

A. 8505
UJ - 7719

Juan Carlos Sanz

MODELACIÓN DE INCENDIOS
PROGRAMA HAZARD I

Ávila, octubre de 1989

MAPFRE
CENTRO
DE
DOCUMENTACION



fundación
MAPFRE

ITSEMAP FUEGO, S.A.
Instituto Tecnológico de Seguridad MAPFRE

INVESTIGACION No. 5

J.C. Sanz Martín y F. Núñez Astray

INFORME FINAL

MODELACION DE INCENDIOS.

PROGRAMA HAZARD I.

Avila, septiembre de 1989

Patrocinador:

FUNDACION MAPFRE

ITSEMAP FUEGO, S.A.

Instituto Tecnológico de Seguridad MAPFRE

I.T. 8131 - 9172

I N D I C E

	<u>Página</u>
1. <u>INTRODUCCION</u>	1
1.1. <u>MODELOS MATEMATICOS DE INCENDIOS.</u> <u>CALCULO AUTOMATICO</u>	1
1.2. <u>CLASIFICACION DE LOS MODELOS</u>	1
1.2.1. <u>Modelos de incendio en recintos cerrados</u> ...	1
1.2.1.1. <u>Modelos estocásticos</u>	2
1.2.1.2. <u>Modelos deterministas. Modelos</u> <u>de zona (o modulares)</u>	2
1.2.2. <u>Simulación de aspectos particulares</u>	3
1.3. <u>FUTURO DE LA MODELACION</u>	4
2. <u>OBJETIVOS</u>	4
3. <u>GENERALIDADES SOBRE EL ANALISIS DEL RIESGO DE INCENDIO</u> .	5
4. <u>HAZARD I</u>	7
4.1. <u>INTRODUCCION</u>	7
4.2. <u>PROGRAMAS Y PROCEDIMIENTOS DEL HAZARD I</u>	8
4.2.1. <u>Cualidades generales de la base de datos</u> <u>FIREDATA</u>	8
4.2.2. <u>Características de la simulación del</u> <u>incendio</u>	8
4.2.3. <u>El modelo de transferencia en el HAZARD I</u> ..	9
4.2.4. <u>Activación de los dispositivos térmicos</u>	11
4.2.5. <u>Conducta y evacuación de los ocupantes</u>	12
4.2.6. <u>Habitabilidad y supervivencia</u>	12
4.3. <u>ASPECTOS PARTICULARES DE FIREDATA</u>	13
4.3.1. <u>Introducción</u>	13

	<u>Página</u>
4.3.2. <u>Estructura de la base</u>	13
4.3.3. <u>Estructura del programa</u>	14
4.3.4. <u>Restricciones de FIREDATA</u>	15
4.4. <u>PORMENORES DEL MODELO TENAB</u>	15
4.4.1. <u>Introducción</u>	15
4.4.2. <u>Límites de seguridad y habitabilidad</u>	16
4.4.2.1. Límites termofísicos de habitabilidad	16
4.4.2.2. Límites toxicológicos de seguridad	17
4.4.3. <u>Estructura de TENAB</u>	18
4.4.3.1. Argumentos proporcionados por FAST	19
4.4.3.2. Argumentos proporcionados por EXITT. Características del fichero de entrada de EXITT	19
4.4.4. <u>Salida proporcionada por TENAB</u>	23
5. <u>PROCEDIMIENTO DETALLADO DEL ANALISIS DEL RIESGO DE INCENDIO MEDIANTE EL HAZARD I</u>	23
6. <u>PROPUESTA DE UNA PLANTA TIPICA DE VIVIENDA</u>	24
6.1. <u>INTRODUCCION</u>	24
6.2. <u>DIMENSIONES Y DISTRIBUCION</u>	24
6.3. <u>PROPIEDADES TERMICAS DE LA EDIFICACION</u>	25
7. <u>DISEÑO DEL INCENDIO</u>	26
7.1. <u>ESCENARIO. PROPIEDADES TERMICAS DEL COMBUSTIBLE</u> ..	26
7.2. <u>CALCULO DEL INCENDIO</u>	27

Página

8. <u>RESULTADOS</u>	28
9. <u>CONCLUSIONES</u>	36
10. <u>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</u>	37
<u>APENDICE 1</u>	42

1. INTRODUCCION

Desde hace unos quince años, varios grupos de investigación de diferentes países^(1-20,21) consideraron que eran precisos, no sólo la reproducción experimental⁽²²⁾ y el análisis de incendios en compartimentos, sino también el desarrollo de modelos matemáticos que sistematizaran la evolución temporal y espacial de estos sucesos, con el fin de evaluar su efecto sobre personas y materiales y de establecer los sistemas de protección más adecuados. Como fruto de estos esfuerzos surgieron diversos esquemas de índole y complejidad variadas.

1.1. MODELOS MATEMATICOS DE INCENDIOS. CALCULO AUTOMATICO

Un modelo matemático de un incendio no es más que una colección coherente de ecuaciones cuyo propósito es simular alguna característica -idealmente cualquiera- del proceso que tiene lugar durante el fuego. En la práctica, un modelo es tanto mejor cuanto mayor sea el ajuste existente entre el valor calculado de un parámetro y el medido mientras tiene lugar el fenómeno real.

Sin embargo, la simulación del incendio de un edificio supone un difícil reto tanto para científicos como para tecnólogos. La complejidad reside no sólo en representar los aspectos quimicofísicos (turbulencia debida a la convección, transferencia radiativa, combustión...), sino también en imponderables tales como la localización de la fuente que origina el incendio, la existencia de viento, la distribución de puertas y ventanas, etc.

Por otro lado, es tal el volumen y la dificultad de los cálculos que, por operatividad y rentabilidad económica, deben automatizarse mediante programas de ordenador.

1.2. CLASIFICACION DE LOS MODELOS

Grosso modo, estos modelos pueden catalogarse en dos grupos:

- * Los que simulan los aspectos quimicofísicos del fuego (generalmente, incendios en recintos cerrados).
- * Aquellos que evalúan la interacción del fuego con el "entorno".

1.2.1. Modelos de incendio en recintos cerrados

Fundamentalmente responden a cuestiones relacionadas con las transferencias de energía y masa y con la química de la propia combustión. Desde el punto de vista metodológico pueden distinguirse dos clases:

- a) Modelos estocásticos.
- b) Modelos deterministas.

1.2.1.1. Modelos estocásticos

Durante el desarrollo del fuego el sistema pasa por distintas etapas, unidas entre sí por diferentes vías de transición. En los modelos estocásticos, a cada una de éstas se le asigna cierta probabilidad de contingencia sobre la base del análisis estadístico de los datos obtenidos en incendios reales, experimentales o no, pero sin contemplar la fisicoquímica del fuego.

En esta categoría se destacan el modelo de Morishita⁽²³⁾ y el BFSM de Swartz y col.⁽¹⁾.

1.2.1.2. Modelos deterministas. Modelos de zona (o modulares)

Los modelos deterministas, al tener sus cimientos en la teoría fisicoquímica de la combustión y en la dinámica de gases y humos, permiten evaluar, de un modo más riguroso, los cambios de cualquier observable y su influencia en la eventualidad y en la evolución de un incendio.

Teniendo en cuenta el análisis del sistema hay dos enfoques: uno holista, génesis de los modelos de campo, y otro reduccionista, de los de zona. En aquéllos, formalmente más generales y exactos, el sistema se considera globalmente, examinándose la variación temporal y espacial de cualquier magnitud; sin embargo, la demanda computacional es enorme, por lo que actualmente no se emplean en los análisis rutinarios.

En los de zona, que son los modelos deterministas más frecuentes, cada compartimento afectado por el fuego suele dividirse en varios dominios, cuyas temperatura y composición son uniformes (el penacho que surge del objeto que arde suele incluirse en el más caliente). Posteriormente se resuelven las ecuaciones de conservación vinculadas con cada subsistema, efectuándose los ajustes necesarios mediante la introducción de parámetros semiempíricos (así pues, estos enfoques tienen un marcado carácter fenomenológico). Por otra parte, suelen despreciar los cambios de las propiedades estructurales causados por las variaciones térmicas, pero el error introducido es pequeño [ver nota (**) de la página 9].

A continuación se recogen, en función de la compartimentación del recinto(*), algunos programas de cálculo basados en estos modelos, cada uno con sus ventajas e inconvenientes⁽²⁾.

(*) Compartimentación: Consiste en dividir el espacio en sectores aislados entre sí, de modo que puedan constreñir el fuego y el humo en aquél donde se originó el incendio, evitando, en el caso ideal, que se propague por los sectores vecinos⁽²⁴⁾.

a) Para recintos monocompartimentados

ASET⁽³⁾ [y su versión simplificada para ordenadores personales ASET-B⁽⁴⁾] y COMPF2⁽⁵⁾ [para efectuar análisis tras la deflagración(*)].

DSLAYV^(6,35) (para condiciones de ventilación natural o forzada y con aberturas en las paredes o en el techo de la habitación) y OSU⁽⁷⁾ (si se quieren analizar las velocidades de desprendimiento de energía y humo).

b) Para recintos bicompartimentados

El más frecuente es el CALTECH⁽⁸⁾.

c) Para recintos multicompartimentados

BRI⁽⁹⁾ y FAST⁽¹⁰⁻¹²⁾. Además, en ambos se consideran compartimentos situados en diversas plantas.

d) Para recintos mono o multicompartimentados

La familia de modelos HARVARD⁽¹³⁻¹⁶⁾, que, dependiendo de la versión, permiten analizar fuegos en recintos con una o varias habitaciones. Sobre la base de estos trabajos surgieron otros esquemas, como el FIRST⁽¹⁷⁾, los modelos de propagación de humos y gases de Crespo y col.^(18,19) y el RFIRES⁽²⁰⁾.

1.2.2. Simulación de aspectos particulares

Existen modelos, que no se detallarán aquí, para analizar ciertas características concretas, como la resistencia frente al fuego de las estructuras, la velocidad de respuesta de detectores y rociadores, la conducta y evacuación de los ocupantes, etc. Pueden emplearse solos o asociados con otros de naturaleza tanto particular como general.

(*) Deflagración: La deflagración, o combustión súbita global ("flashover"), es una etapa crítica en el desarrollo del incendio en un compartimento, síntoma de su generalización. Este acontecimiento, en el que concurren muchos hechos íntimamente ligados, puede caracterizarse porque la mayoría de los combustibles presentes comienza simultáneamente a arder^(25,26,27) con llama abierta y sin detonación⁽²⁸⁾ (así pues, es un fenómeno subsónico). Durante este período se alcanzan temperaturas comprendidas entre 500 y 700°C⁽²⁹⁻³²⁾, el flujo térmico a ras del suelo tiene un valor⁽³³⁾ de 20 kW/m², y el nivel de O₂ desciende por debajo del 5 %⁽³⁴⁾.

1.3. FUTURO DE LA MODELACION

Paralelamente a la necesidad de diseñar y construir sistemas experimentales para la reproducción⁽²²⁾ y el estudio del fuego en recintos cerrados, y a la de efectuar estudios estadísticos sobre incendios reales, se tiende hacia el desarrollo y puesta a punto de modelos holistas^(*), aunque la meta más inmediata es la elaboración de sistemas expertos de aplicación general.

2. OBJETIVOS

Queda clara la necesidad de un marco teórico para conocer más profundamente la evolución temporal y la interrelación de los distintos observables presentes en un incendio^(**). Desde esta perspectiva se pretende investigar y, en su caso, adaptar modelos matemáticos, instrumentándolos posteriormente en programas de ordenador.

Uno de los aspectos particulares de este trabajo, medular en la presente investigación, es la participación en un proyecto de ámbito mundial denominado HAZARD I, promovido y coordinado por el Centre of Fire Researchs (en adelante, C.F.R.) del National Institute of Standards and Technology de Estados Unidos. Consiste en un complejo sistema experto cuya meta, muy ambiciosa, tiene dos vertientes: una de investigación y desarrollo, y otra de aplicación. La finalidad es clara. Por un lado, es un intento de reproducir, predecir y examinar cualquier situación durante el incendio de un edificio habitado.

Y, por otro, pero a más largo plazo, pretende ser un guía para aquellos profesionales que, como los arquitectos, los ingenieros, etc., no siendo necesariamente expertos en el campo del fuego se vean obligados a efectuar una gestión correcta del riesgo de incendio.

(*) Actualmente este tipo de modelos se analizan mediante el empleo de enfoques matemáticos novedosos, tales como la teoría de fractales (K.N.C. Bray, de Cambridge), la del caos (A.N. Beard, de Edimburgo), así como a través de enfoques no lineales (P.H. Thomas, Y. Hasemi, S.R. Kay, T. Boddington).

(**) En la ref. 36 se establecen comparaciones entre el modelo NBS/Harvard VI y algunos datos experimentales. En la ref. 37 se hace otro tanto con el modelo NBS/HARVARD V.

3. GENERALIDADES SOBRE EL ANALISIS DEL RIESGO DE INCENDIO

En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques donde se propone un esquema de las principales decisiones en el análisis del riesgo de incendio, así como sus interacciones.

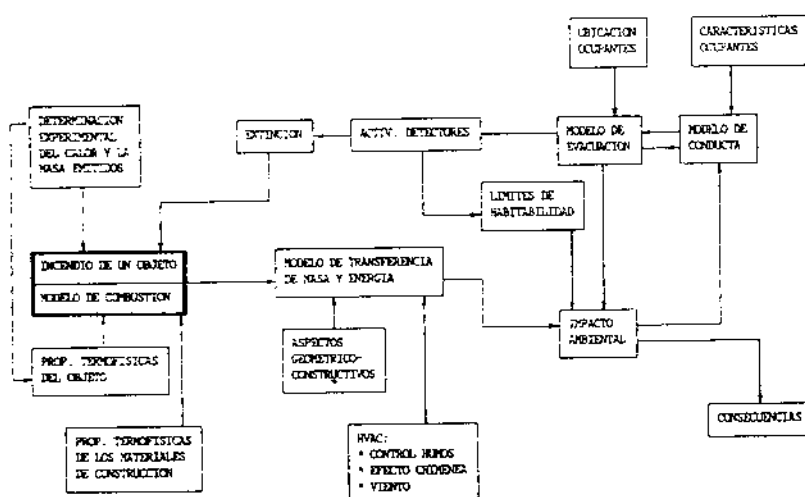


Fig. 1. Interacciones de los componentes principales de un modelo de análisis de riesgos.

En términos generales, esto implica calcular:

- 1) Sobre la base de experimentos efectuados a escala real o reducida, la energía y la masa desprendidas por los objetos que arden.
- 2) El flujo de ambas en las habitaciones y por las aberturas (puertas, ventanas, lucernas, tragaluces, exutorios, etc.), pero no a través de sistemas de ventilación(*) ni de huecos de escalera, pues aún no están suficientemente desarrollados los modelos correspondientes.
- 3) La temperatura, la densidad óptica del humo y las concentraciones de los gases, tras producirse no sólo el intercambio térmico con las superficies delimitadoras de la habitación, sino también la dilución del humo en el aire fresco.
- 4) El proceso de evacuación de un conjunto de ocupantes especificado, teniendo en cuenta tanto las demoras en la notificación y en la adopción de medidas, como las conductas, sus interacciones y la existencia de impedimentos físicos o constructivos.

Sin embargo, por la complejidad que entraña, los modelos actuales todavía no consideran la evacuación de edificios de gran altura (E.G.A.).

- 5) Finalmente, el efecto del ambiente sobre los ocupantes, ya sea el predicho en las habitaciones o el existente mientras se desplazan por el edificio, en términos del número de víctimas esperadas, o del tipo y la causa de las lesiones ocasionadas.

Obsérvese que en un análisis de riesgos confluyen múltiples disciplinas de índole física, química, biológica y psicológica. En ciertos casos la teoría aplicada es "exacta", mientras que en otros son meras conjeturas, puesto que la naturaleza íntima del fenómeno se desconoce. Así pues, ocasionalmente deben introducirse aproximaciones, con la consiguiente aparición de incertidumbres. Un estudio óptimo requiere una correcta estimación de aquellas, y, por tanto, una profunda comprensión de los procedimientos y de los programas usados.

(*) Esta red distribuye rápidamente los productos de combustión. En la actualidad se están desarrollando modelos para simular este transporte⁽³⁸⁾.

4. HAZARD I

4.1. INTRODUCCION

El HAZARD I es un método general para analizar el riesgo de incendio, algunas de cuyas características se mencionan en la sección anterior (fig. 1), si bien, en esta primera versión del sistema no se evaluarán todas ellas. De modo sucinto, puede decirse que el HAZARD I proporciona la contribución relativa de cada posible observable en la siniestralidad de un incendio. Actualmente, su aplicación se restringe a edificios residenciales uni o bifamiliares típicos(*). No obstante, en un futuro no muy lejano podrán estudiarse recintos arbitrarios.

En la figura 2 se esquematiza la organización del sistema HAZARD I.

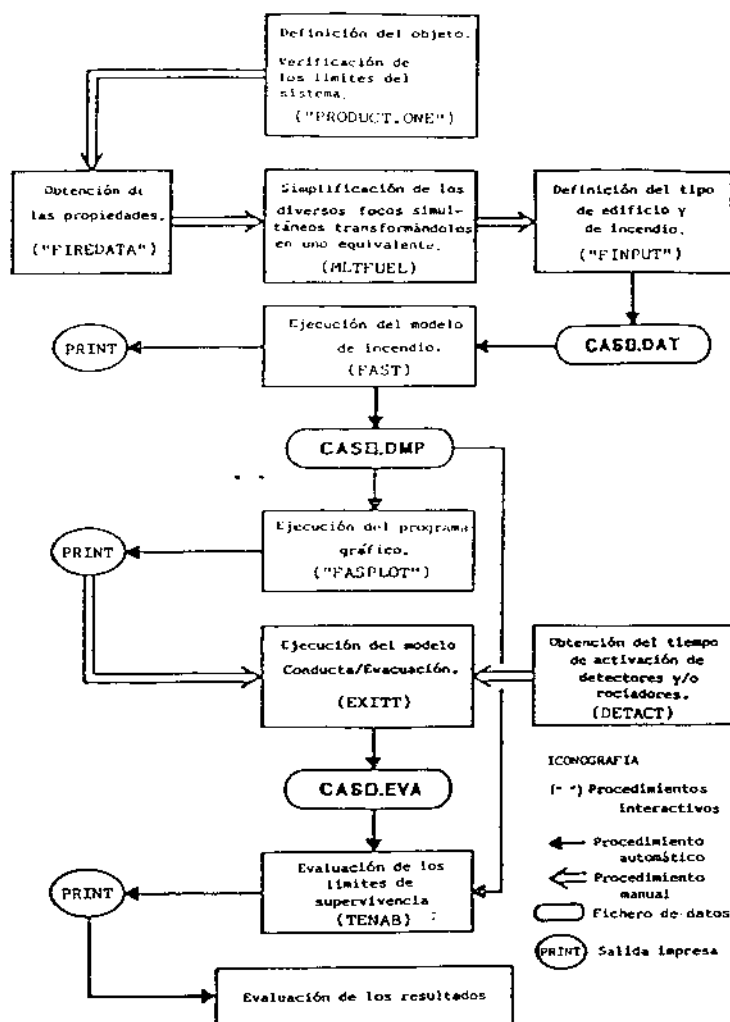


Fig.2. Programas y procedimientos del HAZARD I

(*) Aunque actualmente sólo desde la óptica de los expertos y de los datos estadísticos estadounidenses.

En este sistema cabe distinguir: un procedimiento para desarrollar escenarios e iniciar el proceso (PRODUCT.ONE), pero que puede omitirse⁽³⁹⁾; un programa interactivo para introducir las especificaciones del incendio (FINPUT); una base de datos termofísicos, termoquímicos y toxicológicos (FIREDATA); un modelo de incendio, determinista y de zona para recintos multicompartimentados [FAST⁽¹⁰⁻¹²⁾]; un procedimiento para la elaboración de diagramas (FASTPLOT); un modelo para la simulación de detectores y de rociadores (DETECT); otro para la evacuación, que incluye reglas para la simulación de decisiones y conductas humanas (EXITT); y otro que evalúa el impacto sobre los ocupantes en términos de la mortalidad o de la incapacitación ocasionadas (TENAB).

4.2. PROGRAMAS Y PROCEDIMIENTOS DEL HAZARD I

Los procedimientos y programas de ordenador vienen dados en cuatro disquetes estándar (5,25 pulgadas). Desde el punto de vista del equipo informático, cabe destacar que para su ejecución sirve cualquier dispositivo MS-DOS compatible con los PC-IBM, cuya configuración mínima sea la siguiente:

- Memoria de 640 kb.
- Tarjeta de gráficos (CGA, EGA, VGA o la compatible Hércules).
- Dispositivo de disco duro (de aprox. 2 Mb).
- Coprocesador matemático (8087, 80287 ó 80387).
- Impresora.
- DBASE III (DIII+).
- Sistema operativo MS-DOS versión 3.0 o superior.

Ya se ha indicado que parte del esquema global para el análisis de riesgos (fig. 1) se ha desarrollado en el HAZARD I mediante una serie de procedimientos y programas (fig. 2). A continuación se describen los más interesantes, por ser el esqueleto de todo el sistema.

4.2.1. Cualidades generales de la base de datos FIREDATA

FIREDATA es un archivo que incluye no sólo datos termofísicos relativos a los materiales más comunes empleados en la edificación, sino también algunos diseños representativos de viviendas e información estadística de incendios de muebles. Resulta obvio que la existencia de esta base de datos simplifica enormemente la resolución del problema.

4.2.2. Características de la simulación del incendio

Una de las limitaciones más importantes del HAZARD I es que carece de un modelo ab initio para examinar la evo-

lución del incendio(*); por el contrario, el análisis se efectúa sobre un escenario previamente especificado, y en función de las velocidades con las que un objeto que arde emite energía y masa. Para conocer éstas tienen que efectuarse medidas calorimétricas [a escala real(**) o reducida], lo que conlleva las siguientes limitaciones:

- 1) La existencia de errores sistemáticos (instrumentales) y asistemáticos (imputables al proceso y a la naturaleza de la medición). Vinculado con esto, debe señalarse que en esta versión del HAZARD I se han desestimado las influencias del tipo, de la localización y del punto de contacto de la fuente de ignición⁽⁴⁰⁾.
- 2) Los errores inherentes a la extrapolación si se usan medidas calorimétricas a escala reducida, con la consiguiente pérdida de representatividad.
- 3) La parcialidad del estudio debida a la escasez de datos bibliograficos^(41,42) relevantes; pues, por ejemplo, a pesar de su influencia en la deflagración, hay pocos estudios sobre mobiliario tapizado.

Por otro lado, y a pesar de que el programa MLTFUEL permite estudiar diversos objetos ardiendo a la vez, se produce una simplificación inicial del incendio, que se transforma en otro equivalente pero de foco único. En definitiva, el análisis se efectúa sobre un incendio "sencillo", despreciando las interacciones energéticas entre los diversos focos. Como resultado, las magnitudes calculadas tienen valores inferiores a los medidos experimentalmente.

Finalmente, debe señalarse que en esta versión del HAZARD no se consideran fuegos latentes (de brasas o de incandescencia profunda) ni condiciones postdeflagración.

4.2.3. El modelo de transferencia en el HAZARD I

En el HAZARD I el flujo de masa y energía en las habitaciones se simula, como ya se indicó, mediante FAST⁽¹⁰⁻¹²⁾. Este es un modelo determinista y de zona, desarrollado para recintos multicompartimentados.

(*) Actualmente, la única vía segura para analizar esta circunstancia es la experimentación a escala real y la confección de un modelo semiempírico con los parámetros medidos. No obstante, en versiones posteriores del HAZARD se pretende incluir modelos más refinados como el HARVARD V⁽¹⁴⁾ o el FIRST⁽¹⁷⁾.

(**) De estas evaluaciones se desprende que la habitación tiene poca influencia sobre la dinámica del incendio del objeto.

Debe señalarse que, aunque esta modelación constituye sólo una primera etapa en el análisis de la evaluación del incendio, también representa un fin en sí misma dada la elevada mortalidad que puede atribuirse al humo.

En el marco del FAST cada compartimento se subdivide mediante un plano horizontal de presión neutra, o interfase térmica, en dos capas⁽⁴³⁾ (una caliente, superior, y otra fría, inferior), salvo aquél donde está el foco del incendio que tiene una adicional constituida por el penacho del fuego. (ver fig. 3).

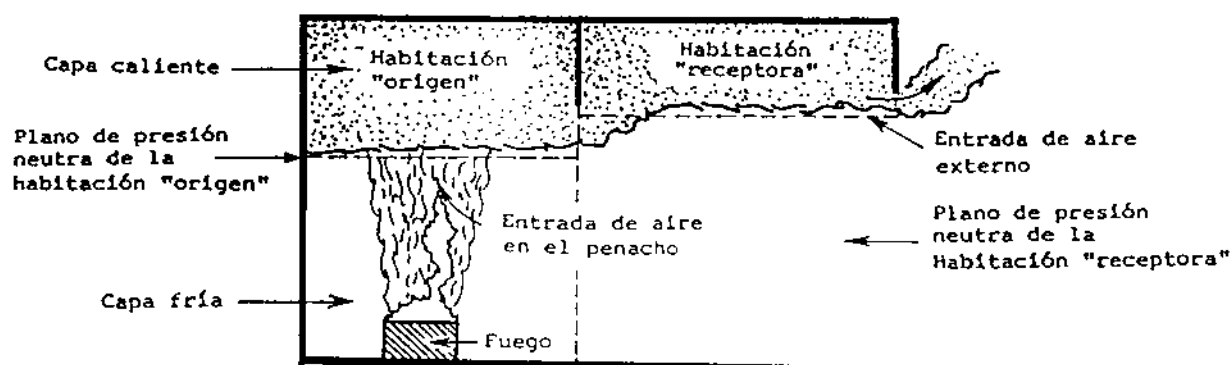


Fig. 3. Esquema de los diversos subsistemas

Este modelo se ajusta con bastante aproximación a la experiencia, donde se comprueba la aparición de estratos en cuyo seno se producen sólo pequeñas variaciones de temperatura (al menos, en comparación con las existentes entre las diversas capas).

Con una aproximación así, las hipótesis y las limitaciones del modelo deben evaluarse continuamente, y, en consecuencia, hay que tener presente que:

- 1) Cuando la velocidad de emisión de humo es elevada y el oxígeno disponible es insuficiente para una combustión estequiométrica, el modelo sobreestima el valor de la temperatura(*) en la habitación donde se encuentra el foco del incendio (a la que se llamará "origen"), y lo subestima en las que se encuentran lejos de ésta.
- 2) Si la temperatura de la habitación "origen" se aproxima a los 500°C, probablemente deflagmará, en cuyo caso en los argumentos (datos de entrada) debería considerarse la existencia de varios focos simultáneos de fuego.

(*) Que puede llegar a superar, incluso, el de la adiabática de llama; entonces se dice que se ha "rebasado el límite de ventilación".

- 3) El modelo efectúa los cálculos sobre las especificaciones hechas previamente, con independencia de la cantidad de oxígeno prevista en la habitación; esto puede falsear⁽⁴⁴⁾ el tipo y la concentración de las especies producidas. Por tanto, debido a su elevada influencia, la ventilación debe analizarse cuidadosamente.
- 4) Los factores numéricos de las ecuaciones empleadas se han parametrizado a partir de valores empíricos. Así pues, un error en éstos tiene un efecto multiplicativo, tanto mayor cuanto más lejos de la "origen" esté la habitación considerada. Los datos experimentales⁽⁴⁵⁾ indican que con los valores habituales de estos coeficientes sólo se consigue un buen ajuste cuando el recinto es, a lo sumo, tricompartmentado.
- 5) En un fuego real parte del humo y de los gases se dispersa en el seno de la capa inferior (por las turbulencias y porque al llegar al techo o a las paredes, más fríos, pierde flotabilidad y desciende). Este fenómeno no se contempla en FAST, pues desestima los coeficientes de mezcla [no obstante, comienza a vislumbrarse una teoría adecuada para estas situaciones⁽⁴⁶⁾], por lo que en este marco la capa inferior, siempre libre de humos y de gases de combustión, sólo podrá calentarse por irradiación. Así pues, este modelo subestima la temperatura de la capa inferior y sobreestima la de la superior.
- 6) En los modelos de zona, los únicos mecanismos previstos para la transferencia de masa y de energía son el penacho, que surge desde el objeto que arde, y el flujo de la capa superior al salir por una abertura. Por tanto, cuando el modelo calcula la expansión de los gases de la capa inferior de la habitación "origen" a través de un resquicio bajo (p. ej.: una rendija en el umbral de una puerta), el flujo resultante, relativamente cálido, es asignado a la capa inferior de la "receptora", donde permanece hasta que la capa caliente de la habitación "origen" desciende hasta llegar a esta abertura. En consecuencia, durante cierto tiempo, la capa inferior de la habitación "receptora" está más caliente que la superior (situación físicamente inverosímil). Sin embargo, este hecho carece de trascendencia, pues, durante este período, como las temperaturas no son muy altas, no existe riesgo sobreañadido.

4.2.4. Activación de los dispositivos térmicos

El tiempo que tardan en activarse los dispositivos térmicos, ya sean detectores de humo o rociadores automáticos, se simula en DETACT⁽⁴⁷⁾. Este modelo considera, por un lado, que el techo es horizontal y que tiene una extensión

indefinida [no compartimentado(*)], por lo que la capa superior, situada bajo el mismo, es cuasiestacionaria; y por otro, que existe una relación directa entre la temperatura y la densidad óptica del humo. Así pues, DETACT supone que los dispositivos térmicos están situados en techos de superficie relativamente grande; es decir, que no hay capa caliente acumulada en el recinto, por lo que la activación será debida al flujo por convección.

4.2.5. Conducta y evacuación de los ocupantes

EXITT⁽⁵¹⁾ es un modelo preliminar -que proporciona la ruta óptima de huida en función del estado físico y emocional del ocupante y del diseño del edificio- donde se ha incluido una serie de pautas generales sobre la conducta, individual o colectiva, de las personas en sus respectivas unidades familiares, y que están basadas en datos psicológicos y en el análisis del movimiento de la gente durante fuegos reales. Por tanto, las hipótesis vienen dadas por el tipo de criterios incluidos y las limitaciones están vinculadas con las reglas no especificadas (por ejemplo, el sistema presupone que los individuos no volverán a entrar en el edificio siniestrado).

Asimismo, el esquema es determinista aunque con una derivación estadística: dadas unas circunstancias siempre se obtendrán las mismas acciones; es decir, si se cumple A entonces en un tanto por ciento de las veces ocurrirá B y en otro, C.

Las reglas que configuran el modelo unas veces son cualitativas (p. ej.: cierto tipo de acciones iniciales de un hombre) y otras cuantitativas (p. ej.: una mujer cuya edad esté comprendida entre E₁ y E₂ años avanzará con una velocidad v), en cuyo caso, también se denominan parámetros.

4.2.6. Habitabilidad y supervivencia

Un análisis de riesgos debe contemplar el posible escape de los ocupantes o las causas que lo impidieron.

En el HAZARD I este aspecto se estudia a través del modelo TENAB, en función de variables termofísicas y toxicológicas, pero sin considerar su mutua interacción (a pesar de que la variación de la temperatura ambiental cambia el grado de absorción de las especies tóxicas).

(*) Esta hipótesis se fundamenta en un estudio experimental^(48,49) efectuado por el Fire Detection Institute, ajustado a la norma 72E de la NFPA⁽⁵⁰⁾, con el patrocinio de Factory Mutual Research Corp.

De fundamental importancia son los límites de habitabilidad, cuyos valores se han fijado, en algunos casos, a partir de experimentos con seres humanos y, en la mayoría, con muestras de ganado porcino y de múridos suponiéndose, pues, que la respuesta psicofisiológica humana es igual que la de estos animales. En general el umbral letal se fija cuando acaece la muerte del espécimen, siendo el de incapacitación la mitad del valor anterior.

4.3. ASPECTOS PARTICULARES DE FIREDATA

4.3.1. Introducción

La base de datos FIREDATA se confeccionó teniendo en cuenta el entorno de la DIII+. Sin embargo, no es preciso conocer este programa, pues existe un conjunto de procedimientos (los comandos de edición y MODIFY de la DIII+) que facilitan la introducción, la edición y la recuperación de la información.

4.3.2. Estructura de la base

FIREDATA consta de cinco ficheros⁽⁵²⁾: un directorio de materiales (MATDIR.DBF) y cuatro archivos principales [uno con las características de los materiales (PHYSICAL.DBF), otro con datos obtenidos mediante calorímetro de cono (DECOMCC.DBF), uno con los proporcionados por el de muebles (DECOMFC.DBF) y, finalmente, otro con especificaciones toxicológicas (TOXICITY.DBF)].

Todos ellos, que se han concatenado para reducir el tiempo de búsqueda, tienen en común el código (Mcode) y la identificación/descripción (Mid) de los materiales; pero al no estar "indexados" puede accederse a cualquiera sin más que confeccionar un programa externo de recuperación.

MATDIR.DBF es un menú de lo contenido en los demás. Como ejemplo, supóngase que se precisan los datos toxicológicos de cierto material. El procedimiento consiste en comprobar primero en este directorio la existencia de información sobre el particular en los archivos principales, pues cada dato archivado en este índice, además de un código, lleva asociada una breve descripción y cuatro campos (VERDADE-RO\FALSO) que señalan su ubicación exacta.

El PHYSICAL.DBF es un catálogo con una selección de parámetros termofísicos de los materiales más frecuentes en los acabados interiores y en la manufactura de mobiliario. Su acceso es mediante un argumento monádico, que proporciona, en función de la temperatura (pero sólo de seis valores), la conductividad térmica, el calor específico y la emisividad del material.

Los archivos DECOMCC.DBF y DECOMFC.DBF presentan datos sobre la resistencia y la reacción de los materiales frente al fuego. Ambos contienen dos clases de información (correspondientes a otras tantas secuencias de pantalla): una recoge las condiciones bajo las que se expuso la muestra (orientación, tipo y tiempo de ignición, energía incidente, masa inicial y final), y la otra, datos dinámicos (tasas de emisión de calor, de masa, de CO y CO₂, de hollín, de HCN, etc.).

La base TOXICITY.DBF también proporciona dos tipos de datos, ajustados, respectivamente, a los protocolos del NBS^(53,54) (actualmente NIST) y de la Universidad de Pittsburgh⁽⁵⁵⁾.

4.3.3. Estructura del programa

Existen dos niveles de comandos en FIREDATA. El primero, denominado FIREDATA.PRG, incluye dos programas de menús: FPMENU.PRG y SELECT.PRG.

El segundo, que puede alcanzarse desde el anterior seleccionando alguna operación específica (p. ej.: adición, búsqueda, edición, ...), consta de un grupo de programas cuya misión es efectuar operaciones concretas en alguno de los cuatro archivos principales. Con cada uno de éstos están asociados dos programas para manipular datos, uno para añadirlos y otro para editarlos, a los que se llega mediante los comandos ADD y EDIT, respectivamente. Además, cada archivo tiene para el tratamiento de los datos, su correspondiente fichero de formatos: PHYFORM.FMT, CONFORM.FMT, FURNFORM.FMT y TOXFORM.FMT.

Los datos pueden ser llamados de dos modos: buscando en un archivo específico o listando los bloques de archivos, mediante los comandos FIND o LIST, respectivamente. Ambas opciones modifican los programas de impresión PHYFMT.PRG, CONEFMT.PRG, FURNFMT.PRG y TOXFMT.PRG.

La figura 4 muestra la estructura del programa FIREDATA, en la que se pueden observar las relaciones entre sus distintas partes. Asimismo, puede verse que, como medida de seguridad, el acceso al segundo nivel requiere pasar antes por el primero.

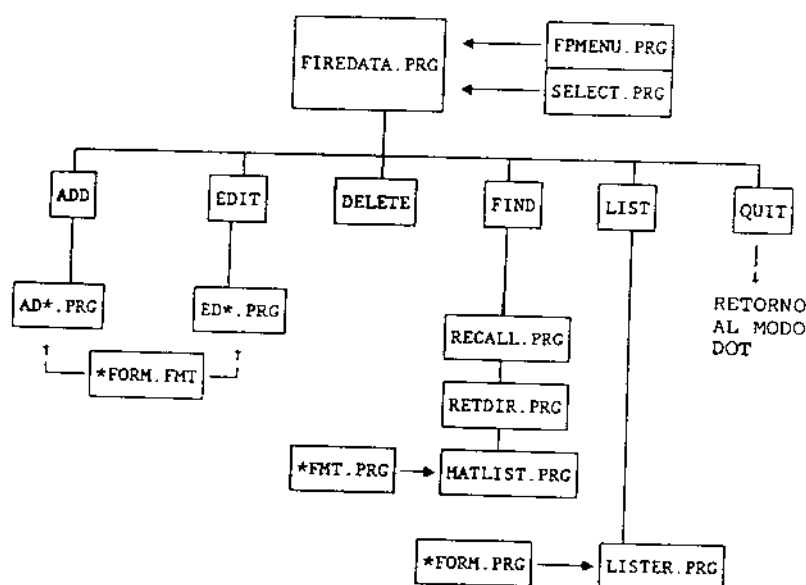


Fig. 4. Esquema de FIREDATA

4.3.4. Restricciones de FIREDATA

Su limitación principal es la de proporcionar especificaciones para un reducido conjunto de objetos. Los valores registrados se han tomado a partir de medidas calorimétricas, a escala real o reducida, efectuadas sobre muestras individuales y en unas condiciones muy concretas. Por tanto, los datos no son necesariamente vicarios del comportamiento genérico del objeto. Asimismo, debe señalarse que los valores de las propiedades termofísicas se tomaron de los catálogos de los fabricantes o de la bibliografía especializada, pero en ningún caso se verificó su representatividad. En cuanto a las propiedades toxicológicas, las fuentes son las indicadas en las referencias, debiéndose advertir la enorme variación de los intervalos de confianza.

4.4. PORMENORES DEL MODELO TENAB

4.4.1. Introduccion

El objeto del modelo es examinar el peligro que afronta un individuo durante su huida del edificio siniestrado. Esta evaluación, que se hace en términos de su posible incapacitación (aparición de quemaduras) o de su fallecimiento, precisa conocer no sólo las características ambientales promedio (dadas por FAST) y la ubicación de los moradores (proporcionada por EXITT), sino también los límites normales de habitabilidad. Así pues, antes de la estructura de TENAB, se debe estudiar el establecimiento de estas cotas.

4.4.2. Límites de seguridad y habitabilidad

Estos umbrales, según su acción, pueden clasificarse en:

- Termofísicos.
- Toxicológicos.

4.4.2.1. Límites termofísicos de habitabilidad

Dentro de esta categoría se analizarán la temperatura (TEMP), el flujo térmico (FLUX) y la densidad óptica (OD). A continuación se detallan algunas de sus características.

- * **Temperatura.**- Aún no se conocen exactamente los cambios fisiológicos sufridos por un ser humano sometido a elevadas temperaturas durante un cierto período. Por tanto, todo criterio para evaluarlos es mera conjetura, sin otro fundamento que el análisis de muestras humanas muy reducidas.

En cualquier caso, además del lapso de exposición, estos efectos van a depender de la humedad relativa del aire (HRA) y de la permeabilidad y aislamiento de la ropa⁽⁵⁶⁾.

En general, puede afirmarse que, incluso para cortas exposiciones, la frontera letal se sitúa en los 100°C⁽⁵⁷⁾ y la de incapacitación en los 65°C.

- * **Flujo térmico.**- La existencia de una corriente de gases calientes puede causar sensaciones cutáneas muy dolorosas; acaso la aparición de ampollas y quemaduras.

Para determinar el umbral de seguridad del flujo térmico se efectuaron ensayos sobre piel de porcino, considerada muy similar a la humana, concluyéndose que un valor comprendido entre 2,1 y 2,9 kW/m² puede tolerarse con la piel al descubierto durante unos tres minutos⁽⁵⁸⁻⁶⁰⁾.

- * **Densidad óptica.**- Fijar una cota para la opacidad no es trivial en absoluto, pues, al contrario que los factores anteriores y que la toxicidad, la densidad óptica no es letal per se. El riesgo proviene de que el oscurecimiento reduce, impidiendo eventualmente, la posibilidad de escape.

Sin embargo, el humo es un obstáculo tan importante que constituye uno de los productos más controlados de

la combustión⁽⁶¹⁾. Uno de los programas de investigación más sobresaliente en esta área se debe a T.J. Jin⁽⁶²⁾, que estableció la siguiente correlación empírica entre la densidad óptica del humo, representado por un coeficiente de extinción^(*), ϵ (m^{-1}), y el límite de visibilidad, V (m):

$$\epsilon \cdot V = 2.$$

Diversos experimentos (que no consideran la irritancia del humo) indican que $\epsilon_{\text{min.}} = 1,2 \text{ m}^{-1}$, lo que proporciona una visibilidad límite de $V = 1,67 \text{ m}$, que es una distancia razonable para encontrar, si hay humo, la puerta en una habitación, o el recodo de un pasillo.

En general, se puede afirmar que la opacidad disminuye la velocidad de evacuación, provocando incluso estados mentales de confusión que llevan al ocupante a tomar una ruta equivocada. En el límite, cuando la opacidad de un recinto es total, la circulación por el mismo está cortada, de modo que se considerará atrapado aquel cuya única vía de escape pase por este compartimento.

4.4.2.2. Límites toxicológicos de seguridad

Una importante fracción de los decesos producidos en los incendios puede atribuirse a la inhalación de agentes tóxicos (siendo el principal el CO) y al descenso de la presión parcial de O_2 . Por consiguiente, el establecimiento de los límites de seguridad en relación con estos aspectos es fundamental.

La mayoría de los estudios se han llevado a cabo sobre muridos y, más raramente, con ganado porcino. Desafortunadamente, apenas existen datos sobre primates y seres humanos.

La toxicidad se evalúa mediante dos parámetros:

- La dosis acumulada (FED).
- La dosis de exposición (C-t).

(*) El coeficiente de extinción (ϵ) es la constante de proporcionalidad de la ecuación diferencial lineal de primer orden siguiente [condición de contorno $I_0 = I(L=0)$]:

$$\frac{dI}{dL} = -\epsilon I$$

donde I = luz transmitida y L = espesor de la capa de humo que recorre aquella.

Ahora se analizarán muy someramente algunas de sus características:

* **FED.**- Es la dosis acumulada por un individuo durante un período dado. Es un factor adimensional (igual a la unidad cuando se alcanza el nivel letal) que se calcula mediante la aproximación N-GAS(*). La hipótesis subyacente es que el efecto total observado es igual a la suma de los debidos a cada uno de los gases componentes. Es decir, si se recibe el 50 % de la dosis letal de CO y otro tanto de la de HCN se admite que se ha alcanzado el nivel mortal.

Por otra parte, en el futuro se pretenden incluir las secuelas derivadas tanto del posible descenso de la concentración de O₂, como de la aparición de gases irritantes como el HCl.

* **C-t.**- También denominada dosis de exposición, es la integral respecto del tiempo de la variación temporal de la concentración de los productos de combustión. Así pues, es una concentración multiplicada por un tiempo. Este parámetro, que tampoco considera el descenso de la presión parcial de O₂, es un índice del impacto toxicológico ocasionado por la combustión, pero sin diferenciar los componentes individuales.

Diversas estimaciones indican que $C-t = 900 \text{ g-min/m}^3$ es el valor para el umbral letal⁽⁶⁶⁾.

4.4.3. Estructura de TENAB

Los condicionantes de la habitabilidad se han analizado en la anterior subsección, en ésta se detallará el cálculo propiamente dicho.

Ya se indicó que durante la ejecución, TENAB va obteniendo sus argumentos a partir de las salidas generadas por otros programas. Así, y en función del tiempo, de FAST recaba las concentraciones de los productos de combustión, la

(*) Aunque en un incendio se producen multitud de gases, es plausible que sólo unos pocos sean claves. La aproximación N-GAS^(63,64,65) parte de esta hipótesis, pues supone que basta un subconjunto de gases relativamente pequeño para explicar los efectos de la totalidad. Así pues, no considera el posible sinergismo. La versión empleada en el HAZARD I sólo incluye CO, CO₂ y HCN.

altura del plano de presión neutra(*), la temperatura y el flujo térmico; y de EXITT, la ubicación de los ocupantes.

Con estos datos se determina, en todo punto e instante, el ambiente al que están expuestos los habitantes del edificio siniestrado. Al cabo, cuando concluye el proceso de simulación, quedan registrados para cada ocupante, su ubicación y su condición física en relación con los niveles alcanzados por los diferentes parámetros de seguridad.

En los siguientes apartados se pormenorizan las etapas esenciales de estos cálculos.

4.4.3.1. Argumentos proporcionados por FAST

Para el funcionamiento de TENAB se precisa la existencia de un fichero de "volcado" generado por FAST. Así pues, antes de operar debe proporcionársele al sistema, cuidando de que exista en el disco un fichero con ese nombre, pues en caso contrario el proceso se detendrá en esta etapa. Por otro lado, si se desea parar aquí la ejecución de TENAB, basta con introducir una barra invertida (//) en lugar del nombre de uno de estos ficheros de "volcado".

4.4.3.2. Argumentos proporcionados por EXITT. Características del fichero de entrada de EXITT

La operación de TENAB necesita los datos de salida generados por EXITT a partir de los argumentos que le proporcionó FAST. Aquellos datos pueden introducirse desde el teclado, para lo cual TENAB da la información interactiva necesaria, o desde el fichero creado durante la ejecución de EXITT.

Ahora se analizarán las características más sobresalientes del fichero de entrada para la ejecución de EXITT.

Este fichero está dividido en cinco secciones: cuatro principales (imprescindibles, las dos primeras) y una informativa. Sus cualidades son las siguientes:

* Obligatorias:

La primera es una entrada monádica consistente en un número natural, NH, igual al de habitaciones de la planta sobre la que opera EXITT.

(*) Este dato permite conocer la capa, caliente o fría, en la que se haya inmerso el ocupante.

- Formato:

NH

La segunda es un cuádruplete de números, los dos primeros naturales, que nos informa acerca de la posición de un ocupante en un instante dado y, por tanto, de la ruta que sigue durante el incendio. Debe tenerse en cuenta que, en el marco de este formalismo, el número máximo de habitaciones que puede recorrer una persona es de 100.

- Formato(*):

$O_j/H_i/t/s$

donde:

$O_j > 0$, es el índice del ocupante j -ésimo.

$H_i \in [1, NH+1]$, es el índice del compartimento i -ésimo.

$t \geq 0$, es el tiempo (s) transcurrido desde el comienzo ($t = 0$) del incendio.

s , es la separación (m) entre el punto de apoyo del ocupante y el suelo de la habitación (usualmente 0,0). Este dato adquiere sentido cuando la habitación tiene, por ejemplo, una galería.

Para señalar la inexistencia de ocupantes, o que ha concluido la entrada de datos, se teclea:

0/0/0/0

* Sección informativa. - Con objeto de que en TENAB conste la existencia de las secciones opcionales, tras la segunda debe introducirse otro cuádruplete de números enteros cuyo formato es:

(*) En este formato la barra indica ya una coma (,), ya un espacio en blanco, ya un "RETURN".

I/O/O/O

Su sentido se da en la siguiente tabla:

VALOR DE I	¿EXISTE LA SEC. 3a?	¿EXISTE LA SEC. 4a?
0	NO	NO
-1	SI	NO
-2	NO	SI
-3	SI	SI

Si se omite esta sección el sistema interrogará interactivamente sobre la posible modificación de los límites de habitabilidad.

* Opcionales:

La tercera sección es un NH-uplete de números naturales que homologa, cuando son distintos, el conjunto de habitaciones empleado en EXITT y el utilizado FAST.

Si se piensa que FAST, al contrario que EXITT, está limitado al análisis de recintos pentacompartimentados, la utilidad de esta sección queda patente; en particular, cuando $NH(EXITT) > NH(FAST)$ debe indicarse las habitaciones "de EXITT" que deben agruparse para que los dos conjuntos se correspondan. Por otra parte, si $NH(EXITT) = NH(FAST)$, entonces $H_i(EXITT) = H_i(FAST)$, teniendo en cuenta que $H_i(j)$ es la habitación i-ésima de la planta usada en los cálculos con el modelo j-ésimo.

- Formato:

H_1, H_2, \dots, H_{NH}

donde H_k señala que la K-ésima habitación de EXITT se corresponde con la H_k -ésima de FAST.

La cuarta está formada por dos tripletes asociados, respectivamente, con los umbrales de incapacitación y de letalidad de FED, C-t y TEMP. Esta sección sirve para especificar, cuando se quieren variar los estándares prefijados, los nuevos límites de seguridad.

- Formato (de ambos tripletes):

FED, C-t, T

Si NO se quiere variar alguno de los valores se introduce "-1." en el lugar pertinente.

A continuación se muestra un fichero de entrada comentado (se supondrá que la planta que se considera en EXITT tiene 6 habitaciones y la de FAST, 5).

6	la planta sobre la que opera EXITT tiene 6 compartimentos
1,1,0,0	la persona 1 está en la habitación 1 en el instante inicial (0,0 s), directamente sobre el suelo.
1,2,120,0	la persona 1 está en la habitación 2 al cabo de 120 s, directamente sobre el suelo.
2,2,0,0	la persona 2 está en la habitación 2 en el instante inicial (0,0 s), directamente sobre el suelo.
-3,0,0,0	señala la presencia de las secciones 3a y 4a.
1,2,2,3,4,5	señala que la habitación 1 de EXITT es la 1 de FAST la habitación 2 de EXITT es la 2 de FAST la habitación 3 de EXITT es la 2 de FAST la habitación 4 de EXITT es la 3 de FAST la habitación 5 de EXITT es la 4 de FAST la habitación 6 de EXITT es la 5 de FAST
-1.,400.,-1.	Para los límites de incapacitación se conservan los valores estándar de FED y T y se cambia el de C-t que ahora vale 400 g-min/m ³ .
-1.,-1.,110.	Para los letales, se conservan los estándares de FED y C-t, y el de temperatura ahora es de 110°C.

4.4.4. Salida proporcionada por TENAB

Tras indicar los ficheros de entrada correspondientes a FAST y EXITT debe hacerse otro tanto con el de salida, en cuyo caso se registrará en el disco (por ello, hay que procurar que no exista ya un fichero útil con el mismo nombre), o tecleando la identificación del periférico de salida: PRN o CON (ambos en el PC), si se quiere, respectivamente, imprimir o visualizar en pantalla.

La salida de TENAB comienza listando los nombres de los ficheros usados desde FAST y EXITT. A continuación escribe los datos proporcionados por EXITT para los límites de seguridad. La última parte de esta salida es una tabla en la que para cada ocupante se dan, en función del tiempo, los valores de los diferentes parámetros de habitabilidad, su condición física y la habitación donde se encuentra.

5. PROCEDIMIENTO DETALLADO DEL ANALISIS DEL RIESGO DE INCENDIO MEDIANTE EL HAZARD I

El proceso para evaluar la siniestralidad del incendio provocado para un objeto dado puede desglosarse en varias etapas.

1) Establecimiento del contexto, que incluye los siguientes pasos:

- Descripción del objeto.
- Definición de su utilización, es decir, dónde, cómo y cuándo se usa.
- Ejecución de PRODUCT.ONE. Aunque, como ya se ha comentado, ésta puede omitirse.

2) Especificación del escenario, lo que implica pormenorizar:

- Las características de la edificación.
- El tipo de incendio (FIREDATA, MLTFUEL).
- El número, clase y situación inicial de los ocupantes.
- Los argumentos iniciales (FINPUT).

3) Cálculo del riesgo, cuyas etapas son:

- Predicción de las condiciones en cada habitación (FAST).
- Representación/listado de los parámetros de interés (FAS-PLOT).
- Descripción de los ocupantes y de las características y distribución del humo (EXITT).
- Ajuste de los detectores y rociadores (DETECT).
- Selección del criterio de habitabilidad y obtención de consecuencias (TENAB).

4) Evaluación de los resultados mediante las siguientes comparaciones:

- Con los casos ejemplo.
- En ausencia del objeto.
- Tras modificar las características del producto.

6. PROPUESTA DE UNA PLANTA TIPICA DE VIVIENDA

6.1. INTRODUCCION

A partir de diversos anteproyectos presentados en los concursos convocados por el I.N.V. durante los años 1979 y 1980⁽⁵⁵⁾, se ha realizado una planta tipo de una vivienda, adaptada al HAZARD I. Para este diseño se han tenido en cuenta únicamente las características constructivas, independientemente de las geográficas, las demográficas u otras consideraciones. Por otra parte, debe considerarse que todas las plantas estudiadas pertenecían a edificios de varios pisos mientras que la propuesta es una vivienda de piso único.

6.2. DIMENSIONES Y DISTRIBUCION

La distribución de la vivienda tipo diseñada, cuya superficie útil total es de 40,26 m², se detalla en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Dimensiones y distribución de la planta

Hi	USO	SUPERF. (m ²)	LONG. (a) (m)	ANCH. (a) (m)	ALTURA (a) (m)
1	Vestíbulo/Distribuidor	6,68	3,86	1,73	2,44
2	Dormitorio	8,98	3,55	2,53	2,44
3	Salón	13,40	4,48	2,99	2,44
4	Baño/Aseo	3,31	2,33	1,42	2,44
5	Cocina	7,89	2,99	2,64	2,44
6	Calle ^(b)	---	---	---	---

NOTAS: (a) La longitud, la anchura y la altura corresponden a las medidas más representativas.

(b) Naturalmente, el exterior no es una dependencia de la vivienda, pero en los cálculos se le considera como un "pseudocompartimento" cuyo número asignado es el 6.

Las relaciones entre las distintas dependencias se esquematizan en el grafo de la figura 5.

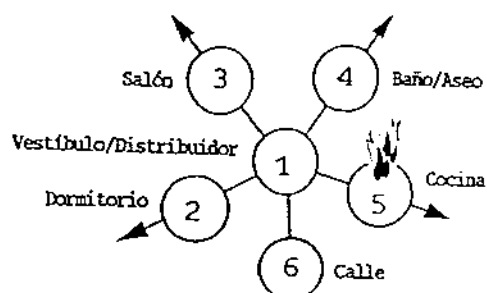


Fig. 5 . Relaciones topológicas entre las diversas dependencias.

En esta figura, la línea que une dos círculos indica una puerta de acceso y la flecha, una ventana. Las dimensiones promedio de estas aberturas se dan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Dimensiones de las aberturas

TIPO DE ABERTURA	ALTURA (m)	ANCHURA (m)	DISTANCIA SUELO-ANTEPECHO (m)
Puerta	2,04	0,76	---
Ventana	1,07	1,50	0,97

6.3. PROPIEDADES TERMICAS DE LA EDIFICACION

A falta de una recopilación estadística más minuciosa sobre las propiedades térmicas medias de los materiales empleados en la construcción de viviendas en España, se dan como avance los siguientes datos recogidos en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. Propiedades térmicas de la edificación

PARAMETRO	De paredes	De techo/suelo
Calor específico (kJ/kg.K)	1,062	0,900
Conductividad térmica (W/m.K)	0,134	0,180
Densidad (kg/m ³)	800,0	790,0
Espesor (m)	0,12	0,40
Emisividad	0,82	0,90

7. DISEÑO DEL INCENDIO

La sencillez del modelo de transporte (FAST) incluido en el HAZARD I no permite que el incendio sea totalmente realista. No obstante, pueden obtenerse conclusiones cualitativamente aceptables.

7.1. ESCENARIO. PROPIEDADES TERMICAS DEL COMBUSTIBLE

El edificio que se propone es un apartamento pentacompartimentado, cuyas puertas y ventanas están completamente abiertas al iniciarse el incendio. El origen de éste se halla en la cocina (dependencia 5), junto a la zona media de una pared, por ignición de aceite de oliva y posterior propagación por el mobiliario (de madera de tablero duro). Algunas características del combustible, tomadas de las referencias 59 y 66, se recogen en la tabla 7.1.

La situación del foco se ha seleccionado por ser la más frecuente, aunque no más peligrosa. Cuando comienza el suceso, los habitantes (una pareja joven sin impedimento alguno) se hallan en el salón (dependencia 3).

Tabla 7.1. Propiedades térmicas del combustible

PARAMETRO	
Calor de combustión (MJ/kg)	39,0
Fracción de calor emitido	0,99
Relación estequiométrica aire/combustible	17,25
Masa (g) de CO ₂ por gramo de combustible quemado	2,75
Masa (g) de H ₂ O por gramo de combustible quemado	2,25
Masa (g) de CO por gramo de combustible quemado	0,019
Masa (g) de humo por gramo de combustible quemado	0,008
Coeficiente de absorción de la llama (m ⁻¹)	1,55

7.2. CALCULO DEL INCENDIO

Mediante el HAZARD I se determinan no sólo las características de cada una de las habitaciones del edificio siniestrado (la duración del incendio se ha fijado en 1200 s), sino también la distribución de los productos fluidos de combustión(*).

(*) Productos fluidos de combustión: Desde una perspectiva físico-química, y atendiendo a su estado de agregación, pueden establecerse dos clases de productos de combustión: los que están en fase condensada (p.ej.: las cenizas) y los que dan lugar a fases fluidas (gases y aerosoles). Desde el punto de vista de la dinámica del incendio sólo tienen importancia estas últimas.

Los gases se caracterizan porque se difunden en el aire, dando lugar a disoluciones "stricto sensu", cuyas propiedades son de sobra conocidas.

Los aerosoles son sistemas coloidales cuya fase dispersante es un gas (generalmente el aire) y la dispersa es un sólido o un líquido, dando lugar, respectivamente, a humos o a nieblas.

8. RESULTADOS Y DISCUSION

Tras la ejecución del HAZARD I con los argumentos descritos en las secciones precedentes, se obtuvieron diversos valores numéricos, una selección de los cuales se ha tabulado en el Apéndice. Sin embargo, con objeto de adquirir una idea más global de los acontecimientos que tienen lugar durante el suceso se han realizado con su ayuda varias figuras, cada una de las cuales se ha construido por interpolación a partir de 120 puntos.

La Fig. 6 esquematiza la evolución en función del tiempo de la altura de la superficie de presión neutra en las cinco habitaciones (el trazo diferente de cada curva distingue el cambio de este parámetro en las respectivas habitaciones). Obsérvese que el gradiente inicialmente más pronunciado corresponde a la curva asociada con la habitación 5. La aparición de máximos y mínimos en $t < 480$ s puede atribuirse al descenso de la presión parcial de O_2 motivado por la deflagración y el consiguiente cambio de las condiciones de combustión.

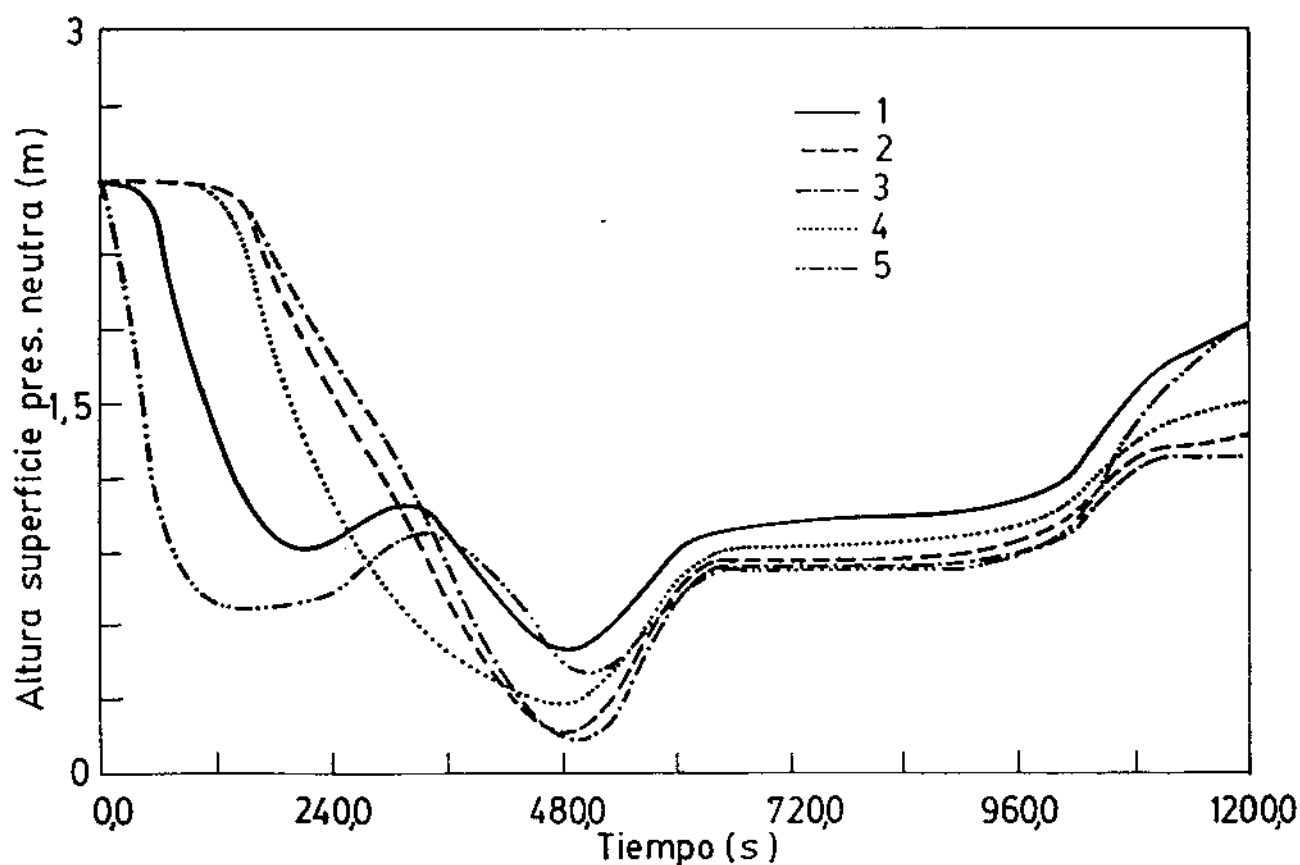


Fig. 6. Variación de la superficie de presión neutra en las diversas habitaciones.

La afirmación anterior se confirma en la fig. 7 pues en ella puede observarse un cambio abrupto de pendiente en $t \approx 480$ s en la habitación 5.

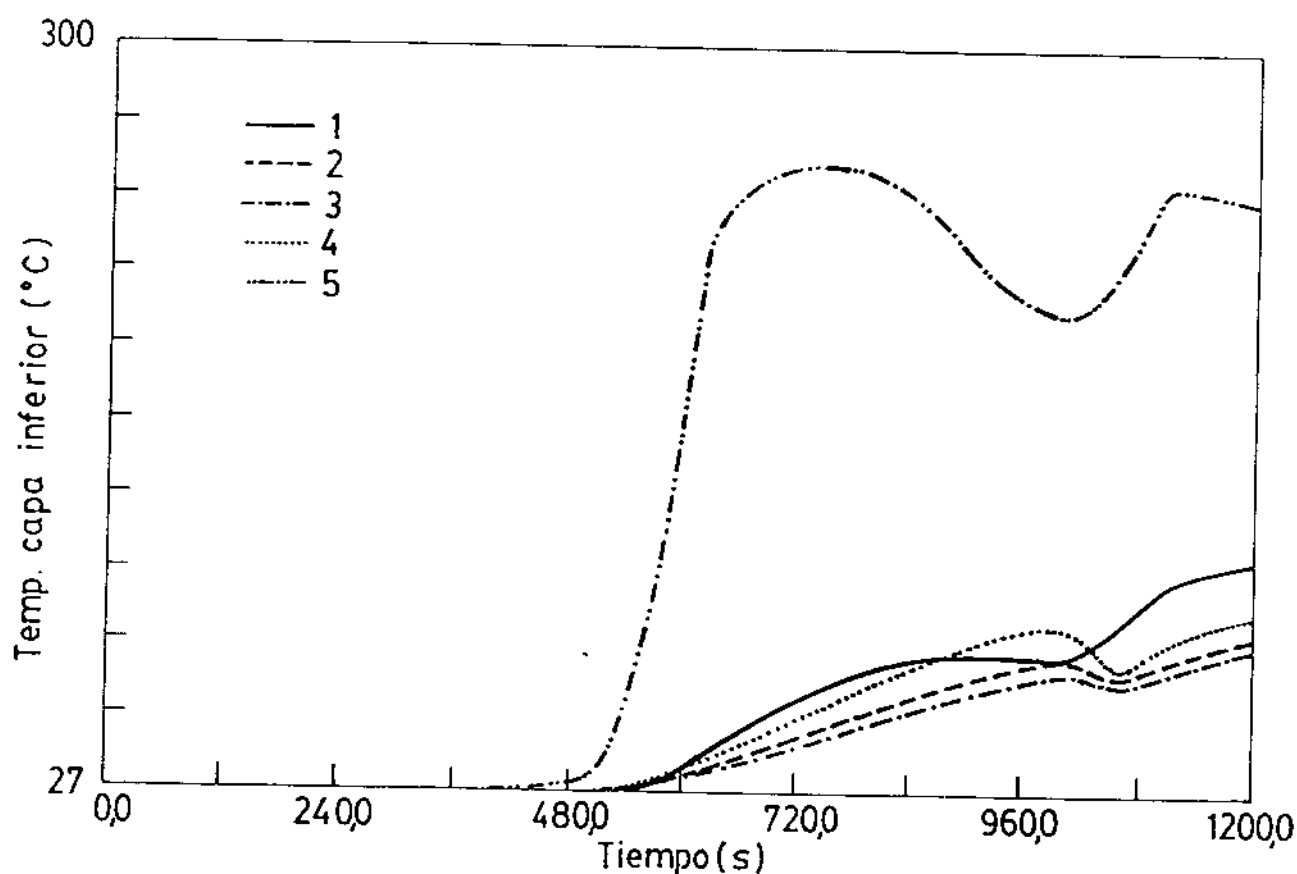


Fig. 7. Temperatura de la capa inferior en función del tiempo en las diversas habitaciones.

En la figura 8, que recoge la variación temporal de la temperatura de la capa superior, aparece un máximo aproximadamente a $t = 480$ s que indica la existencia de deflagración.

Las siguientes figuras se han obtenido fundamentalmente para el análisis de la supervivencia que ahora pasa a comentarse.

Para determinar la ruta óptima de huida se empleó TENAB junto con los límites de seguridad y habitabilidad descritos en el apartado 4.4.2. A continuación se describe el producto de estos cálculos.

Los ocupantes, que, como ya se indicó, se encuentran inicialmente en el salón (compartimento 3), tienen dos vías de escape. Por un lado, a través de la ventana; por otro, pasando por el vestíbulo (compartimento 1). Sin duda, la primera ruta es más rápida. Si ésta es la empleada, el tiempo de demora desde el comienzo del incendio para que la huida tenga éxito es de 8 min (al cabo de 9 sobrevendría la muerte al rebasarse el límite letal de temperatura).

No obstante, si la ventana no fuese transitable y los ocupantes se vieran obligados a escapar por el vestíbulo, el margen de reacción se reduciría sensiblemente, pues en esta última dependencia la temperatura de incapacitación se alcanza a los 7 min tras declararse el fuego (a los 8 min el nivel sería letal). En consecuencia, como la velocidad de huida ($3,0 \text{ m.s}^{-1}$) no se ve reducida, pues son precisos más de 7 min para que la densidad óptica no sea despreciable (ver fig. 12), los ocupantes tienen un período de seguridad de aproximadamente 6 min.

En suma, si se emplea el vestíbulo como vía de escape, el tiempo de respuesta efectiva se reduce casi un 25% en relación con el correspondiente a la huida por la ventana. Lo que debe tenerse en cuenta de cara a la distribución de dispositivos detectores y al diseño constructivo.

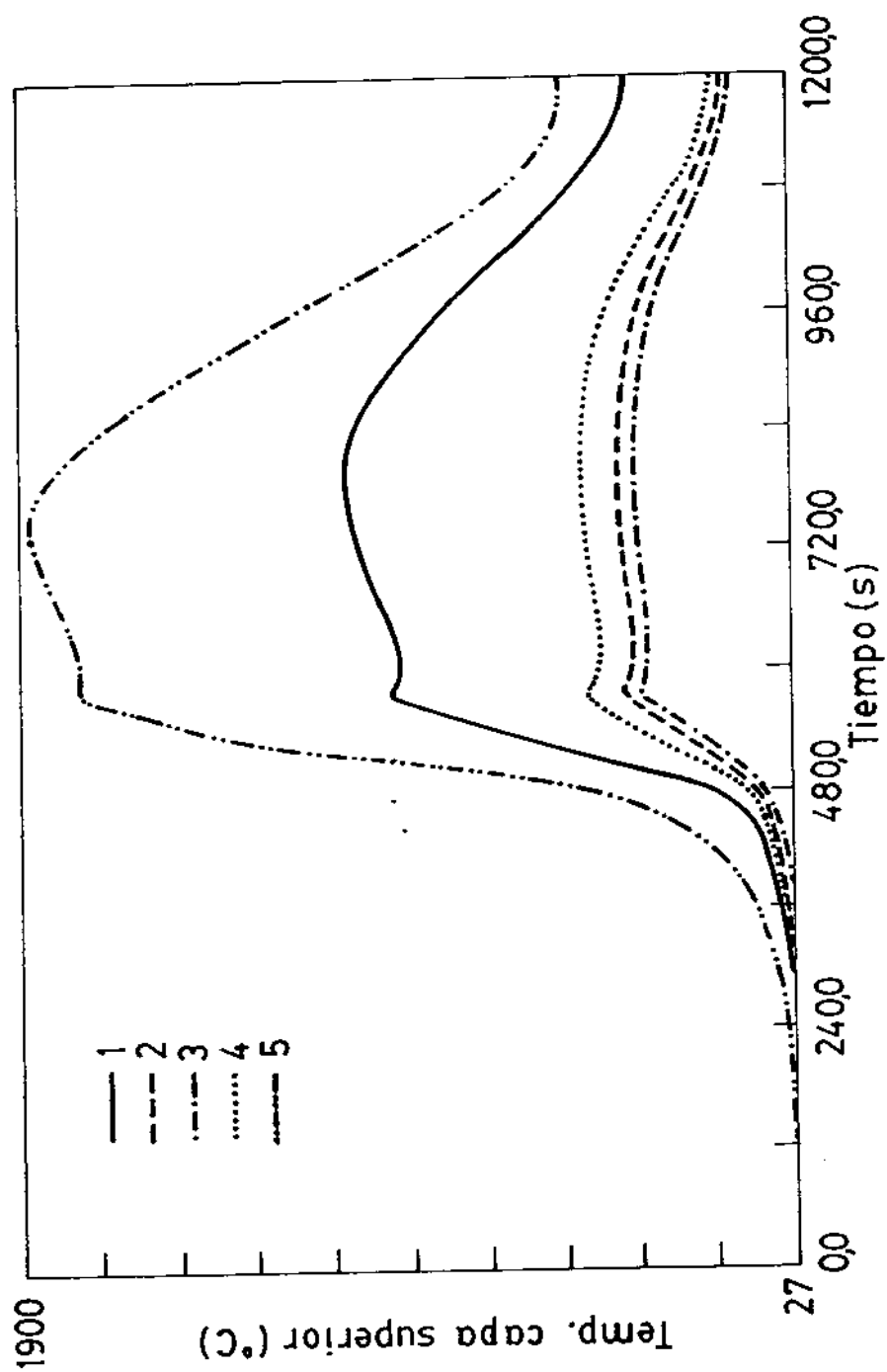


Fig. 8. Temperatura de la capa superior en función del tiempo en las diversas habitaciones.

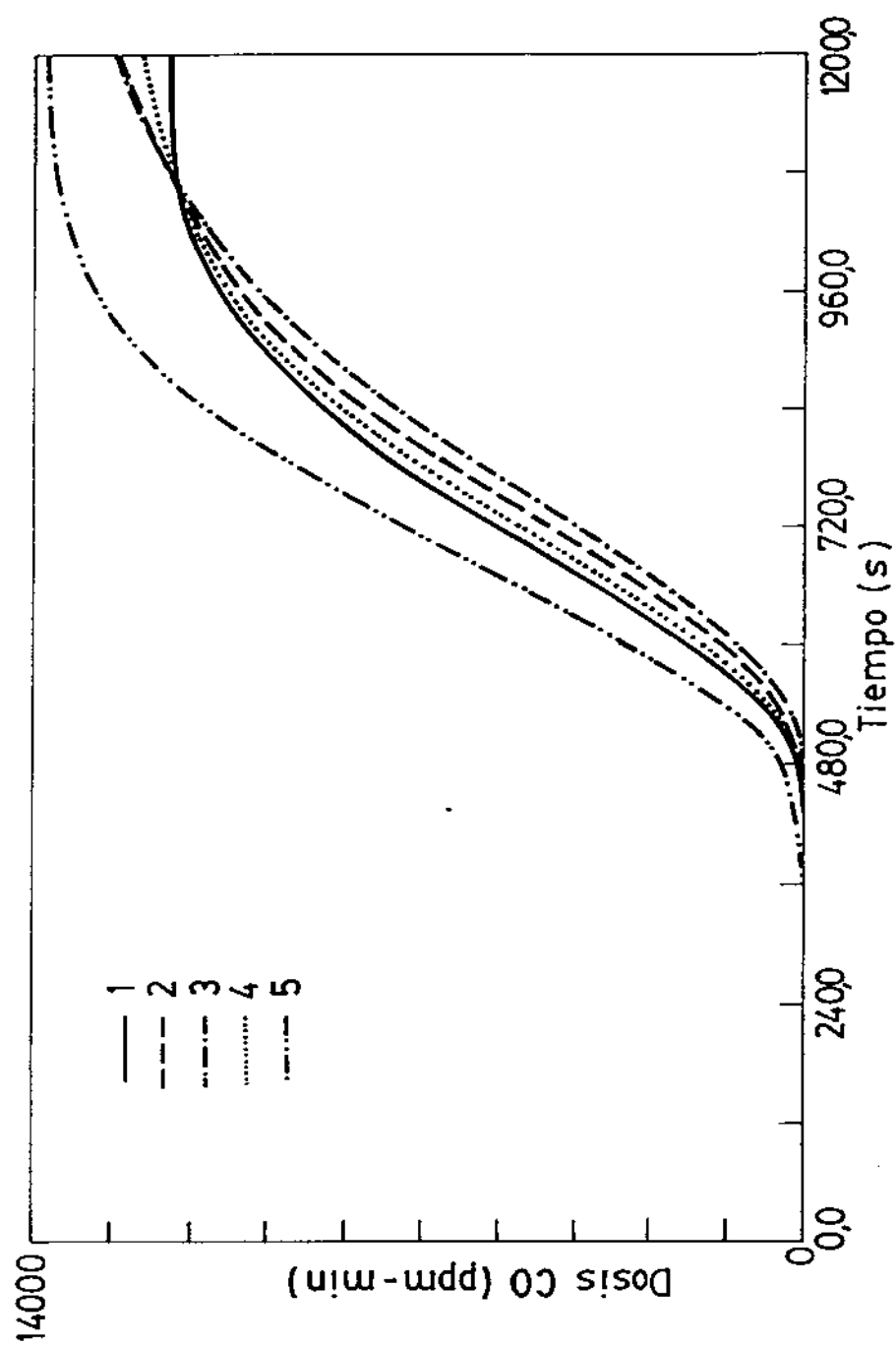
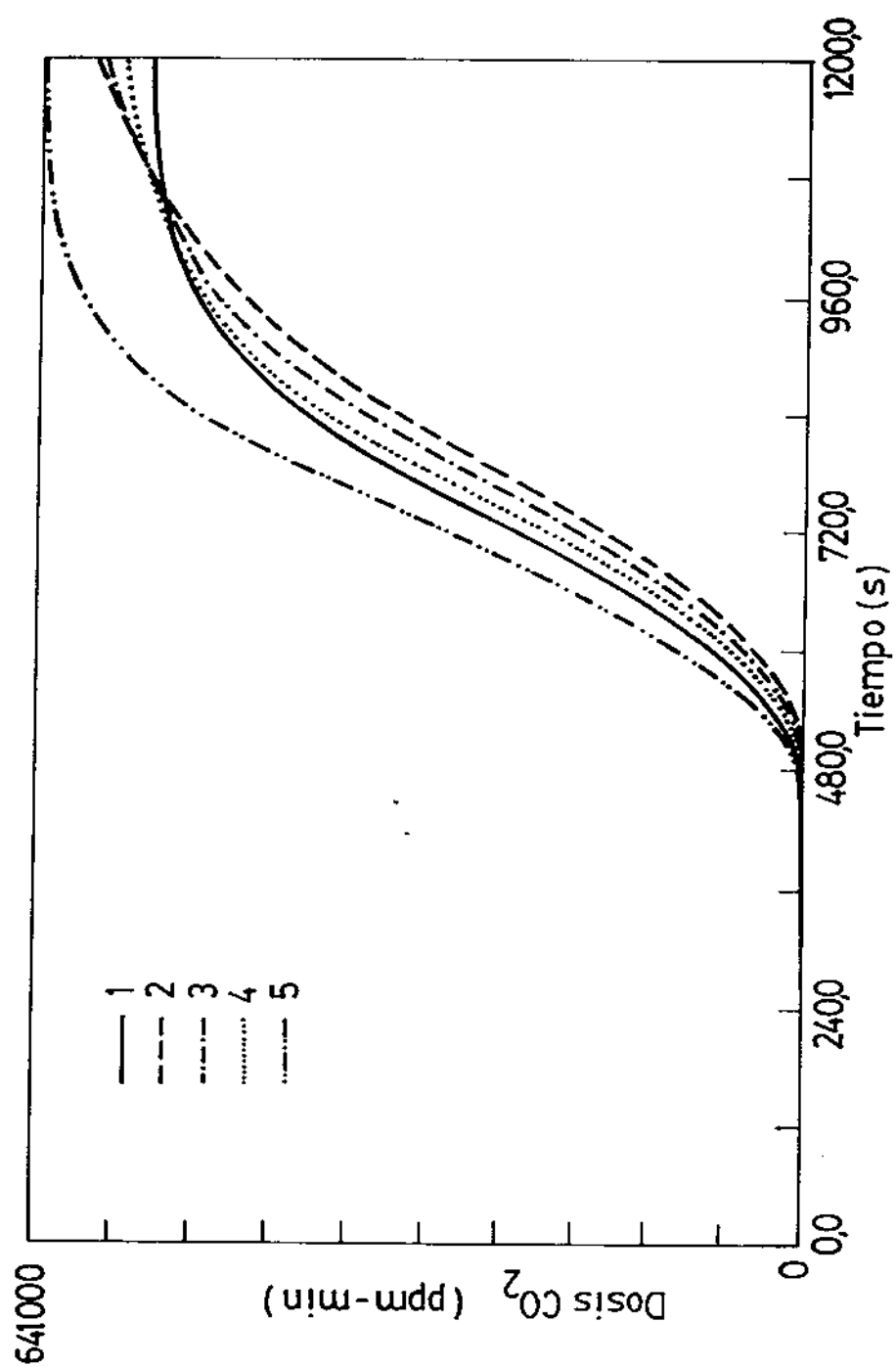


Fig. 9. $C-t(CO)$ en los distintos compartimentos.



Fif. 10. C-t(CO_2) en los distintos compartimentos.

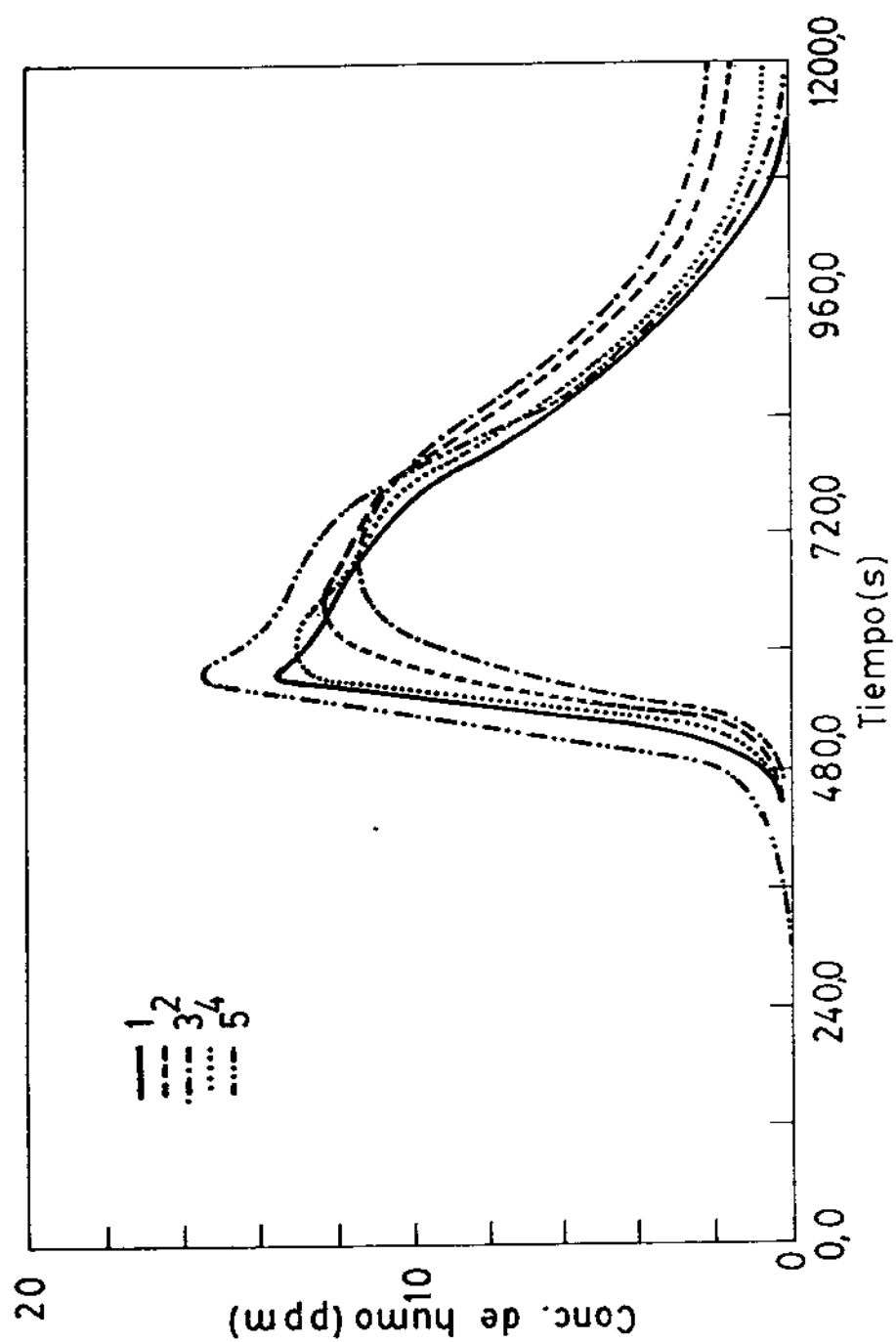


Fig. 11. Variación de la concentración de humo.

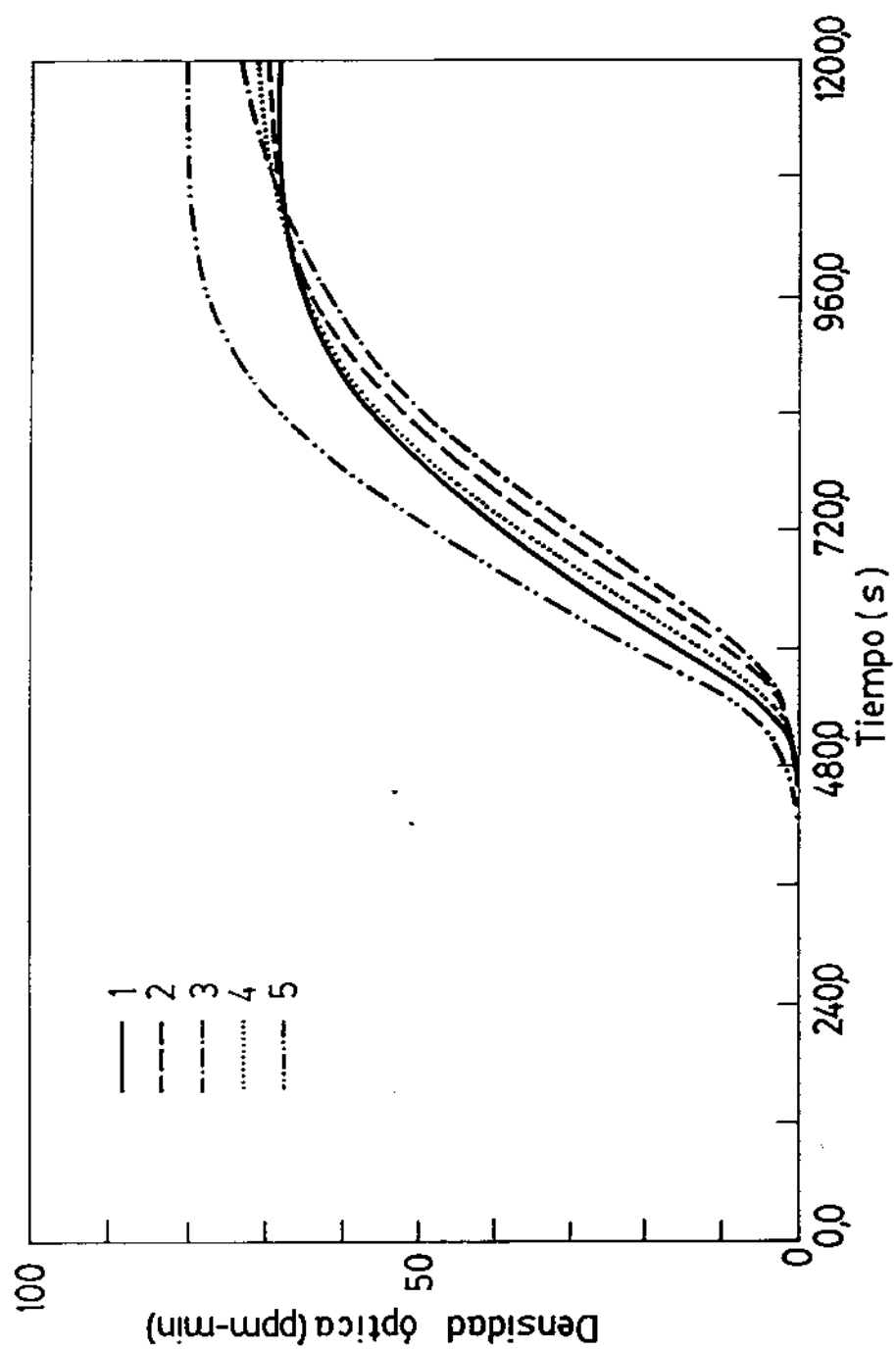


Fig. 12. Variación temporal de la densidad óptica.

9. CONCLUSIONES

El presente estudio, centrado en el empleo del HAZARD I, sobre el desarrollo y las consecuencias de un fuego declarado en un recinto pentacompartimentado, constituye un punto de partida eficaz para conocer, al menos cualitativamente, algunos de los factores principales en el análisis del riesgo de incendios; ya sean las condiciones para la deflagración, ya los márgenes de supervivencia de los ocupantes.

Sin embargo, las simplificaciones existentes a lo largo de las distintas etapas del proceso generan restricciones, quizás excesivamente inflexibles, tanto en la ubicación del foco de ignición como en la distribución de las cargas de fuego en las diferentes dependencias.

Por tanto, es muy probable que la exactitud de las predicciones pueda mejorarse actuando particularmente sobre FAST y EXITT, que son los dos aspectos más limitantes del sistema.

No obstante, a pesar de su relativa sencillez, patente desde cualquier perspectiva, HAZARD I puede considerarse una herramienta de gran utilidad potencial para la elaboración de mejores estrategias de escape, como guía para explorar nuevas estructuras constructivas, y para examinar la superioridad de la modelación sobre el experimento, sea o no a escala real. Si en esta confrontación se confirmasen estadísticamente estas ventajas, sería posible la obtención de información cuantitativamente válida que reduzca, y en el mejor de los casos elimine, la necesidad de costosos montajes de laboratorio.

Las anteriores conclusiones acerca del HAZARD I pueden esquematizarse en los siguientes puntos:

A. El HAZARD I es un método para anticipar el peligro que corre el ocupante de un edificio en el que se ha producido un incendio.

B. Por tanto, es útil para que el proyectista sepa, como mínimo, como no debe diseñar el edificio o la instalación contra incendios para que resulten seguros.

C. El HAZARD I es un conjunto de procedimientos cuyo empleo requiere una considerable destreza en el campo de la seguridad contra incendios. Por ello, la elaboración de un manual simplificado para el uso del HAZARD I sería otro punto interesante de desarrollo futuro.

D. El HAZARD I es un sistema autocontenido. Es decir, que incluye la mayoría de la información precisa para el análisis del riesgo de incendio.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. J.A. Swartz et al.: "Final Technical Report on Building Fire Simulation Model". Natl. Fire Prot. Assn., Vols. I-II (1983). Ver también R.F. Fahy: "Building Fire Simulation Model. An Overview". Fire Safety J., 9(1985) 189.
2. W.W. Jones: "A Review of Compartment Fire Models". NBSIR 83-2684 (1983).
3. L.Y. Cooper y D.W. Stroup: "Calculating Safe Egress Time (ASET). A computer Program and User's Guide". NBSIR 82-2578 (1982). También en Fire Safety J., 9 (1985) 29.
4. W.D. Walton: "ASET-B: A Room Fire Program for Personal Computers". NBSIR 85-3144 (1985). También en Fire Technology, 21 (1985) 293.
5. V. Babrauskas: "COMPF2: A Program for Calculating Post-Flashover Fire Temperature". NBSTN 991 (1979).
6. B.M. Häggglund: "Simulating Fires in Natural and Forced Ventilated Enclosures". FOA Report C 20637-2.4 (1986).
7. E.E. Smith y S. Satija: "Release Rate Model for Developing Fires". 20th Joint ASME/AIChE National Heat Transfer Conference (1981). Milwaukee, WI, (EE.UU.). También en J. Heat Transfer, 105 (1983) 281.
8. E.E. Zukoski y T. Kubota: "Two-Layer Modeling of Smoke Movement in Building Fires". Fire and Materials, 4 (1980) 17.
9. T. Tanaka: "A Model of Multiroom Fire Spread". NBSIR 83-2718 (1983).
10. W.W. Jones: "A Model for the transport Fire, Smoke and Toxic Gases (FAST)". NBSIR 84-2934 (1984).
11. W.W. Jones: "A Multicompartment Model for the Spread of Fire, Smoke and Toxic Gases". Fire Safety J., 9 (1985) 55.
12. W.D. Walton, S.R. Baer y W.W. Jones: "User's Guide for FAST". NBSIR 85-3284 (1985).
13. H.E. Mitler: "The Physical Basis for the Harvard Computer Fire Code". Home Fire Project Technical Report, 34 (1978).
14. H.E. Mitler y H.W. Emmons: "Documentation for CFC V, the Fifth Harvard Computer Fire Code". Home Fire Project Technical Report, 45 (1981). También en NBS-GCR 81-344 (1981).
15. H.E. Mitler: "The Harvard Fire Model". Fire Safety J., 9 (1985) 7.

16. J.A. Rockett y M. Morita: "The NBS/Harvard Mark VI Multi-room Fire Simulation". NBSIR 85-3281 (1986). También en Fire Sci. and Tech., 5 (1985) 149.
17. H.E. Mitler y J.A. Rockett: "Users' Guide to FIRST. A Comprehensive Single-Room Fire Model". NBSIR 87-3595 (1987).
18. A. Crespo, D. Moreno y J. Hernández. "Propagación de humos y gases en incendios". Informe final MAPFRE (Dpto. Mec. Fluidos, E.T.S.I. Industriales de la U.P.M.), 1986.
19. A. Crespo, J. Colombás, J. Hernández y D. Moreno. "Propagación de humos y gases en incendios". Informe final MAPFRE (Dpto. Mec. Fluidos, E.T.S.I. Industriales de la U.P.M.), 1987.
20. R. Pape, T.E. Waterman y T.V. Eichler: "Development of a Fire in a Room from Ignition to Full Room Involvement RFIRES". IIT Research Institute Report, IITRI Project J6485, 1980. También en NBS-GCR 81-301 (1981).
21. J.C. Sanz y F. Núñez: "Modelización de incendios. Programa Hazard I". II Encuentro Internacional de Centros de Investigación y Ensayos de Incendio (Santiago de Chile), Vol I (1989) pp. 525.
22. B. Andersson: "Model Scale Compartment Fire Tests with Wall Lining Materials". Institute of Sci. and Tech. Dpt. Fire Safety Engineering; Report Lutvdg/(TVBB-3041), 1988.
23. Y. Morishita: "A Stochastic Model of Fire Spread". Fire Sci. and Tech., 5 (1985) 1.
24. Instrucción Técnica de protección contra incendios 00.01. ITSEMAP; Avila (1987).
25. V. Babrauskas y R.B. Williamson: "Post-Flashover Compartment Fires: Basis of a Theoretical Model". Fire and Materials, 3 (1979) 1.
26. V. Babrauskas: "Combustion of Mattresses Exposed to Flaming Ignition Sources, Part I. Full-Scale Test and Hazard Analysis". NBSIR 77-1290 (1977).
27. J.B. Fang: "Fire Performance of Selected Residential Floor Constructions Under Room Burnout Conditions". NBSIR 80-2134 (1980).
28. R.L. Alpert y E.J. Ward: "Evaluation of Unsprinklered Fire Hazards". Fire Safety J., 7 (1984) 127. También en FMRC J.I. 01836.20 (1984).
29. B.M. Hägglund, R. Jansson y B. Onnermark: "Fire Development in Residential Rooms after Ignition from Nuclear Explosions". FOA Report C20016-D6(A3) (1974).

30. J.B. Fang y J.N. Breese: "Fire Development in Residential Basement Rooms". NBSIR 80-2120 (1980).
31. S.B. Martin y S.J. Wiersma: "An Experimental Study of Flashover Criteria for Compartment Fires". SRI International Project No. PYC 6494, PRC No. P-77-3-1 (1979).
32. P.H. Thomas: "Testing Products and Materials for their Contribution to Flashover in Rooms". Fire and Materials, 5 (1981) 103.
33. T.E. Waterman: "Scaled room flashover". Final Report OCD WU 25349. Office of Civil Defence, Washington, D.C. (1971).
34. R.L. Alpert y col.: "Influence of Enclosures on Fire Growth. Vol. I Test Data". FMRC J.I. OAOR2.BU 0-8 (1977).
35. B.M. Häggglund: "A Numerical Simulation of Fires in Hospital Rooms". FOA Report C 20684-2.4 (1987).
36. J.A. Rockett, M. Morita y L.Y. Cooper: "Comparisons of NBS/Harvard VI Simulations and Full-Scale, Multi-Room Fire Test Data". NBSIR 87-3567 (1987). También en Fire Safety Sci.-Proc. 2nd. Int. Symp., pp. 481-490, T. Wakumasu et al, Eds., Int. Ass. Fire Safety Sci., Tokyo, (1988), Hemisphere Publishing Co., NY.
37. H.W. Emmons: "Why Fire Model? The MGM Fire and Toxicity Testing". Fire Safety J., 13 (1988) 77.
38. J.H. Klote: "A Computer Model of Smoke Movement by Air Conditioning Systems (SMACS)". Fire Tech., 24 (1988) 299.
39. R.W. Bukowski: "Hazard I - Results of a User Evaluation of the Prototype Software". NISTIR 88-3878 (1988).
40. V. Babrauskas, J.R. Lawson, W.D. Walton y W.H. Twilley: "Upholstered Furniture Heat Release Rates Measured with a Furniture Calorimeter". NBSIR 82-2604 (1982).
41. V. Babrauskas y J.F. Krasny: "Fire Behavior of Upholstered Furniture". N.B.S. (EE.UU.); Monografía NBS nº 173 (1985).
42. V. Babrauskas: "Free Burning Fires". Fire Safety J., 11 (1986) 33.
43. J.G. Quintiere, B.J. Steckler y B.J. McCaffrey: "A model to predict the conditions in a room subject to crib fires". 1st Specialist Meeting of the Comb. Institute. Bordeaux, France (1981).
44. B.T. Lee: "Effect of Ventillation on the Rates of Heat, Smoke and Carbon Monoxide Production in a Typical Jail Cell Fire". NBSIR 82-2469 (1982).

45. R.D. Peacock, S. Davis y B.T. Lee "An Experimental Data Set for the Accuracy Assessment of Room Fire Models". NBSIR 88-3752 (1988).
46. P.H. Thomas: "On a Relationship between certain zone models of two layer and uniform compartment fires". Fire Sci. Tech., 4 (1984) 65.
47. D.D. Evans y D.W. Stroup: "Methods to Calculate the Response Time of Heat and Smoke Detectors Installed Below Large Unobstructed Ceilings". NBSIR 85-3167 (1985). También en Fire Technology, 22 (1985) 54.
48. G. Heskestad, y M.A. Delichatsios: "Environments of Fire Detectors -Phase 1: Effect of Fire Size, Ceiling Height and Material", Vol. 1. NBSGCR 77-86 (1977).
49. Id, Vol. 2. NBSGCR 77-95 (1977).
50. NFPA 72E: "Standard on Automatic Fire Detectors". Natl. Fire Prot. Assn.; Batterymarch Park, Quincy, Mass. (1987).
51. B.M. Levin: "EXITT - A Simulation Model of Occupant decisions and actions in Residential Fires: User's Guide and Program Description". NBSIR 87-3591 (1987).
52. R.W. Bukowski, W.W. Jones, B.M. Levin, C.L. Forney, S.W. Stiefel, V. Babrauskas, E. Braun y A.J. Fowell: "Hazard I. Vol. 1: Fire Hazard Assessment Method". NBSIR 87-3602 (1987).
53. B.C. Levin, A.J. Fowell, M.M. Birky, M. Paabo, S. Salte y D. Malek: NBSIR 82-2532 (1982).
54. W.J. Potts y T.S. Lederer. J. Comb. Toxicol., 4 (1977) 113.
55. Y. Alarie y R.C. Anderson. Toxicol. Appl. Pharmacol., 51 (1979) 341.
56. V.H. Veghte y P. Webb: "Clothing and Tolerance to Heat". WADC Technical Report 57-759 (1957).
57. E.K. Budnik: "Mobile Home Living Room Fire Studies: The Role of Interior Finish", NBSIR 78-1530 (1978).
58. K. Buettner: "Effects of Extreme Heat and Cold on Human Skin, II. Surface Temperature, Pain and Heat Conductivity in Experiments with Radiant Heat". J. Appl. Physiol., 3 (1951) 703.
59. J.D. Hardy: "Thresholds of Pain and Reflex Contraction as Related to Noxious Stimulation". J. Appl. Physiol., 5 (1953) 725.

60. B.D. Dinman. J. Am. Med. Assn., 235 (1976) 2874.
61. A.J. Steiner: "Method of Fire-Hazard Classification of Building Materials". ASTM Bulletin (1943) 19.
62. T. Jin: "Visibility through Fire Smoke". Report of Fire Research Institute of Japan, 33 (1971) 31; Op. cit., 42 (1976) 12.
63. V. Babrauskas, B.C. Levin y R.G. Gann: "A New Approach to Fire Toxicity Data for Hazard Evaluation". ASTM Stand. News, 14 (1986) 28.
64. E. Braun, B.C. Levin, M. Paabo, J. Gurman, T. Holt y J.S. Steel: "Fire Toxicity Scaling". NBSIR 87-3510 (1987).
65. G.E. Hartzell, D.N. Priest y W.G. Switzer: "Mathematical Modeling of Toxicological Effects of Fire Gases". Fire Safety Sci.- Proc. of the First Int. Symp., Hemisphere Publishing Corp. Washington, 1986, p. 1059. También en J. Fire Sci.; 3 (1985) 115.
66. R.W. Bukowski: "Quantitative Determination of Smoke Toxicity Hazard - A Practical Approach for Current Use". Fire Safety Sci. - Proc. of The 1st Int. Sym. (1985) pp. 1089.

APENDICE

En esta sección se han tabulado los resultados obtenidos al ejecutar el HAZARD I con el modelo de edificio propuesto en la sección 6.

Obsérvese que a la derecha de los parámetros hay cinco columnas de números. Cada una de ellas se corresponde en orden creciente con las cinco habitaciones.

Tiempo (s) = 0,0

Temperatura capa superior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Temperatura capa inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Volumen capa superior (m ³)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Espesor capa superior (m)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Temperatura techo (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Temperatura pared superior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Temperatura pared inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Temperatura suelo (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calor irradiado a capa superior (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calor irradiado a capa inferior (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calor convectivo a capa superior (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calor convectivo a capa inferior (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO (ppm)	:	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
OD (m ⁻¹)	:	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C-t (g-min/m ³)	:	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tiempo (s) = 100,0

Temperatura capa superior (K)	300,4	300,0	300,0	300,0	304,0
Temperatura capa inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Volumen capa superior (m ³)	5,4	0,0	0,0	0,0	13,5
Espesor capa superior (m)	0,8	0,0	0,0	0,0	1,7
Temperatura techo (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,1
Temperatura pared superior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,1
Temperatura pared inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Temperatura suelo (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	6,340E-02
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	4,167E-05
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,650E+00
Calor irradiado a capa superior (kW)	1,985E-04	3,142E-06	2,248E-06	7,310E-06	2,203E-03
Calor irradiado a capa inferior (kW)	6,772E-05	8,309E-07	6,887E-07	1,329E-06	1,605E-03
Calor convectivo a capa superior (kW)	6,296E-04	2,516E-06	1,600E-06	7,803E-06	1,553E-02
Calor convectivo a capa inferior (kW)	1,498E-09	0,0	1,374E-10	2,572E-09	-3,726E-06

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	0,105	3,695E-02	2,969E-02	5,336E-02	1,19
CO (ppm)	:	3,313E-02	1,161E-02	9,332E-03	1,677E-02	0,375
OD (m ⁻¹)	:	1,315E-04	4,614E-05	3,708E-05	6,664E-05	1,471E-03
C-t (g-min/m ³)	:	1,212E-02	8,104E-04	6,096E-04	1,384E-03	0,101

Tiempo (s) = 200,0

Temperatura capa superior (K)	303,2	300,2	300,1	300,4	311,2
Temperatura capa inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Volumen capa superior (m ³)	10,1	5,3	6,2	3,1	13,5
Espesor capa superior (m)	1,5	0,6	0,5	1,0	1,7
Temperatura techo (K)	300,1	300,0	300,0	300,0	300,7
Temperatura pared superior (K)	300,1	300,0	300,0	300,0	300,8
Temperatura pared inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,1
Temperatura suelo (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,1
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	7,284E-02
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	8,333E-05
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,300E+00
Calor irradiado a capa superior (kW)	1,700E-03	9,738E-05	7,280E-05	2,348E-04	5,643E-03
Calor irradiado a capa inferior (kW)	1,055E-03	3,722E-05	6,054E-05	6,899E-05	5,464E-03
Calor convectivo a capa superior (kW)	1,135E-02	2,564E-04	1,769E-04	7,787E-04	5,728E-02
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-2,054E-06	0,0	1,374E-10	1,374E-10	-5,276E-05

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	2,24	0,139	0,110	0,307	8,09
CO (ppm)	:	0,705	4,355E-02	3,444E-02	9,638E-02	2,54
OD (m ⁻¹)	:	2,773E-03	1,729E-04	1,368E-04	3,825E-04	9,735E-03
C-t (g-min/m ³)	:	0,154	1,414E-02	1,257E-02	2,046E-02	0,604

Tiempo (s) = 300,0

Temperatura capa superior (K)	315,8	302,5	302,5	303,1	337,3
Temperatura capa inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Volumen capa superior (m ³)	8,7	11,1	14,7	5,5	11,4
Espesor capa superior (m)	1,3	1,3	1,1	1,7	1,5
Temperatura techo (K)	300,6	300,0	300,0	300,1	302,4
Temperatura pared superior (K)	300,8	300,1	300,1	300,1	302,8
Temperatura pared inferior (K)	300,1	300,0	300,0	300,0	300,3
Temperatura suelo (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,2
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,048E-01
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	4,818E-04
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,908E+01
Calor irradiado a capa superior (kW)	8,511E-03	1,345E-03	1,334E-03	1,754E-03	2,085E-02
Calor irradiado a capa inferior (kW)	5,102E-03	7,408E-04	7,375E-04	9,574E-04	1,740E-02
Calor convectivo a capa superior (kW)	9,195E-02	8,244E-03	8,186E-03	1,117E-02	2,700E-01
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-2,780E-05	-1,042E-06	-7,469E-07	-1,665E-06	-2,316E-04

Concentración de especies en la capa superior

CO2 (ppm)	:	32,9	4,28	4,37	5,59	87,3
CO (ppm)	:	6,12	1,06	1,04	1,37	12,7
OD (m^{-1})	:	2,312E-02	4,170E-03	4,096E-03	5,374E-03	4,481E-02
C-t (g-min/ m^3)	:	0,782	0,120	9,691E-02	0,181	1,91

Tiempo (s) = 400,0

Temperatura capa superior (K)	354,7	317,0	314,5	324,1	457,9
Temperatura capa inferior (K)	300,0	300,0	300,0	300,0	300,1
Volumen capa superior (m^3)	10,8	17,5	25,6	6,5	12,2
Espesor capa superior (m)	1,6	2,0	1,9	2,0	1,6
Temperatura techo (K)	303,9	300,6	300,5	301,0	313,2
Temperatura pared superior (K)	304,5	300,8	300,7	301,2	315,6
Temperatura pared inferior (K)	300,4	300,1	300,1	300,1	301,6
Temperatura suelo (K)	300,2	300,1	300,0	300,1	300,9
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	4,436E-01
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,300E-03
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,307E+02
Calor irradiado a capa superior (kW)	3,421E-02	9,661E-03	7,968E-03	1,456E-02	1,641E-01
Calor irradiado a capa inferior (kW)	2,872E-02	9,535E-03	8,023E-03	1,190E-02	1,298E-01
Calor convectivo a capa superior (kW)	4,347E-01	1,017E-01	8,267E-02	1,599E-01	1,521E+00
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-3,059E-04	-4,559E-05	-3,862E-05	-6,490E-05	-1,792E-03

Concentración de especies en la capa superior

CO2 (ppm)	:	441,	126,	105,	194,	1,243E+03
CO (ppm)	:	33,6	10,7	9,13	15,8	94,3
OD (m^{-1})	:	7,550E-02	3,361E-02	2,938E-02	4,709E-02	0,145
C-t (g-min/ m^3)	:	3,02	0,895	0,808	1,25	6,04

Tiempo (s) = 500,0

Temperatura capa superior (K)	550,2	417,3	400,7	448,5	1040,0
Temperatura capa inferior (K)	300,1	300,2	300,2	300,3	301,4
Volumen capa superior (m^3)	12,7	19,6	30,6	6,9	15,7
Espesor capa superior (m)	1,9	2,2	2,3	2,1	2,0
Temperatura techo (K)	320,9	307,1	305,9	309,9	381,8
Temperatura pared superior (K)	325,3	308,9	307,3	312,4	412,7
Temperatura pared inferior (K)	303,5	301,4	301,2	301,6	335,9
Temperatura suelo (K)	301,8	300,7	300,6	300,8	316,9
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	9,086E-01
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,800E-02
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,109E+03
Calor irradiado a capa superior (kW)	4,173E-01	1,089E-01	8,534E-02	1,623E-01	6,131E+00
Calor irradiado a capa inferior (kW)	3,345E-01	1,333E-01	1,127E-01	1,528E-01	4,756E+00
Calor convectivo a capa superior (kW)	2,533E+00	1,116E+00	9,348E-01	1,454E+00	6,982E+00
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-5,029E-03	-8,895E-04	-7,041E-04	-1,147E-03	-9,063E-02

Concentración de especies en la capa superior

CO2 (ppm)	:	5,404E+03	2,555E+03	2,103E+03	3,544E+03	1,514E+04
CO (ppm)	:	245,	146,	123,	190,	601,
OD (m^{-1})	:	0,240	0,176	0,156	0,214	0,328
C-t (g-min/ m^3)	:	9,27	4,95	4,37	6,35	16,1

Tiempo (s) = 600,0

Temperatura capa superior (K)	1290,9	711,6	668,9	796,4	2062,6
Temperatura capa inferior (K)	308,6	305,0	304,4	307,0	443,7
Volumen capa superior (m^3)	10,1	14,7	23,3	5,2	12,5
Espesor capa superior (m)	1,5	1,7	1,7	1,6	1,6
Temperatura techo (K)	541,6	363,9	353,7	386,9	1167,6
Temperatura pared superior (K)	652,9	377,4	364,4	407,1	1652,3
Temperatura pared inferior (K)	447,1	318,9	315,9	323,3	1585,9
Temperatura suelo (K)	378,4	310,4	308,8	312,9	1033,2
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,135E+00
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,013E-01
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	4,013E+03
Calor irradiado a capa superior (kW)	1,244E+01	1,162E+00	8,861E-01	1,902E+00	4,313E+01
Calor irradiado a capa inferior (kW)	9,135E+00	9,543E-01	8,295E-01	1,114E+00	5,714E+01
Calor convectivo a capa superior (kW)	7,041E+00	3,741E+00	3,413E+00	4,337E+00	6,225E+00
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-6,679E-01	-2,327E-02	-1,720E-02	-2,574E-02	-7,766E+00

Concentración de especies en la capa superior

CO2 (ppm)	:	6,966E+04	5,546E+04	4,642E+04	6,602E+04	8,054E+04
CO (ppm)	:	1,668E+03	1,488E+03	1,277E+03	1,681E+03	1,865E+03
OD (m^{-1})	:	1,53	2,38	2,12	2,47	1,08
C-t (g-min/ m^3)	:	39,1	37,6	33,0	44,4	41,9

Tiempo (s) = 700,0

Temperatura capa superior (K)	1339,0	708,5	667,4	795,6	2124,3
Temperatura capa inferior (K)	330,1	316,6	313,7	323,2	520,9
Volumen capa superior (m^3)	9,1	13,5	21,3	4,8	11,8
Espesor capa superior (m)	1,4	1,5	1,6	1,5	1,5
Temperatura techo (K)	720,0	408,4	393,5	442,2	1505,7
Temperatura pared superior (K)	818,7	412,2	395,8	451,1	1877,6
Temperatura pared inferior (K)	594,7	331,4	327,2	337,4	1840,6
Temperatura suelo (K)	488,2	320,6	317,8	324,7	1376,6
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,126E+00
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	8,505E-02
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,368E+03
Calor irradiado a capa superior (kW)	1,063E+01	9,770E-01	7,379E-01	1,673E+00	2,983E+01
Calor irradiado a capa inferior (kW)	1,228E+01	1,009E+00	8,836E-01	1,187E+00	4,254E+01
Calor convectivo a capa superior (kW)	5,157E+00	3,035E+00	2,793E+00	3,497E+00	3,597E+00
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-1,844E+00	-1,493E-02	-1,563E-02	-4,101E-03	-1,113E+01

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	9,539E+04	8,467E+04	7,855E+04	9,144E+04	1,111E+05
CO (ppm)	:	1,781E+03	1,695E+03	1,624E+03	1,750E+03	2,043E+03
OD (m ⁻¹)	:	1,25	2,48	2,56	2,17	0,880
C-t (g-min/m ³)	:	72,5	100,	94,5	101,	65,0

Tiempo (s) = 800,0

Temperatura capa superior (K)	1376,9	726,4	685,5	815,4	2108,2
Temperatura capa inferior (K)	345,6	329,8	325,1	340,0	527,4
Volumen capa superior (m ³)	9,1	13,5	21,3	4,8	12,2
Espesor capa superior (m)	1,4	1,5	1,6	1,5	1,6
Temperatura techo (K)	850,6	442,8	424,1	486,3	1675,2
Temperatura pared superior (K)	939,1	440,8	420,9	489,2	1960,6
Temperatura pared inferior (K)	759,7	346,6	340,7	355,9	1936,8
Temperatura suelo (K)	614,2	332,6	328,3	339,0	1532,5
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,269E+00
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	7,613E-02
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,015E+03
Calor irradiado a capa superior (kW)	9,140E+00	9,612E-01	7,210E-01	1,672E+00	1,696E+01
Calor irradiado a capa inferior (kW)	1,467E+01	1,223E+00	1,085E+00	1,441E+00	2,993E+01
Calor convectivo a capa superior (kW)	3,995E+00	2,742E+00	2,556E+00	3,095E+00	2,196E+00
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-3,491E+00	-8,413E-03	-1,092E-02	1,517E-04	-1,338E+01

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	8,421E+04	9,567E+04	9,428E+04	9,217E+04	9,564E+04
CO (ppm)	:	1,533E+03	1,731E+03	1,731E+03	1,659E+03	1,745E+03
OD (m ⁻¹)	:	0,868	1,97	2,16	1,61	0,637
C-t (g-min/m ³)	:	98,9	154,	152,	148,	84,1

Tiempo (s) = 900,0

Temperatura capa superior (K)	1272,3	708,4	671,0	792,0	1767,9
Temperatura capa inferior (K)	351,9	342,2	336,3	354,5	500,5
Volumen capa superior (m ³)	9,0	13,3	21,0	4,7	12,2
Espesor capa superior (m)	1,4	1,5	1,6	1,4	1,6
Temperatura techo (K)	897,1	464,7	444,1	513,8	1582,7
Temperatura pared superior (K)	943,4	455,6	434,6	508,1	1696,6
Temperatura pared inferior (K)	811,3	360,2	353,0	371,6	1676,8
Temperatura suelo (K)	679,3	344,3	338,8	352,6	1422,0
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,341E+00
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	5,098E-02
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,019E+03
Calor irradiado a capa superior (kW)	4,868E+00	6,788E-01	5,074E-01	1,223E+00	2,330E+00
Calor irradiado a capa inferior (kW)	1,080E+01	1,253E+00	1,120E+00	1,452E+00	1,288E+01
Calor convectivo a capa superior (kW)	2,632E+00	2,255E+00	2,127E+00	2,492E+00	7,744E-01
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-4,419E+00	-5,676E-03	-7,806E-03	3,221E-04	-1,247E+01

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	4,407E+04	5,932E+04	6,481E+04	5,019E+04	4,692E+04
CO (ppm)	:	893,	1,141E+03	1,234E+03	994,	964,
OD (m ⁻¹)	:	0,502	1,21	1,42	0,913	0,385
C-t (g-min/m ³)	:	118,	195,	198,	182,	98,7

Tiempo (s) = 1000,0

Temperatura capa superior (K)	1052,3	639,5	608,9	699,3	1338,0
Temperatura capa inferior (K)	350,6	350,8	344,2	362,0	475,4
Volumen capa superior (m ³)	8,3	12,4	19,9	4,3	11,4
Espesor capa superior (m)	1,3	1,4	1,5	1,3	1,5
Temperatura techo (K)	862,9	470,6	450,2	518,5	1376,6
Temperatura pared superior (K)	856,9	453,1	433,5	500,7	1366,6
Temperatura pared inferior (K)	754,9	367,6	360,0	379,4	1354,1
Temperatura suelo (K)	663,5	352,6	346,5	361,8	1206,5
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,246E+00
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,583E-02
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,023E+03
Calor irradiado a capa superior (kW)	2,090E-01	1,621E-01	1,047E-01	3,150E-01	-5,674E+00
Calor irradiado a capa inferior (kW)	5,516E+00	9,852E-01	9,002E-01	1,097E+00	4,039E+00
Calor convectivo a capa superior (kW)	1,173E+00	1,459E+00	1,388E+00	1,498E+00	-7,096E-03
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-4,201E+00	-4,914E-03	-6,634E-03	1,438E-05	-9,793E+00

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	1,911E+04	3,113E+04	3,709E+04	2,410E+04	1,820E+04
CO (ppm)	:	453,	667,	768,	545,	450,
OD (m ⁻¹)	:	0,275	0,718	0,900	0,515	0,208
C-t (g-min/m ³)	:	132,	225,	232,	205,	110,

Tiempo (s) = 1100,0

Temperatura capa superior (K)	811,4	506,7	490,3	543,1	951,9
Temperatura capa inferior (K)	378,1	348,0	343,9	354,1	524,6
Volumen capa superior (m ³)	5,0	9,5	15,4	3,2	6,6
Espesor capa superior (m)	0,8	1,1	1,1	1,0	0,9
Temperatura techo (K)	768,6	455,5	437,8	496,6	1147,8
Temperatura pared superior (K)	715,0	428,9	413,4	466,3	1051,3
Temperatura pared inferior (K)	670,4	364,4	357,8	374,1	1129,3
Temperatura suelo (K)	611,2	353,9	348,1	362,3	1026,1
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	6,643E-01
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,923E-03
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,554E+02
Calor irradiado a capa superior (kW)	-2,584E+00	-3,512E-01	-2,995E-01	-4,512E-01	-7,334E+00
Calor irradiado a capa inferior (kW)	2,197E+00	5,267E-01	4,939E-01	5,649E-01	8,366E-02
Calor convectivo a capa superior (kW)	1,847E-01	3,361E-01	3,570E-01	2,803E-01	-7,136E-02
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-2,794E+00	-2,394E-02	-1,555E-02	-3,724E-02	-5,908E+00

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	3,111E+03	1,919E+04	2,548E+04	1,155E+04	2,319E+03
CO (ppm)	:	108,	445,	557,	302,	98,5
OD (m ⁻¹)	:	2,178E-02	0,541	0,755	0,281	1,423E-06
C-t (g-min/m ³)	:	139,	248,	260,	222,	116,

Tiempo (s) = 1200,0

Temperatura capa superior (K)	692,8	451,6	439,9	480,0	854,4
Temperatura capa inferior (K)	387,8	359,3	354,6	367,2	518,4
Volumen capa superior (m ³)	3,8	9,1	15,1	2,9	4,3
Espesor capa superior (m)	0,6	1,0	1,1	0,9	0,6
Temperatura techo (K)	689,6	434,6	419,8	469,2	1003,4
Temperatura pared superior (K)	629,5	406,8	394,5	436,8	900,4
Temperatura pared inferior (K)	609,3	360,3	354,5	368,7	988,8
Temperatura suelo (K)	565,0	352,3	347,0	359,9	902,6
Flujo másico desde el penacho (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tasa pirólisis combustible (kg/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calor emitido por el fuego (kW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calor irradiado a capa superior (kW)	-2,086E+00	-3,302E-01	-2,796E-01	-4,454E-01	-4,099E+00
Calor irradiado a capa inferior (kW)	1,148E+00	3,573E-01	3,439E-01	3,656E-01	3,296E-02
Calor convectivo a capa superior (kW)	4,938E-03	8,234E-02	1,048E-01	4,229E-02	-5,348E-02
Calor convectivo a capa inferior (kW)	-1,949E+00	1,705E-03	1,915E-03	1,787E-03	-4,290E+00

Concentración de especies en la capa superior

CO ₂ (ppm)	:	558,	1,528E+04	2,130E+04	7,603E+03	26,3
CO (ppm)	:	13,8	358,	469,	203,	1,12
OD (m ⁻¹)	:	1,053E-02	0,477	0,698	0,201	2,938E-13
C-t (g-min/m ³)	:	142,	269,	287,	236,	118,

