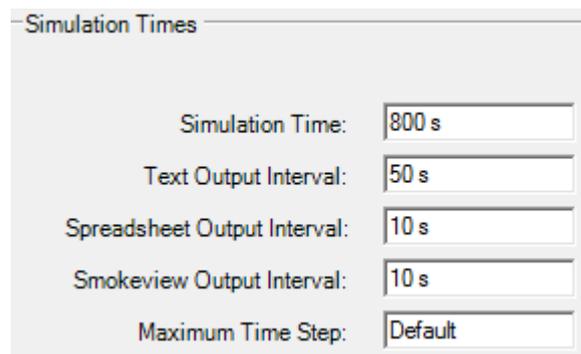
#### 3.2.1 Simulación de incendios cámara de máquinas

Para la selección del tipo de incendio a simular en la cámara de máquinas, se ha realizado en base a un informe de la Dirección General de la Marina Mercante [25] que recoge el historial de incendios en cámara de máquinas de buques similares que a lancha R66. En este informe los incendios más

comunes en buques de misma eslora y mismo material constructivo son incendios producidos por fugas o fisuras en el circuito de combustible, provocando que el gasoil vertido alcanzara la temperatura del colector, superior a la del punto de inflamación.

Aunque el objetivo de esta sección es proporcionar una guía y datos sobre los diferentes fuegos que se ensayan computacionalmente en la cámara de máquinas de la lancha R66 es importante darse cuenta que CFAST no funciona solo con las especificaciones del fuego [20]. Antes de que el modelo pueda ser ejecutado, tienen que ser definidos unos parámetros geométricos y físicos del volumen en el que se realiza se produce el incendio. En el caso de estudio, el compartimento incendiado es la cámara de máquinas, con conexiones al servo y a los tanques de combustible. Se ha simplificado el compartimento para minimizar los tiempos computacionales y los cálculos de los diferentes parámetros. Para ello se ha asumido que todos los compartimentos son rectángulos, esta simplificación realizada en la lancha no es un problema debido a que su geometría constructiva es similar a un rectángulo.

El primer parámetro a introducir en el programa es el tiempo de simulación. Tiempo durante el cual el software estará calculando en el volumen de control indicado, la presión, la altura de la capa de humo y las temperaturas de la zona superior e inferior. El tiempo de simulación es de 800 segundos pero el punto de decadencia es en función de la presencia o no de fuentes de extinción.



**Figura 3-31 Ventana tiempos de simulación**

La geometría del volumen de control de la cámara de máquinas:

- Dimensiones: 5.475 x 4.486 x 2.04 (m), esto hace de un volumen de 50.1 m<sup>3</sup>
- Extracción: Hay dos ventanas de ventilación forzada horizontales con flujos verticales situadas a ambos lados del compartimento. Tienen un área de 0.05 m<sup>2</sup> y están a una altura de 2.04 m. Estas ventanas están conectadas a dos conductos de extracción de la misma área que los ventiladores que conectan con el exterior. En la simulación se ha considerado que la extracción es natural por motivos computacionales, ya que no es capaz de calcular con flujos tan elevados como los que tiene la extracción real.
- Ventilación: Dispone de dos ventiladores colocados encima de cada motor principal. Al igual que los extractores tienen un área de 0.05m<sup>2</sup> y están a una altura de 2.04 m. conectan con dos conductos de ventilación que conectan con el exterior. Los parámetros de extracción reales son 11500 m<sup>3</sup>/hora. Pero al tratarse de un flujo muy elevado se ha tenido que aproximar a 0.002 m<sup>3</sup>/s, limite que no da error en el programa.
- Motores: colocados en el interior representados por dos cubos de volumen simplificado, con respecto a los motores principales. El motivo de su representación es por el tamaño que ocupan en el compartimento. Su volumen es de 2.4 m<sup>3</sup> cada uno y están localizados a cada banda.

- Sentina: Se encuentra en la cámara de máquinas con unas dimensiones 5.475 x 3 x 0.505 (m). Se comunica con la cámara de máquinas mediante una abertura vertical (*ceiling/floor vents*) de área 8.5 m<sup>2</sup>.

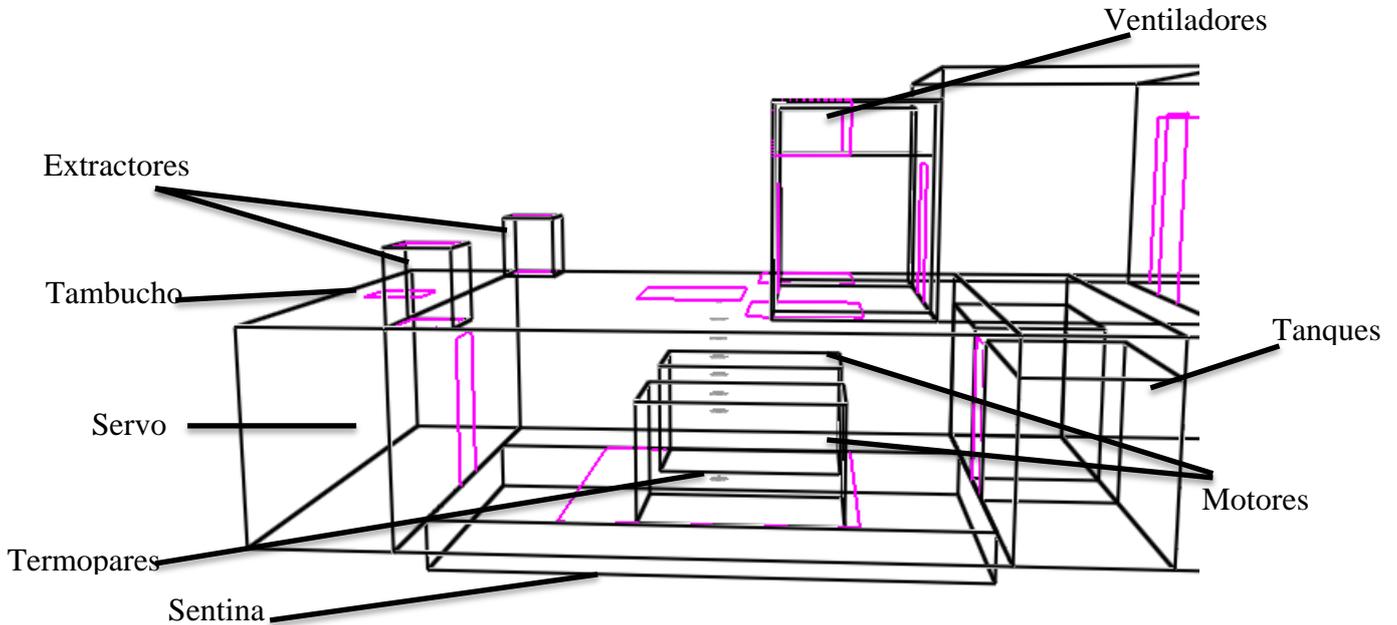


Figura 3-32 Geometría y componentes del volumen de control de la cámara de máquinas

Tanto los conductos de ventilación al igual que los de extracción se han considerado que están fabricado del mismo material que las paredes, suelo y techo. El material es poliéster reforzado en fibra de vidrio (*Glass Fiber, Poured or Blown (1/2 in)*). Los motores, aunque tengan diferentes materiales, se han generalizado a un material genérico de acero al carbono de 3/8 in (*Steel, Plain Carbon (3/8 in)*). Todos los límites de la cámara de máquinas y del resto de compartimentos adyacentes han sido modelados con poliéster reforzado en fibra con el mismo espesor, puesto que el modelo físico está construido con este material, en realidad los espesores y el número de capas es variable en función de la zona del compartimento, sin embargo, CFAST no permite el uso de múltiples espesores en una misma zona (suelo, paredes, techo). Por este motivo, se utiliza un material con propiedades termo físicas estándares (densidad, conductividad, calor específico, etc.).

Material	Conductividad kW/m (°C)	Calor específico kJ/kg (°C)	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Espesor m	Emisividad
Poliéster reforzado (1/2 in)	4.3E-05	0.835	16	0.013	0.9
Acero al carbón (3/8 in)	0.048	0.559	7854	0.0095	0.9

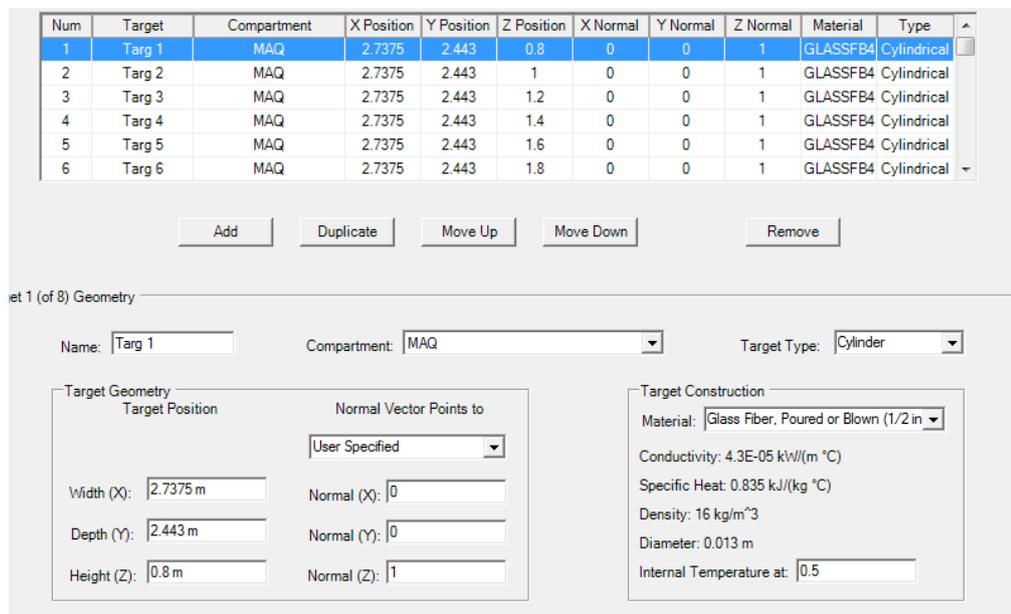
Figura 3-33 Propiedades Termo físicas de los materiales en la cámara de máquinas

Como puede verse en la **Figura 3-32** la cámara de máquinas está conectada al servo y al compartimento de tanques mediante dos aberturas horizontales (*Wall vents*) de dimensiones 1.606 x 0.6 (m) situadas a 2.153 m del mamparo de estribor. Estos dos espacios al ser dos volúmenes también aportan oxígeno a la cámara, además el tambucho del servo de 0.35 m<sup>2</sup> se encuentra abierto, es decir, hay una abertura en el techo por la que se comunica con el exterior. El servo es un volumen de 13.44

$\text{m}^3$  y se considera que la puerta estanca que separa la cámara de máquinas y el servo está abierta. Con respecto al compartimento de tanques de combustible la puerta no es estanca y también se considera abierta. Los depósitos de combustible ocupan la mayor parte del espacio por lo que dejan solo un volumen de  $4.48 \text{ m}^3$  de oxígeno.

El flujo natural de oxígeno a través de las puertas de los compartimentos el programa lo calcula dividiendo la abertura en segmentos horizontales discretos, cada uno de los cuales está delimitado por la parte superior o inferior de la abertura, el interfaz de la zona del compartimento, o el plano neutro, que es donde la velocidad cambia de dirección [20]. Como anteriormente se ha indicado, el compartimento cuenta con cuatro elementos de ventilación forzada, dos extractores y dos ventiladores conectados a unos compartimentos para poder forzar su localización. En la actualidad el modelo de ventilación forzada que dispone CFAST para introducir los parámetros específicos como las curvas de ventilación, tiene algunas deficiencias ya que las ecuaciones que utiliza para calcular este tipo de flujos son de orden superior, no lineal y en algunos casos mal planteados, lo que causa una gran cantidad de dificultades para llegar a una solución numérica que cumpla con la realidad. Por este motivo la simulación de la ventilación de la cámara de máquinas no es real puesto que tampoco permite incluir velocidades altas de extracción, permitiendo solo diez renovaciones del volumen de aire por hora.

Los dispositivos de medición (*targets*) de la variación de temperatura están colocados en el punto medio del volumen de control, con una separación de 0,2 m desde los 0,8 m de altura hasta los 2 m con respecto a la cubierta. También se ha introducido un termopar cilíndrico en el interior del combustible a 5 mm de la superficie para medir la temperatura del mismo. La temperatura que capta cada termopar es registrada a intervalos de un segundo durante el tiempo de la simulación calculando la temperatura del compartimento como la media del conjunto de mediciones realizadas. Estos objetos pueden ser calentados por radiación o convección. El material seleccionado para los termopares es el mismo del que está fabricada la lancha.



**Figura 3-34 Ventana de Termopares cámara de máquinas**

Para poder llegar a simular el incendio, además de especificar una geometría, se tiene que introducir unos parámetros ambientales tanto internos como externos al compartimento (Figura 3-35). Típicamente las temperaturas interiores de un buque no cambian entre compartimentos de forma natural. Por supuesto que la transferencia de temperaturas entre compartimentos por la cubierta y las cuerdas se produce y que, en una cámara de máquinas las temperaturas son mayores que en el resto del buque pero por las limitaciones del programa se considera la misma temperatura para toda la

estructura, pero en cualquier caso, los efectos de la variación de temperatura con maquinaria en funcionamiento o sin ella, con respecto a un incendio son insignificantes, esto solo introduce un pequeño error que con respecto al tamaño del fuego no es apreciable. En el único caso que podría ser importante esta temperatura sería en la de ignición espontánea, pero no se va a estudiar ese caso con los combustibles seleccionados. Sería razonable por lo tanto utilizar una temperatura de 298 K (25 °C). Para la temperatura exterior al ser un buque de pequeño tamaño se trata en cualquier compartimento de la temperatura ambiente, por lo que se considera una temperatura de 178 K (15 °C), esta temperatura se considera una temperatura media en la ría de Pontevedra en el mes de enero [26]. La presión tanto interna como externa es de 101300 Pa (una atmósfera) y la referencia de elevación es de cero (nivel del mar), este parámetro solo es importante cuando se modela estructuras altas, pero el buque modelado no supera los tres metros. La humedad fijada es de un 50% aproximando a la media de la ría de Pontevedra [26].

Simulation Conditions			
<b>Interior</b>			
Temperature:	25 °C	Elevation:	0 m
Pressure:	101300 Pa	Humidity:	50 %
<b>Exterior</b>			
Temperature:	15 °C	Elevation:	0 m
Pressure:	101300 Pa		
<input type="checkbox"/> Adiabatic Compartment Surfaces			

Figura 3-35 Condiciones ambientales de la simulación en CFAST

En este modelado no se ha tenido en cuenta sistemas de extinción ni detección, ya que lo que se busca es el estudio del comportamiento del fuego en la cámara de máquinas de la lancha R66 hasta que se apague por inanición o por que la tasa de gasto másico sea cero.

Las simulaciones que se efectúan en la cámara de máquinas son:

- Fuego de combustible líquido:
  - Simulación S1: Balsa de heptano de 500 kW en cámara de máquinas sin extinción
  - Simulación S2: Balsa de heptano de 500 kW en cámara de máquinas con extinción

### 3.2.1.1 Fuego de combustible líquido

#### Simulación S1:

La primera simulación (S1) se trata de un fuego en la cámara de máquinas en una balsa de heptano (*pool fire*) de 500 kW localizada en el centro del compartimento (3 m (X) x 2,443 m (Y) x 0 m (Z)), con un área de 0.25 m<sup>2</sup> constante en el tiempo, entre los dos bloques que representan los motores. El uso de este hidrocarburo se debe a que su fórmula y propiedades son las más representativas de los combustibles líquidos y es muy utilizado experimentalmente. Por este motivo, este incendio perfectamente puede representar un fuego surgido por una fuga en un manguito del motor principal o por combustible derramado en la sentina. Los datos introducidos en el comportamiento del fuego, al igual que las características del combustible han sido extraídos de ensayos experimentales efectuados por *U.S Coast Guard Research and Development Center* con las indicaciones descritas en [27] y efectuadas en el test USCG- 19 de [28].

Para introducir las características del fuego se tiene que tener en cuenta las reacciones de combustión debido a que la disponibilidad del oxígeno en el compartimento puede limitar a la HRR que se defina. Un fuego completamente desarrollado arderá dependiendo de la cantidad de combustible y de oxígeno que haya, variando de etapa en función de estas dos variables.

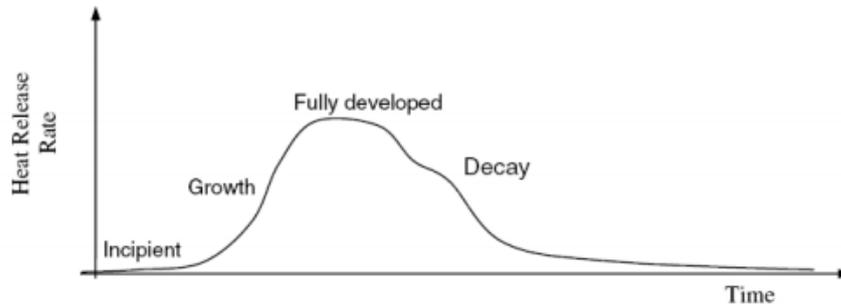
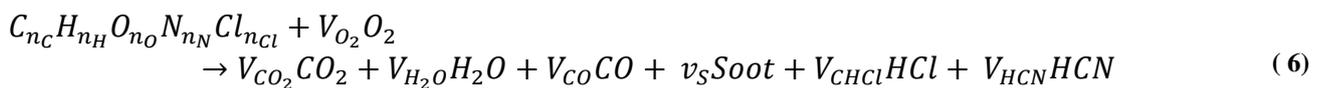


Figura 3-36 Evolución del HRR con el tiempo [18]

La combustión de un combustible hidrocarburo se describe mediante la siguiente reacción:



C:	<input type="text" value="7"/>
H:	<input type="text" value="16"/>
O:	<input type="text" value="0"/>
N:	<input type="text" value="0"/>
Cl:	<input type="text" value="0"/>

Figura 3-37 Elementos de combustión en el heptano

Como se ve en la reacción ( 6), los productos están en función de la fracción de hollín y el CO que es introducido. Se fija por lo tanto, el calor de combustión en 44600 kJ/kg, el Soot Yield (fracción) en 0.01 y el CO Yield (fracción de hollín) en 0.0049, como parámetros de la reacción.

Los parámetros del combustible son más fáciles de fijar ya que solo dependen de la naturaleza del combustible y son independientes de los procesos de combustión. Los valores de HRR se calculan en función de las propiedades de inflamabilidad del combustible y del tamaño del vertido. En el caso de la S1 el heptano tiene unas propiedades:

Fuels	Heat of Combustion MJ/kg	Ideal Mass Loss Rate kg/s-m <sup>2</sup>	Density kg/m <sup>3</sup>
Acetone	25.8	0.041	791
Benzene	40.1	0.085	874
Ethanol	26.8	0.015	794
Fuel oil, heavy	39.7	0.035	940-1000
Gasoline	43.7	0.055	740
Heptane	44.6	0.101	675
Hexane	44.7	0.074	650
JP-4	43.5	0.051	760
JP-5	43.0	0.054	810
Kerosene	43.2	0.039	820
Methanol	20.0	0.017	796

Figura 3-38 Propiedades de inflamabilidad de combustibles líquidos [10]

Para la tasa de liberación de calor se modela como un fuego  $t^2$ , donde  $\alpha$  (kW/s<sup>2</sup>) es el factor de crecimiento del fuego y  $t$  es el tiempo en alcanzar la tasa de liberación de calor  $\dot{Q}$ :

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (7)$$

$$t = \sqrt{\frac{\dot{Q}}{\alpha}} \quad (8)$$

En este caso  $\alpha = 0.1878$ , el tiempo que tarda en alcanzar la tasa máxima de liberación es 73.43 segundos como se representa en Figura 3-39. Y hay que destacar que el HRR máximo es 520 kW. Estos datos junto al momento en el que comienza la etapa de decadencia y en el que el fuego está completamente extinguido se introducen de forma manual en CFAST.

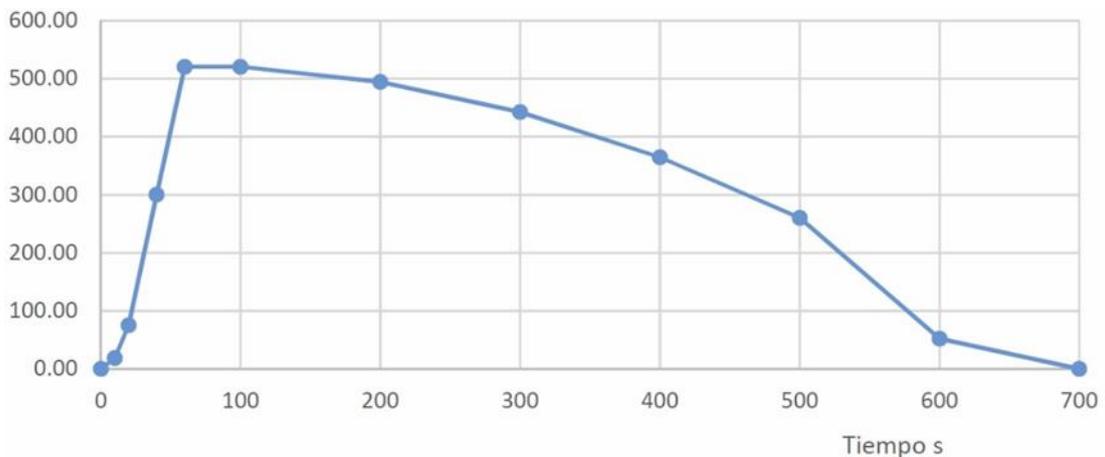


Figura 3-39 Representación de HRR frente al tiempo en una balsa de heptano 500kW

Time (s)	HRR (kW)	Height (m)	Area (m <sup>2</sup> )	CO Yield	Soot Yield	TS Yield
0	0.0	0.00	0.250	0.0049	0.010	0
10	19.0	0.00	0.250	0.0049	0.010	0
20	75.0	0.00	0.250	0.0049	0.010	0
40	300.0	0.50	0.250	0.0049	0.010	0
60	520.0	0.70	0.250	0.0049	0.010	0
90	500.0	1.00	0.250	0.0049	0.010	0
100	495.0	0.90	0.250	0.0049	0.010	0
200	470.0	0.80	0.250	0.0049	0.010	0
300	442.0	0.70	0.250	0.0049	0.010	0
400	364.0	0.60	0.250	0.0049	0.010	0
500	210.0	0.40	0.250	0.0049	0.010	0

Figura 3-40 Evolución del fuego frente al tiempo

El tiempo de duración del fuego se estiman dividiendo la masa (kg) de combustible entre la tasa de pérdida de masa (kg/s), en este caso, 668.32 segundos de combustión.

**Simulación S2:**

Esta segunda simulación se realiza en las mismas condiciones que la anterior simulación, pero se incorpora un rociador de agua.

Num	Compartment	Type	X Position	Y Position	Z Position	Activation	RTI	Spray Density
1	maquinas	Sprinkler	1.35	1.2	2	250	100	5E-05
2	maquinas	Sprinkler	1.35	3.664	2	250	100	5E-05
3	maquinas	Sprinkler	4.05	1.2	2	250	100	5E-05
4	maquinas	Sprinkler	4.05	3.664	2	250	100	5E-05
5	Tanques	Sprinkler	0.68	1.2	2	250	100	5E-05
6	Tanques	Sprinkler	0.68	3.664	2	250	100	5E-05

Alarm 1 (of 6)

Type:       Compartment:       Activation Temperature:

Position

Width (X):

Depth (Y):

Height (Z):

RTI:   
 Spray Density:

Figura 3-41 Ventana de detección y rociadores de CFAST

Los rociadores comienzan a actuar al detectar una temperatura de 250°C en cámara de máquinas y de 170°C en local de tanques. El tipo de rociador elegido tiene unas boquillas de agua pulverizada con un caudal entorno a los 17 l/min, la cuarta parte de un rociador convencional.

### 3.2.1.2 Medidas preventivas y de extinción

Debido al tamaño reducido de la cámara de máquinas y al carácter educativo que la misma tiene, hace que los sistemas contraincendios y las medidas de detección no sean iguales que los de cualquier buque de la Armada española. Por ello un incendio real en la cámara de máquinas no puede ser atacado con todo los medios de los que se dispone, ya que muchos están dentro de la propia cámara. Los medios que podrían utilizarse en caso de incendio real son [8]:

- Extintor de polvo seco: Dentro de la cámara se encuentran dos extintores, y en el servomotor. Como medida inicial o si el incendio es de pequeñas proporciones pueden ser utilizados.
- Sistema de extinción fijo de CO<sub>2</sub>: El sistema está compuesto por un sistema de alarmas cuyo panel está en el C.I.C, conectado a dos detectores de humos y otro de temperatura. Estos sistemas harían saltar las alarmas y mediante una cámara de video se comprobaría que no hay personal dentro del compartimento. Una vez se encuentre cerrado con las puertas estancas, apagado los motores y cerrada la ventilación se activaría manualmente el CO<sub>2</sub>, que inundará la sala y el compartimento de tanques, sofocando el incendio.

Dentro de la cámara se encuentra también la bomba contra incendios, pero se descarta su utilización en caso de incendio, por el tiempo necesario para ponerla en funcionamiento, esto haría que el incendio ya estuviera totalmente desarrollado poniendo en peligro aún más al personal. Es fundamental que la dotación este familiarizada con la utilización de todos los equipos para reducir riegos y tiempos. Además, es recomendable que a cada hora se realice una ronda de temperaturas y visual, para comprobar que no se han producido anomalías.

### 3.2.2 Simulación en camarotes-acomodación

La simulación en camarotes-acomodación ha sido realizada con combustible sólido. En este caso, poliuretano del relleno de los colchones, localizado en la litera del primer camarote a babor de la línea de crujía. Los datos introducidos han sido extraídos de ensayos reales realizados por DFL (*Danish Fire Laboratories*) siguiendo los parámetros descritos por [27] y por los estudios realizados en el *European program on Fire Safety Upholstered Furniture (CBUF)* descritos en [28]. Se ha elegido la causa del incendio en base a [29] que refleja que los incendios ocurridos durante en habitación durante el periodo de análisis han sido de un 100% por colillas mal apagadas o cortocircuitos por fallo eléctrico.

Las simulaciones que se van a efectuar son:

- Simulación S3: Simulación con combustible sólido sin extinción
- Simulación S4: Simulación con combustible sólido con extinción

#### 3.2.2.1 Fuego combustible sólido

Estas simulaciones tratan incendios con combustible sólido que ocurren en las zonas de habitación de buques, como puede ser, un incendio provocado en la cocina, un cortocircuito en el alumbrado, y el más común un incendio provocado por un cigarrillo mal apagado. En este caso se simula el último, incendio en colchón por una fuente de ignición. El tiempo de simulación es de 800 segundos para poder comprobar como el humo se extiende por el resto de compartimento, la pérdida de intensidad depende de los materiales de la fuente de ignición.

Tanto las temperaturas iniciales internas como externas se consideran las mismas que en las anteriores simulaciones (Figura 3-35) al igual que la presión, que sigue siendo de una atmósfera y la elevación con respecto al nivel del mar que al ser camarotes localizados dentro del casco es cero.

La geometría del volumen de control en el primer camarote de babor:

- Dimensiones: 2 x 2.027 x 2.04 (m), esto hace un volumen de 8.27 m<sup>3</sup>.
- Aberturas en mamparos: Es simulado que la puerta del camarote permanece abierta durante todo el incendio, esto hace que se produzca una salida del humo del camarote como que entre oxígeno del pasillo que se encuentra conectado con la cocina. La abertura se encuentra centrada en la pared frontera entre camarote y pasillo con una altura desde el suelo de 1.606 m y de ancho 0.7 m. El flujo a través de estas aberturas verticales se realiza como puede verse en la Figura 3-42.

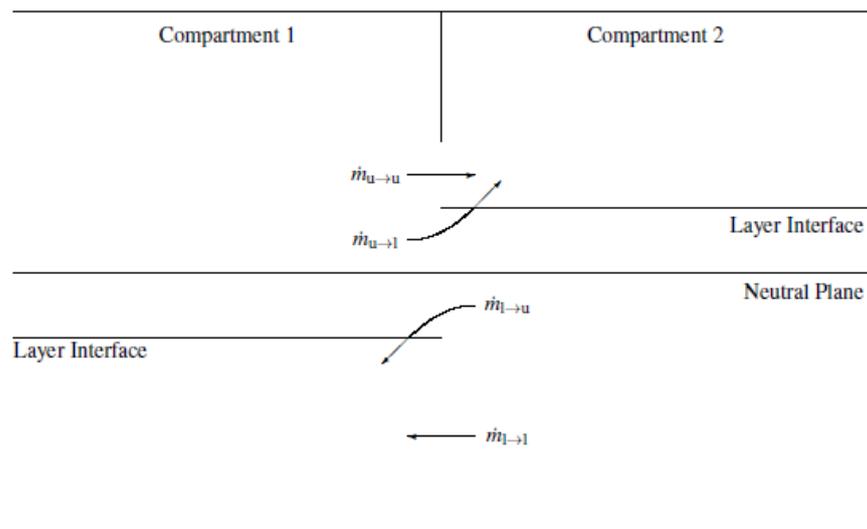


Figura 3-42 Flujos en aberturas verticales [20]

A diferencia que la cámara de maquinas la zona de camarotes-acomodación no dispone de ningún sistema de ventilación forzada, pero sí que dispone de ventilación natural a través del hueco de las escaleras, pero tiene que remarcarse que CFAST no la está teniendo en cuenta. Las aproximaciones que realiza el programa para calcular estos flujos de ventilación son diferentes a la de flujos horizontales, se basa en la diferencia de presiones y densidades entre los compartimentos. Además su posición en la simulación no corresponde con la realidad, pero por limitaciones del programa en las aberturas *Celing/Floors* es simulada en el punto medio del techo. El compartimento superior al que se accede a través de esta ventilación es el puente de gobierno. Este local cuenta con aberturas al exterior, las cuales introducen aire al buque.

El camarote está conectado al pasillo de 7.39 m<sup>3</sup>, que a su vez tiene aberturas verticales correspondientes a puertas cerradas en el resto de compartimentos, estas aberturas simulan a las rendijas que quedan en las puertas no estancas por las que pasa el humo intoxicando el espacio y aumentando su temperatura. Todas las aberturas tienen unas dimensiones de 0.02 m alto y de 0.7 m de ancho. Los materiales asignados para estos compartimentos son el contrachapado (*Plywood (1/2 in)*) para paredes y techo, y goma (*Rubber, Soft*) para el suelo.

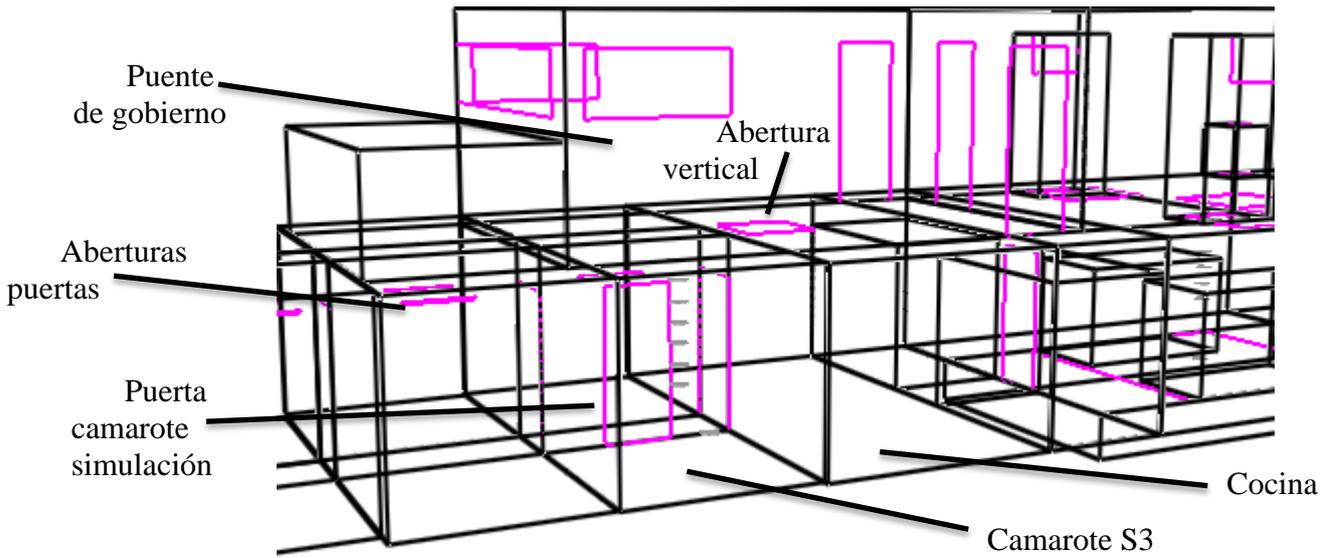


Figura 3-43 Geometría del volumen de control del camarote de S3

Material	Conductividad kW/m (°C)	Calor específico kJ/kg(°C)	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Espesor m	Emitividad
Contrachapado	0.00012	1.215	545	0.013	0.9
Goma	0.00013	2.01	1100	0.04	0.9

Figura 3-44 Propiedades Termo físicas de los materiales en camarotes-acomodación

La situación del combustible en el camarote es localizado siguiendo las indicaciones de la IMO Resolution 265(84), es decir, en el colchón de debajo de la litera a la altura de la almohada. Este tipo de simulación intenta reflejar lo que ocurriría si alguien se queda dormido con una fuente de ignición y prende fuego al poliuretano. La posición del combustible es 1 m (X) x 1 m (Y) x 0.3 m (z). Hay que remarcar la altura inicial en la que es colocado el combustible ya que este imita la posición de un colchón. Al igual que en la SI y S2 los valores son calculados a partir de las propiedades de inflamabilidad y de su tamaño.

CODE	DESCRIPTION	$t_{ig}$	$t_{100W}$	$t_{10}$	$t_{100}$	$t_{end}$	$\dot{Q}_{max}$	$t_p$	$\alpha_g$	$\alpha_d$
Fg. C1. Bunk Bed	BFRL* in February 1996.	195	211	240	240	445	4665.6	25	1.600000	0.111020
Fg. C2. Koisk	Western Fire Center in the summer of 1965.	817	1129	1230	1230	3300	1752.2	312	0.010273	0.000409
Fg. C3. Loveseat		48	222	350	371	666	3012.4	174	0.033039	0.012264
Fg. C4. Mattress (Center)	BFRL in February 1996.	9	173	145	219	959	687.7	164	0.037180	0.001256
Fg. C5. Mattress (Corner)	BFRL in February 1996.	85	294	255	321	484	1009.6	209	0.022893	0.037999

Figura 3-45 HRR y  $t^2$ -fire [30]

En este caso se ha considerado un incendio de poliuretano de 1.8 m<sup>2</sup>, con una tasa de liberación de calor de 4665 kW y un calor específico de combustión de 17100 kJ/kg. Para la representación del comportamiento de HRR se han utilizado las ecuaciones (7) y (8). Y basado entre otros en los datos de Figura 3-45.

Time (s)	HRR (kW)	Height (m)	Area (m <sup>2</sup> )	CO Yield	Soot Yield	TS Yield
0	25.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
400	100.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
580	300.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
615	550.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
760	500.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
910	550.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
1100	300.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
1200	200.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
1500	100.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0
1700	75.0	0.00	1.800	0.0494	0.131	0

Figura 3-46 Evolución teórica del incendio

C:

H:

O:

N:

Cl:

Figura 3-47 Elementos de la combustión del poliuretano.

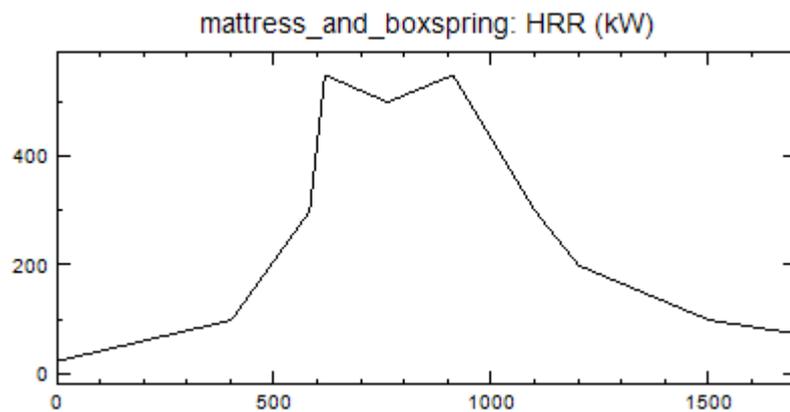


Figura 3-48 Representación de HRR frente al tiempo en una cama de poliuretano

Los dispositivos de medición, al igual que en las anteriores simulaciones se han colocado en el punto medio del volumen de control, con una separación de 0,2 m desde los 0,8 m de altura hasta los 2 m con respecto a la cubierta. También se ha introducido un termopar cilíndrico en el interior del combustible a 5 mm de la superficie para medir la temperatura del mismo. En este caso el material de los termopares es de contrachapado. Para los gases y sus productos se utiliza Figura 3-47.

A diferencia de la S3, la simulación S4 incluye un rociador con boquilla de agua nebulizada que se activa a los 120°C, esto hace que los resultados se vean modificados.

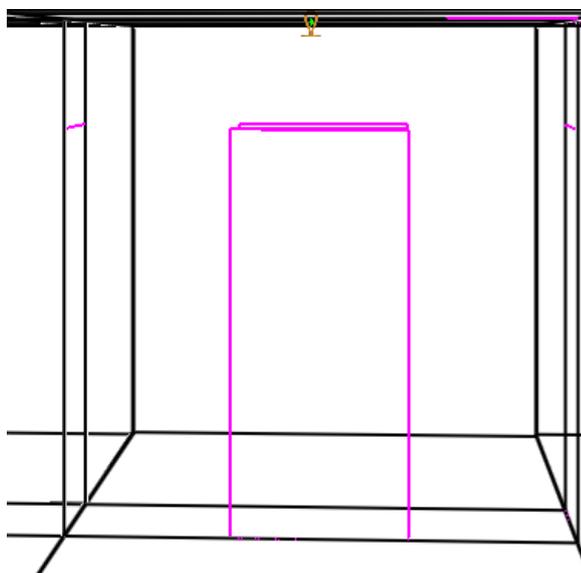


Figura 3-49 Rociador de agua en camarote 1

### 3.2.2.2 Medidas preventivas y de extinción

Al igual que la cámara de máquinas, el tamaño de la habitabilidad hace que cualquier incendio en esta zona sea diferente que en otro buque. Los medios de los que dispone la lancha para poder apagar un incendio son [8]:

- Extintor de polvo seco: localizado en la cocina/comedor.
- Extintor de CO<sub>2</sub>: localizado en la cocina/comedor.
- Agua mediante mangueras: aunque no recomendable, es posible apagar un incendio en habitabilidad mediante agua, ya que se puede conectar las mangueras a las bocas de cubierta y a la de la cámara de máquinas. Para su uso es necesario arrancar la bomba.

En caso de incendio, se cuenta con un detector de humos en el pasillo de habitabilidad y otro detector de humos en la cocina/comedor, ambos harían saltar la alarma de la central contraincendios alojada en el C.I.C. Al igual que un incendio en otro compartimento, son fundamentales las rondas interiores para verificar el estado tanto de enchufes como de temperaturas. El adiestramiento del personal es fundamental para el éxito de las acciones a tomar.

## 4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

A continuación se exponen los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas por el software de modelo de zona CFAST, descrito en el apartado 2.5.1 y los datos extraídos representados mediante gráficas elaboradas en Microsoft Excel.

### 4.1 Resultados de simulación de incendio (500 kW) en cámara de máquinas sin extinción

Las siguientes imágenes muestran tres instantes de tiempo de la simulación S1. Estos instantes corresponden a los momentos en los que varía significativamente la temperatura del incendio y por lo tanto la fase en la que se encuentra. (Ver Figura 2-2 para las fases de un incendio)

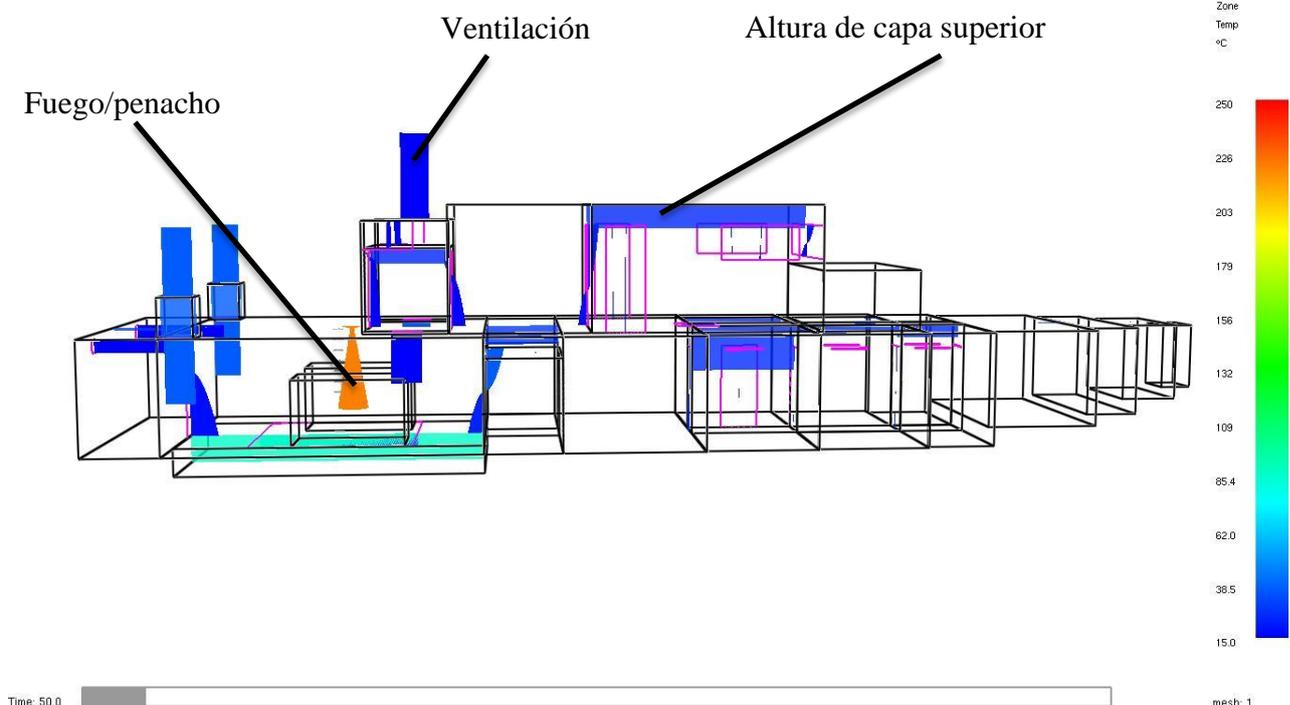
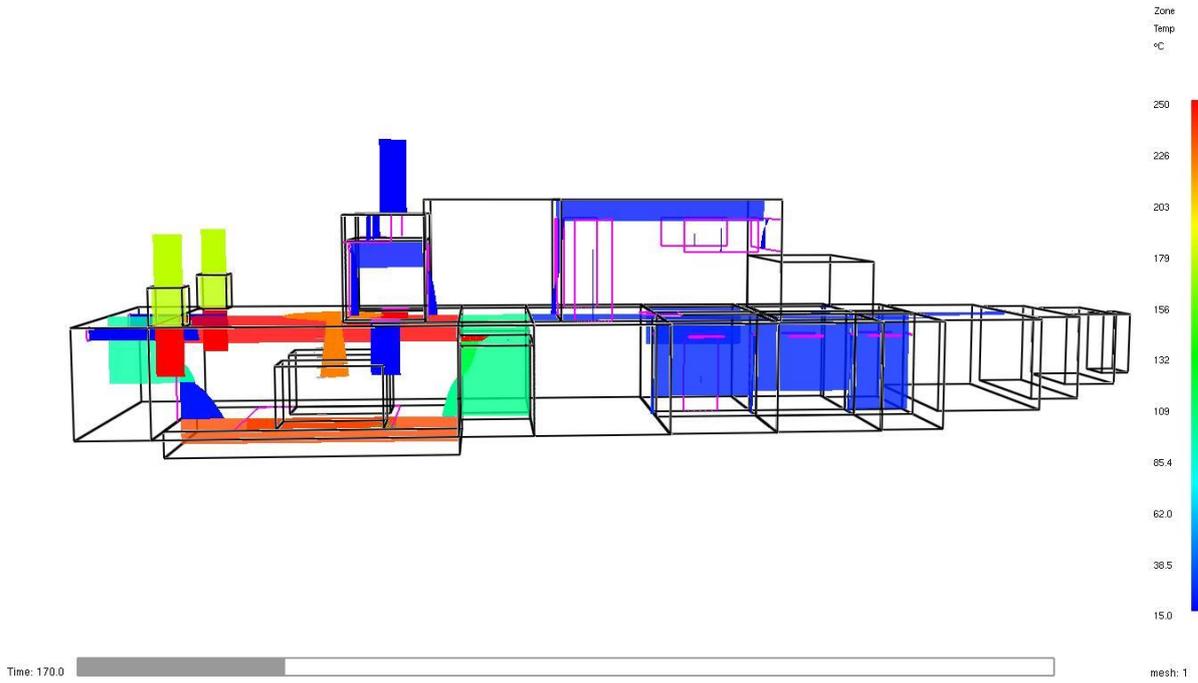
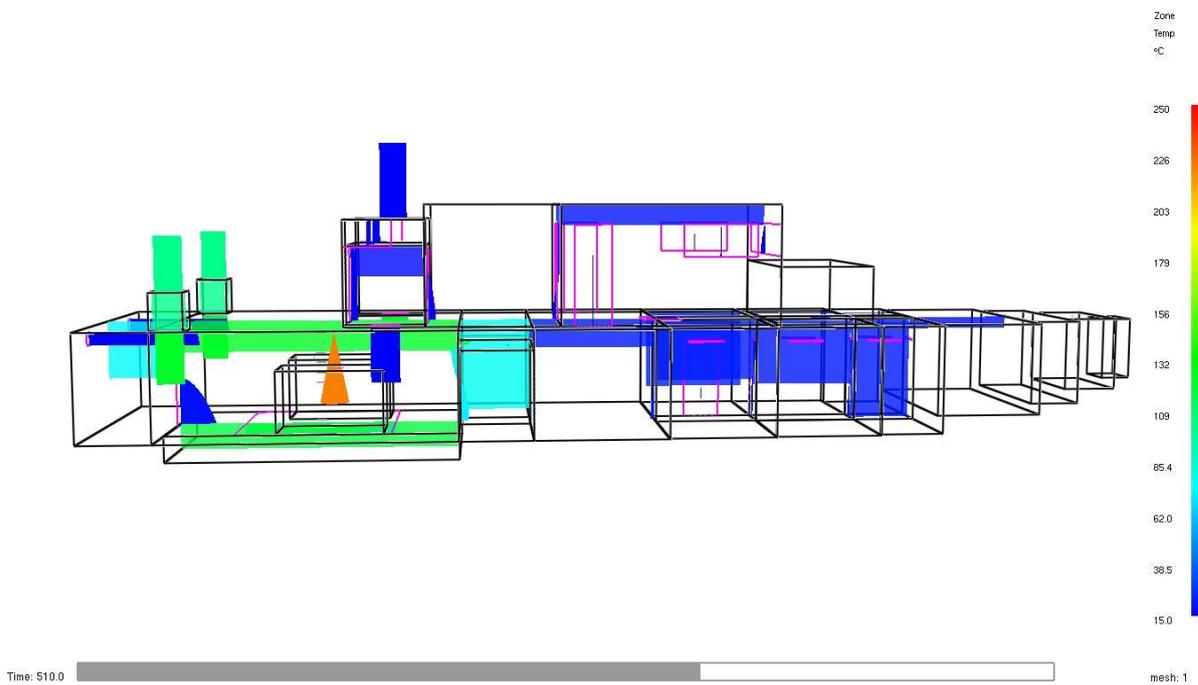


Figura 4-1 Incendio de 500kW de heptano en Máquinas, segundo 50

Todas las figuras de simulación de incendios están compuestas por los mismos elementos.



**Figura 4-2 Incendio de 500kW de heptano en Máquinas, segundo 170**



**Figura 4-3 Incendio de 500kW de heptano en Máquinas, segundo 510**

### 4.1.1 Temperaturas

Como se aprecia en Figura 4-4, es a partir del segundo 50 cuando comienza la fase de crecimiento. Esto se debe a un aumento exponencial de la HRR y por lo tanto la pendiente es creciente, desde ese momento hasta el segundo 100 se producen las condiciones ideales para el flashover, anteriormente explicado. La máxima temperatura alcanzada es en el segundo 160 de 250°C. Es interesante ver como la temperatura se mantiene constante y comienza levemente a descender, siendo en el segundo 350 cuando decae hasta apagarse en los 760 segundos. Las diferencia de temperaturas entre la capa superior e inferior se debe principalmente a que la capa superior permanece a una altura de 1.5 metros durante gran parte del incendio. En los locales en los que la falta de oxígeno se hace más patente el descenso de la capa caliente.

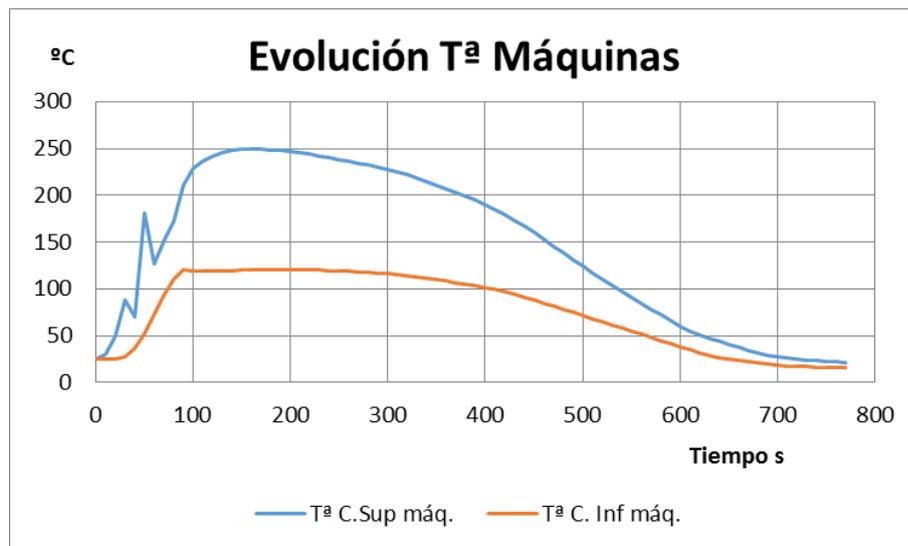


Figura 4-4 Evolución de la Tª en Cámara de Máquinas sin extinción

En el resto de compartimentos comunicados con la cámara de máquinas, la evolución de la temperatura es parecida, pero sin alcanzar los mismos valores. Esto se debe a la distancia de la fuente de ignición, el volumen de los compartimentos y el tiempo de combustión.

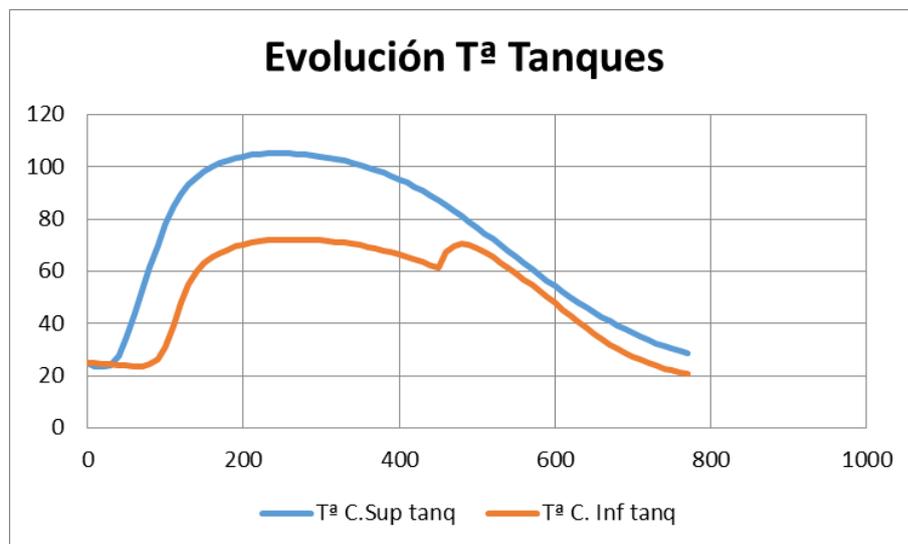


Figura 4-5 Evolución de la Tª en Tanques sin extinción

En el compartimento de tanques con un volumen de aire de  $4.43 \text{ m}^3$  se produce un efecto diferente que en el resto de compartimentos adyacentes Figura 4-6. Comparándolo con el servo se ve que la diferencia de temperatura entre capas es menor.

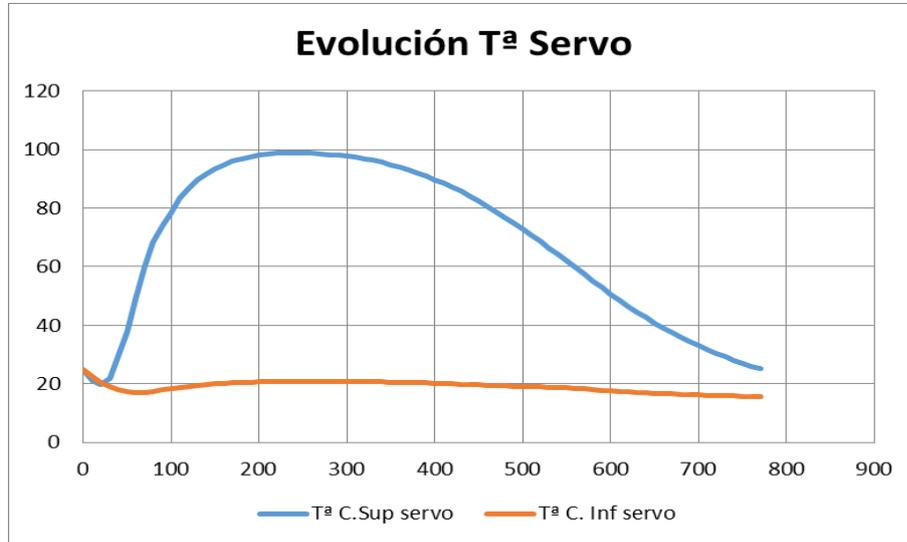


Figura 4-6 Evolución de la Tª en Servo sin extinción

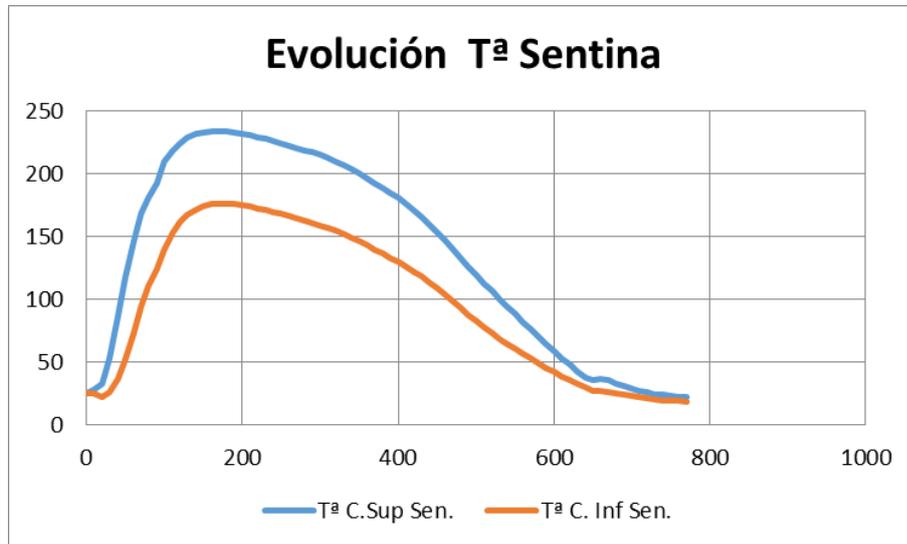


Figura 4-7 Evolución de la Tª en Sentina sin extinción

En la Figura 4-7 se vuelve a ver otro efecto causado por la geometría y por la comunicación vertical entre los compartimentos. La temperatura alcanzada es próxima a la de la cámara de máquinas por el tamaño de la abertura y la diferencia de temperaturas entre capas se debe a la poca altura de la sentina.

### 4.1.2 Humos y gases

Toda reacción de combustión genera productos como consecuencia de la oxidación con el oxígeno. En el caso de la reacción de combustión del heptano ( 6) en la cámara de máquinas las concentraciones de gases que se genera es: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, HCN y CO.

A diferencia del fuego en camarote1, que se muestra en apartados posteriores, la concentración de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> no disminuye radicalmente ya que el volumen de la cámara de máquinas es mayor que el camarote1. Pero llega a estar próximo a niveles en los es posible la sofocación del incendio

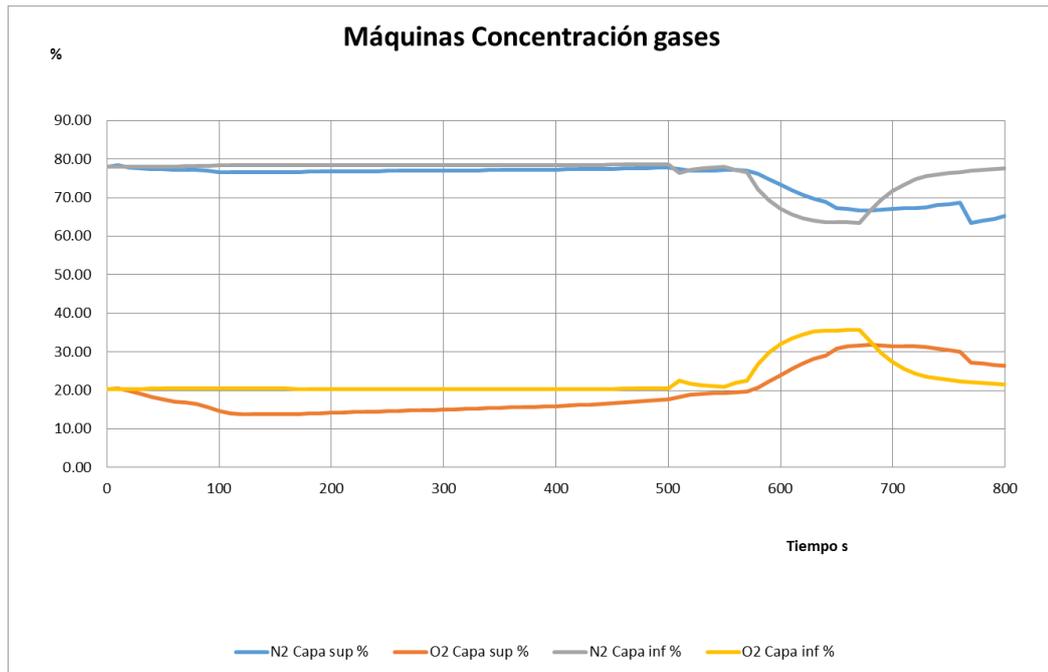


Figura 4-8 Concentración de gases en Máquinas sin extinción

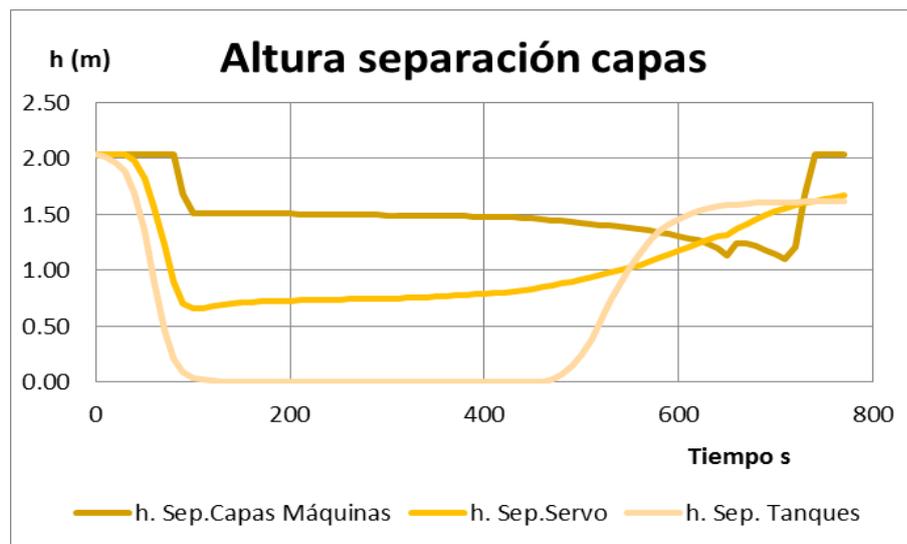


Figura 4-9 Altura de separación de capa en los diferentes compartimentos sin extinción

La disminución de la altura de separación de capas es función del volumen del compartimento y del oxígeno disponible. Disminuye radicalmente en el caso del local de tanques, debido al pequeño volumen de aire que hay en él.

## 4.2 Resultados de simulación de incendio (500kW) en cámara de máquinas con extinción

La simulación S2 cuyos parámetros han sido explicados en el capítulo anterior, se representa en las siguientes imágenes, que capturan cuatro de los instantes más importantes del desarrollo del incendio, sus cambios de fase:

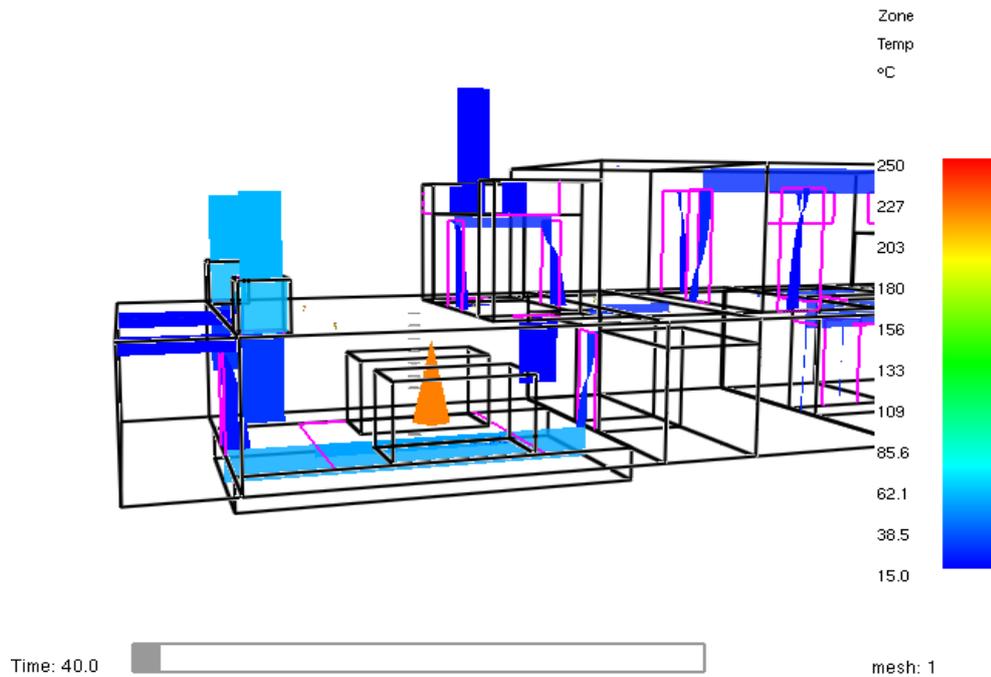


Figura 4-10 Incendio de 500 kW de heptano en Máquinas con extinción, segundo 40

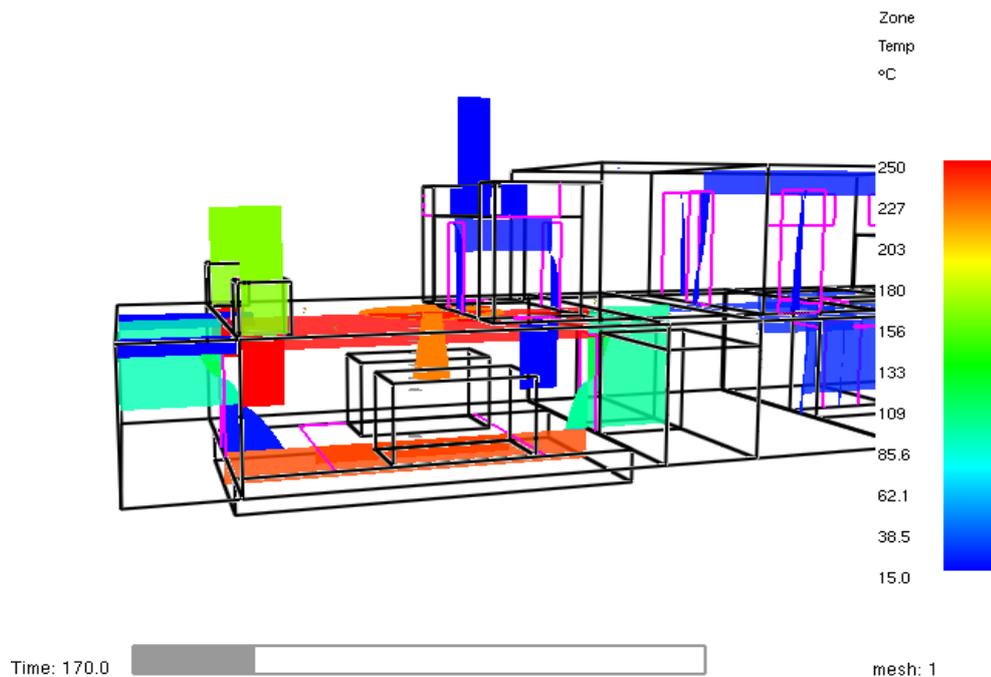
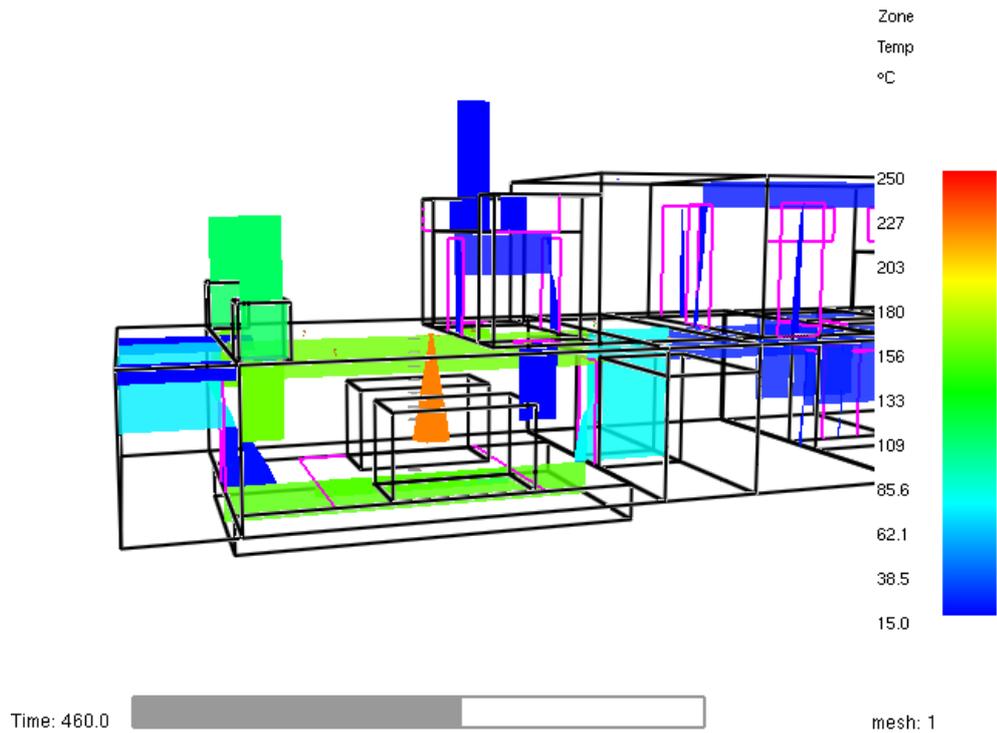
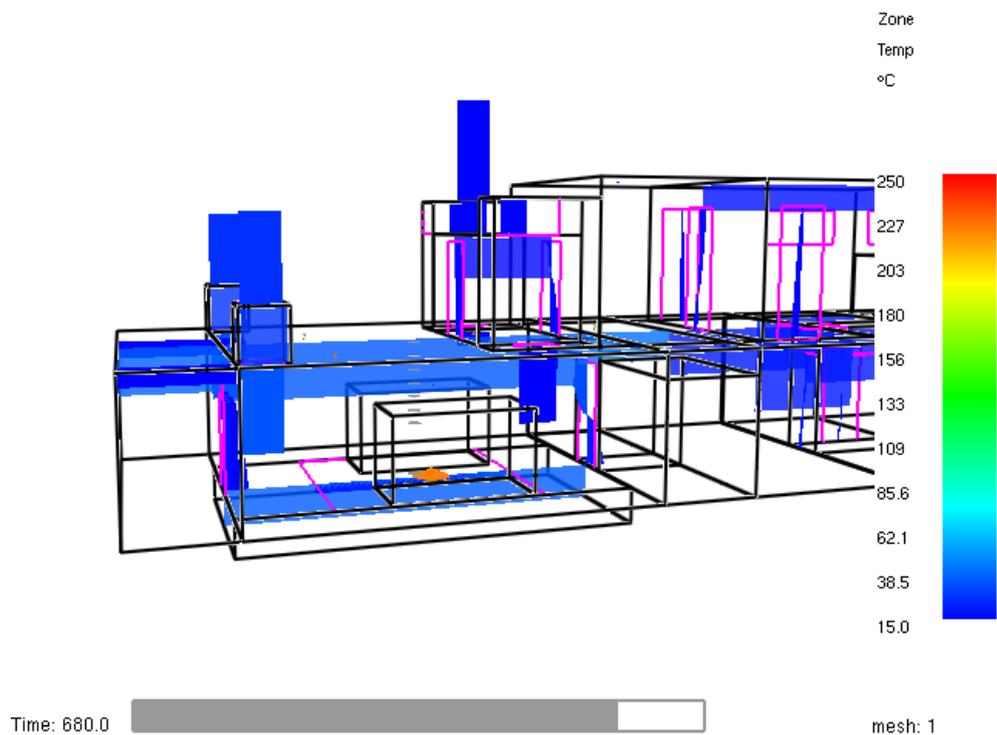


Figura 4-11 Incendio de 500 kW de heptano en Maquinas con extinción, segundo 170



**Figura 4-12 Incendio de 500 kW de heptano en Máquinas con extinción, segundo 460**

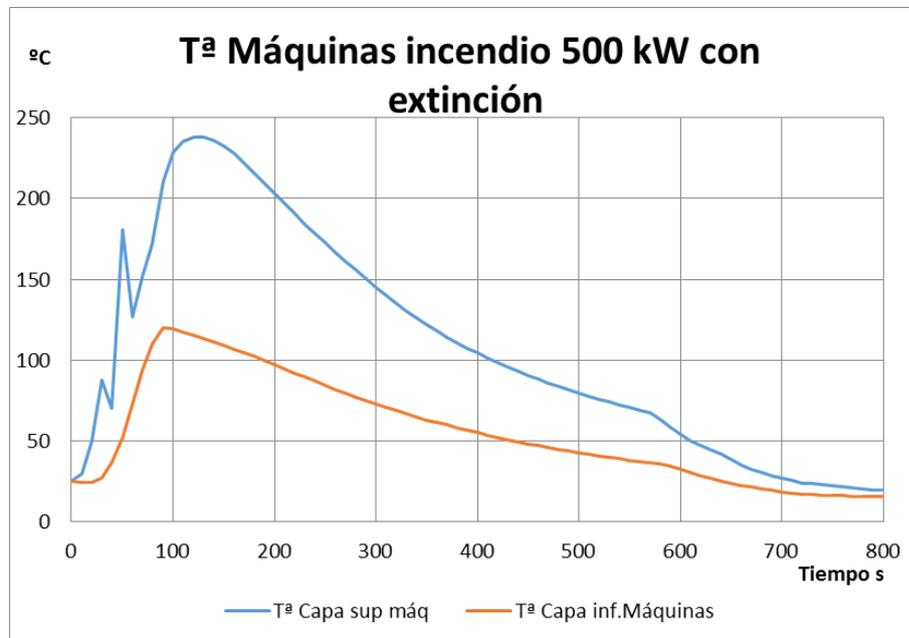


**Figura 4-13 Incendio de 500 kW de heptano en Máquinas con extinción, segundo 660**

Se puede comprobar como las temperaturas alcanzadas son similares a la S1 pero al activarse el rociador de agua a una temperatura de 250°C, todas las fases de desarrollo del incendio reducen sus tiempos.

### 4.2.1 Temperaturas

Como era de esperar la introducción de sistemas de extinción, en este caso, boquillas de agua en la cámara de máquinas ha generado una disminución de la temperatura. Se puede apreciar en la Figura 4-14 como la primera fase de crecimiento es igual que en la S1 porque se ha elegido el mismo momento de disparo que la temperatura máxima de 250°C (momento del pico máximo) y en tanques de 150°C. A partir del inicio de la extinción la fase de desarrollo se acorta y aumenta la pendiente negativa. Por ejemplo en el segundo 310 la temperatura sin rociador es de 225°C y con rociador es de 203°C, 22°C menos. Cabe señalar que se han elegido un caudal inferior al de los rociadores normales puesto que en cámaras de máquinas actualmente se utilizan boquillas de agua pulverizada con un caudal entorno a los 17 l/min, la cuarta parte de un rociador convencional. El software CFAST si es capaz de simular este efecto de bajo caudal de agua y pequeño tamaño de gota, 200 µm. Una extinción de este tipo se puede apreciar en la Figura 4-18, como se ve claramente la disminución radical de la temperatura en la sonda superior.



**Figura 4-14 Evolución de la Tª en Máquinas con extinción**

En el resto de compartimentos que comunican con la cámara de máquinas el efecto producido por el agua es similar, es decir, adelanta el decaimiento de la temperatura.

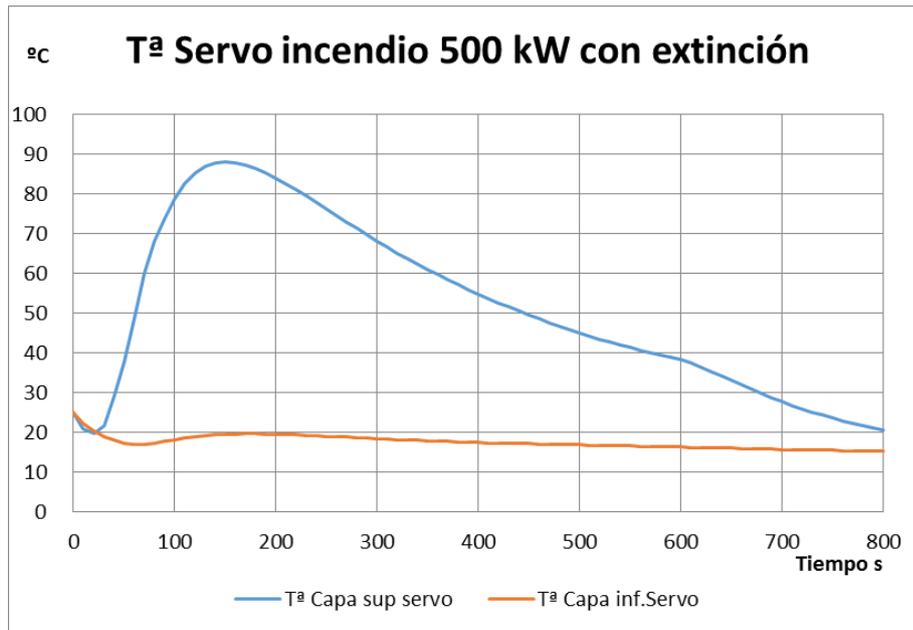


Figura 4-15 Evolución de la Tª en Servo con extinción

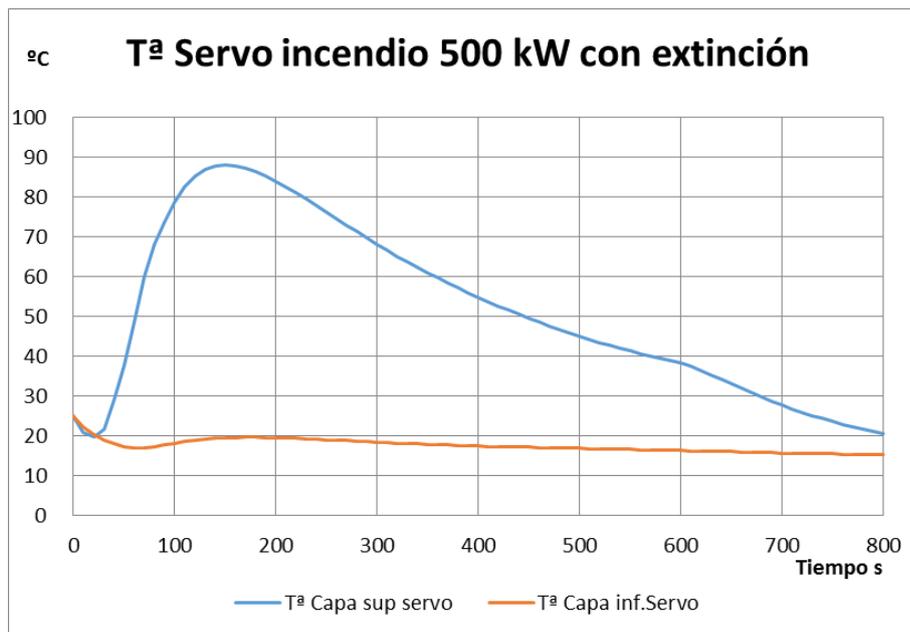


Figura 4-16 Evolución de la Tª de la Sentina con extinción

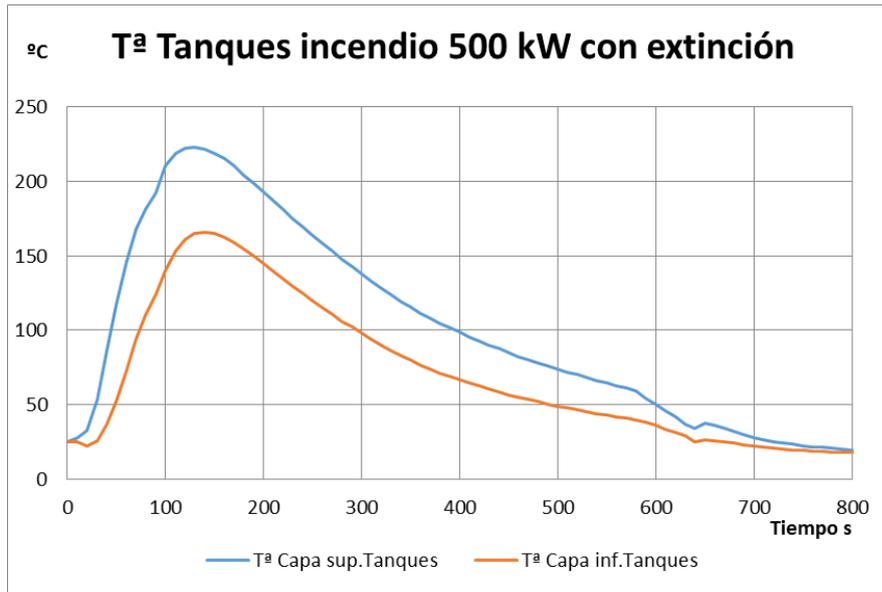


Figura 4-17 Evolución de la Tª en Tanques con extinción

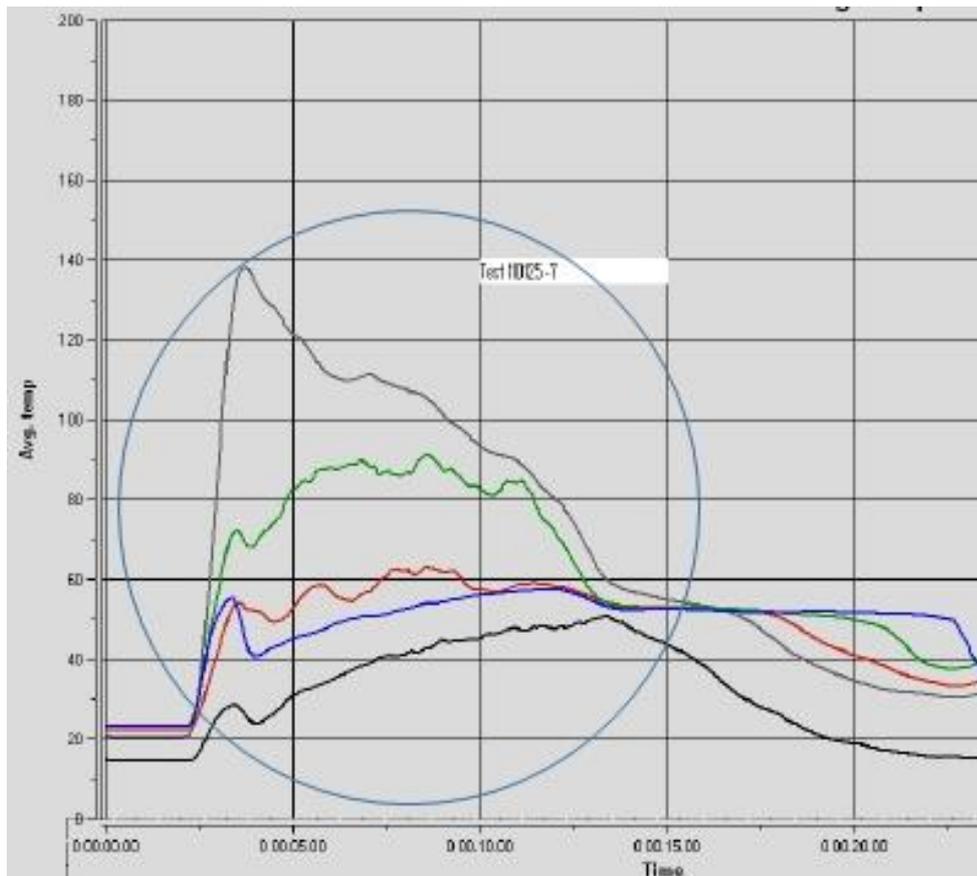


Figura 4-18 Ensayo conforme a IMO MSC 1165 bandeja de heptano de 7x3 m en cámara de máquinas de 19x19x12 realizado en laboratorios VID, DK.

### 4.2.2 Humos y gases

Se aprecia al igual que en el caso de incendio en máquinas sin extinción, que al disponer de un mayor volumen de aire que en el camarote1 la disminución de la concentración de gases no es radical aunque se observa que el oxígeno baja hasta el punto de sofocación del incendio en la capa superior.

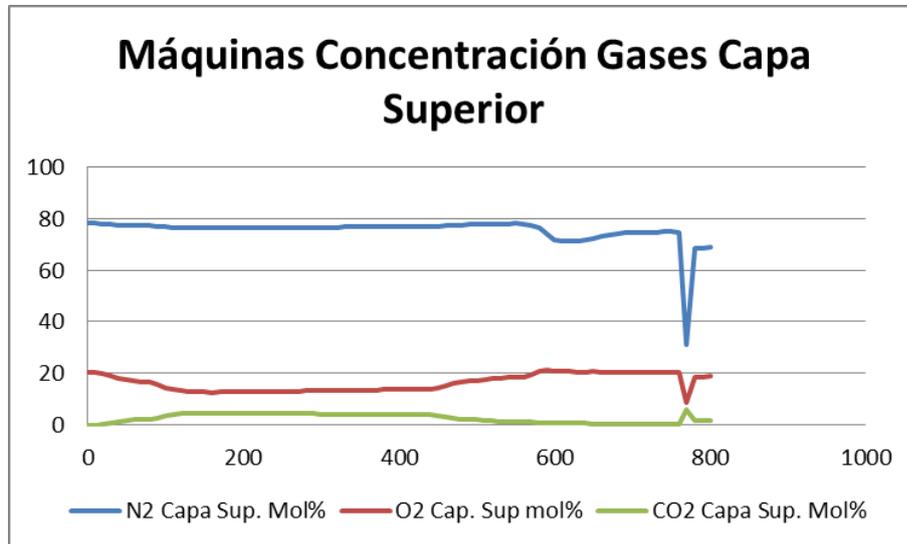


Figura 4-19 Concentración de gases capa superior en Máquinas con extinción

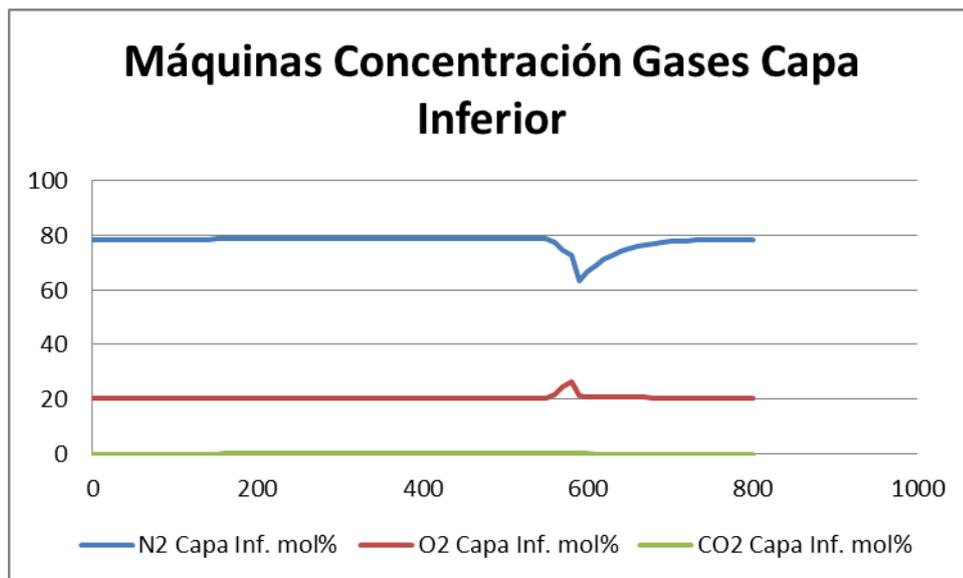


Figura 4-20 Concentración de gases capa inferior en Máquinas con extinción

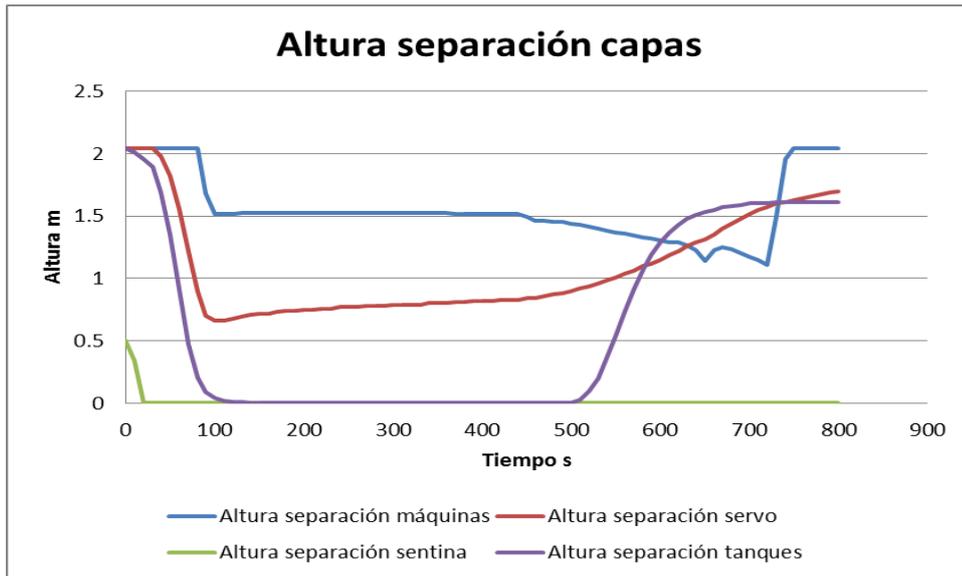


Figura 4-21 Altura de separación de capa en los compartimentos con extinción

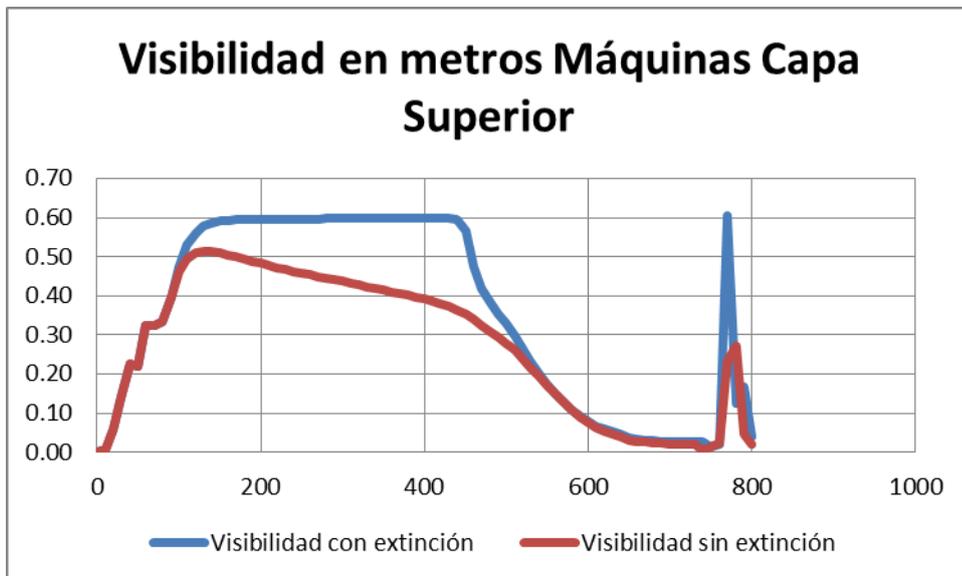


Figura 4-22 Visibilidad en metros en cámara de máquinas

La extinción consigue que la visibilidad permanezca un intervalo de tiempo mayor, el software CFAST no reproduce el efecto del lavado de especies que produce la extinción de agua. Por lo que en el segundo 420 se reduce a niveles de visibilidad sin extinción. Este factor es muy importante para los cálculos de evacuación del buque y extinción.

### 4.3 Resultados de simulación de incendios (250 kW) en cámara de máquinas sin extinción

A modo ilustrativo se añaden secuencias de una simulación efectuada de un incendio más pequeño, sin entrar en mayor detalle.

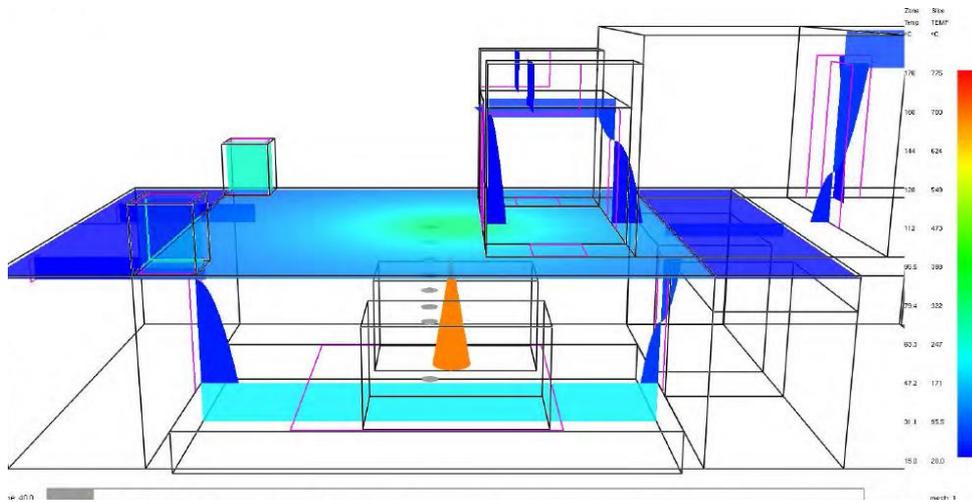


Figura 4-23 Incendio de 250 kW de heptano en Máquinas sin extinción, segundo 40

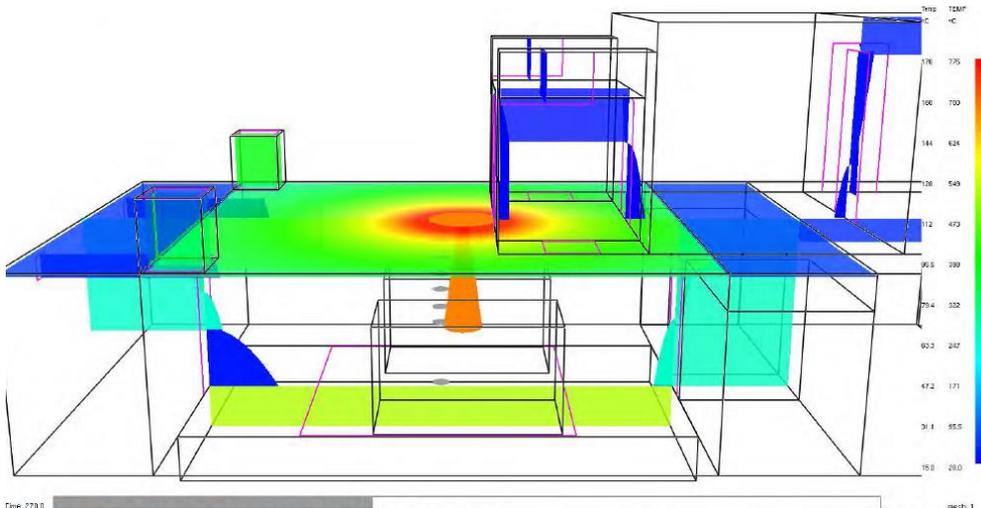


Figura 4-24 Incendio de 250 kW de heptano en Máquinas sin extinción, segundo 270

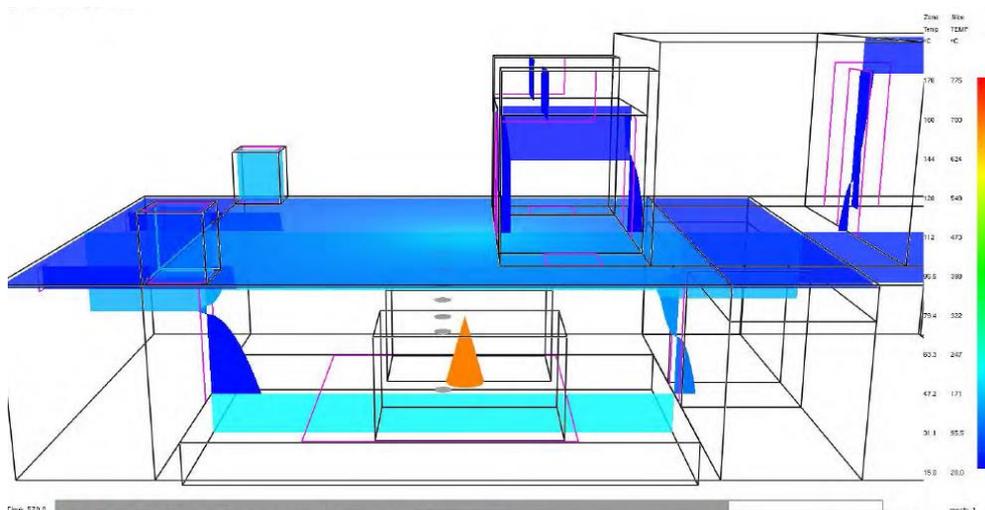


Figura 4-25 Incendio de 250 kW de heptano en Máquinas sin extinción, segundo 570

#### 4.4 Resultados de simulación de incendio en camarotes-acomodación sin extinción

Una vez efectuada la simulación S3 se exponen los resultados en el siguiente apartado, comparándolos con ensayos reales para su justificación. En las siguientes imágenes se muestra la evolución del incendio en los puntos más destacados del desarrollo del mismo.

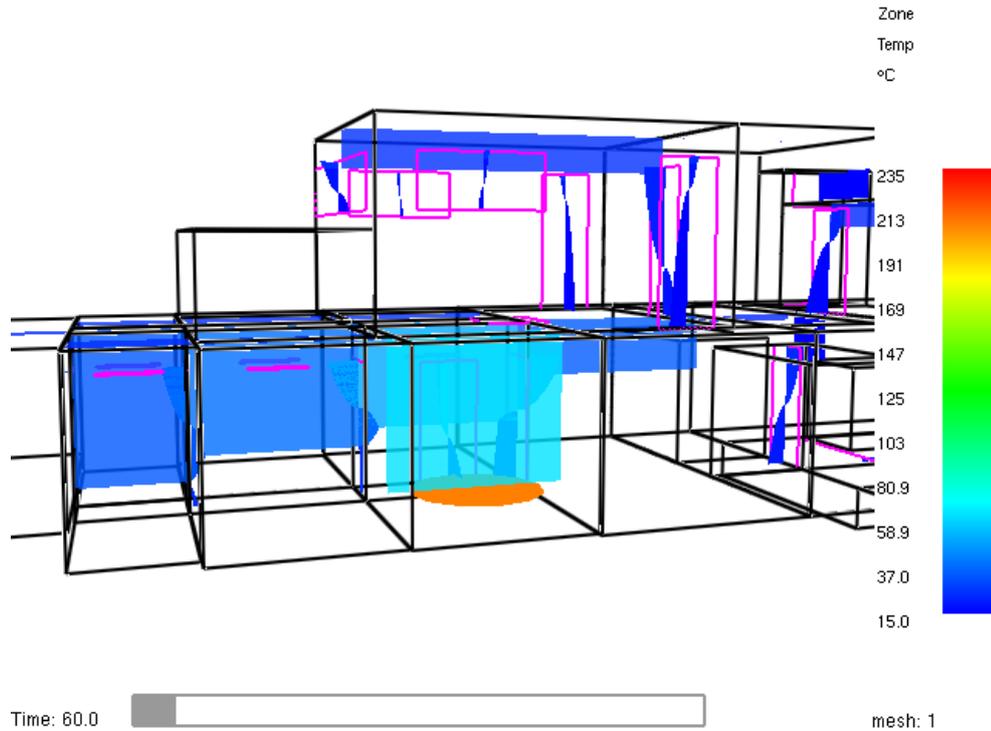


Figura 4-26 Incendio en Camarote1 sin extinción, segundo 60

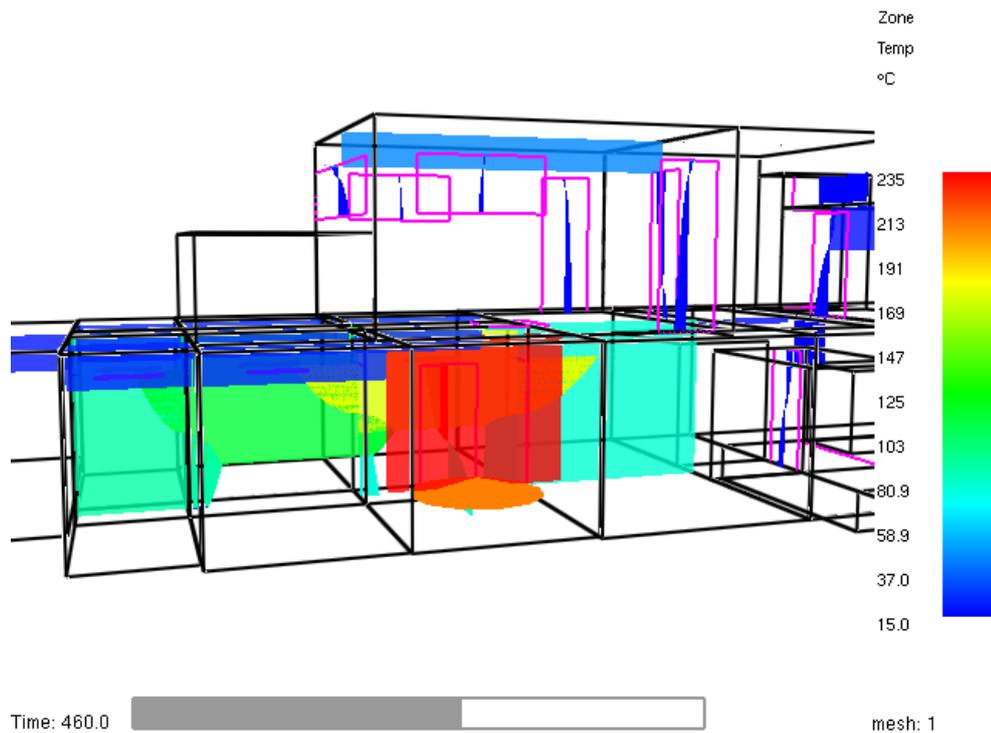
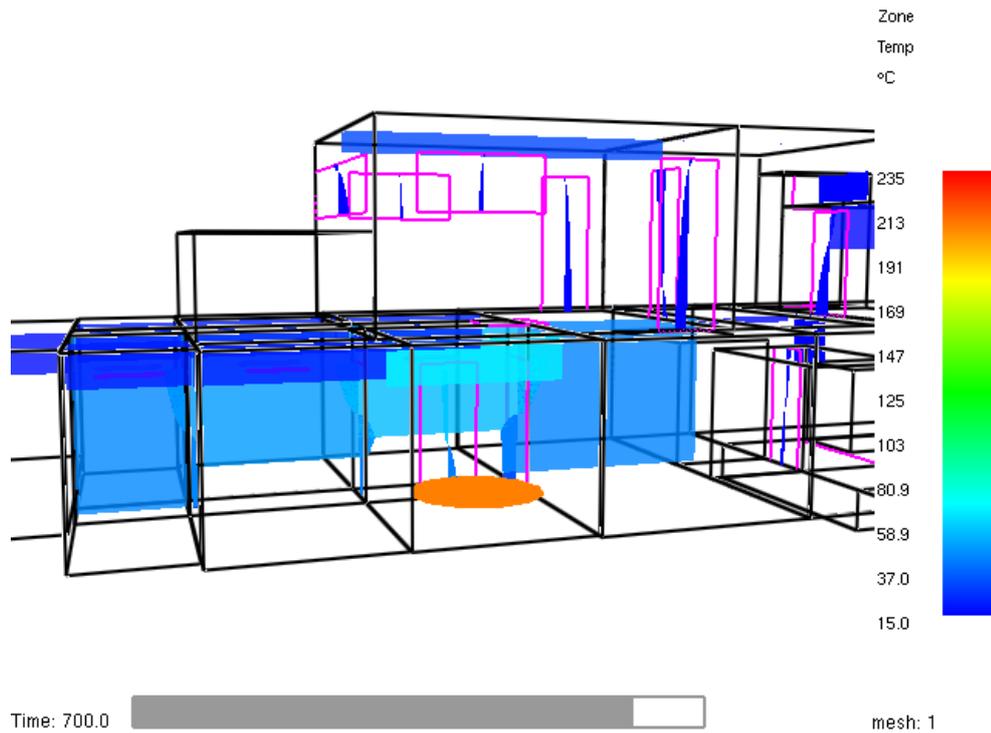
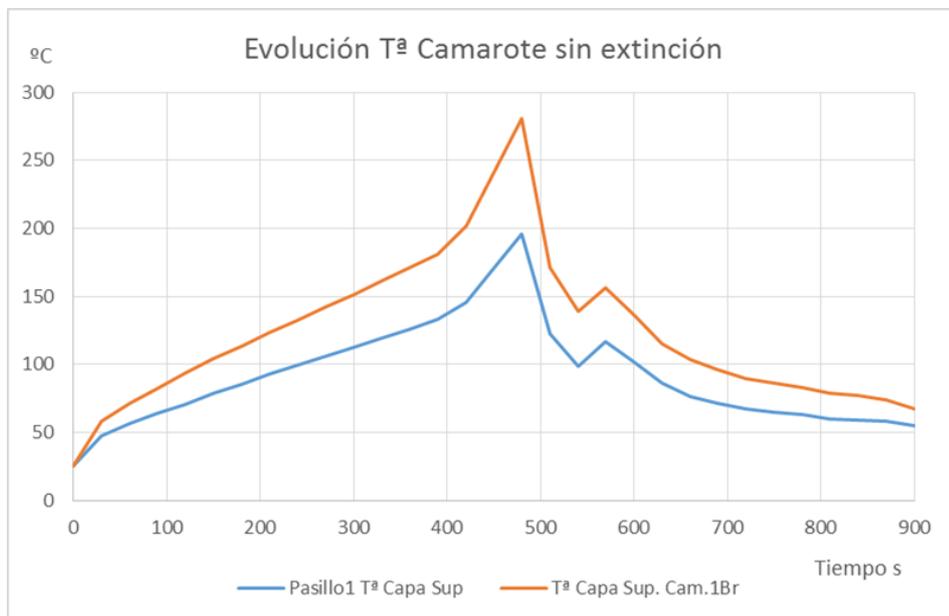


Figura 4-27 Incendio en Camarote1 sin extinción, segundo 460



**Figura 4-28 Incendio en Camarote1 sin extinción, segundo 700**

#### 4.4.1 Temperaturas



**Figura 4-29 Evolución de Tª en Camarote1 sin rociador**

Como puede apreciarse en el gráfico Figura 4-29 de la simulación S3 de CFAST, de evolución temperatura/tiempo en el camarote 1 a babor, la temperatura de la capa superior no llega a 270°C, por lo que se puede comparar con el gráfico Figura 4-30 correspondiente al ensayo número 100028-02 realizado en los laboratorios DFL según el estándar IMO MSC 265(84) para fuegos en camarotes y pasillos.

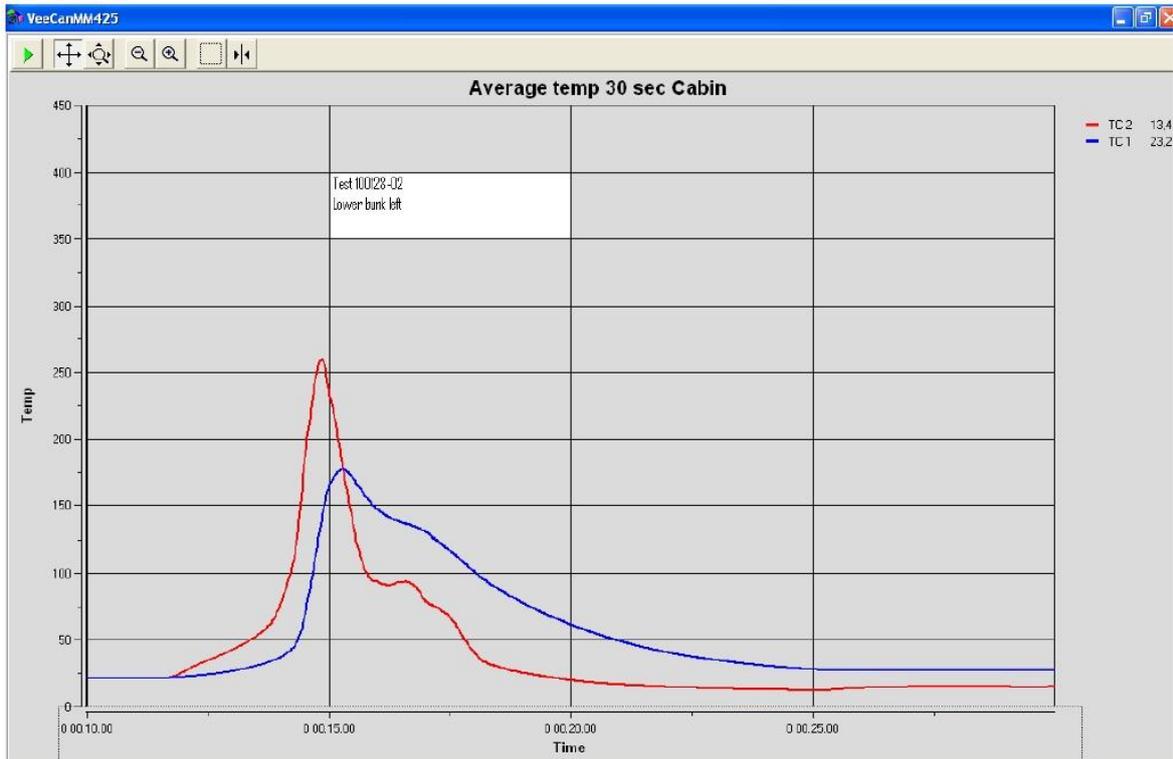


Figura 4-30 Ensayo número 100028-02

La figura 4-30 muestra que el pico de temperatura se produce en la simulación S3 a partir de los 400 segundos, mientras que en el ensayo real de la figura 4.31 se produce a partir de los 200 segundos, quizás porque el ensayo real se realiza en un camarote con un volumen cuatro veces superior y por tanto la mayor cantidad de oxígeno favorece la combustión. Como aspecto positivo de la simulación, la aproximación que realiza CFAST de la HRR con respecto al pico máximo del ensayo real se aproxima bastante a la realidad.

#### 4.4.2 Humos y gases

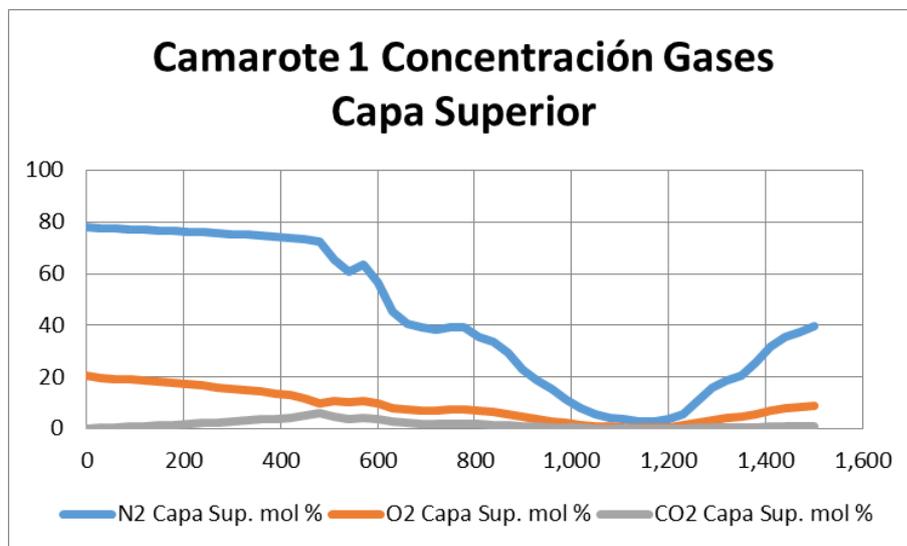


Figura 4-31 Concentración de gases capa superior en Camarote1 sin extinción

En el gráfico resultado de la simulación S3 de CFAST de evolución de concentración de gases en la capa superior Figura 4-31 puede verse como reduce radicalmente la concentración de nitrógeno desde un 78 % hasta menos del 10%. Por otra parte la concentración de oxígeno también se reduce desde el 21% de oxígeno habitual hasta prácticamente desaparecer, lo que ocasiona la sofocación del incendio, y evidentemente la falta de oxígeno provocaría daños en la tripulación.

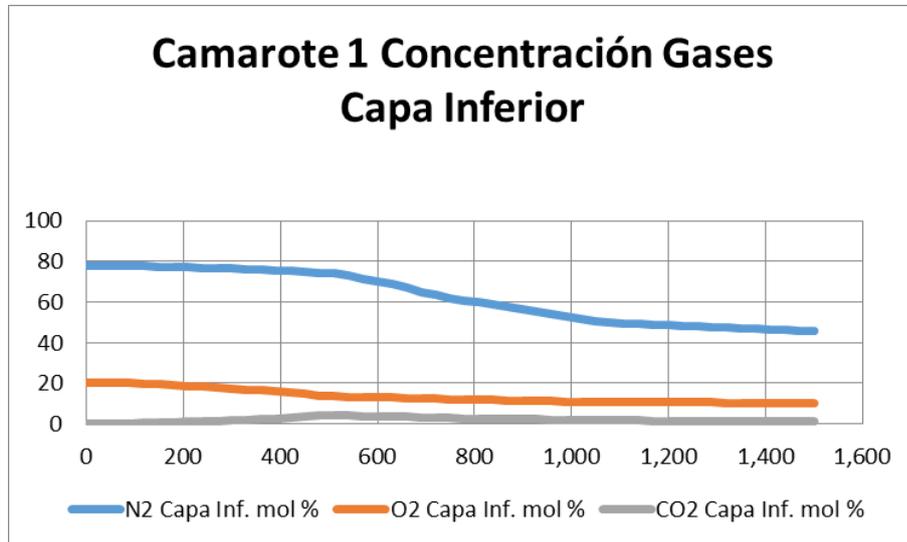


Figura 4-32 Concentración de gases capa inferior de camarote1 sin rociador

En el gráfico similar de la capa inferior Figura 4-32 se puede apreciar que tanto la disminución de nitrógeno como de oxígeno es menor descendiendo hasta un 10%, nivel en el cual ya no es posible la combustión, apagándose el incendio por sofocación.

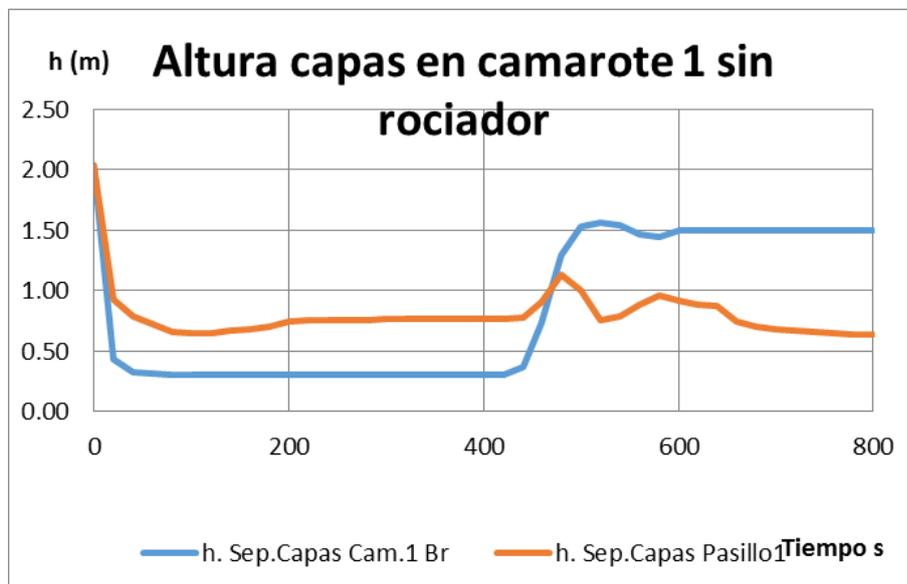


Figura 4-33 Altura separación capas en Camarote1 sin extinción

La altura de la separación entre capa caliente y capa fría en el camarote incendiado, como se ve en Figura 4-33 la altura de la capa fría desciende rápidamente en los primeros segundos hasta los 30 cm, debido al aire caliente producto de la combustión. A partir de 450 s momento en el que el fuego comienza a sofocarse Figura 4-29 la altura sube hasta 1,5 metros. En cambio en el pasillo 1, si bien la altura desciende rápidamente hasta unos 60 cm permanece relativamente estable.

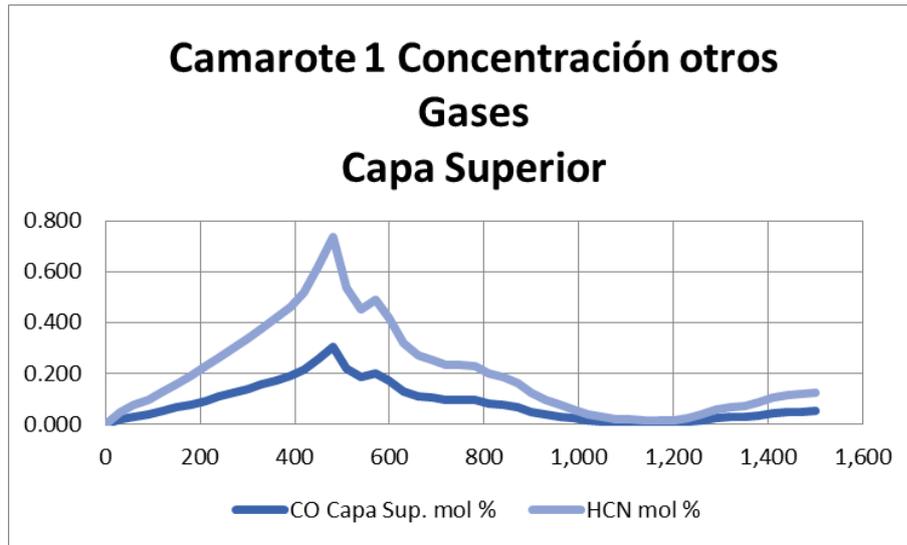


Figura 4-34 Concentración de CO y de HCN en la capa superior de S3

El resto de gases de estudio son aquellos perjudiciales para la salud humana. En el objeto de estudio la concentración de CO (monóxido de carbono) se eleva hasta un 0,3% que se corresponde con una concentración de 3000 ppm, según el R.D 1073/2002 una concentración superior a 1000 ppm supone la muerte después de una hora de exposición.

Así mismo la concentración de HCN (cianuro de hidrogeno), compuesto muy venenoso, alcanza hasta un 7 por mil, siendo una concentración de 300 ppm es suficiente para provocar la muerte en un ser humano en cuestión de minutos.

#### 4.4.3 HRR

Como se ve en la figura 3.45 el HRR de la fuente de ignición tipificada como Matress (colchón litera) llega hasta los 660 kW en el segundo 910, estos datos que son obtenidos por ensayos realizados por el NIST. En la simulación S3 por falta de oxígeno la combustión no pasa de 500 segundos con una HRR de 180 kW.

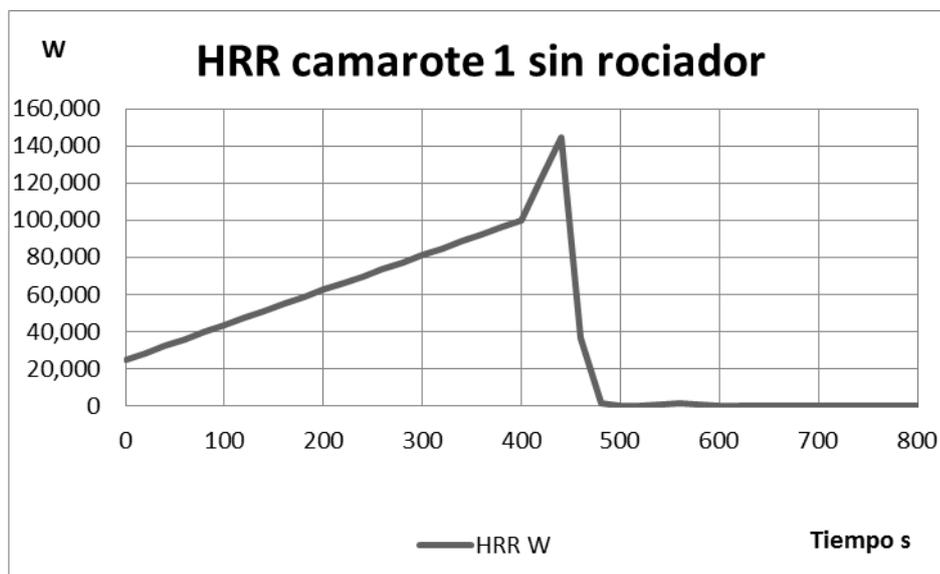


Figura 4-35 HRR de colchón en Camarote1 sin extinción

## 4.5 Resultados de simulación de incendios en camarote-acomodación con extinción

Para efectuar la simulación S4 se ha utilizado el mismo modelo que en la simulación S3 pero incluyendo un rociador en el techo del compartimento.

### 4.5.1 Temperaturas

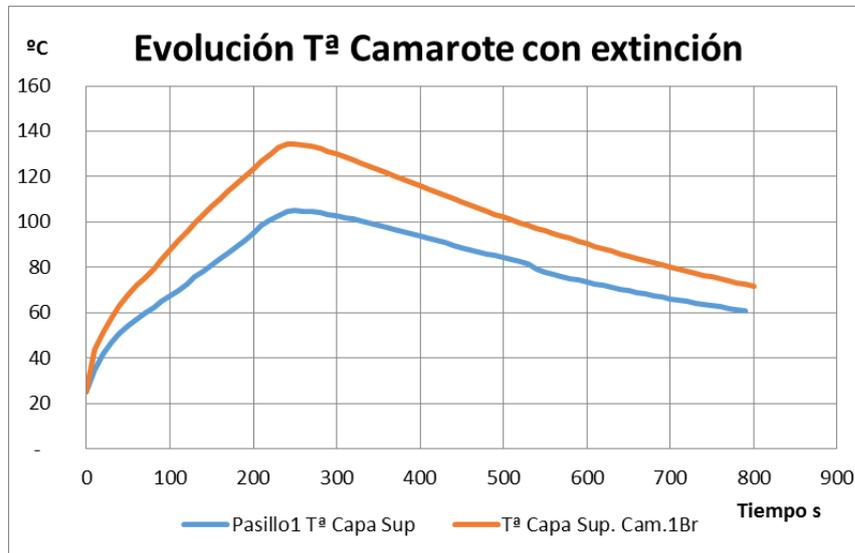


Figura 4-36 Evolución de la Tª en Camarote1 con extinción

Como se puede apreciar tanto en el pasillo (Figura 4-37) como en el camarote1 (Figura 4-36), cuando se realiza la extinción aproximadamente cuando alcanza los 120°C, sin esperar a que alcance el pico máximo de temperatura, la temperatura se estabiliza a diferencia de la S3 en la que se alcanzan 250°C. La normativa IMO 254 da como bueno un ensayo en el que la temperatura en el pasillo no supere los 100°C.

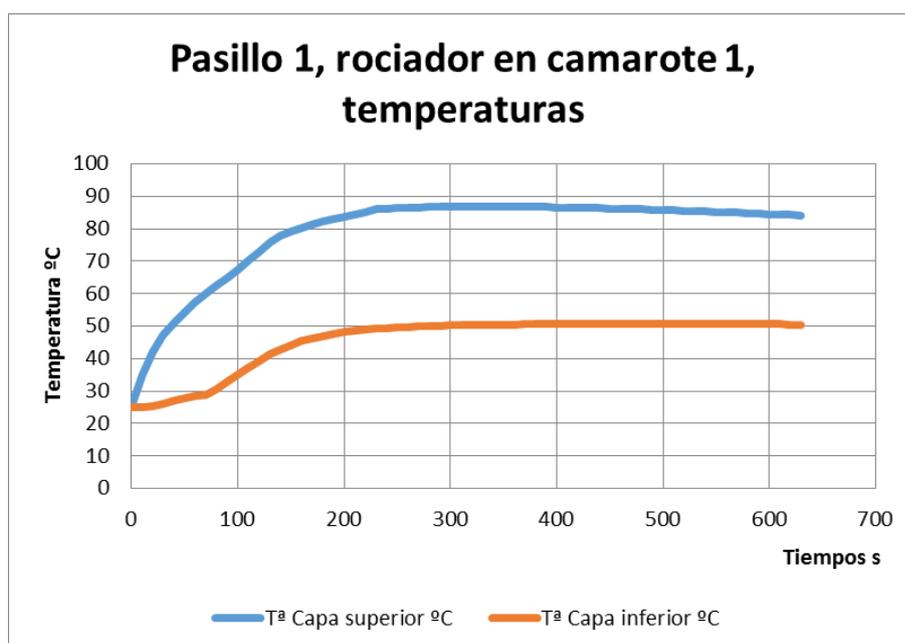


Figura 4-37 Evolución de la Tª en Pasillo con extinción

### 4.5.2 Humos y gases

En la Figura 4-38 se representa la evolución de la concentración de gases en la capa superior e inferior, el CO alcanza 0.15% que es un 1500 ppm y el HCN alcanza el 0.37% que es de 3700 ppm, siendo estas concentraciones excesivas y peligrosas.

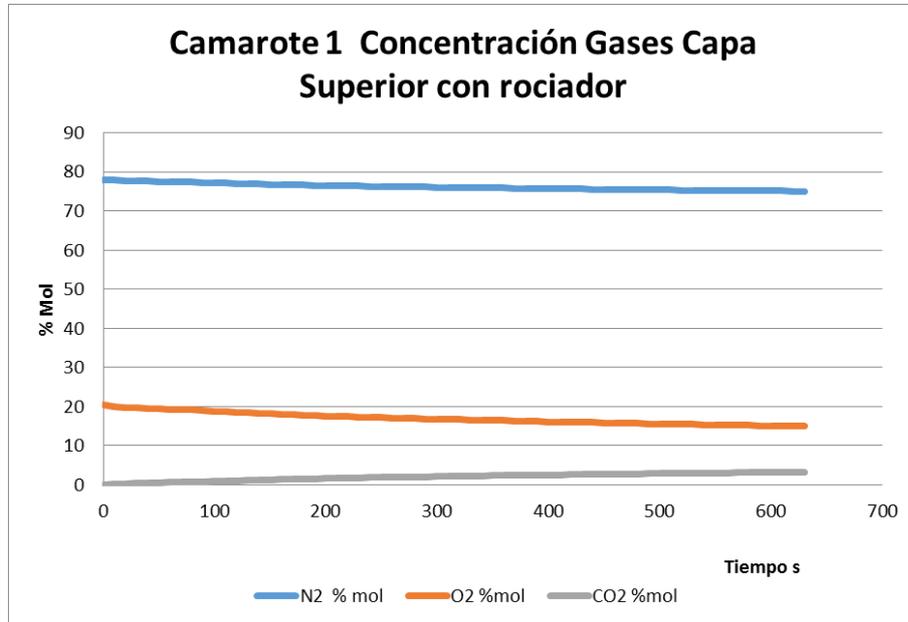


Figura 4-38 Concentración de gases capa superior en Camarote1 con extinción

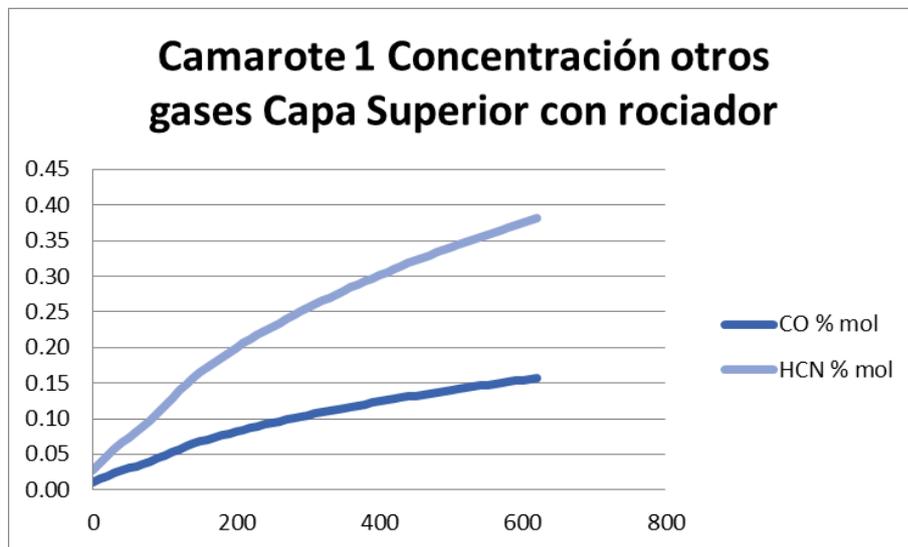


Figura 4-39 Concentración de gases capa inferior en Camarote1 con extinción

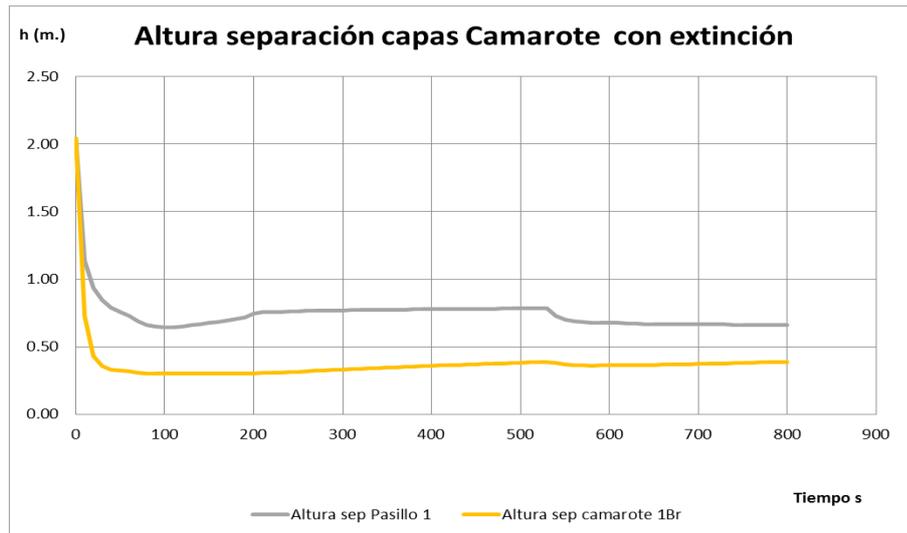


Figura 4-40 Altura separación de capas en camarote1 con rociador

En los gráficos de visibilidad, solo destacar que ocurre el mismo efecto que en la cámara de máquinas, la visibilidad aumenta con la extinción, disminuyendo a medida que aumentan las especies.

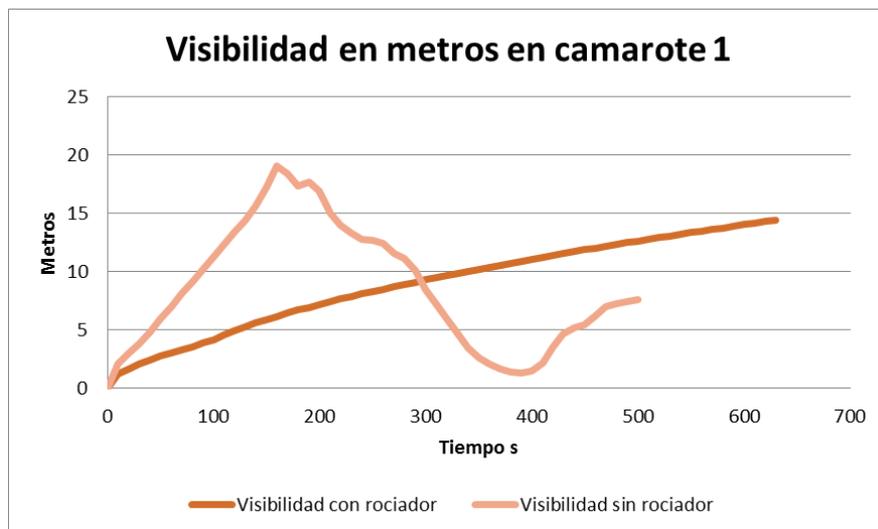


Figura 4-41 Visibilidad en metros en camarote1

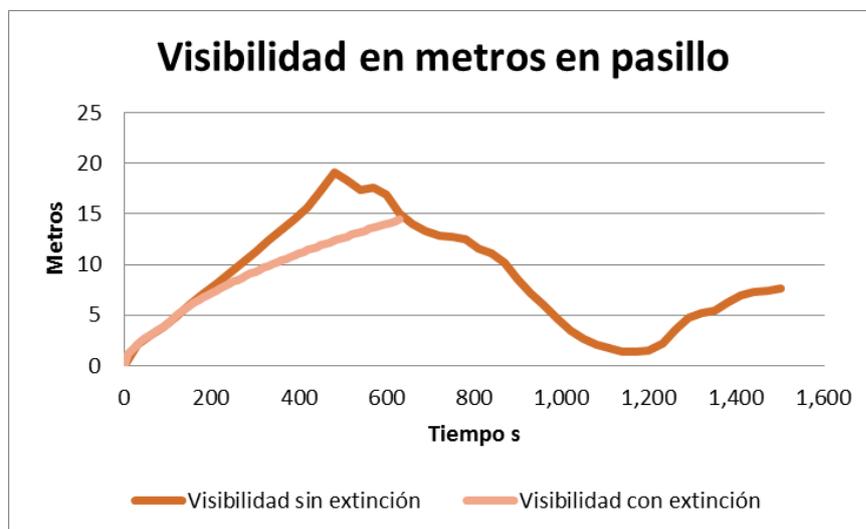


Figura 4-42 Visibilidad en metros en pasillo

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tras el estudio y análisis de las simulaciones de incendios en la lancha de instrucción R66 de la Escuela Naval Militar, se puede aceptar la viabilidad del software de modelo de zona CFAST para el estudio y mejora del diseño de sistemas de protección contra incendios en este tipo de buques.

En el análisis realizado en el capítulo de resultados (4) y contrastándolo con otras simulaciones y con datos reales extraídos de ensayos en laboratorios se puede concluir la posibilidad del uso de este software para el diseño y estudio de medios de protección contra incendios.

La simulación de incendios bien sea con modelos de zona o con modelos campo permite modificar el diseño de un buque en cuanto a dimensiones, disposición de locales y materiales estructurales de forma muy cómoda y económica hasta llegar a la solución óptima que permita cumplir la normativa, mejorar la seguridad y cumplir con los requisitos de costes de fabricación.

La cantidad de datos de salida que aportan los programas es considerable, pudiendo introducir gran número de mediciones suplementarias. Esto hace que se obtengan datos de interés, como es la temperatura o la concentración de los gases de combustión en una zona determinada. Un ejemplo de su utilidad podría ser simular el comportamiento de un incendio provocado por el impacto de un proyectil.

Por otro lado, en las simulaciones realizadas con el modelo de zona CFAST se hace patente las limitaciones del software al no poder reproducir fielmente incendios en los que el movimiento de aire se hace con mucha velocidad. Por otra parte, si bien tiene limitaciones a la hora de reproducir la geometría, esto se traduce en una ventaja a la hora de reducción de tiempos de simulación.

Los modelos de simulación CFD de campo, como el FDS permiten una simulación más detallada y unas condiciones de contorno más reales pero por el contrario los tiempos de simulación se incrementan exponencialmente, por ejemplo para un modelo como es la lancha objeto de estudio, con mallas de 10 cm de resolución, una simulación sencilla puede llevar varios días de tiempo de simulación.

Por último, se ha conseguido modelar satisfactoriamente la geometría de la lancha de instrucción, pudiendo ser utilizada más adelante en simulaciones CFD.

Expuesto lo anterior, se recomiendan como futuras líneas de investigación y de estudio para la mejora del presente trabajo las siguientes:

- i. **Simulación de incendios mediante software FDS:** Aprovechando el modelo 3D realizado se ha comprobado que es posible y sería interesante transformarlo de forma que el mallado realizado por el software de simulación de campo FDS pueda obtener resultados más

eficientemente con menor tiempo de computación. El modelo 3D actual exige un excesivo consumo de recursos de CPU de memoria provocando incluso continuos fallos en la simulación. Este tipo de simulación mediante modelo de campo se podría realizar en cualquier tipo de buque.

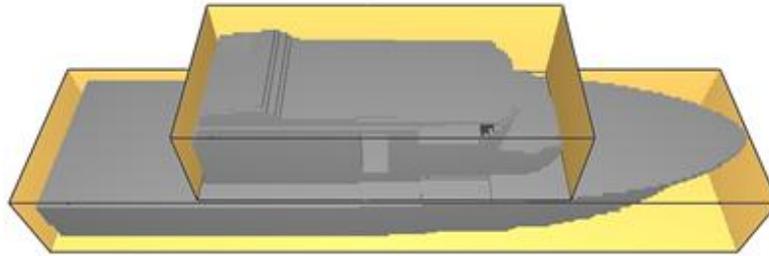


Figura 5-1

- ii. **Realización de estudios contra incendios en buques de la Armada:** De cara a una posible utilización en la Armada de estas herramientas de simulación de incendios, ya que pueden ser utilizadas para optimizar el diseño de locales de especial riesgo de incendio de explosión. En la actualidad estas herramientas sólo se usan en aplicaciones navales por parte de un reducido número de universidades y laboratorios europeos: Universidad de Lund, laboratorios SP, DFL, Vinnova y VTT.

La realización de estudios contra incendios en unidades de la Armada también podría ser extrapolable a:

- Arsenales e instalaciones de la Armada para el estudio de las medidas de seguridad
- Unidades y cuarteles de Infantería de Marina
- Edificios del Ministerio de Defensa

- iii. **Revisión y mejora de la normativa de seguridad contra incendios de la Armada,** pudiendo continuar estudios ya contrastados que han utilizado estas herramientas. Tal como los realizados por el NIST en colaboración con U.S.C.G., estos ensayos han servido para mejorar las regulaciones contra incendios de USCG y el estándar de la US NAVY americana.
- iv. **Estudio de evacuación en buques anfibios con transporte de tropas:** El estudio y simulación realizada puede ser combinado con programas de simulación de evacuación en compartimentos. Este tipo de estudios son muy utilizados en la construcción naval civil, pero no son comunes en los buques de guerra, por lo que sería interesante continuar este trabajo en esa vía de investigación.
- v. **Análisis, estudio y mejora del sistema de extinción y detección de la lancha y de otros buques:** Basándose en el estudio y análisis de temperaturas en los diferentes compartimentos del buque dependiendo del tipo de combustible. Podría estudiarse el actual sistema de extinción y alarma para mejorarlo e instalar un sistema que no solo cumpla con la normativa sino que se adapte plenamente a las necesidades.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Maritime Organization, «International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS),» de *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)*, 1974.
- [2] NFPA, Código NFPA 101 Life Safety Code, 2009.
- [3] IMO, «Resolution MSC 265(84), Cabin and corridor,» 2010.
- [4] F. Vigara, «El diseño basado en prestaciones en la PCI,» de *Jornada Técnica - Prevención de Incendios en la Comunidad de Madrid*, Madrid, 2009.
- [5] D. Alvear, «Modelado y Simulación Computacional de Incendios en la Edificación, Capítulo 1,» Díaz de Santos, 2007.
- [6] Armada Española, «Técnicas y materiales de contraincendios,» 2007.
- [7] P. D. Drysdale, *Introduction to fire dynamics*, 1985.
- [8] Escuela Naval Militar, *Manual Lanchas de Instrucción*, 2007.
- [9] J. Q. Bjorn Karlsson, *Enclosure fire dynamics*, 1999.
- [10] SFPE, *Handbook of Fire Protection Engineering*, 2008.
- [11] B. Karlsson, *Course Fire Safety Engineering*, Lund: Fire Technology and Journal of Performance Based Fire Codes.
- [12] Comité de Seguridad Marítima, IMO, *Código Internacional para la aplicación de procedimientos de ensayo de exposición al fuego*, 2010.
- [13] International Code Council, *ICC Performance-Based Code*, 2003.
- [14] SFPE, *SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection*, 2007.
- [15] F. Vigara, «Diseño Prestacional en SCI en el CTE,» *Ingeniería contra incendios*, pp. 60-68, 2009.
- [16] DoD Modeling & Simulation VV&A, *A practitioner's perspective on simulation validation*, 1999.
- [17] D. Alvear, *Modelado y Simulación Computacional de Incendios en la Edificación*, Díaz de Santos, 2007.

- [18] SFPE, Code Official's Guide to Performance Based Design Review, 2004.
- [19] NFPA, Methodology for nuclear power Facilities.
- [20] National Institute of Standards and Technology, «CFAST – Consolidated Fire, Volume 1: Technical Reference Guide,» 2015.
- [21] National Institute for Standar and Tecnology, «[www.nist.gov](http://www.nist.gov),» [En línea]. Available: <http://www.nist.gov>. [Último acceso: Enero 2016].
- [22] NISTIR, «Comparision of CFAST and FDS for fire simulation with the HDR T51 and T52 test,» National Institute of Standars and Tecnology, Maryland, 2002.
- [23] J. A. Oñartechevarría, Manual técnico práctico de NX 8-CAD, Múgica, Vizcaya: Servicios informáticos DAT, S.L, 2012.
- [24] CUD Marín, «Introducción a la representación de buques,» de *Ingeniería Gráfica*, Marín, 2015, p. Tema 9.
- [25] Naval Research Laboratory, J.B. Hoover and P.A. Tatem, «Application of CFAST to Shipboard Fire,» Office of Naval Research, Washington, DC, 2001.
- [26] Meteogalicia (Conselleria de medio ambiente, territorio e infraestructuras), «Informe climatológico año 2015,» 2015.
- [27] IMO, «IMO FP39 MSC 668- Alternative Arrangements for Halon Fireextinguishing Systems in Machinery Spaces and Pump-rooms,» Londres, 1998.
- [28] U.S Coast Guard Research and Development Center, «Full-scale testing of water mist fire suppression systems in machinery spaces,» Groton, 1998.
- [29] Dirección Gnereral de la Marina Mercante, «ESTUDIO DE LOS ACCIDENTES EN BUQUES PESQUEROS,» 2015.
- [30] H.-J. K. y. D. G. Lilley, «Heat realease rates od burning items in fires,» Reno, 2000.
- [31] Richard D. Peacock, Jason D. Averill, Paul A. Reneke, «Characteristics of fire sceneraios in which sublethal effects of smoke are important,» Kluwer Academic Publishers, 2004.

## **ANEXO I: NORMAS DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS Y DIRECTRICES DEL CÓDIGO IMO FSS FIRE SAFETY SYSTEMS, SSCI SISTEMAS DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS**

- Resolución A.572 (18): Directrices para la evaluación, el ensayo y la aplicación de alumbrado a baja altura de los buques de pasaje
- Resolución A.800 (19): Directrices revisadas para la aprobación de sistemas de rociadores equivalentes a los especificados en la regla II-2/12 del Convenio SOLAS
- Resolución A.951 (23): Directrices mejoradas aplicables a los extintores portátiles de incendios para usos marinos
- MSC/Circ.582 y Corr.1: Directrices para la aplicación de criterios de eficacia y ensayo y para la verificación de los concentrados de espuma de baja expansión empleados en los sistemas fijos de extinción de incendios
- MSC/Circ.668: Alternativas para los sistemas de extinción de incendios a base de halones en los espacios de máquinas y en las cámaras de bombas
- MSC/Circ.670: Directrices para la aplicación de criterios de eficacia y ensayo y para la verificación de los concentrados de espuma de alta expansión empleados en los sistemas fijos de extinción de incendios
- MSC/Circ.677: Normas revisadas para el proyecto, la prueba y el emplazamiento de los dispositivos destinados a impedir el paso de las llamas a los tanques de carga de los buques tanque
- MSC/Circ.728: Revisión de los métodos de prueba de los sistemas equivalentes de extinción de incendios a base de agua para los espacios de máquinas de categoría A y en las cámaras de bombas de carga que figuran en la circular MSC/Circ.668
- MSC/Circ.731: Factores revisados que procede tener en cuenta al proyectar los medios de respiración y desgasificación de los tanques de carga
- MSC/Circ.777: Indicación de los puestos de reunión en los buques de pasaje
- MSC/Circ.798: Directrices para la aplicación de criterios de comportamiento y ensayo y para la verificación de los concentrados de espuma de media expansión utilizados en los sistemas de extinción de incendios
- MSC/Circ.848: Directrices revisadas para la aprobación de sistemas fijos de extinción de incendios por gas equivalentes a los indicados en el Convenio SOLAS 1974 para los espacios de máquinas y las cámaras de bombas de carga
- MSC/Circ.1007: Directrices para la aprobación de sistemas fijos de incendios a base de aerosoles equivalentes a los sistemas fijos de extinción de incendios a base de gas indicados en el Convenio SOLAS 1974, para los espacios de máquinas
- MSC/Circ.1009: Enmiendas a las Normas revisadas para el proyecto, la prueba y el emplazamiento de los dispositivos destinados a impedir el paso de las llamas a los tanques de carga de los buques tanque (MSC/Circ.677)

- MSC/Circ.1165: Directrices revisadas para la aprobación de sistemas equivalentes de extinción de incendios a base de agua para los espacios de máquinas y las cámaras de bombas de carga
- MSC/Circ.1168: Directrices provisionales para la prueba, la aprobación y el mantenimiento de los sistemas de orientación para la evacuación utilizados en lugar de los sistemas de alumbrado a baja altura
- Resolución MDC.98 (73): Adopción del Código internacional de sistemas de seguridad contra incendios

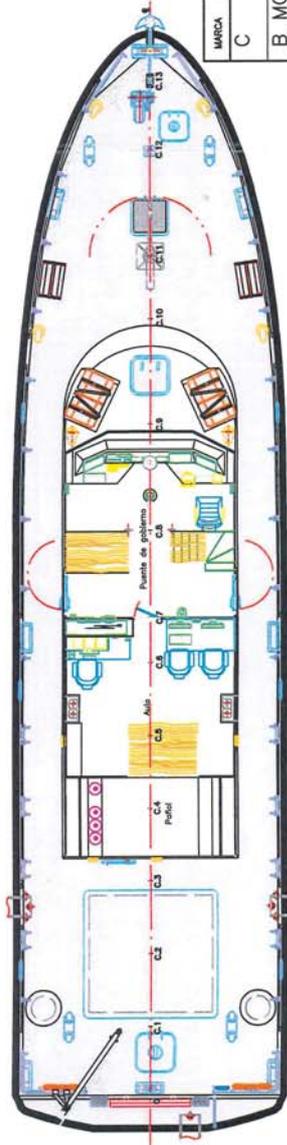
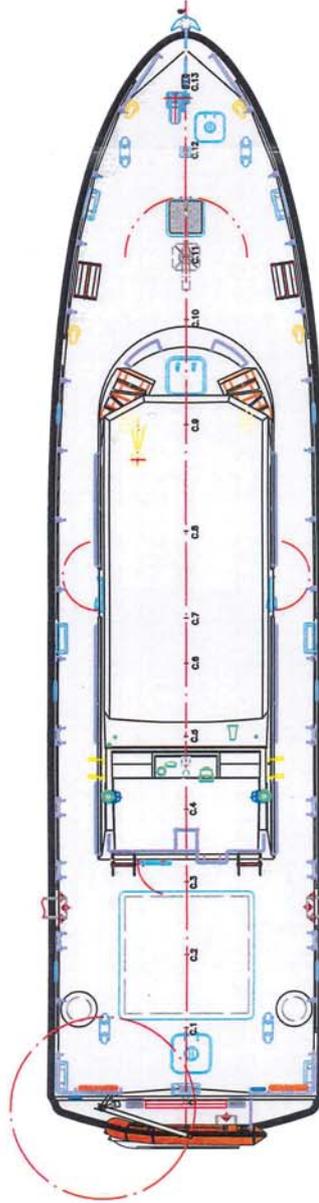
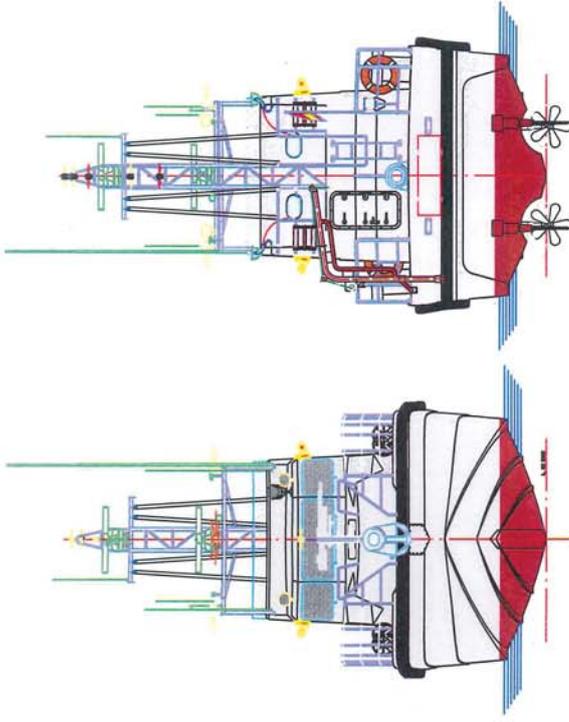
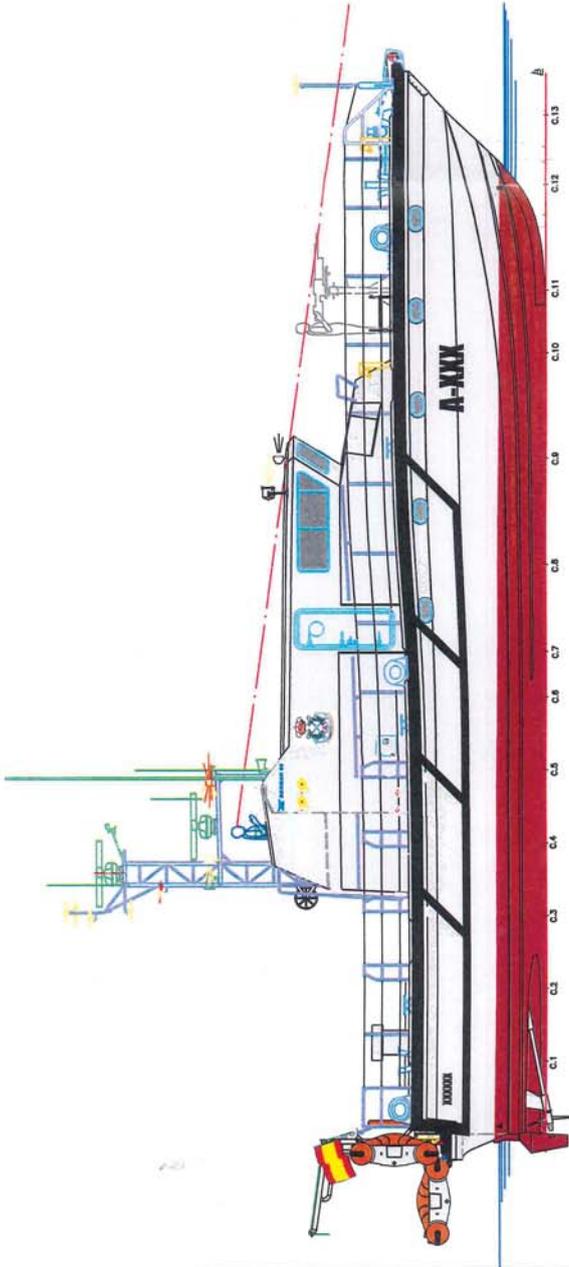
#### FUTURAS ENMIENDAS AL CÓDIGO

- Resolución MSC.206 (81): Adopción de enmiendas al Código internacional de sistemas de seguridad contra incendios (Código SSCI)
- Resolución MSC.217 (82): Enmiendas al Código internacional de sistemas de seguridad contra incendios

## **ANEXO II: PLANOS LANCHA DE INSTRUCCIÓN RODMAN-66**

En el presente anexo se han incluido diversos planos del buque necesarios para la realización del modelado en 3D de este proyecto. Estos documentos han sido facilitados por Rodman Polyship. Los planos anexados son:

- Disposición general exteriores
- Disposición general interiores
- Disposición cámara de máquinas
- Disposición general de línea de ejes y timones



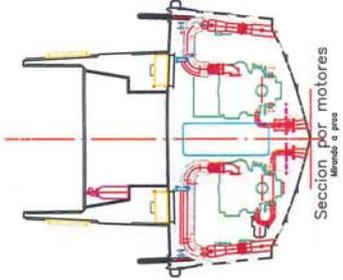
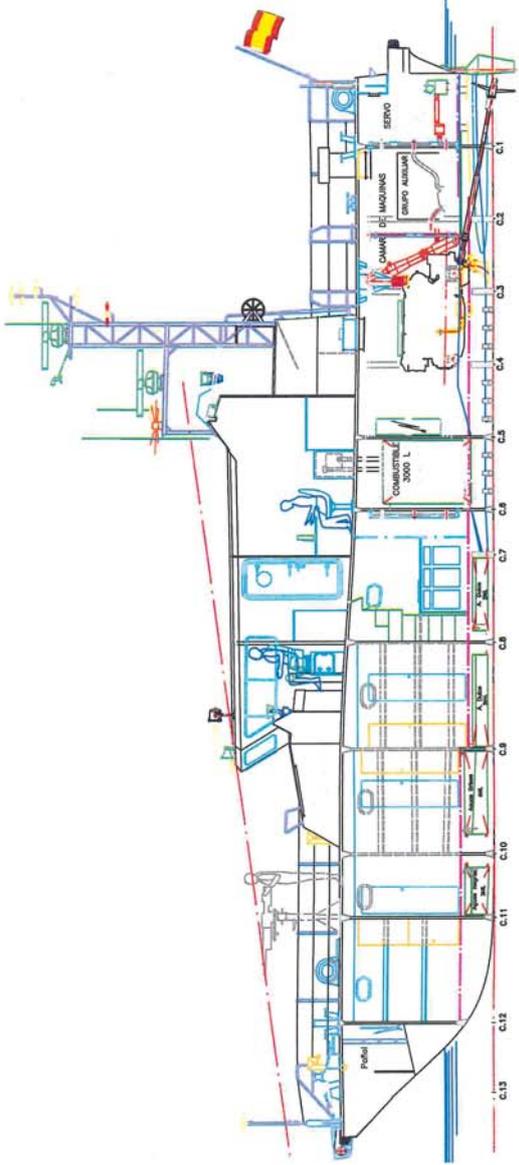
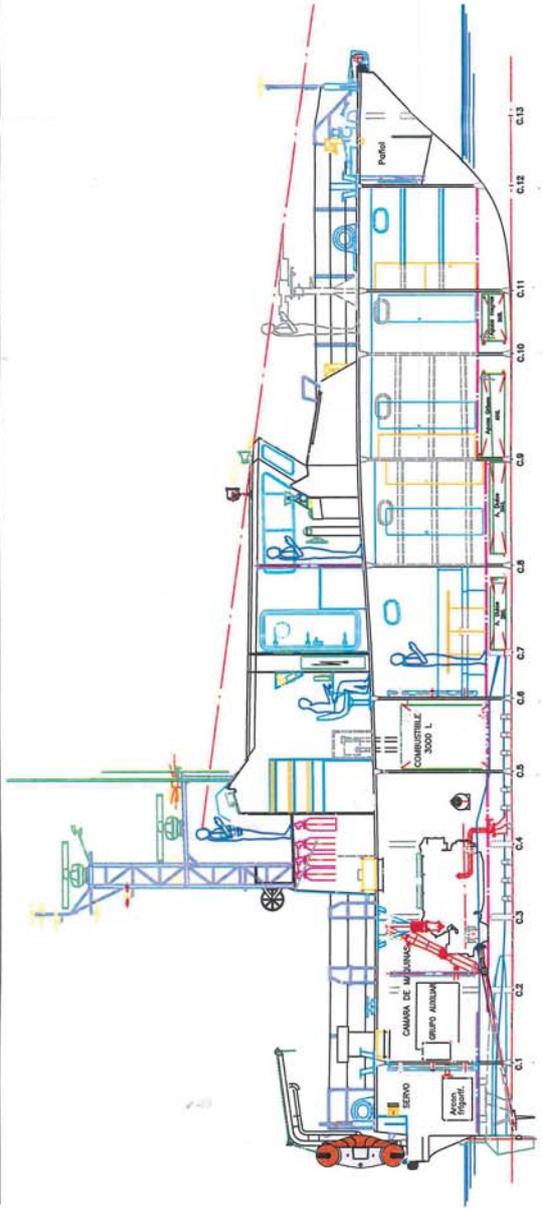
CARACTERISTICAS

ESLORA TOTAL \_\_\_\_\_ 20,50m.  
 ESLORA CASCO \_\_\_\_\_ 20,00m.  
 MANGA \_\_\_\_\_ 4,90m.  
 PUNTAL \_\_\_\_\_ 2,56m.  
 CALADO \_\_\_\_\_ 0,90m.

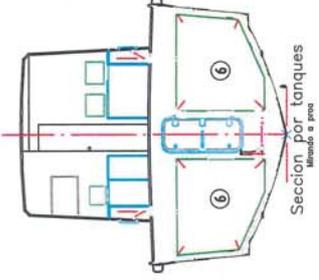
MARCA	DENOMINACION	CANTIDAD	MATERIAL	D.N.	REF. ALMACEN	OBSERVACIONES
C						
B MC	Inclusión construcción 66023, PLANO IGUAL AL ANTERIOR					
24.04.07	Actualizar					
A lb	D. Soto 21.12.06					
19.12.06	CAUSA					
LETRA	MODIFICACIONES					
NOMBRE	FECHA	I.V. (M4) 81 18 00 - Fax: (M4) 81 18 08 - Te. (M4) 87				
Marcos	10-11-06	RCS - TEL. 9/9 - AVANZO POSTAL 501 - 30000 VOG - SPAIN				
DIBUJADO	DESIGNACION	DISPOSICION GENERAL				
María M.	10-11-06	EXTERIORES				
COMPROBADO	MODELO	R-66				
v. b.	COPIA N.º	66007 y 66023				
ESCALAS	DESTINO	66Ym.A6.00B				
1:100	FECHA					



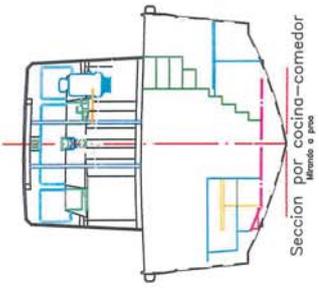
PLANO N.º  
66Ym.A6.00B



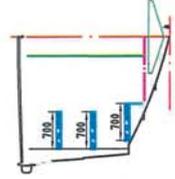
Sección por motores  
Muestra a pie



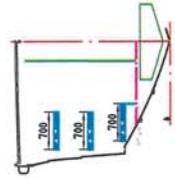
Sección por tanques  
Muestra a pie



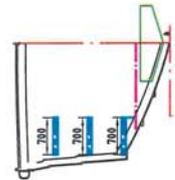
Sección por cocina-comedor  
Muestra a pie



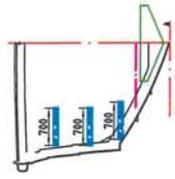
SECCION POR CUNA. 11  
Muestra a pie



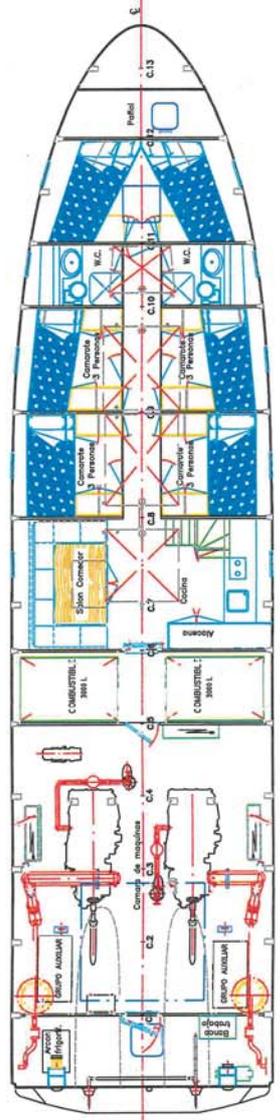
SECCION POR CUNA. 12  
Muestra a pie



SECCION POR CUNA. 13  
Muestra a pie

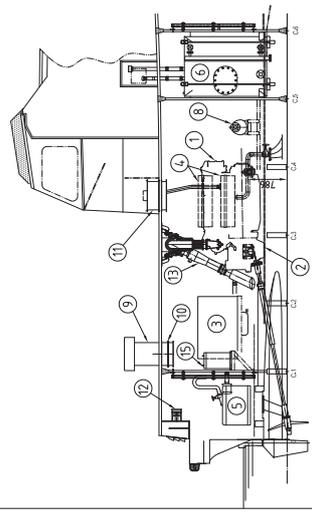


SECCION POR CUNA. 10  
Muestra a pie

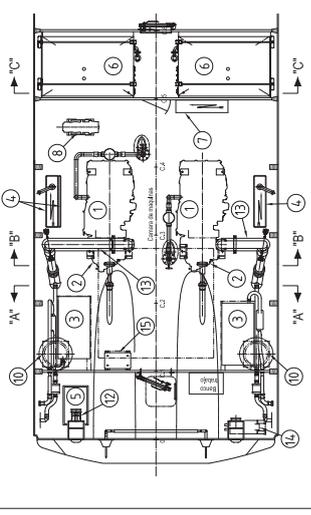


MARCA	DENOMINACION	CANTIDAD	MATERIAL	D.N.	REF. ALMACEN	OBSERVACIONES
C	Inclusión construcción 66023, PLANO IGUAL AL ANTERIOR					
B MC	24.04.07					D. Soto 21.12.06
A lb	19.12.06					CAUSA
LETRA	Actualizar					
		MODIFICACIONES				
		NOMBRE	FECHA	DESIGNACION		
		Marcos	10-11-06	Tel: (986) 81 18 00 - Fax: (986) 81 18 09 - Tlx: 63687		
		Maria M	10-11-06	RCS - ILS, A/T - APARTADO POSTAL 501 - 36200 VIGO - SPAIN		
		CASTILLA	10-11-06	DISPOSICION GENERAL INTERIORES		
		ESCALAS		MODELO		
		COPA N.º		R-66		
		DESTINO		CONSTRUCCIONES 66007 y 66023		
		FECHA		PLANO N.º 66Ym.A6.01B		

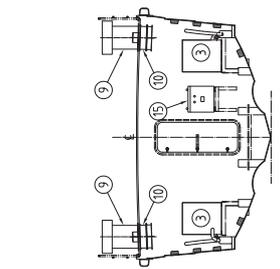




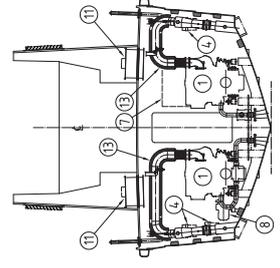
ALZADO MIRANDO A BARRER



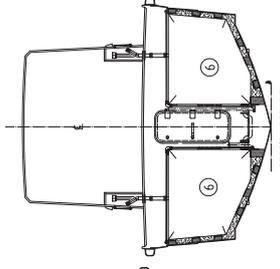
PLANTA BAJA CUBIERTA



SECCION POR X-X



SECCION POR Y-Y



SECCION POR Z-Z

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	REVISION	FECHA	ELABORADO	APROBADO
1	TRANSFORMADOR PRINCIPAL	1	UNIDAD				
2	ESCOPETE	2	UNIDAD				
3	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
4	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
5	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
6	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
7	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
8	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
9	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
10	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
11	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	REVISION	FECHA	ELABORADO	APROBADO
1	TRANSFORMADOR PRINCIPAL	1	UNIDAD				
2	ESCOPETE	2	UNIDAD				
3	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
4	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
5	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
6	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
7	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
8	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
9	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
10	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				
11	EXTRACTOR DE HIELO	1	UNIDAD				

INSTRUMENTOS: 1. ESCOPETE 2. ESCOPETE 3. ESCOPETE 4. ESCOPETE 5. ESCOPETE 6. ESCOPETE 7. ESCOPETE 8. ESCOPETE 9. ESCOPETE 10. ESCOPETE 11. ESCOPETE

REVISIONES: 1. REVISIONES 2. REVISIONES 3. REVISIONES 4. REVISIONES 5. REVISIONES 6. REVISIONES 7. REVISIONES 8. REVISIONES 9. REVISIONES 10. REVISIONES 11. REVISIONES

FECHA: 15/05/2008

ELABORADO: R-66

APROBADO: R-66

PROYECTO: 6007/6023

PLANTA: 6008/6104

FECHA: 15/05/2008

ELABORADO: R-66

APROBADO: R-66

PROYECTO: 6007/6023

PLANTA: 6008/6104

FECHA: 15/05/2008

ELABORADO: R-66

APROBADO: R-66

PROYECTO: 6007/6023

PLANTA: 6008/6104

FECHA: 15/05/2008

ELABORADO: R-66

APROBADO: R-66

PROYECTO: 6007/6023

PLANTA: 6008/6104

FECHA: 15/05/2008

ELABORADO: R-66

APROBADO: R-66

PROYECTO: 6007/6023

PLANTA: 6008/6104



RODMAN

CONSTRUCCIONES

INDUSTRIALES

SA DE CV

