

## PROPOSAL FOR A SYMBIOSIS BETWEEN CLASSICAL METHODS OF FIRE RISK ASSESSMENT AND METHODS OF MODELING AND COMPUTER SIMULATION OF FIRE

Rey Lorenzana, Eloísa; Aguayo González, Francisco; Peralta Álvarez, María Estela; Martín Gómez, Alejandro Manuel; Lama Ruiz, Juan Ramón

Universidad de Sevilla

Among the methods of fire risk assessment, it should consider the scalar and vector methods. In the first set a numeric value (scalar) as an indicator of acceptable and unacceptable risk, having lots of methods. In the vector methods distinguish between random and deterministic, the latter may be of zone and field, which allow computer simulation of fire providing a wealth of information, evidence of which derives its name from vector. A proposal is made in this paper to carry out a joint assessment (scalar-vector) integrated fire risk in the life cycle of the building, making easier the tasks of project engineers and technical risk prevention labor.

**Keywords:** *Fire Risk Assessment; Scalar Methods; Vector Methods; Computational Simulation of Fire; Life Cycle Engineering*

## PROPUESTA SIMBIOSIS ENTRE MÉTODOS CLÁSICOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO DE INCENDIO Y MÉTODOS DE MODELADO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE INCENDIOS

Dentro de los métodos de evaluación de riesgo de incendio, cabe considerar los métodos escalares y vectoriales. En los primeros se establece un valor numérico (escalar) como indicador del riesgo aceptable y no aceptable, existiendo gran cantidad de métodos. En los métodos vectoriales se distingue entre los aleatorios y deterministas, estos últimos pueden ser de zona y de campo, los cuales permiten la simulación computacional de incendios aportando una gran cantidad de información, hecho del que deriva su nombre de vectorial. En el presente trabajo se hace una propuesta para llevar a cabo una evaluación conjunta (escalar-vectorial) del riesgo de incendio integrada en el ciclo de vida de la Construcción, facilitando las tareas de los ingenieros de proyectos y de los técnicos de prevención de riesgos laborales.

**Palabras clave:** *Evaluación del Riesgo de Incendio; Métodos Escalares; Métodos Vectoriales; Simulación Computacional de Incendio; Ingeniería del Ciclo de Vida*

Correspondencia: [alejandrommartin@gmail.com](mailto:alejandrommartin@gmail.com)

## 1. Introducción

Los incendios son uno de los principales riesgos en el ámbito laboral. Consecuencias como pérdidas materiales y posibles daños personales hacen que la evaluación del riesgo de incendio y el conocimiento del comportamiento del fuego sean imprescindibles para prevenir los efectos y minimizar sus consecuencias. Actualmente existen diferentes métodos de evaluación del riesgo de incendio que cuantifican el nivel de riesgo del establecimiento y aportan diferentes medidas de protección a establecer (INSHT, 2003). Gracias al avance tecnológico, existen y se desarrollan técnicas de Modelado y Simulación Computacional de Incendios (MSCI) que pueden completar estos métodos de evaluación general, proporcionando una información mucho más detallada sobre el desarrollo del incendio. Ello determina el interés en la mejora de los métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendios complementándolos con estas técnicas de MSCI, tanto para la evaluación de riesgos como para la actividad forense de siniestros de incendio.

## 2. Objetivo búsqueda

En el presente trabajo se propone la integración de los métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio (escalares) y los métodos de MSCI (vectoriales) para su aplicación conjunta e integrada en las potenciales actividades de evaluación en todo el ciclo de vida de una instalación o construcción industrial o urbana. Para ello se realiza un estudiobibliográfico y se establece el estado del arte de ambos tipos de métodos de evaluación, posteriormente se propondrá varias hipótesis, las mismas orientan la búsqueda de la integración sinérgica de ambos enfoques metodológico y su validación por la aplicación a un caso de estudio.

El caso de estudio consistió en la simulación de un incendio en un establecimiento industrial, con el cual pretendemos verificar que la utilización de los MSCI junto con los métodos convencionales proporciona unos resultados más detallados y mejora la evaluación del riesgo de incendio.

## 3. Estado del arte

El objetivo de evaluar el riesgo de incendio del edificio es comprender y caracterizar los riesgos relacionados con estos eventos, para mejorar la información de cara a la amplia gama de decisiones que deben ser tomadas como parte del diseño del edificio, su construcción y operación (Sakenaite, 2010). El Artículo 20 de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales (Jefatura de Estado, 1995) establece que el empresario deberá analizar las posibles situaciones de emergencia y adoptar las medidas necesarias en materia de primeros auxilios, lucha contra incendios y evacuación de los trabajadores. A continuación se describen los métodos actuales de evaluación, para su proyección en el presente estudio.

### 3.1. Métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio

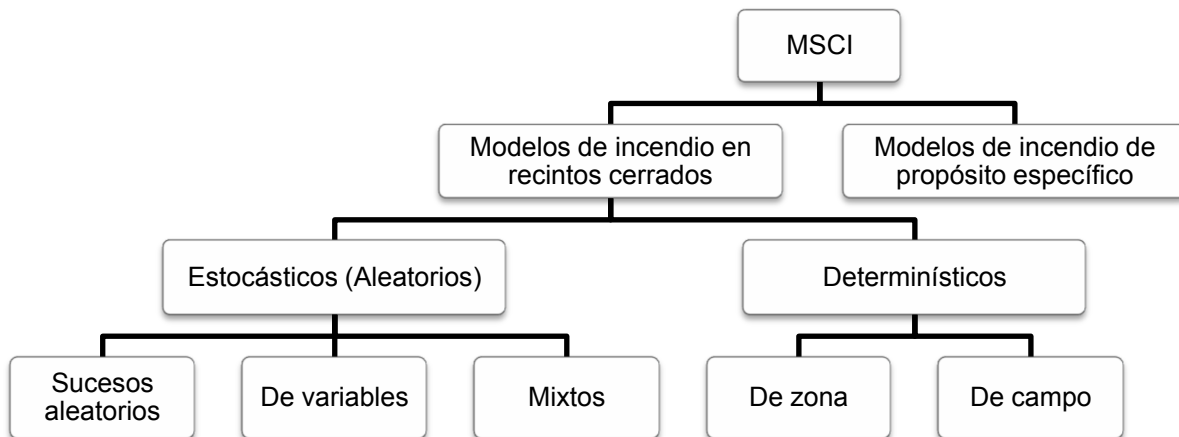
El documento base que regula la protección contra incendios en España es el RD314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, concretamente el Documento Básico de Seguridad en Caso de Incendio, de aplicación en edificaciones de uso no industrial (Ministerio de Fomento, 2010). En el caso de establecimientos industriales, la evaluación del riesgo de incendio viene regulada por el RD2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en los Establecimientos Industriales (RSCIEI) (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2004). Debido a su carácter no vinculante permite usar otros métodos de reconocido prestigio como: MESERI, Gretener, Gustav Purt, ERIC o FRAME. Todos estos métodos son

escalares, es decir, dan como resultado el valor del riesgo cuantitativo o cualitativo (aceptable/no aceptable). Y algunos proponen las medidas de protección necesarias. Los resultados que se obtienen con estos métodos son poco detallados, por lo que, aprovechando los avances técnicos computacionales y tecnológicos en las técnicas y herramientas de MSCI, es posible completar el estudio del incendio para realizar una correcta evaluación.

### 3.2. Métodos de modelado y simulación computacional de incendios (MSCI)

Los Modelos de Simulación Computacional de Incendios (MSCI) son la implementación del modelo de un incendio, la simulación en una computadora digital bajo una ejecución reiterada y el análisis de los resultados de las mismas (Abreu et al., 2004). Son métodos vectoriales que se basan en software de dinámica de fluidos computacional, es decir, emplean el método de los elementos finitos para resolver problemas de fluidos. Proporcionan información más completa que los métodos escalares; entre otras ventajas de la simulación frente a los métodos de cálculo analíticos, cabe destacar la posibilidad de tener en cuenta geometrías complejas, abordar el problema de la transmisión de calor y de dinámica de fluidos, estudiar la interacción entre las diferentes instalaciones de protección contraincendios... (Insúa, 2013). Los modelos de simulación computacional de incendios se pueden clasificar según la figura 1 (Walton, 2002; Watts, 2002):

Figura 1. Clasificación de MSCI



Los modelos de incendios de **propósito específico** simulan el comportamiento de un elemento concreto, como los detectores de humo, sistemas de ventilación, modelos de evacuación... Modelos de incendio en **recintos cerrados** son los que simulan la evolución del incendio completo. Estos últimos se pueden dividir en estocásticos, que consideran los factores aleatorios, y los determinísticos, que no los consideran.

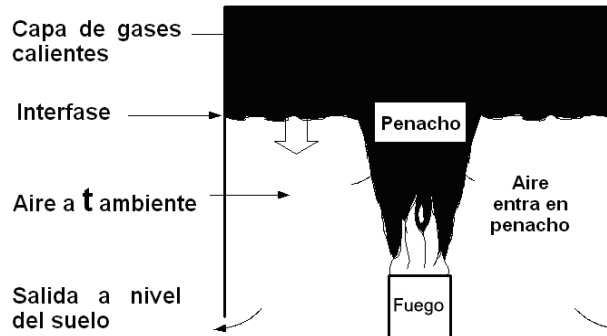
Los métodos estocásticos aún no están muy desarrollados, por ello, no los consideramos en este trabajo, aunque su evolución en el futuro es necesaria debido al carácter aleatorio de los incendios. Los determinísticos son los más utilizados hoy en día y los más desarrollados, por lo que son los que vamos a explicar a continuación, junto al modelo de propósito específico de evacuación, ya que asegurar una correcta evacuación es uno de los principales objetivos de la prevención de incendios.

### 3.3. Modelos determinísticos de zona

Un modelo de zona en el contexto de MSCI, en general, divide cada compartimento en dos zonas que poseen propiedades uniformes. La zona superior corresponde a la capa de

humos que contiene los gases producidos por la combustión y la zona inferior corresponde a la entrada de oxígeno que alimenta la combustión y es donde generalmente se encuentra el origen del incendio. Por último, habrá una tercera zona que se corresponderá con el penacho del incendio, donde se producen las reacciones de inflamación de los gases, humos y llamas.

**Figura 2. Modelo de zona**

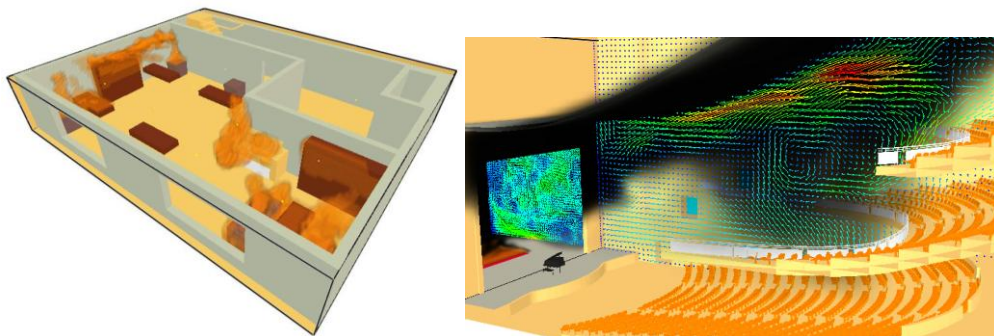


En cada zona se evalúan las ecuaciones de conservación obteniéndose las propiedades medias de las magnitudes. La suposición básica de un modelo de zona es que cada zona es uniforme en temperatura y composición; esta suposición supone una ventaja desde el punto de vista de la reducción de los tiempos de cálculo, aunque su proyección en los ensayos reales ha permitido observar que se forman capas estratificadas y que dentro de una capa la temperatura varía, siendo estas variaciones muy pequeñas en comparación con la diferencia de temperaturas entre las capas. Por lo tanto, estos modelos no describen la realidad en todos sus ámbitos, sino que asumen unas ciertas suposiciones. Para casos de grandes dimensiones donde la diferencia entre las capas sea apreciable estas suposiciones son válidas (Abreu et al., 2004). Existen multitud de modelos de zona y programas informáticos para simularlos como son ASET-B, OZONE y C-FAST.

### 3.4. Modelos determinísticos de campo

Los modelos de campo dividen el escenario en un gran número de pequeños volúmenes, y se evalúan las ecuaciones de conservación en cada uno de ellos. Como resultado, se obtienen los valores de todas las variables características del sistema (presión, velocidad, temperatura, etc.) en cada punto de la malla de cálculo. Por lo tanto, la solución generada (figura 3) por el modelo de campo consigue una mayor precisión que la solución del modelo de zona, aunque requieren un mayor tiempo de cómputo (Jiménez-Castellanos, 2012).

**Figura 3. Modelo de campo**



La ventaja de la dinámica de fluidos computacional (CFD) es que implica la resolución de las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, junto con la química de la llama y los

modelos de radiación, puede dar una descripción adecuada de una variedad de fenómenos del incendio (Drysdale, 2011). Aunque los modelos de campo suministran soluciones muy detalladas, requieren también información de entrada más completa y muchos recursos computacionales para modelar el incendio. Son apropiados para geometrías más complejas donde dos zonas no describen con exactitud el fenómeno del incendio (Abreu et al., 2004). El número de modelos de campo ha ido creciendo debido especialmente al desarrollo de la tecnología, entre los que destacan FDS, SOFIE y JASMINE.

### 3.5. Modelos de simulación computacional de evacuación

En los últimos años se ha incrementado el interés en el estudio de los modelos de simulación computacional de evacuación como una herramienta de análisis en la evaluación de los niveles de seguridad para la vida en las edificaciones. Su principal objetivo es obtener el tiempo de evacuación, que se estima a través una serie de expresiones que relacionan los datos adquiridos en ensayos, pruebas y observaciones con una aproximación "hidráulica" del flujo humano (Abreu et al., 2004). Existen multitud de modelos de simulación de evacuación como pueden ser STEPS, SIMULEX, EVACNET4, FDS+EVAC...

## 4. Hipótesis y objetivos propuestos

Como hemos indicado antes nuestro objetivo es proponer la integración de los métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio y los métodos de MSCI en una evaluación conjunta e incorporarla a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación. Para ello vamos a proponer varias hipótesis que caracterizar el problema y proponen tentativas de solución a los mismos cuya verificación permitirán concluir el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos.

- **Hipótesis:** es posible mejorar la práctica profesional de los Técnicos de Prevención de Riesgos Laborales en la Evaluación del Riesgo de Incendio incluyendo los métodos vectoriales de Modelado y Simulación Computacional de Incendios.
- **Hipótesis derivada 1:** es posible integrar en la Evaluación del Riesgo de Incendio con Métodos Convencionales (escalares), los métodos vectoriales de Modelado y Simulación Computacional de Incendios.
- **Hipótesis derivada 2:** es posible integrar la evaluación conjunta (escalar-vectorial) en la Evaluación del Riesgo de Incendio en la actuación preventiva desde la perspectiva del ciclo de vida de la instalación, conforme al estado del arte de los métodos vectoriales.

### 4.1. Modelo de integración del análisis escalar y vectorial del riesgo de incendio

El modelo propuesto es la integración entre las variables de solución del dominio escalar (métodos convencionales) con las variables de solución del dominio vectorial (simulación computacional) a través del dominio de relación.

Figura 4. Modelo de integración del análisis escalar y vectorial



- El **dominio escalar** consiste en la solución aportada por la aplicación de los métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio, que son el nivel de riesgo y las medidas de protección necesarias.
- El **dominio vectorial** está formado por toda la información obtenida de la simulación del incendio con métodos y herramientas MSCI. Son muchas las magnitudes que podemos obtener, entre las que destacan (McGrattan et al., 2010) velocidad de combustión, entalpía, tasa de generación de calor, altura de la interfaz, presión, temperatura y visibilidad.
- El **dominio de relación** consiste en ver cómo se pueden relacionar entre los dos dominios las medidas de protección y los resultados de la simulación. Hay algunas medidas que no se pueden simular, bien porque sean exigencias geométricas o comportamientos humanos. Otras sí pueden ser comprobadas, tal y como se muestra en la tabla 1.

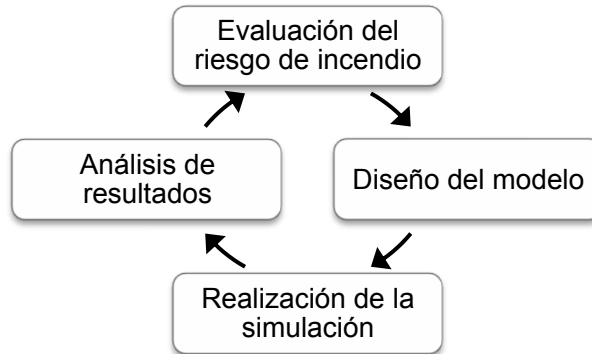
**Tabla 1. Medidas de protección - datos de salida**

<b>Medida de protección Métodos Clásicos</b>	<b>Parámetro Relacional</b>	<b>Datos salida de Métodos MSCI</b>	<b>Comentario</b>
Estabilidad y resistencia al fuego de elementos constructivos y portantes	Temperatura Tiempo Material Recubrimiento	Temperatura Termopar	Comprobar la temperatura máxima que se alcanza en varios puntos de los elementos portantes y tiempo que se mantiene dicha temperatura
Ventilación y eliminación de humos	Distribución del humo Ventilación natural o forzada Distribución de huecos	Fracción másica de hollín	Distribución del humo en el tiempo y correcto funcionamiento de las aberturas y sistemas de ventilación, natural o forzada
Alumbrado de emergencia y señalización	Distribución Visibilidad	Visibilidad	Distancia visible desde varios puntos para comprobar si se vería el alumbrado de emergencia y la señalización
Elementos de evacuación Número y disposición de las salidas de evacuación Disposición de escaleras y aparatos elevadores Dimensionamiento de salidas, pasillos y escaleras Longitud de los recorridos de evacuación	Ocupación Geometría del edificio Distancia y altura del recorrido de evacuación Visibilidad Distribución de humos Temperatura	Fracción másica de hollín Visibilidad Altura de la interfase Temperatura capa caliente Temperatura capa fría	Para la simulación de la evacuación existen programas dedicados exclusivamente a ello. Con la simulación de incendios podemos comprobar: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evolución del humo</li> <li>• Visibilidad</li> <li>• Altura de la interfase</li> <li>• Temperatura</li> </ul> Con todo ello se puede obtener el tiempo de evacuación disponible y compararlo con el tiempo de evacuación necesario, para ver si es suficiente.

#### 4.1.1. Fases de la evaluación conjunta

Para llegar a relacionar ambos dominios, se deberá seguir un proceso, que se ha denominado *evaluación conjunta* cuyas fases están reflejadas en la figura 5 y que pasamos a enumerar:

Figura 5. Fases de la evaluación conjunta de incendios

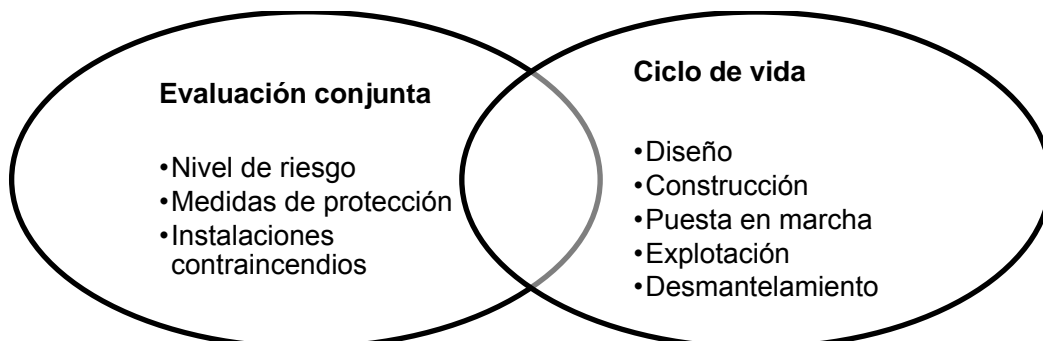


- **Evaluación del riesgo de incendio** con algún método convencional para obtener el nivel de riesgo y las medidas de protección necesarias.
- **Diseño del modelo** decidiendo el tipo de modelo a utilizar, de zona o de campo. Definir la geometría y el conjunto de datos necesarios.
- **Realización de la simulación** y en su caso, también simular la evacuación.
- **Análisis de los resultados de las simulaciones** para validar si las medidas de protección consideradas son suficientes o si es necesario realizar algún cambio. En el caso de que las medidas sean las adecuadas, el proceso se dará por finalizado. En caso contrario, habrá que cambiar las medidas de protección y volver al comienzo del proceso, que se convierte en iterativo hasta que se obtenga un resultado favorable.

#### 4.2. Modelo de integración de la evaluación conjunta en el ciclo de vida de la instalación

El modelo propuesto mostrado en la figura 6, es la integración de los resultados de la evaluación del riesgo de incendio conjunta en la actividad preventiva en las diferentes fases del ciclo de vida de la instalación.

Figura 6. Modelo de integración de la evaluación en el ciclo de vida



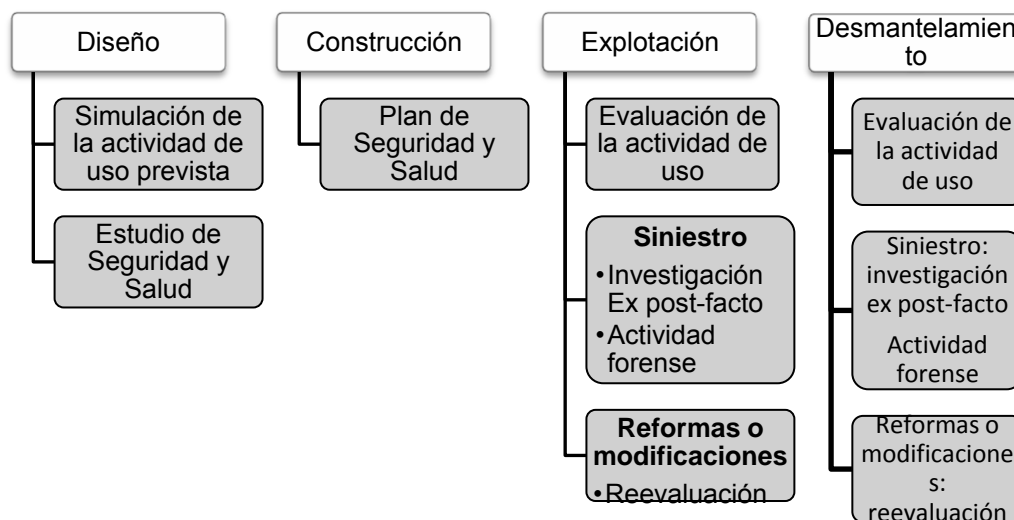
#### 4.2.1. Ciclo de vida de la instalación

El ciclo de vida de una instalación o establecimiento se refiere al desarrollo que experimenta una empresa o institución desde su concepción hasta su desmantelamiento. Las diferentes fases por las que pasa son:

- **Diseño** → fase inicial del proyecto en la que se define la geometría, distribución, materiales, instalaciones...
- **Construcción** → realización física del proyecto. Obra civil, instalaciones, maquinaria, mobiliario...
- **Puesta en marcha** → comienzo de la actividad productiva, administrativa, de venta...
- **Explotación** → tiempo durante el cual la instalación está en funcionamiento.
- **Desmantelamiento** → fin del ciclo de vida, cese de la actividad, desmantelamiento y si procede, demolición del edificio.

Las fases pueden ser asociadas a la evaluación del riesgo de incendio, como se muestra en la figura 7.

**Figura 7. Ciclo de vida de la instalación. Fases asociadas a la evaluación de riesgos**



En la fase de **diseño** la simulación de la actividad de uso prevista consiste en realizar una evaluación conjunta del escenario en fase de explotación que se está diseñando para establecer y proyectar las medidas de protección y la instalación contraincendios antes de la fase de construcción. Para llevar a cabo el Estudio de Seguridad y Salud se podrían realizar algunas simulaciones de los peores escenarios previstos durante la construcción del establecimiento.

Durante la fase de **construcción**, si se producen modificaciones en el Plan de Seguridad y Salud o en la metodología de construcción, se deberá realizar una nueva evaluación y simulación para comprobar que las nuevas condiciones de ejecución no generan nuevos peligros.

Durante la fase de **explotación** se puede comprobar el estado de las instalaciones contraincendios con un check-list y si es necesario por existir modificaciones sustanciales, realizar una nueva evaluación conjunta para establecer las medidas de protección oportunas. Si se produce un incendio o conato, en el estudio del incendio es útil tanto para la actividad forense (determinar si hay algún culpable) como para la investigación ex post-facto



(conocer las causas). Si durante esta fase se realiza algún tipo de reforma se deberá realizar una reevaluación de riesgos.

En la fase de **desmantelamiento** se producen otras actividades distintas a las que estaba destinado el establecimiento, que provocan nuevos riesgos. Realizar una evaluación y una simulación de los posibles escenarios más desfavorables puede ayudar a evitar algún accidente no deseado, que deben integrarse en el estudio de seguridad y salud del proyecto de desmantelamiento.

## 5. Caso de estudio

Para verificar las hipótesis expuestas anteriormente, se realiza una evaluación conjunta de una nave industrial con una zona de oficinas con software PyroSim. El objetivo es comprobar si el establecimiento analizado cumple las condiciones necesarias para una evacuación favorable. El principal criterio es comprobar que el tiempo disponible para la evacuación (ASET – Available Safe Egress Time) es superior al tiempo requerido para la evacuación (RSET – Required Safe Egress Time) (Ramírez, 2012). El ASET viene definido por las características intrínsecas del incendio. A continuación se muestran los factores que influyen y sus valores límites admisibles.

- Altura de la capa libre de humos en las vías de evacuación → mínimo 2 m
- Temperatura de la capa de humos en las vías de evacuación → máximo 200 °C
- Temperatura de la capa libre de humos en las vías de evacuación → máximo 65 °C
- Visibilidad → mínimo 10 m

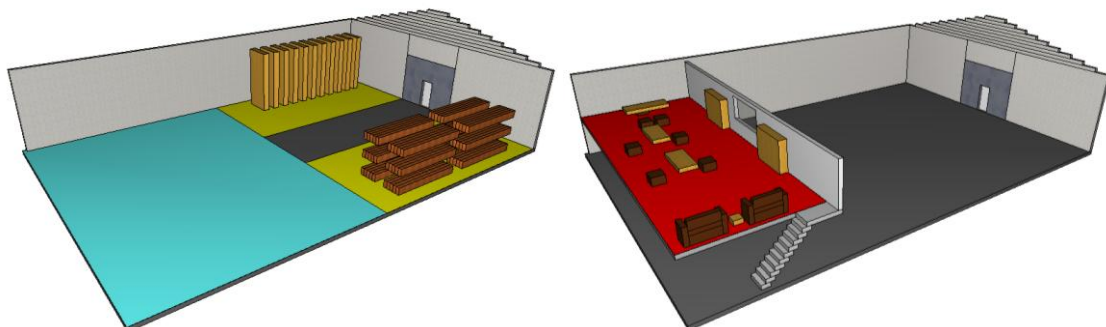
El RSET se obtiene realizando la simulación de la evacuación.

### 5.1. Descripción del establecimiento

El establecimiento elegido es una carpintería situada en una nave industrial de 600 m<sup>2</sup> (30x20 m). Cuenta con una solera de hormigón armado, paredes de hormigón prefabricado y cubierta a dos aguas de placas de acero galvanizado tipo sándwich. La fachada principal tiene una puerta doble para el acceso de personas y la trasera una puerta corredera para la introducción de la mercancía. La nave se divide en tres zonas:

- Zona de producción (carpintería) de 300 m<sup>2</sup> (15x20 m).
- Zona de almacenamiento de 225 m<sup>2</sup> y 6 m de altura máxima.
- Zona de oficinas situada en la entreplanta con un área de 148 m<sup>2</sup> (8x18,5 m).

**Figura 8. Nave industrial. Zonas producción y almacenamiento (izq.) y de oficinas (dcha.)**



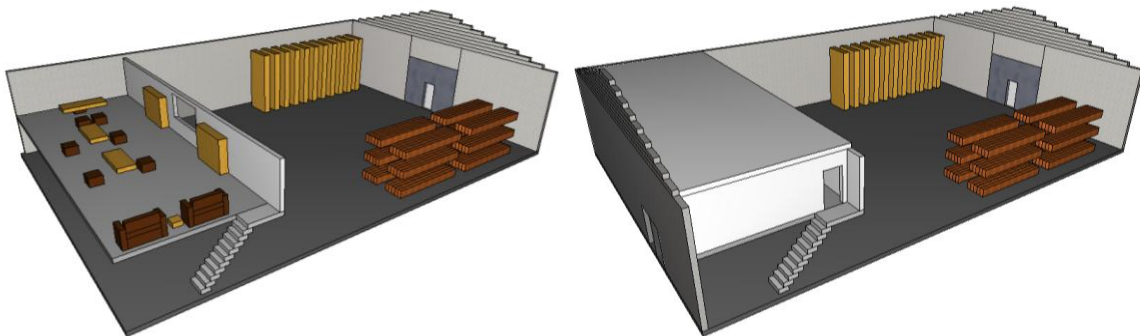
## 5.2. Evaluación del riesgo de incendio

El primer paso según la metodología propuesta es realizar una evaluación del riesgo de incendio con alguno de los métodos convencionales. Tratándose de un establecimiento industrial, se utiliza el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en los Establecimientos Industriales (RSCIEI)(Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2004).Obtenemos que el nivel de riesgo **ALTO factor 7**. El RSCIEI establece que las medidas para la evacuación en este caso de edificio tipo C y con nivel de riesgo alto, son: dos salidas con recorridos de evacuación que no excedan los 25 m, puertas y pasos con una anchura mínima de 80 cm, escaleras con una anchura mínima de 1 m, señalización (escaleras, salidas, pulsadores manuales de alarma), BIEs, extintores y alumbrado de emergencia.

## 5.3. Modelado

Para la realización de la simulación del incendio se utiliza un modelo de campo que proporciona mayor información. Dentro de los modelos de campo se selecciona el FDS, el más completo y de uso más extendido actualmente, el cual incorpora un módulo para la evacuación. Carece de interfaz gráfica, trabaja mediante comandos a través de la ventana de "Símbolo del Sistema". Aún así existen varias herramientas que proporcionan una interfaz gráfica para el uso de FDS. Para este caso de estudio se usó PyroSim desarrollado por ThunderheadEngineeringConsultants. Los pasos necesarios para realizar el modelo son: primeramente definir de las propiedades de los materiales, a continuación definición de las superficies, geometría, mobiliario, obstáculos, etc. y por último los dispositivos (posición de detectores, rociadores...). Una vez introducidos todos esos datos, habremos obtenido el modelo computacional de nuestro establecimiento, figura 9

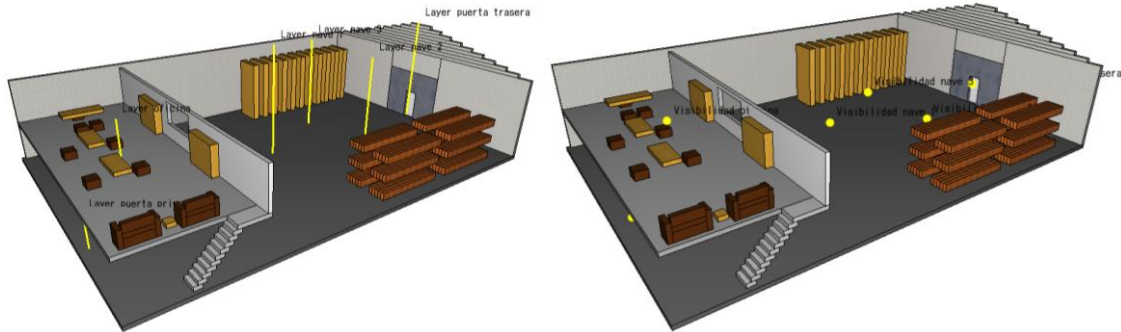
Figura 9. Modelo computacional. Oficina abierta (izq.) y cerrada (dcha.)



## 5.4. Simulación del incendio

Para la correcta realización de la simulación es necesario introducir diferentes datos como la definición del mallado, fuente de ignición, condiciones de ventilación, parámetros de simulación (tiempo de simulación, condiciones ambientales, tipo de simulación...), datos de salida (altura de interfase y temperaturas de la capa caliente y fría obtenidos con LayerZoningDevice y visibilidad).

**Figura 10. Situación de LayerZoningDevice (izq.) y Devices para visibilidad (dcha.)**

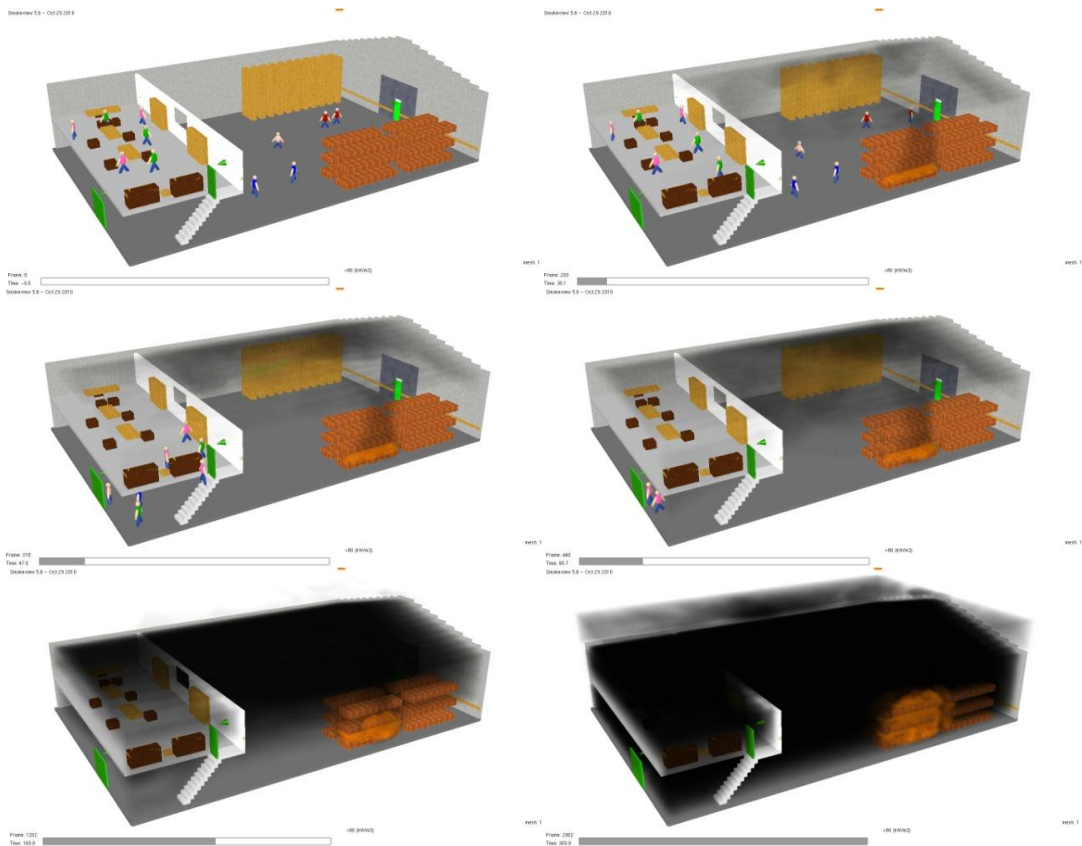


Una vez introducidos todos los datos necesarios es posible realizar la simulación del incendio. Sin embargo, el objetivo incluye la simulación de la evacuación. Se utiliza el mismo modelo computacional definiendo nuevos parámetros: mallado, propiedades de la evacuación, tipos de personas, posición inicial, huecos de evacuación, salidas, entradas, puertas y escaleras. Definidos los dos aspectos, es posible realizar las dos simulaciones simultáneamente.

### 5.5. Resultados y discusión

En la figura 11 se muestran algunas imágenes de la simulación obtenida. El objetivo de esta simulación es obtener el tiempo disponible para la evacuación (ASET) y el tiempo requerido (RSET) y compararlos.

**Figura 11. Simulación del incendio**



## 5.6. Tiempo disponible - ASET

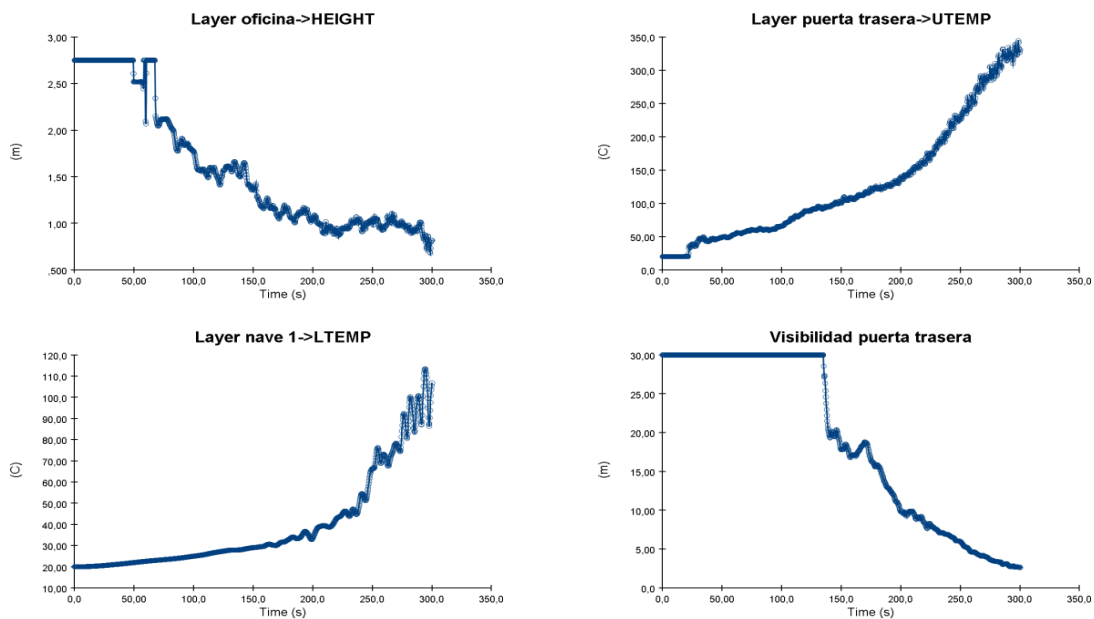
Con los datos obtenidos de la simulación del incendio podemos obtener cuatro ASET, dependiendo del factor a considerar. Se obtiene cada magnitud en seis puntos de la nave y en cada uno, un ASET, seleccionando el más restrictivo.

Tabla 2. Resultados

	Altura interfase (mín 2 m)	Tempcapa caliente (máx 200 °C)	Tempcapa fría (máx 65 °C)	Visibilidad (mín 10 m)
Nave 1	159,9	243,3	<b>248,7</b>	214,5
Nave 2	158,1	248,1	261,6	223,5
Nave 3	160,2	245,1	254,1	227,4
Oficina	<b>82,8</b>	> 300	277,2	231,9
Puerta principal	140,1	> 300	> 300	225,3
Puerta trasera	165,3	<b>235,5</b>	> 300	<b>199,5</b>

En la tabla anterior puede comprobarse que el valor más restrictivo entre todos los factores es el proporcionado por la altura de la capa libre de humos en las vías de evacuación, en la oficina de la planta alta con un valor de **82,8 segundos**. Todos los valores se obtienen a partir de las gráficas como las que muestra la figura 12 correspondientes, en este caso, a los resultados más restrictivos para cada factor.

Figura 12. Resultados



## 5.7. Tiempo requerido - RSET

FDS proporciona una gráfica en la cual se presenta el número de personas en el establecimiento en función del tiempo. El RSET es el momento en el que el número de personas en el establecimiento es 0. Dicho valor en nuestro caso es **68,5 segundos**.

## 5.8. Comparación de resultados

Ambos resultados son comparados y con ello se comprueba si el tiempo disponible es mayor que el requerido, lo que indicaría que la evacuación sería posible y segura. En el caso evaluado, el tiempo disponible para la evacuación segura de las personas es mayor

que el tiempo requerido, por lo que el establecimiento cumple las medidas necesarias para una correcta evacuación. **ASET = 82,8 segundos > RSET = 68,5 segundos**

Si aún así se quiere obtener un ASET mayor, y viendo que el factor más influyente es la altura de la capa de humos, se puede optar por instalar un sistema de ventilación forzada que extraiga parte de esos humos.

## 6. Conclusiones

El objetivo de este estudio era desarrollar y verificar una hipótesis principal, derivada en otras dos. La primera, sobre la evaluación conjunta, ha podido verificarse en su totalidad. La segunda hipótesis derivada, sobre su integración en el ciclo de vida de la instalación, ha sido desarrollada aunque no verificada. La primera de las hipótesis derivadas ha sido verificada con la aplicación de una evaluación conjunta a un establecimiento industrial. Con esta evaluación se ha demostrado que integrar los dos tipos de evaluaciones (escalar y vectorial) es útil para comprobar si las medidas de protección consideradas son suficientes y si su funcionamiento es el esperado, así como para tener un conocimiento más detallado de la evolución del incendio y de los humos.

Con toda la información proporcionada por la simulación del incendio se puede hacer una valoración más completa de las medidas de protección. Aunque en origen esas medidas cumplan con los reglamentos, el técnico de prevención, al observar la evolución del incendio, podrá valorar si sería mejor cambiar la distribución de algunos elementos, o imponer alguna medida extra, cumpliendo siempre con las exigencias reglamentarias mínimas. Teniendo en cuenta que en la actualidad la actividad del técnico de prevención se centra en la fase de explotación, la segunda hipótesis derivada no ha podido ser verificada. Para conseguir integrar la evaluación conjunta en todas las fases del ciclo de vida de la instalación, el técnico de prevención debería estar presente en cada una de ellas, o que otros técnicos competentes asuman esa responsabilidad en aquellas fases en las cuales normalmente aún no hay un técnico de prevención.

Aunque son muchas las ventajas de esta integración de evaluaciones, también existen algunas limitaciones en el uso de los MSCI. Los principales son la gran potencia computacional y los prolongados tiempos de simulación requeridos, llegando a prolongarse durante días; así como la necesidad de conocimientos más profundos de la generación y evolución del incendio por parte del técnico. La primera limitación irá desapareciendo con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología. La segunda no es tanto una limitación como un nuevo requisito para los técnicos de prevención. De lo que no hay duda es de que en un futuro próximo, la integración del MSCI en la evaluación de incendios será algo inevitable. Igual que ha ocurrido con otras disciplinas como el cálculo de estructuras con elementos finitos, que tuvieron un desarrollo lento y paralelo al desarrollo de los ordenadores, pero que hoy en día son de gran utilidad. Con la evolución de la tecnología y de los MSCI se obtendrán simulaciones más detalladas, realistas y rápidas. Su uso se hará más frecuente y necesario, lo que reportará una mejor evaluación del riesgo de incendio y un nivel de seguridad mayor, que es el principal objetivo de la prevención.

## 7. Bibliografía

- Abreu, O. V., Alvear, D., Capote, J. A., Lázaro, M., Rein, G., Torero, J. L. (2004). *Modelado y Simulación Computacional de Incendios en la Edificación*. Madrid: Ed. Díaz de Santos.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Reino Unido: Wiley.
- INSHT (2003). *NTP 599: Evaluación del riesgo de incendio: criterios*. España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

- Insúa, R. (2013). Simulación diseño SCTECH en centro deportivo. *Tecnifuego – AESPI*. N° 31, 34-35.
- Jefatura de estado (1995). *Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales* [en línea]. España, 10 noviembre 1995
- Jiménez-Castellanos Lucena, F. (2012). *Simulación numérica de incendios en edificios tipo atrio*. Proyecto Fin De Carrera. ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- Mcgrattan, K., Mcdermott, R., Hostikka, S., Floyd, J. (2010). *Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide*. U.S. Government Printing Office, Washington.
- Ministerio de fomento (2010). *CTE: Documento Básico SI*. España.
- Ministerio de industria, turismo y comercio (2004). *Guía Técnica de Aplicación: Reglamento de Seguridad Contra Incendios en los Establecimientos Industriales (RD 2267/2004, de 3 de Diciembre)*. España.
- Ramírez Cifuentes, A. (2012). *Estudio de la evacuación de ocupantes y control de humo en edificio en altura*. Tesis de Máster. ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- Sakenaite, J.(2010). A comparison of methods used for fire safety evaluation. *Mokslas – Lietuvos Ateitis*. Vol 2, n° 6, 36-42.
- Walton, W. D., Budnick, E. (2002). Deterministic computer fire models. Sección 11, Capítulo 5, *Fire protection handbook*. Decimo octava edición. National Fire Protection Association, EEUU.
- Watts, J. M. (2002). Probabilistic fire models Sección 11, Capítulo 6, *Fire protection handbook*. Decimo octava edición. National Fire Protection Association, EEUU.