



Integración de métodos escalares y vectoriales en la evaluación del riesgo de incendio en el ciclo de vida de una construcción

Integrated scalar and vector method for fire risk assessment of lifecycle construction

E. Rey (*), F. Aguayo (*), M.^a E. Peralta (*), J. R. Lama (*), M.^a J. Ávila (*)

RESUMEN

Los incendios son uno de los principales riesgos en el ámbito constructivo. Consecuencias como pérdidas materiales, interrupción de actividad o daños personales hacen que la evaluación del riesgo de incendio y el conocimiento del comportamiento de la construcción ante el fuego sean imprescindibles a la hora de disminuir la probabilidad de ocurrencia, prevenir efectos y minimizar consecuencias. Actualmente existen un conjunto de métodos convencionales (escalares) que cuantifican el nivel de riesgo y aportan diferentes medidas de protección. Además se encuentran en desarrollo métodos (vectoriales) de Modelado y Simulación Computacional que aportan información multidimensional. El presente trabajo establece un modelo para la integración de métodos escalares y vectoriales para conocer el desarrollo y evolución del incendio junto al nivel de riesgo no solo en la etapa de diseño de la instalación, sino en su ciclo de vida facilitando las tareas de ingenieros de proyectos y técnicos de prevención de riesgos laborales.

Palabras clave: Prevención contra incendios; evaluación de riesgo de incendio; modelado y simulación; simulación dinámica de incendios (FDS); ciclo de vida de la instalación.

ABSTRACT

Fire is one the main risks in the construction sector. Consequences as material losses, stoppage and possible personal damages cause the fire risk assessment and knowledge of building behaviour in fire situation are essential to prevent and minimize the consequences. Currently there are sets of conventional scalar methods that quantify the risk level and provide different protection standards. At the same time, procedures for Modelling and Computer Simulation of Fire based on vector methods are under development, which provide multidimensional information about the fire. The aim of this work is to establish an integration model of design and assessment with scalar and vector technics for increase the knowledge about the fire risk (both development and evolution processes), supply full information on the development of fire in all lifecycle stage's installation. This model will support the task of Project Manager and Experts in prevention of occupational Risks.

Keywords: Fire prevention; fire risk assessment; modelling and simulation; FDS (Fire Dynamics Simulation); lifecycle installation.

(*) Escuela Politécnica Superior - Universidad de Sevilla (España).

Persona de contacto/Corresponding author: faguayo@us.es (F. Aguayo)

Cómo citar este artículo/Citation: Rey, E., Aguayo, F., Peralta, M.^a E., Lama, J. R., M.^a J. Ávila. (2015). Integración de métodos escalares y vectoriales en la evaluación del riesgo de incendio en el ciclo de vida de una construcción. *Informes de la Construcción*, 67(539): e110, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.154>.

Licencia / License: Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de **Informes de la Construcción** se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento no Comercial 3.0. España (cc-by-nc).

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios son uno de los principales factores de riesgo en el ciclo de vida de una construcción en los distintos sectores productivos y de servicio. Consecuencias como paradas en la actividad, pérdidas materiales o posibles daños personales hacen que la evaluación del riesgo de incendio y el conocimiento del comportamiento del fuego en una construcción (1) (2) sean imprescindibles para evitar su aparición, prevenir los efectos y minimizar sus consecuencias. Actualmente existen diferentes métodos de evaluación de incendio que cuantifican el nivel de riesgo del establecimiento, aportan diferentes medidas de protección a implantar (3) y son hasta el momento los más extendidos en la evaluación de este tipo de riesgos. Con el avance tecnológico y el aumento de la capacidad de procesamiento se están desarrollando diferentes técnicas de Modelado y Simulación Computacional de Incendios (MSCI), que pueden complementar los métodos clásicos de evaluación de carácter general, proporcionando una información mucho más detallada sobre el desarrollo del incendio al ser aplicados sobre los modelos digitales de las construcciones desarrollados en las fases del proyecto.

Durante décadas, el establecimiento del riesgo y las medidas de protección contra incendios se han basado en el uso de normas, códigos y directrices, y el proceso se ha centrado únicamente en los sistemas de seguridad contraincendios bajo códigos prescriptivos. En la situación actual existen códigos prestacionales para el diseño de sistemas de protección contra incendio (en adelante PCI), ello determina el necesario cambio a procesos de concepción de este tipo de instalaciones que estén basados en el «rendimiento de la solución proyectual», que tiene como fin considerar alternativas al proyecto reglamentario, con el objetivo de obtener un entorno al menos tan seguro como el que hubiera sido diseñado de acuerdo a lo establecido en los reglamentos (4).

Con los avances de las técnicas CAx que permiten el modelado digital de edificios y construcciones teniendo en cuenta la concepción de instalación contra incendios (en adelante CI) basada en el rendimiento, sería interesante la mejora de la etapa de evaluación del riesgo de incendio a partir de procedimientos que completen la información aportada por los métodos convencionales, como es el caso de los MSCI, que pueden ser aplicados tanto para la evaluación de riesgos como para la actividad forense relativa a los siniestros sobrevenidos en construcciones por la materialización de un incendio.

En el presente trabajo se propone un modelo para la integración de los métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio (escalares) y los métodos de MSCI (vectoriales) en una evaluación conjunta, integrada en la ingeniería de ciclo de vida de una construcción o instalación productiva o de servicios. Para ello, se procede en un primer lugar a realizar un estudio del estado del arte de ambos tipos de métodos que permiten conocer el riesgo de incendio; posteriormente se formula la propuesta de modelo de evaluación conjunta integrado en el ciclo de vida de la instalación o construcción, ilustrando las ventajas que devienen de la propuesta formulada mediante la aplicación a un caso de estudio. El mismo consistirá en la simulación de un incendio en una construcción industrial, con el cual se pretende verificar que la utilización de los MSCI junto con los métodos convencionales proporciona resultados más detallados y mejora la evaluación del riesgo de incendio, resultando una validación de las soluciones adoptadas más ajustada a las condiciones de incendios reales.

2. SITUACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE INCENDIOS

El riesgo de incendio es la probabilidad de un resultado no deseado en una situación de incertidumbre donde el fuego es el riesgo que puede provocar la pérdida o detrimento de lo evaluado (vida, propiedad, continuidad del negocio, patrimonio, medio ambiente o alguna combinación de los anteriores). El objetivo de evaluar el riesgo de incendio del edificio o instalación productiva 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 (5). Actualmente los métodos de evaluación se pueden clasificar en cualitativos (los cuales identifican los riesgos en su origen, su estructura y la secuencia con que se manifiestan cuando se convierten en accidente), semi-cuantitativos (orientados a establecer el riesgo y la severidad) y cuantitativos (que aunque más extensos y complejos de aplicar, aportan información detallada del evento ya sea a partir de un análisis determinista centrado en la descripción de los riesgos en términos de consecuencia, o con un enfoque probabilístico que ofrece el riesgo cuantificado en base a la frecuencia y consecuencias). Actualmente la mayoría de las evaluaciones de riesgo de incendio se realizan a partir de los métodos cualitativos y semicuantitativos (métodos escalares o también denominados convencionales) por la facilidad de aplicación. Con el desarrollo de los métodos cuantitativos y los MSCI (métodos vectoriales), se amplían las posibilidades de estudio de los incendios gracias al empleo de modelos matemáticos que simulan (o reproducen) mediante modelos computacionales, el incendio real sobre el modelo o maqueta digital de la construcción o instalación, es decir, teniendo en cuenta el contexto, el proceso de combustión o la interacción de los elementos de la instalación entre otros.

2.1. Métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio

El marco reglamentario para la concepción de instalaciones de PCI en el territorio nacional está establecido según los distintos tipos de edificios y su uso. En el caso de las edificaciones de uso no industrial (6) el documento base que regula la PCI 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 (CTE DB:SI)*. Para 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 CI en los Establecimientos Industriales (RSCIEI)* (7). Considerando estos marcos reglamentarios bajo un enfoque prescriptivo o prestacional se conciben las instalaciones de PCI a partir de la determinación de riesgo con las metodologías que se incorporan en el ámbito de los diferentes Documentos Base anteriores. De forma complementaria bien sobre proyectos en la fase de diseño o en instalaciones en explotación, pueden ser usados para evaluar el riesgo de incendio otros enfoques no vinculantes, que permiten la aplicación y utilización de métodos de reconocido prestigio como son MESERI (8), Gretener (9) (10), Gustav-Purt (10) (11), ERIC (9) (12) o FRAME (13).

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 asociadas al nivel de riesgo identificado. Se expone

a continuación sintéticamente la forma en que partiendo de una evaluación escalar del riesgo de incendio, se establece en el marco normativo las exigencias de medidas PCI.

2.1.1. CTE DB-SI: Edificaciones de uso no industrial

Este Documento Básico (6) tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de seguridad (SI) en caso de incendio (de la SI-1 a SI-6 respectivamente: propagación, evacuación, instalaciones PCI, intervención bomberos y resistencia de la instalación). Para ello, el documento incorpora un método que no necesita cálculos, donde todas las medidas vienen tabuladas. En cada apartado se establecen las medidas a cumplir según el uso del edificio, área, altura, ocupación, etc. Y a partir de un conjunto de tablas se establecen las características de la estructura, de la evacuación o de las instalaciones PCI (14). Los inconvenientes recaen en que es de carácter general; no tiene en cuenta las singularidades propias de cada establecimiento imponiendo las mismas medidas de protección en todos los casos considerando solo características generales según uso.

2.1.2. Método de Riesgo Intrínseco para RSCIEI: edificaciones industriales

Esta metodología establece la caracterización de los establecimientos industriales en relación con la seguridad CI y el nivel de riesgo intrínseco. Consiste en calcular la «carga de fuego ponderada y corregida» para un sector de incendio a partir de la «carga de fuego unitaria», y partir de ella, obtener un «Nivel de Riesgo Intrínseco» (alto, medio o bajo) (3), que pueda establecer la coexistencia de los riesgos y limitar la posibilidad de que un incendio pueda salvar los lindes de una propiedad y provocar consecuencias económicas o humanas, como principal objetivo. A partir de este «nivel» el reglamento establece los requisitos constructivos y las instalaciones de PCI –separación entre edificios, características de muros, puertas, escaleras, rampas y otras comunicaciones que conecten una zona del edificio con el resto de los sectores de incendio (10).

Como se puede comprobar con los métodos anteriores los resultados obtenidos son poco detallados y expresan en forma de valor (escalar) el riesgo, por lo que, aprovechando los avances computacionales y métodos de MSCI, junto a las técnicas CADx que permiten el desarrollo de modelos digitales de las construcciones e instalaciones, es posible completar el estudio del riesgo de incendio para realizar una correcta evaluación con información obtenida en la reproducción computacional (simulación) del evento real en un escenario de análisis.

2.2. Métodos de modelado y simulación computacional de incendios (MSCI)

Los Modelos de Simulación Computacional de Incendios consisten en la implementación del modelo matemático de un incendio simulado en una computadora digital mediante el modelo computacional correspondiente, su ejecución reiterada y el análisis de los resultados de las mismas (15). Son métodos **vectoriales** basados en paquetes software de dinámica de fluidos computacional, bajo el modelo matemático de elementos finitos para resolver problemas de fluidos. Proporcionan información más completa que los métodos escalares; entre otras ventajas frente a los métodos de cálculo analíticos, cabe destacar que tienen en cuenta el incendio como **fenómeno causal** (consideran momento y lugar específico de

surgimiento, condiciones concretas de ocupación humana, características y cuantía de medios y materiales, condiciones atmosféricas y ambientales, disposición real de medios y fuerzas de detección, extinción, etc.), estudian el conjunto de **fenómenos físicos** (transporte de energía térmica, mecánica de fluidos, procesos químicos de combustión) así como las **características de la instalación** (geometrías complejas o tener en cuenta la interacción entre las diferentes instalaciones de PCI), ofreciendo algunos de ellos la posibilidad de incluir el **carácter aleatorio del evento** (16).

Los modelos de incendio se pueden clasificar en dos grandes grupos: en recintos cerrados y de propósito específico.

Los MSCI en **recintos cerrados** son los que simulan la evolución del incendio completo. Estos se pueden dividir a su vez en estocásticos (consideran los factores aleatorios) y determinísticos (que no los consideran). Los **métodos estocásticos** contemplan el incendio como fenómeno aleatorio, pero por sus altos requerimientos computacionales no tienen todavía gran difusión y no están muy desarrollados; por ello no son considerados en este trabajo, aunque su evolución en el futuro es necesaria debido al carácter aleatorio de los incendios. Los **determinísticos** (17) se fundamentan en la descripción de los fenómenos intrínsecos del incendio mediante ecuaciones y sistemas de ecuaciones algebraicas, diferenciales, diferenciales en derivadas parciales e integro-diferenciales y ofrecen resultados deterministas de las variables principales que caracterizan el incendio (densidad, temperatura, entalpía, presión, concentración de especies, velocidad del fluido de gases, etc.).

Los MSCI de **propósito específico** simulan el comportamiento de un elemento concreto, como detectores de humo, sistemas de ventilación o modelos de evacuación.

2.3. Modelos determinísticos de zona

Un modelo de zona divide cada compartimento en zonas de propiedades uniformes: la superior corresponde a la capa de humos que contiene los gases producidos por la combustión, la inferior a la entrada de oxígeno que alimenta la combustión donde generalmente se encuentra el origen del incendio y una tercera zona correspondiente al penacho del incendio, donde se producen las reacciones de inflamación de gases, humos y llamas (18).

Estos modelos predicen cómo cambia el estado de las capas de gas superior e inferior con el tiempo mediante la resolución de las ecuaciones de conservación de la masa y la energía con las condiciones de contorno apropiadas. Existen cuatro propiedades básicas necesarias para su desarrollo (presión-masa-volumen-temperatura) y las mismas se relacionan para cada zona a través de las cuatro ecuaciones de conservación [5] [6] [7] [8] aplicables previo conocimiento de las expresiones [1], [2], [3] y [4] siguientes (15):

Volumen del recinto:

$$WLH = V = V_u + V_l \quad [1]$$

donde:

V_u = volumen capa superior (m³)

V_l = volumen capa inferior (m³)

V = volumen (m³)

W = ancho recinto (m)

L = largo recinto (m)

H = alto recinto (m)

Conservación de presión:

$$P_u = P_l = P \quad [2]$$

donde:

- P_u = presión capa inferior (Pa)
- P_l = presión capa superior (Pa)
- P = presión de habitación característica (Pa)

Capa inferior (se puede considerar como gas ideal):

$$P_l \cdot V_l = m_l \cdot R_l \cdot T_l \quad [3]$$

donde:

- m_l = masa acumulada de capa inferior (kg)
- R_l = constante de los gases para la mezcla de la capa inferior (J/kg·K)
- T_l = temperatura de capa inferior (K)

Capa superior (se puede considerar como gas ideal):

$$P_u \cdot V_u = m_u \cdot R_u \cdot T_u \quad [4]$$

donde

- m_u = masa acumulada capa superior (kg)
- R_u = constante de los gases para la mezcla de capa superior (J/kg·K)
- T_u = temperatura capa superior (K)

Conservación de la masa:

$$\frac{dm}{dt} + \sum_{j=1}^n \dot{m}_j = 0 \quad [5]$$

Conservación de las especies:

$$m \frac{dY_i}{dt} + \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot (Y_{i,j} - Y_i) = y_i \dot{m}_f - \dot{m}_{i,loss} \quad [6]$$

donde:

- m = masa capa
- Y_i = fracción masa de la especie i
- Y_i = fracción masa de especie i producida por velocidad de masa de combustible suministrado
- $\dot{m}_{i,loss}$ = pérdidas por deposición superficial o colocación de partículas

Conservación de energía:

$$Vc_p \frac{dT_g}{dt} - V \frac{dP}{dt} + c_p \sum_{j=1}^n \dot{m}_j (T_j - T_g) = \dot{m}_{react} \Delta H_{eff} - \dot{q}_{loss} \quad [7]$$

donde:

- V = volumen de control
- P = presión global
- \dot{m}_{react} = velocidad de reacción combustible
- ΔH_{eff} = calor efectivo de combustión
- \dot{q}_{loss} = tasa de transferencia de calor perdida en fronteras

Con respecto a la ecuación de **conservación del momento** [8] no se aplicará explícitamente, ya que la información que se necesita para calcular velocidades y presiones vendrá de suposiciones y aplicaciones específicas de los principios del momento en los límites de las aberturas del compartimento.

Estos modelos permiten resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales por métodos numéricos. La suposición básica es que cada zona es uniforme en temperatura y composición, lo que supone una ventaja desde el punto de vista de la reducción de tiempo 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. Para casos de grandes dimensiones donde la diferencia entre las capas sea apreciable, estas suposiciones son válidas (15). Existen multitud de modelos de zona y software para simularlos como ASET-B (19), OZONE (20) y C-FAST (21) (22).

2.4. 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...) en cada punto de la malla de cálculo. Por lo tanto, la solución generada por el modelo de campo (Figura 1) consigue una mayor precisión que la del modelo de zona, aunque requieren un mayor tiempo de cómputo (18). Estos modelos se basan en paquetes de dinámica de fluidos computacional, *CFD (Computational Fluids Dynamics)* empleando el método de elementos finitos para resolver problemas de fluidos.

La ventaja del CFD es que implica la resolución de las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos y junto con la química de la llama y los modelos de radiación, puede dar una descripción adecuada de una variedad de fenómenos del incendio; por ejemplo, el movimiento de humo en espacios grandes, la propagación de la llama, la estructura de las llamas y el desarrollo del incendio en un compartimento. Sin embargo, las turbulencias no puede ser modeladas utilizando la presente potencia de cálculo y tienen que llevarse a cabo algunas aproximaciones, ya sea de las ecuaciones promediadas de Reynolds (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS*) o *Large Eddy Simulation (LES)* (23).

Aunque los modelos de campo suministran soluciones muy detalladas, requieren también información de entrada más detallada y altos recursos computacionales para modelar el incendio. Son apropiados para geometrías más complejas donde dos zonas no describen con exactitud el fenómeno del incendio (15). El número de modelos de campo ha crecido debido al desarrollo de la tecnología, destacando FDS (24) (25) (26), SOFIE (27) y JASMINE (28).

A continuación se describe de forma sintética el modelo FDS, uno de los más empleados a nivel internacional en el ámbito del MSCi (será el utilizado en el caso de estudio).

2.4.1. Simulación dinámica de incendios (FDS)

El modelo de simulación computacional de incendios *Fire Dynamics Simulator (FDS)* (29) ha sido desarrollado por Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology – NIST (USA) con la colaboración del VTT Building and Transport (Finlandia) (24).

Es un modelo computacional de dinámica de fluidos (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) concebido de manera específica para reproducir el fenómeno del incendio en recintos cerrados. Resuelve numéricamente un tipo de *ecuaciones de Navier-Stokes* apropiadas para baja velocidad y flujo considerado desde un punto de vista térmico con énfasis en el transporte de humo y calor derivados de incendios. Requiere la división del edificio o elemento de estudio en pequeños volúmenes de control rectangulares o celdas computacionales (15). Para la solución numérica se emplea el conjunto de ecuaciones simplificadas [9] [10] [11] [12] [13], resultado de las ecuaciones generales de la dinámica de fluidos. Todas las derivadas espaciales son aproximadas con diferencias finitas de segundo orden y las variables del flujo se computan temporalmente usando un algoritmo explícito de tipo predictor-corrector de segundo orden (15).

Ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad [9]$$

donde:
 ρ = densidad
 ∇ = divergencia del campo vectorial
 \vec{u} = vector velocidad

Ecuación de conservación de las especies:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \cdot \rho Y_i = -\rho Y_i \nabla \cdot \vec{u} + \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i^m \quad [10]$$

donde:
 Y_i = fracción másica de la i -ésima especie
 \dot{m}_i^m = tasa de producción de la i -ésima especie por unidad de volumen
 D_i = coeficiente de difusión de la i -ésima especie

Ecuación de conservación del momento (Navier-Stokes):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} = -\nabla \rho + \rho \vec{f}_r + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad [11]$$

donde:
 $\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) \right]$ = variación temporal del momento
 $\left[\nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} \right]$ = variación espacial del momento
 $\nabla \rho$ = fuerza producida por las diferencias de presión en el fluido
 $\rho \vec{f}_r$ = fuerzas externas (gravedad junto a otras como las provocadas por el arrastre ejercido por las gotas en el fluido)
 $\left[\nabla \cdot \tau_{ij} \right]$ = fuerzas provocadas por las tensiones tangenciales producidas por la viscosidad del fluido.

Ecuación de conservación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \nabla \cdot \vec{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i \quad [12]$$

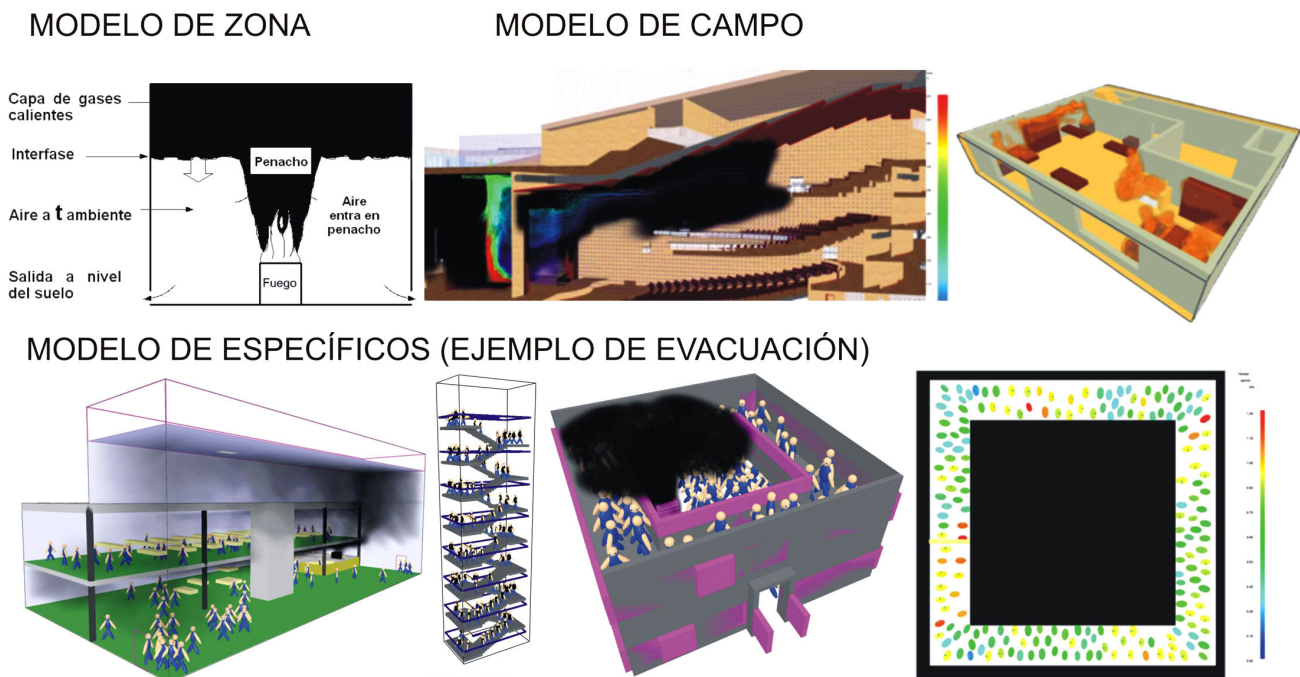


Figura 1. Métodos de modelado y simulación computacional de incendios (15) (17)

Los términos de la parte izquierda de la ecuación

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \vec{u} \right]$$

representan la velocidad de cambio de entalpía como medida de la energía en el volumen de control del fluido, tanto dependiente del tiempo como del movimiento del propio fluido,

$$\frac{Dp}{Dt}$$

es la velocidad del trabajo de la presión del fluido, \dot{q}^m es la velocidad de cesión de calor por unidad de volumen a causa de las reacciones químicas,

$[\nabla \cdot \vec{q}_r]$ es el flujo calórico radiactivo,

$[\nabla \cdot k \nabla T]$ es el flujo calórico conductivo,

$[\nabla \cdot \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i]$ es el flujo energético producido por la difusión de las especies.

Resultando la siguiente ecuación de estado:

$$p_o = R \rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i} \quad [13]$$

De las cinco ecuaciones anteriores se obtienen cinco variables: . Se asumen conocidos los valores iniciales de estas variables, coincidentes con los ambientales. El resto de variables de interés se obtienen de relaciones algebraicas simples y conocidas a partir de las 5 referenciadas.

El procedimiento consiste en primer lugar, en obtener los valores de las ecuaciones [9] [10] [13]. A continuación, con la ecuación [11] se obtiene H y seguidamente las variables termodinámicas corregidas. Se recalcula la presión empleando las magnitudes estimadas y finalmente se obtiene el valor de la velocidad corregido. Para la resolución completa del incendio, además de estas ecuaciones, hay que tener en cuenta los modelos de algunos subprocesos específicos de incendios como son combustión, radiación térmica y condiciones térmicas de contorno.

Actualmente FDS se emplea en campos de aplicación muy diversos, tales como la ingeniería forense, estudios de movimientos de humos, análisis del desarrollo de un incendio, análisis de las condiciones de habitabilidad en una edificación, análisis de las cargas térmicas en las estructuras, análisis de los sistemas de protección activa, o estudios y predicciones en construcción (30) entre otros.

2.5. Modelos de incendio de propósito específico

Con el interés y las posibilidades que ofrecen los modelos de simulación computacional y con el propósito de ampliar y facilitar el diseño de la instalación CI, en los últimos años se han desarrollado un conjunto de modelos de propósito específico con el objetivo de la evaluación de elementos que componen la instalación; los mismos abarcan una gama cada vez más creciente de aplicación: modelos de resistencia de estructuras, de análisis del funcionamiento y diseño de sistemas de detectores de humo, térmicos y rociadores, de control de humos y sistemas de ventilación, de evacuación, combinados o adaptados a un contexto (como por ejemplo, incendios forestales).

En concreto en los últimos años se ha incrementado el interés en los de **evacuación** como herramienta de análisis en la evaluación de los niveles de seguridad para la vida en las edificaciones. Pretenden simular el proceso de egreso de seres humanos durante un incendio (u otro fenómeno de similares características de peligro). Su principal objetivo es obtener el tiempo de evacuación, estimado a través una serie de expresiones que relacionan los datos adquiridos en ensayos, pruebas y observaciones con una aproximación hidráulica del flujo humano (15).

Además, con la especificación de los modelos, se empiezan a simular algunos comportamientos humanos como el movimiento óptimo de los ocupantes, impaciencia, familiaridad con el recinto, muy útiles en el diseño de la construcción, instalación y gestión de simulacros según tipos de contexto. Existen multitud de ejemplos como pueden ser STEPS (31), SIMULEX (32), EVACNET4 (33), FDS+EVAC (34), entre otros; algunos resultados se pueden observar en la Figura 1.

3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE INTEGRACIÓN DE METODOS ESCALARES Y VECTORIALES

El objetivo de este estudio es proponer la integración de los métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio y los métodos MSCI en una evaluación conjunta e incorporar, a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación, los beneficios y oportunidades que ofrecen. Con el mismo, se podrá: 1- Mejorar la práctica profesional de los Ingenieros de proyectos, de diseño de instalaciones de PCI y de Técnicos de Prevención de Riesgos Laborales en la Evaluación del Riesgo de Incendio; 2- Integrar en la Evaluación del Riesgo de Incendio con Métodos Convencionales (escalares), los métodos vectoriales MSCI, para obtener mejoras sinérgicas en la concepción y evaluación de estas instalaciones y 3- Mejorar la calidad de las instalaciones de PCI a partir de la integración de 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.

3.1. Definición de los dominios de trabajo del modelo

El modelo propuesto es la integración entre las variables de solución del dominio escalar (métodos convencionales) con las variables de solución del dominio vectorial (MSCI) a través de un dominio de relación. El **dominio escalar** consiste en la aplicación de los métodos convencionales de evaluación del riesgo de incendio establecida en los reglamentos CTE-DB:SI y RSCIEI, dando como resultado el nivel de riesgo y las medidas de protección necesarias. El **dominio vectorial** está formado por el conjunto de información obtenida sobre el incendio a partir de la simulación por la aplicación de una técnica MSCI. El **dominio de relación** contiene los procedimientos que permitirán la integración de los resultados obtenidos en los dominios escalar y vectorial, el cual además aporta las acciones específicas; para este dominio se ha definido una base de datos de integración que contiene la relación entre los otros dos dominios.

El conjunto de información de entrada al dominio de relación se divide en dos grandes grupos: información del dominio es-

calar que contiene las medidas de protección teóricamente necesarias, que se encuentran en estado de no validación (y por lo tanto el desconocimiento de su idoneidad real, al no poder comprobar su validez sobre la instalación en funcionamiento ante un riesgo real); por ejemplo, inexistencia de evaluación ante los materiales utilizados, óptima ubicación de las salidas, extintores, rociadores, quedando la verificación de esta información sobre las soluciones teóricas, abierta a la experiencia del ingeniero de proyectos o técnico de prevención. El dominio vectorial aporta el conjunto de información relativa a la simulación de la dinámica de un incendio, el comportamiento del establecimiento (maqueta digital de la construcción), los materiales, las medidas de ventilación, protección, evacuación, extinción... En el **dominio de relación**, una vez que estos dos paquetes de información quedan vinculados, puede llevarse a cabo el diseño, selección y optimización de soluciones completas para la construcción (apoyándose en la base de datos aportada por el modelo y de la cual se presenta una síntesis en la Tabla 1). En los siguientes apartados se establecen las fases de aplicación.

3.2. Establecimiento de fases de aplicación del modelo

Para llegar a relacionar ambos dominios, se deberá seguir un proceso, denominado *evaluación conjunta* cuyas fases están reflejadas en la Figura 2.

- **Evaluación del riesgo de incendio** con algún método convencional o los establecidos en los reglamentos (CTE-DB:SI, RSCIEI) para obtener el nivel de riesgo y las medidas de protección necesarias, que se modelarán posteriormente en la maqueta digital de la construcción.
- **Diseño del modelo de incendio** decidiendo el tipo de modelo a utilizar, de zona o de campo. Definir la geometría y el conjunto de datos necesarios, (materiales, mobiliario, instalaciones CI, características de la fuente de ignición, reacción de combustión y condiciones de ventilación entre otros). También es importante decidir las magnitudes a medir y los puntos de simulación.



Figura 2. Modelo de integración y fases de aplicación.

Tabla 1. Síntesis de la Base de datos integrados para el dominio de relación.

Medida de protección (Escarlar)	Parámetro de control	Salida MSCI (vectorial)	ACCIÓN
Estabilidad y resistencia al fuego de elementos constructivos y portantes	Temperatura Tiempo Material Recubrimiento	Temperatura Termopar	Comprobar temperatura máxima alcanzada en varios puntos de los elementos portantes y tiempo de dicha temperatura
Ventilación Eliminación de humos	Distribución de 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 Señalización	Distribución Visibilidad	Visibilidad	Distancia visible desde varios puntos para comprobar si se vería el alumbrado de emergencia y la señalización
Elementos de evacuación	Ocupación Geometría edificio Distancia y altura del recorrido de evacuación Visibilidad Distribución de humos Temperatura	Fracción másica de hollín Visibilidad Altura de la interfaz Temperatura capa caliente Temperatura capa fría	Simulación de la evacuación con software específico. Con la simulación de incendios comprobación de Evolución del humo, Visibilidad, Altura de la interfaz y Temperatura. Y con lo anterior, obtener el tiempo de evacuación disponible y compararlo con el tiempo de evacuación necesario, para ver si es suficiente.
Número y disposición de salidas de evacuación			
Disposición de escaleras y aparatos elevadores			
Dimensionamiento de salidas, pasillos y escaleras			
Longitud de los recorridos de evacuación			

- **Realización de la simulación**, general y específica a seleccionar.
- **Análisis de los resultados en el dominio de relación** para validar si las medidas de protección consideradas inicialmente a partir de los modelos escalares establecidos en CTE-DB:SI y RSCIEI son suficientes o si es necesario realizar algún cambio en base a los resultados de la simulación. Si la instalación y medidas de PCI son 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. Para la fase de optimización de la instalación CI, será necesaria la utilización de la base de datos del modelo.

3.3. Adaptación del modelo de evaluación conjunta al ciclo de vida de la instalación

El interés de la evaluación de riesgo de incendio de una instalación puede devenir en la fase de proyecto, para evaluar y validar las soluciones de diseño de la instalaciones de PCI prevista en los distintos reglamentos (CTE DB:SI, RSCIEI). Además, un interés complementario surge de la perspectiva prevencionista derivada del *A20 de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales* en el cual se establece que el empresario deberá analizar las posibles situaciones de emergencia y adoptar las medidas necesarias en materia de primeros auxilios, lucha CI y evacuación de los trabajadores. En este caso la actividad en relación con el sistema de prevención CI se circunscribe a la fase de explotación del edificio o construcción de carácter industrial u otro sector. Es evidente la importancia de ampliar la evaluación al ciclo de vida completo de la instalación CI.

El ciclo de vida de una construcción se refiere a las fases por las que pasa desde su concepción hasta su desmantelamiento y que preceptivamente están sujetas a exigencias reglamentarias, entre las que se encuentran las derivadas de riesgos de incendio (35). El modelo propuesto integra los resultados de la simulación y evaluación conjunta del riesgo de incendio para cada una de estas fases, (Figura 2).

En la fase de **diseño**, la simulación de los sistemas de PCI puede referirse al proyecto de la edificación y su instalación (simulación de la actividad de uso prevista) o al proyecto de seguridad y salud del proceso de ejecución. En el primer caso se pueden llevar a cabo simulaciones de la actividad de uso prevista, consistente en realizar una evaluación conjunta del escenario de la fase de explotación que se está diseñando para establecer y proyectar las medidas de protección y la instalación CI antes de la fase de construcción. Para el Estudio de Seguridad y Salud se podrían realizar simulaciones de los peores escenarios de riesgo de incendio previstos durante la construcción.

Durante la fase de **construcción**, si se producen modificaciones en el Plan de Seguridad y Salud según la metodología de construcción establecida, se deberá realizar una nueva evaluación y simulación para comprobar que las nuevas condiciones de ejecución establecidas por los contratistas no generan nuevos riesgos de incendio.

Durante la fase de **explotación** se puede comprobar el estado de las instalaciones CI con un *checklist* (evaluación escalar de la actividad de uso) y si es necesario, realizar una nueva

evaluación conjunta (escalar y vectorial), sobre el modelo digital de la construcción actualizado con las modificaciones que hayan podido llevarse a cabo, para establecer las medidas de protección oportunas y su validación. Si se produce un incendio, la metodología propuesta es de interés para la investigación ex post-facto del mismo (conocer las causas) y de forma alternativa puede ser empleada para establecer si durante las reformas o modificación de la construcción en explotación han emergido nuevos riesgos de incendio, así como la evaluación y validación de las medidas de protección adoptadas.

En la fase de **desmantelamiento** se producen otras actividades diferentes para las que estaba destinado el establecimiento o construcción, que provocan nuevos riesgos, por lo que el modelo se aplicaría a la evaluación de la actividad de desmantelamiento partiendo del modelo digital de la construcción actualizado con las posibles reformas que pudieran haberse llevado a cabo en la fase de explotación. A partir de dicho modelo digital del proyecto de demolición en el correspondiente estudio de seguridad, se realiza para los posibles escenarios más desfavorables de riesgo de incendio, una evaluación y una simulación que permite establecer y validar las medidas de protección CI de la fase.

4. CASO DE ESTUDIO: EVALUACIÓN CONJUNTA DE UNA INSTALACIÓN

Para validar la consecución de los objetivos expuestos, se realiza una evaluación conjunta de una Planta Industrial con una zona de oficinas. El objetivo es comprobar si el establecimiento analizado sería seguro en caso de incendio. El modelo se aplica en la fase de **diseño** del ciclo de vida de la instalación, para comprobar si las medidas son suficientes antes de pasar a la construcción, y modificar, en caso necesario el diseño del establecimiento e instalaciones.

Con esta evaluación es posible comprobar muchas de las medidas de protección (materiales, ventilación, medidas de extinción, etc.). Sin embargo, para simplificar el caso de estudio, se mostrará el cumplimiento de las condiciones necesarias para una **correcta evacuación** (tiempo disponible para la evacuación o *ASET-Available Safe Egress Time*, superior al tiempo requerido para la evacuación *RSET-Required Safe Egress Time*) (33). El ASET viene definido por las características intrínsecas del incendio. Los factores que influyen y sus valores límites admisibles son 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) y Visibilidad (mínimo 10 m). RSET se obtiene realizando la simulación de la evacuación.

4.1. Descripción del establecimiento

El establecimiento elegido es una Planta Industrial de transformación de madera (carpintería) situada en una nave industrial de 600 m² (30 × 20 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 personal y la trasera una puerta corredera para la introducción de mercancía. Se divide en tres zonas: (a) de producción (carpintería) de 300 m² (15 × 20 m), (b) de almacenamiento de 225 m² y 6 m de altura máxima y (c) de oficinas situada en la entreplanta con un área de 148 m² (8 × 18,5 m) (Figura 3).

4.2. Fase 1: Dominio Escalar. Evaluación del riesgo de incendio

El primer paso 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 CI en los Establecimientos Industriales (RSCIEI) (7). Obtenemos 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: incorporación de 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. A partir de estas exigencias del RSCIEI sobre el modelo digital de la planta industrial, incluido el proceso y resto de dependencias se establecen las instalaciones y medidas de PCI.

4.3. Fase 2: Dominio Vectorial

El segundo paso es aplicar las técnicas de MSCI sobre el modelo digital de la planta industrial, incluido el modelo del proceso y del resto de dependencias, las instalaciones y medidas de PCI obtenidas y realizando la simulaciones.

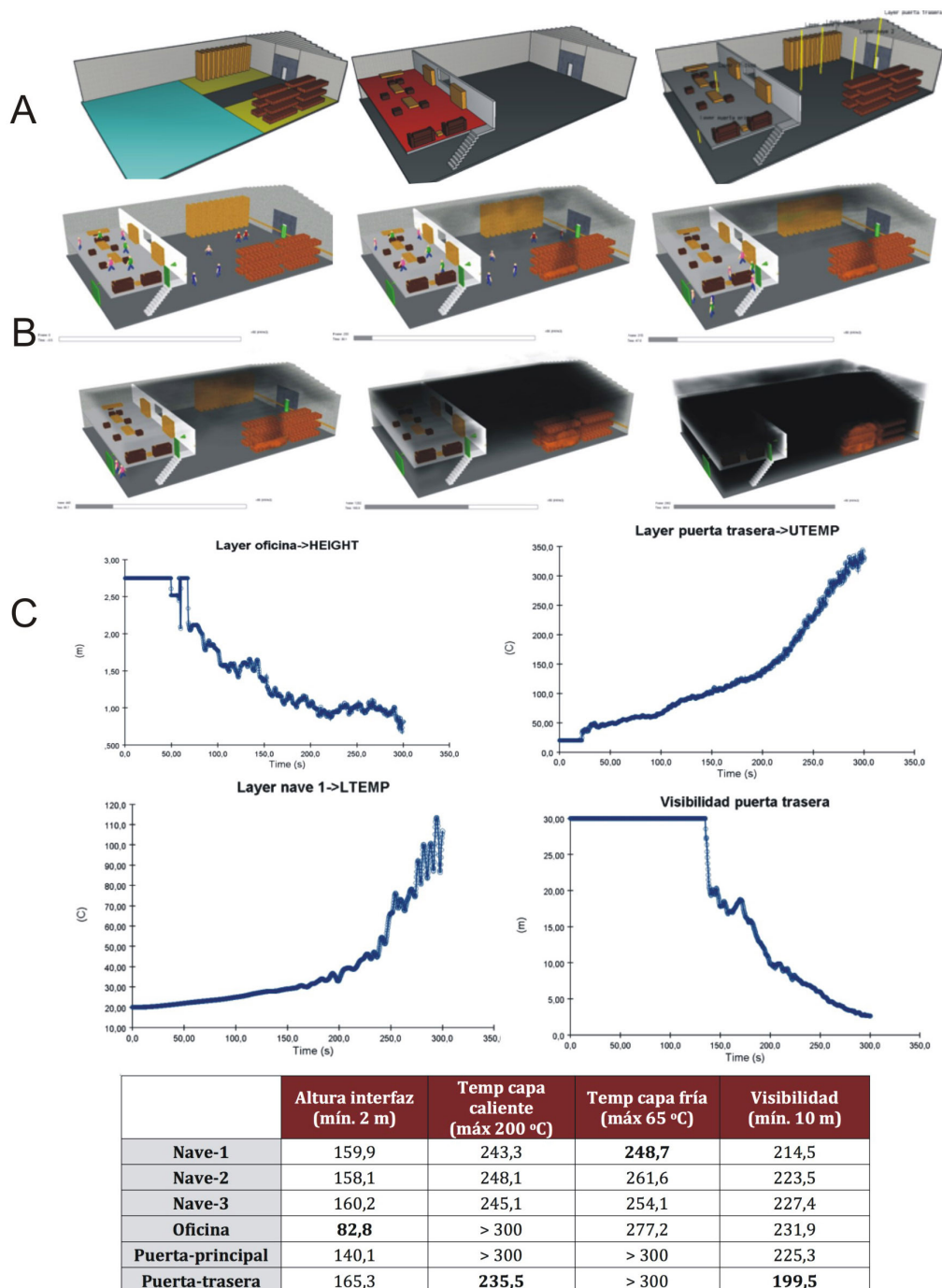


Figura 3. Modelado de Nave industrial (A), Simulación (B) y resultados (C).

4.3.1. Modelado del contexto

Para la realización de la simulación del incendio se utiliza un «modelo de campo» que proporciona mayor información. Se selecciona el FDS, el más completo que incorpora un módulo para la evacuación. Carece de interfaz gráfica, trabaja mediante comandos a través de la ventana de «Símbolo del Sistema». Aun así existen varias herramientas que proporcionan una interfaz gráfica para su uso. Para este caso se usó PyroSim (24). Para realizar el modelo se definieron: propiedades de materiales, superficies, geometría, mobiliario, obstáculos, etc. y de los dispositivos (posición de detectores, rociadores...) obteniendo el modelo computacional de la instalación.

4.3.2. Simulación del incendio

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

Como el objetivo incluye la simulación de la evacuación es necesario, a partir del mismo modelo computacional, definir los parámetros específicos de 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.

4.4. Resultados y discusión

La Figura 3 muestra imágenes de la simulación obtenida. El objetivo es obtener el tiempo disponible para la evacuación (ASET) y el tiempo requerido (RSET) y compararlos.

- Tiempo disponible - ASET: se obtienen diferentes gráficas para los elementos de medición incluidos en el modelo. Proporcionan la evolución temporal de cada factor en varios puntos de la Planta Industrial. De las mismas se obtiene el tiempo que tarda cada factor en llegar al valor límite admisible para mantener la seguridad de las personas, que será el ASET correspondiente a cada factor. El valor más restrictivo entre 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 s (ASET establecimiento).
- Tiempo requerido - RSET: FDS proporciona una gráfica que presenta el número de personas en el establecimiento

to en función del tiempo. RSET es el momento en el que el número de personas en el establecimiento es 0. En este caso es 68,5 s.

- Comparación de resultados: si el tiempo disponible es mayor que el requerido indica que la evacuación sería posible y segura. Es el caso de lo evaluado: el establecimiento cumple las medidas necesarias para una correcta evacuación. $ASET = 82,8 \text{ s} > RSET = 68,5 \text{ s}$

Si solo es tenida en cuenta la evaluación con métodos escalares, en el diseño solo estarían disponibles las medidas de protección mínimas teóricamente necesarias para una evacuación segura, sin verificar la distribución óptima o si resultan insuficientes. Al realizar la evaluación y estudiar el dominio de relación, se comprueba esta suficiencia, ya que el $ASET > RSET$. Además es definido cuál es el factor que más influye en la evacuación, en el caso de estudio relativo a la altura de la capa de humos, pudiendo tomar medidas para mejorar y optimizar las medidas de protección y así aumentar la seguridad (por ejemplo, y para este caso de estudio, cabría la posibilidad de optimizar la seguridad aumentando el ASET con la instalación de un sistema de ventilación forzada que extraiga parte de esos humos).

5. CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido desarrollar un modelo de evaluación que integra los tipos de metodologías (escalar y vectorial) disponibles para el control del riesgo de incendio. Con la información proporcionada por la simulación del incendio (dominio vectorial) se puede hacer una valoración más completa de las medidas de protección. Aunque en origen esas medidas cumplan con los reglamentos (dominio escalar), el ingeniero de proyectos o el técnico de prevención en riesgos laborales al observar la evolución del incendio podrá valorar si sería positivo cambiar la distribución de algunos elementos, o imponer alguna medida extra (todo ello en el dominio de relación), cumpliendo siempre con las exigencias reglamentarias mínimas. Además, sería positivo integrar la evaluación conjunta en todas las fases del ciclo de vida de la construcción (35)(36).

Como última consideración, es necesario puntualizar que la integración de las técnicas MSCI tiende a ser imprescindible, al 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, lo que reportará una mejor evaluación del riesgo de incendio y un nivel de seguridad mayor.

REFERENCIAS

- (1) Calvo-Barrios, A. (1993). La prevención contra el fuego en la construcción. *Informes de la Construcción*, 44(423): 23-31, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1993.v44.i423.1204>.
- (2) Miguel-Rodríguez, JL. (2012). De la resistencia a fuego en los edificios. *Informes de la Construcción*, 39(391): 5-19, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1987.v39.i391.1621>.
- (3) INSHT. (2001). *NTP 599: Evaluación del riesgo de incendio: criterios*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

- (4) Alvarez-Rodriguez, A. (2012). *An integrated framework for the next generation of risk-informed performance-based design approach used in fire safety engineering*. Worcester, MA (USA): Worcester Polytechnic Institute.
- (5) Šakėnaitė, J. (2010). A Comparison of Methods Used for Fire Safety Evaluation. *Mokslas-Lietuvos ateitis*, 2(6): 36-42, doi: <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2010.109>.
- (6) Ministerio de Fomento. (2010). *Documento Básico SI, Seguridad en caso de incendio*.
- (7) Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2004). RD2267/2004 de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad CI en los establecimientos industriales. *Boletín Oficial del Estado*, nº 303, pp. 41194-41255. España.
- (8) Fundación MAPFRE. (1998). Método Simplificado de Evaluación del Riesgo de Incendio: MESERI. *GR*, 64: 17-29.
- (9) Peña, J.F., Carlos, J., Romero, R. (2003). Análisis comparativo de los principales métodos de evaluación del riesgo de incendio. *Seguridad y Salud en el Trabajo*, (25):12-17.
- (10) Rubio-Romero, J. C. (2004). *Métodos de Evaluación de Riesgos Laborales*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- (11) INSHT. (1984). *NTP 100: Evaluación del riesgo de incendio. Método de Gustav Purt*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- (12) Fuertes-Peña, J. (2007). *FRAME (for) Engineering*. Málaga: Universidad de Málaga.
- (13) Smet, E. (2011). *FRAME: Manual del usuario*. http://www.framemethod.net/index_html_files/FRAME_2011_Manual_ES.pdf
- (14) Ramírez, A. (2012). *Estudio de la evacuación de ocupantes y control de humo en edificio en altura* (Tesis de máster). Madrid: ICAI, Escuela Técnica Superior de Ingeniería – Univ. Pontificia Comillas.
- (15) Alvear, D. (2007). *Modelado y simulación computacional de incendios en la edificación*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- (16) Díaz, P.R., Servicio, R., Grau, X. (2013). Simulación, diseño SCTECH en centro deportivo. *Tecnifuego-AESPI*, (31): 34-37.
- (17) Walton, W.D., Budnick, E.K. (1997). Deterministic Computer Fire Models. En *Fire Protection Handbook (18th ed)*. Sección 11, Cap. 5, pp. 55-61. USA: National Fire Protection Association.
- (18) Watts, J. (2002). Probabilistic fire models. En *Fire Protection Handbook*. Sección 11, Cap. 6, pp. 62-69. USA: National Fire Protection Association.
- (19) Jiménez-Castellanos, F. (2012). *Simulación numérica de incendios en edificios tipo atrio*. ICAI – Universidad Pontificia de Comillas.
- (20) Cooper, L.Y. (1982). A mathematical model for estimating available safe egress time in fires. *Fire and Materials*, 6(3-4):135-144, doi: <http://dx.doi.org/10.1002/fam.810060307>.
- (21) Cadorin, J.-F. (2003). *Compartment Fire Models for Structural Engineering* (Tesis doctoral). Liège: Université de Liège.
- (22) Technology NIOSA. (2010). *Fire Growth and Smoke Transport Modeling with CFAST*. http://www.nist.gov/el/fire_research/cfast.cfm.
- (23) Peacock, R.D., Forney, G.P., Reneke, P.A., Jones, W.W. (2011). *CFAST*. http://www.nist.gov/el/fire_research/cfast-software.cfm.
- (24) PyroSim - ThunderHead Engineering. (2013). *Fire Dynamics and Smoke Control*. <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>.
- (25) Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Hoboken, NJ: Wiley. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119975465>.
- (26) McGrattan, K., Forney, G. (2013). *FDS and Smokeview*. http://www.nist.gov/el/fire_research/fds_smokeview.cfm.
- (27) Rubini, P. (2014). *SOFIE: simulation of fires in enclosures*. <http://www.hull.ac.uk/php/331346/sofie.htm>.
- (28) Cox, C., Kumar, S. (2007). Combustion Science and Engineering: JASMINE.[software]
- (29) U.S. NRC. (2007). Fire Dynamics Simulator (FDS). En *Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications*, Vol. 7 (Final Report). Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission
- (30) McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., Floyd, J. (2010). *Fire Dynamics Simulator (V5). User's Guide*. U.S. Government Printing Office.
- (31) Mott MacDonald Group. (2014). STEPS: simulating pedestrian dynamics.[Software]
- (32) Soclutions IE. (2014). SIMULEX[software]. Available from: <http://www.iesve.com/software>
- (33) Kisko, T., Francis, R. L., Nobel, C. R. (2014). EVACNET4 [software].
- (34) Korhonen, T. (2009). Fire Dynamics Simulator with Evacuation. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2009/W119.pdf>
- (35) Esteban, J., Ros, A., Sanz, M., Lozano, R.V. (2013). La integración de la prevención en la fase de diseño. El papel del Proyectista en España y en los países de la Europa de los 15. *Informes de la Construcción*, 65(532): 545-555, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.076>.
- (36) Gascón y Marín Pérez J. (1993). El ingeniero y la seguridad: la seguridad integrada. *Informes de la Construcción*, 44(423): 17-22, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1993.v44.i423.1203>.

* * *