

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAMPO FLUIDO Y TÉRMICO GENERADO POR UN FUEGO EN UNA NAVE INDUSTRIAL

*Viguera Rodríguez, A.¹; Gutiérrez Montes, C.¹; Sánchez Kaiser, A.¹; Zamora Parra, B.¹;
Viedma Robles, A.¹; Lorenzo Sanz, M.²; Sánchez García, J.L.².*

¹ *Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena.
Doctor Fleming s/n, 30202. Cartagena. España.*

² *Departamento de Proyectos. Centro Tecnológico del Metal. Avda. del Descubrimiento P 15,
30820. Alcantarilla. España.*

RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo numérico con el objetivo de simular, en régimen estacionario, los flujos convectivos inducidos por un fuego en el seno de una nave industrial, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el código de volúmenes finitos FLUENT; se ha utilizado el modelo de turbulencia κ - ε estándar y el modelo de radiación de *Roseland*. Algunos de los resultados numéricos obtenidos con FLUENT se han comparado con los alcanzados mediante PHOENICS. El fuego se ha considerado como una fuente térmica situada en el centro del recinto.

La validación del modelo se ha llevado a cabo mediante ensayos experimentales desarrollados en la Nave del Fuego del Centro Tecnológico del Metal en Murcia. Los ensayos consistieron en producir la combustión libre de heptano en distintos hogares normalizados. En dichos ensayos se han realizado medidas de temperatura, presión y velocidad en diferentes puntos de la nave.

La estructura general del flujo, dada por la simulación numérica, consiste en un penacho simétrico, de aire ascendente por flotación, en el centro de la nave y un flujo de recirculación próximo a las paredes de la nave. Se ha observado, que dadas las altas temperaturas alcanzadas en el penacho, la transmisión de calor por radiación es importante.

La comparación con las medidas experimentales valida el modelo numérico establecido, observándose discrepancias inferiores a 5 °C, salvo en puntos cercanos a la llama, donde el error crece debido a que la fuente térmica equivalente produce una distribución de temperatura en esa zona diferente a la del fuego real.

1 INTRODUCCIÓN

El fuego puede considerarse como una forma no controlada de la combustión (Tieszen [1]). En su estudio, Cox [2] concluyó que el coste total originado por el fuego en las naciones desarrolladas había sido del 1% del producto interior bruto anual. Por tanto, el estudio del fuego se justifica en su mayor parte por asuntos de seguridad, resultando de gran interés los estudios sobre el fuego focalizados en las amenazas del fuego, sus efectos, su mitigación y su prevención.

El uso de modelos matemáticos para simular el fenómeno del fuego en compartimentos se remonta, tan sólo, unos 40 años atrás. Estos modelos han sido los precursores de los que hoy denominamos modelos de zona. La comparación sistemática de las predicciones de estos modelos con datos experimentales es un paso esencial para la aceptación general de las afirmaciones de los modelos y para la determinación de su campo de aplicación. El gran desarrollo, que se ha producido en la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) desde los años 70, ha posibilitado el estudio del comportamiento del fuego en edificios.

Un aspecto importante a considerar es el nivel del estudio. Como ha descrito Chow [3], [4], existen dos modos de aproximación al problema planteado: el estudio detallado de la combustión y el estudio de los efectos producidos por el fuego en distintos escenarios. Aunque puede llevarse a cabo un estudio combinado (Luo, He y Beck [5]), normalmente las dos posibilidades de estudio numérico suelen plantearse de modo separado. En el contexto del proyecto de investigación desarrollado, será este segundo enfoque el seguido, ya que nos interesa el estudio de los efectos del fuego en un determinado recinto. En este punto se encuentran en la bibliografía técnica sobre el tema que se han desarrollado distintos modos de aproximación al problema a partir de la década de los setenta. Luo y Beck [6] han apuntado los siguientes cuatro modelos básicos: modelización estadística, modelización basada en las escalas del flujo, modelización por zonas (Chow [7]) y modelización del campo completo. Este último modelo será el que se ha utilizado en el presente proyecto.

El modelo de campo de un edificio ‘Building Fire Field Model’ (Hasemi [8]; Chow [9]) es el más utilizado. En este modelo, el fuego se simula como una fuente de masa y calor que emite además partículas de humo. Los términos convectivos son más importantes de modo global que los efectos difusivos, de modo que el flujo inducido por convección arrastra a las partículas fluidas presentes en la habitación en torno al penacho originado por la fuente térmica que simula el fuego, dando lugar a recirculaciones de gran escala en torno al chorro caliente. Puede considerarse que el penacho tiene forma fundamentalmente axilsimétrica (Chow [10]). Los contornos de concentración se calculan a partir de los de la temperatura, si bien este modelo no estudia lo que ocurre realmente dentro de las llamas de combustión.

Si profundizamos en el ‘Building Fire Field Model’, pueden encontrarse en la bibliografía distintos modelos numéricos, basados normalmente en métodos de diferencias finitas y volúmenes finitos (Chow [9]); dentro de los últimos la utilización de algoritmos basados en el

‘Simple’ (Patankar [11]) ha dado buenos resultados. Chow y Yin [12] han comparado los resultados obtenidos utilizando diversos esquemas derivados del ‘upwind’ y el ‘power-law’. No obstante, se hace preciso comprobar la influencia de utilizar otro tipo de esquemas tales como los basados en la filosofía ‘muscl’.

En cuanto a la turbulencia, el modelo κ - ε de turbulencia (Jones y Launder [13]) ha sido ampliamente utilizado en muchos problemas de mecánica de fluidos. Como han apuntado Chow y Mok [14], los resultados alcanzados con el modelo κ - ε estándar son suficientemente buenos en gran número de casos. Aspectos como el mallado establecido, la densidad de la malla en la cercanía de las paredes, deben analizarse y estudiarse con detenimiento, debiendo ser cotejados con los resultados experimentales.

En muchas ocasiones, los efectos de radiación no han sido tenidos en cuenta en los modelos numéricos ‘Building Fire Field Model’. Diversos autores han profundizado en el tema (Luo [15], de forma experimental, y Keramida y otros [16], de forma numérica).

Todos estos trabajos previos encontrados en la literatura permiten afirmar la posibilidad de modelizar el flujo de aire inducido por el fuego y sus consecuencias térmicas en el recinto que lo contienen.

En este trabajo se busca determinar, mediante simulación numérica, los campos de temperatura y velocidad inducidos por un fuego situado en el centro de una nave industrial; para ello se ha trabajado desarrollando ensayos numéricos y experimentales con el objetivo de construir un modelo satisfactorio para este problema.

Con este fin, se dispuso un montaje experimental en la Nave del Fuego, tal y como se describe en el segundo apartado, en la cual se desarrollaron diversos ensayos. Una vez recogidos los datos experimentales, el siguiente paso fue la simulación numérica. A partir de las características de los ensayos y la nave, y en base a la bibliografía consultada, se desarrolló el modelo numérico detallado en el tercer apartado. Se efectuaron varias simulaciones a partir de este modelo, que posteriormente se han validado con los datos procedentes de la experimentación, como se comenta en el apartado cuarto.

2 DESCRIPCIÓN DE LA NAVE E INSTRUMENTACIÓN EXPERIMENTAL

Los ensayos realizados se han llevado a cabo en la Nave del Fuego del Centro Tecnológico del Metal. La nave es un prisma de base cuadrada de dimensiones $20 \times 20 \times 17.5 \text{ m}^3$ con un techo piramidal de altura 2.5 m. La nave dispone de cuatro extractores situados en el techo piramidal, unas rejillas de entrada de aire distribuidas de forma no simétrica en las paredes de la misma y un hogar situado en el centro de la base de la nave. En la figura 1 se muestra el esquema de la nave.

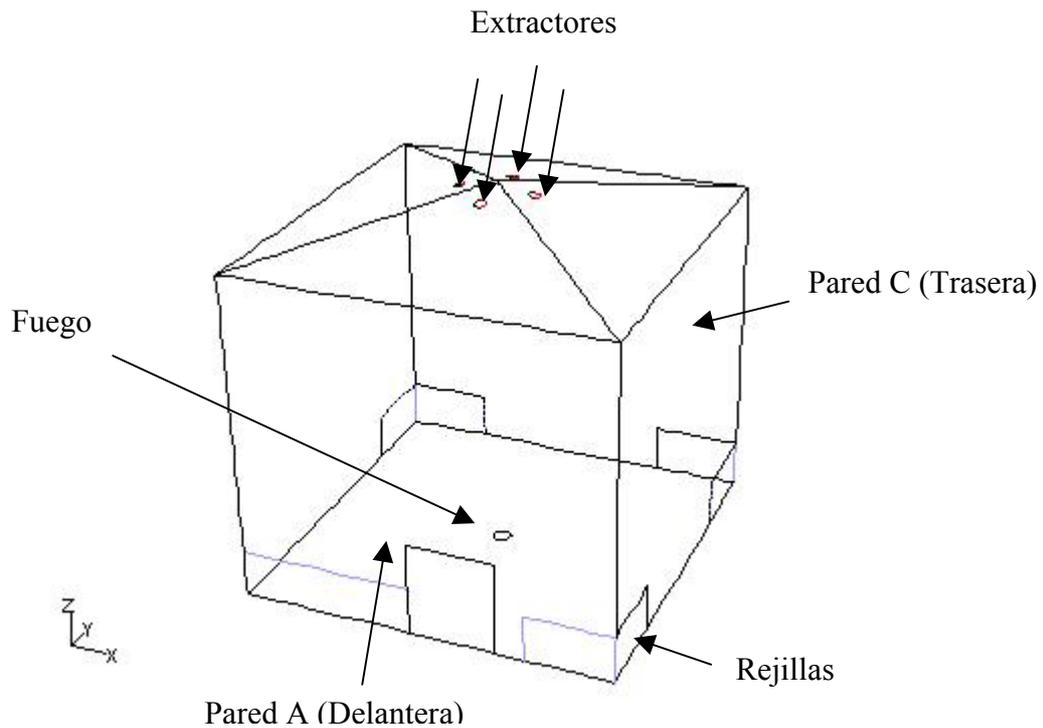


Fig.1. Esquema de la nave.

Con el fin de poder recoger datos experimentales de los ensayos realizados en esta nave se dispuso de una instrumentación con un total de 61 sensores (52 sensores de temperatura, 4 sensores de presión y 5 sensores de velocidad). Para la medida de la temperatura se usaron sondas Pt100 en el seno del fluido y termopares tipo K para las paredes de la nave; para la medida de la velocidad del flujo se usaron sondas de hilo caliente y para la medida de las presiones se usaron transductores tipo capacitivo. Así, el montaje de los sensores quedó de la siguiente manera:

Las paredes A y C tienen 4 sensores, situados a 5 y 15 metros de altura, cuya función es medir la temperatura de la chapa. En dichas paredes A y C también hay 8 y 9 sensores respectivamente dispuestos a 5, 10 y 15 m, que tienen por objeto la medición de la temperatura del aire cercano a las paredes.

La sección vertical central contiene una mayor cantidad de sensores de temperatura por fila con el fin de poder captar con mayor precisión las condiciones del flujo cercanas al penacho que se forma por flotación al producirse la combustión del heptano. Esta sección central consta también de tres filas de sensores de temperatura (a alturas de 5, 10 y 15 m) con 4 sensores en cada una; la disposición de estos no será uniforme, sino que los 3 primeros sensores están colocados a distancias de 4, 7 y 10 m respecto de la pared, para recoger información en el centro del penacho, y el cuarto a 5 m de la otra pared.

Además de estos sensores, también se han dispuesto sensores de temperatura y velocidad en el centro de las rejillas de entrada de aire de ventilación de las paredes anteriormente mencionadas. La primera pared consta de tres rejillas de entrada de aire (3 sensores de

temperatura y 3 de velocidad), y la segunda consta de dos rejillas de entrada (2 sensores de temperatura y 2 de velocidad).

Por último, se colocaron 4 sensores de temperatura en el techo de la nave cercanos a cada una de las esquinas de la nave y otros dos equidistantes del centro y la esquina, así como un sensor de presión absoluta, uno de presión diferencial y otro de temperatura en dos de los cuatro extractores.

3 MODELO NUMÉRICO

La simulación numérica se ha llevado a cabo principalmente mediante el empleo del código de volúmenes finitos FLUENT, empleándose también el código PHOENICS con el objeto de comparar resultados. Se ha empleado un esquema de discretización tipo ‘upwind’ para los términos convectivos de las ecuaciones. En el caso de PHOENICS se han obtenido resultados con un esquema alternativo, ‘muscl’, comprobando que las distribuciones de propiedades obtenidas no variaban de modo significativo respecto de las obtenidas con un esquema tipo ‘upwind’.

Se ha realizado un mallado 3D de la nave con una malla adaptada de 78054 celdas. Previo a esta elección de malla se realizaron varios ensayos para diferentes mallados y números de celdas buscando un equilibrio entre el coste computacional y la precisión requerida. En el caso de PHOENICS se ha empleado una malla de 64000 celdas.

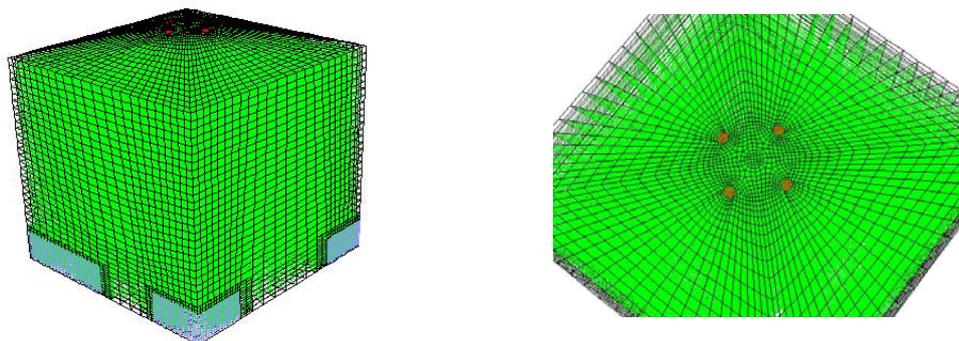


Fig.2. Mallado de la nave.

Siguiendo la línea de W.K. Chow y R. Yin [10] se ha tomado como modelo de turbulencia el modelo κ - ε estándar, aunque también se han llevado a cabo comparaciones mediante PHOENICS empleando el modelo de esfuerzos de Reynolds “RSM” obteniéndose una coincidencia satisfactoria entre los resultados de ambas simulaciones. Los resultados que se presentan en este trabajo están obtenidos con el modelo κ - ε .

El modelo de radiación utilizado es el modelo de Rosseland, ya que al ser las dimensiones de la nave considerables no se introduce un error excesivo. Este modelo, descrito por R. Siegel y J. R. Howell [17], consiste en introducir como variable una conductividad por radiación k_r que es añadida a la conductividad térmica en la ecuación de energía de la siguiente forma

$$q = -(k + k_r)\nabla T ; k_r = 16\sigma T^3 \quad (1)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann $5.672 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; Γ – es una variable que depende de las características ópticas del gas, m^2 ; T – temperatura del gas, K.

Además, se introduce la siguiente condición de contorno de flujo de calor por radiación en las paredes

$$q_{r,w} = -\frac{\sigma(T_w^4 - T_g^4)}{\psi} \quad (2)$$

donde T_w – es la temperatura de la pared, K; T_g – la temperatura del gas en la pared, K; ψ – coeficiente de deslizamiento, $1/\text{m}^2$.

En PHOENICS se ha empleado el modelo de radiación térmica “Composite radiosity model” que busca calcular la radiación por unidad de volumen (“radiosity” o radiosidad, W/m^3), cantidad que representa el promedio de los flujos de radiación entrantes y salientes en todas las direcciones de ángulo sólido. Este modelo, propuesto por Spalding [18], establece la siguiente ecuación para la radiosidad (R):

$$\frac{d}{dx_i} \left[4/3(a+s) \frac{dR}{dx_i} \right] + 4a(E-R) = 0 \quad (3)$$

donde R – radiosidad, W/m^3 ; E – Radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura del gas, W/m^3 ; a – coeficiente de absorción, $1/\text{m}$; s – coeficiente de reflectividad, $1/\text{m}$; x_i - dirección cualquiera.

Y la contribución de la radiación a la ecuación de la energía viene dada por la variable $Srad$,

$$Srad = 4a(R - E) \quad (4)$$

En lo que respecta a las condiciones de contorno, se ha intentado reproducir lo más fielmente posible las condiciones de contorno reales. Sin embargo, en la realidad las condiciones de contorno mostraban ciertas asimetrías que no han sido reflejadas en las condiciones de contorno del modelo numérico, provocando ciertas discrepancias entre los resultados numéricos y los datos experimentales.

En las paredes, el suelo y el techo se ha considerado una ley de pared logarítmica para la velocidad y la temperatura. Las paredes y el techo de la nave son de aluminio, al que se ha supuesto un coeficiente de convección al exterior de $h = 10 \text{ W/m}^2$, emisividad del aluminio de 0,3 y temperatura sol-aire exterior de 20°C . El suelo se considera adiabático.

Para el extractor se ha introducido una correlación entre el salto de presión y el caudal de humo hacia el exterior.

En las rejillas se ha empleado la ecuación de Bernoulli entre un punto de la rejilla y un punto de remanso donde la presión será la atmosférica, añadiéndose una pérdida localizada del 30% de la presión dinámica, tratando con esto de aproximar dicha caída de presión a la que producen las rejillas en el caso real.

El efecto del fuego se introduce mediante un foco térmico consistente en una superficie cilíndrica de aproximadamente 6 m^2 (0,9 m de diámetro y 2 m de altura) situada en el centro del suelo del edificio, en la cual se fija la temperatura de forma que la fuente de calor de dicha superficie sea de 1.588 MW.

Se han efectuado diversas simulaciones mediante PHOENICS y FLUENT con otros modelos de fuego, entre los que destaca una fuente volumétrica de calor con forma de prisma y una superficie cuadrada radiante en la base; este es el modelo con el que se ha efectuado la simulación en PHOENICS que posteriormente se muestra en el presente artículo.

El primer modelo descrito ha arrojado mejores resultados, siendo éste el utilizado en la simulación mediante FLUENT, aunque incrementa significativamente el coste computacional.

Pese a que el flujo está compuesto por aire y humo, para mayor simplicidad y por tanto mayor rapidez computacional, se ha considerado una única especie, utilizando la Ley ideal de los gases para la densidad y ley de Sutherland de tres coeficientes para la viscosidad; en cuanto a las propiedades relacionadas con la radiación se han supuesto coeficientes de absorción y reflectividad medios entre los valores del aire y el humo. El resto de propiedades se han supuesto constantes.

4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La validación del modelo se ha realizado comparando los resultados experimentales en los ensayos realizados en la nave del fuego, con los obtenidos a partir de la simulación numérica en condiciones similares.

El primer experimento numérico se desarrolló utilizando un hogar cilíndrico con 0.66 m^2 de base (hogar 21b normalizado) en el que se provocó la combustión de 44 litros de heptano consiguiéndose una potencia media estimada de 1.588 MW

En los extractores se observa una cierta homogeneidad en las temperaturas obtenidas numéricamente, al igual que ocurre en el caso experimental. Las diferencias de temperatura están comprendidas entre 4 y 5 °C, obteniéndose, por tanto, un buen ajuste del modelo en esta zona.

Por otra parte, las temperaturas de las paredes obtenidas mediante simulación presentan una variación máxima respecto a los valores experimentales medidos de aproximadamente 6°C, tal y como se muestra en la figura 3. Además, numéricamente se observa un ligero incremento de las temperaturas al desplazarnos al lado derecho de la pared, siendo este efecto más acusado en los resultados experimentales, seguramente debido al desplazamiento de la llama hacia un lado en el caso real.

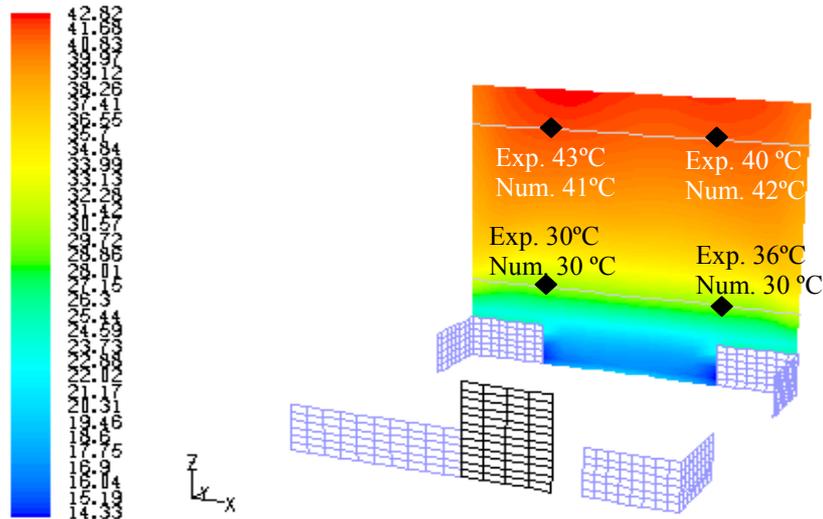


Figura 3. Comparación entre las temperaturas experimentales y numéricas en la pared C.

En la figura 4 se puede observar una estratificación de las temperaturas en las proximidades de las paredes, tanto en los valores experimentales como en los valores numéricos, siendo las temperaturas en estas zonas mayores que en las paredes. De la comparación de los valores experimentales y numéricos se puede concluir que existe un alto grado de coincidencia entre estos valores excepto para la altura de 9.25 m, donde se observan diferencias de hasta 10°C.

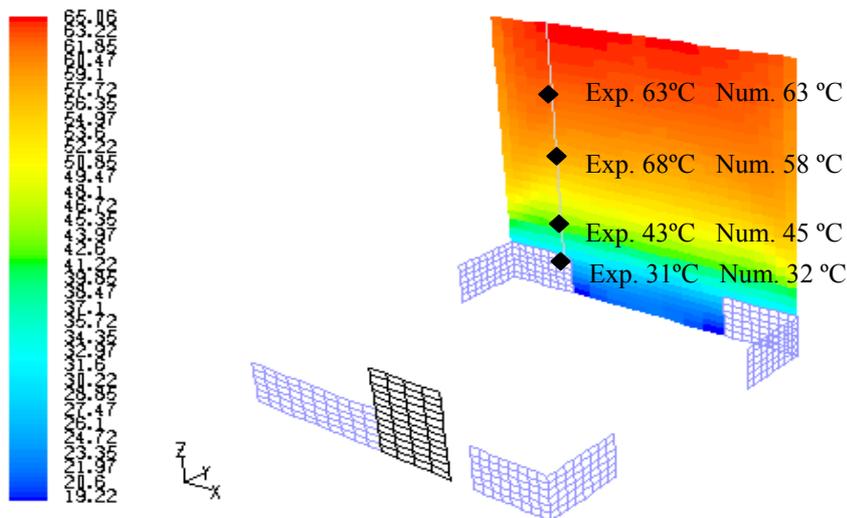


Figura 4. Comparación entre las temperaturas experimentales y numéricas del aire próximo a la pared C.

En la chapa del techo, pese a que los valores numéricos no resultan ser muy coincidentes con los experimentales, el valor máximo de las temperaturas alcanzadas en ambos casos oscila alrededor de los 60°C. Estas discrepancias obtenidas entre ambos resultados se deben al desplazamiento de la llama en el caso real, lo que ocasiona un penacho localizado sobre el techo en una posición distinta en ambos casos. Este desplazamiento de la llama puede ser debido a una asimetría en las condiciones de contorno reales.

El foco térmico produce un penacho simétrico que se ilustra en la figura 5, en dicho penacho se alcanzan temperaturas próximas a los 1000°C. Los resultados de temperaturas experimentales y numéricas sobre el penacho muestran variaciones próximas a los 5°C, excepto en los puntos más próximos a la llama donde se advierten grandes diferencias, del orden de los 30°C. Esta discrepancia podría ser debida a una temperatura de llama real superior, así como el hecho de que en el modelo numérico la llama se simula por una superficie cilíndrica de potencia calorífica equivalente donde las temperaturas son más homogéneas en contra posición al fuego real, donde la distribución de temperaturas en la llama o en la cercanía a la llama no es tan uniforme. Por tanto, se podría concluir que el modelo numérico se ajusta satisfactoriamente a la realidad salvo en las proximidades de la fuente térmica que simula el fuego, donde las distribuciones de temperatura son sustancialmente diferentes.

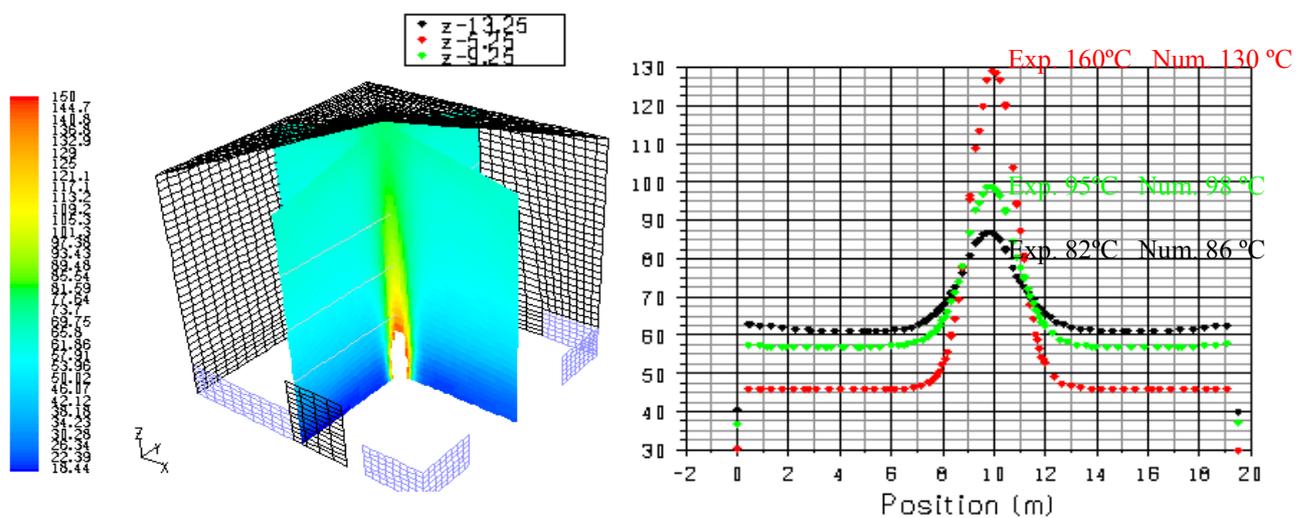


Figura 5. Distribución en los planos centrales y gráfica de la temperatura a tres alturas en uno de los planos.

Por otro lado, en la simulación realizada mediante PHOENICS se obtienen resultados cualitativamente similares, aunque según puede verse en la figura 6 la capa de aire caliente descendiendo excesivamente, alcanzándose a poca altura valores de temperatura más altos. La distribución de temperatura en la sección central dada por ese código se ilustra en la figura 7.

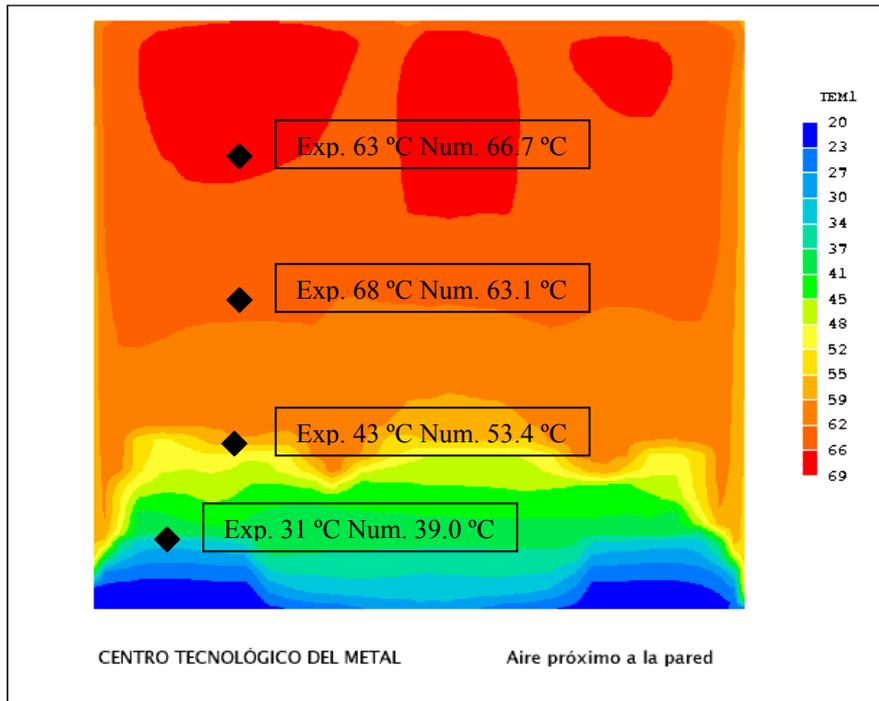


Figura 6. Distribución de la temperatura en el aire cercano a la pared C (PHOENICS).

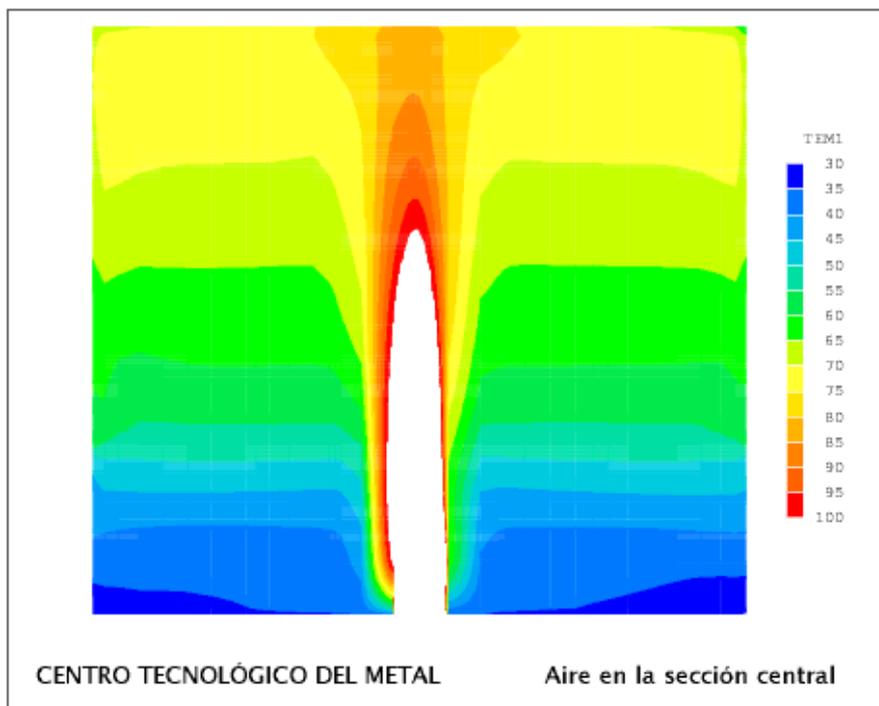


Figura 7. Distribución de la temperatura en la sección central (PHOENICS).

Las comparaciones anteriores muestran que cualitativamente ambas simulaciones reproducen el flujo adecuadamente, aunque la simulación mediante FLUENT se ajusta de forma más precisa a los datos experimentales.

A partir de la simulación con FLUENT los resultados numéricos del campo de velocidades muestran, como se puede apreciar en las figuras 8 y 9, un penacho simétrico situado en el centro de la nave sobre el foco térmico, donde la flotación produce velocidades en torno a los 10 m/s. En la figura 9, también se puede observar que existe cierta recirculación de aire cercano a las paredes; esta recirculación llega hasta la zona de las rejillas donde produce un flujo saliente en la parte superior de las mismas. Este flujo en las rejillas puede apreciarse en la figura 10.

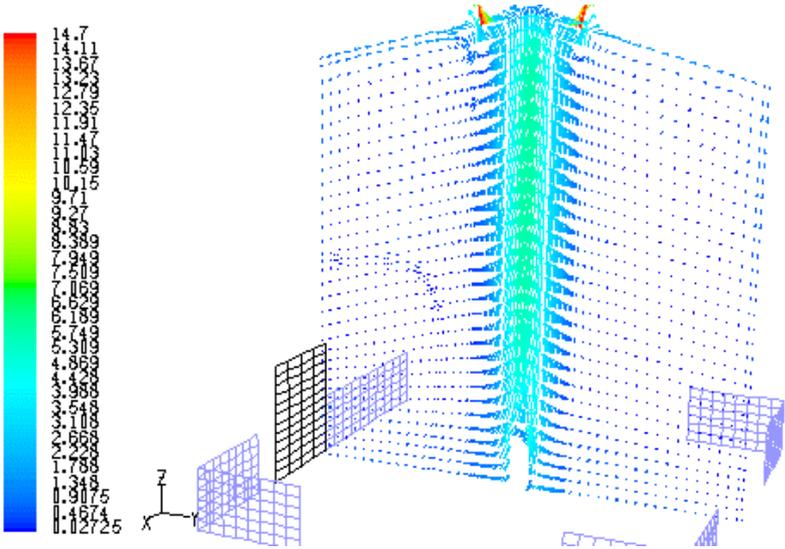


Fig.8 .Campo de velocidades en una sección central.

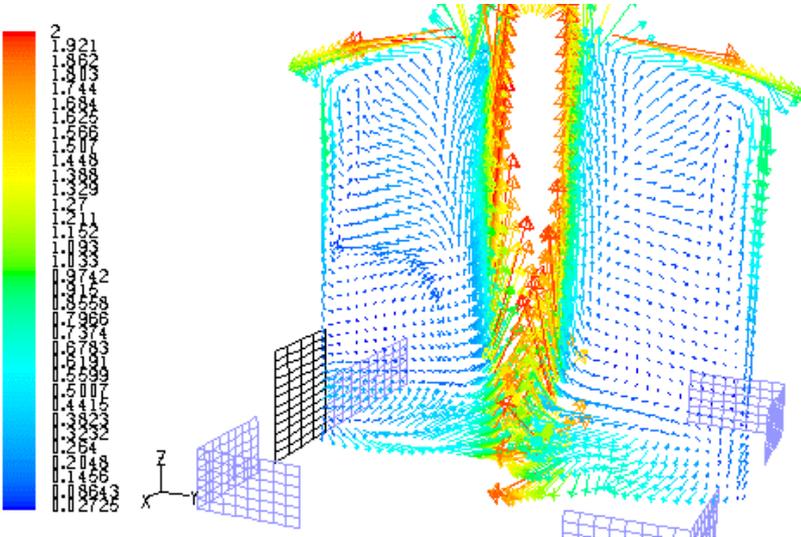


Fig.9 .Recirculación de aire cercano a las paredes.

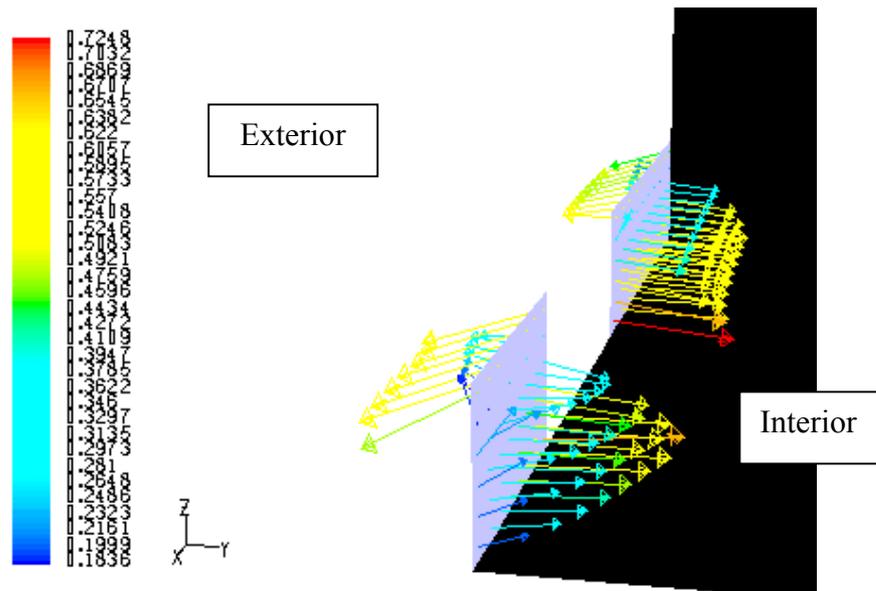


Fig.10 .Campo de velocidades en una rejilla.

El campo de presiones, que podemos observar en las figura 11 y 12, esta claramente estratificado desde valores algo inferiores a la presión atmosférica hasta valores en torno a 30-40 Pa en la parte superior; también resulta apreciable que el tiro inducido por el fuego hace que las características de los extractores resulten insuficientes y estos estén frenando el flujo. Esto es una posible causa de la recirculación del aire por las paredes, donde a la vez éste se enfría adquiriendo velocidades superiores que explican el fenómeno de cruce de flujos que se da en las rejillas. Cabe destacar que este es un fenómeno solo reproducido de manera parcial en PHOENICS, por lo que es preciso un estudio más detallado de la influencia de las condiciones de contorno en estas aberturas.

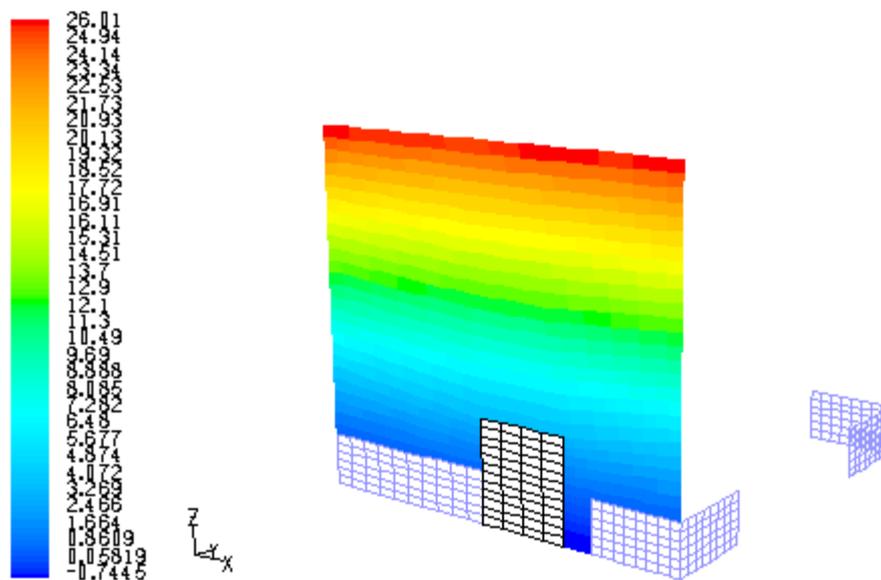


Figura 11. Distribución de presiones en la pared A.

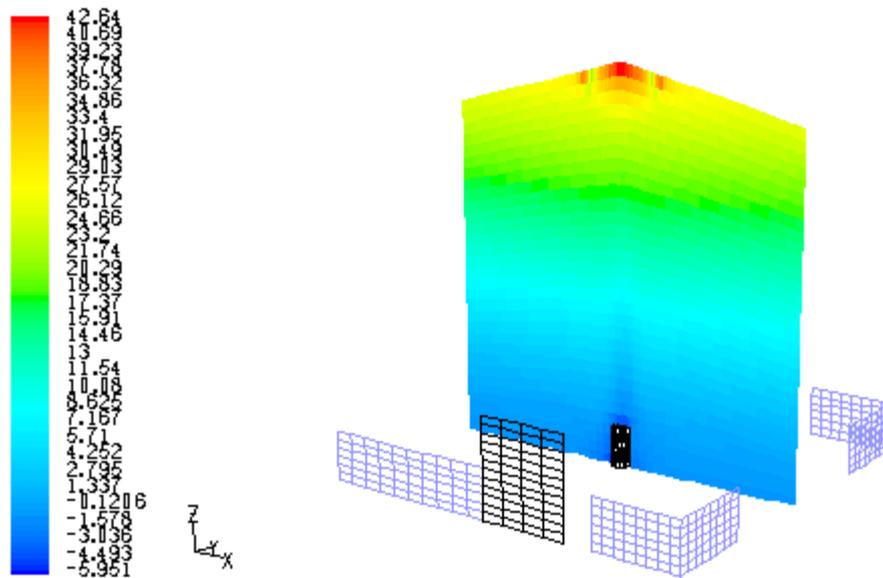


Figura 12. Distribución de presiones en la sección central.

5 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo numérico, implementado en los códigos FLUENT y PHOENICS, con el que se han obtenido resultados numéricos cuya comparación con los resultados experimentales ha sido satisfactoria. Como se ha comentado anteriormente, las discrepancias entre los campos de temperaturas medidos experimentalmente y los obtenidos numéricamente resultan ser en la mayoría de los puntos de control inferiores a los 5°C.

Según los resultados numéricos obtenidos, para el caso estudiado el tamaño de los ventiladores resulta ser insuficiente para la evacuación de los gases calientes generados por la llama, lo que genera una elevación general de la temperatura del aire en el interior del edificio, así como un flujo de aire descendente en las proximidades de las paredes que sale al exterior por la parte superior de las rejillas de entrada al edificio, favorecido por ser la temperatura del aire superior a la temperatura alcanzada en las paredes.

Experimentalmente se ha detectado una desviación del penacho de la llama ocasionando diferencias de temperaturas significativas sobre el techo. Numéricamente se apunta como causa la asimetría en las condiciones de las rejillas de entrada al edificio.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido realizada, en parte, usando los recursos disponibles en el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) de la Universidad Politécnica de Cartagena y con el apoyo informático de Luis Pedro García González.

REFERENCIAS

1. Tieszen, S.R., On the Fluid Mechanics of Fires, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **33**, 2001, pp. 67-92.
2. Cox G., Fire Research in the 21st Century, *Fire Safety Journal*, **32**, 1999a, pp. 19-203.
3. Chow, W.K., Use of Computational Fluid Dynamics for Simulating Enclosure Fires, *J. Fire Sciences*, **13**, 1995, pp. 300-334.
4. Chow, W.K., Application of Computational Fluid Dynamics in Building Services Engineering, *Building and Environment*, **31**, No. 5, 1996, pp. 425-436.
5. Luo, M.; He, Y., y Beck, V., Application of Field Model and Two-zone Model to Flashover Fires in a Full-scale Multi-room Single Level Building, *Fire Safety Journal*, **29**, 1997, pp. 1-25.
6. Luo, M., y Beck, V., The Fire Environment in a Multi-Room Building—Comparison of Predicted and Experimental Results, *Fire Safety Journal*, **23**, 1994, pp. 413-438.
7. Chow, W.K., Multi-Cell Concept for Simulating Fires in Big Enclosures Using a Zone Model, *J. Fire Sciences*, **14**, 1996, pp. 167-198.
8. Hasemi, Y., Numerical Calculations of the Natural Convection in Fire Compartment Research, Paper 69 Building Research Institute (Japan), 1977
9. Chow, W.K., Fire-induced Convective Flow Inside an Enclosure Before Flashover: Numerical Experiments, *Building Serv. Eng. Res. Technol.*, **10**, No. 2, 1989, pp. 51-59.
10. W.K. Chow and R. Yin, Discussion on Two Plume Formulae with Computational Fluid Dynamics, *Journal of Fire Sciences*, **20**, 2002, pp. 179-201.
11. Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Heat Flow, 1980, McGraw-Hill, New York.
12. Chow W.K. and R. Yin, Free Boundary Conditions for Simulating Air Movement in a Big Hall Inducted by a “Bare Cabin”, *Fire Journal of Sciences*, **17**, 1999, pp. 111-147.
13. Jones, W.P., y Launder. B.E., The Prediction of Laminarisation with a Two-equation Model of Turbulence, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **15**, 1972, pp. 301-314.
14. Chow W.K. and Mok W.K., CFD Fire Simulations with Four Turbulence Models and Their Combinations, *Journal of Fire Sciences*, **17**, 1999, pp. 209-239.
15. Luo, M., Effects of Radiation on Temperature Measurement in a Fire Environment, *J. Fire Sciences*, **15**, 1997, pp. 443-461.
16. Keramida E.P., Boudouvis A.G., Lois E., Markatos N.C. and Karayannis A.N., Evaluation of two Radiation Models in CFD Fire Modelling, *Numerical Heat Transfer, Part A*, **39**, 2001, pp. 711-722.
17. R. Siegel y J. R. Howel, Termal Radiation Heat Transfer, 1992, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C.
18. D.B.Spalding, Proposal for a diffusional radiation model, 1994, Unpublished technical memorandum, CHAM, London.