



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Autor: Íñigo Manrique Bautista
Director: Pablo Ayala Santamaría

Madrid
Agosto 2021

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

Simulación de incendios con modelos multicapa-zonal

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/21 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Íñigo Manrique Bautista

Fecha: 30/ 08/ 2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Pablo Ayala Santamaría

Fecha: 30/ 08/ 2021



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Autor: Íñigo Manrique Bautista
Director: Pablo Ayala Santamaría

Madrid
Agosto 2021

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Autor: Manrique Bautista, Íñigo

Director: Ayala Santamaría, Pablo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Los modelos CFD ofrecen una solución de alta precisión con un alto coste computacional para la simulación de incendios. En contraposición, los modelos multicapa-zonales realizan simulaciones de media precisión con un bajo coste computacional, haciendo más accesible esta tecnología mejorando el diseño de los sistemas de ventilación de incendios de infraestructuras. En este proyecto se realiza el desarrollo de un modelo multicapa-zonal, en MATLAB y su posterior validación con los resultados obtenidos por los experimentos realizados en el atrio de Murcia, España [1] y el modelo bizonal [2].

Los resultados obtenidos muestran una reducción significativa del coste computacional siendo la duración de las simulaciones menor que 30 segundos frente a las simulaciones CFD que son del orden de cuatro días. Se ha realizado la validación del modelo con tres experimentos a escala real, y el modelo predice la altura de la capa de humos con un rango de error relativo de 0-8% y predice con un error de 1-18°C la temperatura de la capa superior con respecto a los datos experimentales. Además, se ha mostrado la incertidumbre en la estimación de la altura de la capa de humos que conlleva el uso de este tipo de modelos mediante la implementación de las diferentes correlaciones empíricas dentro del modelo multicapa-zonal.

Palabras clave: modelo multicapa-zonal, simulación, fuego, MATLAB

1. Introducción

Actualmente existen una gran variedad de programas de simulación de incendios, entre ellos se encuentran los modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) como Fire Dynamics Simulator. Estos modelos CFD ofrecen una alta precisión, pero tienen una gran desventaja, su alto coste computacional y el tiempo necesario para realizar las simulaciones. Esta desventaja es una barrera para extender su uso y mejorar el diseño y la seguridad contra incendios de nuestras infraestructuras. Surge la necesidad de desarrollar modelos con un coste y tiempo computacional bajos que ofrezcan una precisión razonablemente buena con el fin de hacer más accesible estos programas de simulación.

Existen modelos que permiten solventar este problema. Muchos de estos programas se encuentran en fase de desarrollo o no existe suficiente documentación comparando los resultados obtenidos con experimentos realizados con un fuego real, es decir, no han sido validados. Uno de estos programas es el modelo multicapa-zonal. Este modelo ha sido validado en unos pocos estudios previos, con incendios en túneles [3] o en recintos de gran volumen [4].

2. Definición del Proyecto

Los recintos de gran volumen, tales como atrios, estaciones de metro o túneles, presentan una complejidad adicional en la simulación de incendios debido a que la capa de gases calientes no se puede considerar uniforme y al riesgo que llevan adheridos en lo que respecta a la evacuación de personas. Actualmente no existe una norma en cuanto a la utilización de este tipo de modelos en función de las dimensiones del espacio o de su uso. Aun así, la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha publicado unas pautas acerca de las dimensiones límites que pueden tener los espacios a simular por los métodos zonales [5]. Con el fin de ofrecer una solución a este problema, es necesario el desarrollo de otros modelos.

Los modelos bizonales no ofrecen suficiente detalle para grandes recintos y los modelos CFD requieren un gran coste y tiempo computacional para realizar las simulaciones. Surge la necesidad de encontrar una solución entre ambos métodos de simulación que resuelva la excesiva simplificación de los modelos bizonales y reduzca el coste y el tiempo computacional de los modelos CFD. De esta necesidad nace los modelos multicapa-zonales (Figura 1).

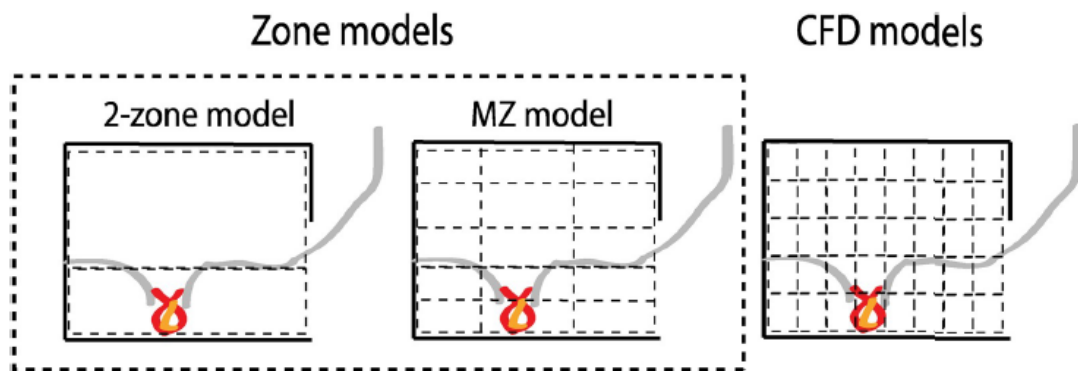


Figura 1. Comparativa entre los modelos zonales y CFD [4]

3. Modelo multicapa-zonal

Los modelos multicapa-zonales se basan en las leyes de la conservación de la masa de masa y energía para calcular las temperaturas de los gases calientes, y las ecuaciones de Bernoulli para calcular los flujos máscicos entre las diferentes zonas en las que está dividido el recinto [6].

En este trabajo se ha desarrollado un modelo para predecir el perfil de temperaturas de los gases en un recinto con un fuego axisimétrico. Al contrario de los modelos bizonales en el que el recinto queda dividido en dos zonas, el recinto de este modelo queda dividido en varias capas horizontales cuyas dimensiones son manualmente introducidas, haciendo el volumen de cada capa constante. Adicionalmente, las paredes del recinto también están divididas en concordancia con las capas horizontales. (Figura 2)

Las propiedades físicas de los gases se consideran uniformes en todos los puntos cada capa horizontal, siendo esta la característica principal del modelo multicapa-zonal y similares. Estas propiedades como la temperatura o densidad de los gases de cada capa son calculadas mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales de la conservación de la masa y energía en función del tiempo en cada una de las capas para cada instante de tiempo.

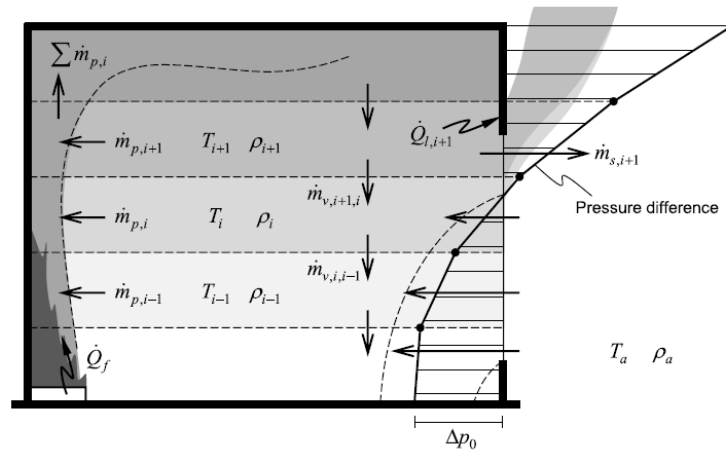


Figura 2. Esquema del modelo multicapa-zonal desarrollado[7]

4. Resultados

Con el fin de validar la capacidad de predicción del modelo desarrollado se han comparado los resultados obtenidos por el modelo multicapa-zonal desarrollado con el modelo bizonal [2] y los tres ensayos del caso de estudio [1], tabla 1.

Test	Tiempo de simulación (s)	Flujo de extracción (m ³ /s)	Temperatura ambiente (°C)	Presión (Pa)	HRR (MW)
#1	708	18.3	20.1	101,651	1.7
#2	647	18.3	18.0	101,617	2.3
#4	565	Nota 1	16.7	102,191	5.3

Tabla 1. Condiciones de los experimentos realizados [1]

Nota 1: (0 a 270 s) 18.3 m³/s; (270 a final) 27.5 m³/s

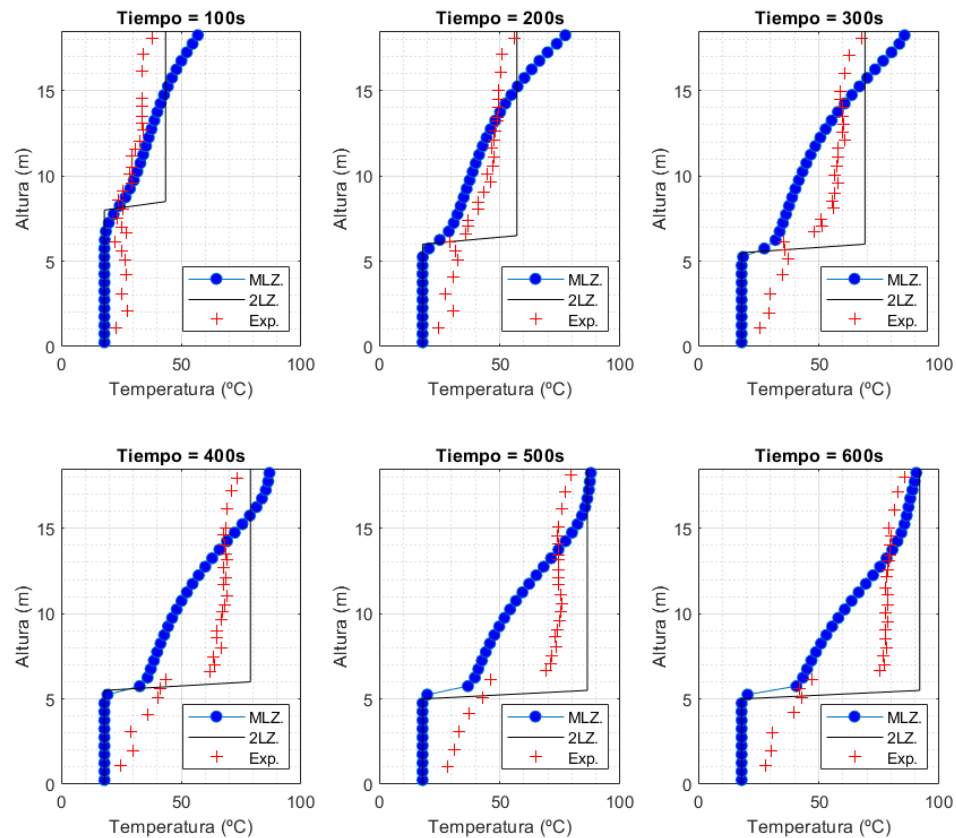


Figura 3. Test #1 Perfil de temperaturas cada 100 segundos

En la Figura 3, se puede identificar la altura de la capa de humo tanto del modelo como experimentalmente al observarse una región en la que aparece un cambio brusco de pendiente en el perfil de temperatura de la temperatura ambiental a la del humo. Este comportamiento se repite en los Test #2 y #3.

Hasta el segundo 300, se puede observar una correcta predicción de la temperatura debajo de la capa de humo. Sin embargo, a partir de los 300 segundos los datos experimentales muestran una variación de la temperatura en contraposición a la predicción del modelo multicapa-zonal y bizonal. Comportamiento también observado en los Test #2 y #3.

En la fase en régimen permanente el modelo predice correctamente la temperatura en las capas superiores con menos de 1°C de error. Siendo el error máximo de los demás ensayos de 18°C. Sin embargo, el resto de perfil de temperaturas tiene un error considerablemente mayor. La discrepancia tan elevada en las capas superiores se puede deber a que la tasa de liberación de calor del modelo multicapa-zonal es constante a lo largo de todo el ensayo, mientras que, en los experimentos, tarda más de 200 s en llegar a régimen permanente.

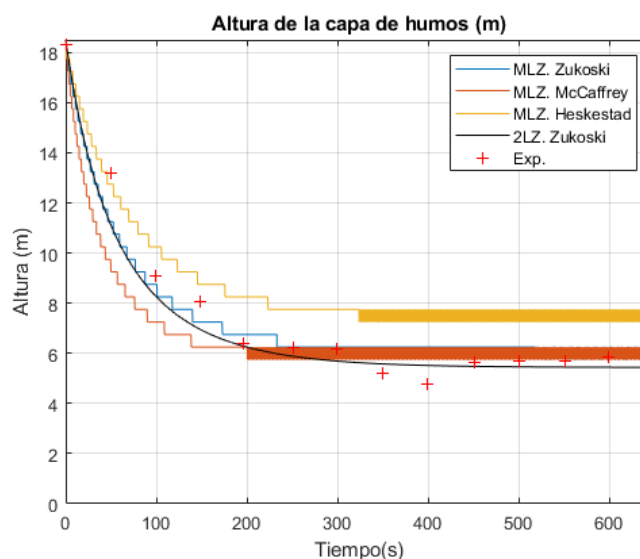


Figura 4. Altura de la capa de humo con diferentes modelos de producción de humo en el Test#2

Además, en la Figura 4 se puede observar la comparación en la estimación de la capa de humos de las diferentes correlaciones para el cálculo de la producción de humos. En la fase transitoria hasta 200 segundos se observa una diferencia entre los modelos de Zukoski[8] y McCaffrey[9]. Este último modelo tiene una menor precisión en la predicción con un error máximo de 2.75 metros, un 15% relativo. Con un rango de error relativo de 9.5-15%, en comparación con el 2-8% de error relativo del modelo de Zukoski. Siendo el error en la fase en régimen permanente igual, al tener el mismo valor. Por último, cabe destacar la correcta predicción de la capa de humos a partir de los 450 segundos de simulación de los modelos de Zukoski y McCaffrey.

Esta diferencia en la predicción de la capa de humos según la correlación utilizada hace que los resultados obtenidos con el uso de este tipo de modelos en el diseño de los sistemas de ventilación haya que analizarlos en detalle. Es muy importante, por tanto, especificar la correlación utilizada, e incluso poder ofrecer resultados con las diferentes correlaciones, mostrando el rango de soluciones con el rango de incertidumbre correspondiente.

5. Conclusiones

Analizando los resultados, se puede observar un rango de errores relativo de 0-8% en las tres simulaciones para la predicción de la altura de la capa de humos con el modelo de Zukoski. Por otro lado, el modelo predice con un error de entre 1-18°C la temperatura de la capa superior en régimen permanente. Sin embargo, se observa un desfase temporal de entre 400-700s del perfil de temperaturas obtenido del modelo con el experimental. En el análisis de la temperatura en las capas superiores, se observa una discrepancia sensible que puede ser debida a que la tasa de liberación de calor del modelo multicapa-zonal es constante a lo largo de todo el ensayo, mientras que, en los experimentos, tarda más de 200 s en llegar a régimen permanente.

Comparando los diferentes modelos de producción de humo se concluye que el modelo de Heskestad tiene una precisión inferior a los modelos desarrollados por Zukoski y McCaffrey. Por tanto, se debe especificar la correlación utilizada en este tipo de modelos ofreciendo siempre el grado de incertidumbre de su uso en el diseño de sistemas de ventilación de incendios.

Por último, cabe destacar que el tiempo computacional del modelo multicapa-zonal ha sido menor de 30 segundos observando un aumento del tiempo computacional con la disminución de la altura de las capas del recinto.

Finalmente, el modelo multicapa-zonal desarrollado ofrece una buena predicción de la altura de la capa de humos y una predicción razonable de la temperatura en las capas superiores, además de una reducción significativa del tiempo computacional frente a los modelos CFD. Sin embargo, las predicciones de temperatura en la mayor parte del recinto no son suficientemente precisas y es necesario continuar su desarrollo para mejorar su precisión y su capacidad de predicción.

6. Referencias

- [1] P. Ayala, A. Cantizano, G. Rein, G. Vigne, and C. Gutiérrez-Montes, “Fire Experiments and Simulations in a Full-scale Atrium Under Transient and Asymmetric Venting Conditions,” *Fire Technol.* 2015 521, vol. 52, no. 1, pp. 51–78, Jun. 2015, doi: 10.1007/S10694-015-0487-9.
- [2] T. Beji, S. Verstockt, R. Van de Walle, and B. Merci, “Prediction of smoke filling in large volumes by means of data assimilation–based numerical simulations:” <http://dx.doi.org/10.1177/0734904112437845>, vol. 30, no. 4, pp. 300–317, Mar. 2012, doi: 10.1177/0734904112437845.
- [3] K. Suzuki, T. Tanaka, and K. Harada, “Tunnel fire simulation model with multi-layer zone concept,” *Fire Saf. Sci.*, pp. 713–723, 2008, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-713.
- [4] N. Johansson, “Evaluation of a zone model for fire safety engineering in large spaces,” *Fire Saf. J.*, vol. 120, p. 103122, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103122.
- [5] “ISO - ISO/TS 13447:2013 - Fire safety engineering — Guidance for use of fire zone models,” 2013. <https://www.iso.org/standard/53799.html> (accessed Aug. 23, 2021).
- [6] K. Suzuki, T. Tanaka, K. Harada, and H. Yoshida, “7B-2 An application of A Multi-layer Zone Model to A Tunnel fire,” 2004. Accessed: Apr. 18, 2021. [Online]. Available: <http://www.iafss.org/publications/aofst/6/7b-2>.
- [7] T. Nishino and K. Kagiya, “A multi-layer zone model including flame spread over linings for simulation of room-corner fire behavior in timber-lined rooms,” *Fire Saf. J.*, vol. 110, p. 102906, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2019.102906.
- [8] K. Suzuki, T. Tanaka, and K. Harada, “Computation Of Smoke Spread In A Building Fire By Multi-Layer Zone Model,” 2007.
- [9] B. J. McCaffrey and D. C. Washington, “Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results,” 1979, doi: 10.6028/NBS.IR.79-1910.

FIRE SIMULATION WITH A MULTI-LAYER ZONE MODEL

Author: Manrique Bautista, Íñigo

Supervisor: Ayala Santamaría, Pablo.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

CFD models offer a high-precision solution with a high computational cost for fire simulation. In contrast, multi-layer zone models perform medium-precision simulations with a low computational cost, making this technology more accessible by improving the design of infrastructure fire ventilation systems. In this project, the development of a multi-layer zone model is carried out in MATLAB and its subsequent validation with the results obtained by the experiments carried out in the atrium of Murcia, Spain [1] and the two-layer zone model [2].

The results obtained show a significant reduction in the computational cost, with the duration of the simulations being less than 30 seconds compared to the CFD simulations that are of the order of four days. The validation of the model has been carried out with three full-scale experiments, and the model predicts the height of the smoke layer with a relative error range of 0-8% and predicts with an error of 1-18°C the temperature of the upper layer with respect to the experimental data. In addition, the uncertainty in the estimation of the height of the smoke layer that entails the use of this type of models has been shown through the implementation of the different empirical correlations within the multi-layer zone model.

Keywords: Multi-layer zone model, simulation, fire, MATLAB

1. Introduction

Currently there are a wide range of fire simulation programs, among them are CFD (Computational Fluid Dynamics) models such as Fire Dynamics Simulator. These CFD models offer high accuracy, but they have a major disadvantage, their high computational cost and the time needed to perform the simulations. This disadvantage is a barrier to extending its use and improving the design and fire safety of our infrastructures. There is a need to develop models with low computational cost and time that offer reasonably good accuracy to make these simulation programs more accessible.

There are models that allow solving this problem. Many of these programs are in the development phase or there is not enough documentation comparing the results obtained with experiments carried out with a real fire, that is, they have not been validated. One of these programs is the multi-layer zone model. This model has been validated in a few previous studies, with fires in tunnels [3] or in large volume enclosures [4].

2. State of the art

High-volume enclosures, such as atriums, subway stations or tunnels, present an additional complexity in fire simulation due to the lack of hot gas layer that cannot be considered uniform and the risk they carry attached in terms of the evacuation of people. Currently there is no standard regarding the use of this type of models depending on the dimensions of the space or its use. Even so, the International Organization for Standardization (ISO) has published guidelines on the boundary dimensions that can have the spaces to be simulated by zonal methods [5]. In order to offer a solution to this problem, it is necessary to develop other models.

Two-layer zone models do not offer enough detail for large enclosures and CFD models require a large cost and computational time to perform the simulations. There is a need to find a solution between both simulation methods that solves the oversimplification of two-layer zone models and reduces the cost and computational time of CFD models. From this need arises the multi-layer zone models (Figure 1).

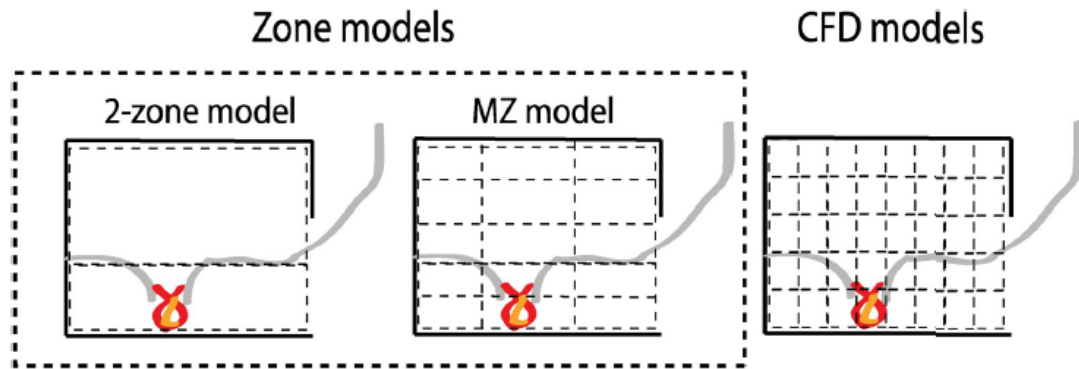


Figure 1. Comparison between zonal and CFD models[4]

3. Multi-layer zone model

Multi-layer zone models are based on the laws of conservation of mass and energy to calculate the temperatures of hot gases, and Bernoulli's equations to calculate mass flows between the different zones into which the enclosure is divided [6]

In this work, a model has been developed to predict the temperature profile of gases in an enclosure with an axisymmetric fire. Unlike the two-layer zone models in which the enclosure is divided into two zones, the enclosure of this model is divided into several horizontal layers whose dimensions are manually entered, making the volume of each layer constant. Additionally, the walls of the enclosure are also divided according to the horizontal layers. (Figure 2)

The physical properties of gases are considered uniform at all points each horizontal layer, this being the main feature of the multi-layer zone model and the like. These properties such as the temperature or density of the gases of each layer are calculated by solving the fundamental equations of the conservation of mass and energy as a function of time in each of the layers for each instant of time.

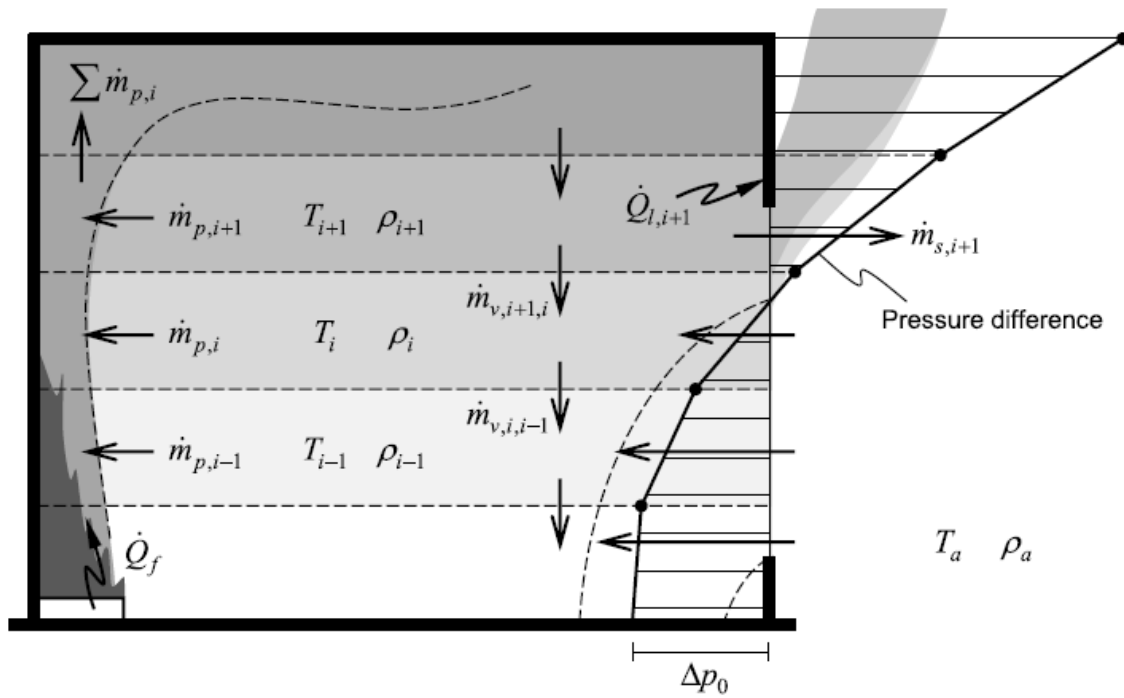


Figure 2. Diagram of the multi-layer zone model developed[7]

4. Results

In order to validate the predictive capacity of the developed model, the results obtained by the multi-layer zone model developed with the two-layer zone model [2] and the three experiments of the case study [1], table 1.

Test	Simulation time(s)	Extraction flow (m ³ /s)	Room temperature (°C)	Pressure (Pa)	HRR (MW)
#1	708	18.3	20.1	101,651	1.7
#2	647	18.3	18.0	101,617	2.3
#4	565	Note 1	16.7	102,191	5.3

Table 1. Conditions of the experiments carried out [1]

Note 1: (0 to 270 s) 18.3 m³/s; (270 a final) 27.5 m³/s

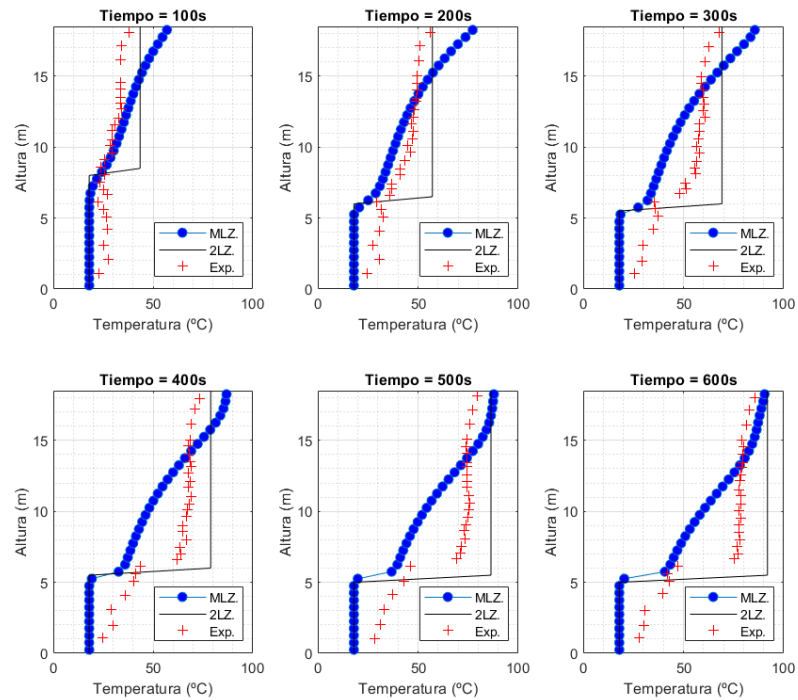


Figure 3. Test #1 Temperature profile every 100 seconds

In Figure 3 the height of the smoke layer can be identified both from the model and experimentally by observing a region in which a sharp change of slope appears in the temperature profile from ambient to smoke temperature. This behavior is repeated in #2 and #3 Tests.

Until the second 300, a correct prediction of the temperature under the smoke layer can be observed. However, after 300 seconds the experimental data show a variation in temperature as opposed to the prediction of the multi-layer zone and two-layer zone model. Behavior also observed in the #2 and #3 Tests.

In the permanent regime phase, the model correctly predicts the temperature in the upper layers with less than 1°C of error. Being the maximum error of the other Test 18°C. However, the rest of the temperature profile has a considerably larger error. The high discrepancy in the upper layers may be due to the heat release rate of the multi-layer zone model is constant throughout the test, while in experiments, it takes more than 200 s to reach permanent regime.

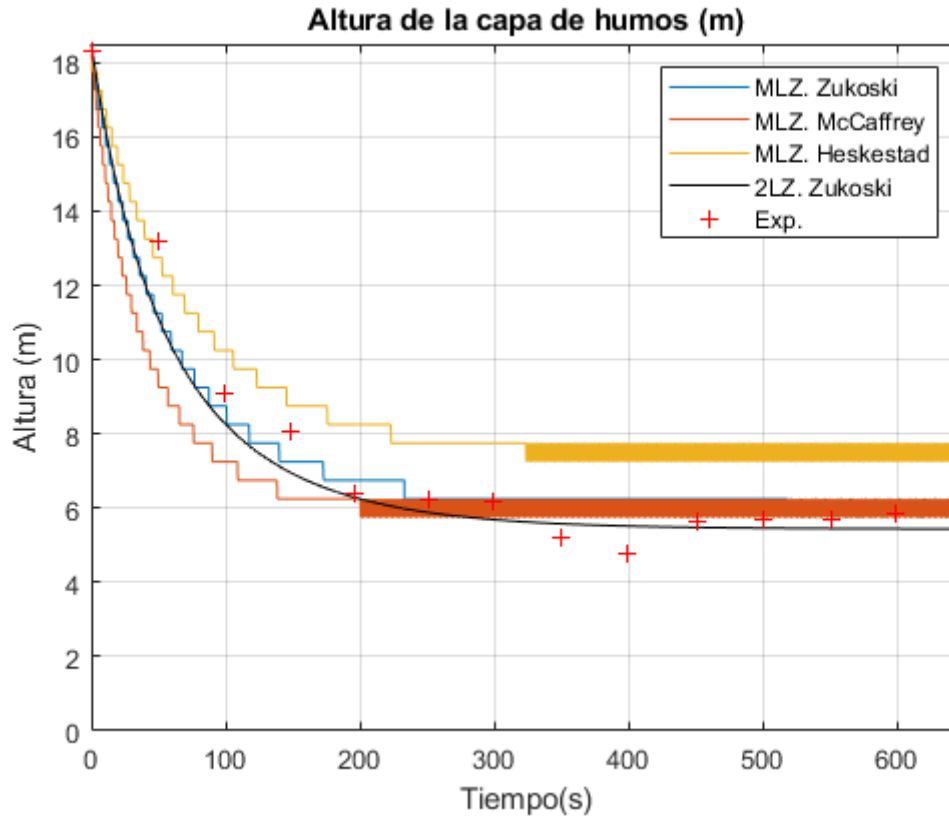


Figure 4. Height of the smoke layer with different smoke production models in Test#2

In addition, in Figure 4 you can see the comparison in the estimation of the smoke layer of the different correlations for the calculation of smoke production. In the transient phase up to 200 seconds a difference is observed between the models of Zukoski[8] and McCaffrey[9]. This last model has a lower accuracy in prediction with a maximum error of 2.75 meters, 15% relative. With a relative error range of 9.5-15%, compared to the 2-8% relative error of Zukoski's model. Being the error in the phase in permanent regime equal, having the same value. Finally, it is worth mentioning the correct prediction of the smoke layer from the 450 seconds of simulation of the Zukoski and McCaffrey models.

This difference in the prediction of the smoke layer according to the correlation used means that the results obtained with the use of this type of models in the design of ventilation systems must be analyzed in detail. It is very important, therefore, to specify the correlation used, and even to be able to offer results with the different correlations, showing the range of solutions with the corresponding uncertainty range.

5. Conclusions

Analyzing the results, a relative error range of 0-8% can be observed in the three simulations for predicting the height of the smoke layer with Zukoski's model. On the other hand, the model predicts with an error of between 1-18°C the temperature of the upper layer in permanent regime. However, a time lag of between 400-700s of the temperature profile obtained from the model with the experimental one is observed. In the analysis of the temperature in the upper layers, a sensitive discrepancy is observed that may be due to the heat release rate of the multi-layer zone model is constant throughout the test, while, in the experiments, it takes more than 200 s to reach permanent regime.

Comparing the different smoke production models, it is concluded that the Heskestad model has a lower accuracy than the models developed by Zukoski and McCaffrey. Therefore, the correlation used in this type of model must be specified, always offering the degree of uncertainty of its use in the design of fire ventilation systems.

Finally, it should be noted that the computational time of the multi-layer zone model has been less than 30 seconds observing an increase in computational time with the decrease in the height of the layers of the enclosure.

Finally, the multi-layer zone model developed offers a good prediction of the height of the smoke layer and a reasonable prediction of the temperature in the upper layers, in addition to a significant reduction in computational time compared to CFD models. However, temperature predictions in most of the enclosure are not sufficiently accurate and it is necessary to continue their development to improve their accuracy and predictability.

6. References

- [1] P. Ayala, A. Cantizano, G. Rein, G. Vigne, and C. Gutiérrez-Montes, “Fire Experiments and Simulations in a Full-scale Atrium Under Transient and Asymmetric Venting Conditions,” *Fire Technol.* 2015 521, vol. 52, no. 1, pp. 51–78, Jun. 2015, doi: 10.1007/S10694-015-0487-9.
- [2] T. Beji, S. Verstockt, R. Van de Walle, and B. Merci, “Prediction of smoke filling in large volumes by means of data assimilation–based numerical simulations:” <http://dx.doi.org/10.1177/0734904112437845>, vol. 30, no. 4, pp. 300–317, Mar. 2012, doi: 10.1177/0734904112437845.
- [3] K. Suzuki, T. Tanaka, and K. Harada, “Tunnel fire simulation model with multi-layer zone concept,” *Fire Saf. Sci.*, pp. 713–723, 2008, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-713.
- [4] N. Johansson, “Evaluation of a zone model for fire safety engineering in large spaces,” *Fire Saf. J.*, vol. 120, p. 103122, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103122.
- [5] “ISO - ISO/TS 13447:2013 - Fire safety engineering — Guidance for use of fire zone models,” 2013. <https://www.iso.org/standard/53799.html> (accessed Aug. 23, 2021).
- [6] K. Suzuki, T. Tanaka, K. Harada, and H. Yoshida, “7B-2 An application of A Multi-layer Zone Model to A Tunnel fire,” 2004. Accessed: Apr. 18, 2021. [Online]. Available: <http://www.iafss.org/publications/aofst/6/7b-2>.
- [7] T. Nishino and K. Kagiya, “A multi-layer zone model including flame spread over linings for simulation of room-corner fire behavior in timber-lined rooms,” *Fire Saf. J.*, vol. 110, p. 102906, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2019.102906.
- [8] K. Suzuki, T. Tanaka, and K. Harada, “Computation Of Smoke Spread In A Building Fire By Multi-Layer Zone Model,” 2007.

- [9] B. J. Mccaffrey and D. C. Washington, "Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results," 1979, doi: 10.6028/NBS.IR.79-1910.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi agradecimiento a mi director de proyecto, Pablo Ayala Santamaría por la ayuda y el apoyo aportados a lo largo del desarrollo del proyecto pese a las circunstancias en las que me encontraba en su duración

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
Capítulo 2. Estado del arte	9
Capítulo 3. Modelo Multicapa-zonal	16
3.1 Modelo zonal.....	16
3.2 Modelo Multicapa-zonal	17
Formulación del Modelo.....	20
3.3 Implementación del modelo en Matlab.....	27
Estructura.....	30
Capítulo 4. Análisis de Resultados.....	31
4.1 Caso de Estudio.....	31
4.2 Comparativa entre el modelo multicapa-zonal, el modelo bizonal y el caso experimental.	32
Capítulo 5. Objetivos Desarrollo Sostenible	48
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	50
Capítulo 7. Bibliografía.....	52
ANEXO I 55	
Código Modelo Multicapa-zonal para atrios.....	55
Código Modelo Multicapa-zonal para tuneles.....	62

Índice de figuras

Figura 1. Comparativa entre los modelos zonales y CFD [4]	7
Figura 2. Utilización del concepto “compartment fire”[4].....	10
Figura 3. Principios del concepto multicapa-zonal [4].....	11
Figura 4. Esquema del concepto multicapa-zonal desarrollado por Suzuki et al.[11]	12
Figura 5. Esquema de la transferencia de calor de una capa [11]	12
Figura 6. Esquema del modelo multicapa-zonal desarrollado por Suzuki et al.[8].....	13
Figura 7. Resultados del modelo multicapa-zonal desarrollado por Suzuki et al. [3]	14
Figura 8. Esquema del modelo zonal [20].....	17
Figura 9. Esquema del modelo multicapa-zonal desarrollado[7]	18
Figura 10. Esquema de la transferencia de calor de una capa [11]	19
Figura 11. Diagrama de flujo del modelo multicapa-zonal completo (Izq.) y el desarrollado (Der.).....	30
Figura 12. Atrio y el esquema con sus dimensiones principales [1]	31
Figura 13. Test #1 Altura de la capa de humos en metros.....	33
Figura 14. Test #1 Perfil de temperaturas cada 100 segundos	34
Figura 15. Test #1 Temperaturas a 15 metros de altura	36
Figura 16. Test #2 Altura de la capa de humos en metros.....	37
Figura 17. Test #2 Perfil de temperaturas cada 100 segundos	38
Figura 18. Test #2 Temperaturas a 15 metros de altura	39
Figura 19. Test #3 Altura de la capa de humos en metros.....	40
Figura 20. Test #3 Perfil de temperaturas cada 100 segundos	41
Figura 21. Test #1 Perfil de temperaturas en tres instantes de tiempo	42
Figura 22. Test #2 Perfil de temperaturas en tres instantes de tiempo	43
Figura 23. Test #3 Perfil de temperaturas en tres instantes de tiempo	44
Figura 24. Altura de la capa de humo con diferentes modelos de producción de humo en el Test#1	45
Figura 25. Altura de la capa de humo con diferentes modelos de producción de humo en el Test#2	46

Índice de tablas

Tabla 1. Condiciones de los experimentos realizados [1]	32
---	----

Nomenclatura

Abreviaturas

A_f	Área del suelo (m^2)
$A_{w,i}$	Área de la superficie interna de las paredes de la capa i (m^2)
B	Anchura de la abertura (m)
c_c	Calor específico del techo (kJ/kg)
c_p	Calor específico del gas a presión constante (kJ/kg)
c_w	Calor específico de las paredes (kJ/kg)
C	Coefficiente de producción de humo
D	Diámetro de la fuente del fuego (m)
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
H_0	Altura del atrio (m)
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección del techo (kW/m^2K)
h_f	Coefficiente de transferencia de calor por convección del suelo (kW/m^2K)
$h_{w,i}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección de las paredes (kW/m^2K)
k_c	Conductividad térmica del techo (kW/mK)
k_w	Conductividad térmica de las paredes (kW/mK)
L_{ft}	Altura de la llama (m)
L_v	Calor latente de vaporización del agua (kJ/kg)
l_w	Espesor de las paredes (m)
$\dot{m}_a$	Flujo másico desde el ambiente hacia el recinto a través de la abertura (kg/s)
$\dot{m}_e$	Flujo másico de extracción forzada (kg/s)
$\dot{m}_{p,i}$	Masa de aire arrastrada desde la capa i hacia la columna de fuego por unidad de tiempo (kg/s)
$\dot{m}_{s,i}$	Flujo másico desde la capa i hacia el ambiente a través de la abertura (kg/s)
$\dot{m}_v$	Tasa de vaporización de agua por unidad de volumen (kg / sm^3)
$\dot{m}_{v,i+1,i}$	Flujo másico desde la capa $i+1$ hacia la capa i a través de la superficie de contacto entre ellas fuera de la columna de fuego (kg/s)
Δp_i	Presión en el centro de la capa i (Pa)
Δp_0	Presión en el suelo del recinto (Pa)
$\dot{Q}_c$	Tasa de liberación de calor por combustión convectiva (kW)
$\dot{Q}_f$	Tasa de liberación de calor por combustión (kW)
$\dot{Q}_{l,i}$	Pérdidas de calor desde la capa i hacia las paredes, suelo y techo (kW)
$\dot{Q}_{r,i+1,i}$	Flujo calorífico transferido por radiación desde la capa $i+1$ hacia la capa i a través de la superficie de contacto entre ellas por unidad de tiempo (kW)
$\dot{Q}_{v,i+1,i}$	Flujo calorífico del gas transportado desde la capa $i+1$ hacia la capa i a través de la superficie de contacto entre ellas fuera de la columna de fuego (kW)
t	tiempo (s)
T_a	Temperatura del aire ambiente (K)
$T_{c,s}$	Temperatura de la superficie del techo (K)
$T_{f,s}$	Temperatura de la superficie del suelo (K)
T_i	Temperatura del gas en la capa i (K)
$T_{w,s,i}$	Temperatura de la superficie de las paredes de la capa i (K)
U_i	Velocidad de ventilación en la capa i (m/s)

V_i	Volumen de la capa i (m^3)
$\dot{V}_e$	Volumen de extracción forzada (m^3/s)
V_h	Volumen del humo en el recinto (m^3)
w^*	Velocidad del combustible (m/s)
x	Distancia desde la superficie (m)
$z_{i,l}$	Altura de la superficie inferior de la capa i desde el suelo (m)
$z_{i,u}$	Altura de la superficie superior de la capa i desde el suelo (m)

Coefficientes

α	Coefficiente de flujo
ε_c	Emisividad del techo
ε_f	Emisividad del suelo
ε_w	Emisividad de las paredes
ρ_a	Densidad del aire ambiente (kg/m^3)
ρ_c	Densidad del techo (kg/m^3)
ρ_i	Densidad del gas en la capa i (kg/m^3)
ρ_w	Densidad de las paredes (kg/m^3)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (kW/m^2K^4)
χ_c	Porcentaje de calor transferido por convección de la tasa de liberación de calor por la combustión

Índices

a	Aire ambiente
c	Techo
f	Suelo
i	Capa
p	Humo
w	Pared

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos computacionales de simulación de incendios están desempeñando un papel importante en el diseño de los sistemas de protección y control de incendios en los últimos años. Actualmente los modelos computacionales más utilizados son principalmente los modelos zonales y los modelos CFD.

Los modelos zonales se han utilizado de manera exitosa en un gran abanico de aplicaciones dado su bajo coste computacional (segundos). Estos modelos se caracterizan por compartimentar el espacio en una, dos o tres capas en las que las propiedades físicas del gas, tales como la temperatura o la densidad, se mantienen uniformes. En los modelos bizonales, la altura de la superficie entre las capas varía con la entrada de masas en forma de llamas y la transferencia de calor. Por ejemplo, el modelo FASIT [10], que es un modelo con 3 zonas utilizado para predecir el movimiento del humo en túneles, puede calcular las condiciones del gas en cada capa incluyendo las superficies entre ellas. Además, con estos modelos se puede predecir perfiles verticales de temperatura con un bajo tiempo computacional. El gran inconveniente que tienen es su incapacidad de predecir un perfil de vertical gradual con bajos saltos en altura.

Los modelos CFD orientados a incendios permiten calcular el campo de temperaturas y velocidades, además de predecir el movimiento del humo en el lugar de interés. El modelo está basado en ecuaciones dimensionales dependientes del tiempo basadas en las leyes de la dinámica de fluidos, se resuelven numéricamente con el conjunto de condiciones de contorno específicas del problema.

Una gran ventaja de los modelos CFD es su alta capacidad y precisión para predecir distribuciones de temperatura y velocidad en el entorno de interés, mientras que los modelos zonales solo obtienen temperaturas medias en una, dos o tres zonas basadas en ecuaciones empíricas. Sin embargo, la resolución de los modelos CFD requiere de una gran capacidad

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

y tiempo computacional que no siempre es fácilmente accesible o asumible, dado que puede extenderse a días o semanas para calcular tiempos de simulación del orden de minutos.

En los experimentos reales de incendios, a pesar de poder observarse la capa de humo diferenciada, la zona divisoria entre estas capas no está completamente definida dado que la temperatura varía de manera gradual con la altura. Por lo tanto, si existiera un modelo con capacidad de predecir ese perfil de temperaturas, se podrían realizar simulaciones de incendios más precisas con una capacidad y tiempo computacional más bajo y asumible.

En este trabajo se estudiará un modelo alternativo, propuesto originalmente por Suzuki[11] llamado modelo multicapa-zonal. Este modelo surge de la necesidad de predecir el perfil de temperaturas con una mayor precisión que el modelo zonal clásico con un coste computacional bajo. El dominio de estudio se divide en varios volúmenes que consisten en múltiples capas horizontales y verticales en las que las propiedades físicas se mantienen uniformes. Adicionalmente, las paredes del entorno se dividen en segmentos en concordancia con la división de las capas. Además, se calcula la transferencia de calor por radiación entre la fuente del fuego y las paredes del entorno; y la transferencia de calor por convección de las paredes con sus capas colindantes. El arrastre del aire en la columna de fuego y llama, considerando el efecto del flujo horizontal a su alrededor, es calculado mediante unas simples ecuaciones. En **Error! Reference source not found.** se muestra un esquema de los diferentes modelos que actualmente se utilizan.

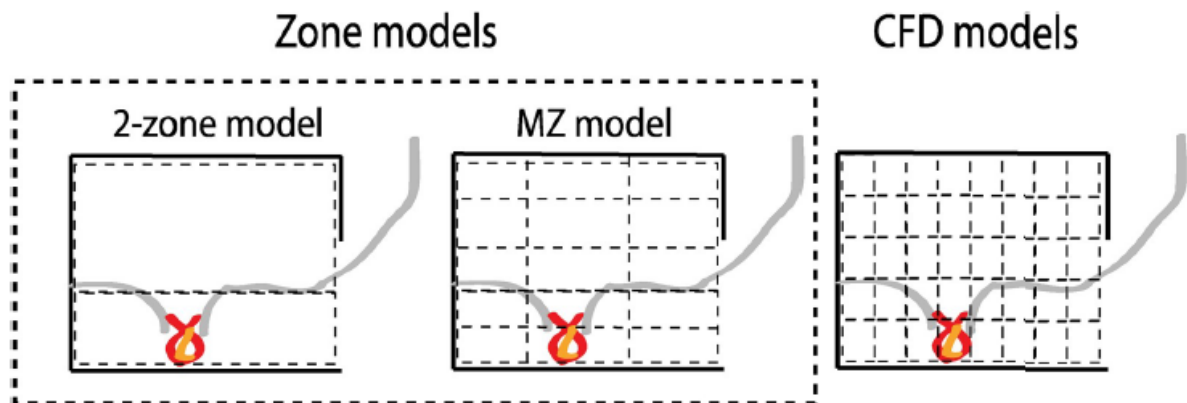


Figura 1. Comparativa entre los modelos zonales y CFD [4]

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

El modelo multicapa-zonal tiene las ventajas de los modelos zonales en términos de tiempos computacionales, aportando una mayor precisión a los resultados de las simulaciones. Por tanto, se trata de modelos que más accesibles y utilizados en el diseño de los sistemas de protección y control de incendios de nuestros edificios e infraestructuras cuando no se puedan utilizar modelos CFD. Sin embargo, es necesaria una validación más profunda de estos modelos para su uso, especialmente en recintos de gran volumen. En este trabajo se pretende implementar el modelo multicapa-zonal y validarlo con resultados experimentales [1].

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

Los incendios en recintos pequeños y medianos causan turbulencias que mezclan los gases calientes, este efecto genera una capa de gas caliente con una distribución de temperatura que puede ser considerada uniforme. Este tipo de incendios están dentro del marco de incendios compartimentados, incluyendo dentro de este campo el concepto “flashover”, también conocido como combustión súbita generalizada, que ocurre cuando el calor de capa de gases calientes es tan intenso que todos los combustibles del recinto se incendian.

El primer estudio que analizó la viabilidad de la utilización de estos conceptos para la seguridad contra incendios se llevó a cabo por Kawagoe en la década de 1950 [12]. A partir de entonces, la investigación en el campo de los incendios ha derivado en diferentes tipos de métodos analíticos, como las curvas del temperatura-tiempo en el Eurocodigo 1[13], modelos numéricos como los bizonales o CFD, que son muy valiosos para la ingeniería de seguridad contra incendios, en la predicción de incendios forestales, o en el comportamiento de estructuras frente a fuego, entre otros.

Los recintos de gran volumen, tales como atrios, estaciones de metro o túneles, presentan una complejidad adicional en la simulación de incendios debido a que la capa de gases calientes no se puede considerar uniforme y al riesgo que llevan adheridos en lo que respecta a la evacuación de personas. Actualmente no existe una norma en cuanto a la utilización de este tipo de modelos en función de las dimensiones del espacio o de su uso (Figura 2). Aun así, la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha publicado unas pautas acerca de las dimensiones límites que pueden tener los espacios a simular por los métodos zonales [5]. Con el fin de ofrecer una solución a este problema, es necesario el desarrollo de otros modelos.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

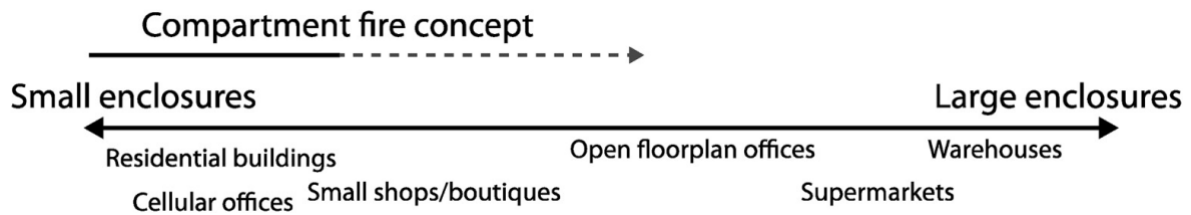


Figura 2. Utilización del concepto “compartment fire”[4]

Stern-Gottfried y Rein [14] introdujo un nuevo marco de estudio, “travelling fires” o fuegos viajeros, en el que el campo térmico inducido por las llamas se divide en dos regiones: el campo cercano y el campo lejano. La posición y el tamaño de estas regiones quedan en función de la posición del fuego, y su movimiento depende de la propagación de las llamas. El campo cercano es la zona donde se produce la combustión y las llamas, y el campo lejano en el que la capa de gases calientes está expuesta térmicamente. Las temperaturas en el campo cercano se pueden predecir con métodos mencionados anteriormente como el Eurocodigo 1 [13]. Por otro lado, las temperaturas del campo lejano tienen una alta complejidad para ser modeladas.

Rein et al. [15] usó el modelo computacional de dinámica de fluidos de FDS para modelar las temperaturas de campo lejano en edificios de gran altura, pero encontró problemas debido a los grandes costes computacionales de las simulaciones. Por ello, los siguientes estudios en el área se centraron en utilizar métodos analíticos más sencillos para estimar las temperaturas del campo lejano como el modelo “Ceiling Jet correlation” desarrollado por Alpert [16]. Este modelo permite estimar la temperatura de los gases en las fases tempranas de un incendio. Sin embargo, la correlación de Alpert no aplica cuando se ha formado una capa de gases calientes, siendo este su gran inconveniente.

Por otro lado, Bong [17] presentó una guía para determinar el tipo de modelo numérico bizonal necesario para simular incendios en recintos de diferentes tamaños. El modelo Bizonal, BRANZFIRE, realiza estimaciones muy precisas en recintos de hasta 600 m² y estimaciones precisas en recintos de hasta 1200 m², contrastando los resultados con el programa CFD Fire Dynamics Simulator (FDS). Sin embargo, las simulaciones de FDS para

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

grandes recintos muestran una distribución no uniforme de temperaturas en las direcciones horizontales y verticales que los modelos bizonales no son capaces de predecir.

Los modelos bizonales no son suficiente para grandes recintos y los modelos CFD requieren un gran coste y tiempo computacional para realizar las simulaciones. Surge la necesidad de encontrar una solución entre ambos métodos de simulación que resuelva la excesiva simplificación de los modelos bizonales y reduzca el coste y el tiempo computacional de los modelos CFD. De esta necesidad nace los modelos multicapa-zonales.

El concepto de los modelos multicapa-zonales se basan en las leyes de la conservación de la masa de masa y energía para calcular las temperaturas de los gases calientes, y las ecuaciones de Bernoulli para calcular los flujos máscicos entre las diferentes zonas en las que está dividido el recinto, [6]. En contraposición al modelo, BRANZFIRE, donde cada recinto está dividido en dos zonas, los recintos quedan divididos en multitud de regiones horizontales y verticales en los modelos multicapa-zonales, como se muestra en la Figura 3.

La gran ventaja de este concepto de modelo es la capacidad de cálculo, en diferentes puntos, de propiedades como la temperatura del gas y, en consecuencia, la distribución de temperatura en la zona de gases calientes con un coste y tiempo computacional muy reducido. Por lo que podría ser utilizados para predecir incendios de forma más precisa que con los modelos zonales clásicos.

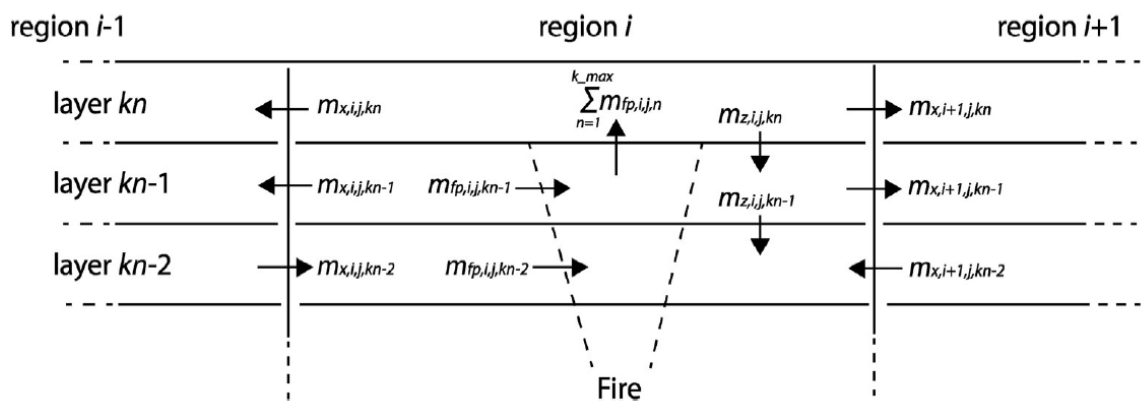


Figura 3. Principios del concepto multicapa-zonal [4]

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

En 2003, Suzuki et al.[11] desarrolló por primera vez un modelo, basado en el modelo multicapa-zonal, para la predicción del perfil de temperaturas y densidades en una habitación. Este modelo divide el recinto en capas horizontales, modelando los flujos másicos y caloríficos entre ellas y el ambiente a través de las aberturas del recinto (Figura 4). Además, el modelo consideraba la transferencia de calor por radiación y convección del gas con las paredes (Figura 5). El modelo se validó con los experimentos llevados a cabo por Steckler et al. [18], mostrando resultados satisfactorios.

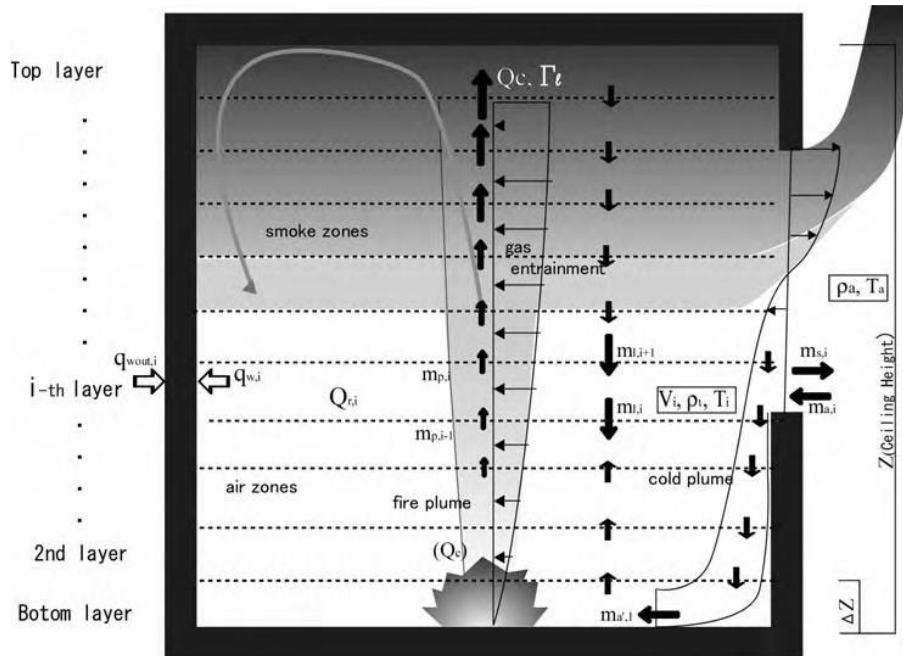


Figura 4. Esquema del concepto multicapa-zonal desarrollado por Suzuki et al.[11]

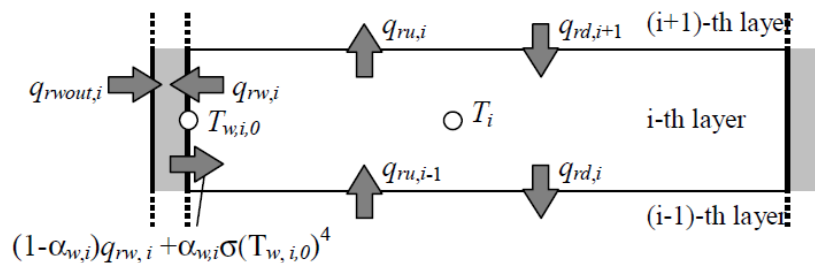


Figura 5. Esquema de la transferencia de calor de una capa [11]

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

En 2004 Suzuki et al.[6] presentó un nuevo modelo basado en el modelo multicapa-zonal para simular incendios en túneles basado en el desarrollado por el mismo autor en 2003. A diferencia del anterior, el espacio de estudio está dividido tanto en capas horizontales como verticales permitiendo analizar el efecto de los flujos mássicos y caloríficos horizontales en el perfil de temperaturas (Figura 3). De nuevo, el modelo propuesto fue validado experimentalmente[6].

En 2005 Xiaojun et al.[19], realizó unas modificaciones al modelo de Suzuki et al.[11] con el fin de mejorar la capacidad de predicción del modelo en la temperatura de las capas inferiores y la dimensión de las capas con gas caliente. Posteriormente, en 2007 Suzuki et al.[8] continuó desarrollando su modelo extendiendo su capacidad de predicción a espacios con varios recintos. Adicionalmente, se llevó a cabo el estudio e implementación de la influencia de la ventilación en el humo, la predicción de los flujos de gas caliente del techo, la interacción del humo en las aberturas y la transferencia de calor por radiación de la llama (Figura 6). El modelo se validó con un experimento a escala real, considerándolo una herramienta útil para el diseño de los sistemas de protección contra incendios.

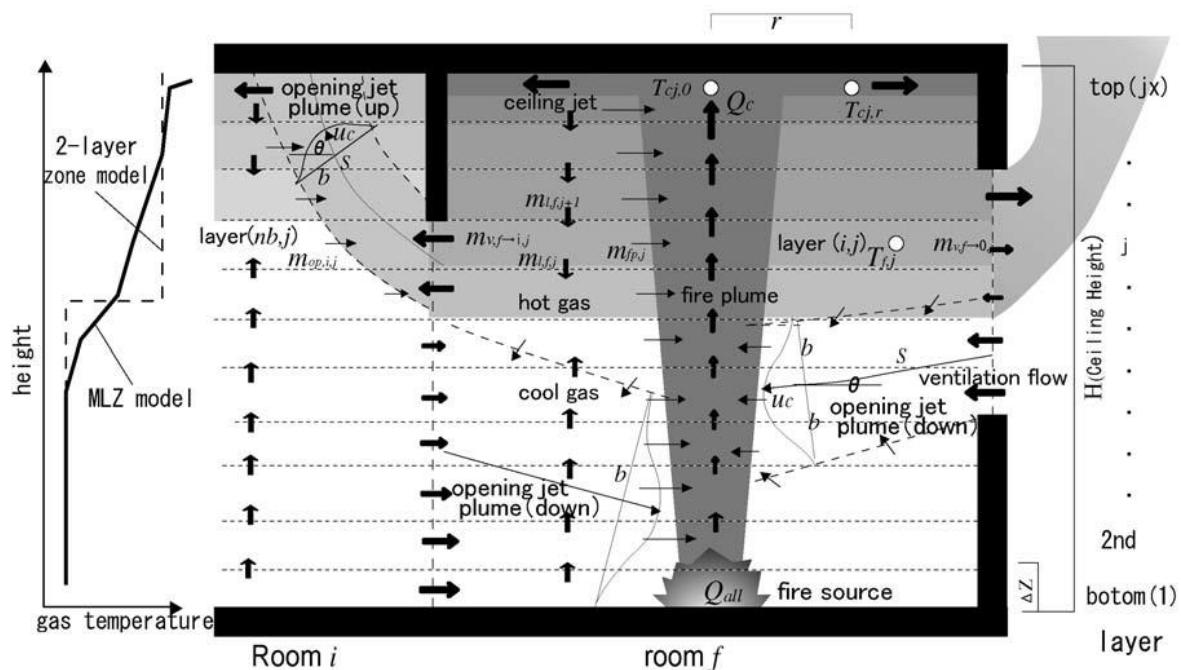


Figura 6. Esquema del modelo multicapa-zonal desarrollado por Suzuki et al.[8]

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

En 2008 Suzuki et al.[3] extendió los avances de 2007 en su modelo de predicción de simulación de incendios en túneles. Introdujo la predicción del movimiento del humo a lo largo del túnel, incluyendo las distribuciones de temperatura y las concentraciones de las especies químicas. Además, el modelo simula el arrastre del aire hacia la columna de humo y fuego considerando la influencia de los flujos horizontales que los rodean. Los resultados (Figura 7) fueron razonablemente fiables, pero el efecto “Backlayering” (retroceso del humo) no fue correctamente estimado.

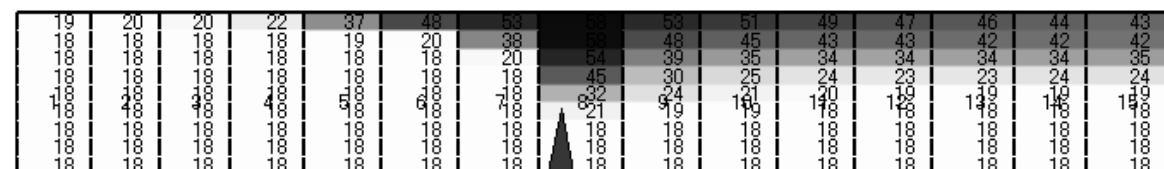


Figura 7. Resultados del modelo multicapa-zonal desarrollado por Suzuki et al. [3]

En 2019 Nishino et al. [7] desarrolló un modelo que simulaba el comportamiento de un fuego en la esquina de un recinto construido con material combustible, como la madera. Combinó el concepto multicapa-zonal con su nuevo modelo de propagación de incendios en las paredes y techo del recinto con un fuego en una esquina. Además, investigó este efecto para recintos con y sin paredes combustibles, y de pequeños y grandes volúmenes. En este estudio se concluyó que era necesario realizar modificaciones al modelo para poder validar sus resultados con el experimento a escala real realizado.

Por último, en 2020, Nils[4] estudió la implementación del modelo multicapa-zonal en recintos de grandes dimensiones. Los resultados obtenidos diferían un 5% con los resultados de FDS y un 10% con los datos experimentales para dos recintos de grandes dimensiones con una buena ventilación. Sin embargo, en una tercera simulación no se llegó a unos resultados coherentes con el experimento debido a la falta de ventilación del recinto. En este estudio se resaltó la falta de documentación necesarios para validar y cuantificar la precisión del modelo y sus limitaciones.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

En este estudio se analiza la utilidad de los modelos multicapa-zonal en espacios de gran volumen para su uso en el diseño de los sistemas de protección y control de incendios de nuestros edificios e infraestructuras.

Capítulo 3. MODELO MULTICAPA-ZONAL

3.1 *MODELO ZONAL*

El modelo zonal se trata de un método de simulación clásico siendo una herramienta fundamental en el diseño de sistemas de protección y control de incendios. Este modelo siendo menos sofisticado que los modelos CFD ofrecen una gran reducción del coste computacional en las simulaciones.

Los resultados de este modelo se obtienen de manera instantánea al reducir enormemente la complejidad en la formulación del modelo. El modelo está basado en las ecuaciones de conservación de la masa y energía, aplicadas a dos zonas en el dominio de estudio. Estas dos zonas en las que queda dividido el recinto son la zona superior caliente y la zona inferior fría. En estos recintos las propiedades físicas del gas como la temperatura y la densidad se consideran uniformes.

En comparación con los modelos CFD, hay una pérdida de precisión en la predicción de temperaturas en el recinto. Esto es debido a una sobre simplificación del modelo, principalmente en la producción de humo y en la capacidad de predecir un perfil de temperaturas en la capa caliente, asumiendo que en todo el recinto la temperatura es la misma. Por ello, el modelo zonal tiene un uso limitado, especialmente en recintos de gran volumen donde la capa de gases calientes tiene una gran dimensión

En vista de las limitaciones del modelo zonal, surge la necesidad de desarrollar un modelo que mantenga el bajo coste computacional del modelo zonal y ofrezca una mejor precisión,

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

más gradual, en la predicción de temperatura en la capa caliente en función de la altura.

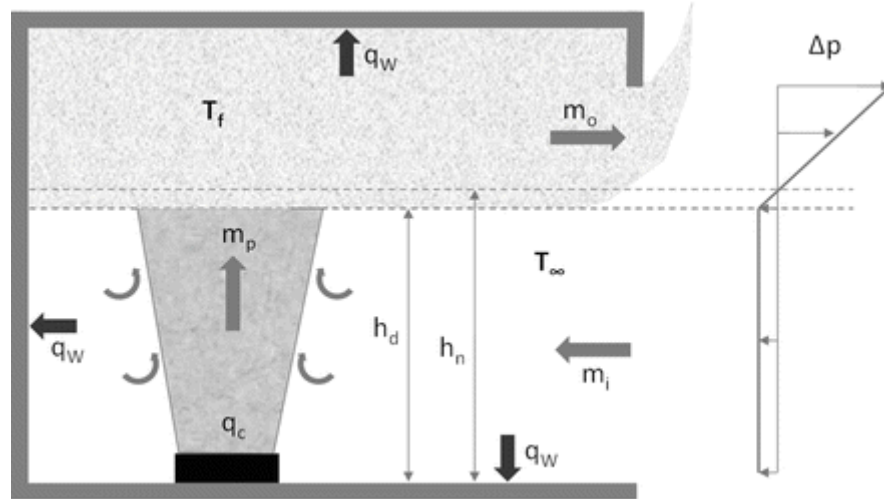


Figura 8. Esquema del modelo zonal [20]

3.2 MODELO MULTICAPA-ZONAL

Los modelos multicapa-zonales se basan en las leyes de la conservación de la masa de masa y energía para calcular las temperaturas de los gases calientes, y las ecuaciones de Bernoulli para calcular los flujos máscicos entre las diferentes zonas en las que está dividido el recinto [6].

En este trabajo se ha desarrollado un modelo para predecir el perfil de temperaturas de los gases en un recinto con un fuego axisimétrico. Al contrario de los modelos bizonales en el que el recinto queda dividido en dos zonas, el recinto de este modelo queda dividido en varias capas horizontales cuyas dimensiones son manualmente introducidas, haciendo el volumen de cada capa constante. Adicionalmente, las paredes del recinto también están divididas en concordancia con las capas horizontales.

A continuación, se muestra un esquema, Figura 9, del modelo en el que se puede observar las diferentes capas horizontales en las que queda dividido el recinto, la nomenclatura utilizada en las fórmulas utilizadas para desarrollar el modelo y los diferentes flujos máscicos entre capas y el ambiente.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

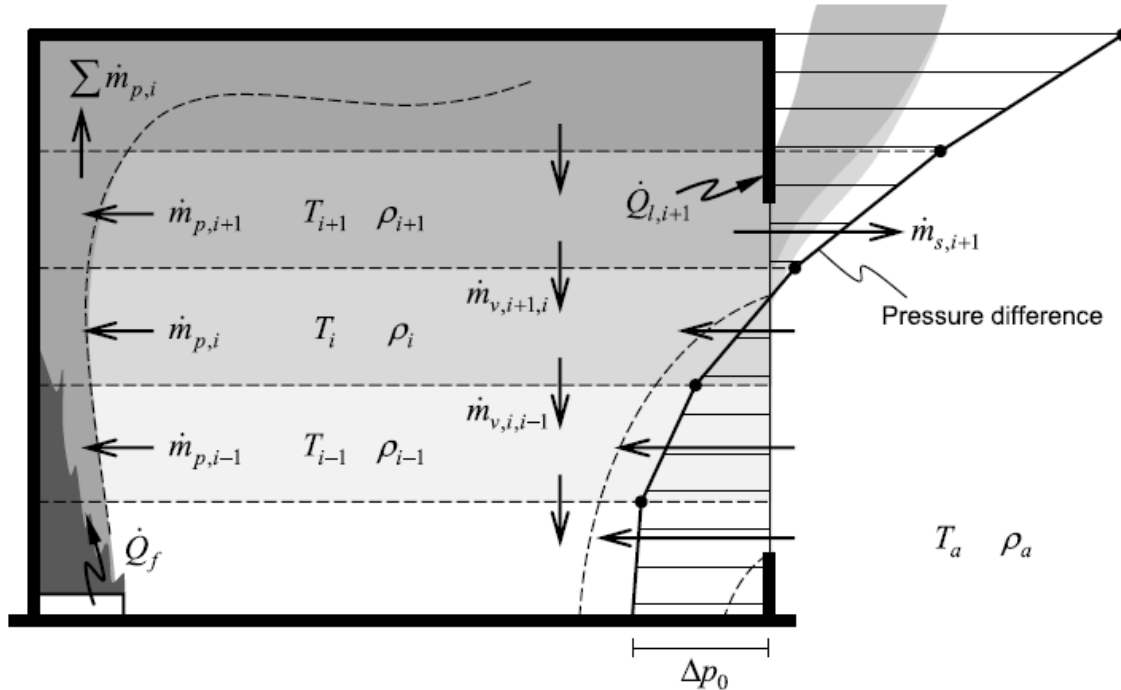


Figura 9. Esquema del modelo multicapa-zonal desarrollado[7]

Las propiedades físicas de los gases se consideran uniformes en todos los puntos cada capa horizontal, siendo esta la característica principal del modelo multicapa-zonal y similares. Estas propiedades como la temperatura o densidad de los gases de cada capa son calculadas mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales de la conservación de la masa y energía en función del tiempo en cada una de las capas para cada instante de tiempo.

En el modelo multicapa-zonal se asume que el todo el humo creado por el fuego asciende a través de todas las capas arrastrando parte de los gases de cada capa hasta que penetran en la capa superior. Consecuentemente, este humo y los gases arrastrados empujan hacia abajo los gases que se encuentran en esta capa superior a través de las superficies de contacto entre capas contiguas fuera de la zona donde se encuentra la columna de fuego y humo. Además, como se asume que el humo no se mezcla con ninguna capa excepto la superior, también se asume que toda la energía generada por el fuego se transporta directamente a la capa superior sin mezclarse con las capas intermedias.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Además, los gases del ambiente que entran en el recinto a través de sus aberturas se asumen que entran en la capa inferior debido a la falta de flotabilidad de estos dentro del recinto.

Adicionalmente, se calcula la transferencia de calor por radiación entre la fuente del fuego y las paredes del entorno; y la transferencia de calor por convección de las paredes con sus capas colindantes (Figura 10). El arrastre del aire en la columna de fuego y llama, considerando el efecto del flujo horizontal a su alrededor, es calculado mediante unas simples ecuaciones.

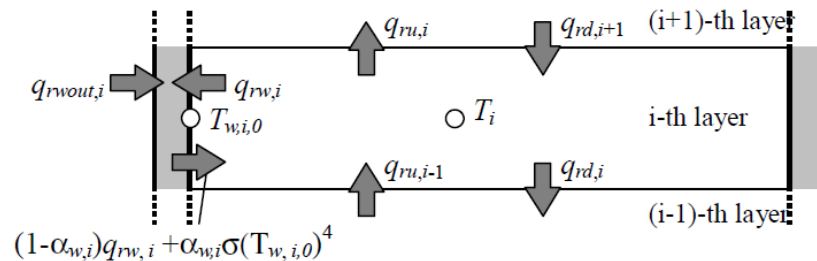


Figura 10. Esquema de la transferencia de calor de una capa [11]

La gran ventaja de este concepto de modelo es la capacidad de cálculo, en diferentes puntos, de propiedades como la temperatura del gas y, en consecuencia, la distribución de temperatura en la zona de gases calientes con un coste y tiempo computacional muy reducido. Por lo que podría ser utilizados para predecir incendios de forma más precisa que con los modelos zonales clásicos.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

FORMULACIÓN DEL MODELO

En este apartado se explican y se exponen las ecuaciones físicas detrás del modelo multicapa-zonal desarrollado. La numeración de las capas se designa por la letra i siendo la numeración ascendente desde la capa inferior, 1.

La formulación de este modelo viene representada por la Figura 9 donde se puede observar las propiedades físicas y flujos másicos de la capa i , $i-1$ e $i+1$.

En el índice se encuentra la nomenclatura utilizada para describir la formulación del modelo desarrollado. Además de una descripción de las abreviaturas utilizadas se puede encontrar las unidades de estas.

3.2.1.1 Conservación de la masa

Las ecuaciones de la conservación de la masa para cada capa son las siguientes:

- Capa Superior

$$E. 1 \quad \frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t} = \sum_{j=1}^{i-1} \dot{m}_{p,j} - \dot{m}_{v,i,i-1} - \dot{m}_{s,i}$$

- Capas intermedias

$$E. 2 \quad \frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t} = -\dot{m}_{p,i} + (\dot{m}_{v,i+1,i} - \dot{m}_{v,i,i-1}) - \dot{m}_{s,i}$$

- Capa inferior

$$E. 3 \quad \frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t} = -\dot{m}_{p,i} + \dot{m}_{v,i+1,i} - \dot{m}_{s,i} + \dot{m}_a$$

Siendo ρ_i la densidad del gas en la capa i , V_i el volumen del gas en la capa i , $\dot{m}_{p,i}$ el flujo másico del gas arrastrado de la capa i hacia la columna de fuego y humo, $\dot{m}_{v,i+1,i}$ el flujo másico desde la capa $(i+1)$ hacia la capa i a través de la superficie de contacto entre ellas fuera de la columna de fuego, $\dot{m}_{s,i}$ flujo másico desde la capa i hacia el ambiente a través de la abertura, $\dot{m}_a$ flujo másico desde el ambiente hacia el recinto a través de la abertura, t el tiempo y j es la capa directamente inferior a la capa superior.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

El volumen de cada capa, V_i , es constante en el tiempo para todas las capas ya que viene prefijada por el modelador, mientras que la densidad del gas, ρ_i , varía con el tiempo.

3.2.1.2 Conservación de la energía

Las ecuaciones de la conservación de la energía, para cada capa son las siguientes:

- Capa Superior

$$E. 4 \quad \frac{\partial(c_p \rho_i V_i T_i)}{\partial t} = \chi_c \dot{Q}_f - \dot{Q}_{l,i} - \dot{Q}_{r,i,i-1} + \sum_{j=1}^{i-1} c_p \dot{m}_{p,j} T_j - \dot{Q}_{v,i,i-1} - c_p \dot{m}_{s,i} T_i$$

- Capas intermedias

$$E. 5 \quad \frac{\partial(c_p \rho_i V_i T_i)}{\partial t} = -\dot{Q}_{l,i} + (\dot{Q}_{r,i+1,i} - \dot{Q}_{r,i,i-1}) + c_p \dot{m}_{p,i} T_i + (\dot{Q}_{v,i+1,i} - \dot{Q}_{v,i,i-1}) - c_p \dot{m}_{s,i} T_i$$

- Capa inferior

$$E. 6 \quad \frac{\partial(c_p \rho_i V_i T_i)}{\partial t} = -\dot{Q}_{l,i} + \dot{Q}_{r,i+1,i} + c_p \dot{m}_{p,i} T_i + \dot{Q}_{v,i+1,i} - c_p \dot{m}_{s,i} T_i + c_p \dot{m}_a T_a$$

Siendo T_i la temperatura del gas en la capa i , T_a la temperatura del aire ambiente, $\dot{Q}_f$ la tasa de liberación de calor por combustión, $\dot{Q}_{l,i}$ las pérdidas de calor desde la capa i hacia las paredes, suelo y techo, $\dot{Q}_{r,i+1,i}$ el flujo calorífico transferido por radiación desde la capa $i+1$ hacia la capa i a través de la superficie de contacto entre ellas por unidad de tiempo, $\dot{Q}_{v,i+1,i}$ el flujo calorífico del gas transportado desde la capa $i+1$ hacia la capa i a través de la superficie de contacto entre ellas fuera de la columna de fuego, χ_c el porcentaje de calor transferido por convección de la tasa de liberación de calor por la combustión, y c_p el calor específico del gas a presión constante.

El flujo calorífico de los gases que cruzan desde la capa $(i+1)$ a la capa i a través de la superficie de contacto entre ellas fuera de la columna de fuego por unidad de tiempo, $\dot{Q}_{v,i+1,i}$, se deduce de la siguiente manera:

$$E. 7 \quad \dot{Q}_{v,i+1,i} = \begin{cases} c_p \dot{m}_{v,i+1,i} T_{i+1} & (\dot{m}_{v,i+1,i} \geq 0) \\ c_p \dot{m}_{v,i+1,i} T_i & (\dot{m}_{v,i+1,i} < 0) \end{cases}$$

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

La ecuación de estado del gas es la siguiente y proviene de la ley de los gases ideales:

$$E. 8 \quad \rho_i T_i = \rho_a T_a$$

Donde ρ_a es la densidad ambiente.

3.2.1.3 Predicción de la temperatura

La ecuación E. 4 se puede desarrollar a:

$$E. 9 \quad c_p \rho_i V_i \frac{\partial T_i}{\partial t} + c_p T_i \frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t} = \chi_c \dot{Q}_f - \dot{Q}_{l,i} - \dot{Q}_{r,i,i-1} + \sum_{j=1}^{i-1} c_p \dot{m}_{p,j} T_j - \dot{Q}_{v,i,i-1} - c_p \dot{m}_{s,i} T_i$$

Sustituyendo la ecuación E. 1 en la ecuación E. 9 se obtiene la derivada en función del tiempo de la temperatura en la capa superior para predecir la temperatura del gas en función del tiempo:

$$E. 10 \quad \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\chi_c \dot{Q}_f - \dot{Q}_{l,i} - \dot{Q}_{r,i,i-1} + \sum_{j=1}^{i-1} c_p \dot{m}_{p,j} (T_j - T_i) - \dot{Q}_{v,i,i-1} + c_p \dot{m}_{v,i,i-1} T_i}{c_p \rho_i V_i}$$

Para las demás capas, la derivada en función del tiempo de la temperatura se puede deducir de la misma manera:

- Capas intermedias

$$E. 11 \quad \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{-\dot{Q}_{l,i} + (\dot{Q}_{r,i+1,i} - \dot{Q}_{r,i,i-1}) + (\dot{Q}_{v,i+1,i} - \dot{Q}_{v,i,i-1}) - c_p (\dot{m}_{v,i+1,i} - \dot{m}_{v,i,i-1}) T_i}{c_p \rho_i V_i}$$

- Capa inferior

$$E. 12 \quad \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{-\dot{Q}_{l,i} + \dot{Q}_{r,i+1,i} + \dot{Q}_{v,i+1,i} - c_p \dot{m}_{v,i+1,i} T_i - c_p \dot{m}_a (T_i - T_a)}{c_p \rho_i V_i}$$

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

3.2.1.4 Tasa de liberación de calor por combustión

La tasa de liberación de calor por combustión, $\dot{Q}_f$, se asume constante y se especifica manualmente.

3.2.1.5 Producción de humo

El cálculo de la tasa de producción de humo puede ser realizado con diferentes expresiones empíricas y depende de la localización del fuego en el recinto.

Para un fuego axisimétrico, el flujo másico arrastrado hacia la columna de humo de cada capa puede ser estimado por la correlación de Zukoski, [8] y se formula a continuación[21]:

$$E. 13 \quad \dot{m}_{p,i} = C \left(\frac{\rho_a^2 g}{c_p T_a} \right)^{1/3} \dot{Q}_f^{1/3} (z_{i,u}^{5/3} - z_{i,l}^{5/3})$$

Siendo C el coeficiente de arrastre, estimado en 0.21, $z_{i,l}$ la altura de la superficie inferior de la capa i desde el suelo y $z_{i,u}$ la altura de la superficie superior. La producción de humo en capas llenas de humo se considera nula.

McCaffrey[9] propuso un modelo para predecir la producción de humo. Dividió el humo en tres regiones, la región de llama continua, la región intermitente y la región del humo, y derivó las siguientes ecuaciones para $\dot{m}_{p,i}$.

$$E. 14 \quad \dot{m}_{p,i} = \begin{cases} 0.011 \dot{Q}_f \left(\frac{z}{\dot{Q}_f^{0.4}} \right)^{0.566} & (0 < \frac{z}{\dot{Q}_f^{0.4}} < 0.08) \\ 0.026 \dot{Q}_f \left(\frac{z}{\dot{Q}_f^{0.4}} \right)^{0.909} & (0.08 < \frac{z}{\dot{Q}_f^{0.4}} < 0.20) \\ 0.0124 \dot{Q}_f \left(\frac{z}{\dot{Q}_f^{0.4}} \right)^{1.895} & (0.20 < \frac{z}{\dot{Q}_f^{0.4}}) \end{cases}$$

Siendo z la altura de la capa de humos.

Heskestad [22] también propuso un modelo alternativo para la predecir la producción de humo. Este modelo tiene en cuenta la influencia de la altura de la llama, obtenida con la siguiente ecuación:

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

$$E. 15 \quad L_{ft} = 0.235 \dot{Q}_f^{0.4} - 1.02D$$

Siendo L_{ft} la altura de la llama y D el diámetro del fuego.

Por lo que las ecuaciones para $\dot{m}_{p,i}$ son las siguientes:

$$E. 16 \quad \dot{Q}_c = \chi_c \dot{Q}_f$$

$$E. 17 \quad z_0 = 0.083 \dot{Q}_c^{0.4} - 1.02D$$

- ($z > L_{ft}$)

$$E. 18 \quad \dot{m}_{p,i} = 0.071 \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} (z - z_0)^{5/3} + 1.92 \cdot 10^{-3} \dot{Q}_c$$

- ($z < L_{ft}$)

$$E. 19 \quad \dot{m}_{p,i} = 0.0056 \dot{Q}_c \left(\frac{z}{L_{ft}} \right)$$

Para un fuego situado en la esquina del recinto, Sugawa and Tabori, [23], observaron que el flujo másico arrastrado hacia la columna de humo es proporcional a la altura elevada a 1/1 y que el coeficiente de arrastre, $C_{e,i}$, es más pequeño que en condiciones de contorno libre, siendo 0.015, y constante en todas las capas.

$$E. 20 \quad \dot{m}_{p,i} = 0.015 \dot{Q}_f^{1/3} (z_{i,u}^{1/1} - z_{i,l}^{1/1})$$

3.2.1.6 Flujo másico a través de las aberturas

Cuando la presión del recinto se trata como referencia cero a la presión atmosférica, el flujo másico desde la capa i al aire ambiente, $\dot{m}_{s,i}$, se estima mediante la siguiente ecuación:

$$E. 21 \quad \dot{m}_{s,i} = \alpha B (z_{i,u} - z_{i,l}) \sqrt{2\rho_i \Delta p_i} \quad (\Delta p_i \geq 0)$$

Siendo Δp_i la presión en el centro de la capa i , α el coeficiente de flujo, B la anchura de la abertura.

El flujo másico desde el aire ambiente al recinto, $\dot{m}_a$, se estima como la suma de los flujos másicos del ambiente a cada capa a través de la abertura:

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

$$E. 22 \quad \dot{m}_a = \sum \alpha B(z_{i,u} - z_{i,l}) \sqrt{2\rho_a(-\Delta p_i)} \quad (\Delta p_i < 0)$$

La presión del recinto en el centro de la capa i , Δp_i se estima mediante la siguiente ecuación:

$$E. 23 \quad \Delta p_i = \Delta p_0 - \sum_{j=1}^{i-1} \rho_j g(z_{i,u} - z_{i,l}) - \rho_i g\left(\frac{z_{i,u} - z_{i,l}}{2}\right) + \rho_a g\left(\frac{z_{i,u} + z_{i,l}}{2}\right)$$

La presión en el suelo del recinto, Δp_0 , es calculada resolviendo la siguiente ecuación en función de la presión por el método de Newton-Raphson. Se obtiene sumando todas las ecuaciones de conservación de energía (E. 4, E. 5 y E. 6).

$$E. 24 \quad f(\Delta p_0) = \chi_c \dot{Q}_f - \sum_i \dot{Q}_{l,i} - \sum_i c_p \dot{m}_{s,i} T_i + c_p \dot{m}_a T_a$$

3.2.1.7 Flujo másico a través de la superficie fuera de la columna de fuego

El flujo másico desde la capa superior a la capa directamente debajo a través de la superficie fuera de la columna de fuego, $\dot{m}_{v,i,i-1}$, se calcula a partir de la ecuación E. 1.

$$E. 25 \quad \dot{m}_{v,i,i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \dot{m}_{p,j} - \dot{m}_{s,i} - \frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t}$$

El flujo másico de la capa i hacia la capa directamente inferior $i-1$ a través de la superficie de contacto entre capas fuera de la columna de fuego, $\dot{m}_{v,i,i-1}$, se calcula a partir de la ecuación E. 2.

$$E. 26 \quad \dot{m}_{v,i,i-1} = -\dot{m}_{p,i} + \dot{m}_{v,i+1,i} - \dot{m}_{s,i} - \frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t}$$

3.2.1.8 Pérdidas de calor en las paredes, suelo y techo del recinto

Las pérdidas de calor desde cada capa a las paredes, suelo y techo, $\dot{Q}_{l,i}$, se formulan a continuación, asumiendo el gas como cuerpo negro:

- Capa superior

$$E. 27 \quad \dot{Q}_{l,i} = \{\varepsilon_w \sigma (T_i^4 - T_{w,s,i}^4) + h_{w,i} (T_i - T_{w,s,i})\} A_{w,i} \\ + \{\varepsilon_c \sigma (T_i^4 - T_{c,s}^4) + h_c (T_i - T_{c,s})\} A_f$$

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

- Capas intermedias

$$E. 28 \quad \dot{Q}_{l,i} = \{\varepsilon_w \sigma (T_i^4 - T_{w,s,i}^4) + h_{w,i} (T_i - T_{w,s,i})\} A_{w,i}$$

- Capa inferior

$$E. 29 \quad \dot{Q}_{l,i} = \{\varepsilon_w \sigma (T_i^4 - T_{w,s,i}^4) + h_{w,i} (T_i - T_{w,s,i})\} A_{w,i} \\ + \{\varepsilon_f \sigma (T_i^4 - T_{f,s}^4) + h_f (T_i - T_{f,s})\} A_f$$

Siendo $T_{w,s,i}$ la temperatura de la superficie de las paredes de la capa i , $T_{c,s}$ la temperatura de la superficie del techo, $T_{f,s}$ la temperatura de la superficie del suelo, $A_{w,i}$ el área de la superficie interna de las paredes de la capa i , A_f el área del suelo, ε_c , ε_f y ε_w la emisividad del techo, suelo y paredes respectivamente, h_c , h_f y $h_{w,i}$, el coeficiente de transferencia de calor por convección del techo, suelo y paredes respectivamente, y σ la constante de Stefan-Boltzmann.

La temperatura de la superficie de las paredes de la capa i , $T_{w,s,i}$, es calculada resolviendo las siguientes ecuaciones unidimensionales de la conducción de calor en la dirección perpendicular a la pared utilizando un método de elementos finitos:

$$E. 30 \quad \rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) - \dot{m}_v L_v$$

$$E. 31 \quad -k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \Big|_{x=0} = \varepsilon_w \sigma (T_i^4 - T_{w,s,i}^4) + h_{w,i} (T_i - T_{w,s,i})$$

$$E. 32 \quad -k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \Big|_{x=l_w}$$

Siendo k_w la conductividad térmica de las paredes, ρ_w la densidad de las paredes, c_w el calor específico de las paredes, l_w el espesor de las paredes, $\dot{m}_v$ la tasa de vaporización de agua por unidad de volumen, L_v el calor latente de vaporización del agua, y x la distancia desde la superficie.

Las temperaturas de la superficie del techo y suelo, $T_{c,s}$ y $T_{f,s}$, también son calculadas resolviendo las ecuaciones unidimensionales, E. 30, E. 31 y E. 32, en la dirección perpendicular al techo y suelo.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Las propiedades térmicas se asumen constantes con la temperatura, utilizándose las propiedades a temperatura ambiente.

El coeficiente de transferencia de calor por convección de las paredes del recinto, $h_{w,i}$, se estiman a partir de las ecuaciones de las correlaciones empíricas para la transferencia de calor por convección natural y forzada a lo largo de una placa plana[24]:

$$E. 33 \quad h_{w,i} = \begin{cases} 0.005 & (\bar{T} \leq 300) \\ 0.001(0.02\bar{T} - 1) & (300 < \bar{T} \leq 800) \\ 0.015 & (800 < \bar{T}) \end{cases}$$

$$E. 34 \quad \bar{T} = \frac{T_t + T_{w,s,i}}{2}$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección del suelo y techo del recinto, h_c y h_f , se estiman con la misma ecuación que $h_{w,i}$.

3.2.1.9 Transferencia de calor por radiación entre capas

El flujo calorífico transferido por radiación desde la capa $i+1$ a la capa i a través de la superficie de contacto entre capas, asumiendo el gas como cuerpo negro, se deduce bajo la siguiente ecuación:

$$E. 35 \quad \dot{Q}_{r,i+1,i} = \sigma(T_{i+1}^4 - T_i^4)A_f$$

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN MATLAB

Para desarrollar el código del modelo multicapa-zonal se han realizado una serie de modificaciones en la formulación del modelo.

Las secciones 3.2.1.8, Pérdidas de calor en las paredes, suelo y techo del recinto, y 3.2.1.9, Transferencia de calor por radiación entre capas, no se han implementado en el modelo por su complejidad.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Para calcular el término $\frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t}$ de las ecuaciones E. 25 y E. 26, se aplica una aproximación diferencial utilizando las densidades del gas del instante previo, $t - 1$ y actual t de tiempo. De este modo el último término tendría la siguiente aproximación:

$$E. 36 \quad \frac{\partial(\rho_i V_i)}{\partial t} \approx \frac{(\rho_i V_i)_t - (\rho_i V_i)_{t-1}}{\Delta t}$$

Además, la sección 3.2.1.6, Flujo másico a través de las aberturas debido a la ventilación natural ha sido sustituida por la ventilación forzada. Para implementar la ventilación forzada en el modelo se han modificado las ecuaciones de conservación de masa. En los casos experimentales la extracción de aire se realizaba en el techo del atrio, por ello se asume que el flujo másico, E. 37, se extrae directamente de la capa superior. Por lo tanto, la ecuación E. 25 se formula a continuación en función del tiempo.

$$E. 37 \quad (\dot{m}_e)_t = (\dot{V}_e)_t (\rho_{ni})_t$$

$$E. 38 \quad (\dot{m}_{v,i-1})_t = \left(\sum_{j=1}^{i-1} \dot{m}_{p,j} - \dot{m}_e \right)_t - \frac{(\rho_i V_i)_t - (\rho_i V_i)_{t-1}}{\Delta t}$$

Siendo $\dot{m}_e$ y $\dot{V}_e$ el flujo másico y el volumen de extracción forzada, respectivamente.

En la ecuación E. 26 el término $\dot{m}_{s,i}$ desaparece al utilizar la ventilación forzada.

Para despejar y calcular el término T_i de las ecuaciones E. 10, E. 11 y E. 12, se aplica una aproximación similar a la aproximación anterior, utilizando la temperatura del instante de tiempo actual t y posterior $t + 1$. De esta manera el término $\frac{\partial T_i}{\partial t}$ se aproxima de la siguiente manera:

$$E. 39 \quad \frac{\partial T_i}{\partial t} \approx \frac{(T_i)_{t+1} - (T_i)_t}{\Delta t}$$

Por lo tanto, las ecuaciones E. 10, E. 11 y E. 12, se transformarían a las ecuaciones E. 40, E. 41 y E. 42, respectivamente, que se muestran a continuación:

- Capa superior

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

$$E. 40 \quad (T_i)_{t+1} = (T_i)_t + \Delta t \left(\frac{\chi_c \dot{Q}_f - \dot{Q}_{l,i} - \dot{Q}_{r,i,i-1} + \sum_{j=1}^{i-1} c_p \dot{m}_{p,j} (T_j - T_i) - \dot{Q}_{v,i,i-1} + c_p \dot{m}_{v,i,i-1} T_i}{c_p \rho_i V_i} \right)_t$$

- Capas intermedias

$$E. 41 \quad (T_i)_{t+1} = (T_i)_t + \Delta t \left(\frac{-\dot{Q}_{l,i} + (\dot{Q}_{r,i+1,i} - \dot{Q}_{r,i,i-1}) + (\dot{Q}_{v,i+1,i} - \dot{Q}_{v,i,i-1}) - c_p (\dot{m}_{v,i+1,i} - \dot{m}_{v,i,i-1}) T_i}{c_p \rho_i V_i} \right)_t$$

- Capa inferior

$$E. 42 \quad (T_i)_{t+1} = (T_i)_t + \Delta t \left(\frac{-\dot{Q}_{l,i} + \dot{Q}_{r,i+1,i} + \dot{Q}_{v,i+1,i} - c_p \dot{m}_{v,i+1,i} T_i - c_p \dot{m}_a (T_i - T_a)}{c_p \rho_i V_i} \right)_t$$

Para calcular la altura de la capa de humos z en cada instante, se calcula el volumen de humo para cada instante de tiempo mediante las siguientes ecuaciones.

$$E. 43 \quad (V_h)_{t+1} = (V_h)_t + \Delta t \left(\left(\frac{\sum_{j=1}^{i-1} \dot{m}_{p,j}}{\rho_{ni}} \right) - \dot{V}_e \right)_t$$

$$E. 44 \quad (z)_{t+1} = H_0 - \left(\frac{V_h}{A_f} \right)_{t+1}$$

Siendo V_h el volumen del humo en el recinto y H_0 la altura del atrio. La altura z es utilizada para identificar todas las capas llenas de humo haciendo su producción de humo $\dot{m}_{p,i}$ nula.

Para calcular V_h se asume que la densidad del flujo másico del humo $\dot{m}_{p,i}$ es la densidad de la capa superior del recinto ρ_{ni} .

El cálculo de $\rho_i V_i$ se realiza mediante la ecuación de estado del gas, E. 8, proveniente de la ley de los gases ideales.

$$E. 45 \quad (\rho_i)_{t+1} = \frac{\rho_a T_a}{(T_i)_{t+1}}$$

Y como V_i , se mantiene constante en el tiempo, obtenemos la siguiente ecuación:

$$E. 46 \quad (\rho_i V_i)_{t+1} = (\rho_i)_{t+1} V_i$$

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

ESTRUCTURA

La estructura del código, para el modelo multicapa-zonal completo, sigue el siguiente diagrama de flujo:

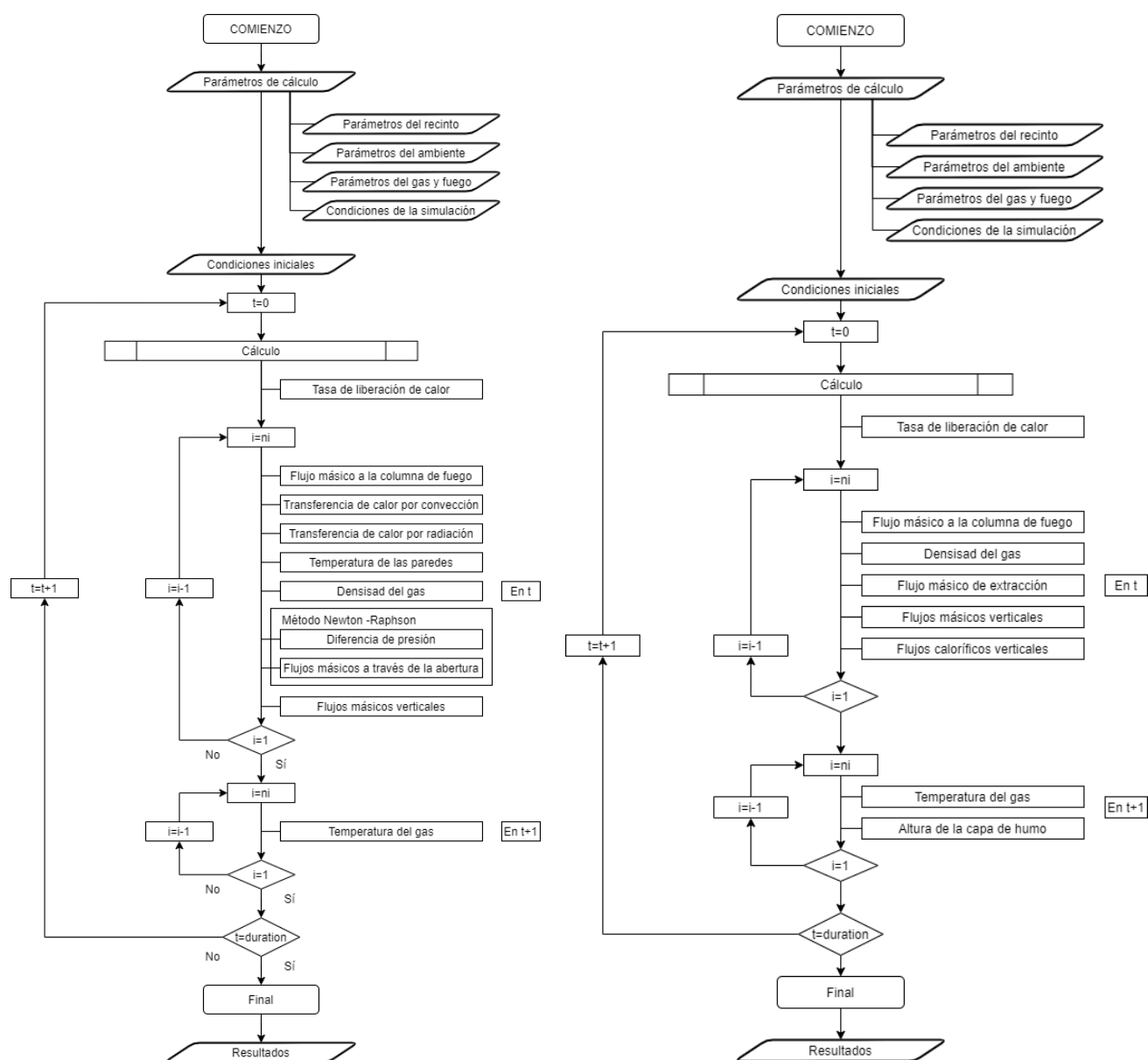


Figura 11. Diagrama de flujo del modelo multicapa-zonal completo (Izq.) y el desarrollado (Der.)

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos por modelo multicapa-zonal desarrollado son comparados con el caso de estudio descrito en el siguiente apartado 4.1 y con el modelo zonal descrito en el apartado 3.1, [2]

4.1 CASO DE ESTUDIO

Los casos de estudio utilizados para comparar los resultados del modelo multicapa-zonal desarrollado se tratan de unos experimentos realizados en un atrio localizado en Murcia, España.[1]

Los datos de los experimentos fueron obtenidos de un atrio de 19.5 x 19.5 x 18.3 m, equipado con 4 ventiladores de extracción y numerosas aberturas en la parte inferior cuyas dimensiones son 4.88 x 2.5 m. Las paredes y el techo son de acero galvanizado de 6 mm de espesor, mientras que el suelo se trata de hormigón. Se utilizaron más de sesenta sensores para medir la temperatura y la presión en los ventiladores.

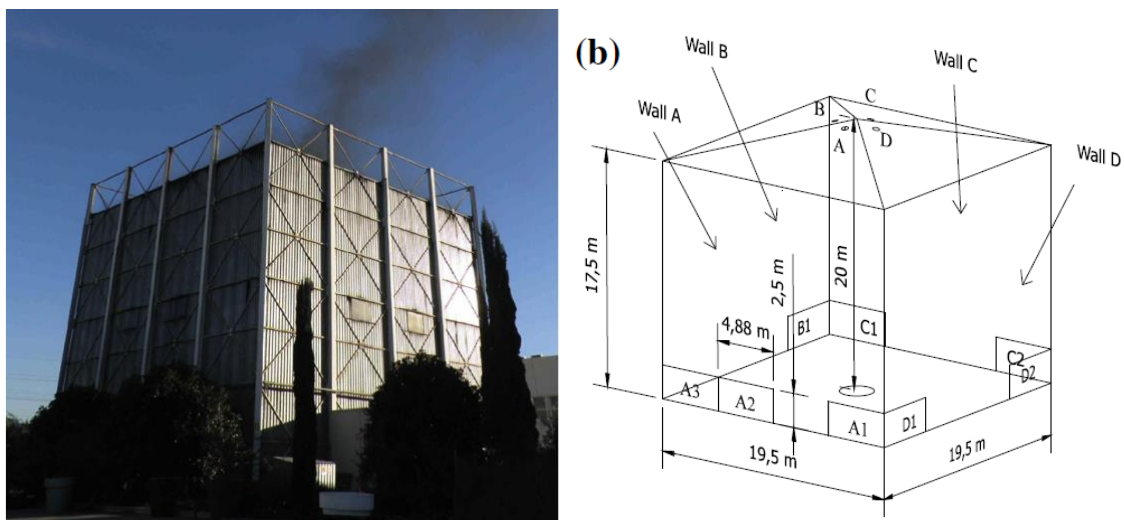


Figura 12. Atrio y el esquema con sus dimensiones principales [1]

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

La fuente del fuego en los ensayos se situaba en el centro del atrio y el combustible utilizado fue Heptano.

En el atrio se realizaron los siguientes experimentos cuyos datos serán utilizados para la comparación de los resultados del modelo multicapa-zonal. Las condiciones experimentales durante los ensayos se recogen en la siguiente tabla, Tabla 1.

Test	Tiempo de simulación (s)	Flujo de extracción (m ³ /s)	Temperatura ambiente (°C)	Presión (Pa)	HRR (MW)
#1	708	18.3	20.1	101,651	1.7
#2	647	18.3	18.0	101,617	2.3
#4	565	Nota 1	16.7	102,191	5.3

Tabla 1. Condiciones de los experimentos realizados [1]

Nota 1: (0 a 270 s) 18.3 m³/s; (270 a final) 27.5 m³/s

4.2 COMPARATIVA ENTRE EL MODELO MULTICAPA-ZONAL, EL MODELO BIZONAL Y EL CASO EXPERIMENTAL

Con el fin de validar la capacidad de predicción del modelo desarrollado se han comparado los resultados obtenidos por el modelo multicapa-zonal desarrollado con el modelo bizonal y los tres ensayos del caso de estudio.

Los resultados del modelo zonal y multicapa-zonal se han obtenido con una $\rho_a = 1.216 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $C = 0.21$ y $\chi_c = 0.65$. La altura de cada capa es 0.5 metros y los incrementos de tiempo son 0.01 segundos.

El modelo de producción de humos implementado en el modelo multicapa-zonal es el de Zukoski

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

4.2.1.1 Test #1

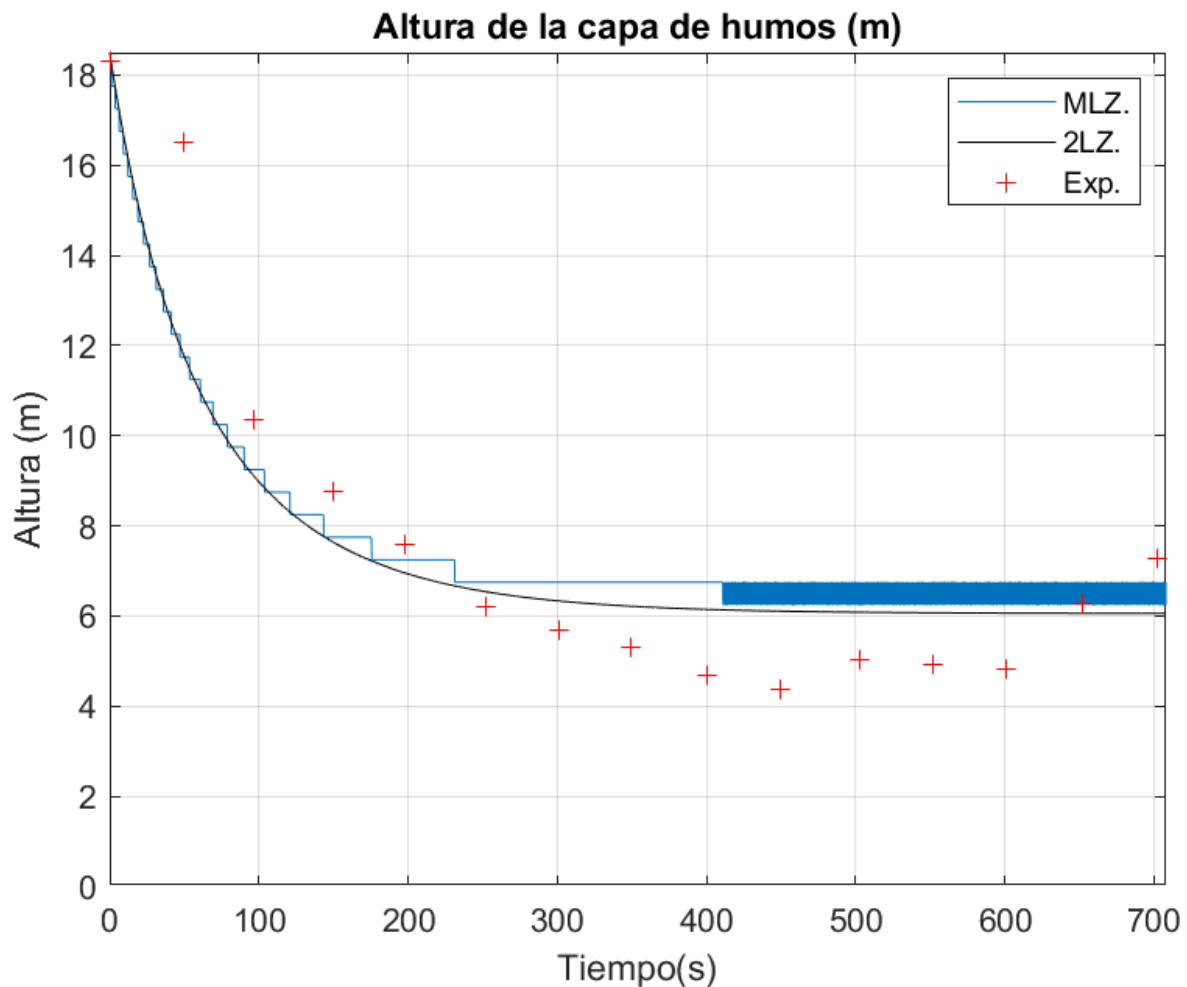


Figura 13. Test #1 Altura de la capa de humos en metros

En la Figura 13 se observa una forma escalonada de la altura de la capa de humos, esto es debido a que el modelo multicapa-zonal discretiza el espacio en numerosas capas que pueden estar llenas de humo o no. Este efecto se ve más acusado al final de la simulación donde la altura oscila entre dos capas.

En primer lugar, se observa una fuerte correlación con el modelo bizonal, esto es debido a que el modelo de producción de humo es idéntico en ambos casos. Por otro lado, se observa una diferencia en la precisión del modelo entre la fase transitoria (hasta 200 segundos) y la fase en régimen permanente (a partir de los 200 segundos). El error máximo en la fase

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

transitoria es de 4.5 metros en $t=50$ s, consistiendo en un error relativo del 24% con la altura del atrio. Sin embargo, en el resto de la fase transitoria el rango de errores relativos es de 1.1-5.3%.

En la fase en régimen permanente se observa un rango de errores de 0-10%, siendo el máximo error absoluto 1.9 metros.

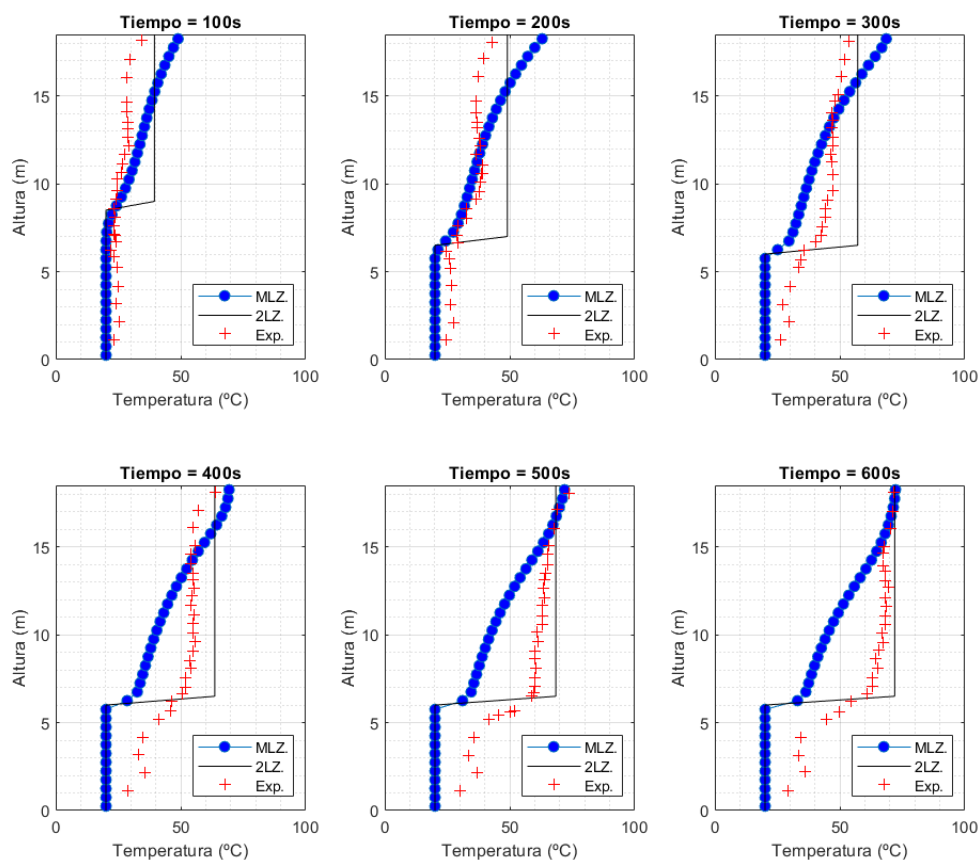


Figura 14. Test #1 Perfil de temperaturas cada 100 segundos

En la Figura 14, se puede identificar la altura de la capa de humo tanto del modelo como experimentalmente al observarse una región en la que aparece un cambio brusco de pendiente en el perfil de temperatura de la temperatura ambiental a la del humo.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Hasta el segundo 300, se puede observar una correcta predicción de la temperatura debajo de la capa de humo. Sin embargo, a partir de los 300 segundos los datos experimentales muestran una variación de la temperatura en contraposición a la predicción del modelo multicapa-zonal y bizonal.

En la fase transitoria hasta 300 segundos, el error máximo es de 19°C en la capa superior. Teniendo en cuenta el perfil de temperaturas hasta los 15 metros de altura el modelo tiene un error máximo de 12°C. Prediciendo con relativa precisión el perfil en el instante $t=200s$.

En la fase en régimen permanente el modelo predice correctamente la temperatura en las capas superiores con menos de 1°C de error. Sin embargo, el resto de perfil de temperaturas tiene un error considerablemente mayor. La discrepancia tan elevada en las capas superiores se puede deber a que la tasa de liberación de calor del modelo multicapa-zonal es constante a lo largo de todo el ensayo, mientras que, en los experimentos, tarda más de 200 s en llegar a régimen permanente.

El modelo zonal predice correctamente en valor medio la forma del perfil de temperaturas, pero su grado de detalle en altura es muy limitado.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

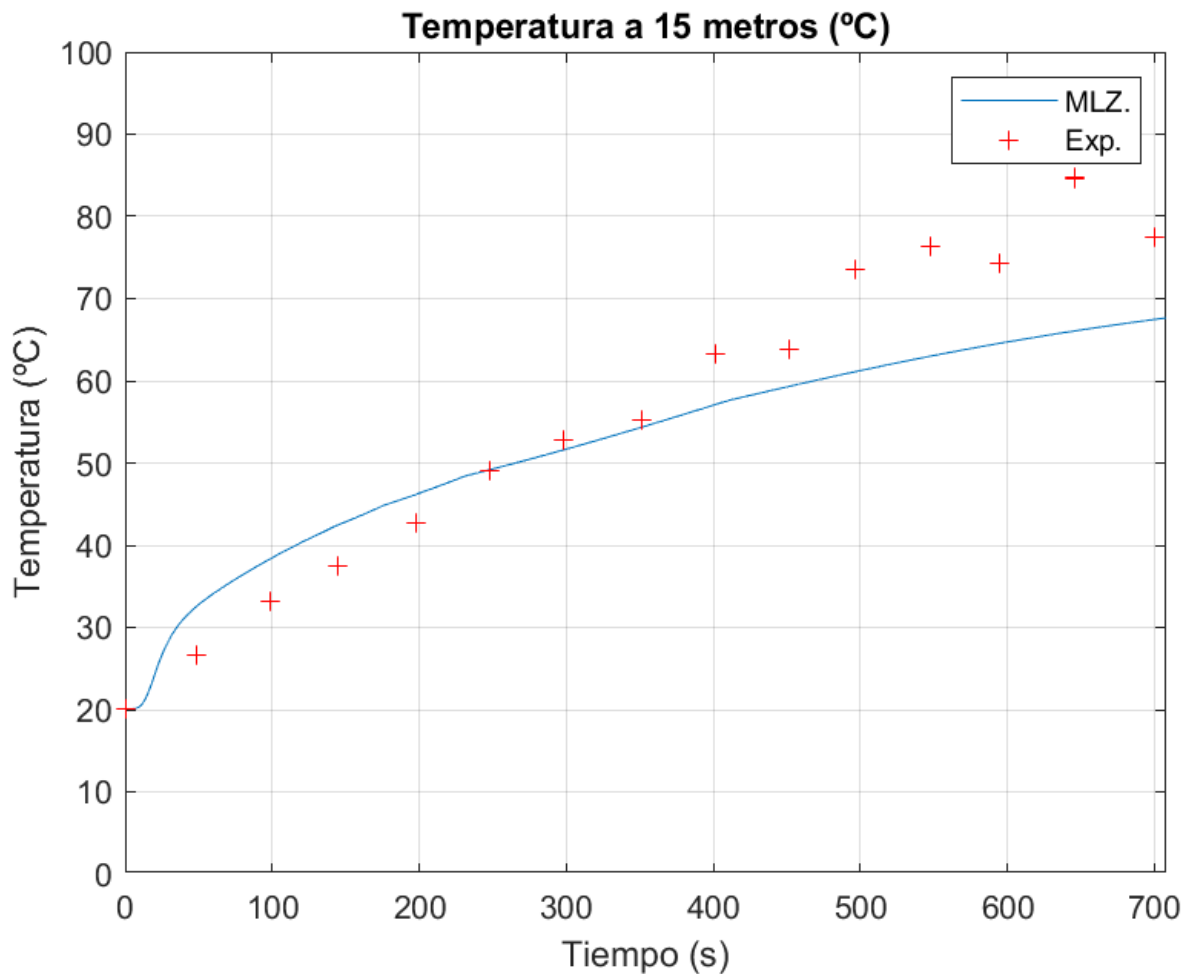


Figura 15. Test #1 Temperaturas a 15 metros de altura

En la Figura 15 se puede observar el perfil de temperaturas a lo largo del ensayo a 15 metros de altura. Se puede apreciar que el modelo MLZ predice la temperatura con un error máximo de 6°C hasta $t=350s$, en la fase transitoria. Sin embargo, en la fase en régimen permanente el error máximo aumenta a 18°C, finalizando la simulación con un error de 9.5°C, un 14% de error relativo.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

4.2.1.2 Test #2

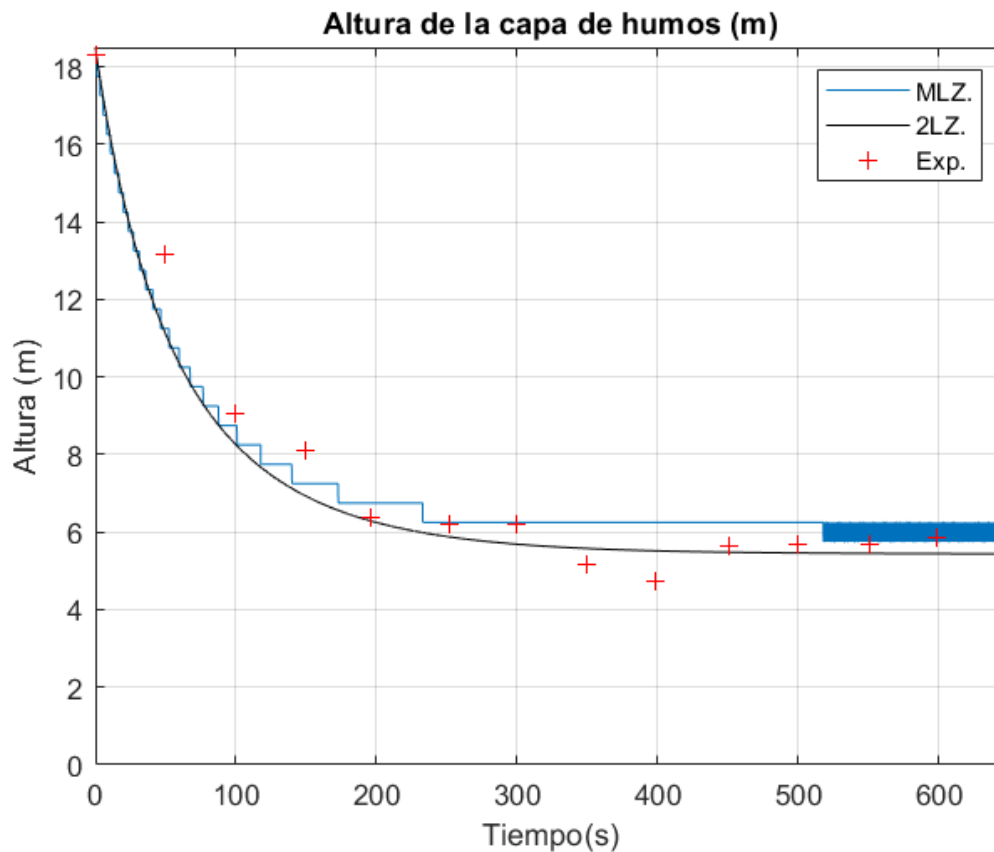


Figura 16. Test #2 Altura de la capa de humos en metros

En la Figura 16 se muestra el descenso de la capa de humos en función del tiempo, pudiéndose observar en la misma una fuerte correlación entre los modelos bizonal y multicapa-zonal y el caso experimental. Considerando la fase transitoria (hasta 200 segundos) y la fase en régimen permanente (a partir de los 200 segundos). El error máximo en la fase transitoria es de 1.43 metros en $t=50$ s, consistiendo en un error relativo del 8% con la altura del atrio. El rango de errores relativos es de 2-8%, muy similar al Test#1.

En la fase en régimen permanente se observa un rango de errores de 0-8%, siendo el máximo error absoluto 1.5 metros. Observando un error casi nulo a partir de los 500 segundos de simulación.

Cabe destacar la similitud de los rangos de errores entre ambas fases y con el Test#1.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

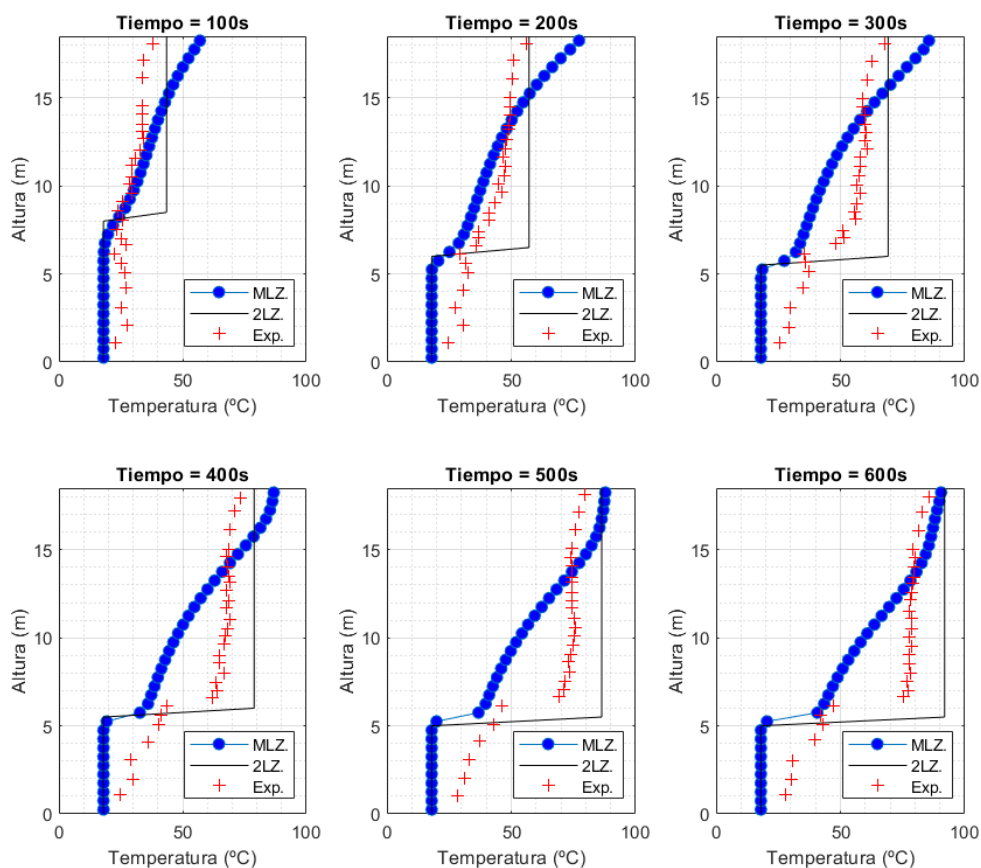


Figura 17. Test #2 Perfil de temperaturas cada 100 segundos

En la Figura 17, se tienen las mismas observaciones que en el Test#1. Sin embargo, el error en la capa superior asciende a 5°C coincidiendo con la predicción del modelo zonal.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

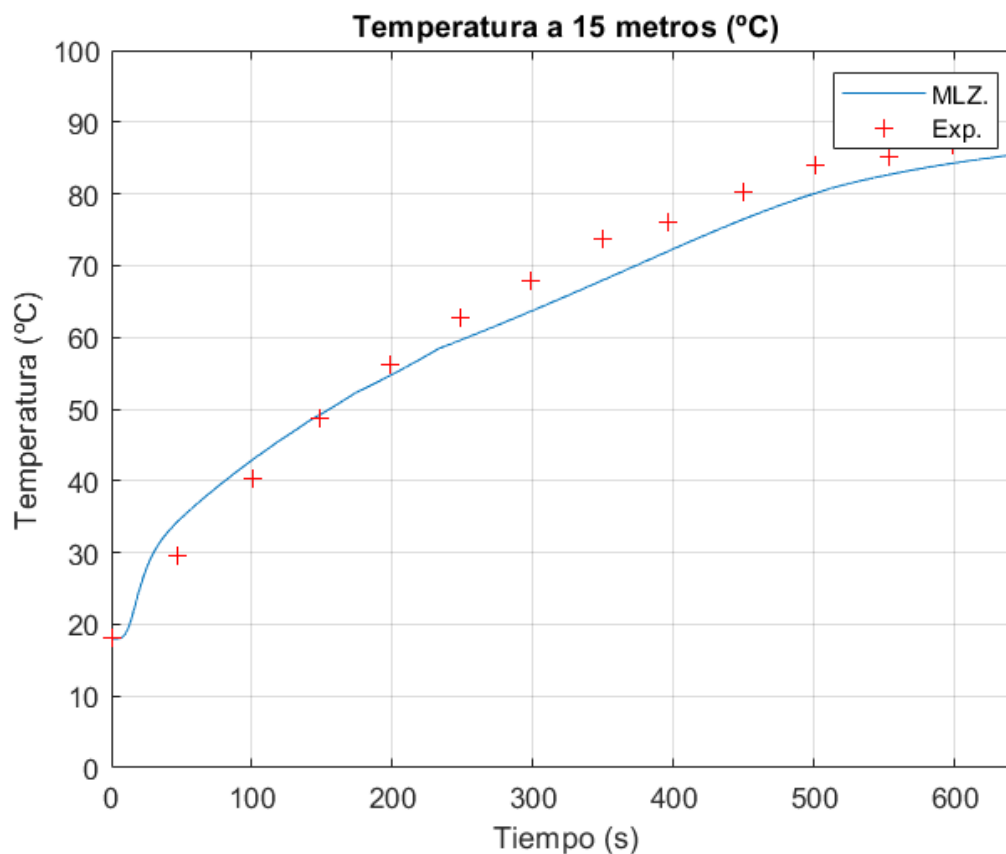


Figura 18. Test #2 Temperaturas a 15 metros de altura

La Figura 18 muestra la evolución de la temperatura a 15 m de altura. Se observa que el modelo MLZ predice la temperatura con un error máximo de 5°C. Reduciendo este error a 2.62°C en la fase final de la simulación, consistiendo en un 3% de error relativo.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

4.2.1.3 Test #3

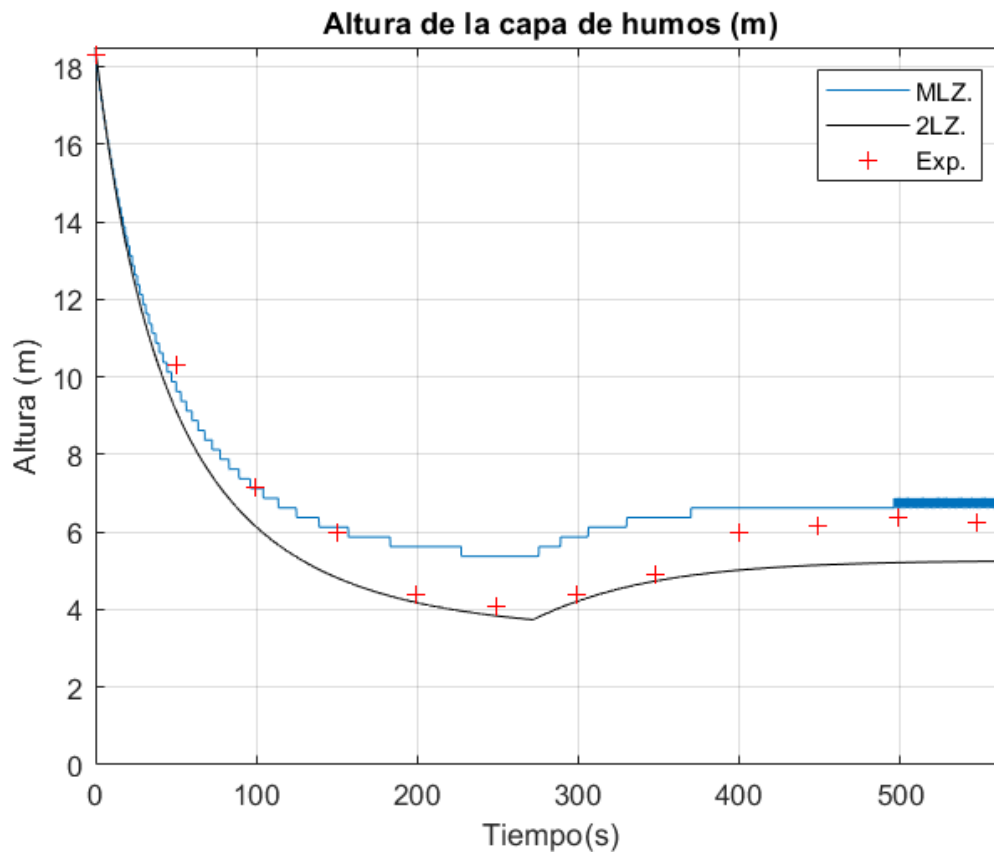


Figura 19. Test #3 Altura de la capa de humos en metros

En la Figura 19 se muestra la posición de la capa de humos en el Test#3. Se observa como la capa de humos del modelo predice el cambio de tendencia en la mitad del ensayo, coincidiendo con el aumento de la tasa de extracción, elevando la altura de la capa de humo. Además, se puede observar que el modelo multicapa-zonal se ajusta a los datos experimentales en la fase transitoria y al final de la fase en régimen permanente, al contrario del modelo zonal. Sin embargo, el modelo zonal predice con gran exactitud la altura entre los 200 segundos y 350 segundos de simulación.

El error absoluto máximo es de 1.5 metros en $t=350s$, consistiendo en un error relativo del 8% con la altura del atrio. El rango de errores relativos en toda la simulación es de 0-8%. El rango es muy similar a los Test #1 y #2.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Adicionalmente, el error al final de la simulación es de 0.415 metros siendo un 2.3% en comparación a los 5.6% del modelo bizonal.

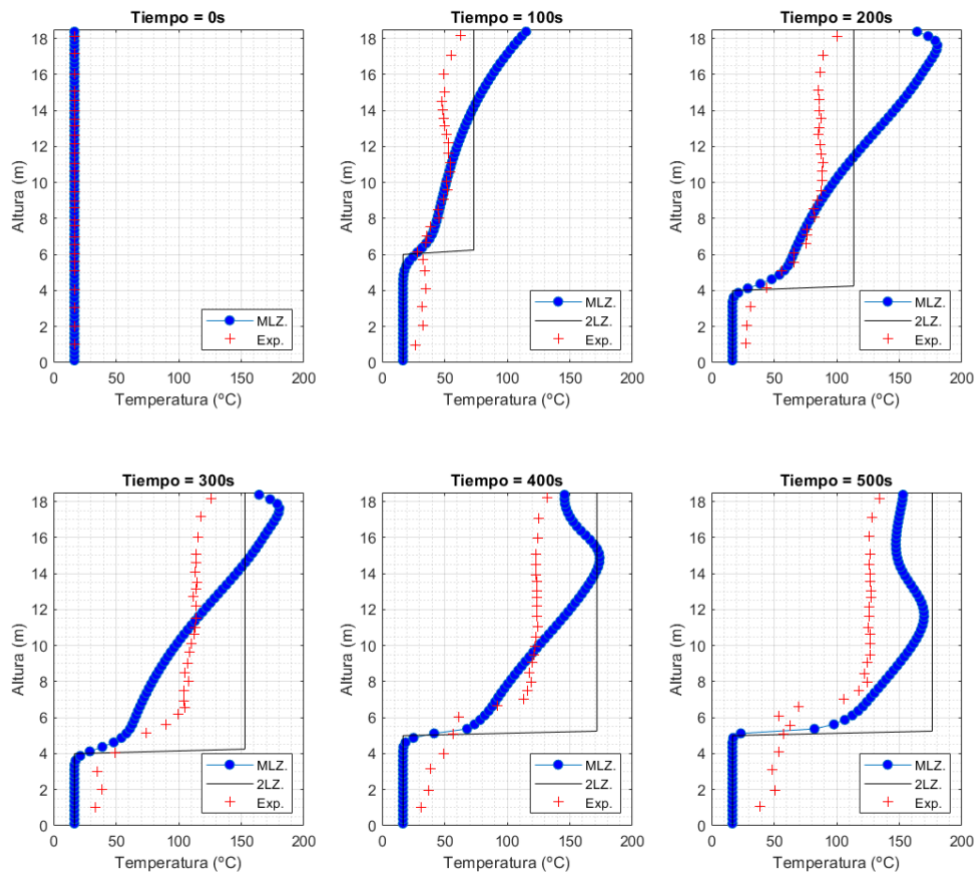


Figura 20. Test #3 Perfil de temperaturas cada 100 segundos

Se puede observar una correcta predicción del perfil de temperaturas hasta los 10 metros en $t=100s$ y $t=200s$, a partir de 15 metros el error máximo es de $90^{\circ}C$.

A partir de los 200 segundos se observa un descenso de la temperatura de las capas superiores coincidiendo con el aumento del volumen de aire extraído del atrio.

Por último, el error desciende a $18^{\circ}C$ en las capas superiores en $t=500s$. Observándose una mejor predicción del perfil de temperaturas que en los Test #1 y #2.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

4.2.1.4 Predicción temporal de la temperatura

Al observar los perfiles de temperatura en los diferentes test obtenidos por el modelo multicapa-zonal desarrollado se puede observar que debido a que el perfil de temperaturas no se tiene correlación total con los datos experimentales exceptuando la capa superior, Figura 14, Figura 17 y Figura 20. La predicción del modelo multicapa-zonal parece que puede encontrarse desfasada en el tiempo. Por ello, en esta sección se muestran los resultados del modelo multicapa-zonal en valores de tiempo superiores, para ver la evolución de la temperatura en las diferentes alturas del atrio.

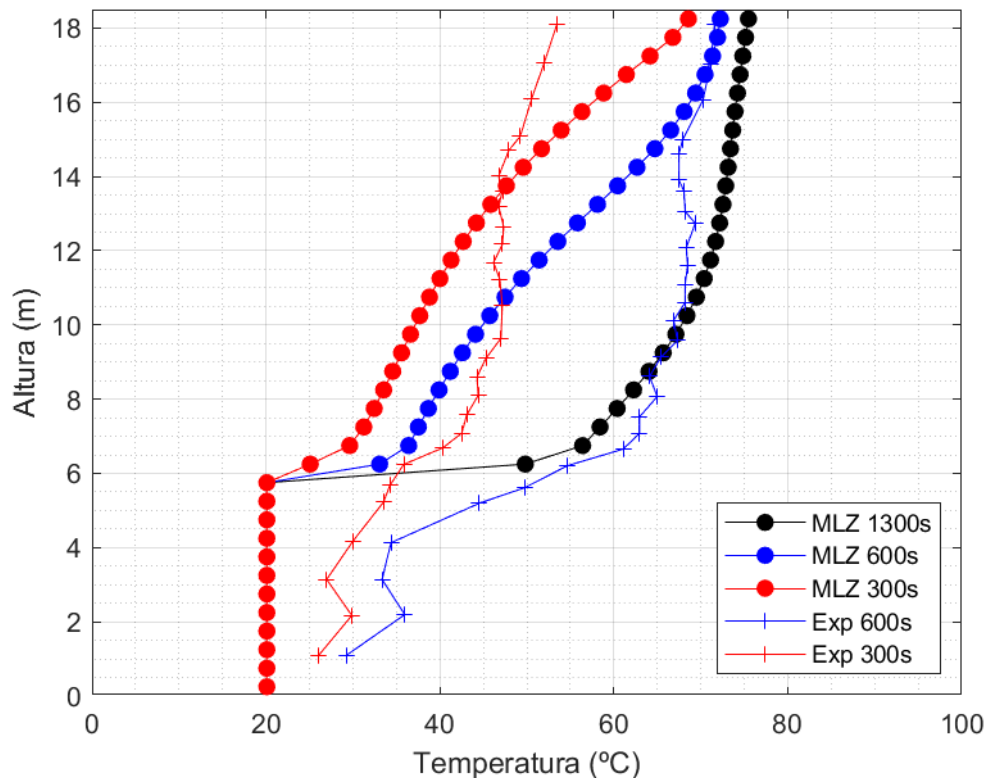


Figura 21. Test #1 Perfil de temperaturas en tres instantes de tiempo

La Figura 21 muestra el perfil de temperaturas del Test#1 en diferentes instantes de tiempo. En las simulaciones realizadas se observa que, con un mayor tiempo de simulación, el perfil de temperaturas experimental a los 600s se ajusta a la predicción por el MLZ a los 1300s. Disminuyendo el error máximo a 6°C en las capas por encima de 6 metros y aumentando el error de la capa superior a 4°C.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

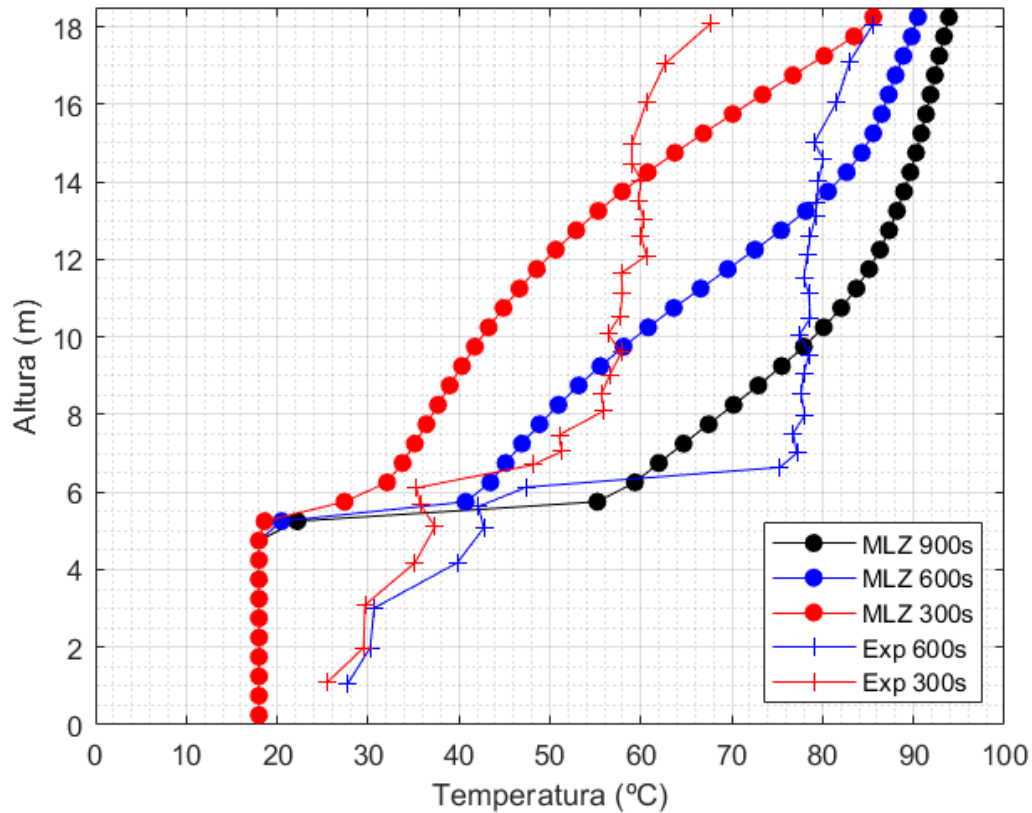


Figura 22. Test #2 Perfil de temperaturas en tres instantes de tiempo

Por otro lado, se observa un mismo comportamiento en el Test#2, Figura 24. En ella se muestra que la predicción a 900 segundos, aunque disminuye el error máximo a 15°C difiere significativamente con los datos experimentales a 500 segundos. Además, el error en la capa superior aumenta a 18°C.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

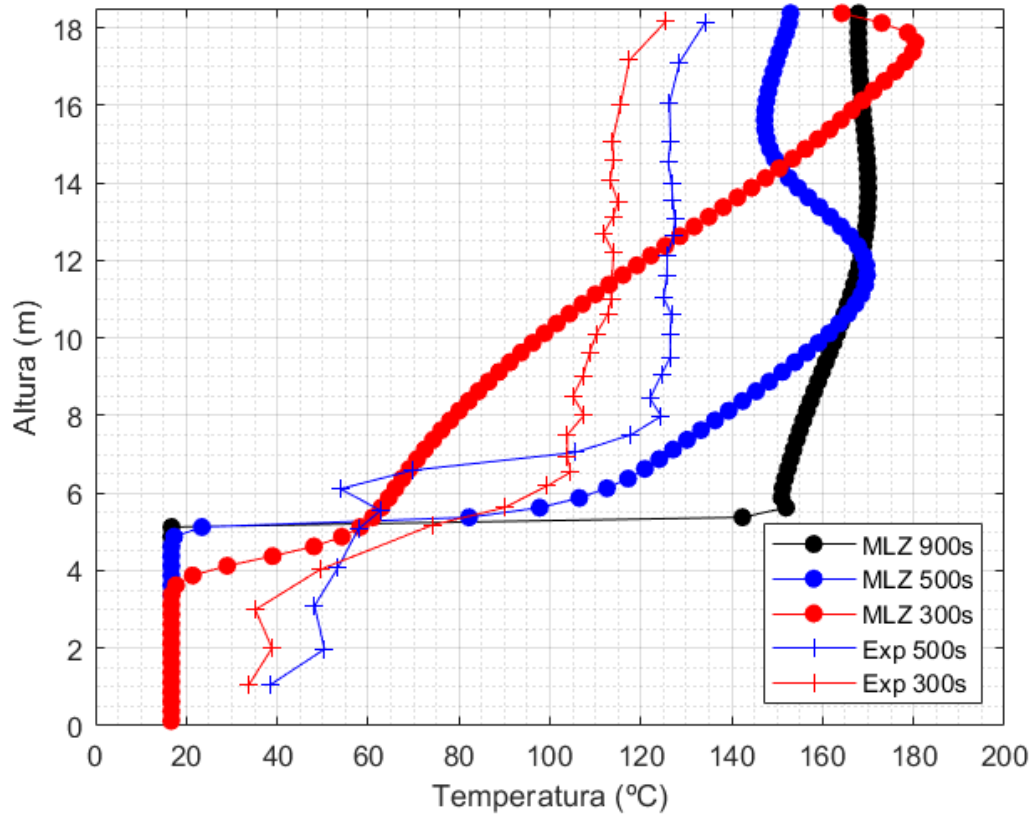


Figura 23. Test #3 Perfil de temperaturas en tres instantes de tiempo

Se observa que la evolución del perfil de temperaturas en el caso experimental difiere significativamente de la predicción del modelo multicapa-zonal desarrollado para t=300 y 500s. Sin embargo, la forma del perfil de temperaturas coincide con la predicción a 900 segundos, obteniéndose un error constante de 50°C con los datos experimentales a 500 segundos.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

4.2.1.5 Comparativa de diferentes modelos de producción de humo en el Test #1 y #2

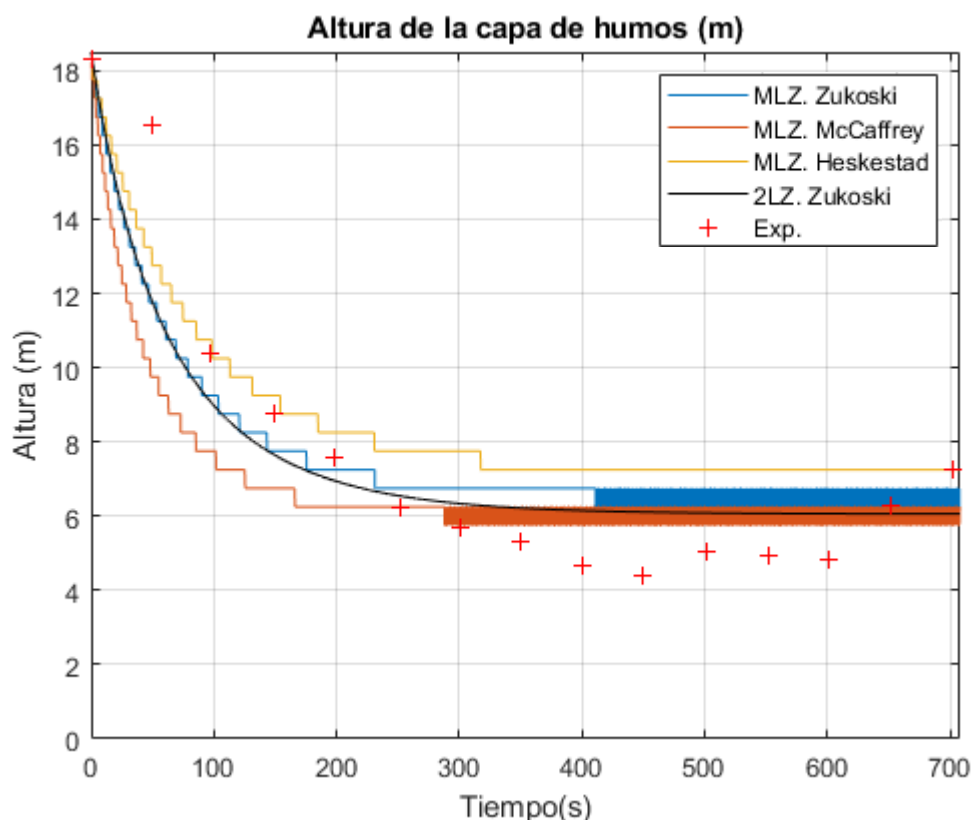


Figura 24. Altura de la capa de humo con diferentes modelos de producción de humo en el Test#1

Por último, se han analizado diferentes modelos de producción de humo, descritos en el apartado 3.2.1.5. En concreto se han comparado los modelos presentados por Zukoski, [8], McCaffrey[9] y Heskestad [22] implementados en el modelo multicapa-zonal desarrollado. También se ha comparado con el modelo zonal y el Test #1 y #2 del caso de estudio.

En la fase transitoria hasta 200 segundos se observa que el modelo desarrollado por Heskestad predice con mayor exactitud en comparación a los demás modelos. Sin embargo, en la fase en régimen permanente del modelo el modelo desarrollado por McCaffrey predice mejor la altura de la capa de humos en comparación con los demás modelos, siendo el modelo de Heskestad el menos preciso. En el Test#1 no es posible comparar los errores de los modelos debido a la baja estabilidad de la altura en los datos experimentales.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

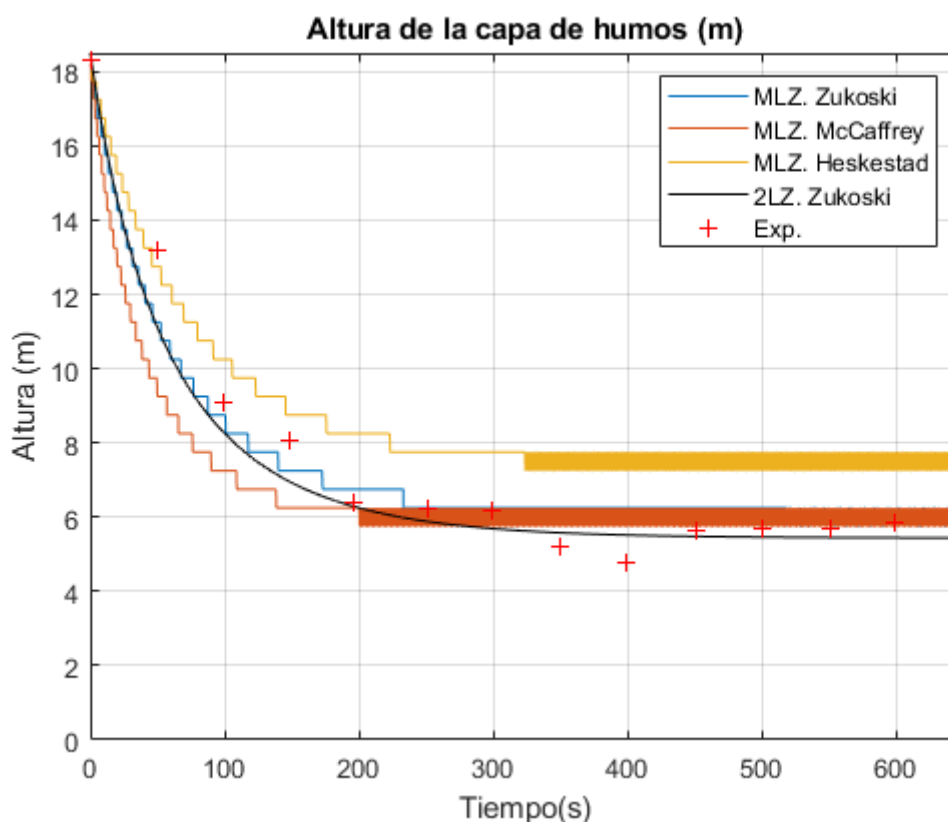


Figura 25. Altura de la capa de humo con diferentes modelos de producción de humo en el Test#2

En el Test#2, se observa que los datos experimentales son estables al final de la simulación. Implementando los diferentes modelos de producción de humo observamos que el modelo desarrollado por Heskestad tiene un error máximo de 2.5 metros siendo un 13.6% de error relativo, y un error, al final de la simulación, de 1.4 metros y 7.7% de error relativo.

En la fase transitoria hasta 200 segundos se observa una diferencia entre los modelos de Zukoski y McCaffrey. Este último modelo tiene una menor precisión en la predicción con un error máximo de 2.75 metros, un 15% relativo. Con un rango de error relativo de 9.5-15%, en comparación con el 2-8% de error relativo del modelo de Zukoski. Siendo el error en la fase en régimen permanente igual, al tener el mismo valor.

Por último, quiero destacar la correcta predicción de la capa de humos a partir de los 450 segundos de simulación de los modelos de Zukoski y McCaffrey.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Esta diferencia en la predicción de la capa de humos según la correlación utilizada hace que los resultados obtenidos con el uso de este tipo de modelos en el diseño de los sistemas de ventilación haya que analizarlos en detalle. Es muy importante, por tanto, especificar la correlación utilizada, e incluso poder ofrecer resultados con las diferentes correlaciones, mostrando el rango de soluciones con el rango de incertidumbre correspondiente.

Capítulo 5. OBJETIVOS DESARROLLO SOSTENIBLE

En el año 2015, se aprobaron 17 objetivos con el fin de garantizar unos principios básicos que pongan fin a la pobreza, protejan al planeta y aseguren la prosperidad de las sociedades. Dichos principios se denominan Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) cuyas metas deben alcanzarse en un plazo de 15 años. Por lo tanto, con el fin de lograr estas metas, los proyectos deben estar alineados con estos objetivos.

Este proyecto tiene un mayor impacto en el tercer ODS (Salud y Bienestar), aunque también favorece a la consecución de los objetivos 9 y 13 (Industria, Innovación e Infraestructura y Acción por el clima respectivamente):

Salud y bienestar: Este proyecto, persigue lograr una mejoría de los sistemas protección contra incendios. La mayor eficiencia del método desarrollado mediante simulaciones multicapa-zonal, permite realizar un mayor número de pruebas (simulaciones) de seguridad a un menor coste. De esta forma, se puede diseñar el sistema de protección contra incendios óptimo y adecuado para cada entorno.

Industria, Innovación e Infraestructura: en este objetivo se expone que el progreso tecnológico debe dirigir los esfuerzos a alcanzar una mayor eficiencia energética, aumentar la eficiencia de los recursos empleados y alcanzar los objetivos medioambientales. Este proyecto propone un método alternativo a los ensayos experimentales para analizar los sistemas de protección contra incendios. Dichos ensayos suponen un alto coste económico y de recursos. Por lo tanto, este proyecto ofrece una solución tecnológica a la necesidad de analizar los sistemas de protección contra incendios, realizando simulaciones en un entorno informático para obtener resultados de una manera más eficiente, sin dañar tanto el medioambiente y consumiendo menos recursos que con otros métodos, como son los ensayos experimentales.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

Acción por el clima: con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de protección contra incendios se realizan ensayos experimentales. En estos ensayos se libera grandes cantidades de CO₂ que agravan el calentamiento global. Con el modelo multicapa-zonal se puede simular la respuesta de dichos sistemas frente a incendios en multitud de situaciones sin impactar negativamente en el medioambiente.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha desarrollado un modelo multicapa-zonal para la predicción de incendios, contrastando los resultados obtenidos con los ensayos realizados en el atrio de Murcia, España y con el modelo bizonal clásico. Para ello, se han comparado la evolución de los perfiles de temperatura en función de la altura y el descenso de la capa de humos en tres ensayos con potencias de incendio entre 1.7 – 5.3 MW con diferentes tasas de extracción mecánica. El análisis desarrollado en los tres ensayos ha mostrado que el rango de errores relativo alcanzado es de 0-8% en para la predicción de la altura de la capa de humos con el modelo de Zukoski. Por otro lado, el modelo predice con un error de entre 1-18°C la temperatura de la capa superior en régimen permanente. Sin embargo, se observa un desfase temporal de entre 400-700s del perfil de temperaturas obtenido del modelo con el experimental.

La discrepancia tan elevada en las capas superiores se puede deber a que la tasa de liberación de calor del modelo multicapa-zonal es constante a lo largo de todo el ensayo, mientras que, en los experimentos, tarda más de 200 s en llegar a régimen permanente.

Comparando los diferentes modelos de producción de humo se concluye que el modelo de Heskestad tiene una precisión inferior a los modelos desarrollados por Zukoski y McCaffrey. Por tanto, se debe especificarla correlación utilizada en este tipo de modelos ofreciendo siempre el grado de incertidumbre de su uso en el diseño de sistemas de ventilación de incendios.

Por último, cabe destacar que el tiempo computacional del modelo multicapa-zonal ha sido menor de 30 segundos observando un aumento del tiempo computacional con la disminución de la altura de las capas del recinto.

Finalmente, el modelo multicapa-zonal desarrollado ofrece una buena predicción de la altura de la capa de humos y una predicción razonable de la temperatura en las capas superiores,

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

además de una reducción significativa del tiempo computacional frente a los modelos CFD. Sin embargo, las predicciones de temperatura en la mayor parte del recinto no son correctas y es necesario continuar su desarrollo para mejorar su precisión y su capacidad de predicción.

Con el fin de mejorar la precisión del modelo desarrollado, en futuros desarrollos se debería implementar la transferencia de calor por radiación y convección con las paredes y el techo, además de la transferencia entre capas. Además, otra posible mejora sería la implementación de la ventilación natural a través de las aberturas y unas tasas de liberación de calor dependientes del tiempo para mejorar la predicción de la temperatura en las fases iniciales de la simulación.

Adicionalmente, el desarrollo de un modelo multicapa-zonal que permita dividir el dominio de estudio en capas horizontales y verticales mejoraría significativamente precisión del modelo en la predicción de temperaturas.

Finalmente, se debería revisar el cálculo de la temperatura de las diferentes capas en función del tiempo, dado que los modelos presentan un retraso en la predicción de la temperatura en capas intermedias.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Ayala, A. Cantizano, G. Rein, G. Vigne, and C. Gutiérrez-Montes, “Fire Experiments and Simulations in a Full-scale Atrium Under Transient and Asymmetric Venting Conditions,” *Fire Technol.* 2015 521, vol. 52, no. 1, pp. 51–78, Jun. 2015, doi: 10.1007/S10694-015-0487-9.
- [2] T. Beji, S. Verstockt, R. Van de Walle, and B. Merci, “Prediction of smoke filling in large volumes by means of data assimilation-based numerical simulations:,” <http://dx.doi.org/10.1177/0734904112437845>, vol. 30, no. 4, pp. 300–317, Mar. 2012, doi: 10.1177/0734904112437845.
- [3] K. Suzuki, T. Tanaka, and K. Harada, “Tunnel fire simulation model with multi-layer zone concept,” *Fire Saf. Sci.*, pp. 713–723, 2008, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-713.
- [4] N. Johansson, “Evaluation of a zone model for fire safety engineering in large spaces,” *Fire Saf. J.*, vol. 120, p. 103122, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103122.
- [5] “ISO - ISO/TS 13447:2013 - Fire safety engineering — Guidance for use of fire zone models,” 2013. <https://www.iso.org/standard/53799.html> (accessed Aug. 23, 2021).
- [6] K. Suzuki, T. Tanaka, K. Harada, and H. Yoshida, “7B-2 An application of A Multi-layer Zone Model to A Tunnel fire,” 2004. Accessed: Apr. 18, 2021. [Online]. Available: <http://www.iafss.org/publications/aofst/6/7b-2>.
- [7] T. Nishino and K. Kagiya, “A multi-layer zone model including flame spread over linings for simulation of room-corner fire behavior in timber-lined rooms,” *Fire Saf. J.*, vol. 110, p. 102906, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2019.102906.
- [8] K. Suzuki, T. Tanaka, and K. Harada, “Computation Of Smoke Spread In A Building Fire By Multi-Layer Zone Model,” 2007.

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

- [9] B. J. Mccaffrey and D. C. Washington, “Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results,” 1979, doi: 10.6028/NBS.IR.79-1910.
- [10] D. A. Charters, W. A. Gray, and A. C. McIntosh, “A computer model to assess fire hazards in tunnels (FASIT),” *Fire Technol.* 1994 301, vol. 30, no. 1, pp. 134–154, Feb. 1994, doi: 10.1007/BF01040993.
- [11] K. Suzuki, K. Harada, and T. Tanaka, “A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a single room,” *Fire Saf. Sci.*, pp. 851–862, 2003, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.7-851.
- [12] KAWAGOE and K., “Fire Behaviour in Room,” *BRI Rep.*, vol. 27, 1958, Accessed: Apr. 17, 2021. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10027656712>.
- [13] “En: 1-2: 2002 Eurocode 1: Actions on structures—Part... - Google Académico.” [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Eurocode 1%3A Actions on Structures - Part 1-2%3A General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire&author=En 1991-1-2&publication_year=2002](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Eurocode+1%3A+Actions+on+Structures+-+Part+1-2%3A+General+Actions+-+Actions+on+Structures+Exposed+to+Fire&author=En+1991-1-2&publication_year=2002) (accessed Apr. 17, 2021).
- [14] J. Stern-Gottfried and G. Rein, “Travelling fires for structural design-Part II: Design methodology,” *Fire Saf. J.*, vol. 54, pp. 96–112, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2012.06.011.
- [15] G. Rein *et al.*, “MULTI-STOREY FIRE ANALYSIS FOR HIGH-RISE BUILDINGS,” 2007. Accessed: Apr. 17, 2021. [Online]. Available: <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/1980>.
- [16] R. L. Alpert, “Turbulent ceiling-jet induced by large-scale fires,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 5–6, pp. 197–213, Oct. 1975, doi: 10.1080/00102207508946699.
- [17] W. J. Bong, “Limitations of Zone Models and CFD Models for Natural Smoke Filling in Large Spaces,” 2012. Accessed: Apr. 18, 2021. [Online]. Available:

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

<http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/10342>.

- [18] K. D. Steckler, J. G. Quintiere, and W. J. Rinkinen, "Flow induced by fire in a compartment," *Symp. Combust.*, vol. 19, no. 1, pp. 913–920, Jan. 1982, doi: 10.1016/S0082-0784(82)80267-1.
- [19] C. Xiaojun, Y. Lizhong, D. Zhihua, and F. Weicheng, "A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room," *Fire Saf. J.*, vol. 40, no. 3, pp. 267–281, Apr. 2005, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2005.01.005.
- [20] U. Wickström, "Pre-flashover Compartment Fires: Two-Zone Models," *Temp. Calc. Fire Saf. Eng.*, pp. 175–183, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-30172-3_11.
- [21] G. Heskestad, "Fire plume air entrainment according to two competing assumptions," *Symp. Combust.*, vol. 21, no. 1, pp. 111–120, Jan. 1988, doi: 10.1016/S0082-0784(88)80237-6.
- [22] G. Heskestad, "Luminous heights of turbulent diffusion flames," *Fire Saf. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 103–108, Jan. 1983, doi: 10.1016/0379-7112(83)90002-4.
- [23] O. Sugawa and M. Tobari, "Behavior of Flame/Plume Flow In and Near Corner Fire: Entrainment Coefficient for Corner Fire.," 2000, Accessed: Aug. 21, 2021. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/publications/behavior-flameplume-flow-and-near-corner-fire-entrainment-coefficient-corner-fire>.
- [24] K. N. T. Tanaka, "A model for predicting smoke transport in buildings based on two layer zone concept," 1989. [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=A Model for Predicting Smoke Transport in Buildings Based on Two Layer Zone Concept&author=T. Tanaka&publication_year=1989](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=A+Model+for+Predicting+Smoke+Transport+in+Buildings+Based+on+Two+Layer+Zone+Concept&author=T.+Tanaka&publication_year=1989) (accessed Aug. 19, 2021).

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

ANEXO I

CÓDIGO MODELO MULTICAPA-ZONAL PARA ATRIOS

```
%% Multizone Atrio Model
% Iñigo Manrique Bautista
close all;
clear all;

%% Cargar datos
load('T1_Humo.mat');
T1_Humo_MZ=load('T1_Humo_MZ.mat','h');
T1_T_MZ=load('T1_T_MZ.mat','T');
load('T1_T_0.mat');
load('T1_T_15m.mat');
load('T1_T_100.mat');
load('T1_T_200.mat');
load('T1_T_300.mat');
load('T1_T_400.mat');
load('T1_T_500.mat');
load('T1_T_600.mat');

%% Changelog con respecto a 3
% Producción de humo corregida

%% Parametros y constantes

%ATRIUM CHARACTERISTICS
At.da = 1.216;           %Densidad [kg/m3]
At.g = 9.8;             %Gravedad [m/s2]
At.Cp = 1;              %C_p
At.C = 0.21;            %Coeficiente Fire Plume
At.Ta = 293.1;          %Temperatura Ambiente [K]
At.H0 = 18.5;           %Altura del atrio [m]
At.DH0 = 0.5;           %Altura de la zona [m]
At.A = 380.25;          %Base del atrio 20x20 [m2]
At.V = At.A*At.DH0;     %Volumen de la zona [m3]
At.alpha = 0.65;        %Flow coefficient
At.B = 2;               %Ancho de la apertura [m]
% At.HCE = 44647;        Entalpia de combustión del Heptano
% At.CEff = 0.92;        Eficiencia de combustion
% At.mfuel0 = 134.1;     Masa inicial de fuel
% At.mfuel = 97.6;       Masa final de fuel
At.duration = 1400;      %Tiempo del test 708
% At.mfuel = (At.mfuel0 - At.mfuel)/At.duration; Tasa de evaporación de
% combustible (kg/s)--> "m punto"
% At.Q = At.mfuel*At.HCE*At.CEff; Heat release rate (tasa de liberación
de
% calor)
At.Q = 1700;             %Heat Release Rate [KW]
```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```

At.Ve = 18.32;           %Caudal de extracción [m3/s]
At.Ve1 = 18.32;          %Caudal de extracción 1[m3/s]
At.Ve2 = 27.5;           %Caudal de extracción 2[m3/s]
At.dt = 0.01;            %Incrementos de tiempo
At.D = 1;                %Diametro del fire source original eq15
At.TimeSteps= At.duration/At.dt % Número de time steps en el bucle

ni= At.H0/At.DH0;        %Número de zonas verticales
Z=0:At.DH0:At.H0;        %Vector de alturas de las superficies entre capas
[p o]=size(Z);
Zm= Z(2:o)-At.DH0/2;      %Vector de altura medias de cada capa
Zmt=transpose(Zm);
k=2;

for i = 1:ni

    Dzm(i)=Z(i+1)^(5/3) - Z(i)^(5/3);

end
Dzmt=transpose(Dzm);
At.Qc=At.Q*At.alpha;
% Heskeastad
Lf1=0.235*At.Q^0.4 - 1.02*At.D;
z0=0.083*At.Qc^0.4 - 1.02*At.D;
%% Variables
% La designación de las variables es (i,j,k)
% i zona vertical i (Abajo 1)
% k tiempo k

% du Densidad en la zona i en el tiempo k [kg/m3]
% Tu Temperatura en la zona i en el tiempo k [K]
% rv Multiplicación de du x Vu
% mv Flujo másico vertical de la zona i a la zona i-1 en el tiempo k
[kg/s]
% Qv Flujo de calor vertical de la zona i a la zona i-1 en el tiempo k
% mfp Flujo másico de la zona i a la columna de fuego en el tiempo k
[kg/s]
% ms Flujo másico de la zona i al ambiente en el tiempo k [kg/s]
% ma Flujo másico del ambiente a la zona i en el tiempo k [kg/s]

% DP Incremento de presión de la zona i,j en el tiempo k [Pa]
%% Prealocación de memoria
% Incrementa la rapidez y el rendimiento del programa
du=zeros(ni,At.TimeSteps);
Tu=zeros(ni,At.TimeSteps);
rv=zeros(ni,At.TimeSteps);
mv=zeros(ni,At.TimeSteps);
Qv=zeros(ni,At.TimeSteps);
mfp=zeros(ni,At.TimeSteps);
t=zeros(1,At.TimeSteps);
Vu=zeros(1,At.TimeSteps);
h=zeros(1,At.TimeSteps);
c=zeros(1,At.TimeSteps);

```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```
mp=zeros(ni,At.TimeSteps);

%% Condiciones iniciales

du(1:ni,[1 2]) = At.da;
Tu(1:ni,[1 2]) = At.Ta;
%E(1:ni,[1 2]) = du(1:ni,[1 2]).*At.V.*At.Cp.*(Tu(1:ni,[1 2])-At.Ta);
rv(1:ni,[1 2]) = du(1:ni,[1 2]).*At.V;
h([1,2]) = At.H0;
c([1,2]) = ni;
t(1)=0;

%% Modelo

while At.dt*k <= At.duration

    % Flujo másico de fire plume
    % mfp Eq.14
    mfp(1:(ni-1),k) = 0.015 * At.Q^(1/3) * At.DH0;
    mfp(1:(ni-1),k) =
    At.C*((At.da^2*At.g)/(At.Cp*At.Ta))^(1/3)*At.Q^(1/3) * At.DH0;
    mfp(1:(c(k)),k) =
    At.C*((At.da^2*At.g)/(At.Cp*At.Ta))^(1/3)*(At.Q^(1/3)).*(Zmt(1:c(k)).^(5/3));
    mfp(1:(c(k)),k) =
    At.C*((At.da^2*At.g)/(At.Cp*At.Ta))^(1/3)*At.Q^(1/3) .* Dzmt(1:c(k));
    mfp(1:(ni),k) = 0.08 * At.Q^(1/3) .* Dzmt;

    %McAffrey
    for i = 1:ni
        if (0<(Zm(i)/At.Q^0.4)) && ((Zm(i)/At.Q^0.4)<0.08)
            mp(i,k)=0.011*At.Q*(Zm(i)/At.Q^0.4)^0.566;
        elseif (0.08<(Zm(i)/At.Q^0.4)) && ((Zm(i)/At.Q^0.4)<0.20)
            mp(i,k)=0.026*At.Q*(Zm(i)/At.Q^0.4)^0.909;
        elseif (0.2<(Zm(i)/At.Q^0.4))
            mp(i,k)=0.124*At.Q*(Zm(i)/At.Q^0.4)^1.895;
        else
            mp(i,k)=0;
        end
    end
    for i = 1:ni
        if Zm(i)<h(k)
            if i==1
                mfp(i,k)=mp(i,k);
            else
                mfp(i,k)=mp(i,k)-mp(i-1,k);
            end
        else
            mfp(i,k)=0;
        end
    end
end

% Heskeastad
for i = 1:ni
    if Zm(i)>Lfl
        mp(i,k)=0.071*At.Qc^(1/3)*(Zm(i)-z0)^(5/3)+1.92*10^(-3)*At.Qc;
```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```
% elseif Zm(i)<Lfl
% mp(i,k)=0.0056*At.Q*(Zm(i)/Lfl);
% else
% mp(i,k)=0;
% end
% end
% for i = 1:ni
% if Zm(i)<h(k)
% if i==1
% mfp(i,k)=mp(i,k);
% else
% mfp(i,k)=mp(i,k)-mp(i-1,k);
% mfp(8,k)=1.3277;
% end
% else
% mfp(i,k)=0;
% end
% end
% end

for i = ni:-1:1
% Densidad
du(i,k) = (At.da*At.Ta)/Tu(i,k);
% Rv
rv(i,k) = du(i,k)*At.V;
% Flujo másico entre capas

% mv Eq.20
if i==ni
me(k) = At.Ve * du(ni,k);
mv(i,k) = sum(mfp(1:ni,k)) - (rv(i,k) - rv(i,k-1))/At.dt -
me(k);
else
% mv Eq.21
mv(i,k) = -mfp(i,k) - (rv(i,k) - rv(i,k-1))/At.dt +
mv(i+1,k);
if mv(i+1,k)>=0
Qv(i+1,k) = mv(i+1,k)*At.Cp*Tu(i+1,k);
else
Qv(i+1,k) = mv(i+1,k)*At.Cp*Tu(i,k);
end

end
end
for i = ni:-1:1
% Temperatura
if i==ni
% Eq.10
Tu(i,k+1) = Tu(i,k) + At.dt*(At.alpha*At.Q +
sum(mfp(:,k)).*At.Cp.*(Tu(:,k)-Tu(i,k))) - Qv(i,k) +
At.Cp*mv(i,k)*Tu(i,k))/(At.Cp*du(i,k)*At.V);
elseif i==1
% Eq.12
```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```

Tu(i,k+1) = Tu(i,k) + At.dt*(Qv(i+1,k) -
At.Cp*mv(i+1,k)*Tu(i,k))/(At.Cp*du(i,k)*At.V);
else
    % Eq.11
    Tu(i,k+1) = Tu(i,k) + At.dt*((Qv(i+1,k) - Qv(i,k)) -
At.Cp*(mv(i+1,k) - mv(i,k))*Tu(i,k))/(At.Cp*du(i,k)*At.V);
end

% Densidad
% if i==ni
%     % Eq.1
%     rv(i,k+1) = rv(i,k) + At.dt*(sum(mfp(:,k)) - mv(i,k));
% else
%     if i==1
%         % Eq.3
%         rv(i,k+1) = rv(i,k) + At.dt*(-mfp(i,k) + mv(i+1,k));
%     else
%         % Eq.2
%         rv(i,k+1) = rv(i,k) + At.dt*(-mfp(i,k) + mv(i+1,k) -
mv(i,k));
%     end
% end

end

Vu(k+1) = Vu(k) + (sum(mfp(:,k))/du(i,k) - At.Ve)*At.dt;

% Altura de la capa de humos
if (At.H0 - Vu(k+1)/At.A)>0
    h(k+1) = At.H0 - Vu(k+1)/At.A;
    [~,I] = min(abs(Z-h(k+1)));
    c(k+1) = I-1;
else
    h(k+1)=0;
end

t(k+1)= t(k) + At.dt;
k = k + 1;

end

%% Resultados
% Kelvin a Grados
T=Tu-273;
TempLim=100;

figure(1)
plot(t(1:70801),T(15/At.DH0,1:70801));
hold on;
plot(T1_T_15m(:,1),T1_T_15m(:,2),'r+');
axis([0 708 0 TempLim]);
title('Temperatura a 15 metros (°C)');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Temperatura (°C)');
grid on;

```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```

legend('MLZ.', 'Exp. ');

figure(2)
plot(t(1:70801), Zm(c(1:70801)));
hold on;
plot(t(1:70801), T1_Humo_MZ.h(:), 'k');
plot(T1_Humo(:,1), T1_Humo(:,2), 'r+');
axis([0 708 0 At.H0]);
title('Altura de la capa de humos (m)');
xlabel('Tiempo(s)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
legend('MLZ.', '2LZ.', 'Exp. ');

%Plot de temperatura por capas

TTMZ=Z;
h100=T1_Humo_MZ.h(100/At.dt);
TTMZ(TTMZ>h100)=T1_T_MZ.T(100/At.dt);
TTMZ(TTMZ<h100)=T(1,1);

figure(3)
subplot(2,3,1)
plot(T(:,100/At.dt), Zm(:), '-o', 'MarkerFaceColor', 'b');
hold on;
plot(TTMZ, Z, 'k');
plot(T1_T_100(:,1), T1_T_100(:,2), 'r+');
axis([0 TempLim 0 At.H0]);
title(['Tiempo = ', num2str(100), 's']);
xlabel('Temperatura (°C)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
grid minor;
legend('MLZ.', '2LZ.', 'Exp.', 'location', 'southeast');

TTMZ=Z;
h100=T1_Humo_MZ.h(200/At.dt);
TTMZ(TTMZ>h100)=T1_T_MZ.T(200/At.dt);
TTMZ(TTMZ<h100)=T(1,1);

subplot(2,3,2)
plot(T(:,200/At.dt), Zm(:), '-o', 'MarkerFaceColor', 'b');
hold on;
plot(TTMZ, Z, 'k');
plot(T1_T_200(:,1), T1_T_200(:,2), 'r+');
axis([0 TempLim 0 At.H0]);
title(['Tiempo = ', num2str(200), 's']);
xlabel('Temperatura (°C)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
grid minor;
legend('MLZ.', '2LZ.', 'Exp.', 'location', 'southeast');

TTMZ=Z;
h100=T1_Humo_MZ.h(300/At.dt);

```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```

TTMZ (TTMZ>h100)=T1_T_MZ.T(300/At.dt);
TTMZ (TTMZ<h100)=T(1,1);

subplot(2,3,3)
plot(T(:,300/At.dt),Zm(:),'-o','MarkerFaceColor','b');
hold on;
plot(TTMZ,Z,'k');
plot(T1_T_300(:,1),T1_T_300(:,2),'r+');
axis([0 TempLim 0 At.H0]);
title(['Tiempo = ',num2str(300),'s']);
xlabel('Temperatura (°C)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
grid minor;
legend('MLZ.','2LZ.','Exp.','location','southeast');

TTMZ=Z;
h100=T1_Humo_MZ.h(400/At.dt);
TTMZ (TTMZ>h100)=T1_T_MZ.T(400/At.dt);
TTMZ (TTMZ<h100)=T(1,1);

subplot(2,3,4)
plot(T(:,400/At.dt),Zm(:),'-o','MarkerFaceColor','b');
hold on;
plot(TTMZ,Z,'k');
plot(T1_T_400(:,1),T1_T_400(:,2),'r+');
axis([0 TempLim 0 At.H0]);
title(['Tiempo = ',num2str(400),'s']);
xlabel('Temperatura (°C)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
grid minor;
legend('MLZ.','2LZ.','Exp.','location','southeast');

TTMZ=Z;
h100=T1_Humo_MZ.h(500/At.dt);
TTMZ (TTMZ>h100)=T1_T_MZ.T(500/At.dt);
TTMZ (TTMZ<h100)=T(1,1);

subplot(2,3,5)
plot(T(:,500/At.dt),Zm(:),'-o','MarkerFaceColor','b');
hold on;
plot(TTMZ,Z,'k');
plot(T1_T_500(:,1),T1_T_500(:,2),'r+');
axis([0 TempLim 0 At.H0]);
title(['Tiempo = ',num2str(500),'s']);
xlabel('Temperatura (°C)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
grid minor;
legend('MLZ.','2LZ.','Exp.','location','southeast');

TTMZ=Z;
h100=T1_Humo_MZ.h(600/At.dt);
TTMZ (TTMZ>h100)=T1_T_MZ.T(600/At.dt);

```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```
TTMZ (TTMZ<h100)=T(1,1);

subplot(2,3,6)
plot(T(:,600/At.dt),Zm(:),'-o','MarkerFaceColor','b');
hold on;
plot(TTMZ,Z,'k');
plot(T1_T_600(:,1),T1_T_600(:,2),'r+');
axis([0 TempLim 0 At.H0]);
title(['Tiempo = ',num2str(600),'s']);
xlabel('Temperatura (°C)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
grid minor;
legend('MLZ.','2LZ.','Exp.','location','southeast');

figure(4)
plot(T(:,1300/At.dt),Zm(:),'k-o','MarkerFaceColor','k');
hold on;
plot(T(:,600/At.dt),Zm(:),'b-o','MarkerFaceColor','b');
plot(T(:,300/At.dt),Zm(:),'r-o','MarkerFaceColor','r');
plot(T1_T_600(:,1),T1_T_600(:,2),'b-+');
plot(T1_T_300(:,1),T1_T_300(:,2),'r-+');
axis([0 TempLim 0 At.H0]);
xlabel('Temperatura (°C)');
ylabel('Altura (m)');
grid on;
grid minor;
legend('MLZ 1300s','MLZ 600s','MLZ 300s','Exp 600s','Exp 300s','location','southeast');
```

CÓDIGO MODELO MULTICAPA-ZONAL PARA TUNELES

```
%% Multizone Tunnel Model
% Iñigo Manrique Bautista

%% CONSTANTES

%TUNNEL CHARACTERISTICS
Tnl.da = 1.216; % Densidad [kg/m3]
Tnl.g = 9.8; % Gravedad [m/s2]
Tnl.Cp = 1; % C_p [kJ/kgK]
Tnl.Ta = 291; % Temperatura
Ambiente [K]
Tnl.L0 = 20; % Longitud del tunel
[m]
Tnl.D0 = 0.3; % Diámetro del tunel
[m]
%Tnl.An0 = 10; % Anchura del tunel
[m]
%Tnl.A0 = 10; % Altura del tunel
[m]
```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```
%Tnl.A = Tnl.A0*Tnl.An0; % Sección del tunel
[m2]
Tnl.DL0 = 0.5; % División de zonas
longitudinales [m]
Tnl.DA0 = 0.05; % División de zonas
transversales [m]
Tnl.A = Tnl.D0^2*pi/4; % Sección del tunel
[m2]
Tnl.CvFH = 0.65; % alpha -->
Q=alpha*Q_c
Tnl.HCE = 44647; % Entalpía de
combustión del Heptano
Tnl.CEff = 0.92; % Eficiencia de
combustion [%]
Tnl.mfuel0 = 134.1; % Masa inicial de
fuel [Kg]
Tnl.mfuelf = 97.6; % Masa final de fuel
[Kg]
Tnl.duration = 647; % Tiempo del test [s]
Tnl.mfuel = (Tnl.mfuel0 - Tnl.mfuelf)/Tnl.duration; % Tasa de evaporación
de combustible [kg/s]
Tnl.Q = Tnl.mfuel*Tnl.HCE*Tnl.CEff; % Heat release rate
(tasa de liberación de calor) [KW/s]
Tnl.Vel = 0.16; % Velocidad [m/s]
Tnl.FlW = Tnl.Vel*Tnl.A*Tnl.da; % Caudal de impulsión
[m^3/s]

ni= Tnl.L0/Tnl.DL0; % Número de zonas
longitudinales
nj= Tnl.D0/Tnl.DA0; % Número de zonas
transversales

%EXPERIMENT CHARACTERISTICS

dt = 0.01; % Incrementos de
tiempo [s]
C=0.12; % Coeficiente C de la
producción de humo [%]
alfa=0.65;
Qc = Tnl.Q*Tnl.CvFH; % Flow coefficient

% ZONE VOLUME
j=1;
z(1)=0;
for j= 2:(nj/2+1)
    z(j)=Tnl.DA0+z(j-1);
    j=j+1;
end
% Calcular el area de contacto con la regiones contiguas horizontales de
cada zona del tunel Ab(i,j)
zz=2*sqrt((Tnl.D0/2)^2-z.^2);
zzz=[zz,flip1r(zz)];
Ab=zzz.*Tnl.DL0;
% Calcular el volumen de cada zona del tunel de sección circular V(i,j)
Vz=pi*zz.^2;
```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```
j=1;

for j= 1:(nj/2)
    Vz(j)=Vz(j)-Vz(j+1);
    j=j+1;
end
Vzz=[Vz, fliplr(Vz)];
Vu=Vzz.*Tnl.DL0;
% Calcular el area de pared de cada zona del tunel Aw(i,j)
% Dz=sqrt(Vu./pi);
% Dzz=[fliplr(zz),zz];
% Aw=(Dz.*pi-Dzz).*Tnl.DL0;

% Vector altura media
Zm(1)=Tnl.DA0/2;
for m=1:nj
    Zm1=Zm(m)+Tnl.DA0;
    Zm=[Zm,Zm1];
end

% Calculo de factores de visión
%% VARIABLES
% La designación de las variables es (i,j,k)
% i zona longitudinal i
% j zona transversal j
% k tiempo k

% du Densidad en la zona i,j en el tiempo k [kg/m3]
% Tu Temperatura en la zona i,j en el tiempo k [K]
% Vu Volumen en la zona i,j en el tiempo k [m3]
% Tuws Temperatura en las paredes en la zona i,j en el tiempo k [K]
% mh Flujo másico horizontal de la zona i,j a la zona i+1,j en el tiempo
k
% [kg/s]
% mv Flujo másico vertical de la zona i,j a la zona i,j-1 en el tiempo k
% [kg/s]
% mfp Flujo másico vertical (fire plume) de la zona i,j a la zona i,j-1
en el tiempo k
% [kg/s]
% Y Fracción másica de la especie en la zona i,j en el tiempo k
% Mh Flujo másico de la especie horizontal de la zona i,j a la zona
i+1,j
% en el tiempo k [kg/s]
% Mv Flujo másico vertical de la especie de la zona i,j a la zona i,j-1
en
% el tiempo k [kg/s]
% hh Intercambio de calor de la zona i,j a la zona i+1,j en el tiempo k
% [Kw]
% hv Intercambio de calor de la zona i,j a la zona i,j-j en el tiempo k
% [Kw]
% DP Incremento de presión de la zona i,j [Pa] en el tiempo k
%
%
% alphac Heat transfer coefficient
% Qw Transferencia de calor por convección con la pared del tunel de la
```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```
% zona i,j a la pared en el tiempo k [kW]
% Qr Pérdidas de calor por radiación en la zona i,j en el tiempo k [kW]
%% MODEL

duration = Tnl.duration;
k=1;

%Valores iniciales
du(1:ni,1:nj,1) = Tnl.da;
Tu(1:ni,1:nj,1) = Tnl.Ta;
Tuws(1:ni,1:nj,1) = Tnl.Ta;

t(1)=0;

while dt*k <= duration

    for i = 1:ni
        for j= 1:nj

            % Eq 4
            if mv(i,j,k) > 0
                hv(i,j,k) = Tnl.Cp*mv(i,j,k)*Tu(i,j,k);
            else
                hv(i,j,k) = Tnl.Cp*mv(i,j,k)*Tu(i,j-1,k);
            end
            % Eq 5
            if mh(i,j,k) > 0
                hh(i,j,k) = Tnl.Cp*mh(i,j,k)*Tu(i,j,k);
            else
                hh(i,j,k) = Tnl.Cp*mh(i,j,k)*Tu(i+1,j,k);
            end
            % Eqs 8
            if mv(i,j,k) > 0
                Mv(i,j,k) = mv(i,j,k)*Y(i,j,k);
            else
                Mv(i,j,k) = mv(i,j,k)*Y(i,j-1,k);
            end

            if mh(i,j,k) > 0
                Mh(i,j,k) = mh(i,j,k)*Y(i,j,k);
            else
                Mh(i,j,k) = mh(i,j,k)*Y(i+1,j,k);
            end
            % Eq 10
            du(i,j,k+1) = (Tnl.da*Tnl.Ta)/Tu(i,j,k+1);

            if j=nj;
                % Eq 13 Top
                Tu(i,j,k+1) = Tu(i,j,k) +
                (1/(Tnl.Cp*du(i,j,k)*Vu(i,j))) * (sum(mfp(i,j,k)*Tu(i,j,k)) -
                Tu(i,j,k)*sum(mfp(i,j,k)) + Qc(i) - hv(i,j,k) +
                Tnl.Cp*mv(i,j+1,k)*Tu(i,j,k) + hh(i-1,j,k) - Tnl.Cp*mh(i-1,j,k)*Tu(i,j,k)
                - hh(i,j,k) + Tnl.Cp*mh(i,j+1,k)*Tu(i,j,k) - Qw(i,j,k) - Qr(i,j,k));
            else
                % Eq 12
```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```

Tu(i,j,k+1) = Tu(i,j,k) +
(1/(Tnl.Cp*du(i,j,k)*Vu(i,j)))*(hv(i,j+1,k) -
Tnl.Cp*mv(i,j+1,k)*Tu(i,j,k) - hv(i,j,k) + Tnl.Cp*mv(i,j+1,k)*Tu(i,j,k) +
hh(i-1,j,k) - Tnl.Cp*mh(i-1,j,k)*Tu(i,j,k) - hh(i,j,k) +
Tnl.Cp*mh(i,j+1,k)*Tu(i,j,k) - Qw(i,j,k) - Qr(i,j,k));
end
if j=nj;
% Eq 15 Top
Y(i,j,k+1) = Y(i,j,k) +
(1/(du(i,j,k)*Vu(i,j)))*(sum(mfp(i,j,k)*Y(i,j,k)) -
Y(i,j,k)*sum(mfp(i,j,k)) - Mv(i,j,k) + mv(i,j,k)*Y(i,j,k) + Mh(i-1,j,k) -
mh(i-1,j,k)*Y(i,j,k) - Mh(i,j,k) + mh(i,j,k)*Y(i,j,k));
else
% Eq 14
Y(i,j,k+1) = Y(i,j,k) +
(1/(du(i,j,k)*Vu(i,j)))*(Mv(i,j+1,k) - mv(i,j+1,k)*Y(i,j,k) - Mv(i,j,k) +
mv(i,j,k)*Y(i,j,k) + Mh(i-1,j,k) - mh(i-1,j,k)*Y(i,j,k) - Mh(i,j,k) +
mh(i,j,k)*Y(i,j,k));
end
% Eq 16
DP(i,j,k) = DP(i,0,k) - Tnl.g*sum(du(i,j,k)*Tnl.DA0) +
Tnl.g*Tnl.da*Zm(j);

% Eq 17
if DP(i,j,k) - DP(i+1,j,k)>=0
mh(i,j,k) = Tnl.CvFH*Ab(i,j)*sqrt(2*du(i,j,k)*(DP(i,j,k) -
DP(i+1,j,k)));
else
mh(i,j,k) =
Tnl.CvFH*Ab(i,j)*sqrt(2*du(i+1,j,k)*(DP(i+1,j,k)-DP(i,j,k)));
end

% Eq 18

% Eq 19
mfp(i,j,k) = C*Qc*(Zm(j)^(5/3)-Zm(j-1)^(5/3));

if j=nj;
% Eq 20 Top
mv(i,j,k)=sum(mfp(i,j,k)) + mh(i-1,j,k)-mh(i,j,k)- derivad?;
else
% Eq 21
mv(i,j,k)=-mfp(i,j,k) + mv(i,j+1,k) + mh(i-1,j,k)-mh(i,j,k)-
derivad?;
end

% HEAT TRANSFER
Tm = (Tu(i,j,k)+Tuws(i,j,k))/2;
% Coeficiente de transferencia de calor en la pared i,j en el
% tiempo k
if Tm < 300
alphac = 0.005;
else if Tm > 800
alphac = 0.015;

```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```

else
    alphac = 0.001*(0.02*Tm-1);
end
end
%Convection heat transfer
% Eq 23
Qw(i,j,k) = alphac*(Tu(i,j,k)-Tuws(i,j,k))*Aw(i,j);

%Radiation heat transfer
%if
%Eq 26
qru(i,1,k) = alphag(i,1)*sigma*Tu(i,1,k)^4 + (1-
alphag(i,1))*FWU(i,1)*((1-alphaw(i,1))*qrw(i,1,k) +
alphaw(i,1)*sigma*Tws(i,1,k)^4);

%Eq 27
qru(i,j,k) = (1-alphag(i,j))*FLU(i,j)*qru(i,j-1,k) +
alphag(i,j)*sigma*Tu(i,j,k)^4 + (1-alphag(i,j))*FWU(i,j)*((1-
alphaw(i,j))*qrw(i,j,k) + alphaw(i,j)*sigma*Tws(i,j,k)^4);

%if
%Eq 28
qrd(i,nj,k) = alphag(i,nj)*sigma*Tu(i,nj,k)^4 + (1-
alphag(i,nj))*FL(i,nj)*((1-alphaw(i,1))*qrw(i,nj,k) +
alphaw(i,nj)*sigma*Tws(i,nj,k)^4);

%Eq 29
qrd(i,j,k) = (1-alphag(i,j))*FUL(i,j)*qrd(i,j-1,k) +
alphag(i,j)*sigma*Tu(i,j,k)^4 + (1-alphag(i,j))*FWL(i,j)*((1-
alphaw(i,j))*qrw(i,j,k) + alphaw(i,j)*sigma*Tws(i,j,k)^4);

%if
%Eq 30
qrw(i,1,k) = (1-alphag(i,1))*FUW(i,1)*qrd(i,2,k) +
alphag(i,1)*sigma*Tu(i,1,k)^4;

%Eq 31
qrw(i,j,k) = (1-alphag(i,j))*(FLW(i,j)*qru(i,j-
1,k)+FUW(i,j)*qrd(i,j+1,k) + alphag(i,j)*sigma*Tu(i,j,k)^4);

%Eq 32
qrw(i,nj,k) = (1-alphag(i,nj))*FLW(i,nj)*qrd(i,nj-1,k) +
alphag(i,nj)*sigma*Tu(i,nj,k)^4;

%Eq 33
Qr(i,j,k) = -Af(i,j)*(qru(i,j-1,k)-qrd(i,j,k)) - Af(i,j+1)*(-
qru(i,j,k)+qrd(i,j+1,k)) - Aw(i,j)*(qrw(i,j,k)-((1-
alphaw(i,j))*qrw(i,j,k)+alphaw(i,j)*sigma*Tws(i,j,k)^4));
%Conduction heat transfer

%Heat Release Rate

Qc(i)=Cb*mb(i)*H

```

SIMULACIÓN DE INCENDIOS CON MODELOS MULTICAPA-ZONAL

```
end  
  
end  
t(k+1)=t(k)+dt;  
k = k + 1;  
end
```