



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

EVALUACIÓN DE SOLUCIÓN PRESTACIONAL DE SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURAS Y
EVACUACIÓN DE HUMOS EN NAVE DESTINADA A ALMACENAMIENTO LOGÍSTICO SEGÚN
NORMA UNE 23585 Y COMPARATIVA OPERACIONAL Y ECONÓMICA CON LA SOLUCIÓN
PRESCRIPTIVA DE LA NORMA

AUTOR: ARTURO CUARTERO GARCÍA
DIRECTOR: D. BORJA RENGEL DARNACULLETA

MADRID

2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:

“EVALUACIÓN DE SOLUCIÓN PRESTACIONAL DE SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURAS Y EVACUACIÓN DE HUMOS EN NAVE DESTINADA A ALMACENAMIENTO LOGÍSTICO SEGÚN NORMA UNE 23585 Y COMPARATIVA OPERACIONAL Y ECONÓMICA CON LA SOLUCIÓN PRESCRIPTIVA DE LA NORMA”

En la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas
en el curso académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y no
ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

Tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Arturo Cuartero García



Fecha: 29/08/2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Borja Rengel Darnacullea

Fecha: 29/08/2024



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

EVALUACIÓN DE SOLUCIÓN PRESTACIONAL DE SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURAS Y
EVACUACIÓN DE HUMOS EN NAVE DESTINADA A ALMACENAMIENTO LOGÍSTICO SEGÚN
NORMA UNE 23585 Y COMPARATIVA OPERACIONAL Y ECONÓMICA CON LA SOLUCIÓN
PRESCRIPTIVA DE LA NORMA

AUTOR: ARTURO CUARTERO GARCÍA
DIRECTOR: D. BORJA RENGEL DARNACULLETA

MADRID

2024

EVALUACIÓN DE SOLUCIÓN PRESTACIONAL DE SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURAS Y EVACUACIÓN DE HUMOS EN NAVE DESTINADA A ALMACENAMIENTO LOGÍSTICO SEGÚN NORMA UNE 23585 Y COMPARATIVA OPERACIONAL Y ECONÓMICA CON LA SOLUCIÓN PRESCRIPTIVA DE LA NORMA

Autor: Cuartero García, Arturo

Director: Rengel Darnacullea, Borja

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO:

El proyecto consiste en la comparativa del diseño de una solución para control de temperatura y evacuación de humos en una nave de almacenamiento logístico, según RD2267 y UNE 23585, de manera prescriptiva y de manera prestacional. De esta manera, se estudiarán las ventajas y desventajas de adoptar una solución prestacional de la norma, considerando soluciones equivalentes, en términos operativos y económicos.

Palabras clave: naves logísticas, incendios, SCTEH, Sistema de control de temperatura y evacuación de humos, PyroSim, FDS, Norma UNE 23585, RD 2267/2004, solución, prestacional, solución prescriptiva.

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Control de Temperaturas y Evacuación de Humos (SCTEH) en naves logísticas gestionan los humos y el calor durante incendios, manteniendo despejadas las rutas de evacuación y facilitando el trabajo de bomberos. Estos sistemas incluyen, principalmente: exutorios accionados en remoto, barreras de humo y elementos auxiliares como detección.

La normativa española de sistemas de control de temperatura y evacuación de humos el RD 2267/2004 y la norma UNE 23585, está desfasada respecto a las tecnologías actuales. Esto puede llevar a instalaciones sobredimensionadas. El enfoque prescriptivo, que detalla métodos específicos, limita la innovación. En cambio, el enfoque prestacional, más flexible,

permite optimizar los sistemas de control de temperatura y humos mediante tecnologías avanzadas. Herramientas como FDS y PyroSim facilitan simulaciones precisas en escenarios complejos, mejorando la seguridad y eficiencia de los sistemas en naves logísticas y otros entornos industriales, ajustándose mejor a las necesidades actuales de seguridad contra incendios.

DEFINICIÓN DEL PROYECTO

El objeto del proyecto consistirá el diseño de sistemas de control de humos en una nave logística usando enfoques prescriptivo (RD2267 y UNE 23585) y prestacional. Evaluará ventajas y desventajas operativas y económicas mediante simulaciones con FDS y PyroSim, destacando cómo el enfoque prestacional puede optimizar el diseño frente a limitaciones prescriptivas.

Primero se definirá una nave objeto de estudio. Esta nave tendrá consideraciones de nave real comercial. Posteriormente se desarrollarán dos soluciones prescriptivas según la norma UNE 23585. A continuación, se escogerá una de las soluciones y se eliminarán las barreras de humo y se considerará como solución prestacional a evaluar. En añadido, se considerarán elementos auxiliares de la nave (portones y muelles) como elementos de aportación de aire, cuestión no recogida por la norma.

Después se modelarán las tres soluciones en el software PyroSim y se simulará el incendio de diseño más restrictivo utilizado para el dimensionamiento de las soluciones prescriptivas. El motor de simulación es FDS. Los parámetros a evaluar serán temperatura y visibilidad (humos)

También se realizará comparativo económico de las tres soluciones.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las solución evaluada como prestacional resulta significativamente más económica, pero el análisis solo incluye importes de ejecución material, omitiendo gastos en ingeniería y desarrollo.

La solución evaluada como prestacional y una de las prescriptivas presentan mejores resultados en las simulaciones realizadas, considerando los parámetros evaluados: temperatura y visibilidad (humos); en el tiempo de simulación establecido. Se puede concluir que su eficacia se debe al uso de elementos auxiliares como portones y muelles de carga como aportación de aire, no considerados en la norma UNE 23585 para el diseño de soluciones prescriptivas.

El estudio y simulación tienen un alcance académico limitado, por lo que no se puede concluir con certeza sobre la validez de la solución prestacional. Sin embargo, no se han encontrado indicios de invalidez. Dada la menor inversión requerida para dicha solución, se concluye el interés positivo por la metodología.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE SOLUTION OF A TEMPERATURE CONTROL AND SMOKE EVACUATION SYSTEM IN A WAREHOUSE FOR LOGISTIC STORAGE ACCORDING TO UNE 23585 STANDARD AND OPERATIONAL AND ECONOMIC COMPARISON WITH THE PRESCRIPTIVE SOLUTION OF THE STANDARD.

Author: Cuartero García, Arturo

Principal: Rengel Darnacullea, Borja

Collaborating Entity: ICAI - Comillas Pontifical University

SUMMARY OF THE PROJECT:

The project consists of the comparative design of a solution for temperature control and smoke evacuation in a logistic storage building, according to RD2267 and UNE 23585, in a prescriptive way and in a performance way. In this way, the advantages and disadvantages of adopting a prescriptive solution of the standard will be studied, considering equivalent solutions, in operational and economic terms.

Keywords: logistic warehouses, fire, SCTEH, temperature control and smoke evacuation system, PyroSim, FDS, UNE 23585 Standard, RD 2267/2004, solution, performance, prescriptive solution.

INTRODUCTION

Smoke and Smoke Evacuation and Temperature Control Systems (SHEVS) in logistics warehouses manage smoke and heat during fires, keeping evacuation routes clear and facilitating the work of firefighters. These systems mainly include remotely operated ventilators, smoke barriers and auxiliary elements such as detection.

Spanish regulations on temperature control and smoke evacuation systems, RD 2267/2004 and UNE 23585, are outdated with respect to current technologies. This can lead to oversized installations. The prescriptive approach, which details specific methods, limits innovation. On the other hand, the more flexible performance approach makes it possible to optimize

temperature and smoke control systems using advanced technologies. Tools such as FDS and PyroSim facilitate accurate simulations in complex scenarios, improving the safety and efficiency of systems in logistics warehouses and other industrial environments, better matching today's fire safety needs.

PROJECT DEFINITION

The object of the project will consist of the design of smoke control systems in a logistics warehouse using prescriptive (RD2267 and UNE 23585) and performance approaches. It will evaluate operational and economic advantages and disadvantages through simulations with FDS and PyroSim, highlighting how the performance approach can optimize the design against prescriptive constraints.

First, a target ship will be defined. This ship will have real commercial ship considerations. Subsequently, two prescriptive solutions will be developed according to UNE 23585. Then, one of the solutions will be chosen and smoke barriers will be eliminated and considered as a performance solution to be evaluated. In addition, auxiliary elements of the building (gates and piers) will be considered as air supply elements, which is not included in the standard.

The three solutions will then be modeled in PyroSim software and the most restrictive design fire used for the sizing of the prescriptive solutions will be simulated. The simulation engine is FDS. The parameters to be evaluated will be temperature and visibility (smoke).

An economic comparison of the three solutions will also be carried out.

RESULTS AND CONCLUSIONS

The solution evaluated as performance is significantly more economical, but the analysis only includes material costs, omitting engineering and development costs.

The solution evaluated as performance and one of the prescriptive ones present better results in the simulations performed, considering the evaluated parameters: temperature and

visibility (smoke); in the established simulation time. It can be concluded that its effectiveness is due to the use of auxiliary elements such as gates and loading docks as air supplies, not considered in the UNE 23585 standard for prescriptive solutions design.

The study and the simulation have a limited academic scope, so it is not possible to conclude with certainty about the validity of the performance solution. However, no indications of invalidity have been found. Given the lower investment required for such a solution, the positive interest of the methodology is concluded.

Índice de contenido:

1.- Introducción, marco y planteamiento del proyecto	17
1.1.- Naves de almacenamiento logístico.	17
1.2.- Sistemas PCI en naves de almacenamiento logístico.....	19
1.3.- Sistemas de control de temperaturas y evacuación de humos (SCTEH) en naves logísticas.....	26
2.- Descripción de las tecnologías, estado del arte.....	31
3.- Descripción del modelo desarrollado	37
3.1.- Objetivos, especificación y datos a analizar.	38
3.2. - Nave objeto de estudio.....	40
3.3.- Desarrollo.....	51
3.3.1.- Solución prescriptiva.....	51
3.3.2.- Solución prestacional y simulación soluciones estudiadas.....	61
4.- Análisis de resultados.....	82
4.1.- Económicos	82
4.2.- Funcionales	84
5.- Conclusiones	86
5.1.- Conclusiones sobre la metodología	86
5.2.- Conclusiones sobre los resultados	88
5.3.- Recomendaciones para futuros estudios.....	89
6.- Bibliografía y webgrafía.....	91
ANEXOS	92
A1. Alineación con objetivos de desarrollo sostenible según agenda 2030.....	93
A2. Tabla resumen cálculos soluciones prescriptivas	98
A3.- Planos.....	99

Índice de tablas:

Tabla 1: Cuadro de superficies y alturas nave objeto de estudio.	40
Tabla 2: RD 2267/2004 Tabla de riesgo intrínseco.....	44
Tabla 3: RD 2267/2004 Riesgo intrínseco sector.....	45
Tabla 4: Cálculo carga de fuego intrínseca máxima de la nave y mercancía media.	46
Tabla 5: Tabla 2.2. RD 2267/2004 Riesgo Intrínseco y configuraciones edificaciones.....	47
Tabla 6: Tabla 2.4. RD 2267/2004 Riesgo Intrínseco y configuraciones edificaciones una sola planta	47
Tabla 7: Tabla resumen soluciones prescriptivas.....	60
Tabla 8: PyroSim materiales configurados.....	68
Tabla 9: Medidas y Presupuesto solución prestacional.	82
Tabla 10: Medidas y Presupuesto solución prescriptiva $Y = 2/3 h$	83
Tabla 11: Medidas y Presupuesto solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$	83

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Nave logística renderizada.	18
Ilustración 2: Rociador o Sprinkler.	21
Ilustración 3: Extintor.	22
Ilustración 4: Señalética de salida de emergencia.	23
Ilustración 5: Exutorio de apertura automática de ventana.	26
Ilustración 6: Barreras de humos.	28
Ilustración 7: Logotipo PyroSim	34
Ilustración 8: Ejemplo simulación PyroSim	35
Ilustración 9: Incendio y Penacho, norma UNE 23585.....	37
Ilustración 10: Vista planta nave. Cotas en Anexos.....	41
Ilustración 11: Vista planta nave con implantación. Cotas en Anexos.....	42
Ilustración 12: Vista cubierta nave. Cotas en Anexos.	42
Ilustración 13: Vista alzados nave. Cotas en Anexos.....	43
Ilustración 14: Vista perfiles nave. Cotas en Anexos.....	43
Ilustración 15: Vista planta nave con depósitos de humos diferenciados.....	52
Ilustración 16: UNE 23585 Explicación depósitos adyacentes.....	53
Ilustración 17: Vista cubierta solución prescriptiva $Y= 2/3 h$ m.....	60
Ilustración 18: Vista cubierta solución prescriptiva $Y= h + 0,5$ m.	61
Ilustración 19: Vista cubierta solución alternativa prestacional.....	62
Ilustración 20: PyroSim configuración malla.....	64
Ilustración 21: PyroSim configuración modelo.	65
Ilustración 22: PyroSim nave modelada solución prestacional.	65
Ilustración 23: PyroSim nave modelada solución prestacional vista sin cerramientos.	66
Ilustración 24: PyroSim función Import file FDS/CAD formato dwg.....	66
Ilustración 25: PyroSim configuración aportaciones de aire.	67
Ilustración 26: PyroSim código generado para FDS.	68
Ilustración 27: PyroSim menú configuración materiales.	69
Ilustración 28: PyroSim simulación incendio solución prestacional medida temperatura.....	72

Ilustración 29: PyroSim simulación incendio solución prestacional medida temperatura.	
Detalle	73
Ilustración 30: PyroSim simulación incendio solución prestacional medida visibilidad.....	73
Ilustración 31: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = 2/3 h m$	74
Ilustración 32: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = 2/3 h m$. Vista sin cerramientos.	75
Ilustración 33: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = 2/3 h m$ medida temperatura.	75
Ilustración 34: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = 2/3 h m$ medida temperatura. Detalle.....	76
Ilustración 35: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = 2/3 h m$ medida visibilidad	77
Ilustración 36: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$	78
Ilustración 37: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$. Vista sin cerramientos.	78
Ilustración 38: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$ medida temperatura.	79
Ilustración 39: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$ medida temperatura. Detalle.....	80
Ilustración 40: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$ medida visibilidad.	80

1.- Introducción, marco y planteamiento del proyecto

El proyecto consiste en la comparativa del diseño de una solución para control de humos en una nave de almacenamiento logístico, según RD2267 y UNE 23585, de manera prescriptiva y de manera prestacional. De esta manera, se estudiarán las ventajas y desventajas de adoptar una solución prestacional de la norma, considerando soluciones equivalentes, en términos operativos y económicos. A su vez, esto permitirá realizar cierta crítica hacia las soluciones prescriptivas que adopta la norma en este tipo de inmuebles a los cuales aplica. Para la comparativa se empleará un software de simulación de incendios denominado FDS y una interfaz gráfica denominada PyroSim, comparando la evolución de los incendios de diseño que marca la norma y los parámetros determinados que se estipularán a lo largo de este trabajo.

Para ello, se utilizará una nave objeto de estudio para la que se diseñarán ambas soluciones. Así, se permitirá el estudio comparativo. Se utilizará como objeto de estudio una edificación categorizada según RD2267 como establecimiento tipo C y riesgo intrínseco del fuego medio 5, de 12.100,00 m² construidos totales siendo 11.600,00 m² de almacén de estructura de hormigón situada en la provincia de Guadalajara, Castilla – La Mancha.

1.1.- Naves de almacenamiento logístico.

Las naves logísticas, también denominadas almacenes o centros de distribución, son edificaciones diseñadas para el almacenamiento, manejo y distribución de productos y mercancías dentro de las cadenas de suministro. Se trata de instalaciones esenciales en el proceso de distribución de bienes y productos, ya que actúan como puntos centrales donde se almacenan temporalmente dichos bienes y productos antes de su envío a otros puntos de almacenamiento y tratamientos, puntos de venta o directamente a clientes finales.



Ilustración 1: Nave logística renderizada.

Estas edificaciones han experimentado un notable auge en las últimas décadas debido a una serie de factores clave que han impulsado su crecimiento y demanda. Con la expansión de la globalización, las empresas buscan mercados más amplios donde se encuentran con una mayor competitividad. Esto ha llevado a un aumento del comercio internacional y, como resultado, a una mayor necesidad de espacios de almacenamiento y distribución para gestionar el flujo de mercancías a nivel mundial. A su vez, el crecimiento exponencial del comercio electrónico ha transformado la forma en que las empresas venden y entregan productos a los consumidores. Las naves logísticas desempeñan un papel crucial en esta industria al servir como centros de cumplimiento donde se almacenan, seleccionan y preparan los productos que finalmente serán adquiridos por el cliente final. Debido a estos factores, las empresas persiguen formas de optimizar sus cadenas de suministro para reducir costos, mejorar la eficacia y aumentar la satisfacción del cliente en mercados cada vez más competitivos. Las naves logísticas juegan un papel fundamental en esta optimización al proporcionar puntos estratégicos de acopio.

Estas edificaciones pueden variar en tamaño y complejidad, desde pequeños almacenes locales hasta grandes centros de distribución regionales o incluso internacionales. Su diseño

y funcionalidad dependen de varios factores, incluyendo el tipo de productos almacenados, el volumen de mercancías que se manejan, los requisitos de la cadena de suministro, entre otros. Cabe mencionar que durante la última década las naves desarrolladas han sufrido un aumento notable de tamaño debido principalmente a economías de escala

1.2.- Sistemas PCI en naves de almacenamiento logístico

Los sistemas de protección contra incendios (SPI) son un conjunto de medidas y dispositivos diseñados para prevenir, controlar y mitigar los efectos del fuego. Estos sistemas son esenciales para la seguridad de naves logísticas, así como para la protección de personas y bienes. La aplicación de los sistemas de PCI varía principalmente en función del tipo de carga intrínseca de fuego almacenada. En general, los sistemas de PCI se dividen en varias categorías principales, cada una con funciones específicas para abordar diferentes aspectos de la protección contra incendios.

Sistemas de detección y alarma:

Incluye dispositivos como detectores de humo, detectores de calor y sistemas de alarma. Los detectores de humo identifican la presencia de humo en el aire, mientras que los detectores de calor reaccionan ante el aumento de la temperatura. Cuando estos dispositivos detectan signos de incendio, activan una alarma para alertar a los ocupantes y a los equipos de emergencia. Los sistemas de alarma pueden ser acústicos, visuales o una combinación de ambos, y están diseñados para alertar a las personas que se encuentran en distintas zonas del edificio, como por ejemplo señales sonoras, luces estroboscópicas y mensajes de emergencia. En algunos casos, los sistemas de notificación están conectados a centros de control que alertan automáticamente a servicios de emergencia como los bomberos, lo que permite una respuesta rápida en caso de incendio. Estos sistemas tienen consideración de protecciones pasivas ya que su objeto no es la supresión o extinción del incendio.

Los detectores de humo son una de las herramientas más comunes y efectivas para la detección temprana de incendios. Existen diferentes tipos de detectores, como los de

ionización, que son sensibles a las partículas pequeñas producidas por incendios rápidos, y los detectores fotoeléctricos como las barreras OXY, que detectan partículas más grandes de humo, típicas de incendios latentes. Normalmente se disponen de láseres con emisor y receptor bajo cubierta, que emiten alarma cuando el humo impide que el receptor reciba la señal lumínica del emisor.

Los detectores de calor, por su parte, se activan cuando detectan un aumento significativo de la temperatura en el área vigilada, lo cual es útil en entornos donde los detectores de humo podrían dar falsas alarmas debido a la presencia de polvo o vapor.

Una vez que se detecta un incendio, es fundamental alertar rápidamente a los ocupantes de la nave para que puedan evacuar el lugar de forma segura mediante alarmas que deben estar ubicados en lugares estratégicos para garantizar que todos los presentes sean advertidos del peligro. Además, en muchas instalaciones, las alarmas están conectadas a sistemas de monitoreo remoto que alertan automáticamente a los servicios de emergencia, reduciendo el tiempo de respuesta.

Sistemas de extinción:

Estos sistemas están diseñados para extinguir o controlar un incendio una vez que se ha iniciado. Los sistemas de extinción incluyen rociadores automáticos, extintores de agua, espuma o polvo químico seco, BIES (bocas de incendio equipadas), hidrantes, sistemas de extinción por gas inerte. Tienen consideración de protección activa ya que su objeto u fin es el control, supresión y en ciertos casos extinción del incendio.

Quizá, el elemento más característico y común de sistemas de extinción en naves de almacenamiento logístico son los rociadores automáticos. Estos sistemas están diseñados para activarse de manera automática cuando la temperatura en el área protegida alcanza un umbral específico, liberando agua sobre el fuego para sofocar las llamas. Los sistemas de rociadores pueden ser de diferentes tipos, como los de tubería húmeda, donde el agua está

siempre presente en las tuberías y se libera inmediatamente cuando se activa el sistema, o los de tubería seca, donde el agua se libera solo cuando se detecta un incendio, lo que es útil en áreas donde las tuberías podrían congelarse. Normalmente además suelen disponerse de diferentes circuitos, no teniendo que saltar el completo de rociadores de toda la nave.



Ilustración 2: Rociador o Sprinkler.

En algunos casos y como ya se ha comentado previamente, donde el uso de agua podría causar daños a los bienes almacenados, los sistemas de extinción por gas son una opción preferible. Estos sistemas liberan gases inertes o agentes químicos que sofocan el fuego al reducir el nivel de oxígeno en el ambiente o interrumpir las reacciones químicas necesarias para la combustión. Estos sistemas son especialmente útiles en almacenes que contienen equipos electrónicos sensibles, documentos importantes o productos donde el agua podría agravar el problema en lugar de solucionarlo. Este tipo de sistemas de extinción es más costoso y tiene mayor trabajo de mantenimiento.

Los extintores portátiles sirven como primer elemento de supresión para las personas que operan en las naves. Aunque no son adecuados para incendios de gran envergadura, los extintores son esenciales para el personal capacitado en la extinción de conatos de incendio en su etapa inicial. Existen diferentes tipos de extintores, como los de polvo químico seco, dióxido de carbono (CO₂), espuma y agua, cada uno de los cuales es adecuado para diferentes clases de incendios, desde incendios de materiales sólidos hasta líquidos inflamables y equipos eléctricos.



Ilustración 3: Extintor.

Las Bocas de Incendio Equipadas (BIES) están diseñadas para proporcionar una intervención rápida en caso de incendio. Consisten en un armario que contiene una manguera de 20 a 30 metros conectada a la red de agua, una válvula de corte para controlar el flujo, una lanza para dirigir el agua y un manómetro para medir la presión. Cubren grandes áreas y permitiendo una acción efectiva y directa contra el fuego en sus primeras etapas.

Sistemas de control de temperaturas y evacuación de humos:

Estos sistemas están diseñados para gestionar el movimiento del humo y el calor en caso de incendio, ayudando a mantener libres de humo las rutas de evacuación y facilitando el trabajo de los equipos de emergencia. Los sistemas de control de humos incluyen exutorios por tiro natural, barreras de humo con el fin de dividir la nave en diferentes depósitos de humo y sistemas de control con el afán de crear zonas de presión positiva para impedir que el humo penetre en zonas críticas.

En algunas naves logísticas se pueden llegar a identificar extractores cuando la mercancía almacenada produce gases nocivos para la salud de las personas que trabajan en ellas. No

obstante, este tipo de extractores no tiene el fin de evacuar humos y no se debería confundir su objeto.

Señalización y diseño de vías de evacuación:

Las vías de evacuación, las señalizaciones y los protocolos de actuación en caso de incendio son también elementos clave en los sistemas de seguridad contra incendios pero se consideran sistemas pasivos. Las salidas deben estar claramente señalizadas y ser accesibles en todo momento, y las rutas de evacuación deben estar libres de obstáculos para permitir una evacuación rápida y segura en caso de incendio. La iluminación de emergencia también es esencial para guiar a las personas hacia las salidas en condiciones de poca visibilidad.



Ilustración 4: Señalética de salida de emergencia.

Los sistemas de comunicación de emergencia ayudan a coordinar las acciones durante un incendio y garantizan que la información llegue eficazmente a los ocupantes y a los equipos de emergencia. Estos sistemas pueden incluir interfonos, teléfonos de emergencia y sistemas de comunicación por radio.

Protocolos de mantenimiento

Los protocolos de mantenimiento y pruebas son esenciales para garantizar que todos los componentes del sistema de PCI funcionen correctamente en caso de emergencia. Esto

incluye inspecciones periódicas (normalmente realizadas por OCAs: Organismos de control autorizado), pruebas funcionales y mantenimiento siguiendo la normativa técnico legal de los dispositivos de detección de humo, alarma, supresión y control.

En conclusión, los sistemas de protección contra incendios son un conjunto integral de tecnologías y procedimientos diseñados para proteger la vida y los bienes en caso de incendio. Hay que considerar que la cuantía económica de los bienes almacenados en naves logísticas es muy alta debido a su gran densidad. Por no comentar el gran número de trabajadores que suele trabajar en su interior. Estos sistemas trabajan de manera coordinada para detectar incendios, alertar a los ocupantes, suprimir el fuego y gestionar el movimiento del humo, contribuyendo a una respuesta efectiva y a la minimización de daños. Ya que en este tipo de instalaciones se almacenan grandes volúmenes de mercancías, muchas de las cuales son inflamables, la implementación de un sistema PCI adecuado y efectivo resulta vital. La concentración de productos y la gran envergadura de estos espacios aumentan la posibilidad de que un incendio, en caso de producirse, se propague rápidamente y cause daños significativos.

La importancia de un sistema de protección contra incendios radica en su capacidad para prevenir incendios, detectarlos a tiempo y actuar de manera inmediata para controlarlos o extinguirlos. Además, es un requisito legal en muchos países y debe cumplir con normativas específicas como las establecidas por la NFPA (National Fire Protection Association) en Estados Unidos o las normas UNE-EN en España. Estas normativas dictan los criterios mínimos que deben cumplir los sistemas de detección, alarma y extinción de incendios, garantizando su eficacia y fiabilidad.

El diseño y de las protecciones contra incendios un sistema PCI en una nave de almacenamiento logístico deben ser cuidadosamente planificados y personalizados según las características específicas de la instalación. El primer paso en este proceso es realizar un análisis de riesgos exhaustivo. Este análisis identifica los posibles peligros de incendio dentro de la nave, evalúa la probabilidad de que ocurran y determina las posibles consecuencias.

Factores como la naturaleza de las mercancías almacenadas, la disposición del almacén, los equipos y maquinaria utilizados, y las condiciones ambientales deben ser considerados en este análisis. Por ejemplo, en almacenes que almacenan productos químicos o materiales inflamables, es crucial diseñar un sistema PCI que incluya detectores y sistemas de extinción adecuados para esos materiales específicos. La configuración del almacén también influye en la propagación del fuego, por lo que la disposición de los estantes, la altura de almacenamiento y la distancia entre ellos son factores que deben tenerse en cuenta al diseñar el sistema de extinción. Además, los equipos y la maquinaria, como los montacargas eléctricos o las máquinas de embalaje, pueden ser fuentes de ignición potenciales si no se mantienen correctamente.

Después del análisis de riesgos, se procede al diseño del sistema de detección. Este sistema debe cubrir toda la superficie de la nave, incluidas las áreas críticas como las zonas de carga y descarga, oficinas, salas de máquinas y áreas de almacenamiento de materiales peligrosos. La ubicación de los detectores debe estar basada en el análisis de riesgos y la configuración del almacén, para garantizar una detección temprana y efectiva.

Además y como ya se ha comentado, es importante prever y diseñar una buena instalación de sistemas de monitoreo y protocolos de actuación que permitan la detección temprana de incendios incluso cuando la nave no está ocupada, como durante las noches o los fines de semana. Estos sistemas pueden estar conectados a centros de control remoto que supervisan la actividad en la nave y envían alertas en caso de detectar cualquier anomalía.

El cálculo de los sistemas de extinción debe considerar los tipos de riesgos identificados y las características del almacén. Además, el personal debe recibir formación periódica sobre el uso de extintores portátiles y otros equipos de emergencia, así como en la implementación de los protocolos de evacuación en caso de incendio.

En resumen, un sistema PCI en una nave de almacenamiento logístico debe ser un conjunto integral de medidas de detección, alarma y extinción de incendios, diseñado específicamente para las características de la instalación y los riesgos asociados. La correcta implementación

de estos sistemas no solo es una obligación legal en muchas jurisdicciones, sino también una inversión en la seguridad de las personas, los bienes almacenados y la continuidad operativa de la empresa. La prevención, detección y extinción temprana de incendios son los pilares fundamentales para minimizar los daños y garantizar la seguridad en naves de almacenamiento logístico.

1.3.- Sistemas de control de temperaturas y evacuación de humos (SCTEH) en naves logísticas

Son sistemas diseñados para gestionar el movimiento del humo y el calor en caso de incendio, ayudando a mantener libres de humo las rutas de evacuación y facilitando el trabajo de los equipos de emergencia.

Los sistemas de control de humos más empleados son exutorios por tiro natural, barreras de humo con el fin de dividir la nave en diferentes depósitos de humo y sistemas de control con el afán de crear zonas de presión positiva para impedir que el humo penetre en zonas críticas.



Ilustración 5: Exutorio de apertura automática de ventana.

La importancia de los sistemas de control de temperaturas y evacuación de humos radica en su capacidad para proporcionar un ambiente más seguro durante un incendio. Estos sistemas ayudan a mantener las rutas de evacuación libres de humo, mejorando la visibilidad y permitiendo que las personas salgan del edificio de manera segura. Además, facilitan el trabajo de los bomberos al reducir la concentración de humo en las áreas donde están operando, lo que les permite localizar y extinguir el fuego más rápidamente. Asimismo, el control efectivo del humo puede ayudar a minimizar los daños estructurales al evitar que el calor y los gases tóxicos se acumulen en el techo, lo que podría comprometer la integridad del edificio. El diseño de un sistema de control de temperaturas y evacuación de humos en una nave logística depende de varios factores, entre ellos la disposición del almacén, los materiales almacenados, la altura del techo y las normativas locales. Las naves logísticas suelen ser grandes, con techos altos y áreas abiertas extensas, lo que genera desafíos específicos en la gestión del humo y las temperaturas en caso de incendio. El humo no solo reduce la visibilidad, lo que dificulta la evacuación de las personas, sino que también contiene gases tóxicos que pueden causar asfixia o intoxicación en los ocupantes y puede aumentar la temperatura ambiente, lo que puede llevar al colapso estructural del edificio si no se gestiona adecuadamente.

Los exutorios, que se abren automáticamente en caso de incendio, se basan en la diferencia de presión entre el interior y el exterior del edificio para ventilar el humo de manera natural. Su efectividad depende de las condiciones ambientales externas, como el viento y la temperatura, lo que puede limitar su capacidad para manejar grandes volúmenes de humo en algunos casos. Sin embargo, son una solución eficaz en naves con techos altos y donde el riesgo de acumulación de humo es menor.

Por otro lado, los sistemas activos de extracción de humos utilizan ventiladores mecánicos para extraer el humo de manera controlada y constante. Estos sistemas son más complejos y costosos, pero ofrecen una mayor fiabilidad y capacidad de extracción, lo que los hace ideales para naves logísticas grandes o donde se almacenan materiales especialmente peligrosos. Los ventiladores de extracción se colocan estratégicamente en el techo o en las paredes superiores y se activan automáticamente cuando se detecta un incendio. Estos ventiladores están diseñados para manejar grandes volúmenes de humo y mantener una velocidad de

extracción constante, lo que garantiza que el humo no se acumule en el interior del edificio y que las rutas de evacuación se mantengan despejadas.

Las barreras de humos segmentan el espacio en diferentes depósitos de humos y dirigir el humo hacia las áreas de extracción, estas barreras permiten un control más efectivo del humo y protegen las áreas críticas, como las rutas de evacuación o las salas de control. En naves de almacenamiento logístico, donde el espacio es a menudo abierto y sin divisiones, las barreras de humo son muy importantes para evitar que el humo se disperse de manera incontrolada y ponga en peligro a las personas en diferentes partes de las naves.



Ilustración 6: Barreras de humos.

Los sistemas de control de temperatura y humos en naves logísticas es la integración con otros sistemas de protección contra incendios, como los sistemas de detección y extinción de incendios. La detección temprana de un incendio es fundamental para activar el sistema de control de humos en el momento adecuado, asegurando que el humo no se propague antes de que se inicie la extracción o la presurización. Los detectores de humo y calor, así como los sistemas de alarma, deben estar coordinados con el sistema de control de humos para garantizar una respuesta rápida y efectiva.

En España, la normativa UNE 23585 establece los requisitos para los sistemas de control de humos y calor en edificios, incluyendo naves de almacenamiento. Esta normativa especifica aspectos como el dimensionamiento de los sistemas de extracción, la ubicación de los puntos de extracción, el caudal de aire necesario y las pruebas de funcionamiento que deben realizarse para garantizar la eficacia del sistema. Cumplir con estas normativas no solo es una obligación legal, sino que también garantiza que el sistema de control de humos sea efectivo en situaciones de emergencia y proteja tanto a las personas como a los bienes almacenados.

La instalación y mantenimiento de los sistemas de control de humos también son aspectos críticos que no deben pasarse por alto. Un sistema mal instalado o que no se mantenga adecuadamente puede fallar en el momento más crítico, poniendo en peligro la seguridad de la nave y sus ocupantes. Por ello, es fundamental que la instalación sea realizada por profesionales cualificados y que se realicen inspecciones y pruebas periódicas para asegurarse de que el sistema funcione correctamente. Los sistemas de control de humos deben ser revisados regularmente para garantizar que todos sus componentes, como ventiladores, cortinas de humo y sistemas de control, estén en buen estado y funcionen correctamente. Esto incluye la limpieza de los conductos de extracción para evitar la acumulación de polvo y residuos que podrían obstruir el flujo de aire, así como la verificación del estado de las barreras de humo y las pruebas de los sistemas de presurización. Un mantenimiento preventivo adecuado no solo garantiza la efectividad del sistema, sino que también puede prolongar su vida útil y reducir la necesidad de reparaciones costosas.

A medida que la tecnología avanza, los sistemas de control de humos también están evolucionando. Hoy en día, es posible encontrar sistemas de control de humos inteligentes que utilizan sensores avanzados y algoritmos de control para ajustar el funcionamiento del sistema en tiempo real, según las condiciones del incendio. Estos sistemas pueden detectar la ubicación y la intensidad del incendio y ajustar la velocidad de los ventiladores o la apertura de las barreras de humo en consecuencia, optimizando la extracción del humo y garantizando que las áreas críticas se mantengan protegidas. Además, los sistemas inteligentes pueden

integrarse con otras tecnologías de edificios inteligentes, como los sistemas de gestión de energía, para proporcionar un control más eficiente y sostenible.

Un ejemplo de innovación y objeto principal de este trabajo es el uso de modelos de simulación por ordenador para diseñar y optimizar los sistemas de control de humos en naves logísticas. Estos modelos permiten simular el comportamiento del humo en caso de incendio, teniendo en cuenta factores como la disposición del almacén, el tipo de materiales almacenados y las condiciones ambientales. Con esta información, los ingenieros pueden diseñar sistemas de control de humos que sean más eficaces y que cumplan con las normativas de seguridad mediante soluciones equivalentes a las prescripciones de la normativa establecida. Además, las simulaciones pueden ayudar a identificar posibles puntos débiles en el sistema y a realizar ajustes antes de la instalación, lo que reduce el riesgo de fallos durante un incendio real.

En conclusión, los sistemas de control de temperatura y evacuación de humos en naves de almacenamiento logístico son una parte crucial de la seguridad contra incendios y deben ser diseñados, instalados y mantenidos con el mayor cuidado. Estos sistemas no solo protegen a las personas al mantener las rutas de evacuación despejadas y seguras, sino que también ayudan a minimizar los daños a la estructura del edificio y a los bienes almacenados. La elección entre sistemas de extracción de humos pasivos o activos, sistemas de presurización y barreras de humo dependerá de las características específicas de la nave y de las normativas aplicables. Además, la integración con otros sistemas de protección contra incendios, la utilización de tecnología avanzada y el cumplimiento de las normativas de seguridad son aspectos clave para garantizar la efectividad del sistema de control de humos en situaciones de emergencia.

2.- Descripción de las tecnologías, estado del arte.

La tecnología punta en sistemas de evacuación de humos ha evolucionado significativamente en los últimos años para garantizar una evacuación de humos segura y eficaz en edificios industriales. No obstante, las regulaciones técnicas españolas que recogen los métodos de diseño se basan en normativas que datan de la década del 2000, en concreto, el Real Decreto 2267 de diciembre de 2004, que hace uso de la norma UNE 23585 para regir el diseño y dimensionamiento de las soluciones de control de humos en edificios de uso terciario. La norma UNE 23585 fue publicada por primera vez en 2004, y aunque se revisó ligeramente en el 2017, se puede hipotetizar que no está en línea o adaptada a las tecnologías actuales de sistemas de evacuación y control de humos. Esto nos lleva a inducir que muchas de las instalaciones diseñadas según la norma, sean sobredimensionadas y basadas en métodos antiguo pudiendo optimizarse más utilizando métodos modernos de dimensionamiento basados en soluciones prestacionales. El propio RD 2267 2004, de hecho, menciona en su cuerpo que para el diseño de soluciones de evacuación y control de humos se deberá seguir dicha norma de manera prescriptiva o, basarse en soluciones prestacionales, dando el preámbulo a la utilización de métodos modernos para dicha labor.

El término “solución prestacional” hace referencia a un enfoque que se centra en los resultados deseados o prestaciones esperadas de un sistema, proceso o servicio, en lugar de dictar específicamente cómo se deben lograr esos resultados. La solución prestacional se enfoca en definir claramente los resultados que se esperan alcanzar, en lugar de establecer métodos específicos para lograr esos resultados. Esto implica identificar los objetivos finales que se desean lograr, como la eficacia en el control de temperaturas y la evacuación de humos en un sistema de seguridad contra incendios. En lugar de imponer un conjunto predeterminado de acciones o tecnologías, la solución prestacional permite flexibilidad en la selección de métodos y enfoques para lograr los resultados deseados. Esto simboliza libertad para elegir las estrategias más adecuadas y eficientes para cumplir con los objetivos establecidos. Dado que la solución prestacional no está limitada por métodos específicos, puede adaptarse a las circunstancias cambiantes o a las necesidades específicas de un

contexto determinado. La efectividad de una solución prestacional se evalúa en función de su capacidad para cumplir con los resultados deseados, en lugar de la conformidad con un conjunto de métodos o estándares. Esto pone el foco en la eficacia y la eficiencia en la entrega de resultados tangibles.

Una solución prescriptiva se refiere a un enfoque que especifica detalladamente los métodos, procesos o tecnologías específicas que deben seguirse para alcanzar los objetivos deseados. En contraste con una solución prestacional que se enfoca en los resultados, una solución prescriptiva proporciona instrucciones específicas sobre qué hacer y cómo hacerlo. Esto implica una detallada especificación de los pasos a seguir, las tecnologías a emplear y los criterios de desempeño que deben cumplirse. Una solución prescriptiva ofrece menos margen de maniobra para la capacidad de adaptación o la variación en la implementación. Los métodos y procesos están prescritos en detalle, lo que limita las opciones disponibles para los ejecutores del proyecto.

No obstante, una solución prescriptiva, al proporcionar instrucciones detalladas, una solución prescriptiva ofrece claridad y consistencia del proyecto. Esto minimiza la ambigüedad y reduce el riesgo de malentendidos. Por tanto, de ello se puede inducir, que las soluciones prescriptivas representan una opción cómoda para aquellos técnicos responsables directamente del desarrollo de proyectos. Cuestión que entra en conflicto directo con las ventajas, eficiencias y espíritu de innovación que representan las soluciones prestacionales. Así mismo, al especificar los métodos y procesos que deben seguirse, una solución prescriptiva puede garantizar un nivel de calidad y uniformidad en la ejecución del proyecto. Esto es especialmente importante en contextos donde la coherencia y la precisión son críticas. Por todo ello y como bien se ha detallado previamente, las soluciones prescriptivas están diseñadas para cumplir con estándares o regulaciones específicas donde la responsabilidad apremia. Al prescribir métodos y tecnologías que son conocidos por cumplir con estos estándares, se garantiza la homogeneidad y la seguridad, sustentada en una reducción de la incertidumbre y el riesgo asociado con la ejecución del proyecto al ser detallados los métodos y procesos.

Se puede emplear la analogía de que las soluciones prescriptivas representan una metodología de trabajo más conservadora mientras que las soluciones prestacionales representan una metodología de trabajo más liberal.

De esta forma, con objeto de buscar soluciones prestacionales cada vez óptimas para el diseño de SCTEH (Sistemas de control de temperatura y extracción de humos que se persigue), El auge de los softwares de simulación en el diseño de Sistemas de Control de Temperatura y Evacuación de Humos (SCTEH) en naves logísticas ha revolucionado la forma en que se aborda la seguridad contra incendios en estos entornos. Dado que las naves logísticas suelen ser estructuras de gran tamaño y complejidad, el control del humo y el calor es crucial para proteger tanto a las personas como a los bienes almacenados. Los softwares de simulación permiten a los ingenieros modelar el comportamiento del humo y el calor en diferentes escenarios de incendio, lo que les ayuda a optimizar la ubicación y el diseño de sistemas de ventilación, extractores de humo y barreras de contención. Estos programas simulan condiciones reales, evaluando cómo se distribuirán el humo y el calor a lo largo del tiempo, y permiten identificar posibles puntos de fallo antes de que el sistema se implemente en el mundo real. Además, las simulaciones ofrecen la posibilidad de realizar pruebas de diferentes configuraciones de sistemas sin necesidad de construir prototipos físicos, lo que reduce significativamente los costos y el tiempo de desarrollo. En resumen, el uso de software de simulación en el diseño de SCTEH no solo mejora la eficiencia y seguridad de los sistemas, sino que también permite a las empresas cumplir con normativas más estrictas, garantizar la protección de sus instalaciones y, en última instancia, proteger vidas humanas.

Uno de los softwares más utilizados para la simulación de este tipo de condiciones de incendio es FDS. Fire Dynamics Simulator (FDS) es un software avanzado de simulación de incendios desarrollado por el NIST, utilizado para modelar la dinámica del fuego y el comportamiento del humo en entornos cerrados. Basado en la dinámica de fluidos computacional (CFD), FDS simula con precisión la propagación del calor, el movimiento de gases tóxicos y la interacción del fuego con los materiales en un espacio determinado. Esto permite a los ingenieros evaluar

cómo un incendio se desarrollará en diferentes escenarios y cómo los sistemas de control, como la ventilación y la evacuación de humos, funcionarán en situaciones reales. FDS es especialmente valioso en el diseño y análisis de sistemas de seguridad contra incendios en edificios complejos, como naves logísticas, ya que facilita la optimización de las estrategias de evacuación de humo y control de temperatura, ayudando a cumplir con normativas internacionales y mejorando la seguridad global de las instalaciones. Además, el software permite realizar simulaciones detalladas que minimizan la necesidad de pruebas físicas, lo que reduce costos y tiempos de implementación.

Por otro lado, existen interfaces gráficas que facilitan el modelado del entorno de estudio objeto para las simulaciones pertinentes. Una de las interfaces gráficas más conocidas es PyroSim, la cual es gráfica avanzada para Fire Dynamics Simulator (FDS), diseñada para facilitar la creación, edición y visualización de simulaciones de incendios complejas. PyroSim simplifica el proceso de modelado al proporcionar una interfaz de usuario intuitiva, que permite a los ingenieros y diseñadores crear geometrías detalladas de edificios, definir materiales y configurar condiciones de incendio de manera visual. Además, PyroSim ofrece herramientas para configurar y analizar sistemas de ventilación y evacuación de humos, permitiendo realizar simulaciones detalladas sin la necesidad de interactuar directamente con el código de FDS. Esto hace que el proceso de simulación sea más accesible y eficiente, especialmente en proyectos de gran escala, como naves logísticas y otros entornos industriales complejos. Además, PyroSim permite visualizar los resultados de las simulaciones en 3D, facilitando la interpretación de datos y la toma de decisiones para optimizar la seguridad contra incendios y cumplir con normativas internacionales.



Ilustración 7: Logotipo PyroSim

PyroSim y FDS son ampliamente utilizados a nivel global en la ingeniería de seguridad contra incendios, especialmente en proyectos complejos como naves logísticas, aeropuertos, túneles, rascacielos y centros comerciales. Estos softwares son preferidos por su capacidad para modelar con precisión el comportamiento del fuego, la propagación del humo y el calor, y la efectividad de los sistemas de ventilación y evacuación de humos en escenarios realistas.

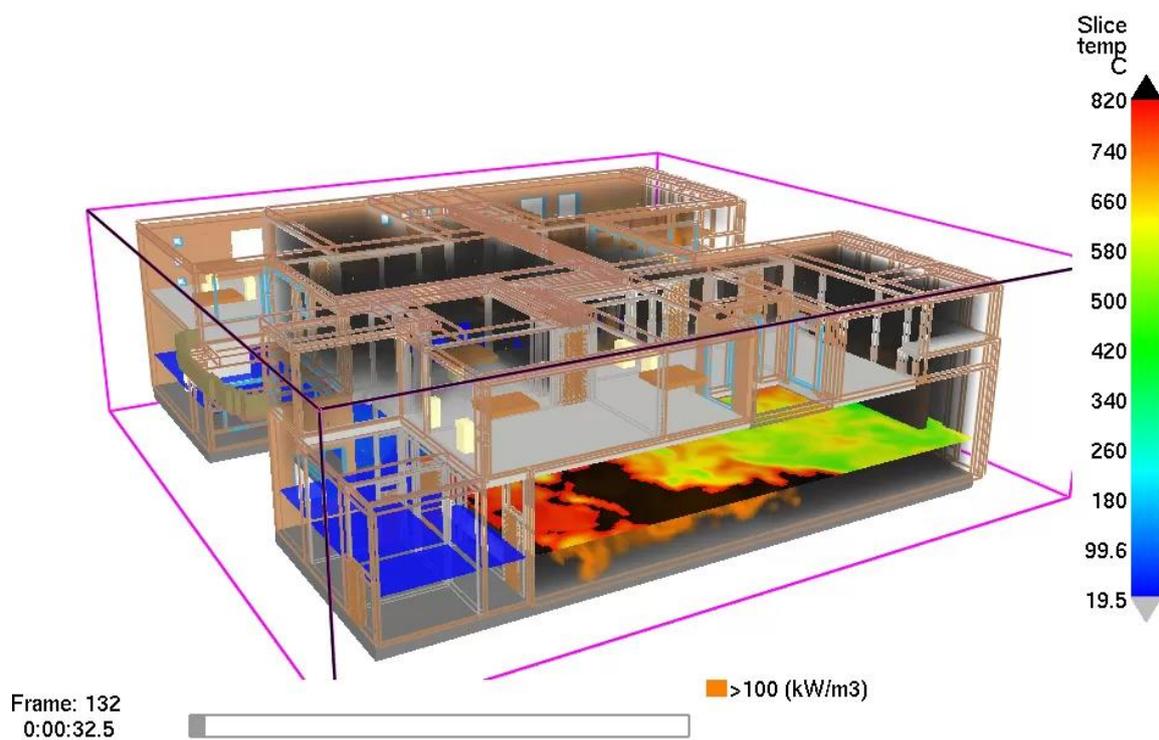


Ilustración 8: Ejemplo simulación PyroSim

FDS es reconocido por su precisión en la simulación de la dinámica de incendios, y su uso se ha extendido entre ingenieros de protección contra incendios, investigadores, consultores y autoridades reguladoras. Es un estándar en el análisis de riesgos y el diseño de sistemas de protección contra incendios, siendo fundamental en la validación de estrategias de seguridad y en la presentación de resultados ante las autoridades.

PyroSim, al ser una interfaz gráfica para FDS, ha facilitado su adopción entre profesionales que no están familiarizados con la programación, lo que ha incrementado su uso en la industria. Gracias a su facilidad de uso y su capacidad para visualizar resultados en 3D, PyroSim es utilizado en empresas de ingeniería y consultoría para diseñar, probar y optimizar soluciones

de seguridad contra incendios, cumpliendo con normativas internacionales y mejorando la seguridad en edificaciones de alta complejidad.

En resumen, la combinación de FDS y PyroSim ha alcanzado una gran extensión de uso a nivel mundial debido a su capacidad para manejar simulaciones detalladas y complejas de incendios, proporcionando herramientas esenciales para la protección de grandes infraestructuras y el cumplimiento normativo en materia de seguridad contra incendios.

3.- Descripción del modelo desarrollado

El modelo que se va a desarrollar a lo largo de este trabajo se divide principalmente en dos troncos:

1. La solución de un Sistema de Control de Temperaturas y Evacuación de Humos mediante el seguimiento prescriptivo de la norma UNE 2385 según dos opciones.

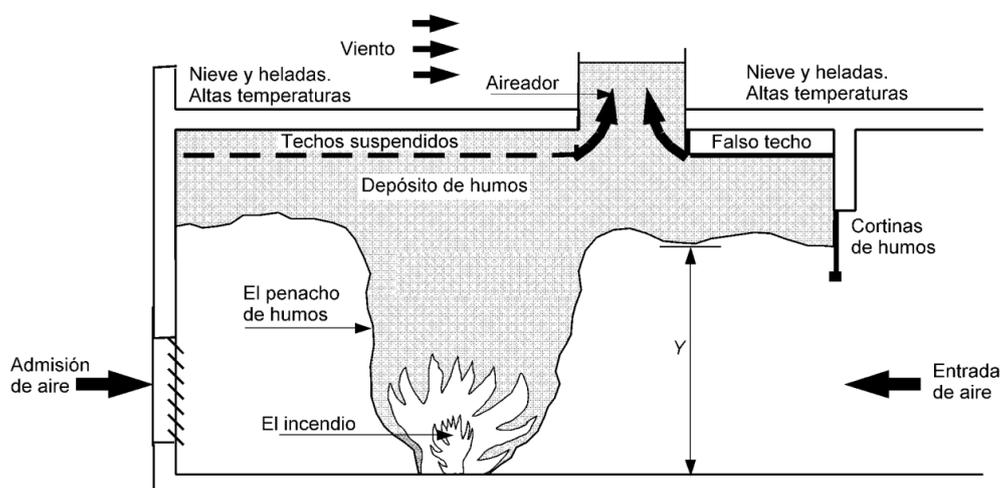


Ilustración 9: Incendio y Penacho, norma UNE 23585.

- a. Almacenamiento en altura a $h=10,5$ m con altura libre de humos de $Y=2/3$ h m considerando cortinas de humo bajo cumbrera hasta dicha altura y depósitos correspondientes resultado de la división de las cortinas.
- b. Almacenamiento en altura a $h=10,5$ m con altura libre de humos de $Y=h+0,5$ m considerando cortinas de humo bajo cumbrera hasta dicha altura y depósitos de humos correspondientes resultado de la división de las cortinas.

Ambas opciones están recogidas por la norma. Es importante destacar, aunque se hará a lo largo del trabajo que la solución prescriptiva de la norma no recoge la opción de aportación de aire exterior a través de portones, muelles y otras aperturas verticales. A lo largo del proyecto se entrará en más detalle.

2. Considerar una solución alternativa a las dos anteriores la cual se basa en emplear la solución prescriptiva para almacenamiento en altura a $h=10,5$ m con altura libre de humos de $Y=2/3$ h m sin considerar cortinas de humo y por lo tanto sus derivados depósitos correspondientes pero considerando portones auxiliares y muelles de carga como elementos de aportación de aire. Esta solución será la evaluada como prestacional

Para realizar este modelo se va a emplear una nave objeto de estudio. Esta nave se definirá en el apartado 3.2. de este trabajo.

3.1.- Objetivos, especificación y datos a analizar.

El objetivo principal es evaluar el desempeño de la solución prestacional que se toma como alternativa frente a las dos soluciones prescriptivas desarrolladas. Esto permitirá comparar, valorar y juzgar la eficacia de adoptar soluciones equivalentes a la norma.

Para ello, se modelarán en PyroSim las tres soluciones comentadas en el punto 3 y se empleará como incendio de diseño el establecido en la norma UNE más restrictivo para cada una de las soluciones. Posteriormente se simulará el incendio mediante FDS y se analizarán los resultados.

PyroSim permite establecer aquellos datos y variables que se desean estudiar, recogidos en puntos, planos o espacios concretos. Para valorar y comparar, en este caso vamos a emplear parámetros de temperatura y visibilidad en diferentes planos cercanos al incendio, donde resulta de interés analizar la evolución de estas variables.

Esto nos permitirá sacar conclusiones sobre el comportamiento del incendio en las diferentes soluciones.

La medición del parámetro temperatura en simulaciones de incendios es crucial para comprender el comportamiento del fuego, ya que proporciona información detallada sobre cómo se desarrolla y propaga el incendio en función de las condiciones térmicas. Esta información es esencial para diseñar y calibrar sistemas de protección contra incendios, como rociadores automáticos y sistemas de ventilación, asegurando su eficacia en situaciones extremas. Además, permite evaluar la resistencia de materiales y estructuras a altas temperaturas, planificar rutas de evacuación seguras y optimizar la efectividad de los sistemas de control de humos, garantizando la seguridad de los ocupantes y la integridad de los bienes. En conjunto, la medición de la temperatura en simulaciones contribuye a crear entornos más seguros y resilientes frente a incendios.

La medición del parámetro visibilidad en simulaciones de incendios es crucial para evaluar cómo el humo y otros productos de la combustión afectan la claridad y el entorno dentro de un edificio durante un incendio. La unidad de medida para la visibilidad en el estudio de incendio en este trabajo se va a realizar en metros. Este valor representa la distancia máxima a la que una persona puede ver un objeto con claridad en presencia de humo. La visibilidad reducida puede hacer que las rutas de evacuación sean difíciles de identificar, lo que pone en riesgo la seguridad de los ocupantes al dificultar su salida segura. Además, una visibilidad comprometida puede complicar las operaciones de los equipos de emergencia al limitar su capacidad para acceder y combatir el incendio de manera eficiente. Al medir la visibilidad, se pueden diseñar estrategias efectivas de ventilación y control de humos, así como sistemas de iluminación y señalización adecuados, para asegurar que las áreas críticas se mantengan visibles y accesibles durante un incendio. En conjunto, la evaluación de la visibilidad en simulaciones ayuda a mejorar la seguridad general y la efectividad en la gestión de emergencias, facilitando una evacuación más rápida y segura y optimizando la respuesta ante incendios.

Por último y en añadido, se realizará una comparativa económica del coste de inversión de todas las soluciones para analizar y concluir sobre el impacto económico de adoptar una solución u otra.

3.2. - Nave objeto de estudio

Para desarrollar y analizar las diferentes soluciones para un sistema de control de temperatura y evacuación de humos a lo largo de este trabajo, se va a emplear una nave logística estándar como objeto de estudio. A continuación, se definen sus características básicas, profundizando en los aspectos regulados por el RD 2267/2004 (RSCIEI)

Cuadro de superficies / alturas

Tabla 1: Cuadro de superficies y alturas nave objeto de estudio.

Nave		
Almacén		11.633,07 m ²
Vestuarios + Oficinas	Planta baja	262,56 m ²
	Planta primera	262,56 m ²
	Suma	525,09 m ²
Total superficie construida		12.158,17 m ²
Superficie ocupación planta		11.895,62 m ²
Altura Libre		11,86 m
Altura cumbre		13,77 m
Altura media punto extracción (H)		13,365 m

Vistas nave

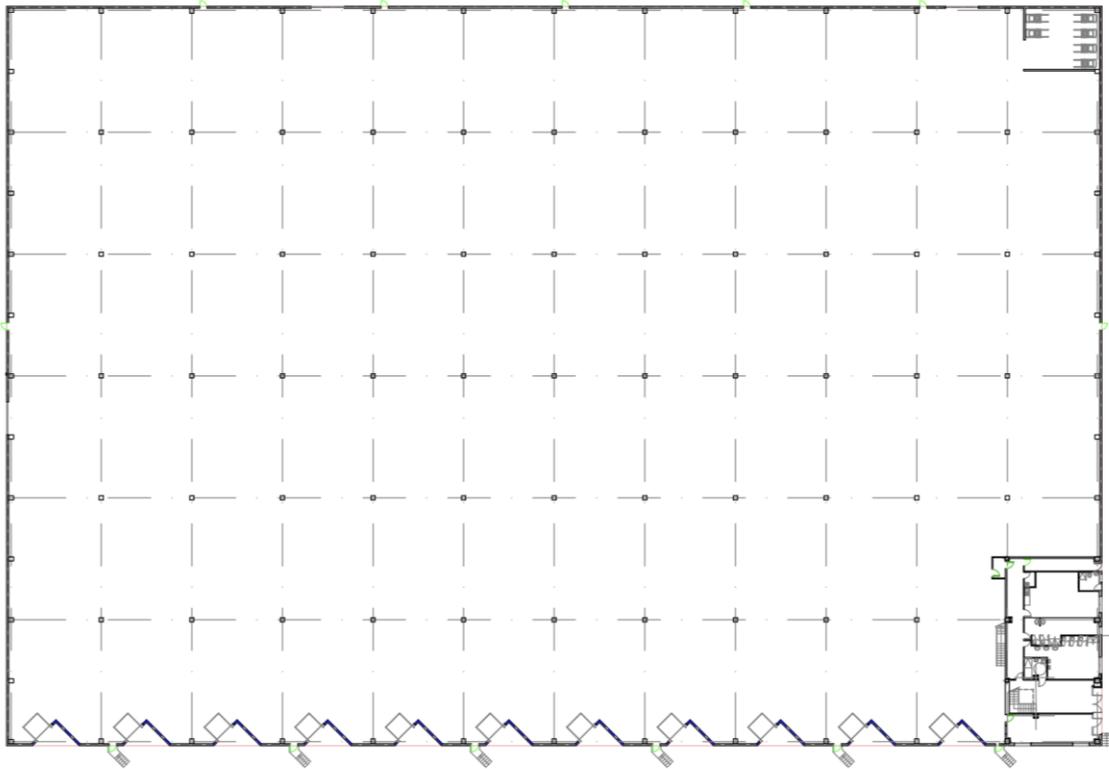


Ilustración 10: Vista planta nave. Cotas en Anexos.

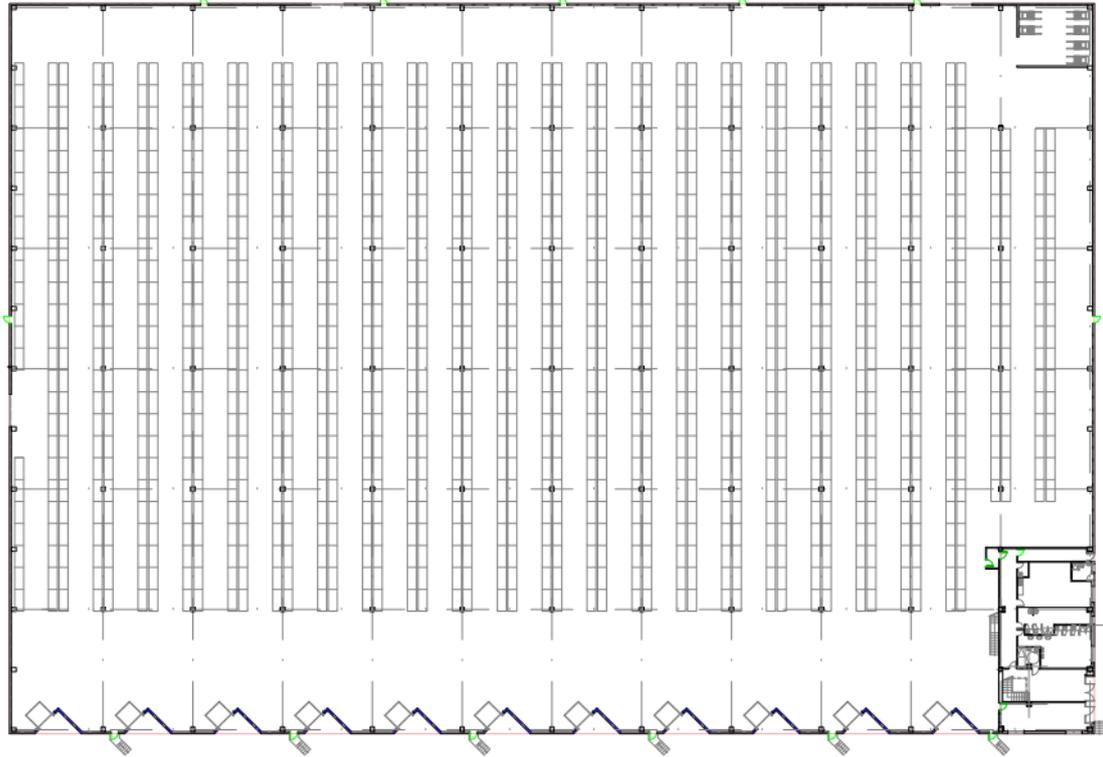


Ilustración 11: Vista planta nave con implantación. Cotas en Anexos.

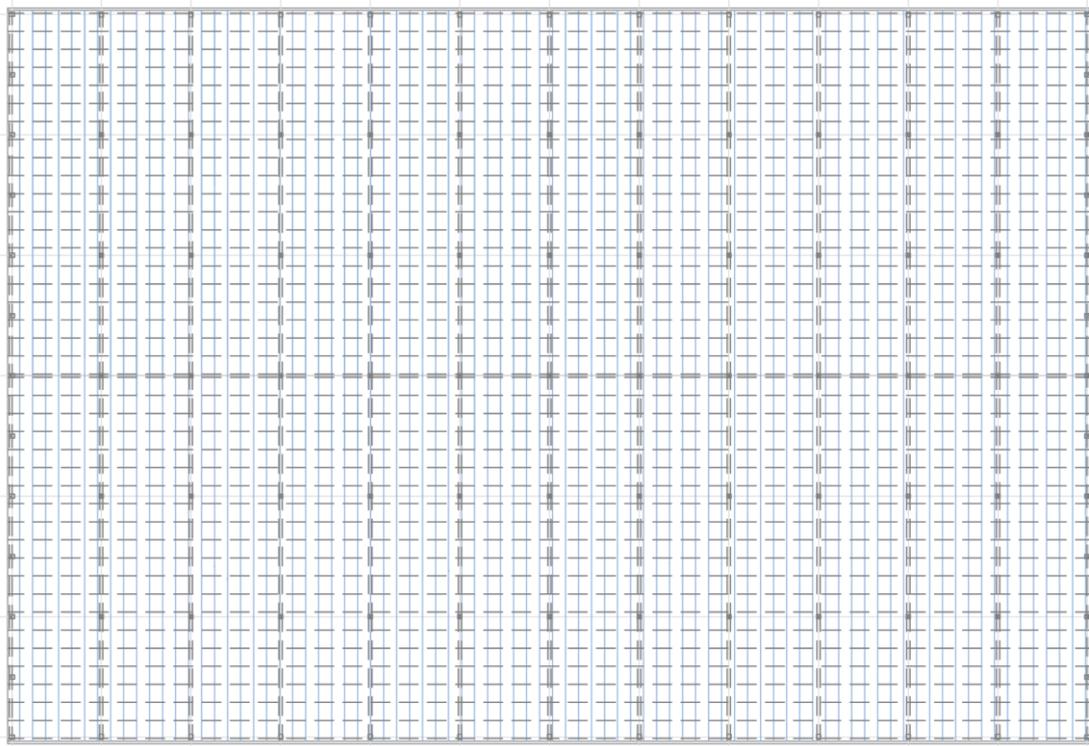


Ilustración 12: Vista cubierta nave. Cotas en Anexos.



Ilustración 13: Vista alzados nave. Cotas en Anexos.

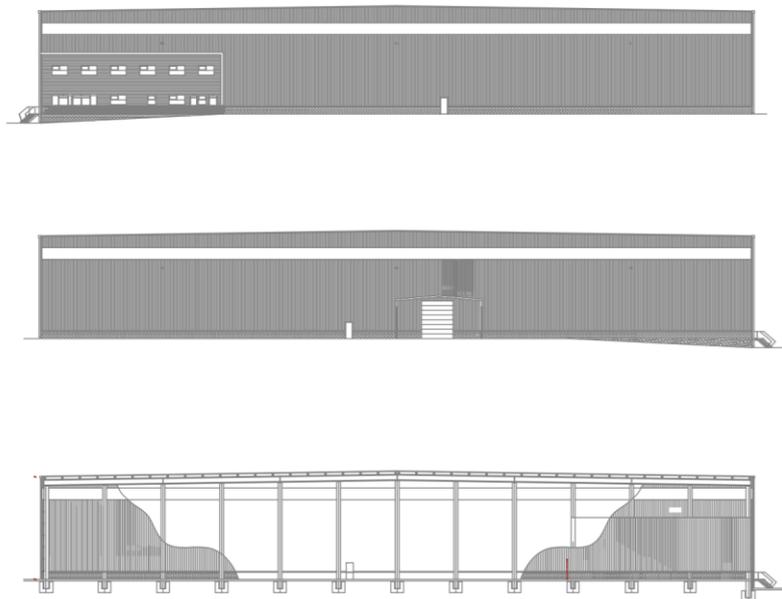


Ilustración 14: Vista perfiles nave. Cotas en Anexos.

Funcionalidad:

La nave estará planteada para almacenamiento paletizado tradicional en estanterías cuya densidad de carga de fuego no superará los 800 Mcal/m² o 3.400 MJ/m² lo que equivale, considerando la superficie del almacén a 9.306.456 Mcal o 39.552.438 MJ totales. No se estudiará la posibilidad de almacenamiento de mercancías especiales, como por ejemplo APQ (almacenamientos de productos químicos, regidos por la instrucción complementaria MIE APQ 379/2001), almacenamiento de depósitos petrolíferos (regidos por RD 2085/1997) u otras funcionalidades distintas del almacenamiento industrial.

Clasificación y tipología:

La edificación será categorizada, según RD2267/2004 (RSCIEI), como **TIPO C** (“*El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio, o varios, en su caso, que está a una distancia mayor de tres metros del edificio más próximo de otros establecimientos. Dicha distancia deberá estar libre de mercancías combustibles o elementos intermedios susceptibles de propagar el incendio*”) para **cargas de fuego de riesgo intrínseco medio 5**, considerando la tabla 1.3. del reglamento.

Tabla 2: RD 2267/2004 Tabla de riesgo intrínseco.

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

Según la tabla 2.1. RD 2267/2004 la máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio será de 3.500,00 m²

Tabla 3: RD 2267/2004 Riesgo intrínseco sector.

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

No obstante, según la nota (4) de la tabla: *En configuraciones de tipo C, si la actividad lo requiere, el sector de incendios puede tener cualquier superficie, siempre que todo el sector cuente con una instalación fija automática de extinción y la distancia a límites de parcelas con posibilidad de edificar en ellas sea superior a 10 m.*

De esta manera, se considerará un solo sector de incendios, suponiendo que la distancia a límites de otras parcelas con posibilidad de edificar en ellas sea superior a 10 m.

Carga intrínseca de juego disponible a almacenar

Se realiza un cálculo de la carga intrínseca máxima a almacenar que nos ayudará a lo largo del trabajo en las simulaciones correspondientes así como en el modelado.

Hipótesis:

- Carga media de pallet = 1500 kg

- Volumen medio de pallet = volumen total almacenamiento según implantación / número de pallets almacenables según implantación.
- Espacio entre cargas apiladas de 0,5 m
- Conductividad supuesta mercancía de estudio igual a 0,5 (W/(m*K))

Tabla 4: Cálculo carga de fuego intrínseca máxima de la nave y mercancía media.

Límite RD 2267 - 2004 (MJ/m ²)	3.400
Superficie nave (m ²)	11.633
Capacidad calorífica total almacenamiento (MJ)	39.552.438
Volumen total almacenamiento según implantación (m ³)	33.213
Número de pallets	13.668
Volumen medio pallet (m ³)	2,43
Carga media pallet	1.500
Densidad pallet (kg/m ³)	617,28
Calor específico mercancía de estudio (KJ/(Kg*K))	1,77
Conductividad supuesta mercancía de estudio (W/(m*K))	0,50

Síntesis constructiva:

Cimentación:

La cimentación estará compuesta zapatas de hormigón armado, HA-25 N/mm² de resistencia característica y unidas entre sí por vigas riostras de hormigón armado, también de resistencia característica HA-25 N/mm² siguiendo lo especificado en la Instrucción del Hormigón Estructural EDE. La armadura de cimentación y de las vigas riostras será de acero AEH - 500 N

Estructura portante:

La estructura portante de la nave será de hormigón prefabricado, repartida en 13 pórticos a dos aguas con pilares múltiples y pendiente del 1,5%. Los 11 pórticos intermedios contarán

con 7 pilares y luces de 14,82 m. El pórtico frontal y el pórtico trasero contarán con 13 pilares y luces de 7,41 m. La distancia del vano entre pórticos será de 10,95 m.

La tabla 2.2. RD 2267/2004 define la estabilidad al fuego de los elementos estructurales exigida.

Tabla 5: Tabla 2.2. RD 2267/2004 Riesgo Intrínseco y configuraciones edificaciones.

NIVEL DE RIESGO INTRÍNSECO	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante
BAJO	R 120	R 90	R 90	R 60	R 60	R 30
	(EF -120)	(EF - 90)	(EF - 90)	(EF - 60)	(EF - 60)	(EF - 30)
MEDIO	NO ADMITIDO	R 120	R 120	R 90	R 90	R 60
		(EF-120)	(EF-120)	(EF - 90)	(EF - 90)	(EF - 60)
ALTO	NO ADMITIDO	NO ADMITIDO	R 180	R 120	R 120	R 90
			(EF -180)	(EF -120)	(EF -120)	(EF- 90)

No obstante, siguiendo la excepción 4.3: *En edificios de una sola planta con cubierta ligera, cuando la superficie total del sector de incendios esté protegida por una instalación de rociadores automáticos de agua y un sistema de evacuación de humos, los valores de la estabilidad al fuego de las estructuras portantes podrán adoptar los siguientes valores:*

Tabla 2.4.

Tabla 6: Tabla 2.4. RD 2267/2004 Riesgo Intrínseco y configuraciones edificaciones una sola planta

Nivel de riesgo intrínseco	Edificio de una sola planta		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Riesgo bajo	R 60 (EF-60)	NO SE EXIGE	NO SE EXIGE
Riesgo medio	R 90 (EF-90)	R 15 (EF-15)	NO SE EXIGE
Riesgo alto	NO ADMITIDO	R 30 (EF-30)	R15 (EF-15)

Por tanto, la resistencia al fuego de los elementos portantes será:

- Estabilidad al fuego de pilares EF-30
- Estabilidad al fuego de vigas cubierta EF-30

- Estabilidad al fuego de correas EF-60

Solera:

La solera estará compuesta de hormigón de resistencia HA-20 N/mm² de 20 cm de espesor armada con un mallazo de 150*150*6 mm colocado a 10 cm del espesor. La terminación de la cara superior será fratasada y pulida.

Se disponen juntas en toda la superficie formando cuadrículas aproximadamente de 5*5 m.

Cerramientos:

- Fachada:
 - Primer bloque de hormigón hasta la cota +1,00 metros.
 - Chapa de fachada exterior grecada en acabado prelacado con sentido vertical de 0,6 mm de espesor de 40 mm de profundidad
 - Aislamiento térmico intermedio de fibra de vidrio 30 mm de espesor fijado mecánicamente al soporte.
 - Chapa de fachada interior grecada en acabado prelacado con sentido vertical de 0,5 mm de espesor 40 mm de profundidad
- Cubierta:
 - Soporte de chapa grecada de 40 mm de altura con 0,8 mm de espesor en acero galvanizado con acabado prelacado.
 - Aislamiento PIR tipo AISLADECK de 30 mm de espesor fijado mecánicamente al soporte.

- Impermeabilización con lámina de PVC de 1,2 mm de espesor con armadura de tejido de poliéster fijada mecánicamente al soporte y soldada por termofusión en las juntas.

Muelles de carga:

La nave dispondrá de 11 muelles para carga y descarga de mercancías para camiones formados por:

- Plataformas hidráulicas de accionamiento eléctrico con cilindro de elevación y apertura de labio para capacidad máxima de 6 toneladas y de medidas 2,00*3,00 m
- Puertas seccionales de apertura manual por polea de medidas 3,00 * 3,50 m con abrigo situadas en las plataformas hidráulicas

Portones auxiliares:

La nave dispondrá de 3 portones auxiliares para la entrada y salida de maquinaria y aparataje auxiliar con apertura de accionamiento automático y sensores de seguridad. Medidas 4,00 * 4,80 m

Oficinas y Vestuarios:

La nave dispondrá de superficies destinadas a oficinas y vestuarios para los trabajadores del centro. La estructura de las oficinas y vestuarios será también compuesta por elementos prefabricados de hormigón armado, igualando la resistencia al fuego de la estructura portante de la nave.

Instalaciones:

La nave contará con las siguientes instalaciones:

- Instalación de suministro de agua de consumo. No aplica para este trabajo.
- Instalación de saneamiento: pluviales y fecales. No aplica para este trabajo.
- Instalación eléctrica a partir de transformador de abonado. No aplica para este trabajo.
- Instalación de red de datos. No aplica para este trabajo.
- Instalación de climatización en vestuarios y oficinas. No aplica para este trabajo.
- Instalaciones PCI (protección contra incendios)
-

Instalaciones PCI (Protección contra incendios)

La nave contará con las siguientes instalaciones de protección contra incendios:

- Sistema de abastecimiento de agua autónomo.
- Red de rociadores automáticos ESFR K25, Tr 24
- Red de hidrantes.
- Red de bocas de incendio equipadas (BIEs).
- Extintores manuales.
- Sistema de detección y alarma.
- Señalización.
- Sistema de control de temperatura y evacuación de humos (SCTEH) por tiro natural. Este sistema es el objeto de estudio de este trabajo. A lo largo del proyecto se diseñarán las diferentes soluciones y se profundizará en los métodos de diseño, tecnologías, simulaciones y resultados.

3.3.- Desarrollo

3.3.1.- Solución prescriptiva

Se busca la solución prescriptiva de la norma UNE 23585 para el sistema de control de temperaturas y evacuación de humos en la nave objeto de estudio. Se recuerda que está diseñada como una configuración TIPO C para cargas de fuego de riesgo intrínseco medio 5, es decir, que no superarán los 800 Mcal/m² o 3.400 MJ/m². El primer dimensionamiento de la solución se realizará para una altura máxima de almacenamiento de 10,50 m en estanterías autoportantes preparadas para el almacenamiento de mercancías paletizadas.

Según R.D. 2267/2004 para los sectores de incendio con actividades de almacenamiento si están situados en cualquier planta sobre rasante y su nivel de riesgo intrínseco es alto a medio, a razón de un mínimo de superficie aerodinámica de 0,5 m¹/150 m² o fracción, la ventilación será de tiro natural a no ser que la ubicación del sector lo impida. En este caso, la nave objeto de estudio no presenta ningún impedimento, por lo que se considerará por ventilación natural. Constará de los siguientes elementos:

- Aireadores de apertura automática.
- Barreras de humo fijas para compartimentación de depósitos de humos.
- Sistema electroneumático para el accionamiento y control de los aireadores

Dimensionamiento del sistema:

UNE 23585 2017

- "6.6.2.6. Cuando el incendio está directamente debajo del depósito de humos, la superficie máxima de cualquier depósito de humos debe ser de 2.000 m² si se han adoptado aireadores naturales de extracción de humos."
- "6.6.2.8. La máxima longitud de cualquier depósito de humos a lo largo de su eje mayor debe ser de 60 m"

Por tanto, considerando una superficie de almacén de 11.633,07 m² se define dividir el sector del almacén en 6 depósitos de humos ($5 < 11.633,07/2.000 < 6$; $132,35/3 < 60$; $89,88/2 < 60$), separados mediante barreras de humos fija bajo cubierta.

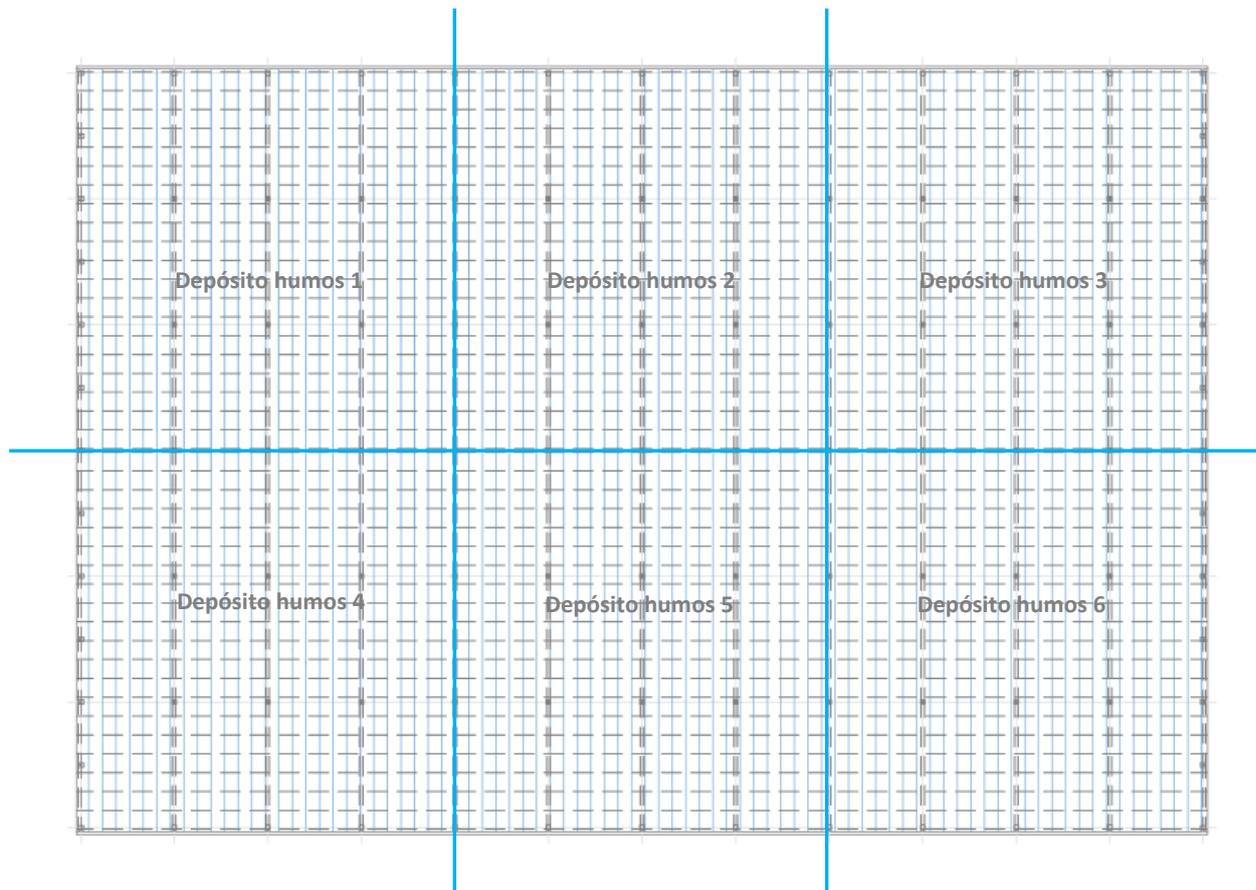


Ilustración 15: Vista planta nave con depósitos de humos diferenciados.

El dimensionamiento prescriptivo según la norma solo permite la consideración de los depósitos colindantes como superficies de aportación de aire. La compartimentación mediante barreras permite garantizar un correcto equilibrio entre las superficies de evacuación de humos y las de aportación de aire, siempre siendo depósitos separados.

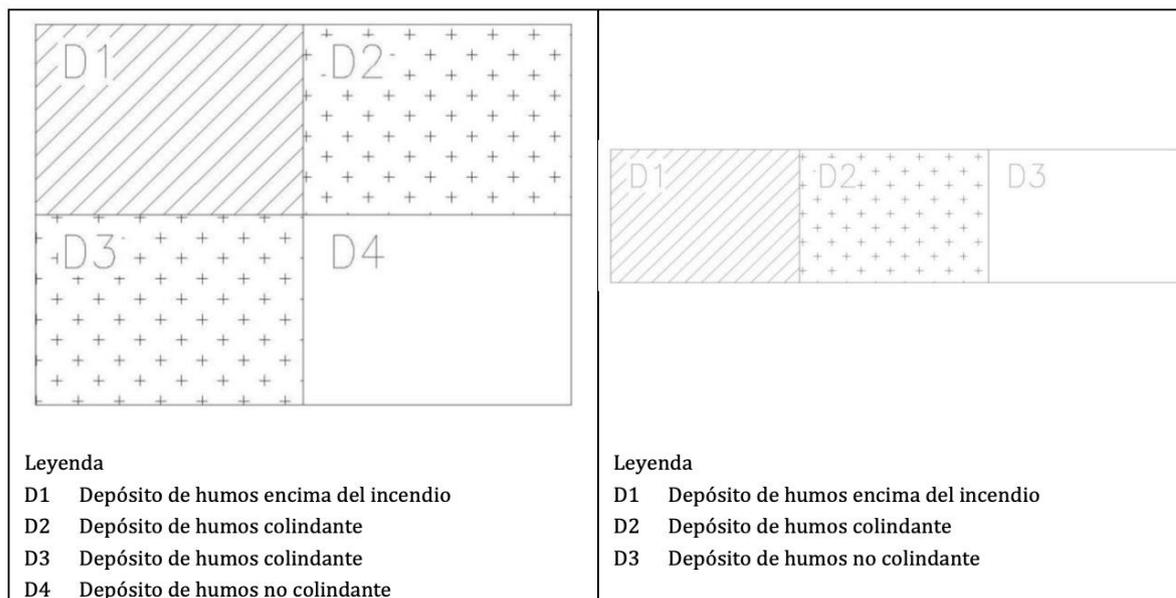


Figura 6.8 (a) – Vista en planta de depósitos de humos colindantes y no colindantes

Figura 6.8 (b) – Vista en planta de depósitos de humos colindantes y no colindantes

Ilustración 16: UNE 23585 Explicación depósitos adyacentes.

UNE 23585 2017

- “6.2.2. i) La altura de ascenso hasta la base de la capa de humos en el depósito de humos debe tener previstos al menos 0,5 m de altura limpia de humos por encima de la parte superior de los géneros almacenados, excepto para los silos en cuyo caso la altura libre de humos es la especificada en la tabla 1.4”

De esto se deriva el estudio de dos opciones de dimensionamiento:

Siendo h la altura máxima de almacenamiento:

1. **Opción 1** Considerando barreras de humo fijas bajo cubierta a $2/3^* h$ metros de altura tal y siguiendo la tabla 1.4 de la norma.
2. **Opción 2** Considerando barreras de humo fijas bajo cubierta a $h + 0,5$ metros de altura.

En la industria, la manera de dimensionamiento más extendida es la opción 2. Esto se debe a que las barreras de humo largas que coinciden en altura con productos almacenados terminan estorbando la distribución de estanterías y con ello su operativa. No obstante y considerando que el objeto de este proyecto es de análisis, se estudiarán las dos opciones para realizar comparativas.

Se considera la existencia de rociadores en altura y se realiza el dimensionamiento en función de la operativa de los mismos. Rociadores conforme norma UNE 12354:

- ESFR K25 (360) Tr 74°C, operativos según la norma hasta:
 - *Altura máxima de techo de 13,7 metros.*
 - *Altura máxima de almacenamiento 12,2 metros.*

Se consideran como sistema de supresión temprana, donde el diseño y tipo de rociador tiene como objeto controlar el incendio, pero también extinguirlo.

A continuación, se define el incendio en situación estable con tamaño apropiado al edificio implicado por depósito de humos sobre el que se va a realizar el diseño de la solución para cada una de las dos opciones, en altura y en suelo, resultando cuatro escenarios. Para cada opción de dimensionamiento, se deberán escoger las condiciones más restrictivas.

Siguiendo la norma UNE 23585 2017:

1.1.- Barreras de humo fijas bajo cubierta a $2/3 \cdot h$ metros de altura (altura libre de humos) e incendio en altura

Por depósito:

- Altura del depósito (**H**) = **13,365 (m)**

- Altura de almacenamiento (**h**) = **10,50 (m)**
- Anchura de estanterías (**w**) = **2,4 (m)**
- Flujo de calor liberado (**q_f**) = **250 (kW/m²)** (“tabla 1.4 UNE 23585 2017”)
- Temperatura ambiente (**T_{amb}**) = **293 (K)** (“temperatura media considerada”)
- Coeficiente de descarga según tipo aireador **C_v** = **0,65 (adimensional)** (“según aireadores tipo lama”)
- Coeficiente de descarga de una abertura de entrada de aire de alimentación **C_i** = **0,6 (adimensional)**
- Area del incendio considerado (**A_f**) = $(4/3) * h * (w + 0,18 * h) = \mathbf{60,06 (m^2)}$ (“tabla 1.4”)
- Perímetro del incendio considerado (**P**) = $2 * (w + 4*x) = \mathbf{19,92 (m)}$ (“tabla 1.4”)
- Capa libre de humo (**Y**) = $2/3*h = \mathbf{7 (m)}$
- Profundidad media capa humos (**d_i**) = $H - Y = \mathbf{6,365 m}$
- Coeficiente de caudal de entrada para un gran penacho de humos de incendio (**C_e**) = **0,188 (adimensional)** (“Anexo A UNE 23585 2017: Derrame del penacho de humos directamente desde el incendio dentro de un depósito de humos para recintos de gran espacio donde el techo está muy por encima del incendio”)
- Masa de humos (**M_f**) = $C_e * P * Y^{(3/2)} = \mathbf{69,36 (kg/s)}$ (“Anexo A”)

*“6.2.2. d) el calor convectivo (Q_f) transportado por los gases de los humos que penetran en el depósito de humos, se debe tomar como 0,8 veces el valor del calor emitido (q_f*A_f) predeterminado para el modelo de incendio de diseño, a menos que el proyectista pueda demostrar hechos o razones que aconsejen el uso de un valor diferente.”*

- Calor liberado por el incendio (**Q_f**) = $0,8 * A_f * q_f = \mathbf{12.012,00 KW}$
- Incremento de temperatura de la capa de humo por encima de la del ambiente (**Θ_f**) = $Q_f / (c * M_f) = \mathbf{171,14 (°C)}$ (“E.1 Anexo E”)
 - o Donde **c** (1,012) es el calor específico del aire a presión constante (kJ/(kg*K))

- Temperatura capa de humos (T_f) = **74 (°C)**

Se considera la temperatura de activación de los rociadores si la temperatura ambiente considerada más el incremento de la capa de humo por encima de la del ambiente resulta mayor. En caso contrario, se consideraría la temperatura ambiente más el incremento de temperatura.

- Diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de la capa de humos (T_{dif}) = **54,15 (°C)**
- Superficie aireación aerodinámica ($A_v C_v$) = **14,90 m²**
- Superficie aireación geométrica (A_v) = **22,92 m²**

Según ecuación 6 del anexo E:

Ecuación 1: Ecuación 6 Anexo E UNE 23585.

$$A_{vtot} \cdot C_v = \frac{M_1 \cdot T_1}{\left[2 \cdot \rho_{amb}^2 \cdot g \cdot d_1 \cdot \Theta_1 \cdot T_{amb} - \frac{M_1^2 \cdot T_1 \cdot T_{amb}}{[A_i \cdot C_i]^2} \right]^{0,5}}$$

Donde

- Superficie aireación entrada (A_i) = **75 m²**
- **$A_i:A_v = 3,27$**

A continuación se repite el proceso para los siguientes escenarios:

1.2.- Barreras de humo fijas bajo cubierta a $2/3 \cdot h$ metros de altura (altura libre de humos) e incendio en suelo

- Altura del depósito (**H**) = **13,365 (m)**
- Altura de almacenamiento (**h**) = **10,50 (m)**
- Anchura de estanterías (**w**) = **2,4 (m)**
- Flujo de calor liberado (**q_f**) = **250 (kW/m²)**
- Temperatura ambiente (**T_{amb}**) = **293 (K)**
- Coeficiente de descarga según tipo aireador **C_v** = **0,65**
- Coeficiente de descarga de una abertura de entrada de aire de alimentación **C_i** = **0,6**
- Area del incendio considerado (**A_f**) = **20,25 (m²)** según hipótesis
- Perímetro del incendio considerado (**P**) = **18 (m)** según hipótesis
- Capa libre de humo (**Y**) = **7 (m)**
- Profundidad media capa humos (**d_l**) = **6,365 m**
- Coeficiente de caudal de entrada para un gran penacho de humos de incendio (**C_e**) = **0,188**

- Masa de humos (**M_f**) = **62,67 (kg/s)**
- Calor liberado por el incendio (**Q_f**) = $0,8 \cdot A_f \cdot q_f =$ **4.050,00 KW**
- Incremento de temperatura de la capa de humo por encima de la del ambiente (**Θ_f**) = **63,86 (°C)**
- Temperatura capa de humos (**T_f**) = **74 (°C)**
- Diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de la capa de humos (**T_{dif}**) = **54,15 (°C)**
- Superficie aireación entrada (**A_i**) = **61,5 m²**
- **A_i:A_v = 2,94**
- Superficie aireación aerodinámica (**A_vC_v**) = **13,60 m²**
- Superficie aireación geométrica (**A_v**) = **20,92 m²**

2.1.- Barreras de humo fijas bajo cubierta a $h + 0,5$ metros de altura (altura libre de humos) e incendio en altura

- Altura del depósito (**H**) = **13,365 (m)**
- Altura de almacenamiento (**h**) = **10,50 (m)**
- Anchura de estanterías (**w**) = **2,4 (m)**
- Flujo de calor liberado (**q_f**) = **250 (kW/m²)**
- Temperatura ambiente (**T_{amb}**) = **293 (K)**
- Coeficiente de descarga según tipo aireador **C_v** = **0,65**
- Coeficiente de descarga de una abertura de entrada de aire de alimentación **C_i** = **0,6**
- Area del incendio considerado (**A_f**) = **60,06 (m²)** (“tabla 1.4”)
- Perímetro del incendio considerado (**P**) = **19,92 (m)** (“tabla 1.4”)
- Capa libre de humo (**Y**) = **h + 0,5 = 11 m**
- Profundidad media capa humos (**d_l**) = **2,365 m**
- Coeficiente de caudal de entrada para un gran penacho de humos de incendio (**C_e**) = **0,188**
- Masa de humos (**M_f**) = **136,63 (kg/s)**
- Calor liberado por el incendio (**Q_f**) = $0,8 * A_f * q_f$ = **12.012,00 KW**
- Incremento de temperatura de la capa de humo por encima de la del ambiente (**Θ_f**) = **86,88 (°C)**
- Temperatura capa de humos (**T_f**) = **74 (°C)**
- Diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de la capa de humos (**T_{dif}**) = **54,15 (°C)**
- Superficie aireación entrada (**A_i**) = **379 m²**
- **A_i:A_v = 5,25**
- Superficie aireación aerodinámica (**A_vC_v**) = **46,88 m²**
- Superficie aireación geométrica (**A_v**) = **72,13 m²**

2.2.- Barreras de humo fijas bajo cubierta a $h + 0,5$ metros de altura (altura libre de humos) e incendio en altura

- Altura del depósito (**H**) = **13,365 (m)**
- Altura de almacenamiento (**h**) = **10,50 (m)**
- Anchura de estanterías (**w**) = **2,4 (m)**
- Flujo de calor liberado (**q_f**) = **250 (kW/m²)**
- Temperatura ambiente (**T_{amb}**) = **293 (K)**
- Coeficiente de descarga según tipo aireador **C_v** = **0,65**
- Coeficiente de descarga de una abertura de entrada de aire de alimentación **C_i** = **0,6**
- Area del incendio considerado (**A_f**) = **20,25 (m²)** según hipótesis
- Perímetro del incendio considerado (**P**) = **18 (m)**
- Capa libre de humo (**Y**) = **11 (m)**
- Profundidad media capa humos (**d_l**) = **2,365 m**
- Coeficiente de caudal de entrada para un gran penacho de humos de incendio (**C_e**) = **0,188**
- Masa de humos (**M_f**) = **123,46 (kg/s)**
- Calor liberado por el incendio (**Q_f**) = $0,8 * A_f * q_f =$ **4.050,00 KW**
- Incremento de temperatura de la capa de humo por encima de la del ambiente (**Θ_f**) = $Q_f / (c * M_f) =$ **32,42 (°C)** ("E.1 Anexo E")
- Temperatura capa de humos (**T_f**) = **52,42 (°C)**
- Diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de la capa de humos (**T_{dif}**) = **32,57 (°C)**
- Superficie aireación entrada (**A_i**) = **406 m²**
- **A_i:A_v** = **5,14**
- Superficie aireación aerodinámica (**A_vC_v**) = **51,33 m²**
- Superficie aireación geométrica (**A_v**) = **78,98 m²**

Se consideran exutorios tipo lama de $3,14 * 2,07 = 6,5$ m² con coeficiente de descarga 0,65. Estos exutorios están definidos para caber entre el hueco paralelo entre dos correas.

A continuación se expone una tabla resumen con los resultados, destacándose el número de exutorios requeridos según el tipo de solución y el área de barreras de humo.

Tabla 7: Tabla resumen soluciones prescriptivas.

Incendio de diseño	Solución prescriptiva (2/3h)		Solución prescriptiva (h+0,5)	
	Incendio en altura	Incendio en suelo	Incendio en altura	Incendio en suelo
Superficie geométrica exutorios (m ²)	6,5	6,5	6,5	6,5
Superficie aireación geométrica (A _v) (m ²)	22,92	20,92	72,13	78,98
Nº Exutorios/depósito	4	4	12	13
Nº de depósitos	6	6	6	6
Nº exutorios total	24	24	72	78
Superficie exutorios (m ²)	101,4	101,4	304,2	329,6
% Respecto cubierta	0,85%	0,85%	2,54%	2,75%
Longitud total barreras de humo (m)	312,11	312,11	312,11	312,11
Profundidad barreras de humo (m)	6,37	6,37	3,37	3,37
Superficie barreras de humo (m ²)	1.986,58	1.986,58	1.050,25	1.050,25

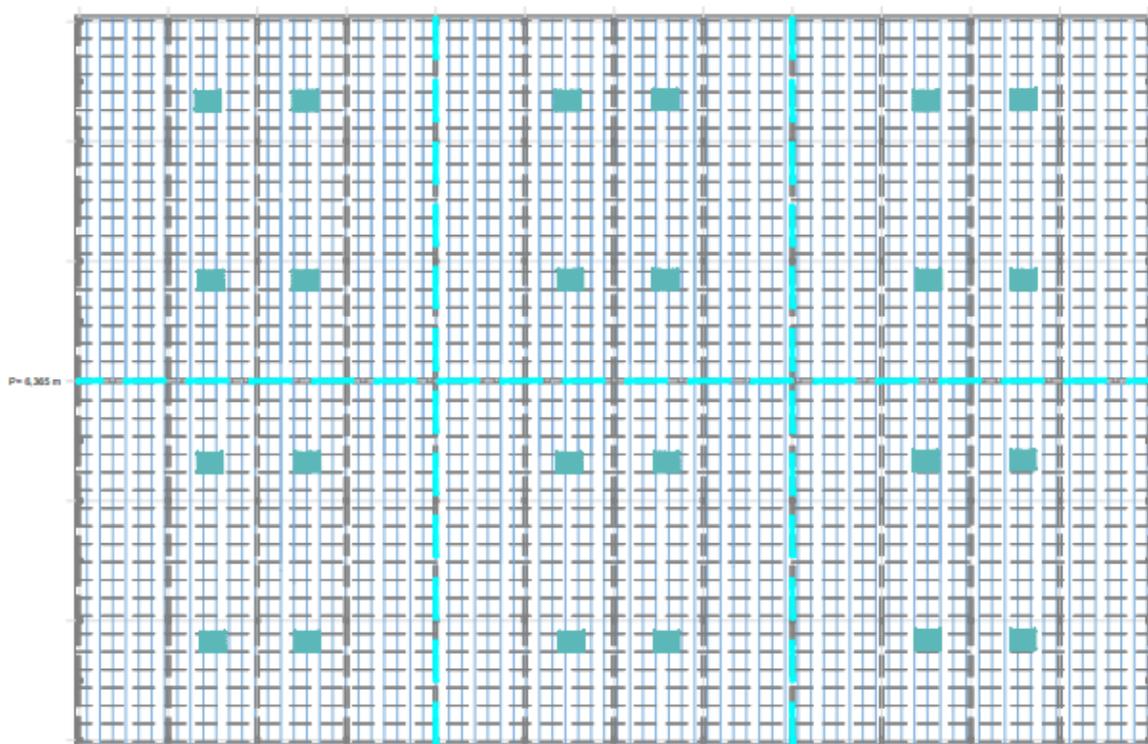


Ilustración 17: Vista cubierta solución prescriptiva $Y = 2/3 h$ m.

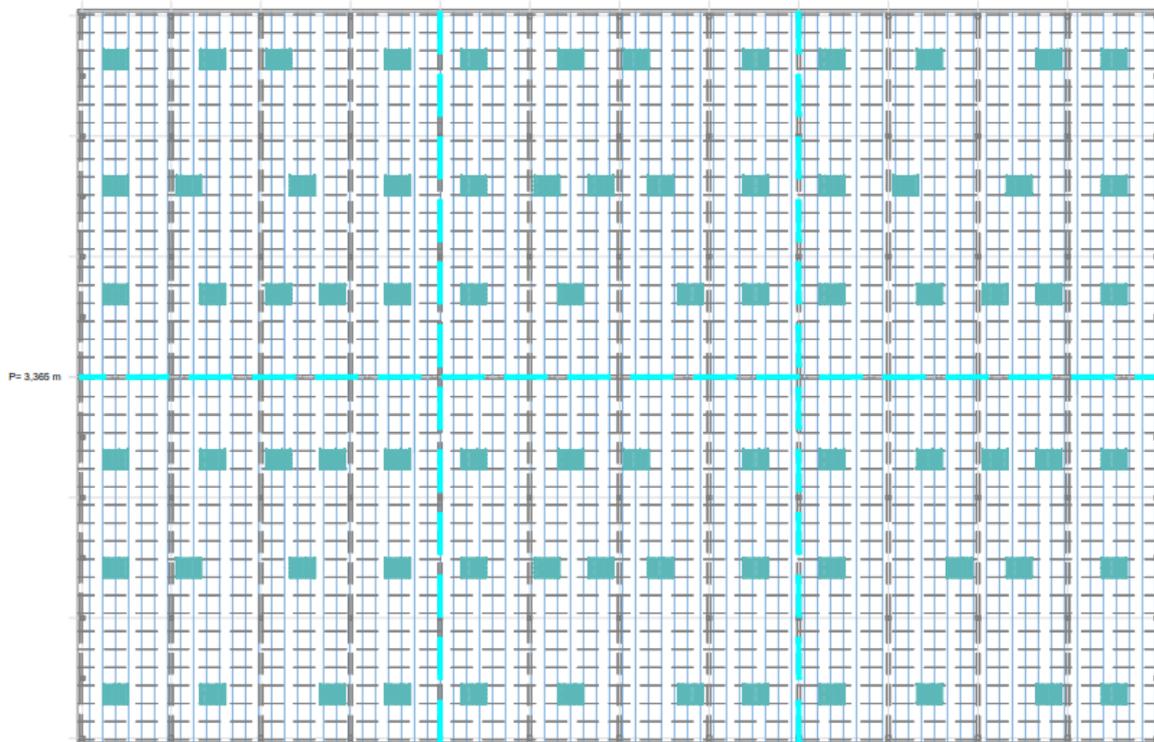


Ilustración 18: Vista cubierta solución prescriptiva $Y= h + 0,5$ m.

3.3.2.- Solución prestacional y simulación soluciones estudiadas.

Modelado y simulación de incendio de diseño en suelo para la alternativa tomada como solución prestacional:

A continuación se realiza el modelado de la nave objeto de estudio en el Software PyroSim con la alternativa considerada como solución prestacional comentada en el punto 3.0 de este trabajo. El motivo de esta solución es valorar el funcionamiento del sistema SCTEH optimizando recursos a partir de una de las soluciones prescriptivas pero eliminando barreras de humos y considerando portones auxiliares y muelles como elementos de aportación de aire natural, cuestión que la norma UNE 23585 no recoge para el diseño de las soluciones.

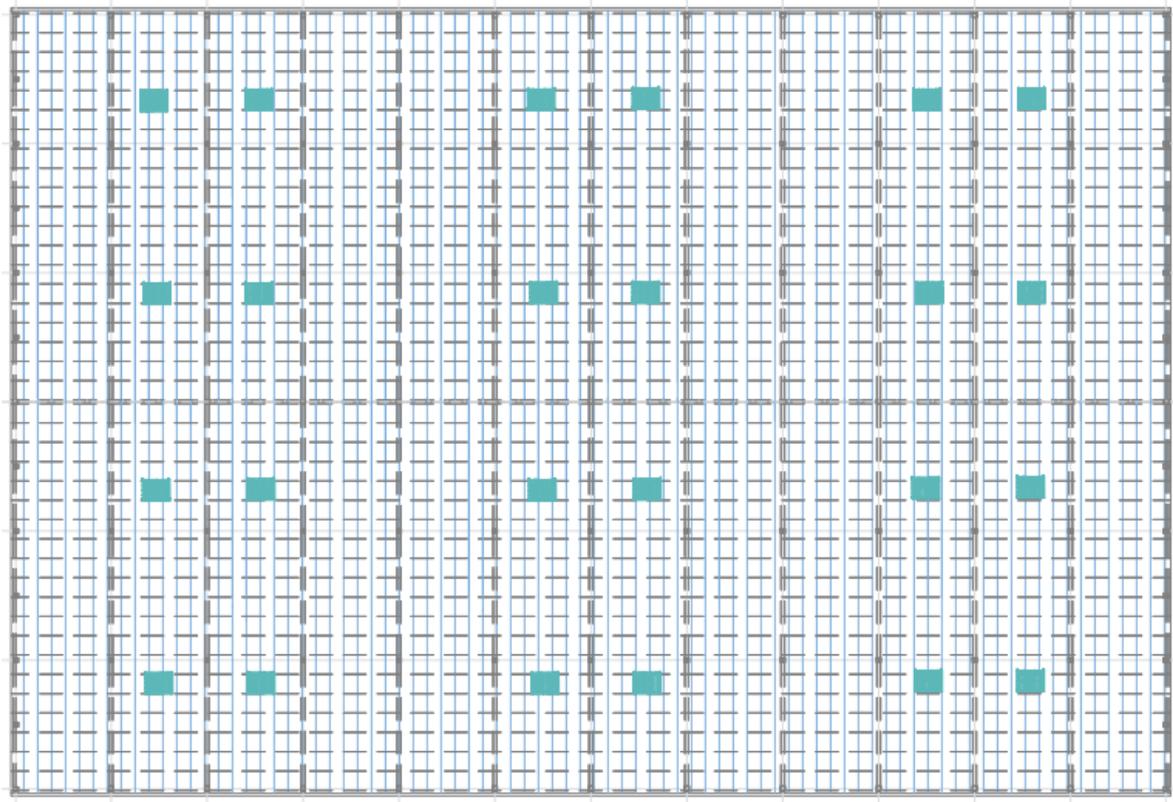


Ilustración 19: Vista cubierta solución alternativa prestacional.

Se establecen una serie de simplificaciones debido a la complejidad de la nave objeto de estudio:

- La estructura se simplifica, considerando:
 - Pilares de 0,5*0,5 m
 - Correas de 0,5*0,2 m
 - Vigas de 0,5*0,8 m
- Los muelles de carga se simplifican en geometría, colocando estos en el plano $y=0$.
- Se considera almacenamiento en 4 alturas en las estanterías y un hueco entre alturas de 0,5 m
- Se modelan los exutorios como aperturas huecas considerando su superficie de aireación real, es decir, 4,22 m²

- Las oficinas se modelan como un bloque. Dado que no es objeto de este trabajo el análisis de los sistemas PCI de estas, no se entrará en detalle en ellas.

Lo primero de todo es establecer una malla dimensional discretizada en unidades diferenciales o celdas para la simulación del entorno. Esta malla define el dominio computacional tridimensional que FDS (software de simulación) utiliza para simular el modelo. Cada unidad diferencial es utilizada en una serie de cálculos. A medida que aumenta el número de celdas, aumenta la precisión de la simulación. Sin embargo, cuando más precisa sea la simulación mayor será el tiempo requerida para la misma así como la capacidad computacional requerida. La nave que se está estudiando, tiene las características de ser una nave comercial, que perfectamente puede ser construida para fines logísticos. No tiene una naturaleza teórica, sino funcional, práctica y real.

La malla tendrá las dimensiones (m) del alcance de la nave:

- Min X = 0
- Max X = 132.35
- Min Y = 0
- Max Y = 89.88
- Min Z = 0
- Max Z = 13.365

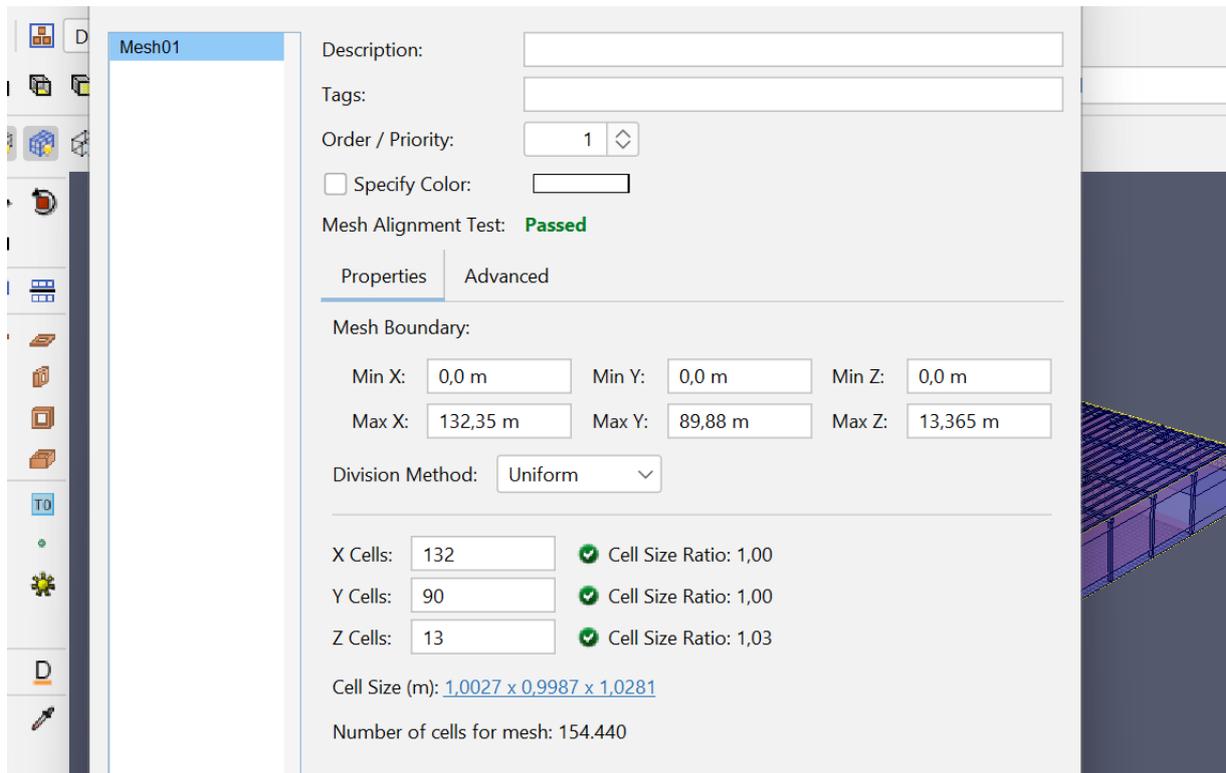


Ilustración 20: PyroSim configuración malla.

Debido a restricciones computacionales de los equipos disponibles, las celdas se van a definir de 1*1 m, generando un total de 154.440.

Lo ideal sería definir las de 0,5*0,5 m para el modelo y de 0,25*0,25 m para el incendio. No obstante el número de celdas ascendería a más de un millón, siendo recomendable una capacidad de computación superior a los 24 Gb RAM y tiempos de simulación en magnitud de días, recursos no disponibles para este trabajo.

A continuación se modela la nave utilizando el editor de bloques, superficies, paredes y ventanas interactivas entre los elementos dentro del mallado o con capacidad de interacción con el ambiente.

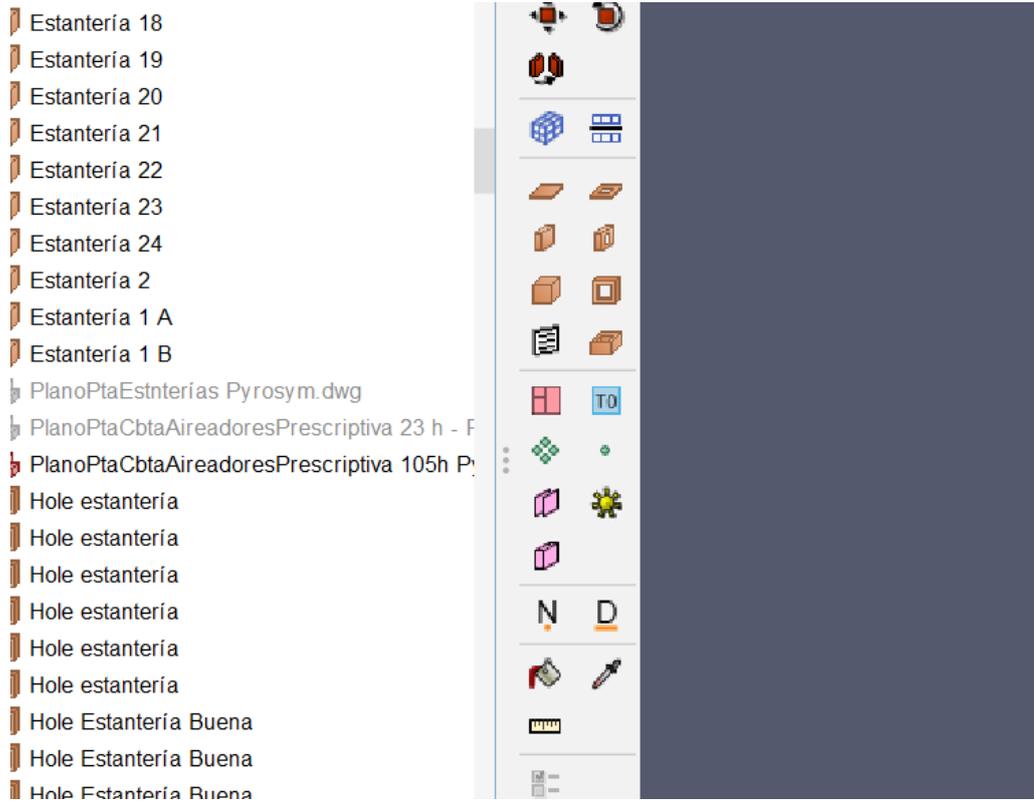


Ilustración 21: PyroSim configuración modelo.

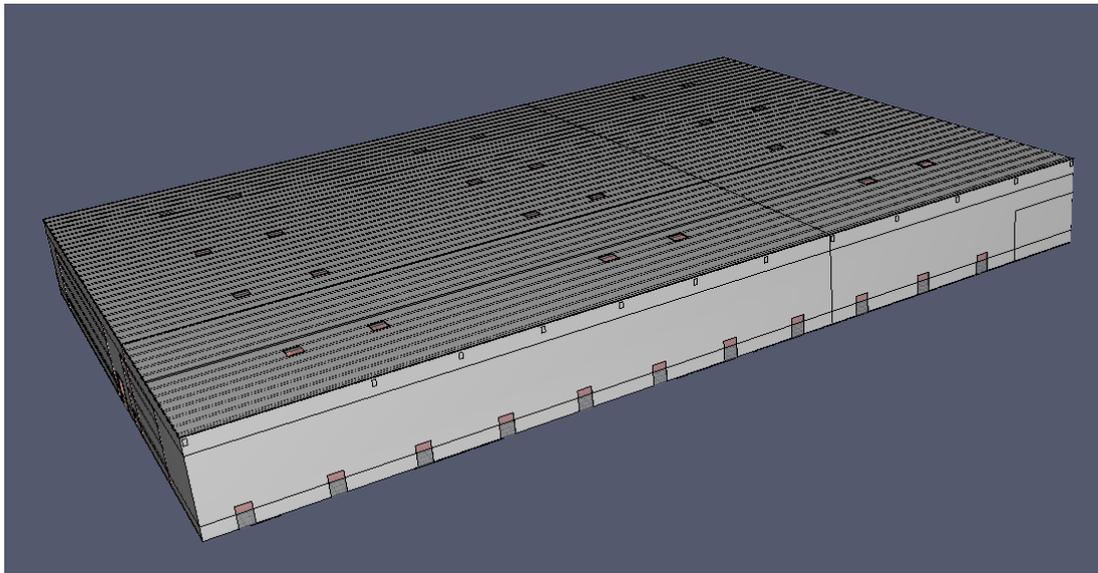


Ilustración 22: PyroSim nave modelada solución prestacional.

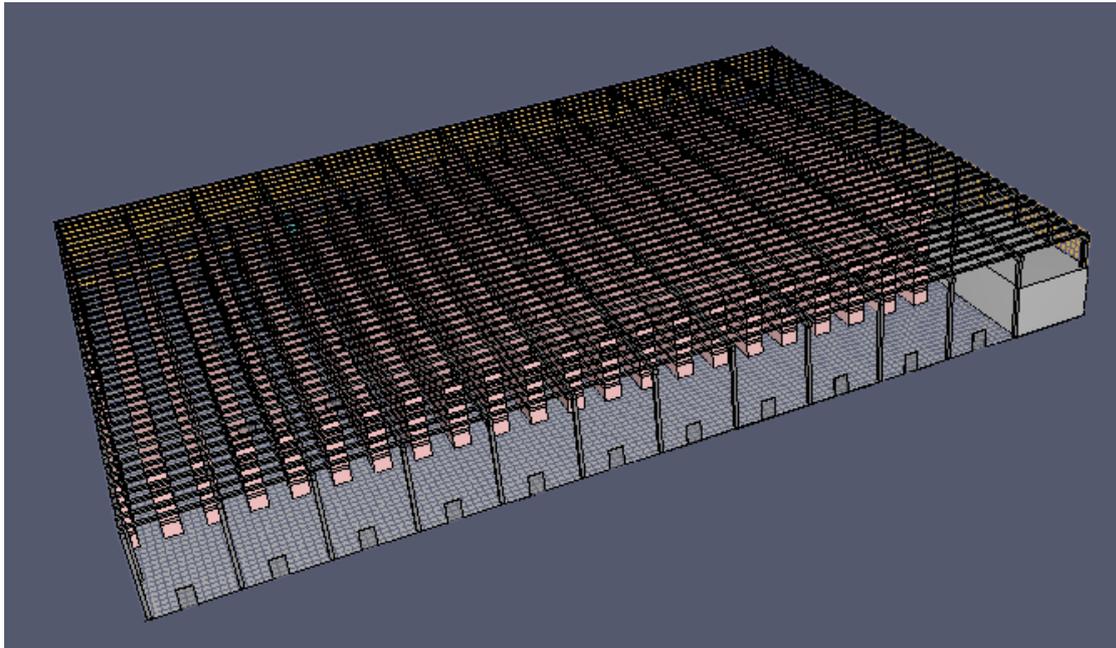


Ilustración 23: PyroSim nave modelada solución prestacional vista sin cerramientos.

Se destaca la función “Import FDS/CAD file” que permite aloar un plano en formato .dwg en cualquier plano del ambiente de desarrollo para facilitar la tarea del modelado.

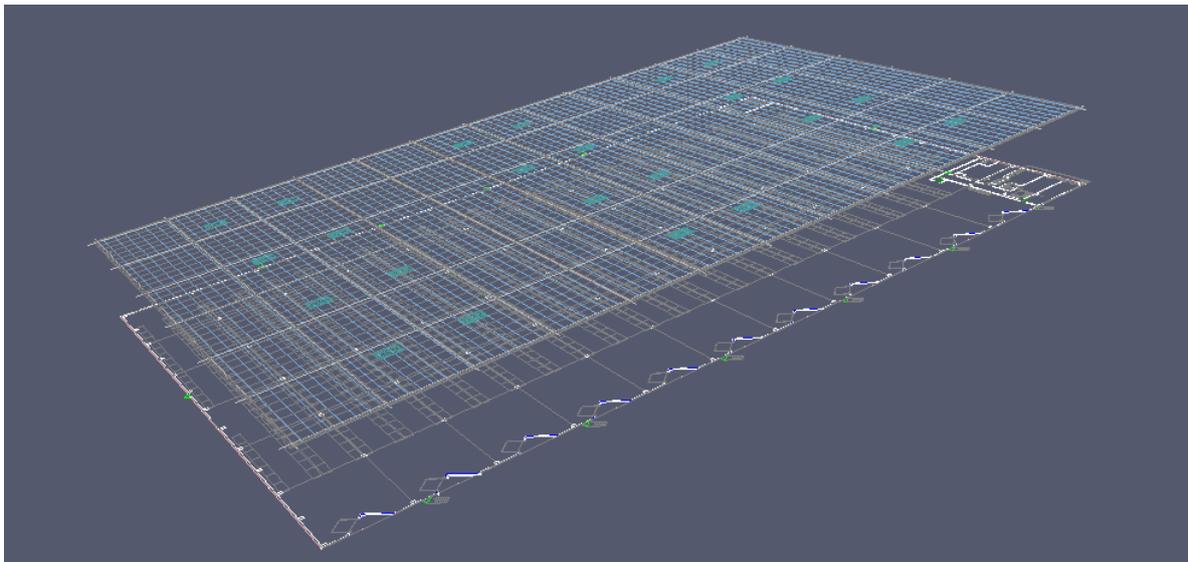


Ilustración 24: PyroSim función Import file FDS/CAD formato dwg.

En esta simulación, donde se va a considerar aire de aportación del ambiente por exutorios, muelles y portones, es importante destacar que para modelar dichas aportaciones, hay que hacer un “agujero” correspondiente limitante con los límites del entorno, es decir la malla dimensional (que emula el alcance del objeto de estudio) y luego en esos agujeros añadir una ventana en la propia malla y configurarla como intercambio abierto.

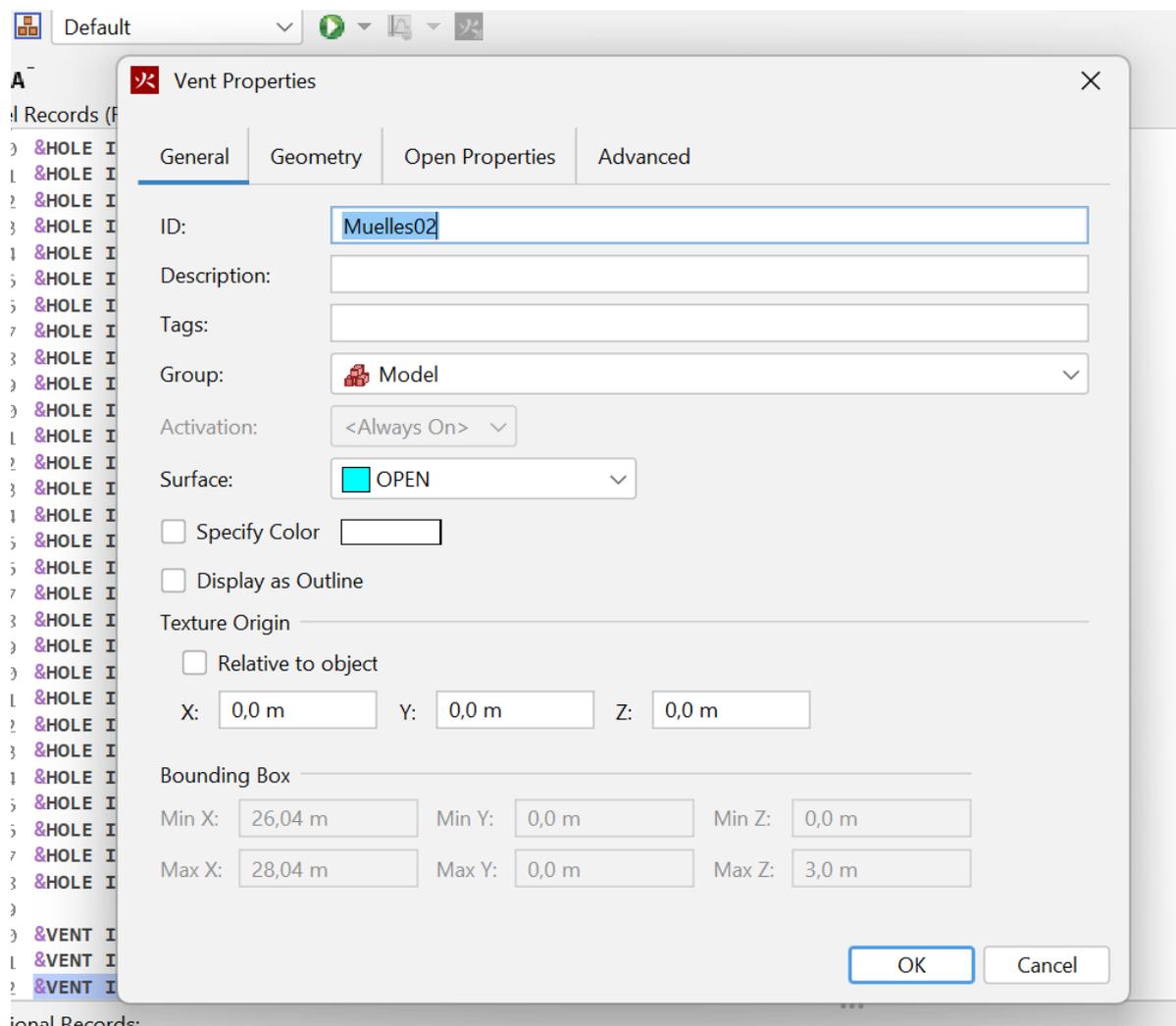
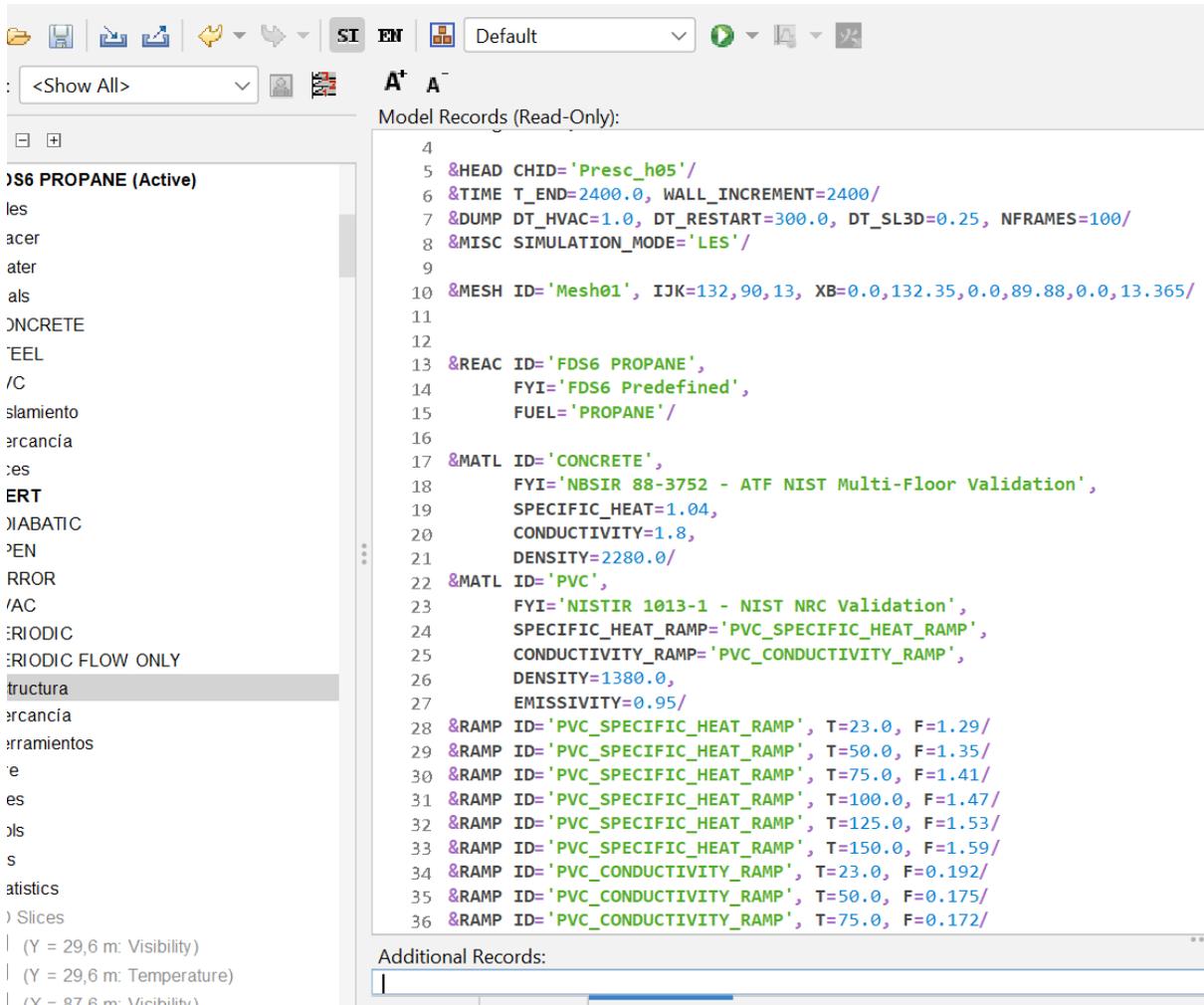


Ilustración 25: PyroSim configuración aportaciones de aire.

Según se desarrolla la nave en la interfaz gráfica de Pyrosim, el propio software va definiendo el código de programación que interactuará con el motor de simulación FDS.



```

4
5 &HEAD CHID='Presc_h05'/
6 &TIME T_END=2400.0, WALL_INCREMENT=2400/
7 &DUMP DT_HVAC=1.0, DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25, NFRAMES=100/
8 &MISC SIMULATION_MODE='LES'/
9
10 &MESH ID='Mesh01', IJK=132,90,13, XB=0.0,132.35,0.0,89.88,0.0,13.365/
11
12
13 &REAC ID='FDS6 PROPANE',
14     FYI='FDS6 Predefined',
15     FUEL='PROPANE'/
16
17 &MATL ID='CONCRETE',
18     FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',
19     SPECIFIC_HEAT=1.04,
20     CONDUCTIVITY=1.8,
21     DENSITY=2280.0/
22 &MATL ID='PVC',
23     FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',
24     SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
25     CONDUCTIVITY_RAMP='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP',
26     DENSITY=1380.0,
27     EMISSIVITY=0.95/
28 &RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=23.0, F=1.29/
29 &RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=50.0, F=1.35/
30 &RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=75.0, F=1.41/
31 &RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=100.0, F=1.47/
32 &RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=125.0, F=1.53/
33 &RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=150.0, F=1.59/
34 &RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=23.0, F=0.192/
35 &RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=50.0, F=0.175/
36 &RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=75.0, F=0.172/

```

Ilustración 26: PyroSim código generado para FDS.

A continuación se definen los materiales que van a componer los diferentes elementos de la nave objeto de estudio.

Tabla 8: PyroSim materiales configurados.

Material	Densidad (Kg/m ³)	Calor Específico (kJ/(kg*K))	Conductividad (W/(m*K))
Aislamiento	150	0,8	0,039
Hormigón	2280	1,04	1,8
Mercancía	617	1,77	0,5
PVC	1380	Variable según software	Variable según software
Acero	7850	0,46	45,8

La mercancía hace referencia al material almacenado, calculado y teorizado en el punto 3.2. de este trabajo.

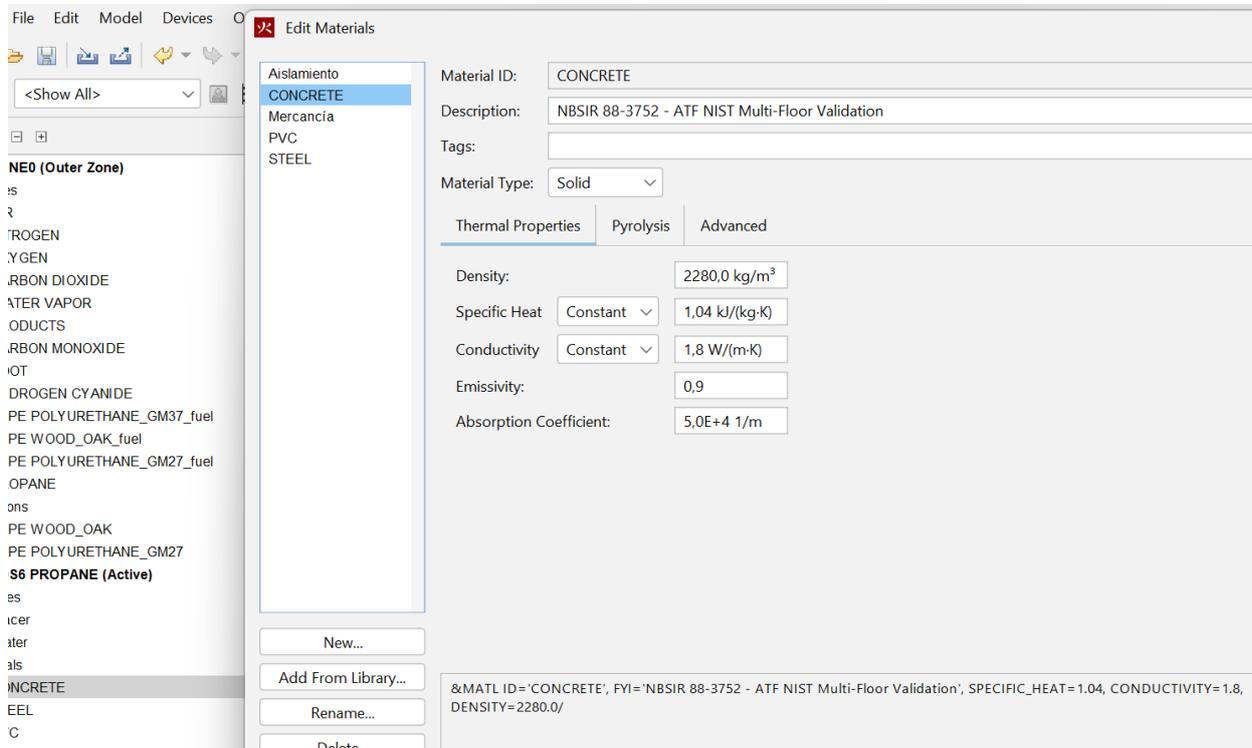


Ilustración 27: PyroSim menú configuración materiales.

Después de definir los materiales, se definen las superficies de los elementos del modelo. Las superficies se van a considerar. Se consideran superficies laminadas teóricas para efectos de computación.

- Estructura: 0,2m de profundidad de hormigón.
- Mercancía: 1 mm de espesor de plástico (envoltorios pallets) y 0,4 m de material teórico Mercancía.
- Cerramientos: 10 cm de acero de chapa grecada, 30 cm de aislamiento, 10 cm de acero de chapa grecada de 1 mm de espesor.
- Inerte

- Fuego: Se considera la superficie en la que va a originar el fuego. Para el incendio que se va a originar y sobre el que se van a estudiar las soluciones, se va a considerar 250,00 kW/m³ siguiendo el incendio empleado para el diseño de las soluciones prescriptivas.

Los elementos de la nave a los que se les asignará superficie de estructura serán:

- Vigas.
- Pilares.
- Correas.
- Solera.

Los elementos de la nave a los que se les asignará superficie de Mercancía serán:

- Estanterías paletizadas para simular la carga de fuego intrínseca media máxima permitida.

Los elementos de la nave a los que se les asignará superficie de cerramiento serán:

- Oficinas
- Cubierta
- Fachadas

Los elementos de la nave a los que se les asignará superficie inerte serán:

- Barreras de humos limitantes de depósitos en caso de que se dispongan.

Los elementos de la nave a los que se les asignará superficie de fuego serán:

- Elemento de origen de fuego.

A continuación se modela el incendio de diseño. Se ha supuesto una reacción por espuma de poliuretano GM27 (producto altamente empleado en el embalaje de mercancías cotidianas) y se modela el origen del fuego. Para ello se realiza un bloque de área y se le determina como superficie de fuego. En añadido, se incluye una ventana que active el fuego.

La reacción debe configurarse en el editor de reacciones.

Debido a que el incendio más restrictivo para la solución prescriptiva $Y = h + 0,5 \text{ m}$ es el incendio en el suelo, y para la solución prescriptiva $Y = 2/3 h \text{ m}$, tanto el incendio en el suelo como en altura dan la misma solución de exutorios requeridos, para realizar las comparaciones entre las tres soluciones se va a emplear un incendio en suelo de área 20 m^2 y perímetro 18 m siguiendo el mismo que se ha empleado en el diseño de las soluciones prescriptivas.

Para cuantificar o medir los resultados de las simulaciones de comportamiento del fuego en la nave objeto de estudio, es necesario definir los dispositivos de medición así como las variables a analizar y medir. En este caso, se van a emplear planos bidimensionales de medición, cuantificando temperatura y visibilidad. Los planos serán los siguientes:

Temperatura:

- $Y = 29,6 \text{ m}$
- $X = 87,6 \text{ m}$
- $Z = 2 \text{ m}$
- $Z = 11 \text{ m}$

Los planos verticales se sitúan cerca del origen del incendio para analizar su evolución calorífica.

Los planos horizontales se sitúan:

1. Bajo cubierta para analizar el comportamiento de la temperatura del incendio a altura.
2. A 2 m del suelo para analizar la temperatura en recorridos de evacuación de personal.

Visibilidad:

- $Y = 29,6 \text{ m}$
- $X = 87,6 \text{ m}$
- $Z = 2 \text{ m}$

El cruce de los planos verticales se sitúan cerca del origen del incendio para analizar su evolución de humos.

Los planos horizontales se sitúan a 2 m del suelo para analizar la visibilidad en recorridos de evacuación de personal.

Por último y antes de comenzar la simulación, se configuran los parámetros de la simulación. Se va a simular un tiempo algo superior a 180 segundos, el cual es el tiempo que los ocupantes o el personal tiene para poder evacuar la nave según el “Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo”. En este caso vamos a realizar 4 minutos de simulación de incendio, estableciendo así un margen del 33,3%

- Tiempo de simulación de fuego: 240 s
- Incremento de la actualización de muros: 2.400 pasos temporales
- Captura de imágenes $t = 240$ s

Resultados temperatura:

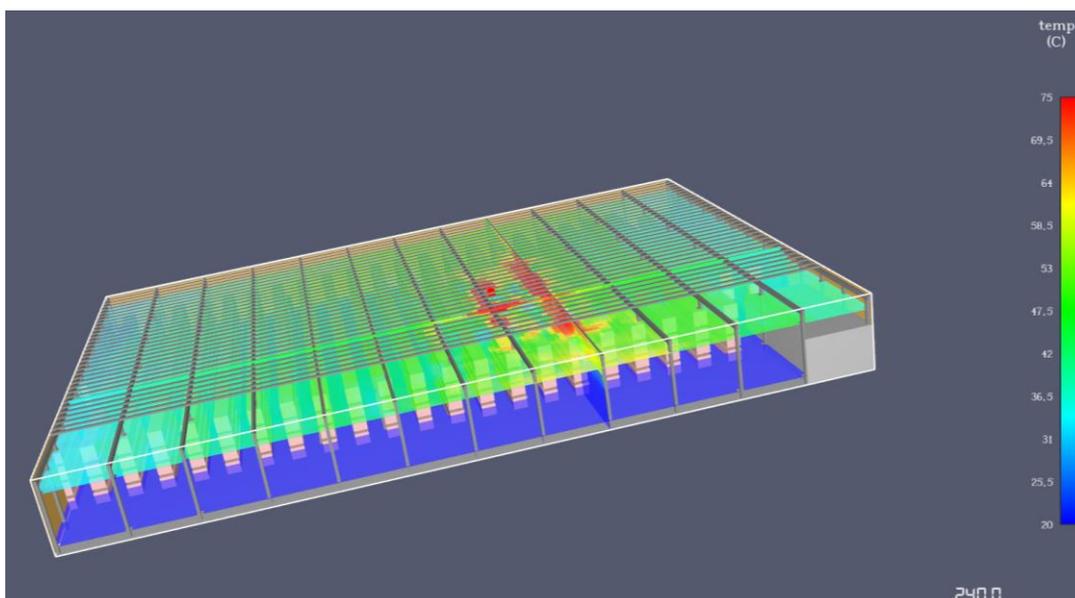


Ilustración 28: PyroSim simulación incendio solución prestacional medida temperatura.

- Se denota claramente que al no haber barreras de humo bajo cubierta el calor se desprende por toda la nave.
- A nivel de suelo, no se produce un incremento de temperatura alarmante.
- Se observa como la temperatura máxima a los 4 minutos alcanza los 75 °C.
- También se observa como las áreas próximas a los exutorios no reciben tanto aumento de temperatura por su interacción con el ambiente.

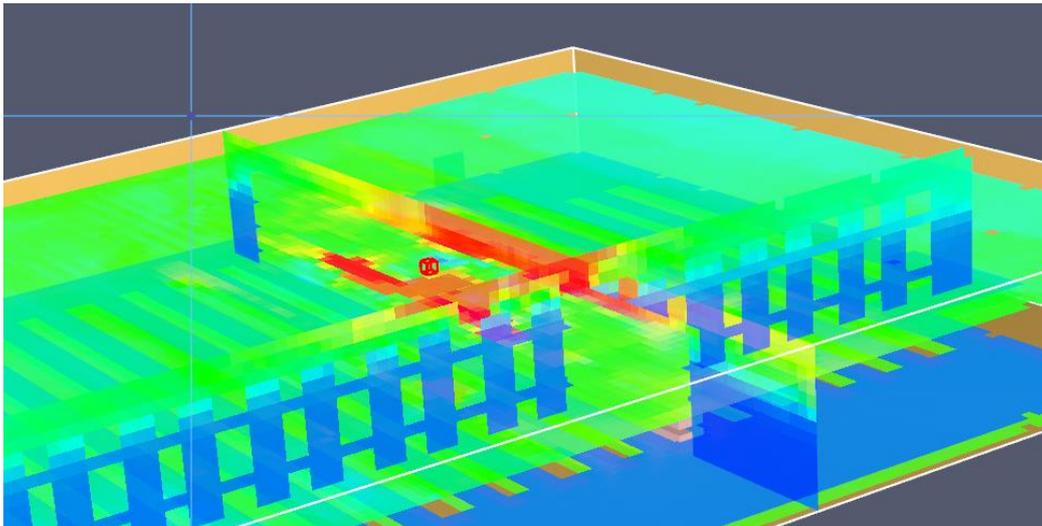


Ilustración 29: PyroSim simulación incendio solución prestacional medida temperatura. Detalle

Resultados visibilidad (humos):

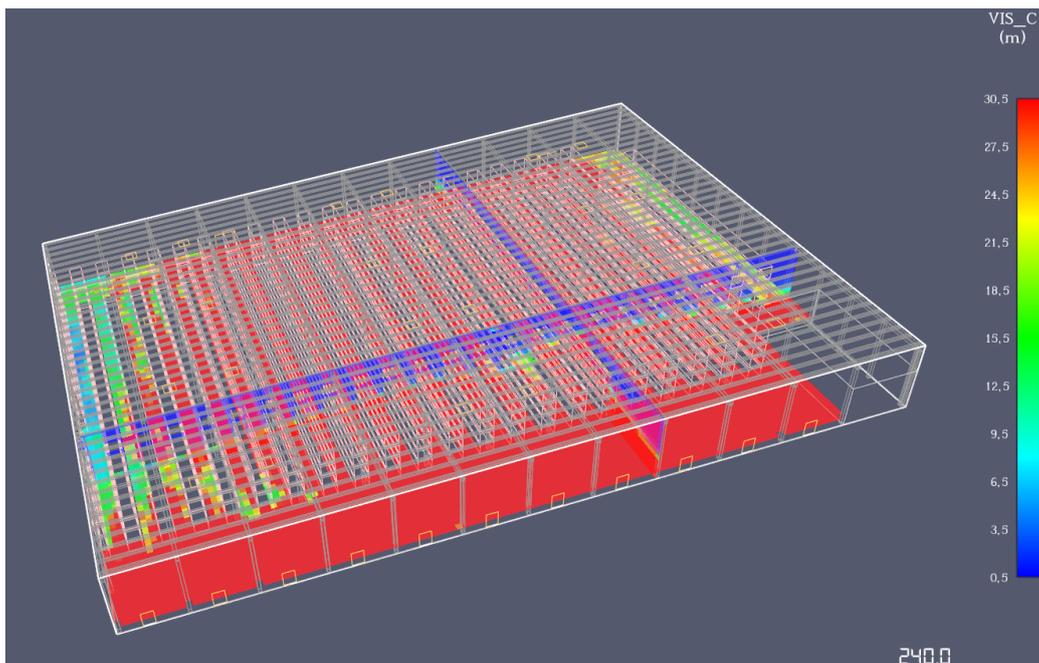


Ilustración 30: PyroSim simulación incendio solución prestacional medida visibilidad.

- De los planos verticales se deriva que toda la zona a altura bajo cubierta ha sido invadida de humos.
- La visibilidad a 2 metros, en su mayoría, se respeta y se mantiene dentro de valores válidos. No obstante si que existen puntos calientes que cabe remarcar:
 - Lateral izquierdo.
 - Lateral derecho.
 - Núcleo de incendio.

Se recuerda que la medición de esta variable es vital para que la gente pueda llevar a cabo sus recorridos de evacuación en condiciones de salud y no se intoxique con humos en el proceso.

Modelado y simulación de incendio de diseño en suelo para solución prescriptiva $Y = 2/3 h$ m:

Se sigue el mismo proceso que para la solución escogida como alternativa a las prescriptivas

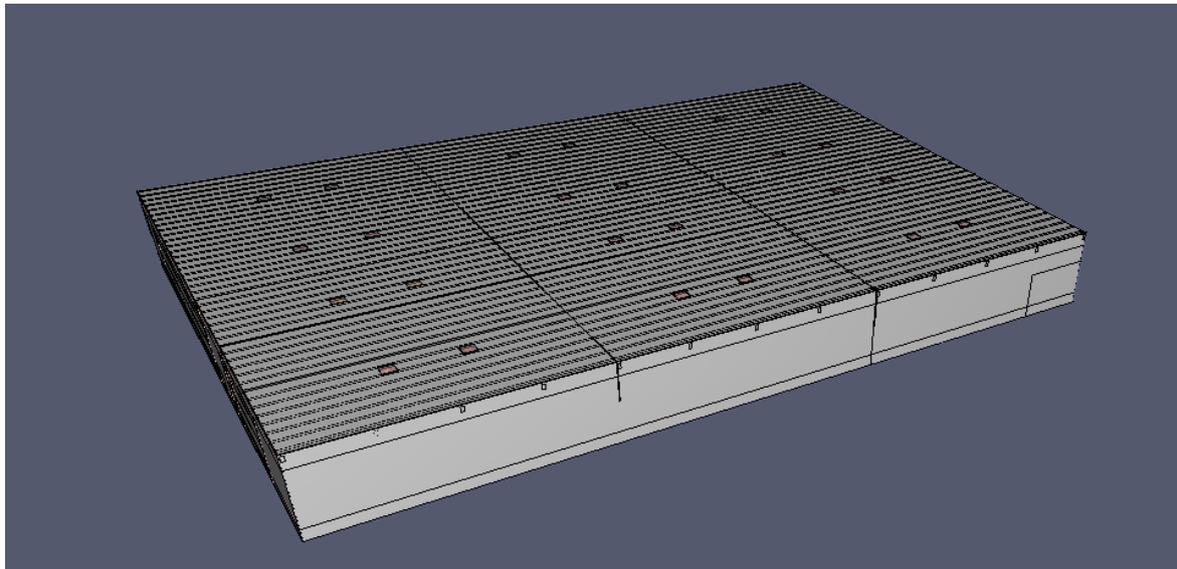


Ilustración 31: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = 2/3 h$ m

Se eliminan los muelles y portones auxiliares como aportaciones de aire exterior.

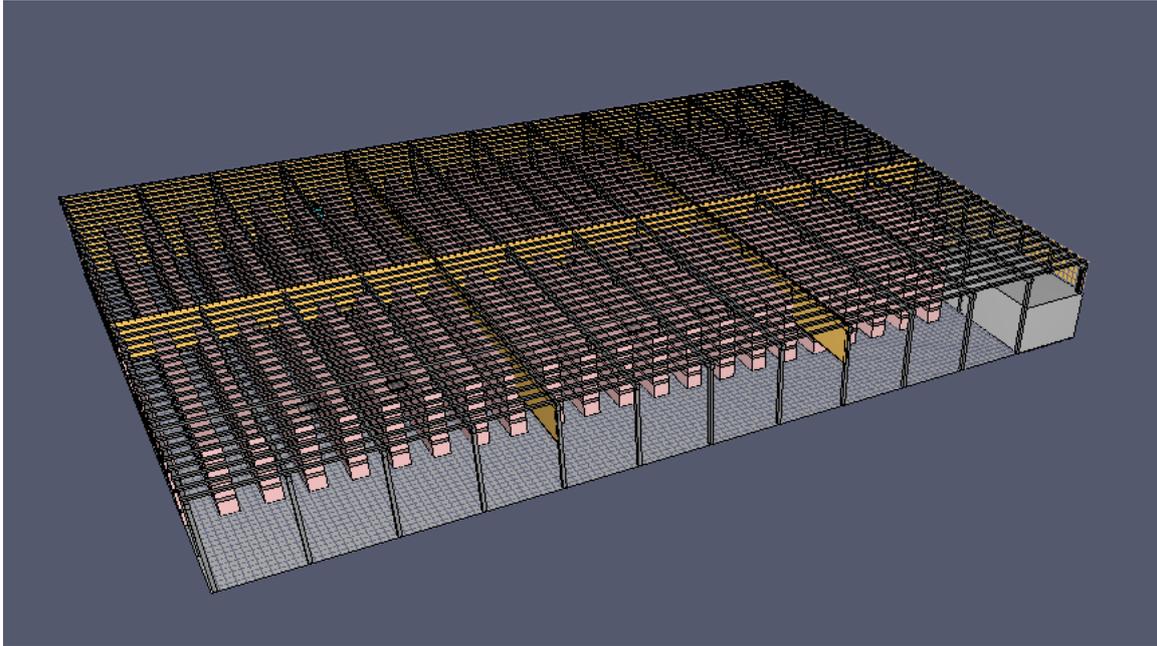


Ilustración 32: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = 2/3$ h m. Vista sin cerramientos.

Se añaden las cortinas de humos correspondientes a la solución.

Resultados temperatura:

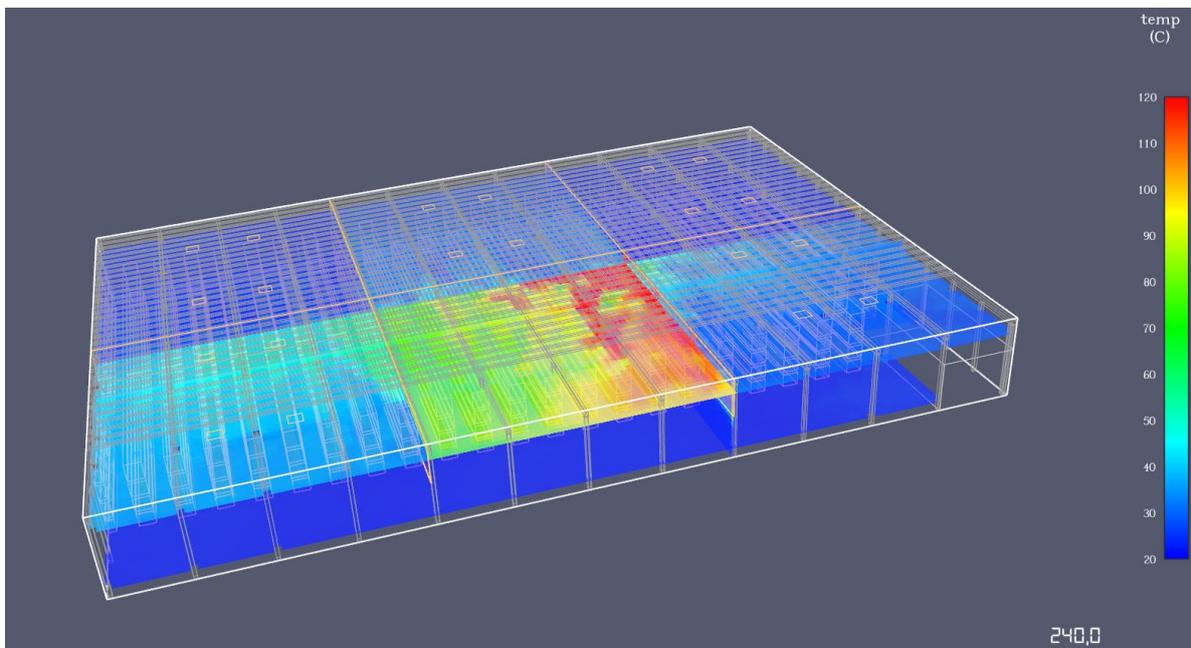


Ilustración 33: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = 2/3$ h m medida temperatura.

- Se observa como las cortinas de gran profundidad delimitan claramente el depósito de humos. Además, se observa claramente que el resto de depósitos permanecen casi intactos. En añadido, se observa lo que estipula la norma UNE 23585 de que solo los depósitos adyacentes por vértice sufren interacción. Se ve ligeramente como estos han aumentado su temperatura.
- A nivel de suelo, no se produce un incremento de temperatura alarmante.
- Se observa como la temperatura máxima a los 4 minutos alcanza los 120 °C. Se concentra la temperatura de manera más exhaustiva en el depósito del incendio.
- También se observa como las áreas próximas a los exutorios no reciben tanto aumento de temperatura por su interacción con el ambiente.

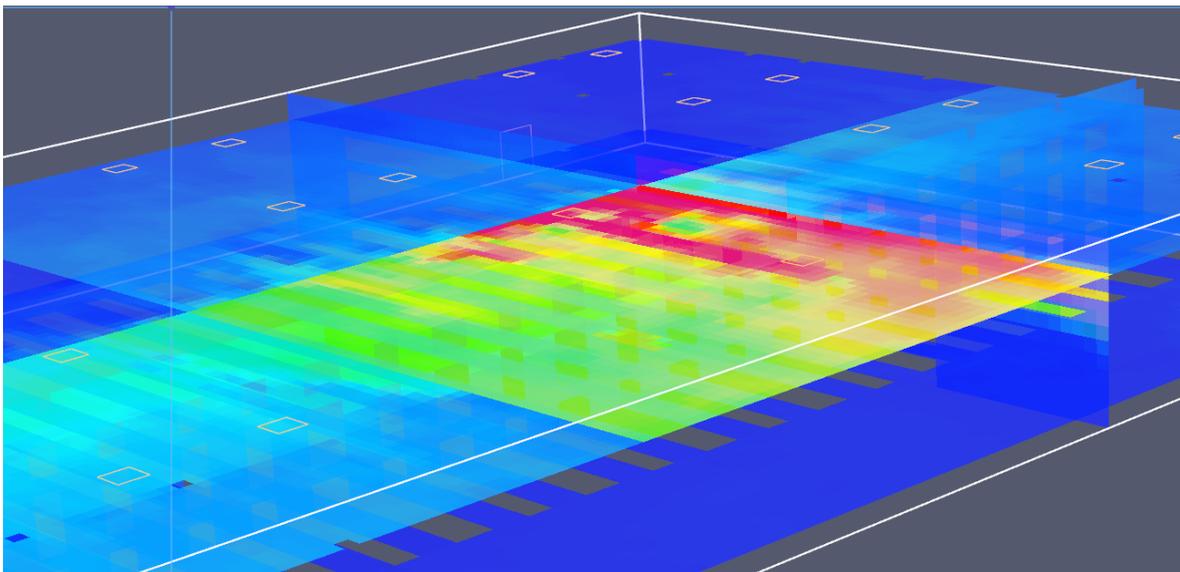


Ilustración 34: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = 2/3$ h m medida temperatura. Detalle.

Resultados visibilidad (humos):

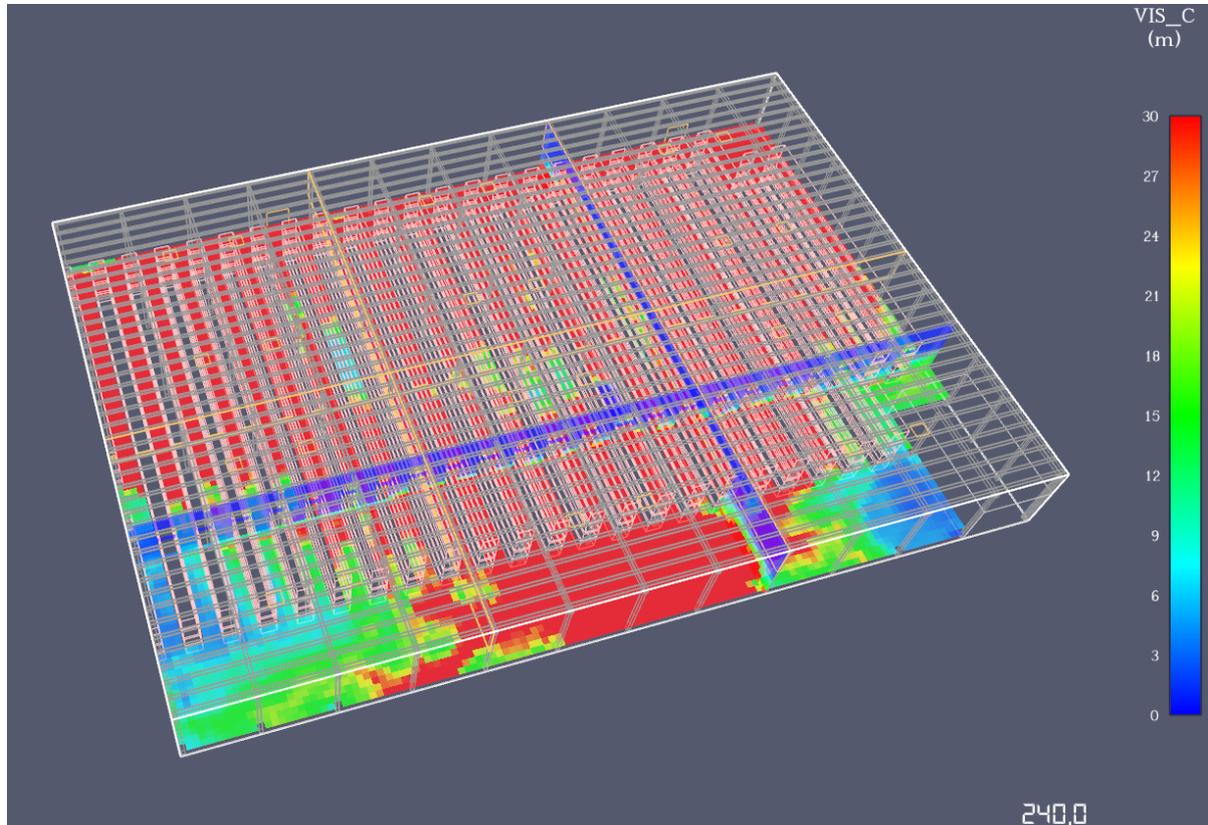


Ilustración 35: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = 2/3$ h m medida visibilidad

- De los planos verticales se deriva que toda la zona a altura bajo cubierta ha sido invadida de humos.
- La visibilidad a 2 metros presenta zonas bastante comprometidas, sobre todo en los depósitos adyacentes que más interactúan como aportación de aire, haciendo que el aire que entra empuje los humos hacia abajo. Así mismo, las grandes cortinas de humo que presentan bastante profundidad hacen que el recorrido del aire de aportación sea más largo.

Se recuerda que la medición de esta variable es vital para que la gente pueda llevar a cabo sus recorridos de evacuación en condiciones de salud y no se intoxique con humos en el proceso. Además se recuerda que esta solución es prescriptiva por lo que está debidamente aceptada por la norma.

Modelado y simulación de incendio de diseño en suelo para solución prescriptiva $Y = h + 0,5$ m:

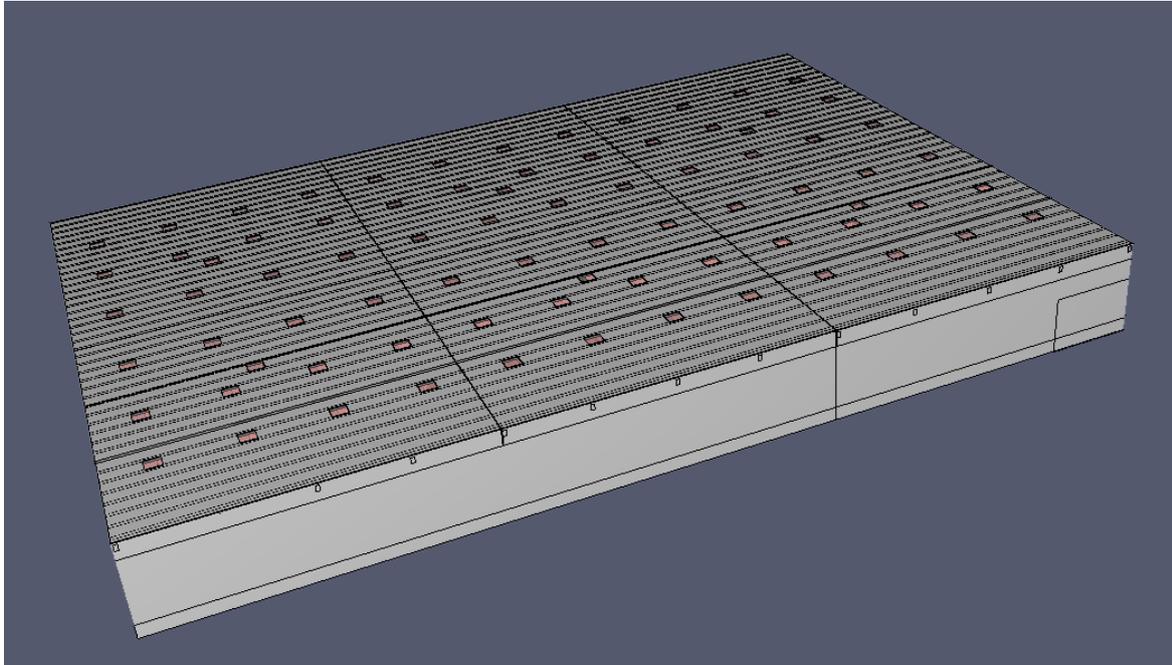


Ilustración 36: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = h + 0,5$ m.

Se añaden los exutorios característicos de esta solución.

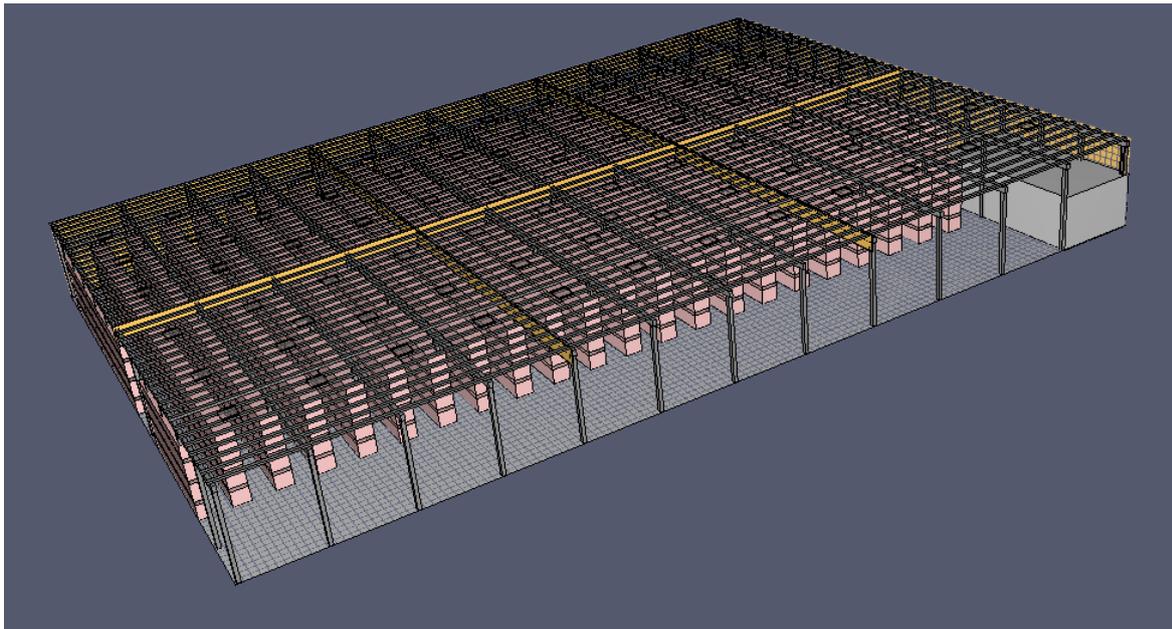


Ilustración 37: PyroSim nave modelada solución prescriptiva $Y = h + 0,5$ m. Vista sin cerramientos.

Se reduce la profundidad de las barreras cortafuegos.

Resultados temperatura:

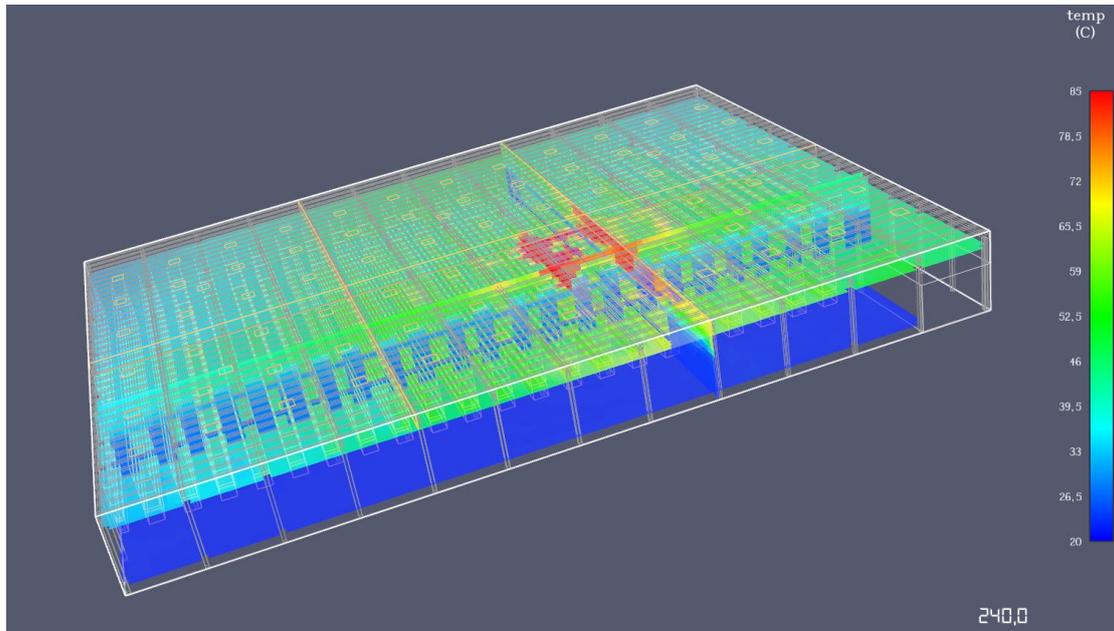


Ilustración 38: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = h + 0,5$ m medida temperatura.

- Se observa un comportamiento de la temperatura más similar al de la solución alternativa (prestacional) que a la otra solución prescriptiva ($Y=2/3$ h m) aunque aquí el depósito hace que la temperatura aumente algo más. Se alcanza un pico de 85 °C
- No se llega a notar de manera tan significativa el efecto del depósito.

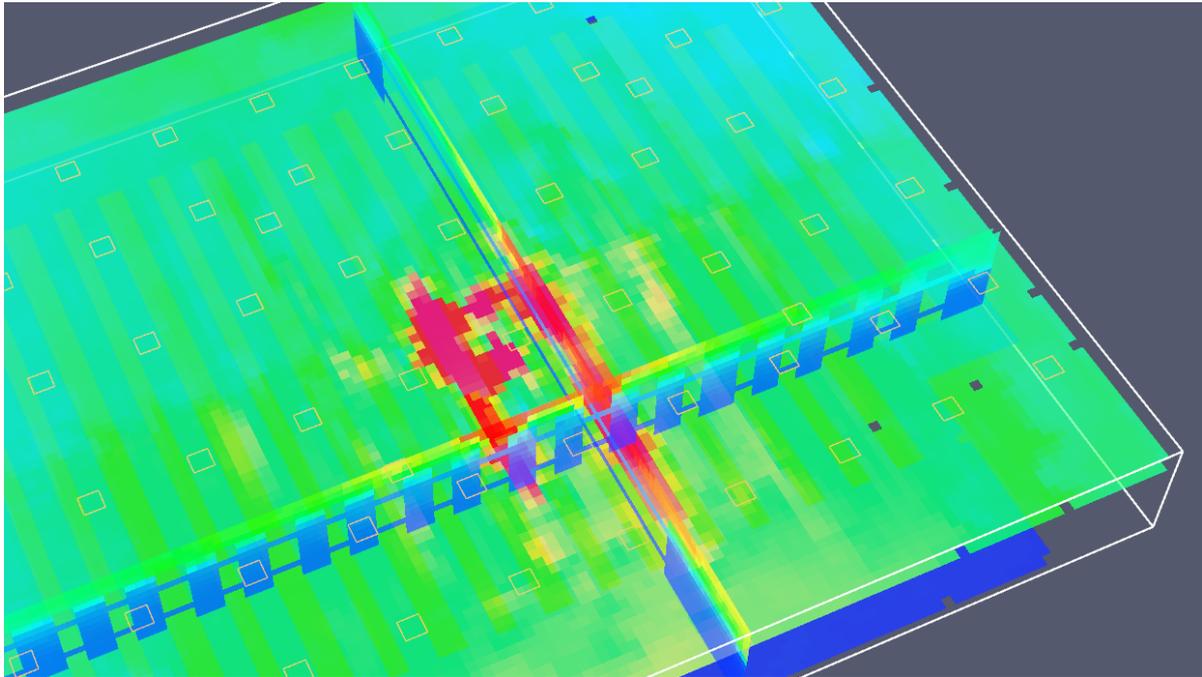


Ilustración 39: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = h + 0,5$ m medida temperatura. Detalle

Resultados visibilidad (humos):

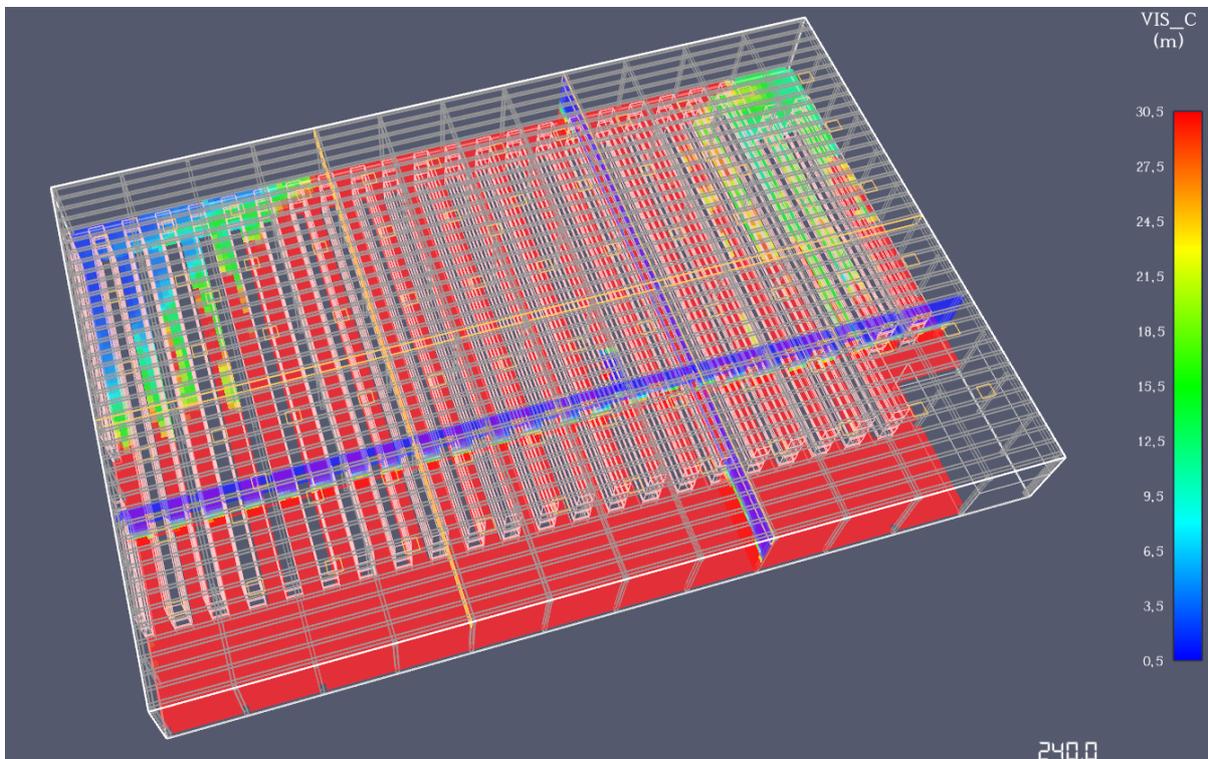


Ilustración 40: PyroSim simulación incendio solución prescriptiva $Y = h + 0,5$ m medida visibilidad.

- De los planos verticales se deriva que toda la zona a altura bajo cubierta ha sido invadida de humos.
- La visibilidad a 2 metros presenta una zona concreta bastante comprometida, a parte del núcleo del incendio, la esquina lateral superior izquierda. Este fenómeno no es tan intuitivo pero si que presenta ciertas similitudes con la solución prescriptiva: se acumula el humo donde la interacción de velocidades de aire no es muy grande puesto que los exutorios de dicho depósito no se consideran adyacentes y su intercambio con el entorno

4.- Análisis de resultados.

En este apartado se realizará el análisis de resultados de los desarrollos realizados en el apartado 3 de este trabajo. Se comenzará haciendo una comparativa de los costes de inversión para la implantación de cada solución y posteriormente se analizarán los resultados funcionales en función de los parámetros evaluados.

4.1.- Económicos

A continuación se expone una tabla con las mediciones del SCTEH de cada solución adoptada así como el presupuesto para la instalación de cada uno de ellos. El presupuesto ha sido realizado en base a precios unitarios aportados por la empresa Protección contra incendios Clima, S.L.

Tabla 9: Medidas y Presupuesto solución prestacional.

			Alternativa solución prestacional
Superficie geométrica exutorios (m2)			6,5
Superficie de aireación exutorios (m2)			4,22
Nº Exutorios/depósito			4
Nº de depósitos			1
Nº exutorios total			24
Superficie exutorios (m2)			101,4
% Respecto cubierta			0,85%
Longitud total barreras de humo (m)			N/A
Profundidad barreras de humo (m)			N/A
Superficie barreras de humo (m2)			N/A
Equipo de acción neumática exutorios			1
Central control exutorios			1
<i>IVA no inc.</i>			
Exutorios (inst. inc.)	2.820,00	€/#	67.680,00
Barreras de humo	24,06	€/m2	N/A
Equipo de acción neumática exutorios	261,66	€/# exutorios	6.279,73
Sistema apertura y control exutorios	6.724,66	€/#	6.724,66
Sumas			80.684,39
Diff			0,0%

Tabla 10: Medidas y Presupuesto solución prescriptiva $Y = 2/3 h$.

	Solución prescriptiva (2/3h)
Superficie geométrica exutorios (m2)	6,5
Superficie de aireación exutorios (m2)	4,22
Nº Exutorios/depósito	4
Nº de depósitos	6
Nº exutorios total	24
Superficie exutorios (m2)	101,4
% Respecto cubierta	0,85%
Longitud total barreras de humo (m)	312,11
Profundidad barreras de humo (m)	6,37
Superficie barreras de humo (m2)	1.986,58
Equipo de acción neumática exutorios	1
Central control exutorios	1

IVA no inc.

Exutorios (inst. inc.)	2.820,00	€/#	67.680,00
Barreras de humo	24,06	€/m2	47.796,86
Equipo de acción neumática exutorios	261,66	€/# exutorios	6.279,73
Sistema apertura y control exutorios	6.724,66	€/#	6.724,66
Sumas			128.481,25
Diff			59,2%

Tabla 11: Medidas y Presupuesto solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$

	Solución prescriptiva (h+0,5)
Superficie geométrica exutorios (m2)	6,5
Superficie de aireación exutorios (m2)	78,98
Nº Exutorios/depósito	13
Nº de depósitos	6
Nº exutorios total	78
Superficie exutorios (m2)	329,6
% Respecto cubierta	2,75%
Longitud total barreras de humo (m)	312,11
Profundidad barreras de humo (m)	3,37
Superficie barreras de humo (m2)	1.050,25
Equipo de acción neumática exutorios	1
Central control exutorios	1

IVA no inc.

Exutorios (inst. inc.)	2.820,00	€/#	219.960,00
Barreras de humo	24,06	€/m2	25.268,88
Equipo de acción neumática exutorios	261,66	€/# exutorios	20.409,13
Sistema apertura y control exutorios	6.724,66	€/#	6.724,66
Sumas			272.362,67
Diff			237,6%

Se observa una gran diferencia entre los costes de inversión entre unas soluciones y otras. En añadido, los materiales y medios requeridos de producción para las soluciones prescriptivas son mayores.

La solución alternativa representa un coste de inversión significativamente menor. No obstante, en el presupuesto solo se está valorando el coste de ejecución material. No se tienen en cuenta “soft costs” como ingeniería. Seguramente, la ingeniería requerida para realizar un informe de base requerido para demostrar que la solución equivalente alternativa, es decir, la prestacional, requiera recursos significativos tanto de horas en simulación, como de ingeniería y elaboración de informes. Dichos costes no se están considerando en este trabajo.

4.2.- Funcionales

Temperatura:

- La solución prescriptiva $Y = 2/3 h m$ es la que mayor pico de temperatura presenta bajo cubierta a una altura de 11m. Esto es debido a que el gran depósito funcional que presenta limita la distribución de calor a depósitos adyacentes.
- La solución prescriptiva $Y = h + 0,5 m$ y la solución alternativa evaluada como prestacional presentan un comportamiento similar en cuanto a la distribución del calor. No obstante, los depósitos de la solución prescriptiva hacen que en esta solución se distribuya ligeramente de menor manera el calor y se alcanza un pico de temperatura algo superior. En añadido, en esta solución
- En cuanto la temperatura a $h=2 m$ todas las soluciones presentan un comportamiento similar. No se detectan o registran zonas calientes, permitiendo los recorridos de evacuación en buenas condiciones de temperatura excepto en el nodo del incendio.

Visibilidad (humos):

- La solución prescriptiva $Y = h + 0,5 \text{ m}$ y la solución alternativa evaluada como prestacional presentan un comportamiento similar en cuanto a concentración de humos a $h=2\text{m}$. Se concentra en los laterales de la nave. También es cierto que en la solución prescriptiva se presenta una acumulación de humo muy marcada no intuitiva en la esquina más alejada al núcleo del incendio, mientras que en la solución evaluada como prestacional, se presenta mayoritariamente en los laterales. Se concluye que se concentra donde menor interacción hay con corrientes de aire debido a aportación/succión de este.
- La solución prescriptiva $Y = 2/3 h \text{ m}$ presenta mayores zonas comprometidas inundadas de humo a $h = 2 \text{ m}$ perjudicando los recorridos de evacuación. Principalmente se concentran en los depósitos adyacentes, los cuales funcionan como aportadores de aire. Esto sumado a que las barreras de humo tienen bastante profundidad, hacen que las corrientes escupan el humo distribuido por casi toda la nave hacia abajo.

5.- Conclusiones

5.1.- Conclusiones sobre la metodología

El empleo de software de simulación como PyroSim y FDS (Fire Dynamics Simulator) en el diseño de sistemas de control de temperaturas y evacuación de humos en naves logísticas ofrece una metodología avanzada que permite obtener simulaciones con gran precisión y así dar lugar a soluciones prestacionales adaptadas a las necesidades específicas de cada instalación. A diferencia de seguir las normas prescritas de manera rígida, el uso de estas herramientas permite modelar escenarios de incendio de manera detallada, considerando variables específicas como la geometría específica de la nave, los materiales presentes, las cargas térmicas y las dinámicas del humo. Esto resulta en un diseño optimizado y personalizado que puede mejorar la seguridad y eficiencia en la evacuación y el control del fuego. Además, esta metodología proporciona la posibilidad de realizar análisis comparativos entre diferentes estrategias de diseño, lo que permite seleccionar la solución más adecuada con base en los resultados obtenidos de las simulaciones, en lugar de depender únicamente de criterios normativos generalizados. La simulación también facilita la evaluación del comportamiento de los sistemas bajo condiciones extremas, lo que puede no estar completamente cubierto por las normativas estándar. En resumen, la metodología basada en simulaciones con PyroSim y FDS ofrece flexibilidad, precisión y un enfoque basado en el rendimiento real del sistema, lo que puede superar las limitaciones de un enfoque normativo prescriptivo, proporcionando soluciones más seguras y adaptadas a las necesidades específicas de cada proyecto logístico.

No obstante, también presenta desventajas importantes, especialmente en relación con los recursos computacionales que requiere. Estas herramientas de simulación, al modelar dinámicas complejas de fuego y humo en escenarios detallados, demandan una gran capacidad de procesamiento y memoria. Este requisito se traduce en la necesidad de equipos de alta gama o incluso de infraestructuras de computación, lo que puede ser costoso tanto en

términos de hardware como de tiempo de simulación. Además, la inversión en estos recursos computacionales no solo implica un alto costo inicial, sino también un mantenimiento continuo y la actualización de equipos, lo que incrementa los gastos operativos. Para proyectos de menor escala o para empresas con recursos limitados, estas exigencias pueden hacer que la implementación de simulaciones detalladas sea financieramente complicada, especialmente cuando se comparan con los enfoques normativos tradicionales que no requieren este nivel de tecnología. Además, el tiempo que pueden llevar estas simulaciones, especialmente en modelos complejos, puede ser considerable, lo que puede retrasar el proceso de diseño y construcción. Por lo tanto, aunque la metodología basada en simulación ofrece claras ventajas, la necesidad de gran capacidad de computación representa una barrera significativa en términos de costos y accesibilidad.

También puede llegar a tener una desventaja a la hora de tener que hacer trámites con las administraciones públicas, que son quienes dan los permisos y licencias de obras de instalación correspondientes. Los proyectos, al fin y al cabo, deben ser validados por los técnicos municipales de los ayuntamientos. Para demostrar que una solución prestacional equivalente es válida, se requiere un informe visado por una ingeniería que así lo demuestre. No obstante, este tipo de informes puede llegar a dar a dudas.

Por otro lado, muchas ingenierías puede que se sientan más respaldadas o protegidas si siguen las definiciones prescriptivas de una norma extendida y altamente aceptada. De este modo, realizan un proceso más sistemático que aporta confianza tanto a la ingeniería como a la parte cliente.

En el desarrollo de este trabajo, donde se ha utilizado como nave objeto de estudio una nave de tipología comercial real, y no se han estudiado todos los parámetros posibles para llegar a realizar un diseño o informe prestacional válido, se ha demostrado la necesidad de grandes capacidades de computación así como tiempos de simulación para tal fin.

5.2.- Conclusiones sobre los resultados

La solución prestacional estudiada no se escapa de los márgenes de funcionamiento marcados por las soluciones prescriptivas según el alcance y parámetros estudiados y simulados en este trabajo. De hecho, se podría decir que los resultados obtenidos en las simulaciones para la solución evaluada como prestacional, son mejores que para la solución prescriptiva $Y=2/3 h$ y ligeramente similares o incluso algo mejor que para la solución prestacional $Y= h + 0,5 m$. Se concluye además que estos resultados son posibles gracias a la consideración de elementos auxiliares al SCTEH (Sistema de control de temperaturas y evaluación de humos) como elementos funcionales para el mismo. En este caso, portones auxiliares y muelles de carga como elementos de aportación de aire. Este punto puede ser origen de crítica a la norma UNE 23585, ya que no permite considerar otros elementos auxiliares como elementos de aportación de aire, teniendo que, probablemente, sobredimensionar innecesariamente algunas soluciones.

Cabe recordar que las soluciones prescriptivas son aceptadas por el reglamento, por lo tanto, toda solución equivalente que presente una funcionalidad igual o mejor deberá ser válida tal y como estipula el propio reglamento (RD 2267/2004)

No obstante, los parámetros estudiados y simulados tienen carácter académico y un alcance muy limitado. No se puede sacar una conclusión con certeza sobre la validez de la solución prestacional evaluada, pero sí que se puede asegurar que no se han detectado indicios para declarar su invalidez.

Considerando la menor cuantía de recursos materiales y económicos necesaria para la implantación de la solución prestacional evaluada, se concluye férreamente que resulta de interés este tipo de metodologías de diseño y su continuidad de estudio.

5.3.- Recomendaciones para futuros estudios

- Ampliación del análisis económico.

En futuros estudios, sería valioso realizar un análisis económico más exhaustivo que incluya no solo los costes de ejecución material, sino también los "soft costs" asociados a la ingeniería y la gestión del proyecto. Esto incluiría los gastos derivados de la preparación de informes técnicos detallados, las horas invertidas en simulaciones, así como el costo no monetario sino temporal de obtener las aprobaciones necesarias de las autoridades. También sería útil calcular el costo total del ciclo de vida de cada solución, considerando factores como el mantenimiento a largo plazo, la eficiencia energética y la posible necesidad de actualizaciones tecnológicas. Este análisis permitiría una mejor comprensión de la relación costo-beneficio de las soluciones prescriptivas frente a las prestacionales, proporcionando una visión más completa para la toma de decisiones.

- Optimización de recursos computacionales.

Dado que la capacidad computacional es un factor limitante en simulaciones avanzadas como las realizadas en PyroSim y FDS, futuros estudios podrían explorar formas de optimizar el uso de recursos. Se podría investigar el uso de soluciones en la nube, que ofrecen escalabilidad en términos de capacidad de procesamiento, permitiendo ejecutar simulaciones más complejas en menos tiempo sin la necesidad de una inversión inicial en hardware. También sería relevante evaluar el impacto de diferentes configuraciones de hardware en el tiempo de simulación y la precisión de los resultados, lo que podría ayudar a determinar la configuración óptima para distintos tipos de proyectos.

- Investigación sobre validación y aceptación regulatoria

La aceptación de soluciones prestacionales por parte de las autoridades locales es un aspecto crítico que debe ser abordado en futuros estudios. Sería útil investigar y documentar casos exitosos de implementación de soluciones prestacionales, incluyendo el proceso de

aprobación regulatoria y los desafíos enfrentados. Además, sería valioso colaborar con autoridades regulatorias para desarrollar guías que faciliten la evaluación y aprobación de este tipo de soluciones. Esta investigación podría también explorar la posibilidad de estandarizar ciertos aspectos de la metodología prestacional, lo que podría aumentar su aceptación y reducir la carga de prueba para cada nuevo proyecto.

- Ampliación del Análisis Funcional

De cara a obtener conclusiones más robustas, futuros estudios deberían incluir simulaciones más prolongadas en tiempo y más detalladas en el modelado de las condiciones de incendio. Esto permitiría evaluar no solo las primeras etapas del incendio, sino también el comportamiento a largo plazo del fuego y del sistema de control de humos y temperaturas. Además, sería interesante explorar la implementación de variables adicionales en las simulaciones, como la influencia de las condiciones climáticas externas, o la interacción entre diferentes fuentes de calor y materiales. Estos estudios podrían proporcionar una visión más completa de cómo las distintas soluciones responden a condiciones reales y extremas

6.- Bibliografía y webgrafía

1. Real decreto 2267/2004 por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
2. Norma UNE 23585:2004 y 2017 Sistemas de control de humo y calor. Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y de evacuación de humos (SCTEH) en caso de incendio estacionario
3. Sistemas de protección contra incendios y de extinción en naves industriales – Grupo Intasal
4. Sistemas de protección contra incendios en naves industriales – Tusocal.
5. <https://www.savills.es/sectores/industrial-logistico.aspx> - Savills
6. PyroSim Tutorials | FDS – 01 – 13 / The Safety Channel.
7. <https://www.navelogisticamadrid.com/> - Forcadell
8. Industrial y Logístico, datos de mercado – Figures tercer trimestre 2023 España - CBRE
9. Proyecto de Adecuación de las condiciones de seguridad contra incendios nave de almacenamiento logístico y oficinas – AGP S.L.
10. Rociadores Automáticos – Enginyers Tarragona
11. Presupuesto - Protecciones Contra Incendios Clima, S.L.
12. Análisis CFD de fuegos en naves industriales para evaluar distancias de intervención y evacuación – Beatriz Peci García
13. <https://www.prefire.es/hub/2021/03/como-funciona-un-sistema-scteh/> - Prefire
14. <https://tecnitexfire.com/blog/que-es-un-sistema-scteh-y-como-funciona/> - Tecnitex
15. <https://www.iberext.com/sistemas/sistemas-de-control-de-temperatura-y-evacuacion-de-humos-scteh/> - Ibertext
16. <https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/firegov-fire-service/fire-dynamics> - Fire Dynamics. NIST.
17. <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2023-1/user-manual/> - PyroSim

ANEXOS

A1. Alineación con objetivos de desarrollo sostenible según agenda 2030



El desarrollo de soluciones avanzadas para el control de temperaturas y humos busca promover el trabajo decente y el crecimiento económico inclusivo. En primer lugar, la creación y mantenimiento de tecnologías para el diseño de estos sistemas genera nuevas oportunidades de empleo y fomenta la capacitación técnica especializada. Estos roles incluyen ingenieros y otros técnicos quienes son esenciales para el desarrollo, instalación y gestión de estas soluciones, contribuyendo a la expansión del mercado laboral y mejorando las condiciones de trabajo. Además, la inversión en estas tecnologías impulsa la innovación y la competitividad de las empresas al permitirles adoptar procesos más eficientes y tecnológicamente avanzados, lo que puede abrir nuevos mercados y fomentar un crecimiento económico sostenible. La implementación de sistemas efectivos de control de temperaturas y humos también mejora las condiciones laborales al mitigar los riesgos asociados con ambientes extremos y la exposición a contaminantes, creando un entorno de trabajo más seguro y saludable. Finalmente, estas soluciones suelen estar diseñadas con un enfoque en la eficiencia energética y la reducción de emisiones, lo que apoya prácticas empresariales más sostenibles y responsables, alineándose con el objetivo de un crecimiento económico que sea respetuoso con el medio ambiente. Así, la integración de tecnologías avanzadas en el control de temperaturas y humos no solo impulsa la economía y mejora las condiciones laborales, sino que también promueve un desarrollo empresarial que es tanto innovador como sostenible.



Se aboga por el fortalecimiento de la industria, la promoción de la innovación y la mejora de la infraestructura. La implementación de tecnologías avanzadas en la regulación de temperaturas y la gestión de emisiones no solo moderniza los sistemas industriales existentes, sino que también impulsa la creación de nuevas infraestructuras adaptadas a las necesidades contemporáneas del mercado. Estas soluciones innovadoras incluyen sistemas de ventilación de alta eficiencia, controles automatizados de temperatura y tecnologías de captura y filtración de humos, que transforman el panorama industrial al hacer que los procesos sean más limpios y eficientes.

La integración de estas tecnologías contribuye significativamente a la modernización de la infraestructura industrial, al facilitar la construcción y renovación de instalaciones con estándares más altos de eficiencia energética y sostenibilidad. Al adoptar estas soluciones, las industrias pueden optimizar sus procesos de producción, reducir el desperdicio y minimizar su impacto ambiental, lo que, a su vez, mejora la competitividad global. La inversión en la investigación y desarrollo (I+D) de estas tecnologías fomenta una cultura de innovación dentro del sector, alentando a las empresas a desarrollar nuevas técnicas y materiales que pueden revolucionar la forma en que se llevan a cabo las operaciones industriales.

Además, el impulso hacia la innovación en el control de temperaturas y humos abre oportunidades para el desarrollo de productos y servicios nuevos, creando un entorno industrial más dinámico y resiliente. La adopción de tecnologías avanzadas permite a las empresas no solo cumplir con normativas ambientales más estrictas, sino también liderar en la creación de soluciones que ofrecen ventajas competitivas en un mercado global cada vez más orientado hacia la sostenibilidad. En resumen, el desarrollo y la implementación de soluciones para el control de temperaturas y humos no solo modernizan y fortalecen la infraestructura industrial, sino que también fomentan la innovación, apoyan el crecimiento económico y contribuyen a un desarrollo industrial más sostenible y eficiente.



Estas soluciones tecnológicas juegan un papel crucial en la creación de entornos urbanos más saludables y eficientes al abordar dos de los desafíos clave de las ciudades modernas: la gestión de la calidad del aire y el control del confort térmico.

Implementar sistemas avanzados de control de temperaturas y humos en áreas urbanas y en edificaciones puede reducir significativamente la contaminación del aire al capturar y filtrar emisiones nocivas, lo que mejora la calidad del aire y protege la salud de los residentes.

Además, estas soluciones tecnológicas pueden ser integradas en el diseño y la renovación de infraestructuras urbanas. La adopción de tecnologías innovadoras en la gestión térmica y de emisiones también apoya el diseño de espacios urbanos que mejoran la habitabilidad y el bienestar general de las comunidades. Esto incluye la creación de entornos interiores más confortables y saludables, así como la reducción del impacto ambiental asociado con la construcción y operación de edificaciones.

La integración de sistemas avanzados de control de temperaturas y humos en la planificación urbana y en las políticas de desarrollo sostenible facilita la construcción de comunidades más resilientes. En conjunto, estas tecnologías avanzadas ayudan a promover el bienestar urbano, mejorar la calidad del aire y hacer que las comunidades sean más adaptables a los desafíos ambientales contemporáneos, alineándose así con el objetivo 11 de ciudades y comunidades sostenibles.



Se promueve la producción y el consumo responsables. Estas tecnologías avanzadas son un ejemplo clave de cómo la innovación puede contribuir a un uso más eficiente de los recursos y a una reducción del impacto ambiental a través de prácticas más sostenibles.

Las soluciones prestacionales para el control de temperaturas y la evacuación de humos, al estar diseñadas para ser altamente eficientes, a menudo requieren menos materiales de construcción y se basan en un conocimiento técnico y humano avanzado. Esto significa que, en lugar de depender de grandes cantidades de materiales físicos, estas soluciones optimizan el uso de equipos y sistemas para lograr resultados efectivos. Por ejemplo, sistemas de ventilación y control de temperatura de última generación pueden ofrecer un rendimiento superior con una menor inversión en infraestructura física, al tiempo que maximizan la eficiencia energética.

Este enfoque no solo reduce la necesidad de recursos materiales, sino que también disminuye el impacto ambiental asociado con la producción y el desecho de estos materiales. Al utilizar menos materiales, se reduce el consumo de recursos naturales y se minimizan las emisiones generadas durante la fabricación y transporte de los materiales de construcción. Además, la optimización de equipos y sistemas permite una mayor eficiencia operativa y una menor demanda de energía, contribuyendo así a la reducción de la huella de carbono y a un consumo de recursos más responsable.

La implementación de tecnologías avanzadas para el control de temperaturas y humos también promueve prácticas de mantenimiento y operación más sostenibles. Estas soluciones suelen estar diseñadas para tener una vida útil más prolongada y requieren menos intervenciones frecuentes, lo que reduce el desperdicio y la necesidad de reemplazos constantes. Además, al basarse en un conocimiento técnico especializado, estas tecnologías

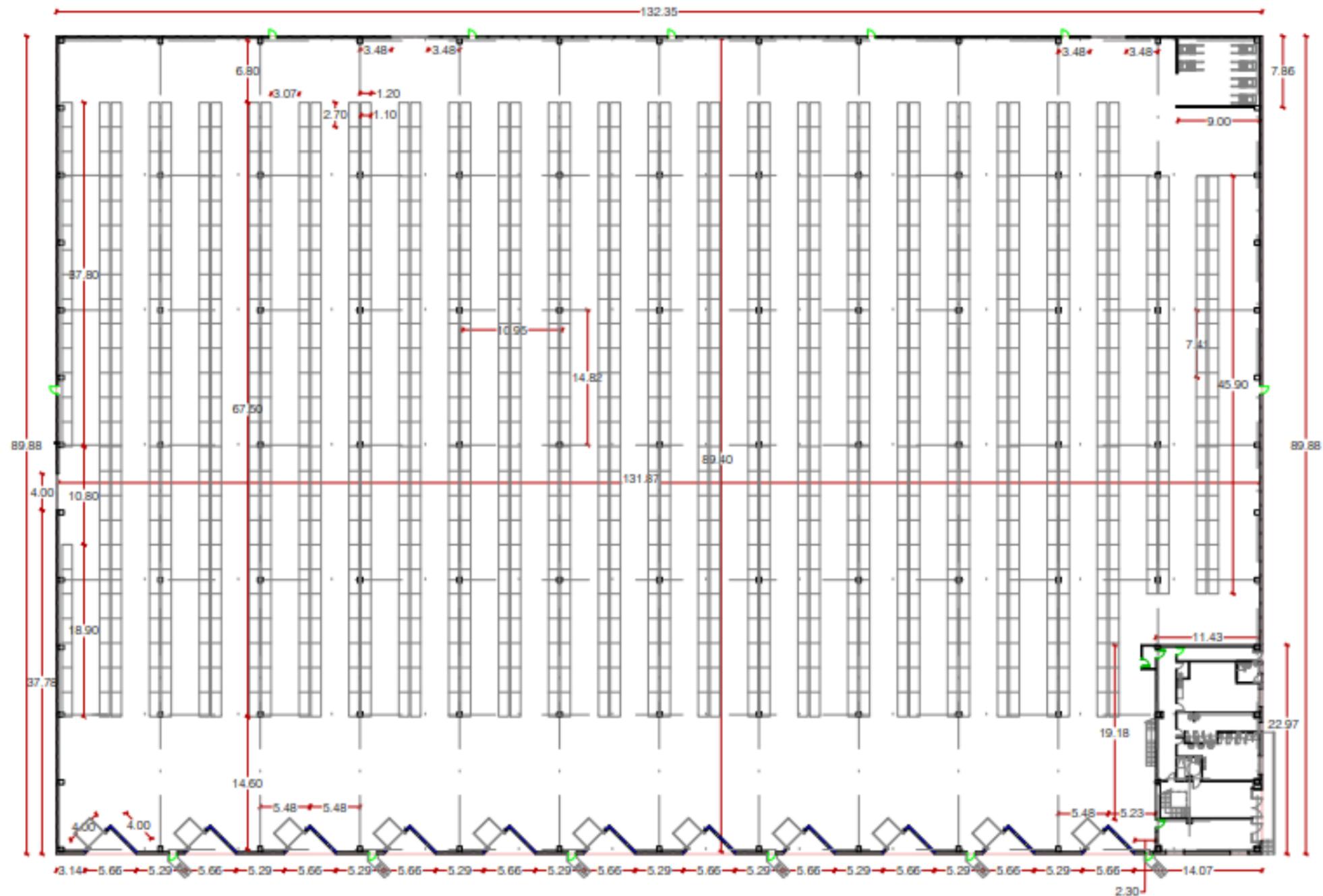
pueden ser ajustadas y adaptadas para mejorar continuamente su rendimiento, lo que contribuye a un ciclo de consumo más eficiente y responsable.

En resumen, las soluciones avanzadas para el control de temperaturas y humos ejemplifican cómo la innovación en el diseño y la implementación puede llevar a una producción y consumo más responsables. Al reducir la necesidad de materiales y optimizar el uso de los recursos, estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia y el rendimiento, sino que también apoyan prácticas más sostenibles, alineándose con el objetivo 12 de promover una producción y consumo que respeten los límites del planeta y fomenten un desarrollo más equilibrado.

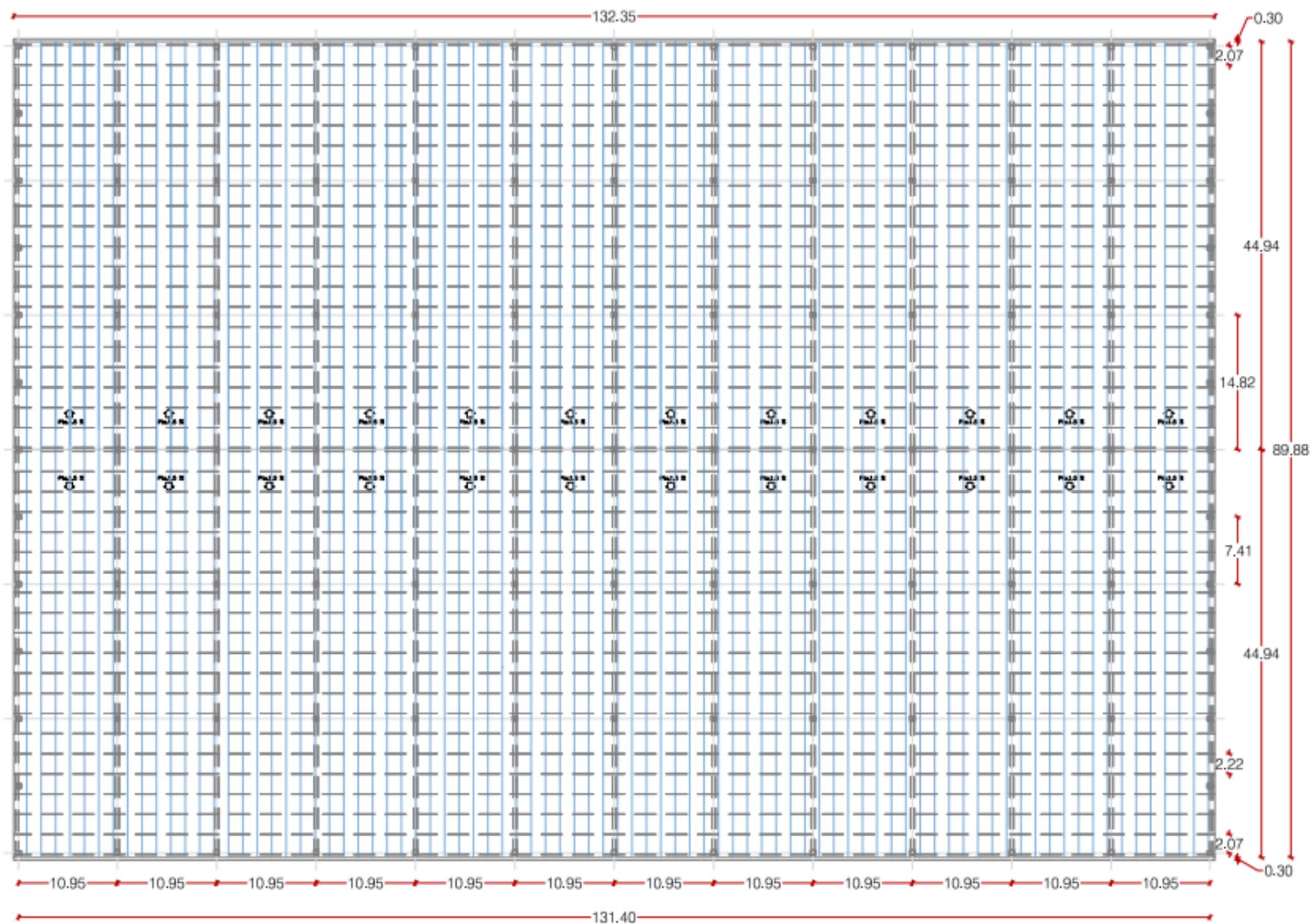
A2. Tabla resumen cálculos soluciones prescriptivas

	Solución prescriptiva (2/3h)		Solución prescriptiva (h+0,5)		
	Incendio en altura	Incendio en suelo	Incendio en altura	Incendio en suelo	
Incendio de diseño	Incendio en altura	Incendio en suelo	Incendio en altura	Incendio en suelo	
Altura del depósito (H)	13,365	13,365	13,365	13,365	m
Altura de almacenamiento (h)	10,5	10,5	10,5	10,5	m
Anchura de estanterías (w)	2,4	2,4	2,4	2,4	m
Flujo de calor liberado (q_f)	250	250	250	250	kW/m ²
Temperatura ambiente (T_{amb})	293	293	293	293	K
C_v	0,65	0,65	0,65	0,65	
C_i	0,6	0,6	0,6	0,6	
Area del incendio (A_f)	60,06	20,25	60,06	20,25	m ²
Perímetro del incendio (P)	19,92	18	19,92	18	m
Capa libre de humo (Y)	7,00	7,00	11,00	11,00	m
Profundidad media capa humos (d_i)	6,4	6,4	2,4	2,4	m
Masa de humos (M_f)	69,36	62,67	136,63	123,46	kg/s
Calor liberado por el incendio (Q_f)	12012,00	4050,00	12012,00	4050,00	kW
Incremento de temperatura (Θ_f)	171,14	63,86	86,88	32,42	°C
Temperatura capa de humos (T_f)	74,00	74,00	74,00	52,42	°C
Dif. Temperatura (T_{dif})	54,15	54,15	54,15	32,57	°C
Superficie aireación aerodinámica (A_v, C_v)	14,90	13,60	46,88	51,33	m ²
Superficie aireación geométrica (A_v)	22,92	20,92	72,13	78,98	m ²
Superficie aireación entrada (A_i)	75	61,5	379	406	m ²
$A_i:A_v$	3,27	2,94	5,25	5,14	
Superficie geométrica exutorios	6,5	6,5	6,5	6,5	m ²
Exutorios/depósito	4	4	12	13	unidades
Nº de depósitos	6	6	6	6	
Nº exutorios total	24	24	72	78	
m	101,4	101,4	304,2	329,6	m ²
	0,8%	0,8%	2,5%	2,7%	

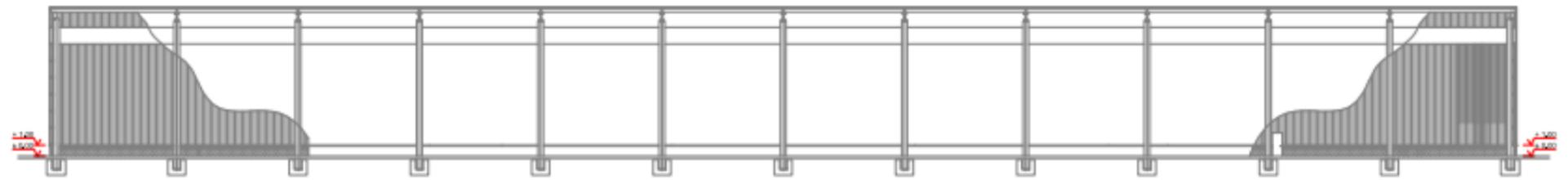
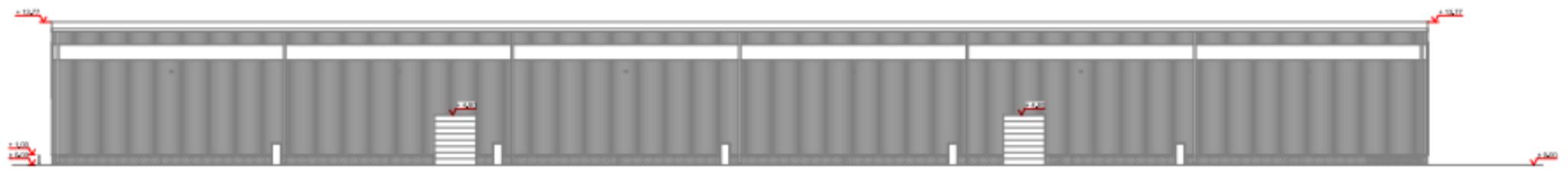
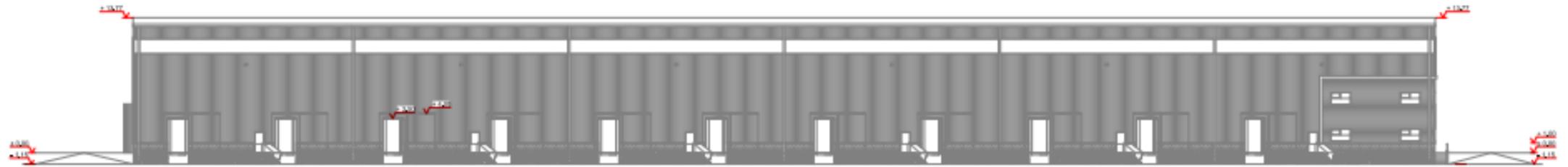
A3.- Planos



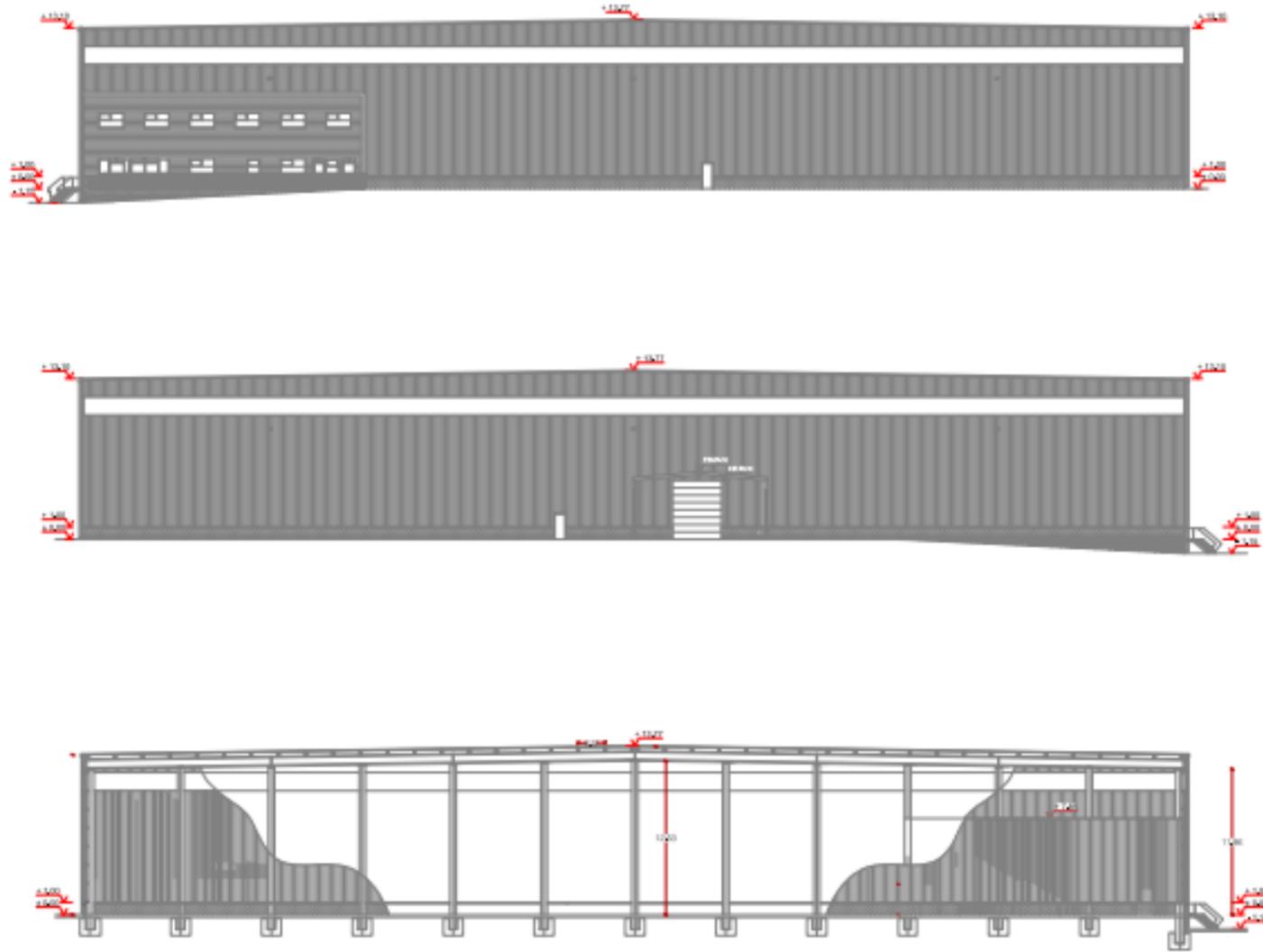
REVISIONES				PLANO	PROYECTO: Evaluación solución prestacional control de humos en nave logística
nº	DESCRIPCIÓN	APROBADO	FECHA		
				ICAI	DESCRIPCIÓN: Nave objeto estudio Planta con estanterías
					DISEÑO: ARTURO CUARTERO GARCÍA
					FORMATO A3



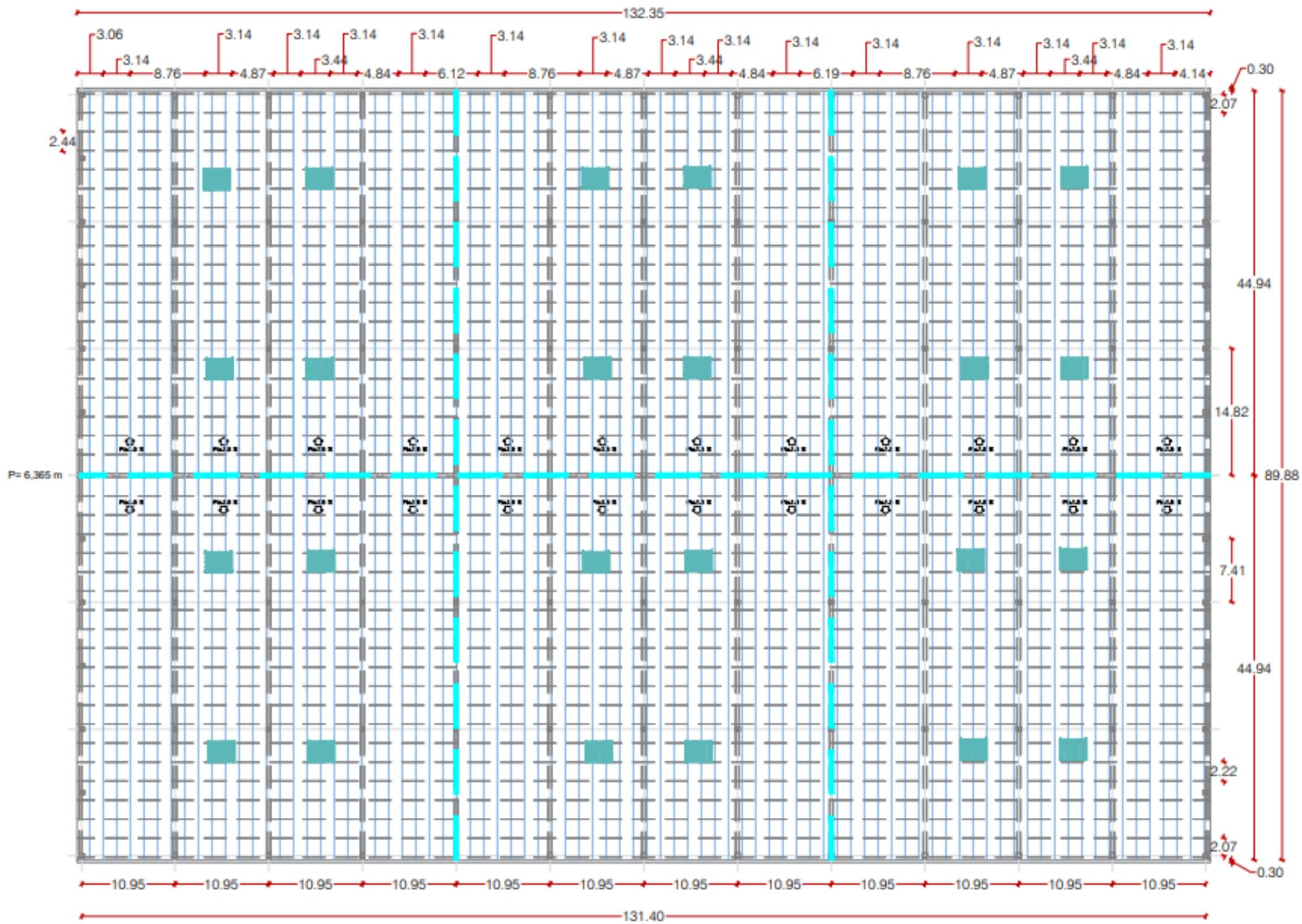
REVISIONES				PLANO	PROYECTO: Evaluación solución prestacional control de humos en nave logística	
nº	DESCRIPCIÓN	APROBADO	FECHA			
				ICAI	DESCRIPCIÓN: Nave objeto estudio Planta cubierta - Caso base	
				DISEÑO: ARTURO QUARTERO GARCÍA	ESCALA: 1:500	FORMATO A3



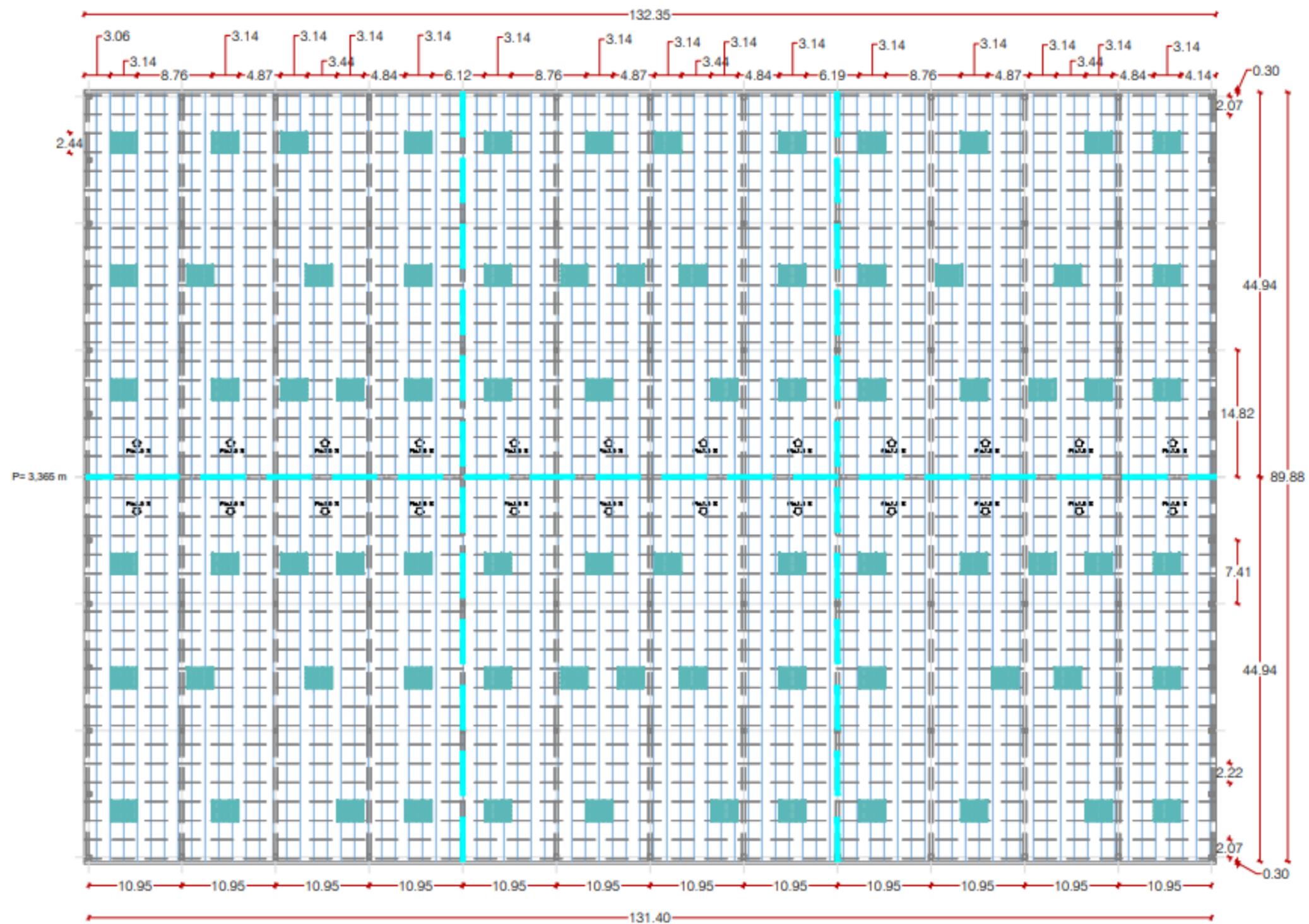
REVISIONES				PLANO	PROYECTO: Evaluación solución prestacional control de humos en nave logística
nº	DESCRIPCIÓN	APROBADO	FECHA		
				ICAI	DESCRIPCIÓN: Nave objeto estudio Alzados
					DISEÑO: ARTURO CUARTERO GARCÍA
					FORMATO A3



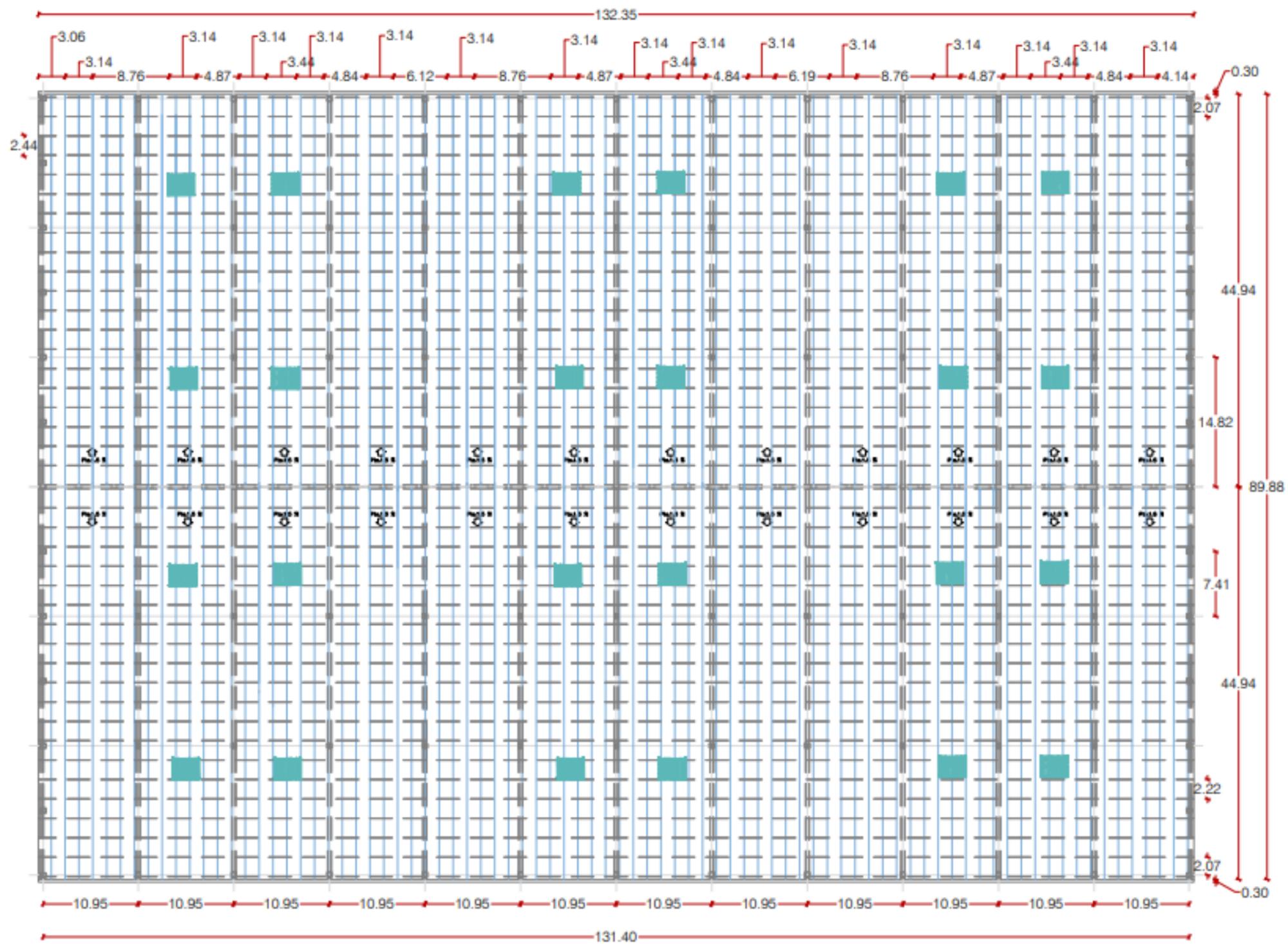
REVISIONES				PLANO	PROYECTO: Evaluación solución prestacional control de humos en nave logística
nº	DESCRIPCIÓN	APROBADO	FECHA		
				ICAI	DESCRIPCIÓN: Nave objeto estudio Perfiles
					DIBER: ARTURO CUARTERO GARCÍA



REVISIONES				PLANO	PROYECTO: Evaluación solución prestacional control de humos en nave logística
nº	DESCRIPCIÓN	APROBADO	FECHA		
				ICAI	DESCRIPCIÓN: Nave objeto estudio Planta cubierta - Solución prescriptiva Y = 2/3 h m h = 10,5 m
					DISEÑO: ARTURO CUARTERO GARCÍA



REVISIONES				PLANO	PROYECTO: Evaluación solución prestacional control de humos en nave logística
nº	DESCRIPCIÓN	APROBADO	FECHA		
				ICAI	DESCRIPCIÓN: Nave objeto estudio Planta cubierta - Solución prescriptiva Y = h + 0,5 m / h = 10,5 m
				DISEÑO: ARTURO CUARTERO GARCÍA	ESCALA: 1:500
					FORMATO A3



REVISIONES				PLANO	PROYECTO: Evaluación solución prestacional control de humos en nave logística
nº	DESCRIPCIÓN	APROBADO	FECHA		
				ICAI	DESCRIPCIÓN: Nave objeto estudio Planta cubierta - Solución prestacional
					DISEÑO: ARTURO CUARTERO GARCÍA ESCALA: 1:500 FORMATO A3