



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN
CASO DE INCENDIO DE UN TRAMO DE LÍNEA DE METRO
MEDIANTE MODELOS HÍBRIDOS 1D-3D**

Autor: Juan Latorre Cucala

Director: Pablo Ayala Santamaría

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:
Análisis numérico del sistema de ventilación en caso de incendios de un tramo de línea de
metro mediante modelos híbridos 1D-3D
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023-2024 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.: Juan Latorre Cucala

Fecha: 27/08/2024



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Pablo Ayala Santamaría

Fecha: 27 / 08 / 2024





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN
CASO DE INCENDIO DE UN TRAMO DE LÍNEA DE METRO
MEDIANTE MODELOS HÍBRIDOS 1D-3D**

Autor: Juan Latorre Cucala

Director: Pablo Ayala Santamaría

Madrid

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo. En primer lugar, agradezco de manera especial a mi director, Pablo Ayala, por su ayuda, orientación y paciencia a lo largo de todo el proceso. Sus conocimientos y apoyo han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

También quiero dar mi agradecimiento a la Universidad Pontificia Comillas, por proporcionarme los recursos, la formación académica y el entorno necesario para llevar a cabo esta investigación. Agradezco a todos los profesores y compañeros que, de una forma u otra, han contribuido en la realización de este proyecto.

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN CASO DE INCENDIO DE UN TRAMO DE LÍNEA DE METRO MEDIANTE MODELOS HÍBRIDOS 1D-3D

Autor: Latorre Cucala, Juan.

Director: Ayala Santamaría, Pablo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El metro, siendo un modo de transporte esencial en áreas urbanas, presenta desafíos significativos de seguridad, particularmente en lo que respecta a incidentes de incendios. Incidentes históricos como el incendio del metro de Bakú en 1995 y el incendio del metro de Madrid en 2023 destacan la necesidad crítica de medidas de seguridad efectivas. Esta investigación se centra en comprender el comportamiento térmico y dinámico del fuego y el humo, examinando parámetros como la distribución de temperatura, la velocidad del aire y el desarrollo de la capa de humo. Empleando herramientas avanzadas de simulación como el Fire Dynamics Simulator (FDS), el estudio compara la modelización tradicional 3D con un enfoque híbrido 1D-3D, enfatizando la eficiencia computacional y la precisión de este último. Los hallazgos revelan conocimientos significativos sobre la propagación del calor y el humo, subrayando la importancia de los sistemas de ventilación optimizados. El modelo híbrido demuestra una reducción sustancial en los recursos computacionales mientras mantiene predicciones precisas, sugiriendo su viabilidad para simulaciones a gran escala en sistemas de metro. Esta investigación contribuye a mejorar la seguridad y eficiencia de las estrategias de respuesta ante emergencias en redes de transporte subterráneo.

Palabras clave: Fuego, túneles, simulación, multiescala, FDS, ventilación, modelo híbrido, seguridad

1. Introducción

El metro es uno de los medios de transporte más populares en las grandes ciudades, utilizado por millones de personas debido a sus ventajas como la rapidez, la capacidad de descongestionar el tráfico urbano y la reducción de la contaminación. No obstante, este sistema también presenta desafíos, siendo la seguridad uno de los más importantes.

El entorno subterráneo del metro, con su espacio limitado y la alta concentración de pasajeros, genera riesgos considerables, especialmente en caso de incendios. Para abordar estos riesgos, es fundamental estudiar cómo se comporta el fuego y los gases, como el monóxido de carbono, que ascienden debido a su baja densidad y se acumulan en el techo del túnel o vagón, creando capas peligrosas de humo. Este fenómeno, conocido como estratificación del humo, es un aspecto clave que se debe considerar al diseñar sistemas de seguridad en el metro.

Los sistemas de ventilación son esenciales para evitar la acumulación de gases peligrosos. Desde hace más de un siglo, se han desarrollado varios tipos de ventilación en túneles: transversal, semitransversal, longitudinal y natural. Cada uno de estos sistemas tiene sus propias ventajas y se ha ido adaptando a las necesidades cambiantes de las infraestructuras de transporte subterráneo.

2. Estado del arte

El estudio del comportamiento del fuego y del humo en entornos subterráneos, como las líneas de metro, es fundamental para diseñar sistemas de ventilación eficaces que garanticen la seguridad de las personas y la protección de las infraestructuras. La modelación numérica ha surgido como una herramienta crucial para predecir los efectos de un incendio y desarrollar estrategias de mitigación. Sin embargo, para validar estas simulaciones, es necesario realizar experimentos a escala real, aunque estos son limitados debido a sus altos costos y la extensa cantidad de tiempo que requieren.

Desde la década de los 60, se han llevado a cabo diversos experimentos en túneles para analizar la propagación del fuego y los efectos de los gases tóxicos, comenzando con las pruebas en el túnel Ofenegg en 1965. Posteriormente, proyectos como Eureka en Noruega y el proyecto Metro en Suecia han contribuido al desarrollo de conocimientos fundamentales sobre el comportamiento del fuego en túneles. [9]

En situaciones donde los experimentos a gran escala no son viables, se han empleado modelos físicos a escala reducida y simulaciones numéricas con Dinámica de Fluidos

Computacional (CFD) para estudiar la propagación del fuego y el humo. Estas simulaciones han demostrado ser valiosas para replicar el comportamiento observado en experimentos reales y han sido validadas en diversos estudios.

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de modelos híbridos 1D-3D, que combinan la precisión del modelado tridimensional con la eficiencia computacional del modelado unidimensional. Estos modelos híbridos ofrecen una representación más completa y precisa de los escenarios de incendio, al tiempo que optimizan los recursos computacionales, haciendo posible un análisis detallado de la seguridad en túneles. Simulaciones recientes han demostrado que estos modelos híbridos mejoran significativamente la eficiencia y precisión en la evaluación de incendios en túneles, destacando su relevancia en la ingeniería de seguridad actual.

3. Análisis de sensibilidad de malla

Para realizar un análisis adecuado de la sensibilidad de un modelo numérico de una estación de metro, se ha diseñado un modelo específico que incluye una estación de metro y dos túneles conectados. El escenario simulado considera un incendio de 5 MW, situado a 20 m de la estación, y una ventilación longitudinal establecida a 1.5 m/s.

Se han evaluado tres configuraciones de malla diferentes: dos de ellas emplean mallas uniformes de 0.2 m³ y 0.4 m³, mientras que la tercera configuración utiliza una malla híbrida que combina 0.2 m³ en la zona cercana al fuego y 0.4 m³ en el resto de la estación y túneles. Para comparar la eficacia de cada malla, se analizaron las temperaturas en varias ubicaciones del modelo a lo largo del tiempo.

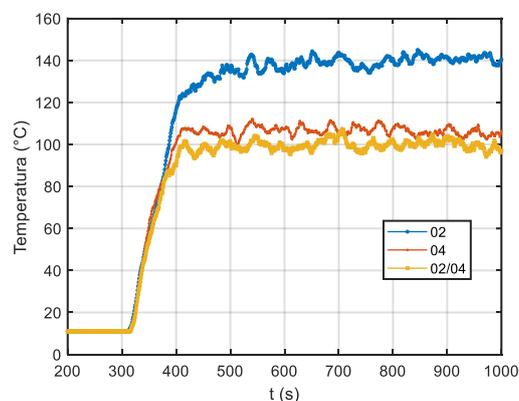


Figura 1. Evolución temporal de la temperatura en el extremo izquierdo de la estación de las tres opciones de malla

En la gráfica superior se observa una comparación de la temperatura, en el inicio de la estación, situada a 20 m del origen del incendio, de los tres tamaños de malla evaluados. Al comparar las mallas, la de 0.2 m³ mostró mayor precisión en la captura de temperaturas más altas cerca del fuego, lo que es consistente con su mayor resolución. La malla de 0.4 m³, aunque más eficiente en términos computacionales, presentó temperaturas más bajas cerca del incendio, reflejando una menor precisión. La malla híbrida, que combina elementos de ambas mallas, ofreció un equilibrio adecuado entre precisión y eficiencia, con un comportamiento intermedio.

Finalmente, se optó por utilizar la malla de 0.2 m³ debido a su capacidad para capturar con mayor detalle las fluctuaciones térmicas, lo que resulta crucial para un análisis preciso del comportamiento del fuego y la dispersión de gases. Aunque esta elección conlleva un mayor tiempo de simulación, la precisión adicional obtenida es esencial para diseñar sistemas de seguridad más efectivos.

4. Comparación del Modelo 3D con el Modelo Híbrido 1D-3D

A lo largo del proyecto, se ha demostrado que el modelo híbrido 1D-3D es una alternativa eficiente y precisa para la simulación de incendios en túneles de metro. Este enfoque combina la capacidad de modelado detallado del 3D en áreas críticas, como las cercanas al origen del incendio, con la simplicidad y eficiencia del modelado 1D en secciones del túnel donde las variaciones espaciales son menos significativas.

La principal ventaja del modelo híbrido es su capacidad para reducir los tiempos de cálculo y el uso de recursos computacionales, lo que se evidencia en un ahorro del 29.71% en los tiempos de simulación en comparación con un modelo 3D. A pesar de utilizar solo 5 núcleos frente a los 6 del modelo 3D, el modelo híbrido consigue mantener una precisión similar, con diferencias porcentuales mínimas en los resultados de temperatura, velocidad y altura de la capa de humo, que son inferiores al 5% durante gran parte de la simulación.

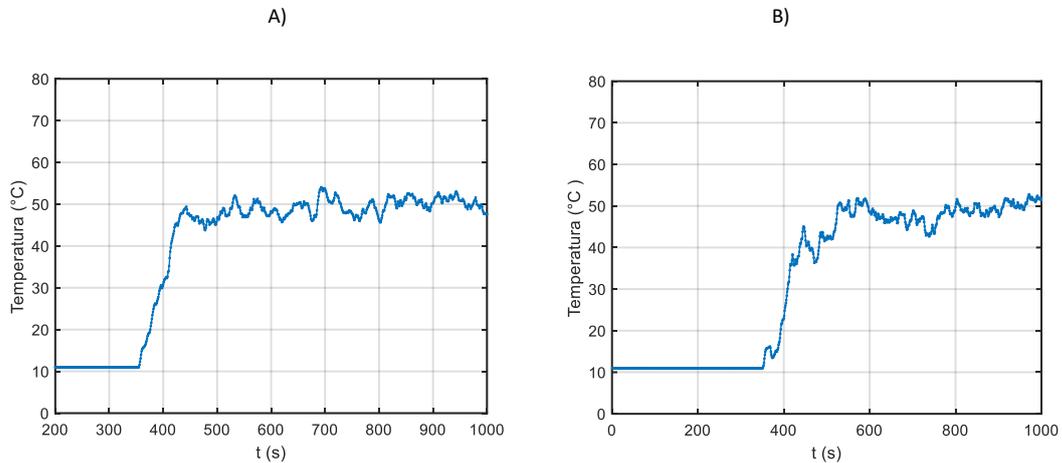


Figura 2. Evolución temporal de la temperatura a 60 m del origen de los modelos 3D y 1D-3D respectivamente

Observando las gráficas presentadas de la temperatura se puede apreciar las grandes similitudes que existen entre ambos modelos, en cuanto al patrón que siguen las temperaturas y los valores que se alcanzan, salvo por pequeñas variaciones de temperatura que no tienen razón aparente que aparecen en modelo híbrido, que pueden deberse a desajustes numéricos en el modelo. El análisis comparativo de las gráficas ha demostrado que, aunque el modelo híbrido presenta algunas fluctuaciones más suaves y menos pronunciadas en ciertos aspectos, como la distribución de velocidad en función de la altura y la evolución temporal de la capa de humo, las diferencias con el modelo 3D no son lo suficientemente significativas como para justificar el mayor costo computacional del 3D completo.

5. Conclusiones

En este proyecto se ha demostrado la eficiencia y validez del uso de un modelo híbrido 1D-3D en la simulación de incendios en tramos de metro con ventilación longitudinal, empleando FDS. A lo largo del estudio, se ha comprobado que esta metodología no solo es válida para obtener resultados precisos, sino que también

permite una significativa reducción en el coste computacional comparado con una simulación completa en 3D. En este proyecto, se ha logrado un ahorro de más del 25% en los tiempos de simulación, lo que resulta especialmente relevante en escenarios de gran escala o donde es necesario realizar múltiples iteraciones. Además, se ha verificado que, para obtener resultados precisos, el uso de un tamaño de malla adecuado es fundamental. En este caso, se ha optado por una malla de 0.2 debido a la precisión de los datos obtenidos.

En cuanto a la ventilación, se ha observado que las velocidades del aire varían significativamente a lo largo del túnel, influenciadas por factores como la distancia al fuego y la altura dentro del túnel. Se ha identificado que la convección térmica juega un papel crucial en estas variaciones, especialmente en la generación de velocidades negativas en ciertas áreas, lo que indica la presencia de corrientes de aire con sentido opuesto al flujo de la ventilación establecido que pueden impactar en la seguridad durante un incendio. Asimismo, el análisis de la capa de humo mostró que la estación más alejada del incendio no se vio afectada, lo que indica que los sistemas de ventilación funcionaron adecuadamente para contener el calor y el humo generados.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE VENTILATION SYSTEM IN CASE OF FIRE IN A METRO LINE SECTION USING HYBRID 1D-3D MODELS

Author: Latorre Cucala, Juan.

Supervisor: Ayala Santamaría, Pablo.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The metro, being an essential mode of transportation in urban areas, poses significant safety challenges, particularly concerning fire incidents. Historical incidents such as the 1995 Baku metro fire and the 2023 Madrid metro fire highlight the critical need for effective safety measures. This research focuses on understanding the thermal and dynamic behaviour of fire and smoke, examining parameters such as temperature distribution, air velocity, and smoke layer development. By employing advanced simulation tools like Fire Dynamics Simulator (FDS), the study compares traditional 3D modelling with a hybrid 1D-3D approach, emphasizing the computational efficiency and precision of the latter. The findings reveal significant insights into the propagation of heat and smoke, underlining the importance of optimized ventilation systems. The hybrid model demonstrates a substantial reduction in computational resources while maintaining accurate predictions, suggesting its viability for large-scale simulations in metro systems. This research contributes to enhancing the safety and efficiency of emergency response strategies in underground transportation networks.

Keywords: Fire, tunnels, simulation, multiscale, FDS, ventilation, hybrid model, security

1. Introduction

The metro is one of the most popular means of transportation in large cities, used by millions of people due to its advantages such as speed, its ability to ease urban traffic congestion, and its reduction of pollution. However, this system also presents challenges, with safety being one of the most significant.

The underground environment of the metro, with its limited space and high concentration of passengers, generates considerable risks, especially in the event of fires. To address these risks, it is crucial to study how fire and gases, such as carbon monoxide, behave as they rise due to their low density and accumulate at the tunnel or carriage ceiling, creating dangerous smoke layers. This phenomenon, known as smoke stratification, is a key aspect to consider when designing safety systems in the metro.

Ventilation systems are essential to prevent the accumulation of dangerous gases. For over a century, various types of tunnel ventilation have been developed: transverse, semi-transverse, longitudinal, and natural. Each of these systems has its advantages and has been adapted to the changing needs of underground transport infrastructure.

2. State of the Art

The study of fire and smoke behaviour in underground environments, such as metro lines, is essential for designing effective ventilation systems that ensure the safety of people and the protection of infrastructure. Numerical modelling has emerged as a crucial tool for predicting the effects of a fire and developing mitigation strategies. However, to validate these simulations, it is necessary to conduct full-scale experiments, although these are limited due to their high costs and the extensive time they require.

Since the 1960s, various tunnel experiments have been conducted to analyse fire spread and the effects of toxic gases, starting with tests in the Ofenegg tunnel in 1965. Subsequently, projects like Eureka in Norway and the Metro project in Sweden have contributed to the development of fundamental knowledge about fire behaviour in tunnels. [9]

In situations where large-scale experiments are not feasible, reduced-scale physical models and numerical simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD) have been employed to study fire and smoke propagation. These simulations have proven valuable in replicating behaviour observed in real experiments and have been validated in various studies.

Technological advancements have enabled the development of hybrid 1D-3D models, which combine the precision of three-dimensional modelling with the computational efficiency of one-dimensional modelling. These hybrid models offer a more complete and accurate representation of fire scenarios while optimizing computational resources, making detailed safety analysis in tunnels possible. Recent simulations have demonstrated that these hybrid models significantly improve efficiency and accuracy in evaluating tunnel fires, highlighting their relevance in current safety engineering.

3. Mesh Sensitivity Analysis

To properly conduct a mesh sensitivity analysis in a metro station fire simulation environment, a specific model has been designed that includes a metro station and two connected tunnels. The simulated scenario considers a 5 MW fire, located 20 meters from the station, and longitudinal ventilation set at 1.5 m/s.

Three different mesh configurations were evaluated: two of them use uniform meshes of 0.2 m³ and 0.4 m³, while the third configuration uses a hybrid mesh combining 0.2 m³ in the area near the fire and 0.4 m³ in the rest of the station and tunnels. To compare the effectiveness of each mesh, temperatures were analysed at various locations in the model over time.

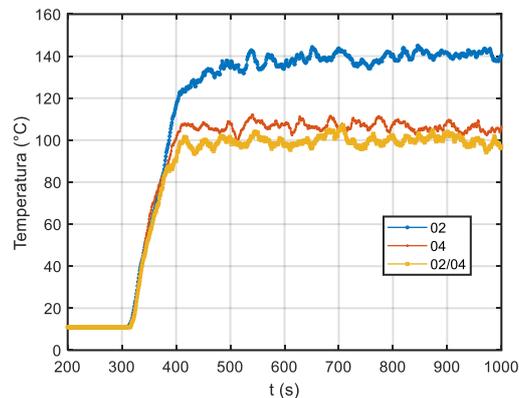


Figure 1. Temporal evolution of temperature at the left end of the station of the three meshes analysed

The upper graph shows a comparison of the temperature at the beginning of the station, located 20 meters from the origin of the fire, for the three mesh sizes evaluated. When comparing the meshes, the 0.2 m³ mesh showed greater precision in capturing higher temperatures near the fire, consistent with its higher resolution. The 0.4 m³ mesh, although more efficient in computational terms, presented lower temperatures near the fire, reflecting lower precision. The hybrid mesh, which combines elements of both, offered a suitable balance between precision and efficiency, displaying intermediate behaviour.

Finally, the 0.2 m³ mesh was chosen for its ability to capture thermal fluctuations in greater detail, which is crucial for a precise analysis of fire behaviour and gas dispersion. Although this choice involves a longer simulation time, the additional precision obtained is essential for designing more effective safety systems.

4. Comparison of the 3D Model with the Hybrid Model 1D-3D

Throughout the project, it has been demonstrated that the 1D-3D hybrid model is an efficient and accurate alternative for simulating fires in subway tunnels. This approach combines the detailed modelling capability of 3D in critical areas, such as those near the fire's origin, with the simplicity and efficiency of 1D modelling in tunnel sections where spatial variations are less significant.

The main advantage of the hybrid model is its ability to reduce computation times and resource usage, as evidenced by a 29.71% reduction in simulation times compared to a full 3D model. Despite using only five cores compared to six for the 3D model, the hybrid model manages to maintain similar accuracy, with minimal percentage differences in temperature, velocity, and smoke layer height results, which are less than 5% throughout most of the simulation.

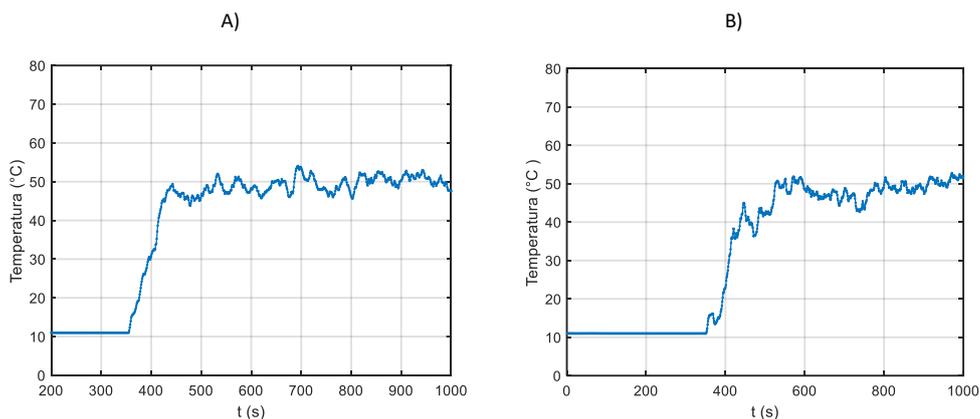


Figure 2. Temporal evolution of temperature at 60 m from the origin for the 3D and 1D-3D models, respectively.

By observing the presented temperature graphs, one can appreciate the significant similarities between both models in terms of the temperature patterns they follow and the values they reach, except for minor temperature variations that appear in the hybrid model without an apparent reason, which could be due to numerical adjustments in the model. The comparative analysis of the graphs has shown that although the hybrid model presents some smoother and less pronounced fluctuations in certain aspects, such as the distribution of velocity concerning height and the temporal evolution of the smoke layer, the differences with the 3D model are not significant enough to justify the higher computational cost of the full 3D model

5. Conclusions

This project has demonstrated the efficiency and validity of using a hybrid 1D-3D model in simulating metro fires with longitudinal ventilation, using FDS. Throughout the study, it has been proven that this methodology is not only valid for obtaining accurate results but also allows a significant reduction in computational cost compared to a full 3D simulation. In this project, more than 25% savings in simulation times have been achieved, which is particularly relevant in large-scale scenarios or where multiple iterations are needed. Additionally, it has been verified that to obtain accurate results, using an appropriate mesh size is essential. In this case, a 0.2 mesh was chosen due to the precision of the data obtained.

Regarding ventilation, it has been observed that air velocities vary significantly along the tunnel, influenced by factors such as distance from the fire and height within the tunnel. It has been identified that thermal convection plays a crucial role in these variations, especially in generating negative velocities in certain areas, indicating the presence of air currents moving in the opposite direction to the established ventilation flow, which can impact safety during a fire. Furthermore, the analysis of the smoke layer showed that the station farthest from the fire was not affected, indicating that the ventilation systems functioned adequately to contain the generated heat and smoke.

Índice de la memoria

| | |
|--|----|
| Índice de la memoria | 2 |
| 1. Introducción | 4 |
| 2. Estado del arte | 8 |
| 3. Análisis de sensibilidad de malla | 11 |
| 3.1 Comparación de perfil de temperatura longitudinal en régimen estacionario..... | 14 |
| 3.2 Análisis de diferencias entre mallas..... | 14 |
| 3.3 Perfiles de temperatura en función del tiempo | 15 |
| 3.4 Elección del tamaño de malla | 16 |
| 4. Modelo 3D..... | 18 |
| 4.1 Condiciones y parámetros para la simulación | 19 |
| 4.2 Análisis de la temperatura..... | 20 |
| 4.2.1 Evolución temporal de la temperatura | 21 |
| 4.2.2 Evolución de la temperatura con respecto a la posición en el modelo | 23 |
| 4.2.3 Conclusiones de las temperaturas | 25 |
| 4.3 Análisis de la velocidad | 25 |
| 4.3.1 Velocidad en función del tiempo..... | 26 |
| 4.3.2 Velocidad en función de la altura..... | 29 |
| 4.4 Capa de humo | 31 |
| 5. Modelo híbrido 1D-3D..... | 35 |
| 5.1 Condiciones y parámetros para la simulación | 36 |
| 5.2 Análisis de la temperatura..... | 37 |
| 5.2.1 Evolución temporal de la temperatura | 37 |
| 5.2.2 Evolución de la temperatura en función de la posición | 40 |
| 5.2.3 Temperatura en función de la altura..... | 42 |
| 5.3 Análisis de la velocidad | 43 |
| 5.3.1 Velocidad en función del tiempo..... | 44 |
| 5.3.2 Velocidad en función de la altura..... | 47 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.3.3 | Conclusiones de la velocidad del aire..... | 50 |
| 5.4 | Análisis de la capa de humo..... | 51 |
| 6. | Comparación del modelo 3D y el modelo híbrido | 55 |
| 7. | Conclusiones..... | 59 |
| 8. | Objetivos de Desarrollo Sostenible | 61 |
| 9. | Trabajos futuros | 62 |
| 10. | Apéndices | 64 |
| 11. | Bibliografía | 89 |

1. Introducción

El metro se ha convertido en uno de los métodos de transporte más recurrentes en las grandes ciudades hoy en día. Debido a sus grandes ventajas frente a otros medios de transporte, el metro es la elección para millones de usuarios que viajan de un lado de la ciudad a otra. Sin embargo, además de las numerosas ventajas como es el rápido transporte, la descongestión que supone para las carreteras en el centro urbano de las ciudades, o la reducción de contaminación que supone lo comentado justo ahora; el metro trae consigo una serie de inconvenientes o retos, y la seguridad es uno de ellos.

El metro se encuentra en un espacio subterráneo lo que supone una limitación de espacio, esto sumado a las grandes masas de gente que se pueden juntar en un espacio tan reducido se traduce en un riesgo para los usuarios. Ya han sucedido numerosos accidentes en el pasado, como puede ser la aparición de incendios, produciéndose altos costes, tanto a nivel humano como a nivel material. Algunos casos pueden ser el accidente en el metro de Bakú, la capital de Azerbaiyán, en 1995, donde se produjo una chispa en el motor originando un incendio que acabó con casi 300 fallecidos [1]. Otro ejemplo más reciente y cercano es el que tuvo lugar en octubre de 2023 y que desembocó en la prohibición de los patinetes eléctricos en los metros y cercanías. Este incendio se originó en la línea 2 del metro de Madrid y se produjo por la explosión de la batería de un patinete eléctrico que se sitiaba dentro del vagón [2]. Afortunadamente no hubo víctimas, pero fue suficiente para concienciar del peligro que puede llegar a suponer cualquier incidente en este medio de transporte.

Uno de los grandes peligros del metro son los incendios ya que, al tratarse de un espacio reducido, el fuego se puede esparcir con gran velocidad, y como las puertas están bloqueadas mientras el vehículo está en movimiento, puede llegar a ser una jaula en la que no puedes escapar. Es por eso por lo que es tan importante conocer el comportamiento del fuego, analizar su movimiento, como se desarrolla desde que empieza hasta que se ha formado completamente y como puede afectar a una persona expuesta a él. Además, es casi más importante estudiar cómo se comportan los gases originados por el fuego, ya que, en la mayoría de los accidentes producidos por fuego, no solo los que ocurren en el metro sino también en el resto de los casos, el mayor número de víctimas mortales se produce por asfixia, y no por las quemaduras del propio fuego (en torno a un 70% de las muertes se producen por asfixia). [3]

Para comenzar con el estudio, es imprescindible conocer y comprender el comportamiento del fuego y los gases que se liberan, cuál es su composición y cómo evoluciona durante el desarrollo de un incendio. El humo que se genera está compuesto por una mezcla de sustancias carbonáceas, principalmente monóxido de carbono (CO), que están suspendidas en aire caliente, y que ocupan el volumen que debería ocupar el oxígeno imposibilitando la respiración para aquellos que se encuentren en el mismo espacio que el fuego [4].

Estos gases liberados durante el incendio tienden a subir debido a su baja densidad, hasta que chocan con el techo del vagón o el túnel. Una vez que alcanzan dicha altura, se expanden horizontalmente, por eso, el tamaño del vagón es un factor clave a la hora de evaluar y analizar los efectos de un incendio. Cuando dichos gases se expanden horizontalmente, van creando unas capas de gases que son las causantes de las asfixias que se producen en este tipo de accidentes. Este fenómeno de amontonamiento de los gases se conoce como estratificación del humo, término muy relevante que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar sistemas de seguridad en medios de transporte subterráneos. [5]

Para combatir este fenómeno, y evitar que se formen capas de estos gases, hay que evacuar lo más rápido posible estos gases, además de que el flujo de aire limpio lleve una velocidad mínima. Para conseguir esto tenemos los sistemas de ventilación, distinguiéndose cuatro tipos principales: ventilación transversal, semitransversal, longitudinal y natural.

La historia de los sistemas de ventilación se remonta hasta hace más de 100 años, donde originalmente, el primer tipo que se diseñó en los túneles para lidiar con los gases contaminantes que producían los vehículos fue la ventilación transversal. La ventilación transversal consiste en dos series de conductos que actúan de forma simultánea. Una primera serie de tubos que se encarga de suministrar aire fresco para mantener el flujo de aire, situándose en el techo o suelo; y otra serie encargada de absorber mediante rejillas situadas normalmente en el techo del túnel los gases que emanan del incendio. En la figura inferior se referencia al conducto de aire con las flechas azules, y al conducto de extracción con las flechas negras, ya que siempre se sitúa en la parte superior del túnel. [6]

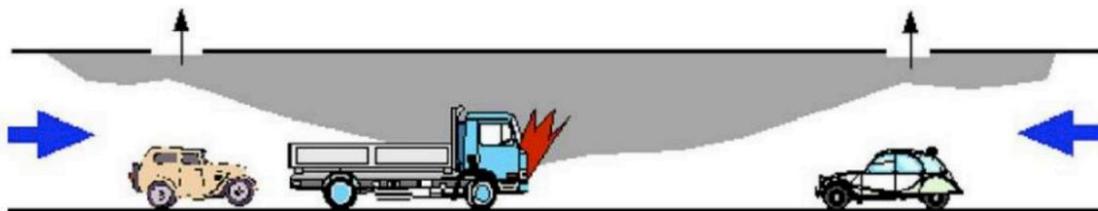


Figura 3. Ventilación transversal en caso de incendio [7]

La siguiente mejora en los sistemas de ventilación fue la ventilación transversal, que no supuso una mejora como tal de la seguridad, sino una reducción de costes, puesto que la ventilación semitransversal es muy similar a la anterior, con la diferencia que esta última no puede realizar los dos procesos simultáneamente. La ventilación semitransversal o suministra aire fresco, o extrae los gases que se encuentren en el túnel [6] [7].

En la década de 1980, con el auge de las grandes ciudades y la necesidad de descongestionar el tráfico, se impulsa el uso del metro, y con eso se desarrollan nuevas mejoras en los sistemas de seguridad. Surge un nuevo tipo de ventilación que contó con un gran éxito a nivel global debido a su sencillo mecanismo y sus costes bajos: la ventilación longitudinal. En la ventilación longitudinal el principal protagonista son los ventiladores de chorro, “jet fans”, ventiladores situados normalmente en el techo del túnel que cuenta con unas hélices y se encargan de mover el flujo de aire o el humo en caso de incendio en un sentido determinado, de forma que los gases no son eliminados, sino que se transportan. En la ventilación longitudinal aparece un parámetro nuevo e imprescindible tener en cuenta a la hora de diseñar este sistema: la velocidad crítica. La velocidad crítica es la mínima velocidad que debe tener el flujo producido por los “jet fans” para que el flujo de humo se mueva únicamente en una dirección, y por lo tanto pueda ser evacuado correctamente. [6] [7]



Figura 4. Ventilación longitudinal en caso de incendio [7]

El último sistema de ventilación es la ventilación natural. La ventilación natural es un proceso mediante el cual se permite el intercambio de aire en un espacio interior de manera pasiva, sin depender de sistemas mecánicos. Este método se basa en utilizar las fuerzas naturales como la fuerza del viento o las diferencias de temperatura para facilitar la entrada de aire fresco y la expulsión de aire contaminado o humo. Generalmente se suele incluir algún otro elemento mecánico además de la ventilación natural puesto que esta solo es óptima para determinadas condiciones climáticas y no se puede adaptar a casos de emergencia [6][8].

2. Estado del arte

El estudio del comportamiento del fuego y del humo en escenarios es esencial para el diseño de sistemas de ventilación efectivos, especialmente en entornos subterráneos como son las líneas de metro. La modelación numérica se ha convertido en una herramienta clave para la prevención de las consecuencias de un incendio y el desarrollo de estrategias de mitigación que garanticen la seguridad de los ocupantes y la integridad de las infraestructuras. Sin embargo, es necesario llevar a cabo experimentos a escala real para comprobar la veracidad de las pruebas realizadas en las simulaciones. A pesar de la necesidad de llevar a cabo estos experimentos, debido a sus altos costes y a la cantidad de tiempo que requieren, son muy limitados los experimentos que se han realizado a lo largo del tiempo.

Los primeros experimentos que se realizaron en Europa tuvieron lugar en la década de los 60, comenzando con las pruebas realizadas en 1965 en el túnel Ofenegg, donde se realizaron 11 pruebas en un túnel de 24 m² de sección y 191 m de largo, de una única vía y sin salida de túnel. En dichas pruebas se analizaron los niveles de temperatura, de gases como el monóxido de carbono (CO) o el dióxido de carbono (CO₂), y la visibilidad del túnel. [9]

Posteriormente, debido a la creciente preocupación por la seguridad en el transporte subterráneo, nueve países se juntan para crear el proyecto Eureka, que tiene lugar en Noruega entre 1990 y 1995. Entre 1990 y 1992 se desarrollaron 21 pruebas de incendio en un túnel con una sección de 35 m² y una longitud de túnel de 2,3 km, repartidos entre los distintos países. Desde 1992 hasta 1995 los datos y resultados obtenidos fueron analizados, y se sacaron varias conclusiones como que la temperatura máxima de un vehículo depende de su tamaño, así como la potencia calorífica máxima que se libera. [9]

A medida que nos vamos acercando más a la actualidad nos encontramos con las pruebas realizadas en el 2011 en el túnel de Brunsberg en Suecia, llamado el proyecto Metro. El túnel contaba con una longitud de 276 m y una sección media de 44 m². Para este experimento se realizaron varias pruebas donde se incendiaba el interior de los vagones de distintos trenes y se evaluaron los niveles de temperatura, velocidad de expansión del fuego, densidades y niveles de CO y CO₂ entre otros. [9]

Más tarde, en 2013, tuvo la segunda tanda de pruebas en el túnel de Runehamar (las primeras pruebas tuvieron lugar en 2003), en Noruega, que cuenta con una longitud de

1600 m, una sección de 47 m², en donde se analizaron los casos de la aparición de un incendio en el punto medio de túnel. [9]

Muchas veces no se pueden llegar a realizar estos experimentos debido a los altos costes que suponen, tanto a nivel de infraestructura y materiales, como de tiempo (algunos pueden llegar a durar más de 3 años como el ya mencionado proyecto Eureka). Además, hay que añadir los problemas en las simulaciones numéricas, en donde no se puede reproducir con precisión los efectos de estratificación. Para estos casos, el uso de un modelo físico con una reducción de escala es una alternativa para las investigaciones. Muchos autores ya han abordado el problema de la propagación y control del humo en caso de incendio en túneles utilizando modelos térmicos de escala reducida como es el caso de las investigaciones realizadas por Oka y Atkinson en 1995 [10]; o las de Vantelon en 1991 [11]; todas ellas centradas en el estudio del control longitudinal del humo. En la práctica, los modelos a pequeña escala son útiles para realizar estudios paramétricos y centrarse en un aspecto físico particular. En la mayoría de los casos, la pequeña escala sigue siendo una representación simplificada de la realidad, pero puede proporcionar información relevante sobre la fenomenología, así como determinados que pueden trasladarse a la escala completa mediante adaptaciones adecuadas.

Además de realizar experimentos a escala reducida para intentar sustituir los experimentos reales, e intentar reducir los costes lo máximo posible, también se ha empleado en los últimos años las simulaciones, otra herramienta que intenta reproducir los experimentos realizados en túneles, con las mismas condiciones. Para ello se emplea la Dinámica de Fluidos Computacional, CFD (Computational Fluid Dynamics). Las simulaciones numéricas permiten simular detalladamente el comportamiento térmico y de los flujos en situaciones de incendio, ofreciendo información sobre la propagación del fuego, la temperatura y la concentración de humos, así como la interacción con las estructuras. La simulación de incendios mediante CFD ha sido validada en diferentes estudios, mostrando una gran similitud entre los comportamientos modelados y los incendios reales.

A medida que avanza la tecnología, surgen nuevas oportunidades que permiten el estudio de campos como: la operación óptima de sistemas de ventilación, el desarrollo de nuevos sistemas de emergencia y la evaluación de riesgos en túneles. A pesar de los constantes avances que hay relacionados con la Dinámica computacional, los ordenadores de hoy en día siguen sin ser capaces de procesar las simulaciones debido a la gran cantidad de recursos computacionales requeridos para llevarlas a cabo en los túneles que se pretenden analizar. Para abordar esta necesidad, ha surgido en los últimos años un nuevo modelo híbrido 1D-3D.

Antes de llegar a este modelo, tuvieron lugar numerosas pruebas y simulaciones con distintos escenarios y condiciones. Primero, se partió con el 1D, usando distintos modelos como el modelo MFIRE usado por Cheng LH, Ueng TH, Liu CW en 2001 para simular y analizar varios sistemas de ventilación en caso de incendio en un túnel de pequeñas dimensiones, y poder sacar conclusiones sobre las ventajas y desventajas de los distintos sistemas de ventilación y poder averiguar cuál es el más efectivo en caso de emergencia [12]. En el 2010, Colella realiza una serie de pruebas en 1D, usando el modelo Whitesmoke, simulando el incendio en un túnel de 1,2 km de longitud [13].

Por otro lado, también se han realizado simulaciones en 3D, teniendo como modelo más relevante y empleado CFD como las simulaciones realizadas en 2016 por Chow WK, Gao Y, Zhao JH, Dang JF, Chow N, en donde se realizaron diversas pruebas simulando un túnel de 8 m de longitud, que presenta una ventilación natural, en donde se inicia un incendio [14]. En 2016, con el fin de evaluar el fenómeno de estratificación y el parámetro de velocidad crítica, concluyendo que, para incendios pequeños, la velocidad crítica disminuye con el aumento tanto de la altura del túnel, como su ancho [15]. Otra de las posibilidades que trae consigo la simulación es la recreación de accidentes ya pasados, con el fin de analizar posibles causas y soluciones para que no vuelvan a suceder. Un ejemplo de esto es la simulación realizada en 2017, donde se recreó el incendio del túnel de Hsuehshan, ocurrido en 2012 en Taiwán que resultó en 2 víctimas y decenas de heridos [16]. Otro modelo, usado en el 2005 por Floyd J, Hunt S, Williams F, Tatem P, fue FSSIM, que surgió con la necesidad de evaluar el crecimiento y expansión del fuego y sus gases antes sistemas de ventilación compleja [17]. En 2019 se realizan una serie de simulaciones usando el modelo CFAST, capaz de predecir el entorno en un espacio cerrado con múltiples compartimentos, sometido a un incendio. Además, permite calcular la distribución del fuego y sus, así como la temperatura en todos los puntos del espacio durante todo momento del incendio. [18]

Al incorporar y fusionar estos dos modelos, se proporciona una representación más completa de los escenarios de incendio. Esta sinergia entre dimensiones permite no solo una mayor precisión en la simulación, sino también una optimización del tiempo computacional, allanando el camino para un análisis más eficaz y detallado de la seguridad contra incendios. Las simulaciones de fuego en túneles que se han llevado a cabo usando el modelo híbrido son todas bastante recientes, entre las que destacan las realizadas por Colella F, Rein G, Borchiellini R, Torero J en 2011, combinando el software Fluent con las ecuaciones en 1D, para simular un incendio de una potencia calorífica variable de 10 a 100 MW en un túnel de 1,2 km de longitud y 7 m de diámetro [19]. En la actualidad ya no se usa prácticamente Fluent, la gran mayoría de la comunidad

emplea el software FDS (Fire Dynamics Simulator) debido a que se trata de un software de código abierto. Algunas de las simulaciones realizadas combinando FDS con el 1D fueron realizadas por Ang C, Rein G, Peiro J, Harrison R, en 2016, recreando el túnel de Dartford, Londres, que tiene unas dimensiones de 1,2 km de longitud y 8,5 m de diámetro [20]. Por último, en 2017, Vermesi I, Rein G, Colella F, Valkvist M, Jomaas G, realizaron una serie de simulaciones empleando el modelo híbrido, combinando FDS, donde se encontraba la parte del fuego del túnel, y 1D, para simular el resto del túnel. A partir de estas simulaciones concluyeron que este modelo híbrido mejoraba cualquiera de los otros dos modelos que fusiona, debido a que se reduce el tiempo computacional con respecto a los modelos 3D, mejorando así la eficiencia de las simulaciones, además de mantener la exactitud en los resultados obtenidos [21].

3. Análisis de sensibilidad de malla

Para la correcta elección del tamaño de malla, se va a utilizar un modelo de una estación de metro tipo de dimensiones 11.2 x 5.2 m y 70 m de longitud conectada a dos túneles de dimensiones 5.6 x 4.8 m y longitud de 40 m, Figuras 5 y 6, en el que se simulará un incendio de 5MW de dimensiones 2x2 m² situada a 20 m aguas arriba de la estación. La estación tiene una ventilación longitudinal de 1.5 m/s.

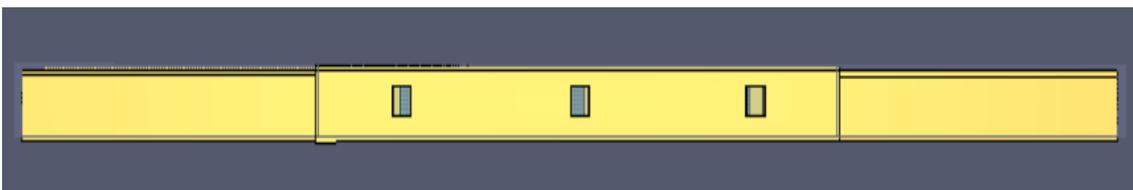


Figura 5. Vista lateral del modelo

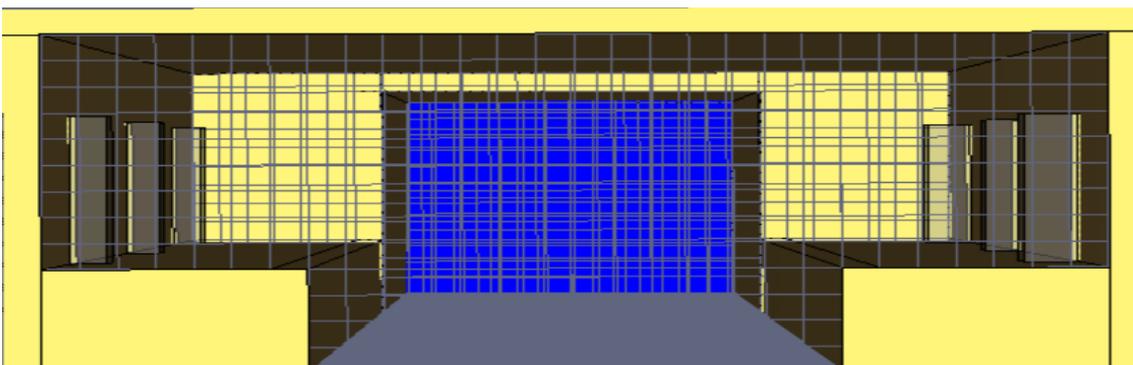


Figura 6. Vista frontal de la estación tipo de metro del modelo

Algunas medidas adicionales que se deben conocer son las dimensiones de las seis entradas y salidas que están presentes en la estación, tres a cada lado dispuestas de forma simétrica y con unas medidas de 2.4 x 2.4 m. Por otra parte, la estación cuenta con dos andenes situados a ambos lados de la zona de vías, dispuestos a 1.6 m de altura con respecto al suelo, y con una longitud de 2.8 m por cada andén, y 5.6 m de longitud para la zona de vías.

Para realizar el análisis se han considerado 3 tamaño de malla diferentes que cumplen con la resolución adecuada. El análisis de sensibilidad de malla es una parte crucial en la validación y precisión de simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics). En este estudio, se analiza la resolución espacial utilizando la relación: $R = \frac{D^*}{\Delta}$, donde Δ es el

tamaño del elemento y D^* es el diámetro característico del penacho, obtenido del número de Froude. La fórmula para calcular D^* es:

$$D^* = \left(\frac{Q \cdot}{\rho_{\infty} C_{p\infty} T_{\infty} g} \right)^{2/5}$$

Donde $Q \cdot$ es la tasa de liberación de calor, HRR (5000 kW), ρ_{∞} es la densidad del aire (1.2 kg/m^3), $C_{p\infty}$ es el calor específico del aire a presión constante (1005 J/(kg K)), T_{∞} es la temperatura del aire (293 K) y g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

De los tres tamaños de malla, dos de ellos emplean un tamaño de malla uniforme en todo el modelo (0.2 m^3 y 0.4 m^3). El tercer modelo resulta de la combinación de los otros dos tamaños de malla, en donde se va a emplear el de 0.2 para el túnel en el que se encuentra el origen del fuego, y 0.4 para la estación de metro y el otro túnel. La tabla 1 muestra los detalles de los tres modelos:

| Modelos | Tamaño de malla | Número de elementos | D^* | R | Tiempo de simulación (horas) |
|---------|-----------------|---------------------|-------|------------|------------------------------|
| 1 | 0.4 | 157,000 | 1.79 | 4.475 | 3.11 |
| 2 | 0.2/0.4 | 451,500 | 1.79 | 8.95/4.475 | 28,38 |
| 3 | 0.2 | 1,260,000 | 1.79 | 8.95 | 38.36 |

Tabla 1: Detalles de los modelos utilizados en el análisis de sensibilidad de malla

Para comparar los resultados obtenidos para los tres tamaños de malla se va a analizar la temperatura en función del tiempo en dos ubicaciones distintas: a 20 m y a 90 m abajo del incendio a 1 m del techo, que coinciden con la estación de metro tipo. Además, se va a analizar la temperatura alcanzada en régimen estacionario toda la longitud del modelo bajo a 1 m del techo de los túneles y estación para los tres distintos tamaños de malla.

3.1 Comparación de perfil de temperatura longitudinal en régimen estacionario

Se busca analizar la temperatura media aguas abajo del fuego en la dirección del flujo del aire, siendo 0 m la temperatura media a lo largo de la simulación a la altura del fuego. La figura 5 presentada muestra la temperatura media a lo largo del modelo a una altura de 1 metro bajo el techo, en función de la distancia al fuego para tres tamaños de malla diferentes: 0.2, 0.4 y una malla híbrida 02/04. Se puede observar que existe un patrón similar de comportamiento de la temperatura que disminuye con la distancia al fuego (cerca del fuego, las temperaturas son más altas, como era de esperarse debido a la proximidad de la fuente de calor.) Además, se alcanza una estabilización después de cierta distancia, en torno a los 40 m aguas abajo del origen del fuego.

3.2 Análisis de diferencias entre mallas

Como se muestra en la figura 7, la malla de 0.2 muestra las temperaturas más altas en las inmediaciones del fuego, lo cual es esperado debido a la mayor resolución y precisión en la captura de los efectos térmicos intensos cerca de la fuente. La temperatura disminuye rápidamente y se estabiliza después de aproximadamente 30 m, empezando a disminuir las temperaturas a partir de los 40 m. Por otro lado, la malla de 0.4 tiene temperaturas más bajas cerca del fuego en comparación con la malla de 0.2, lo cual indica una menor precisión en la captura de los gradientes térmicos. Por otra parte, la estabilización de la temperatura se observa a una distancia similar a la de la malla de 0.2 m, pero con valores ligeramente inferiores, resultando una diferencia porcentual entre los dos tamaños de malla del 25% aproximadamente.

La malla híbrida 0.2/0.4 presenta un comportamiento intermedio entre las mallas de 0.2 m y 0.4 m. Las temperaturas cerca del fuego son similares a las de la malla de 0.4 m, pero con una precisión mejorada debido al uso de la malla más fina en la zona cercana al fuego. Además, la estabilización de la temperatura es similar a las otras dos mallas, ya que las 3 mallas siguen un mismo patrón de temperaturas, consiguiendo una estabilidad a partir de los 30 m de distancia al fuego.

Hay que recalcar que la temperatura mostrada en los diferentes puntos del modelo es una temperatura media obtenida durante la duración de la simulación (1000 s)

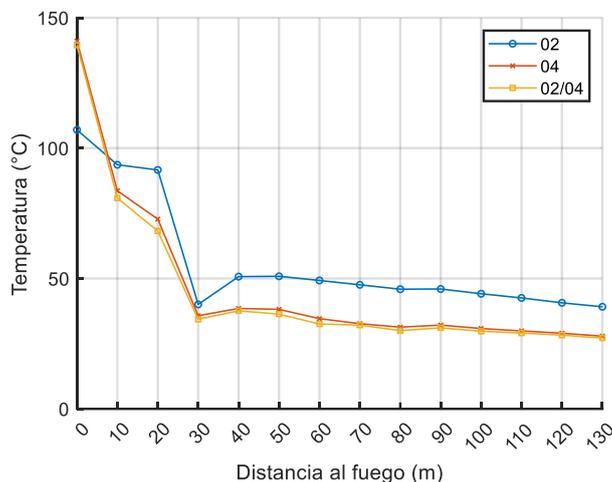


Figura 7. Media de temperatura a lo largo del modelo

3.3 Perfiles de temperatura en función del tiempo

La figura 8 muestra la evolución de la temperatura de los tres modelos en dos ubicaciones distintas: 20 m y 90 m aguas abajo del incendio, que coinciden con el inicio y el final de la estación de metro.

En la malla de 0.2 la temperatura alcanza un valor más alto (145°C aproximadamente en la figura 8 a) y 70°C en la figura b)) en comparación con las otras mallas. La variabilidad de la temperatura también es mayor, indicando una mayor sensibilidad y precisión en la captura de las fluctuaciones térmicas. Para la malla de 0.4 la temperatura estabiliza en un valor inferior (en torno a los 110°C en la figura 8 a) y 45°C en la figura 8 b)) en comparación con la malla de 0.2. Además, posee una menor variabilidad, indicando una menor resolución en la captura de las fluctuaciones. En cuanto a la malla híbrida 0.2/0.4, la temperatura alcanza un valor intermedio (100°C aproximadamente en la figura 8 a) y 45°C en la figura 8 b)), mostrando un comportamiento muy similar a la malla de tamaño 0.4 en cuanto a los valores de temperatura alcanzados y su variabilidad a lo largo del modelo.

Si se analiza las diferencias entre los diferentes modelos, se puede observar que el modelo con la malla de 0.2 proporciona la mayor precisión y sensibilidad en ambos puntos de medición (20 m y 90 m), capturando más detalles de las fluctuaciones térmicas. La malla de 0.4, aunque es menos precisa, es más eficiente en términos computacionales y aún proporciona resultados razonablemente buenos. La malla híbrida (02/04) ofrece un punto medio entre ambos tamaños, proporcionando suficiente precisión en las áreas críticas cercanas al fuego y siendo más eficiente en términos de recursos computacionales en áreas menos relevantes para el estudio del proyecto.

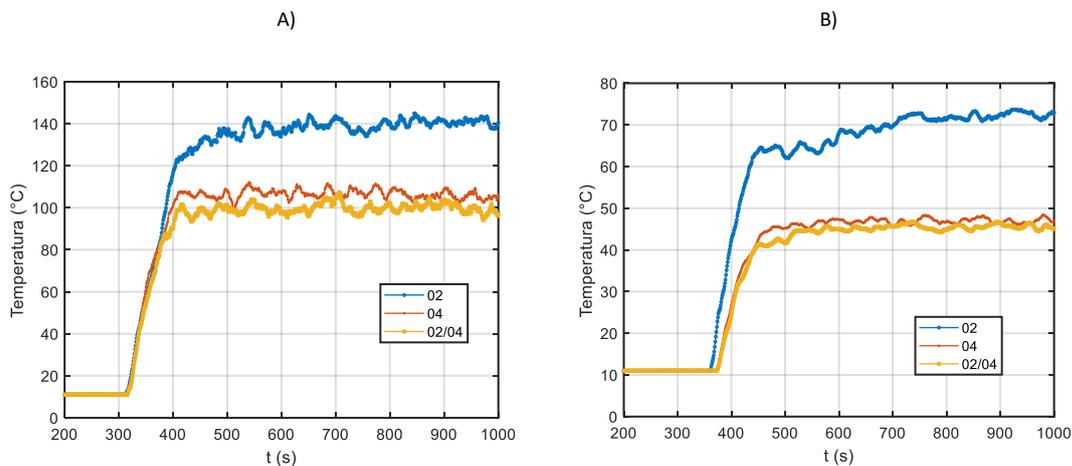


Figura 8. Evolución temporal de la temperatura de los tres tamaños de malla a los 20 y 90 m del origen respectivamente

3.4 Elección del tamaño de malla

El uso de diferentes tamaños de malla en simulaciones puede resultar en un significativo ahorro de recursos computacionales. Las mallas estructuradas, que consisten en celdas regulares y ordenadas, requieren menos memoria y tiempo de cálculo en comparación con las mallas no estructuradas, que utilizan celdas de formas irregulares. Además, las mallas híbridas, que combinan elementos de mallas estructuradas y no estructuradas, permiten adaptar la resolución de la malla a las regiones de interés, concentrando los recursos en áreas críticas y reduciendo la carga computacional en zonas menos relevantes. De esta manera, al seleccionar cuidadosamente el tipo de malla más apropiado para cada aplicación, se puede lograr un balance óptimo entre la precisión de

los resultados y la eficiencia computacional, permitiendo simulaciones más rápidas y el uso de recursos informáticos más limitados.

El tamaño de malla se va a escoger en función del análisis que se va a realizar, de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de malla y de los recursos computacionales disponibles. En este caso, la diferencia entre los tiempos de simulación del tamaño 0.4 y los otros dos es muy significativa, del orden de 10 veces más de tiempo para su simulación completa. En cuanto a la calidad de los resultados obtenidos, se puede apreciar cómo no hay diferencias apenas entre los modelos de 0.4 y los de 0.2/0.4, obteniendo unos valores muy similares en ambos casos, con una diferencia máxima del 7,5 % entre ambos modelos de malla. Las diferencias significativas se dan entre estos dos modelos y el modelo de 0.2, tanto cuando hablamos de las temperaturas medias a lo largo del modelo, como cuando hablamos de la temperatura en los dos puntos observados a lo largo de la simulación. En este caso, el modelo con tamaño de malla 0.2 supera en prácticamente todo el tiempo a partir del cual el fuego ya se ha desarrollado (a partir de los 400 s) a los otros dos modelos, con una diferencia porcentual de entorno al 30% con respecto a los modelos con tamaño de malla 0.4 y 0.2/0.4.

Con todo explicado, es necesario saber las necesidades de cada proyecto para poder elegir el tamaño de malla óptimo: si buscamos la mayor precisión posible sin importar los costes computacionales como puede ser el tiempo de simulación el modelo óptimo es el de 0.2. En cambio, si el tiempo para hacer las simulaciones y los análisis de los resultados es muy ajustado, y lo que se pretende analizar son tendencias o comparaciones con resultados 1D-3D, puede resultar más conveniente buscar un tamaño de malla mayor, que reduzca notablemente el tiempo de simulación, pero sin que se traduzca en una pérdida notable de calidad en los resultados. El modelo híbrido consigue una mezcla de ambos modelos: reducir los tiempos de simulación con respecto al modelo 0.2, pero buscando la precisión de resultados en zonas en donde más nos interesa conocer el comportamiento del fuego, en este caso sería la zona donde se origina el incendio.

En este caso, y atendiendo a las necesidades del proyecto, se ha escogido el tamaño de malla de 0.2 para las simulaciones. Los resultados de las simulaciones muestran que la malla de 0.2 proporciona una mayor resolución y sensibilidad en la captura de las fluctuaciones térmicas, lo cual es crucial para un análisis detallado del comportamiento del fuego y la dispersión de los gases. A pesar de que el tiempo de simulación es mayor en comparación con mallas más grandes, la precisión de los datos obtenidos justifica el

uso de esta malla fina, especialmente en estudios donde la exactitud es fundamental para diseñar sistemas de seguridad eficientes.

La malla de 0.2 permite una mejor representación de los gradientes de temperatura, la distribución del humo, la velocidad del aire entre otros aspectos críticos para evaluar adecuadamente los riesgos y la efectividad de los sistemas de ventilación en escenarios de emergencia, donde la máxima precisión es exigida.

4. Modelo 3D

Una vez seleccionado el tamaño de malla más apropiado para el objeto de estudio del proyecto, hay que modelar un tramo de estación de metro que replique las condiciones y medidas de una estación real. Obteniendo los resultados más realistas posibles y que más se ajusten a la realidad, se podrá seguir mejorando los sistemas de seguridad actuales para poder minimizar los costes materiales y humanos en caso de un incidente.

Para ello, se ha partido del primer modelo, el que se ha empleado para el análisis de malla, y se han usado las mismas medidas para la estación de metro del modelo. Se ha cogido esta estación y se ha duplicado para obtener en el modelo dos estaciones conectadas por un túnel de 600 m. El túnel tiene unas medidas de 5.6 x 4.8 m, mientras que las estaciones cuentan con unas medidas de 11.2 x 5.2 m y 70 m de longitud. Por su parte, cada estación cuenta con tres salidas a cada lado, seis en total con unas medidas de 2.4 x 2.4 m. Además, el modelo contará con dos tramos más de túnel, además del que conecta las dos estaciones tipo. Estos dos tramos de túnel se encontrarán en los extremos opuestos de las estaciones, y contarán con las mismas medidas: 5.6x 4.8m y 40 m de longitud.



Figura 9. Vista lateral del modelo a simular

4.1 Condiciones y parámetros para la simulación

Estos parámetros y condiciones se han seleccionado cuidadosamente para crear un entorno de simulación realista que permita analizar detalladamente la propagación del incendio, la efectividad del sistema de ventilación, y el impacto de diversas variables en la seguridad y la gestión del fuego en un túnel de metro.

El incendio simulado tiene una potencia máxima de 5 MW, pero con el objetivo de buscar el entorno más realista posible, la potencia no va a ser constante a lo largo de la duración de la simulación, sino que va a consistir en una rampa que comienza desde los 0 MW hasta llegar a la potencia máxima en 50 s. Los primeros 300 s de la simulación, con el fin de calibrar los sistemas de ventilación y las condiciones de contorno, no habrá

ningún tipo de potencia de fuego. A partir del segundo 300 y hasta el segundo 350 se va a originar un incendio cuya potencia irá incrementando hasta 5 MW. A partir del segundo 350 y hasta la finalización de la simulación, la potencia de fuego se mantiene constante en 5 MW. Toda esta evolución se puede apreciar en la figura 9, en donde se muestra una parte de la simulación (de 200 a 500 s).

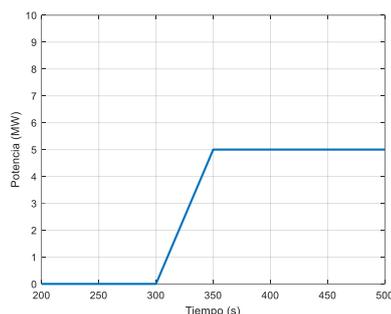


Figura 10. Evolución temporal de la potencia de fuego

El área de este incendio simulado es de 4 m², un cuadrado de 2x2 m que cuenta con un HRR (heat rate release) de 5000 kW, por lo que el HRRPUA (heat rate release per unit area) es 1250 KW / m².

La duración total de la simulación es de 1000 s, permitiendo observar el comportamiento del incendio desde su inicio hasta un punto de estabilización. El tiempo real que se ha necesitado para completar la simulación entera es de 164 horas.

En cuanto a las condiciones de contorno, los extremos del modelo están abiertos, permitiendo la libre entrada y salida de aire y humo, lo cual simula un sistema de ventilación que facilita la dispersión de gases. En adición, las seis salidas que se encuentran en las estaciones permanecen abiertas durante la simulación, favoreciendo la circulación del aire y la evacuación del humo.

Para la ventilación, se ha optado por una ventilación longitudinal con una velocidad de ventilación de 1.5 m/s, que representa un flujo de aire continuo a lo largo del túnel que contribuye a la dispersión del calor y del humo generado por el incendio. Por su parte, la temperatura ambiente del modelo está establecida en 11°C.

4.2 Análisis de la temperatura

Para empezar con la evaluación de resultados, se va a empezar analizando la temperatura en función del tiempo en varios puntos clave del modelo: se van a tomar 3 puntos de la estación más alejada al fuego (los extremos de cada estación y la salida central de la estación), 3 puntos en el túnel que conecta ambas estaciones: el punto sobre el que se encuentra el origen del incendio, la zona media del túnel y el punto que se encuentra a una cuarta parte de la distancia del túnel medida desde el extremo final de la estación más alejada del túnel (a 150 m de esta estación). Las 3 últimas zonas que se van a analizar se encuentran en la estación de metro más próxima al origen del fuego, y estas se dispondrán en los extremos de la estación, y sobre la salida central de la estación. En la figura 11 se muestra la vista de perfil del modelo y los puntos sobre los que se van a graficar.

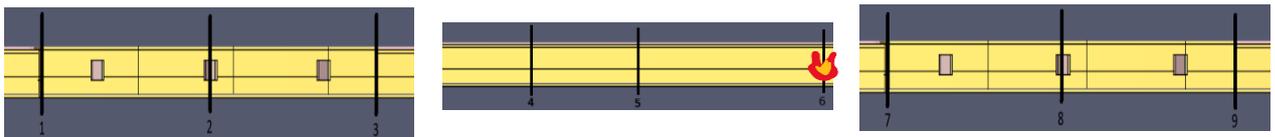


Figura 11. Puntos del modelo en los que se va a analizar la evolución temporal de la temperatura

4.2.1 Evolución temporal de la temperatura

Representadas en las figuras 12, 13 y 14, se encuentran las comparaciones de la temperatura a lo largo de los 1000 s que dura la simulación de los 9 puntos a analizar. La figura 12 se corresponde con los puntos 7, 8 y 9 de la figura 11, es decir la estación más próxima al origen del fuego. Las figura 13 analiza los puntos 4, 5 y 6, lo que corresponde al túnel que conecta ambas estaciones; y las última figura se corresponde con los puntos 1 a 3 de la figura 11, la otra estación del modelo.

A)

B)

C)

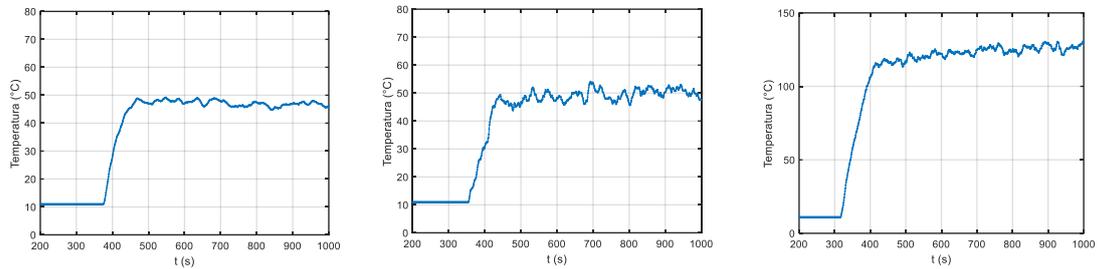


Figura 12. Evolución temporal de la temperatura de los puntos 9, 8 y 7 respectivamente de la figura 11

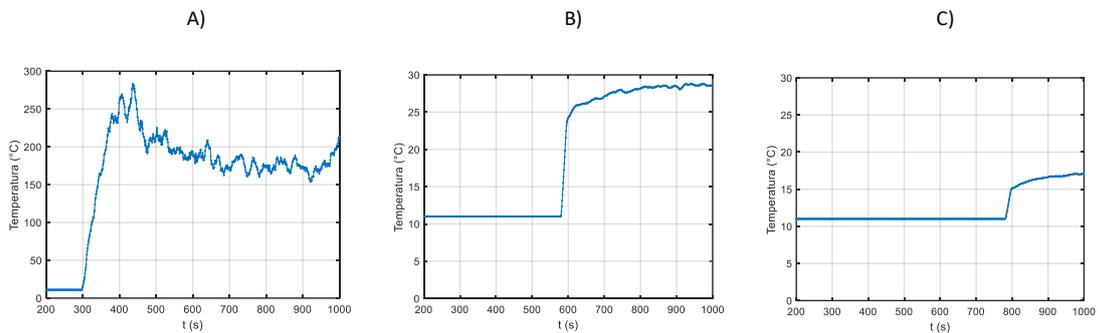


Figura 13. Evolución temporal de la temperatura de los puntos 6, 5 y 4 respectivamente de la figura 11

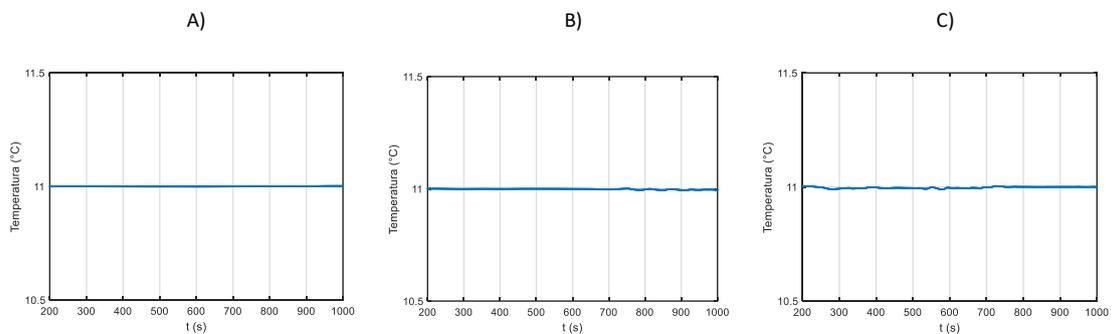


Figura 14. Evolución temporal de la temperatura de los puntos 3, 2 y 1 respectivamente de la figura 10

En la figura 12 se representa la evolución de la temperatura en 3 puntos de la estación más próxima al incendio, siendo la primera figura el extremo de la estación más alejado del incendio y la figura 12 c) el extremo más próximo. Se puede observar como el punto más cercano al origen del fuego, es la más afectada, sufriendo el mayor aumento de temperaturas, y siendo el punto que más temperatura alcanza de los tres, superando los 130°C. A partir de los 90°C, el riesgo aumenta considerablemente, ya que la exposición prolongada (incluso de solo unos pocos minutos) puede resultar en lesiones

graves o la muerte, por lo que las temperaturas que se alcanzan en esta estación durante la simulación suponen un verdadero peligro para la seguridad de los usuarios. [22]

En cuanto a las figura 13, que representa la temperatura a lo largo de la simulación en tres puntos distintos del túnel conector, se alcanza picos de temperatura máximos a la altura donde se origina el fuego, llegando a los 280°C. A medida que avanzamos aguas arriba del túnel, se comprueba como la subida de temperatura debido al incendio se va posponiendo en el tiempo, además de reducirse la temperatura máxima alcanzada: la figura 13 b) se encuentra a 280 m del incendio y en este punto no se superan los 30°C, mientras que en la figura 13 c), se ha avanzado 150 m con respecto a la anterior y en este punto se alcanzan los 17°C en el final de la simulación. La última figura del grupo corresponden con la estación de metro más alejada del fuego, en donde se puede apreciar como su temperatura no varía durante toda la simulación, manteniendo las temperaturas iniciales de 11°C en toda la longitud de la estación. Como la temperatura no se ve afectada, implica que no hay aparición de humo, por lo que la ventilación del modelo evita que el humo alcance la estación aguas arriba del incendio.

A la vista de las gráficas obtenidas, se demuestra una disipación térmica clara en la estación, con temperaturas más altas cerca del origen del incendio y menores a medida que se alejan. Esto es crucial para entender cómo el calor se propaga en un escenario de incendio en una estación de metro, y cómo las condiciones de contorno pueden afectar significativamente en diferentes puntos de la estación, como ocurre con los puntos 8 y 9 de la figura 11, donde, a pesar de que el punto 9 de la estación se encuentra a 20 m más alejado de la fuente del fuego que el punto 8, no hay grandes variaciones de temperatura. Esto puede deberse a que en el punto 8 evaluado existe una salida de aire, por lo que el aumento de temperatura no se ven tan afectado como si esa salida no existiera o estuviese dispuesta en otra posición de la estación.

4.2.2 Evolución de la temperatura con respecto a la posición en el modelo

Las siguientes gráficas representan la temperatura en función de la posición en el modelo. Las gráficas se analizan en dos momentos diferentes: a los 350 s y a los 800 s de la simulación. La posición del modelo se mide aguas arriba de la estación, siendo la posición 0 el extremo derecho del modelo, y 820 m el extremo izquierdo del modelo.

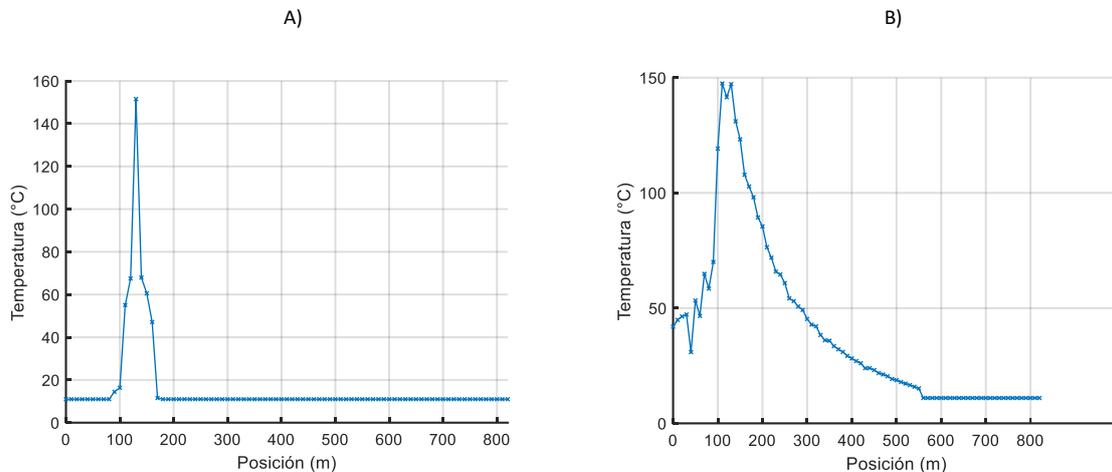


Figura 15. Gráficas de la temperatura con respecto a la posición en el modelo a los 350 y 800 s respectivamente.

A los 350 s, el incendio ha alcanzado su régimen permanente de 5 MW, pero las temperaturas aún no están completamente estabilizadas. Se observa un incremento abrupto de la temperatura a partir de los 100 m, alcanzando un pico máximo de aproximadamente 150°C a 130 m de distancia con respecto al extremo del modelo, coincidiendo con la posición en la que se origina el incendio. Aguas arriba, la temperatura va disminuyendo hasta que llega a la temperatura ambiente de 11°C, que se da a los 180 m.

A los 800 s, la simulación ha alcanzado un estado estabilizado en términos de distribución de temperatura, por lo que el análisis de los datos observados es más interesante y resulta más representativo. Similar a la primera gráfica, hay un pico de temperatura que alcanza alrededor de 150°C a los 130 m, origen del fuego. Después del pico, la temperatura disminuye gradualmente a lo largo de la longitud del túnel, con una pendiente más suave que en la gráfica de los 350 s. A partir de aproximadamente los 600 m, que se corresponde aún con el túnel que conecta las dos estaciones, la temperatura se estabiliza y alcanza la temperatura ambiente de 11°C, indicando que el calor ha sido disipado de forma efectiva a lo largo del túnel.

A los 800 s, la simulación ha alcanzado un estado estacionario donde las temperaturas a lo largo del túnel están equilibradas, mostrando que el modelo ha logrado una distribución térmica estable. La pendiente más suave en la disminución de temperatura sugiere que el calor ha tenido tiempo suficiente para dispersarse más uniformemente a lo largo del túnel.

4.2.3 Conclusiones de las temperaturas

Tras el análisis detallado de las gráficas obtenidas durante la simulación de la temperatura en función del tiempo en varios puntos, y la temperatura en función de la posición para dos momentos concretos, se pueden obtener varias conclusiones.

Primero de todo, existe un gradiente térmico claro desde el punto más cercano al incendio hasta el punto más alejado. Las temperaturas más altas se registran en las proximidades del fuego, mientras que las zonas más alejadas experimentan incrementos más moderados, o directamente no se experimenta ningún incremento. Además, se puede apreciar una estabilidad térmica en todos los puntos. Las temperaturas alcanzan un valor estable después del incremento inicial, aunque las fluctuaciones son más notables en puntos más cercanos al incendio. Por último, se observa como la estación de metro que se encuentra más alejada del origen del incendio no experimenta un incremento significativo de temperatura durante los 1000 s de simulación. Esto indica que, en un escenario real, dicha estación permanecería segura y operativa, sin riesgo inmediato de daños por calor. Veremos más adelante cómo se comporta el nivel de humo y la velocidad en el eje x en esta estación.

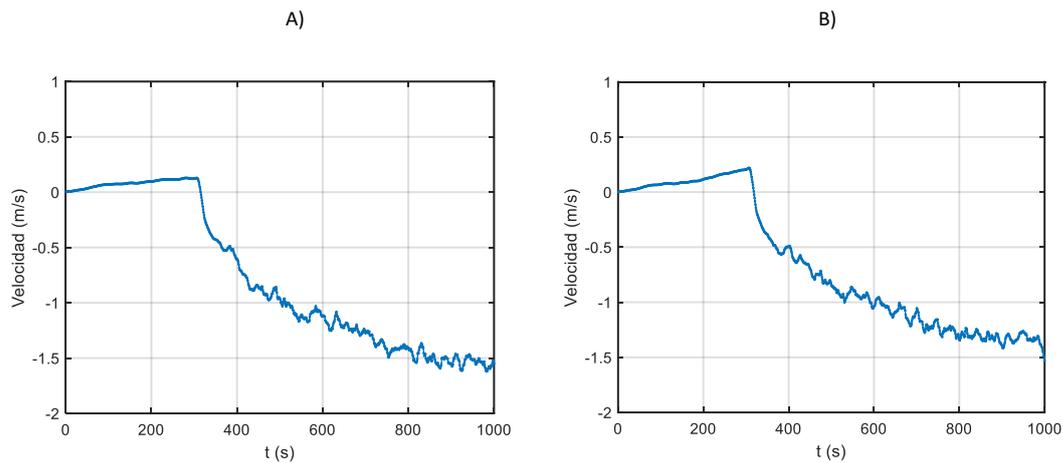
4.3 Análisis de la velocidad

Una vez comentado el aspecto de la temperatura, se va a analizar la velocidad del aire en diferentes puntos del túnel y a diversas alturas, durante distintos momentos de la simulación del incendio. Este análisis es crucial para entender cómo el incendio afecta la dinámica del flujo de aire a lo largo del túnel, y cómo estas variaciones pueden influir en la propagación del calor y del humo. Se va a considerar tanto las fases iniciales del incendio como las fases avanzadas, evaluando cómo las condiciones cambian a medida que el incendio progresa. Este estudio nos proporcionará información valiosa para mejorar la eficacia de los sistemas de ventilación. Para ello, igual que con la temperatura, se va a analizar la velocidad en dos instantes diferentes, a los 350 y 800 s de la simulación.

4.3.1 Velocidad en función del tiempo

Primero se va a analizar la velocidad en el eje x a diferentes alturas del modelo durante el tiempo que dura la simulación en dos puntos concretos del modelo: a 10 m aguas abajo del origen del incendio, que forma parte del túnel que conecta ambas estaciones. El otro punto a analizar va a ser a 60 m aguas abajo del incendio, que es el punto medio de la estación de metro más próxima al fuego.

Punto situado a 10 m aguas abajo



C)

D)

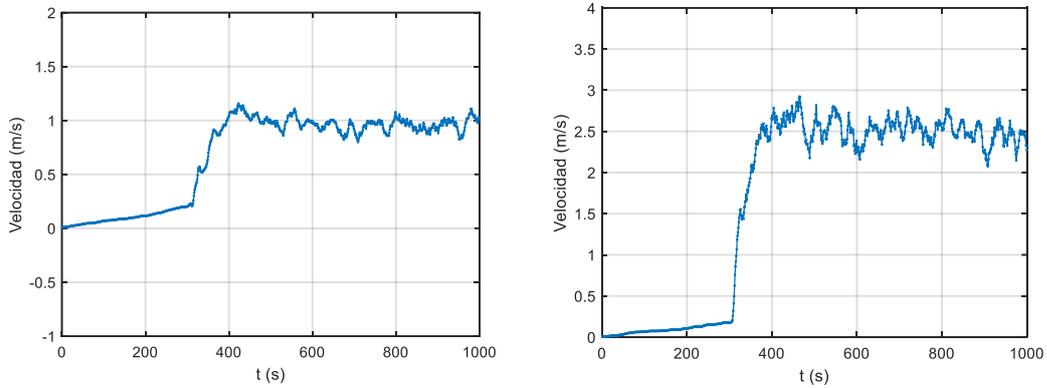


Figura 16. Gráficas de la velocidad en función del tiempo a 0, 1.6, 3.2 y 4.5 m de altura respectivamente

Punto situado a 60 m aguas abajo

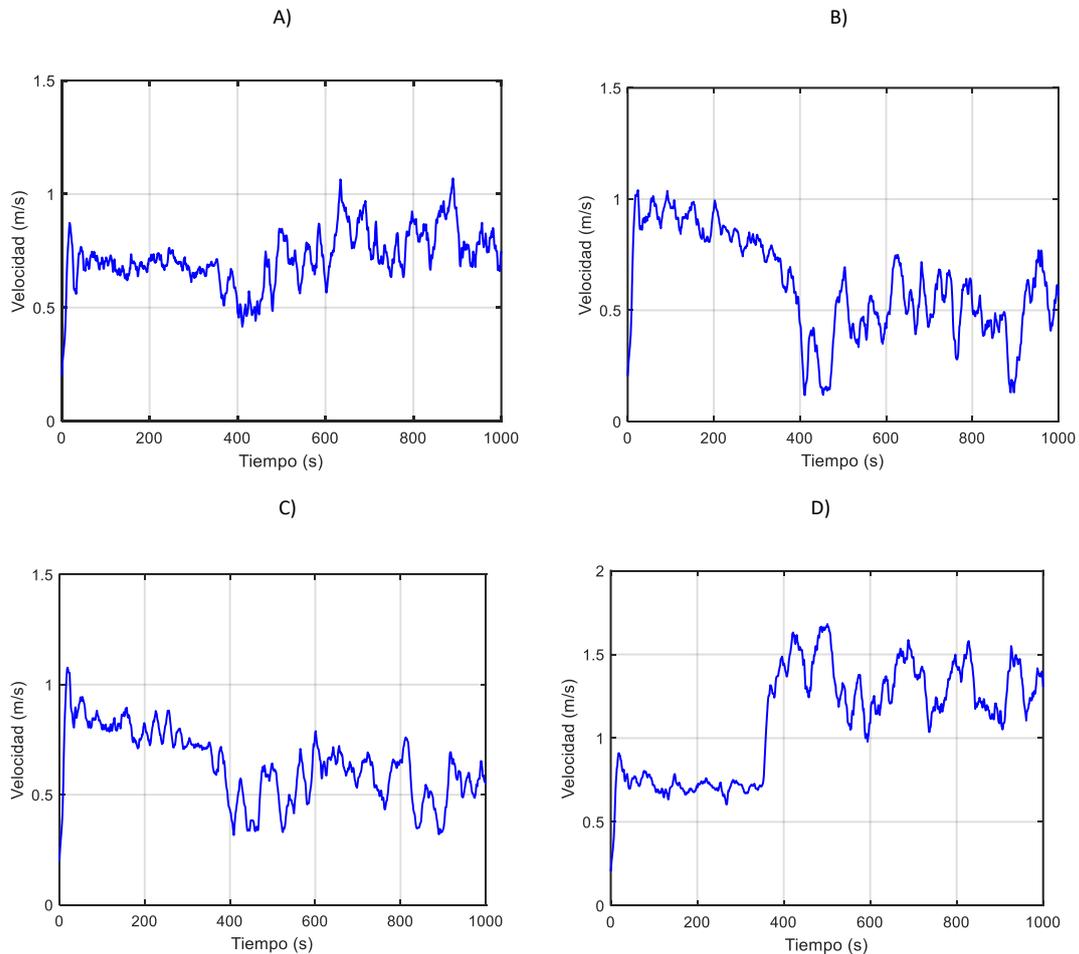


Figura 17. Gráficas de la velocidad en función del tiempo a 0, 1.6, 3.2 y 4.5 m de altura respectivamente

En el punto ubicado a 10 m del fuego, las gráficas muestran un comportamiento distinto en función de la altura. A nivel del suelo (0 m), la velocidad comienza alrededor de 0 m/s, y sufre un aumento ligero hasta llegar a los 300 s de la simulación aproximadamente, para luego empezar a disminuir progresivamente hasta alcanzar valores negativos cercanos a -1.5 m/s al final de la simulación. A 1.6 m de altura, la velocidad sigue la misma tendencia que a nivel de suelo: la velocidad muestra una tendencia ascendente, comenzando en valores cercanos a 0 m/s para luego disminuir y llegar a valores negativos de 1.5 m/s. A 3.2 m el comportamiento de la gráfica varía, la velocidad sufre un aumento considerable entre el segundo 300 y 400 de la simulación, alcanzando un pico de aproximadamente 1 m/s, donde alcanza cierta estabilidad. A 4.5 m de altura, la velocidad del aire es más intensa, alcanzando un pico de aproximadamente 2.5 m/s antes de estabilizarse con ligeras fluctuaciones de amplitud 0.5 m/s.

En el punto situado a 60 m del origen del incendio, las gráficas reflejan un comportamiento más estable de la velocidad, pero con mayor número de oscilaciones y de mayor amplitud. A nivel del suelo, la velocidad se mantiene relativamente constante entre 0.5 y 1 m/s. A 1.6 y 3.2 m, la velocidad muestra una mayor variabilidad, oscilando entre 0 y 1 m/s, pero con grandes picos. Finalmente, a 4.5 m, la velocidad del aire es más pronunciada, mostrando una tendencia general ascendente, alcanzando un pico cercano a 1.25 m/s y manteniendo una fluctuación constante alrededor de este valor.

Las conclusiones que se pueden extraer de estas gráficas son significativas para la comprensión de la dinámica del flujo de aire durante un incendio en un túnel de metro. A 10 m del incendio, las velocidades muestran una disminución general con alturas menores, surgiendo velocidades negativas lo que se podría explicar con la aparición de corrientes de aire descendentes cerca del origen del fuego. Esta dinámica provoca que el aire en la proximidad del fuego, a nivel del suelo, se mueva en dirección opuesta al flujo principal inducido por la ventilación. Mientras que, a 60 m del incendio, las velocidades son más estables y muestran una tendencia general ascendente con la altura, reflejando una influencia más moderada del fuego y una mezcla de aire caliente y frío menos turbulenta.

4.3.2 Velocidad en función de la altura

El siguiente análisis que se va a realizar sobre la velocidad en el modelo es la velocidad en función de la altura en puntos relevantes del modelo (a 10 m del origen del fuego, a 60 m y a 100 m aguas abajo del origen del incendio), y en dos momentos de la simulación: a los 350 s y a los 800 s.

Punto situado a 10 m del origen

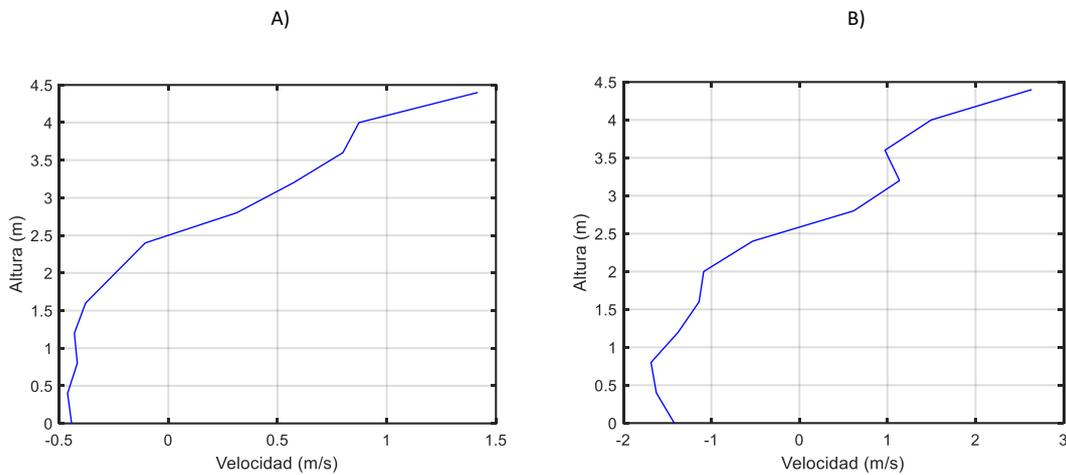


Figura 18. Gráficas de la velocidad en función de la altura a los 350 y 800 s respectivamente

Punto situado a 60 m aguas abajo

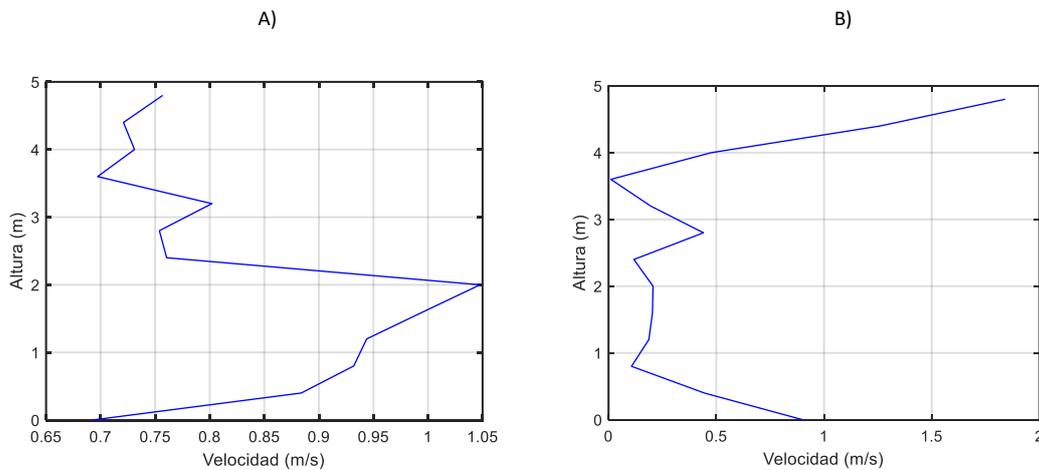


Figura 19. Gráficas de la velocidad en función de la altura a los 350 y 800 s respectivamente

Punto situado a 100 m aguas abajo

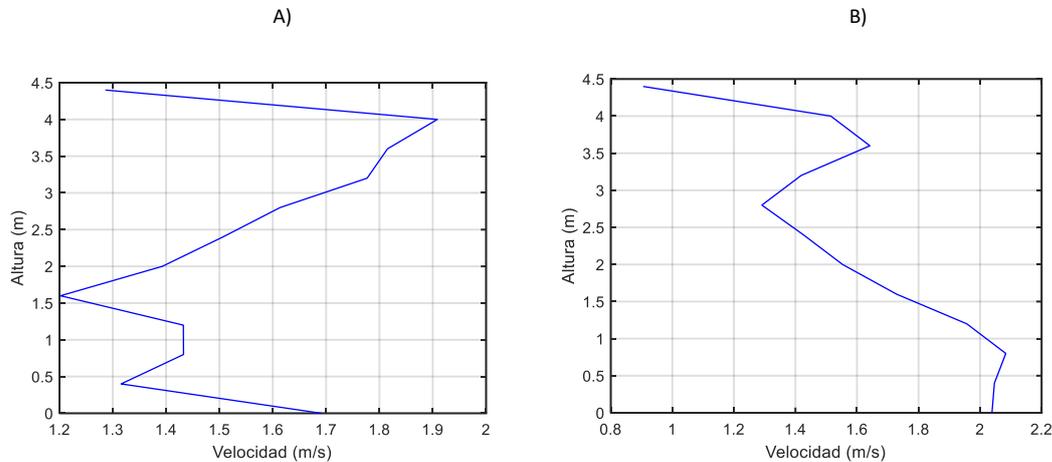


Figura 20. Gráficas de la velocidad en función de la altura a los 350 y 800 s respectivamente

Las siguientes gráficas (figuras 18, 19 y 20) representan la velocidad en función de la altura a los 350 s y 800 s en distintos puntos del modelo. Estas gráficas permiten analizar la dinámica del flujo de aire y su evolución a lo largo del tiempo durante el incendio.

Cuando hablamos del punto situado a 10 m del origen del fuego a los 350 s la velocidad del aire muestra un incremento gradual desde valores negativos hasta alrededor de 1.5 m/s conforme aumenta la altura. La velocidad comienza cercana a 0 m/s a nivel del suelo y alcanza un valor máximo de aproximadamente 1.5 m/s a una altura de 4.5 m. La figura 18 b) muestra una mayor variabilidad en comparación con la gráfica a los 350 s, con velocidades que oscilan desde -1.5 m/s hasta cerca de 2.5 m/s. Al igual que a los 350 s, a los 800 s la velocidad del aire va aumentando conforme va aumentando la altura en la que nos encontramos. Estos valores negativos que se dan en ambas gráficas se pueden deber a que, a los 350, y sobre todo a los 800 s, el flujo de aire cerca del origen del incendio ya ha sido influenciado significativamente por el calor ascendente, por lo que podría haber presencia de corrientes de aire descendentes que produzcan un cambio de sentido en la dirección del aire.

A los 60 m, a los 350 s, la velocidad del aire varía entre 0.65 m/s y 1.05 m/s. En este punto, el flujo de aire es moderado y muestra un patrón de incremento suave en la velocidad a medida que aumenta la altura. A los 800 s, la velocidad del aire varía entre 0 m/s y 2 m/s. A medida que el incendio progresa, el flujo de aire se vuelve más variable y fuerte, con mayores velocidades especialmente a alturas superiores.

A 100 m del origen del fuego, a los 350 s, la velocidad del aire varía entre 1.2 m/s y 2 m/s. A esta distancia, la influencia del incendio en el flujo de aire es aún más pronunciada, con velocidades relativamente altas a diferentes alturas. A los 800 s, la velocidad del aire varía entre 0.8 m/s y 2.2 m/s. La variabilidad en las velocidades es alta, mostrando una fuerte mezcla y turbulencia en el flujo de aire. Este comportamiento es típico en las etapas avanzadas de un incendio, donde las corrientes de aire son más intensas y desordenadas.

La comparación entre los tiempos muestra que, a medida que el incendio progresa, la velocidad del aire aumenta y se vuelve más variable y turbulenta, especialmente en los puntos más cercanos al origen del fuego.

4.4 *Capa de humo*

El estudio de la capa de humo es fundamental para entender la dinámica de un incendio en entornos cerrados como túneles de metro. Durante un incendio, el humo generado puede representar un peligro significativo, no solo debido a su toxicidad, sino también por su capacidad de reducir la visibilidad y dificultar la evacuación. En este contexto, es crucial analizar cómo se comporta la capa de humo a diferentes distancias del origen del fuego y a distintas alturas.

Es por ello, que es necesario realizar un análisis del volumen del humo que se da en el modelo. A continuación, se presentan las gráficas de la altura de la capa de humo en función del tiempo en puntos situados a 10, 30, 60, 600 y 650 m del origen del incendio. Estas gráficas permiten visualizar la acumulación y dispersión del humo a lo largo del túnel, proporcionando información valiosa sobre la evolución del incendio y la respuesta del sistema de ventilación.

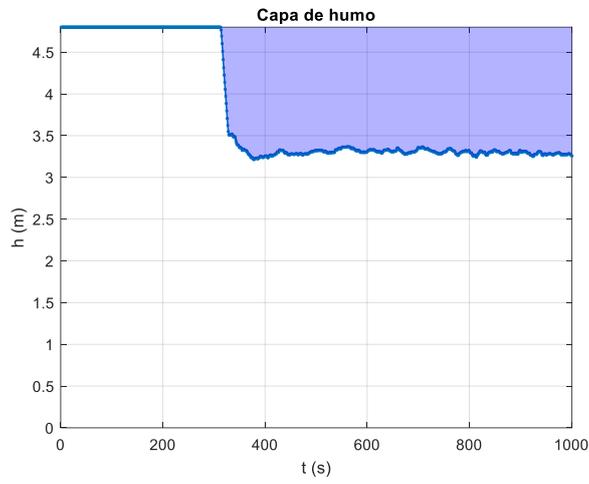


Figura 21. Capa de humo a 10 m del fuego (aguas abajo)

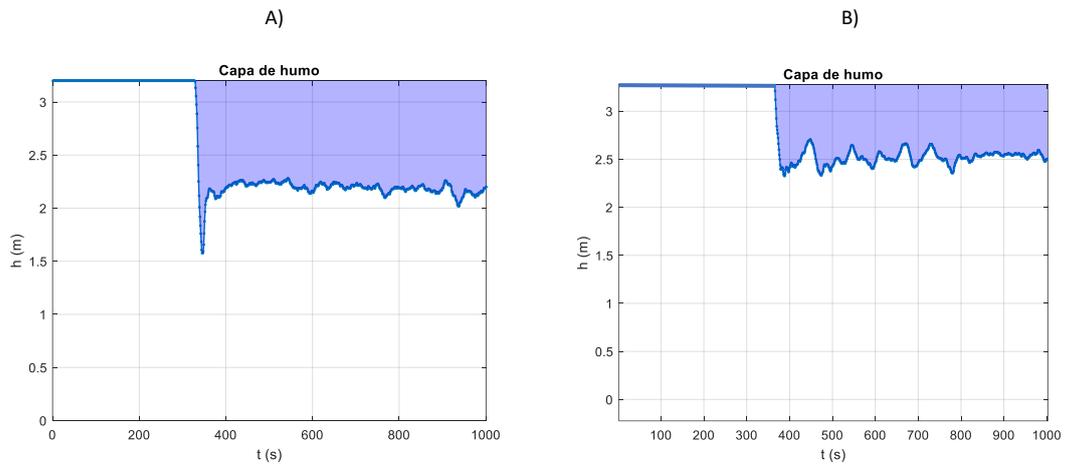


Figura 22. Capa de humo a 30 y 60 m del fuego respectivamente (aguas abajo)

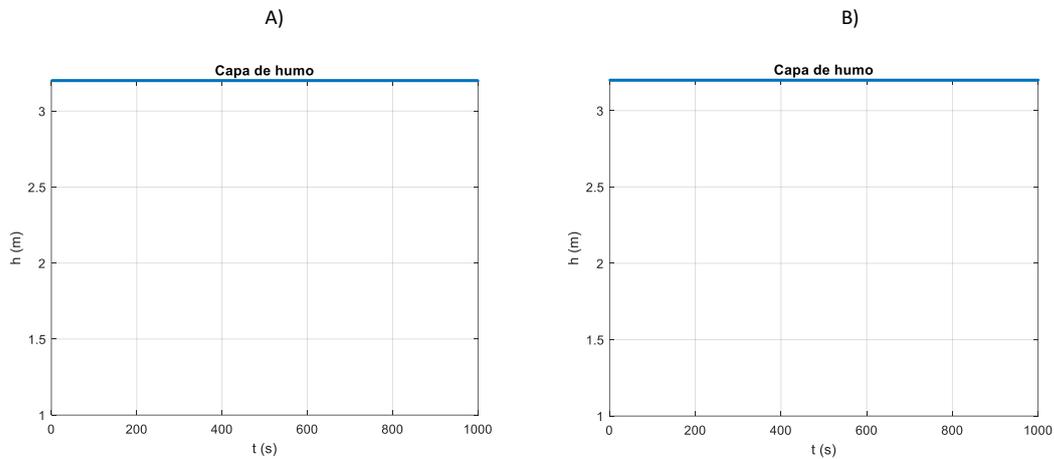


Figura 23. Capa de humo a 600 y 650 m del fuego respectivamente (aguas arriba)

La primera gráfica muestra la altura de la capa de humo a 10 m del origen del incendio. Se observa cómo, a partir de los 300 s, la capa de humo alcanza una altura de 1.5 m aproximadamente, llegando a una altura de casi 3 m, y estabilizándose alrededor de los 3.5 m. Esto indica una acumulación considerable de humo cerca del origen del fuego, donde la densidad del humo es más alta debido a la proximidad del incendio.

Los puntos a los que hace referencia las figura 22 se corresponden con la estación más próxima al origen del incendio. En estas gráficas el punto más alto que aparece en el eje vertical es 3.2 m, a pesar de que la altura de la estación es mayor. Esto se debe a que se ha tenido en cuenta la altura tomando como altura 0 el suelo del andén. La figura 22 a) representa la capa de humo a 30 m del origen del fuego. Aquí también se observa un aumento de la altura de la capa de humo después de los 300 s, coincidiendo con el origen del incendio, estabilizándose a los 2.3 m. En esta gráfica se da un pico donde la capa de humo alcanza casi los 1.5 m de altura. Esto se debe a un cambio abrupto en la dinámica del flujo de aire debido al incremento de la potencia del fuego. Durante esta fase, el incendio alcanza su régimen permanente de 5 MW, lo que provoca un aumento rápido en la generación de humo y la posterior interacción con las corrientes de aire dentro del túnel. A medida que nos vamos alejando de la fuente del fuego, la capa de humo va disminuyendo, como se puede apreciar en la gráfica 22 b), donde se muestra la capa de humo a 60 m del origen del incendio. La altura de la capa de humo se estabiliza alrededor de los 2.5 m de altura.

Las figura 23 reflejan la capa de humo a 600 y 650 m del origen del incendio, y estas se corresponden con dos puntos de la estación de metro tipo más lejana al incendio. La altura de la capa de humo se mantiene constante cerca del techo del modelo durante toda la simulación. Esto indica que, a esta distancia, el humo no ha alcanzado niveles significativos, manteniendo el aire relativamente limpio y seguro.

Estas gráficas demuestran la propagación y acumulación del humo a diferentes distancias del origen del incendio. En las proximidades del fuego (10, 30 y 60 m), la acumulación de humo es significativa, reduciendo la altura de la capa de aire limpio y mostrando fluctuaciones debido a la dinámica del incendio. Sin embargo, a distancias mayores (600 y 650 m), el sistema de ventilación mantiene eficazmente el aire limpio, evitando la acumulación de humo y garantizando la seguridad en esas áreas del túnel. Para mantener la seguridad, lo más recomendable es que la capa de humo no llegue a una altura menor a 2 m, de forma que los usuarios puedan evacuarse y no sufran intoxicaciones por inhalación de humo. En este caso, y observando las gráficas de la figura 22, podemos comprobar como esta medida se cumple en gran parte de la simulación, exceptuando el pico ya mencionado en la gráfica 22 a).

5. Modelo híbrido 1D-3D

Los modelos tridimensionales 3D, son conocidos por su capacidad para proporcionar una representación detallada y precisa de los fenómenos térmicos en simulaciones de incendios. Sin embargo, su aplicación a gran escala en sistemas extensos como las líneas metro puede ser muy costosas, en términos de operaciones computacionales, y a menudo resultan ser imprácticas para simulaciones de largo plazo. Por otro lado, los modelos unidimensionales 1D, ofrecen una mayor eficiencia computacional al simplificar las ecuaciones de flujo y transferencia de calor, pero pueden carecer de la resolución y detalle necesaria para capturar valores o parámetros cruciales cerca de la fuente del incendio y en otras áreas clave para el estudio del trabajo.

El modelo híbrido 1D-3D combina lo mejor de ambos modelos. Este modelo híbrido integra la precisión de los modelos 3D con la eficiencia de los modelos 1D. El modelado híbrido permite reducir significativamente el tiempo y los recursos computacionales necesarios para realizar simulaciones de incendios a gran escala, permitiendo ajustar el nivel de detalle en función de la importancia de diferentes secciones del túnel, optimizando así los recursos y el tiempo de simulación. De esta forma, este tipo de modelos permite mantener un alto nivel de precisión en áreas críticas del túnel, permitiendo una mejor predicción de la propagación del calor y del humo.

El objetivo de este proyecto y lo que da nombre al título es presentar y analizar el modelo híbrido 1D-3D para el caso de un incendio en un tramo de metro. Aunque se han discutido varios aspectos relacionados y se han empleado otros modelos, el núcleo de este trabajo reside en la implementación y evaluación de un modelo híbrido que combina las ventajas de las simulaciones 3D, y las del 1D; y analizando su efectividad.

Para implementar este modelo híbrido 1D-3D, se ha utilizado la herramienta de simulación avanzada Fire Dynamics Simulator (FDS). La integración de los modelos 1D y 3D se realiza mediante un acoplamiento que permite el intercambio de información entre las distintas escalas de modelado. El acoplamiento se ha realizado estableciendo las áreas que diferencian el modelado 3D del modelado en una dimensión, estas son las zonas de transición. Estas zonas de transición son áreas específicas del dominio donde se realiza el intercambio de datos entre los modelos 1D y 3D. Estas zonas deben estar cuidadosamente definidas para garantizar una transición suave y coherente de la información, y que se mantengan las condiciones de contorno. Para conservar esta coherencia, se utilizan métodos de interpolación y extrapolación: la interpolación ajusta

los datos del modelo 1D para que sean compatibles con la malla más fina del modelo 3D. Mientras, la extrapolación ajusta los datos del modelo 3D para que se adapten a la representación simplificada del modelo 1D. [23]

Para elaborar este modelo híbrido, se ha empleado el modelado 3D en áreas críticas como son las dos estaciones y los extremos del modelo, incluyendo las áreas cercanas al origen del incendio. En estas zonas se requiere una alta resolución espacial para capturar los efectos térmicos y la dispersión del humo con precisión. El uso del modelado en una dimensión se ha reservado para la mayor parte del túnel que conecta las dos estaciones, en concreto 560 m de los 600 m que componen dicho túnel, con el fin de representar la transferencia de calor y el flujo de aire de manera eficiente.



Figura 24. Representación del modelo 1D-3D del tramo de línea de metro

5.1 Condiciones y parámetros para la simulación

Las condiciones y parámetros iniciales no han variado con respecto al modelo anterior. EL incendio simulado va a seguir una rampa lineal empezando su HRR en 0 durante los primeros 300 s, y luego durante los siguientes 50 s va a consistir en una rampa lineal creciente hasta los 5200 kW aproximadamente, como se aprecia en la figura 39. El área del incendio sigue siendo de 4 m², un cuadrado de 2x2 m con un HRR de 5200 kW, lo que da un HRRPUA de 1300 kW/m².

La duración de la simulación es de 1000 s, y el tiempo necesario para ejecutarla de forma completa ha sido de 115 horas, lo que supone un ahorro considerable de coste computacional con respecto al anterior modelo, que era tridimensional en su totalidad (un ahorro del 29,71%).

Las condiciones de contorno se mantienen, donde los extremos del modelo están abiertos, además de las seis salidas que se encuentran en las estaciones permanecen. Por su parte, la ventilación, sigue siendo una ventilación longitudinal con una velocidad

de 1.5 m/s. Adicionalmente, la temperatura ambiente en el modelo tampoco ha variado, siendo la temperatura inicial en todos los puntos 11°C.

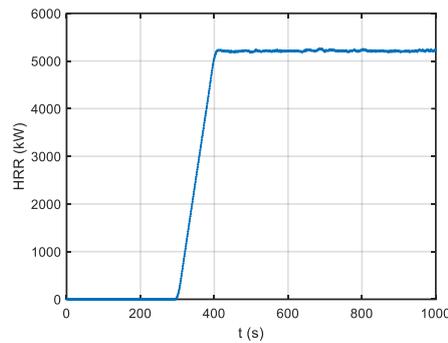


Figura 25. Representación del HRR durante el tiempo de simulación

5.2 *Análisis de la temperatura*

5.2.1 *Evolución temporal de la temperatura*

Para empezar con la evaluación de resultados, se va a empezar analizando la temperatura en función del tiempo en varios puntos clave del modelo: se van a tomar 3 puntos de la estación más alejada al fuego (los extremos de cada estación y la salida central de la estación), 2 puntos en el túnel que conecta ambas estaciones: el punto sobre el que se encuentra el origen del incendio, y un punto situado a 550 m aguas arriba del origen. Las 3 últimas zonas que se van a analizar se encuentran en la estación de metro más próxima al origen del fuego, y estas se dispondrán en los extremos de la estación, y sobre la salida central de la estación.

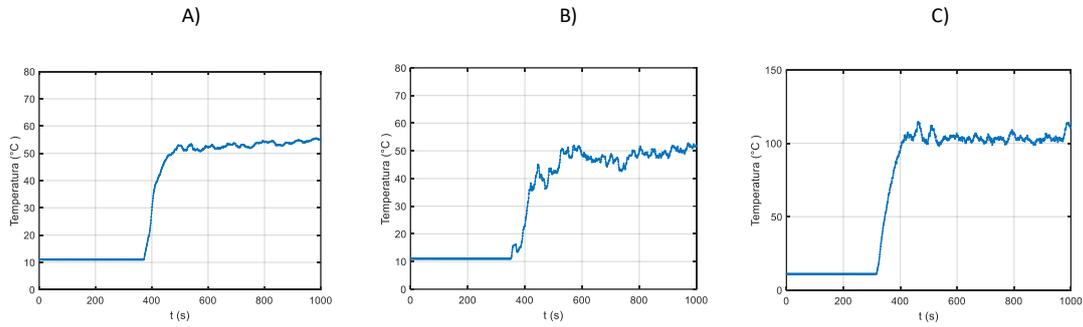
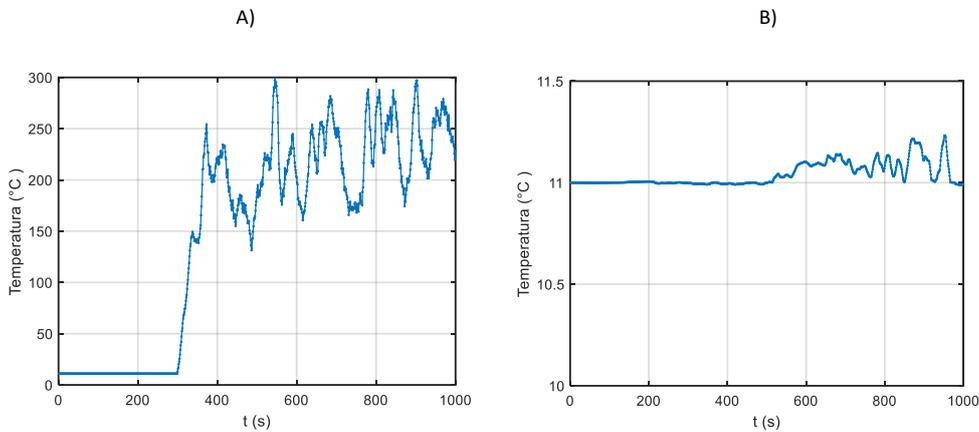


Figura 26. Evolución temporal de la temperatura a 90, 60 y 20 m del origen del incendio respectivamente (aguas abajo)



Figuras 27. Evolución temporal de la temperatura a 0 y 550 m del origen del incendio respectivamente (aguas arriba)

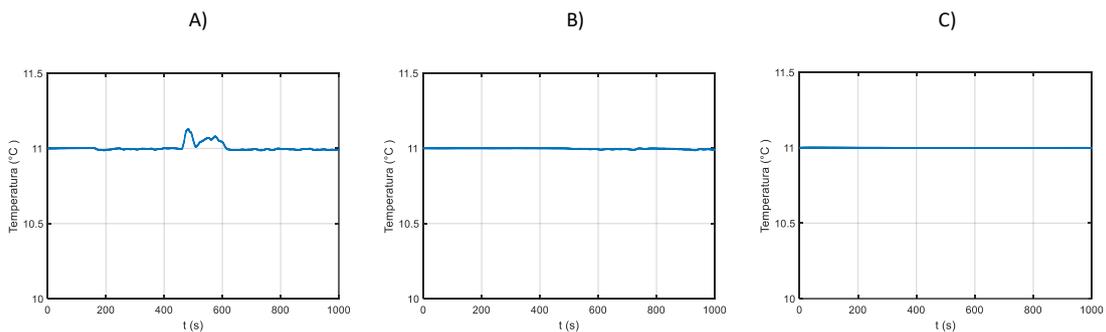


Figura 28. Evolución temporal de la temperatura a 600, 620 y 650 m del origen del incendio respectivamente (aguas arriba)

La figura 26 representa la evolución de la temperatura en puntos situados a 90, 60 y 20 m del origen del incendio, respectivamente. A 60 y 90 m del incendio, las temperaturas alcanzadas son muy similares, excepto que a 60 m las fluctuaciones son mayores, probablemente debidas a las salidas de la estación. Estas similitudes en la temperatura

se daban también en el modelo 3D. Como ya se ha comentado, a pesar de que la gráfica 26 a) se encuentre 30 m más alejada de la fuente del fuego que la gráfica 26 b), las temperaturas alcanzadas son casi idénticas, y esto se debe a que la figura 26 b) es una representación de la temperatura en un punto situado a la altura de una salida de la estación, por lo que el intercambio de temperaturas producido entre el exterior e interior hace que el aumento de temperatura en ese punto no sea tan notable, y que se alcancen unas temperaturas que no superen en ningún momento los 60°C.

La figura 27 hace referencia a dos puntos situados en el túnel conector de ambas estaciones. La primera gráfica de las dos está situada justo en el origen del incendio. Se puede comprobar ya que en este punto se alcanzan las temperaturas más altas en todo el modelo, superando los 300°C. Además, en este punto es donde mayor variabilidad, y más grandes fluctuaciones existen. Esto es producido por las corrientes de convección y las turbulencias, que son más pronunciadas cerca del origen, causando variaciones rápidas en la temperatura. La figura 27 b) hace referencia a un punto del túnel situado a 550 m del fuego aguas arriba, por lo que es de esperar que las temperaturas no se vean tan afectadas. Esto se puede corroborar rápidamente observando la gráfica, donde existe un aumento de temperaturas a partir del segundo 500, pero que no supera 0.5°C de incremento, por lo que no se puede considerar como un aumento de temperaturas relevante para el estudio del proyecto. Viendo las gráficas de volumen de humo que se mostrarán más adelante, se puede concluir que esta pequeña fluctuación de la temperatura puede deberse a una pequeña inestabilidad numérica, ya que no existe capa de humo en este punto de la estación.

En las últimas tres gráficas del grupo, las temperaturas se mantienen muy estables y cercanas a la temperatura inicial de 11°C durante toda la simulación. Esto indica que, a estas distancias, el impacto térmico del incendio es prácticamente nulo y la ventilación es efectiva en mantener un ambiente seguro.

Las gráficas demuestran una disipación térmica clara en el túnel, con temperaturas significativamente altas cerca del origen del incendio y estabilización a medida que se aleja del fuego. Este análisis es crucial para entender cómo el calor se propaga en un escenario de incendio en un túnel de metro y cómo las condiciones de contorno y la ventilación pueden afectar la temperatura en diferentes puntos. Es necesario comentar la existencia de algunas anomalías en las gráficas, como la que aparece en la figura 28 a), donde hay un aumento puntual y ligero de la temperatura. Estas anomalías se deben a errores de precisión en la recopilación o procesamiento de los datos de la simulación, debido al acoplamiento entre la parte unidimensional y tridimensional del modelo híbrido.

5.2.2 Evolución de la temperatura en función de la posición

En el estudio de incendios en túneles, es esencial comprender cómo se distribuye la temperatura a lo largo del tiempo y la distancia desde el origen del fuego. Para ello, se han seleccionado dos momentos críticos de la simulación: los 350 y 800 s. Estos puntos en el tiempo permiten observar tanto la fase inicial del incendio como su estabilización.

Las gráficas presentadas a continuación muestran la variación de la temperatura en función de la posición en el modelo en estos dos momentos clave. Es necesario recalcar que en este modelo híbrido no se han podido establecer sensores de temperatura en la parte unidimensional del modelo, por lo que no se va a tener los datos de los 560 m de longitud que se corresponde con la parte 1D del modelo híbrido.

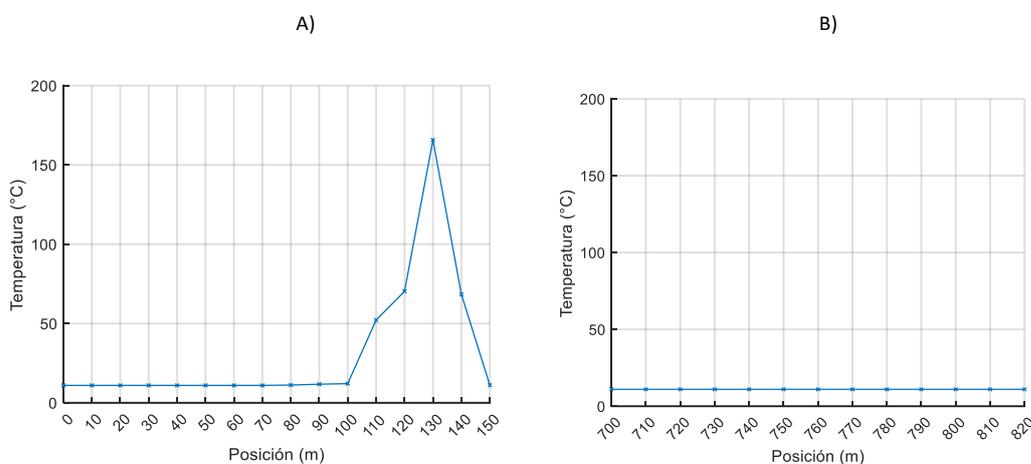


Figura 29. Evolución de la temperatura en función de la posición a los 350 s

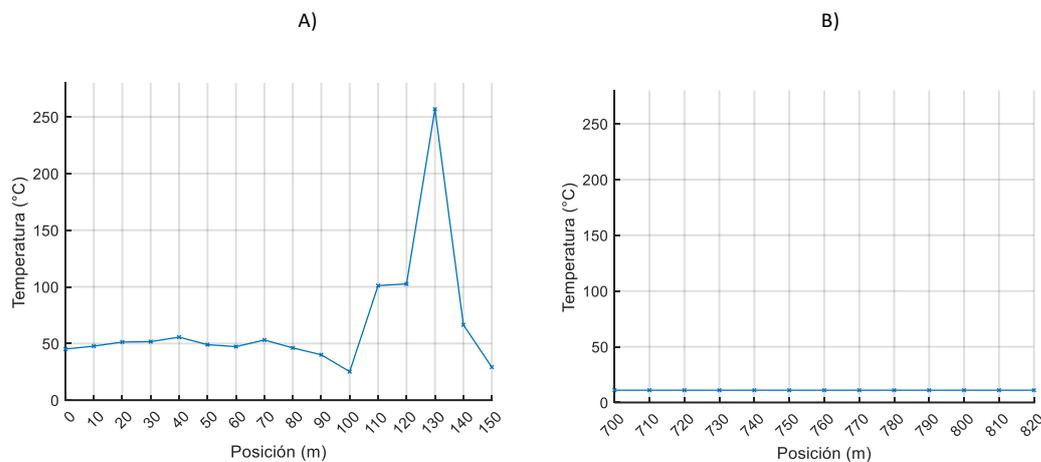


Figura 30. Evolución de la temperatura en función de la posición a los 800 s

La figura 29 muestra la variación de la temperatura a lo largo de la sección del modelo. Se observa un aumento significativo de la temperatura a partir de los 110 m, alcanzando un pico de alrededor de 150°C en los 120-130 m, seguido de una disminución abrupta. Esta distribución indica una zona de alta intensidad térmica, debido a la proximidad al origen del fuego. La gráfica confirma que el foco del incendio está en esa sección del modelo, a los 130 m, lo que genera un gradiente térmico pronunciado en esta área. En la segunda gráfica de los 350 s, que abarca desde los 700 hasta los 820 m, muestra una temperatura prácticamente constante y cercana a 10°C, en concreto 11°C, que coincide con las condiciones iniciales de la simulación. Esto indica que, a esta distancia, el efecto del incendio es insignificante, con el sistema de ventilación y condiciones de contorno, manteniendo el túnel a temperaturas seguras y controladas.

La figura 30 muestra también la variación de la temperatura en función de la posición del modelo. Al igual que ocurre con las gráficas anteriores, se observa un aumento significativo de la temperatura a partir de los 100 m, alcanzando un pico de alrededor de 250°C a los 130 m, seguido de una disminución abrupta. A los 800 s, se observa una temperatura máxima más alta (250°C) en comparación con los 150°C a los 350 s, lo que indica que el incendio ha ganado intensidad y ha generado más calor. A pesar de que las temperaturas hayan aumentado, la estación que se encuentra más alejada del origen del incendio sigue sin verse afectada por él, manteniendo las temperaturas originales del modelo al comienzo de la simulación.

5.2.3 Temperatura en función de la altura

Otro estudio interesante que se puede realizar es el análisis de la temperatura en función de la altura del modelo. Para este análisis, se ha seleccionado un momento específico de la simulación, pasado los 800 s, cuando las temperaturas se han estabilizado. Con el momento elegido, se han identificado tres puntos relevantes del modelo para graficar la temperatura: 10, 60 y 100 m del origen del incendio aguas abajo. A continuación, se presentan las gráficas que muestran la evolución de las temperaturas en estos tres puntos en función de la altura, permitiendo una comprensión detallada de la distribución térmica en el túnel.

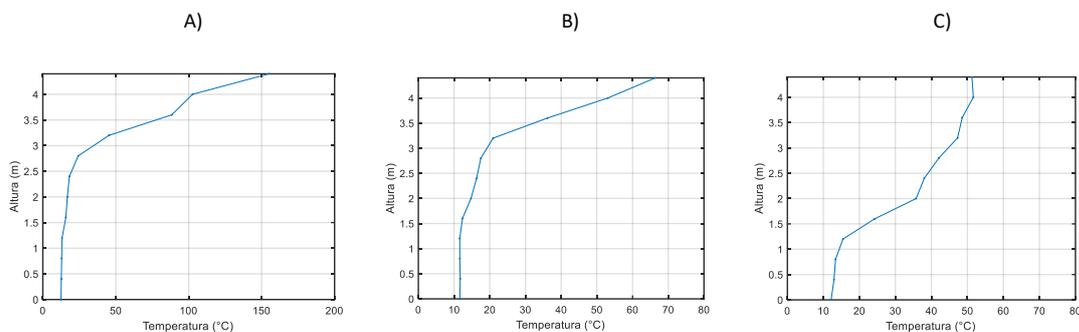


Figura 31. Gráficas de la temperatura en función de la altura a 10, 60 y 100 m aguas abajo del origen del fuego respectivamente

La primera gráfica muestra la variación de la temperatura en función de la altura a 10 m del origen del incendio. Se observa un aumento significativo de la temperatura con la altura, alcanzando un pico de alrededor de 160°C a 4 m de altura. Este comportamiento indica que el aire caliente generado por el incendio tiende a ascender rápidamente, creando un gradiente térmico vertical pronunciado. La alta temperatura a esta distancia del incendio sugiere una fuerte influencia del fuego en las proximidades. Este comportamiento se va a repetir en los otros dos puntos analizados. En la segunda gráfica (que representa la temperatura en función de la altura a 60 m del origen del incendio) la temperatura también aumenta con la altura, alcanzando aproximadamente 80°C a 4 m de altura. Aunque el gradiente térmico es menos pronunciado que en la primera gráfica, sigue siendo significativo. Por último, la tercera gráfica muestra la temperatura a 100 m del origen del incendio. Aquí, la temperatura máxima observada es de alrededor de 60°C en su punto más alto.

En todos los puntos analizados, la temperatura aumenta con la altura, lo que es consistente con el comportamiento del aire caliente que asciende debido a la convección térmica generada por el incendio. A 10 m del origen del incendio, la temperatura alcanza un valor máximo significativamente más alto que a 60 y 100 m, indicando una disminución de la influencia del incendio con la distancia. Aunque el efecto del incendio disminuye con la distancia, todavía se observa un impacto térmico significativo hasta los 100 m, lo que resalta la necesidad de sistemas de ventilación efectivos para mitigar la propagación del calor en túneles.

Las gráficas demuestran cómo el incendio se intensifica y propaga su calor a lo largo del tiempo, afectando significativamente las temperaturas en las proximidades del fuego, pero mostrando una notable efectividad del sistema de ventilación en mantener temperaturas seguras a mayores distancias.

Con todo esto, se puede probar que el modelo híbrido 1D-3D puede capturar de manera efectiva las variaciones térmicas tanto en función de la posición como del tiempo. La consistencia entre las diferentes representaciones de los datos térmicos valida la precisión del modelo en simular el comportamiento del incendio y su propagación en el túnel.

5.3 *Análisis de la velocidad*

Tras analizar la temperatura, se va a examinar la velocidad del aire en distintos puntos del túnel y a diferentes alturas, en varios momentos de la simulación del incendio. El análisis de la velocidad del aire en función del tiempo o de la altura es esencial en el estudio de incendios en un tramo de metro porque permite entender cómo el incendio afecta la circulación del aire y la propagación del calor y el humo. La dinámica del flujo de aire influye en la dispersión de gases tóxicos y en la eficiencia de los sistemas de ventilación y evacuación. Además, este análisis ayuda a evaluar las condiciones de seguridad para los ocupantes y a diseñar estrategias efectivas de control del incendio y evacuación.

Se va a evaluar tanto las etapas iniciales como las avanzadas del incendio, analizando los cambios en las condiciones a medida que el incendio avanza. Este estudio nos proporcionará información crucial para mejorar la efectividad de los sistemas de

ventilación. Similar al análisis de temperatura, se evaluará la velocidad del aire en dos puntos concretos: a los 350 y 800 s de la simulación.

5.3.1 Velocidad en función del tiempo

Primero se analizará la velocidad en el eje x a diferentes alturas del modelo durante la duración de la simulación en tres puntos específicos: a 10 m aguas abajo del origen del incendio, que corresponde al túnel que conecta ambas estaciones. Otro a 60 m aguas abajo del incendio, en el punto medio de la estación de metro más cercana al fuego. Por último, se va a tomar un punto a 100 m de distancia aguas abajo del incendio.

Punto situado a 10 m del origen

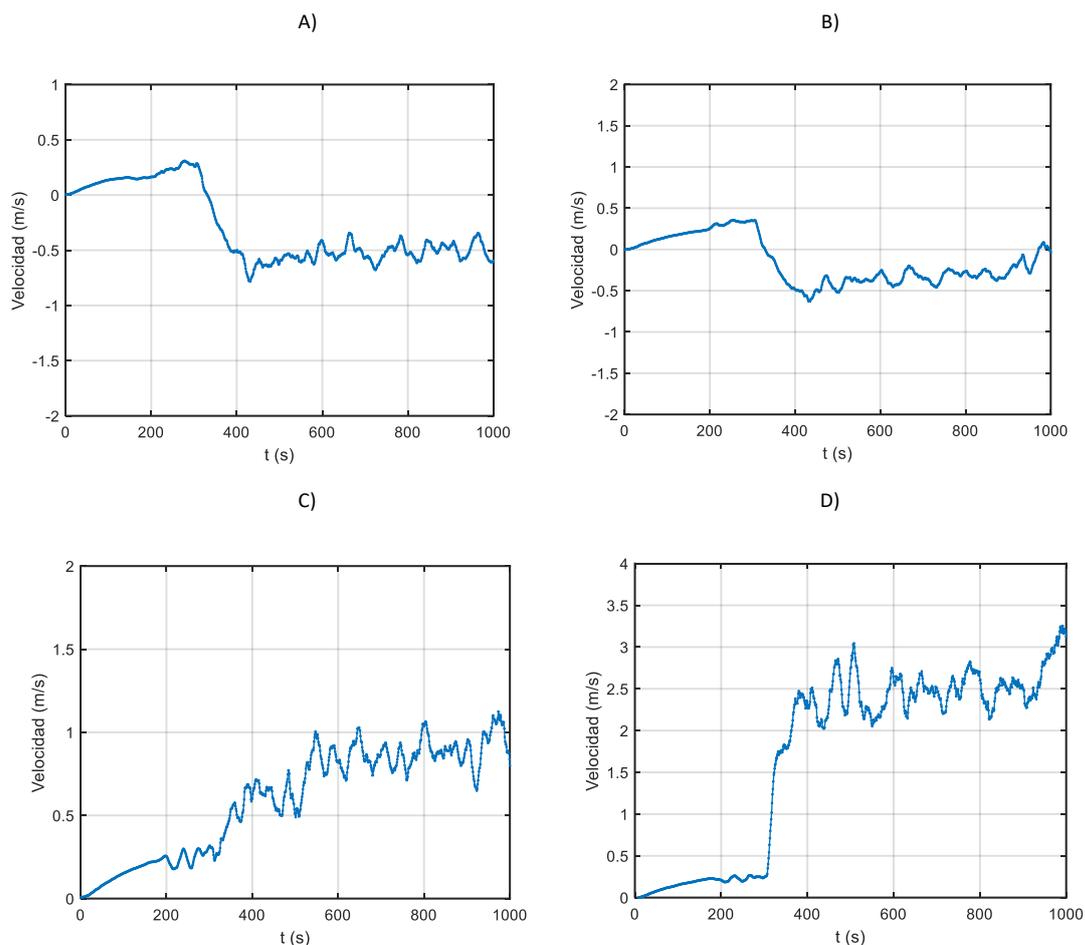


Figura 32. Gráficas de la velocidad en función del tiempo a 0, 1.6, 3.2 y 4.5 m de altura respectivamente

Punto situado a 60 m aguas abajo del origen

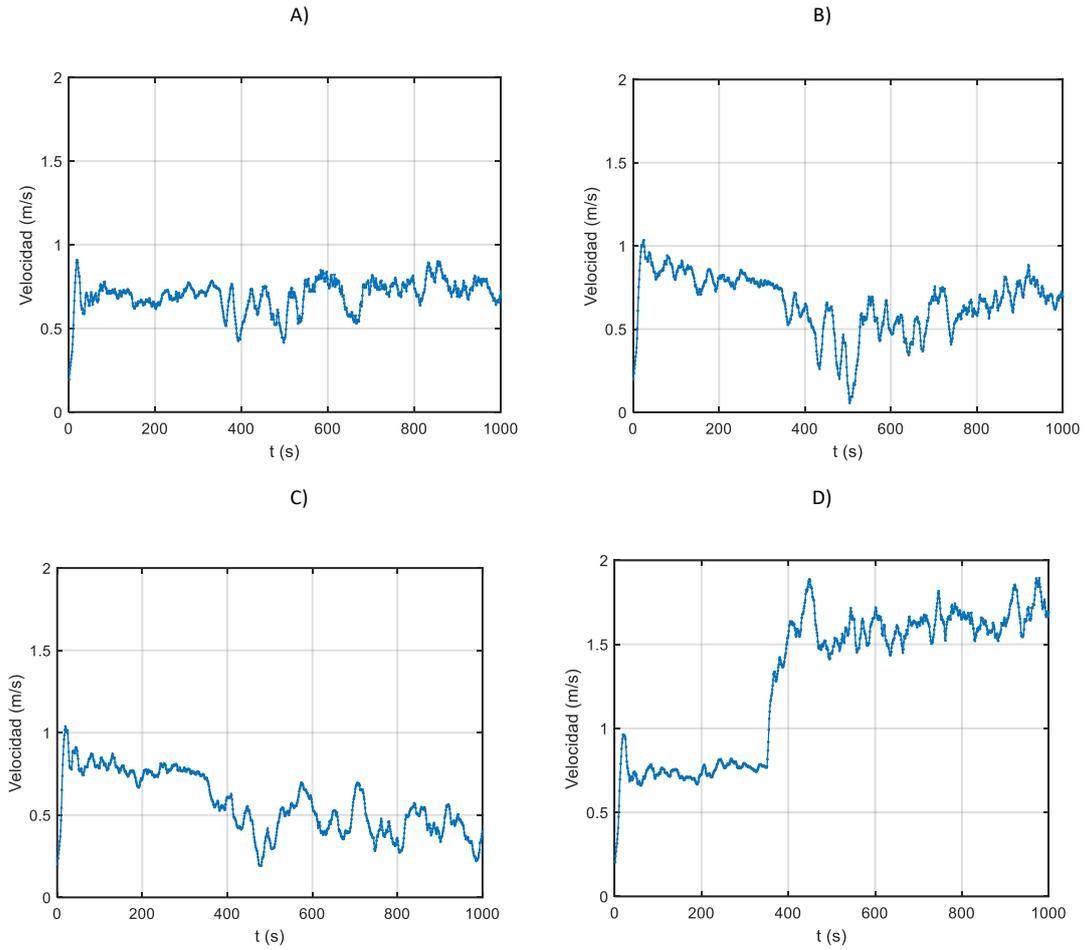


Figura 33. Gráficas de la velocidad en función del tiempo a 0, 1.6, 3.2 y 4.5 m de altura respectivamente

Punto situado a 100 m aguas abajo del origen

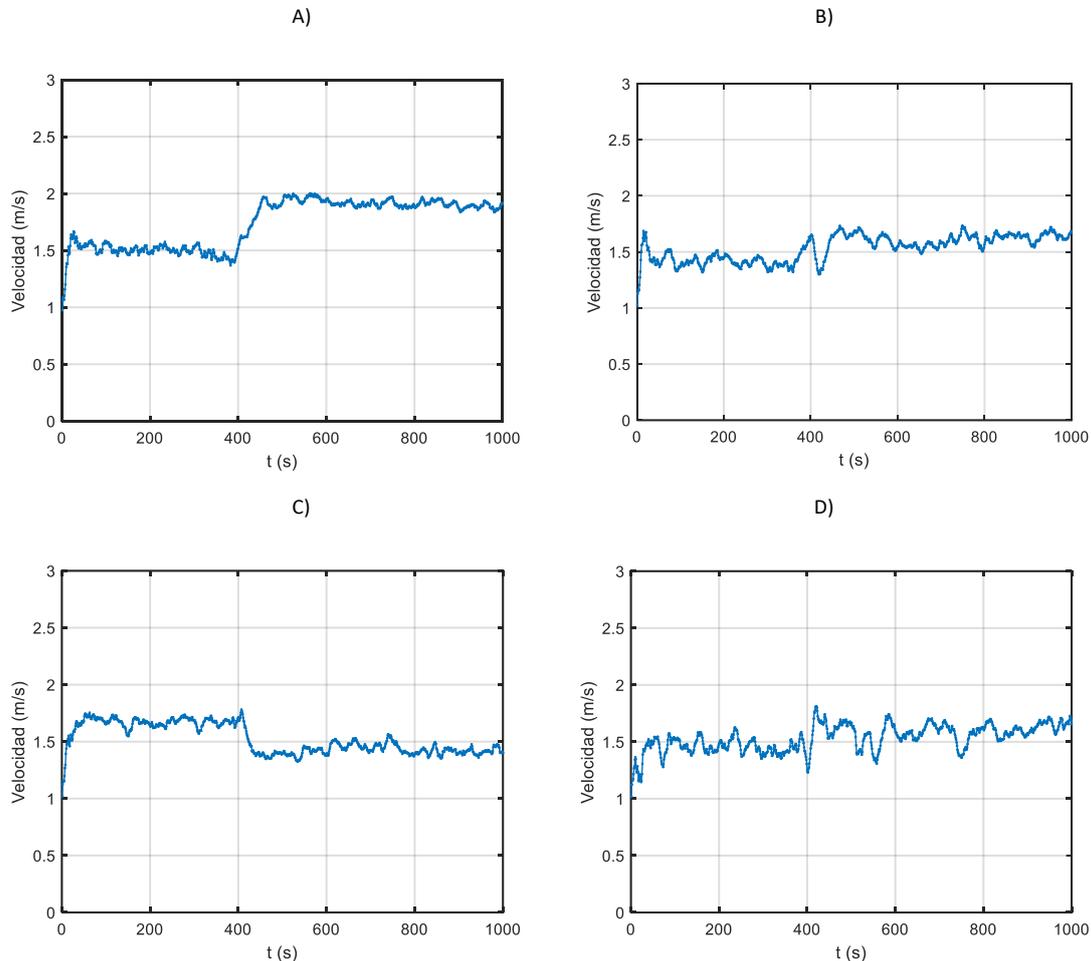


Figura 34. Gráficas de la velocidad en función del tiempo a 0, 1.6, 3.2 y 4.5 m de altura respectivamente

A 10 m del fuego se puede apreciar como en las dos primeras gráficas la velocidad del aire alcanza valores negativos, mientras que a partir de los 3 m de altura aproximadamente sus valores empiezan a sufrir un aumento, alcanzando máximos de 3.3 m/s en el techo del túnel. Estos valores negativos se deben a que, al encontrarse en un punto tan cercano a la fuente, en los puntos más bajos del modelo se han generado contracorrientes que son inducidos por diferencias de presión debidas al calentamiento del aire.

En el punto situado a 60 m del origen del incendio aguas abajo, se puede observar cómo se repite el patrón alcanzando las máximas velocidades en su altura máxima, logrando

valores cercanos a 2 m/s. Cuanto más nos alejamos del origen del fuego, se puede ver como el incremento de velocidades no es tan notable a medida que subimos de altura, como se puede observar en el punto $x=100$ m, donde las gráficas de velocidad no sufren un aumento considerable, sino que se mantienen con cierta estabilidad en torno al valor de 1.5 m/s, salvo a nivel de suelo, donde hay una velocidad de 2 m/s constantes, una vez el incendio ha llegado a la potencia de 5 MW. A 60 y 100 m todas las velocidades son mayores a 0. A medida que nos alejamos del fuego, la influencia directa de las corrientes térmicas generadas por el incendio disminuye considerablemente, a distancias mayores, estas corrientes pierden fuerza, por lo que el flujo de aire producido por el sistema de ventilación es mayor.

Viendo las gráficas anteriores, se puede apreciar como la velocidad del aire aumenta con la altura, obteniendo el valor más alto de velocidad en el punto más alto del modelo. Además, las diferencias de velocidad entre el punto más bajo y el punto más alto del modelo van disminuyendo a medida que nos vamos alejando de la fuente del fuego. Esto indica que es más difícil conseguir una estabilización en la velocidad del aire en puntos más cercanos al origen del incendio.

5.3.2 Velocidad en función de la altura

El siguiente paso es el estudio de la velocidad a diferentes alturas del modelo en momentos concretos de la simulación (a los 350 y 800 s). Este análisis es fundamental para comprender mejor cómo se distribuye el aire durante un incendio en un túnel de metro. El análisis de estas gráficas análisis permite identificar las variaciones en el flujo de aire a diferentes niveles verticales, lo cual es crucial para evaluar la propagación de humo y calor.

Punto situado a 10 m del origen

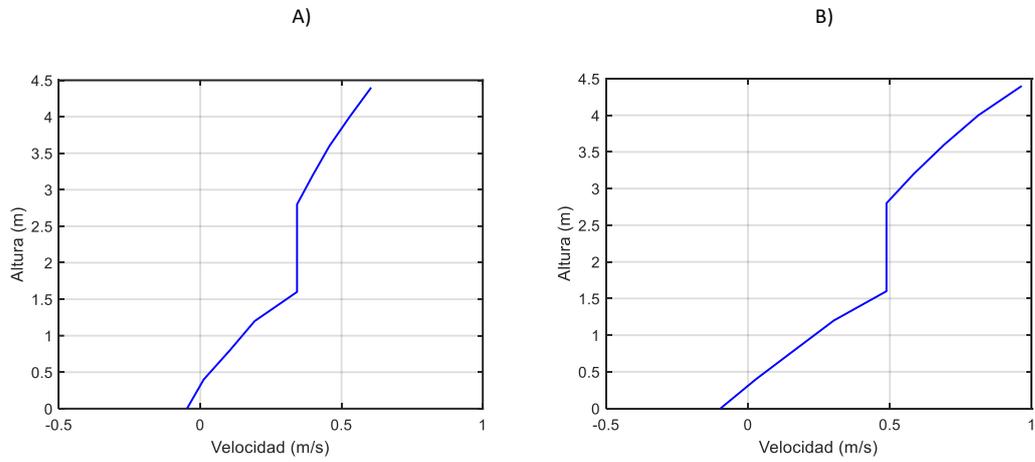


Figura 35. Gráficas de la velocidad en función de la altura a los 350 y 800 s respectivamente

Punto situado a 60 m aguas abajo

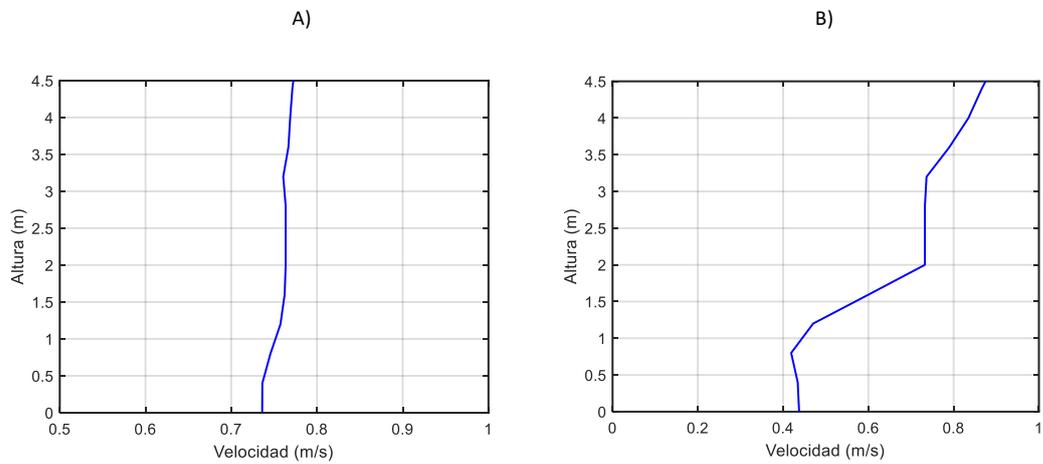


Figura 36. Gráficas de la velocidad en función de la altura a los 350 y 800 s respectivamente

Punto situado a 100 m aguas abajo

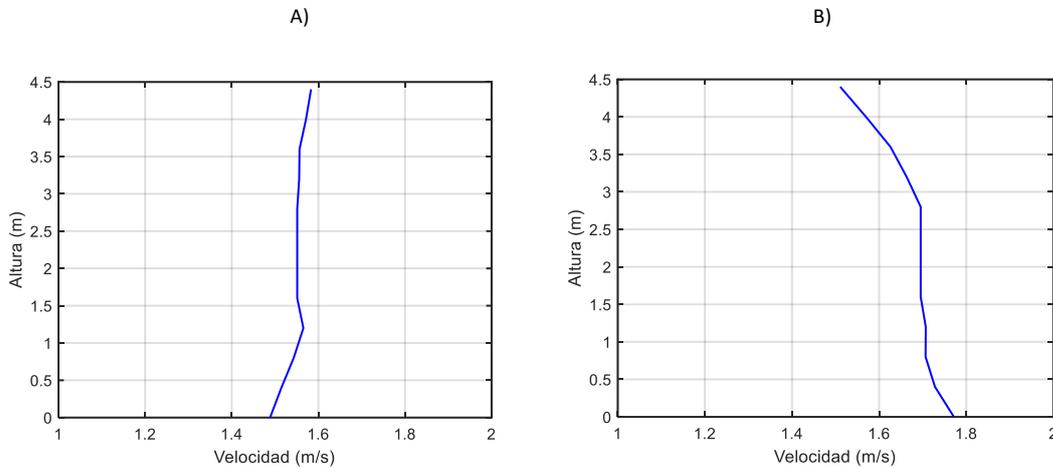


Figura 37. Gráficas de la velocidad en función de la altura a los 350 y 800 s respectivamente

En las gráficas presentadas, se observa la evolución de la velocidad del aire en función de la altura en diferentes puntos del túnel a 10, 60 y 100 m del origen del incendio, tanto a los 350 como a los 800 s de la simulación.

A 10 m del origen, se percibe una progresión en la velocidad del aire a medida que se incrementa la altura. A los 350 s, la velocidad alcanza alrededor de 0.8 m/s, incrementándose a 1 m/s a los 800 s, indicando una mayor dispersión del flujo de aire conforme el incendio se estabiliza.

En el punto situado a 60 m del origen se repite el mismo patrón que en el punto anterior. La velocidad del aire a 350 s es moderada, aumentando ligeramente hacia la parte superior del túnel, con velocidades que oscilan entre 0.7 y 0.9 m/s. A los 800 s, se observa un incremento más marcado en la velocidad, especialmente a mayores alturas, donde alcanza 1.8 m/s. Este aumento indica una intensificación del flujo de aire hacia las áreas superiores a medida que el calor y el humo se propagan.

A 100 m del origen del incendio, ocurre algo distinto a los dos puntos previos. A los 350 s, la velocidad varía entre 0.5 y 0.8 m/s, alcanzando su máximo en el techo, mientras que, a los 800 s, las velocidades alcanzan hasta 1.8 m/s, pero se dan en el suelo del modelo no en el techo. En este caso las velocidades disminuyen a medida que aumenta la altura. Esta gráfica puede parecer contraintuitiva, ya que generalmente se esperaría un incremento en la velocidad debido a la mayor liberación de calor a mayores alturas, que impulsa el flujo ascendente. Sin embargo, en este caso, dicha disminución se puede deber a la estructura del modelo, ya que el punto se encuentra en el túnel muy próximo

al extremo de la estación, por lo que la diferencia de alturas entre estación y túnel puede alterar la distribución del flujo de aire y causar una reducción en la velocidad a mayores alturas.

5.3.3 Conclusiones de la velocidad del aire

En el análisis de las gráficas obtenidas durante la simulación del incendio, se observa la presencia de velocidades negativas del aire en ciertos puntos, fenómeno que se atribuye a la convección térmica como ya se ha mencionado. Este fenómeno es importante para comprender cómo las corrientes de aire caliente ascendentes y descendentes pueden afectar el flujo general del aire en el entorno del túnel y explicar de forma coherente dichos valores menores a 0.

La convección térmica es el proceso de transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido, como el aire o el agua. Este fenómeno ocurre cuando el calor genera diferencias de temperatura en el fluido, provocando cambios en su densidad. Los fluidos más calientes, menos densos, tienden a ascender, mientras que los más fríos, más densos, descienden. Este ciclo de movimiento crea corrientes de convección que distribuyen el calor. [24]

En el contexto de un incendio en un túnel de metro, las velocidades del aire pueden volverse negativas debido a varios factores. Un flujo de aire negativo indica que el aire se mueve en la dirección opuesta al flujo predominante, o en este caso, opuesta a la ventilación del túnel establecida en las condiciones iniciales. Esto se debe, generalmente, a presiones o fuerzas contrarias. Puede ocurrir cuando el aire caliente asciende rápidamente y el aire frío circundante se desplaza para ocupar su lugar, creando una corriente descendente que se manifiesta como una velocidad negativa. Además, en espacios cerrados como túneles o estaciones de metro, las variaciones en la velocidad del aire pueden verse influenciadas por obstáculos, cambios en la sección del túnel, salidas de aire y otros elementos que afectan el flujo del aire. [25]

Estos fenómenos son cruciales en la ingeniería de seguridad, especialmente en la gestión de emergencias y el diseño de sistemas de ventilación, ya que permiten entender cómo se comportan el humo y el calor en situaciones de incendio, y cómo evacuar el calor y los productos de combustión de manera eficiente para proteger a las personas y la infraestructura.

5.4 *Análisis de la capa de humo*

La gran parte del peligro para los seres humanos durante un incendio en un túnel de metro proviene de la inhalación de humo y gases tóxicos, y no tanto por las quemaduras o las altas temperaturas que se dan debido al incendio. Es crucial comprender cómo se comporta la capa de humo en estas situaciones para implementar medidas de seguridad efectivas. La acumulación y el movimiento del humo pueden reducir la visibilidad y dificultar la evacuación, además de ser una fuente importante de intoxicación

En la mayoría de los códigos de construcción y normativas sobre seguridad contra incendios, se establece que la altura de la capa de humo debe mantenerse por encima de 2 m en espacios cerrados para asegurar condiciones de visibilidad y seguridad durante la evacuación.

Por ejemplo, el International Building Code (IBC) 2012 especifica en su sección 909.8.1 que la altura de la superficie horizontal más baja de la capa de humo debe mantenerse al menos a 6 pies (aproximadamente 1.8 m) por encima de cualquier superficie de tránsito que forme parte de un sistema de salida requerido dentro de la zona de humo. Esta normativa garantiza condiciones seguras para las personas evacuando el edificio, evitando la inhalación de humo y mejorando la visibilidad. [26]

Adicionalmente, la NFPA 92, que es la norma para los sistemas de control de humo, también incluye requisitos sobre la profundidad y altura de la capa de humo. Específicamente, establece que el diseño debe asegurar que las condiciones sean seguras para los ocupantes durante el tiempo de evacuación, lo que generalmente implica mantener la capa de humo a una altura segura por encima del nivel de tránsito. [27]

Por lo tanto, aunque los requisitos específicos pueden variar ligeramente entre diferentes códigos y normativas, el consenso general es que la capa de humo no debe descender por debajo de los 2 m para garantizar la seguridad y visibilidad en situaciones de evacuación de emergencia.

Para realizar el análisis de la capa de humo, se han seleccionado varios puntos clave del modelo para observar la altura de dicha capa y estudiar si cumple las medidas de seguridad y las normas establecidas. En este caso se ha seleccionado un punto del túnel

que se encuentra a 10 m de la fuente aguas abajo, dos puntos de la estación más próxima a dicha fuente (a 30 y 60 m), y otros dos puntos de la estación más alejada del fuego (a 600 y 650 m aguas arriba).

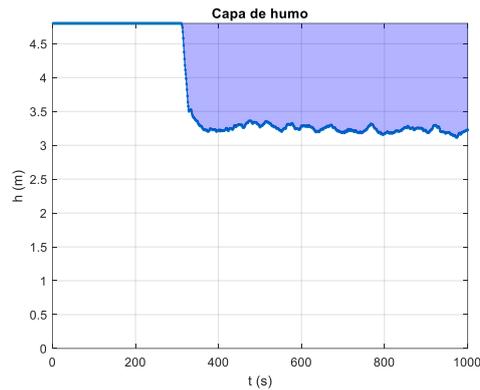


Figura 38. Capa de humo a 10 m del fuego (aguas abajo)

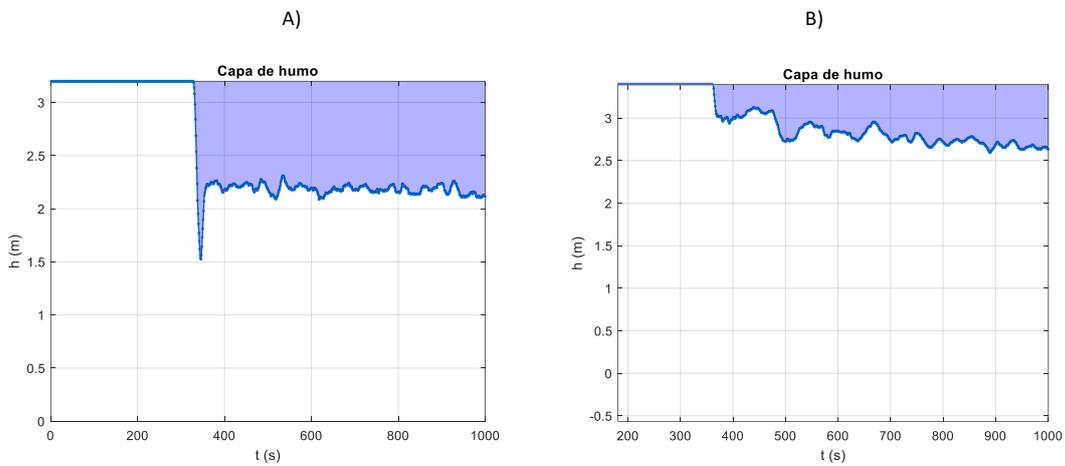


Figura 39. Capa de humo a 30 y 60 m del fuego respectivamente (aguas abajo)

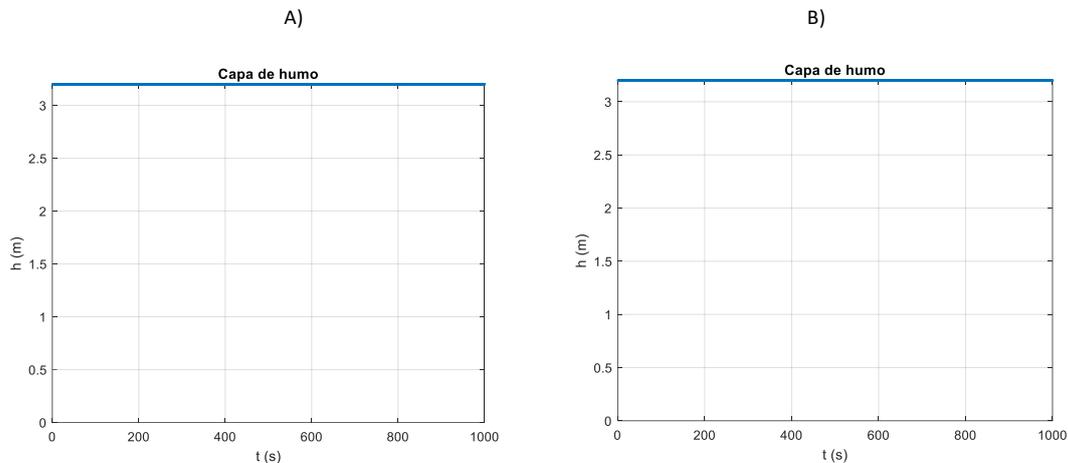


Figura 40. Capa de humo a 600 y 650 m del fuego respectivamente (aguas arriba)

En la primera gráfica, a 10 m del origen del incendio, se observa que la capa de humo se empieza a formar a partir de los 300 s, estabilizándose por debajo de los 3.5 m. Esta rápida formación de la capa de humo se debe al inicio del incendio, que genera una gran cantidad de humo que se acumula rápidamente cerca del punto de origen.

Las figuras 39 y 40 representan cuatro puntos en las dos estaciones que hay en el modelo. En estas figuras se puede apreciar como la máxima altura que aparece es de 3.2 m. Esto es la altura que hay desde el andén de la estación hasta el techo del modelo.

A 30 y 60 m, se presenta un comportamiento similar, con un aumento notable en la capa de humo seguido de una estabilización. A 30 m, la capa alcanza una altura de 2.15 m, mientras que, a 60 m del origen, la capa se estabiliza ligeramente por encima de los 2.5m. Se puede observar, como a 60 m, la capa de humo generada es de menor volumen con respecto a las dos gráficas anteriores comprobando que el volumen de la capa de humo y la distancia tienen una correlación negativa, de forma que a medida que la distancia aumenta, el volumen de la capa de humo disminuirá.

Las dos últimas gráficas, a 600 y 650 m del origen del incendio, muestran que no se forma capa de humo prácticamente y se mantiene constante a una altura del techo. Esto se debe a que la distancia es suficientemente grande para que el humo se diluya y no afecte significativamente la visibilidad en esos puntos lejanos.

Las gráficas demuestran cómo la concentración de humo disminuye con la distancia al origen del incendio, y reflejan que no existe un riesgo excesivo para la salud de los usuarios de la vía puesto que, en la estación más próxima al incendio (figura 39), la capa

de humo no llega a sobrepasar los 2 m de altura, y la estación más alejada (figura 40) no se ve afectada por el incendio.

6. Comparación del modelo 3D y el modelo híbrido

El modelo híbrido 1D-3D emerge como una alternativa viable que equilibra precisión y eficiencia. Al utilizar el modelado unidimensional en secciones del túnel con flujo uniforme y aplicar el modelado tridimensional en áreas críticas, el modelo híbrido logra reducir los tiempos de cálculo (en este proyecto se ha conseguido un ahorro del 29.71% en los tiempos de simulación), y la necesidad de recursos computacionales sin comprometer la calidad de los resultados. Además, el modelo 3D requiere seis procesos de cálculo (seis núcleos), mientras que el modelo híbrido necesita cinco procesos (cinco núcleos), consiguiendo un ahorro, que no solo supone un menor tiempo de simulación, sino también en un uso más eficiente de los recursos computacionales, lo que puede ser particularmente valioso en simulaciones a gran escala.

Estos modelos híbridos se caracterizan por ofrecer eficiencia computacional, al reducir significativamente el número de celdas de cálculo necesarias y, por ende, el tiempo y los recursos computacionales requeridos para ejecutar las simulaciones. También consiguen obtener precisión en áreas críticas al usar el modelado 3D para capturar con precisión los fenómenos físicos complejos, como la propagación del humo y el calor. Además, este tipo de modelos son especialmente útiles para la aplicación en escenarios complejos, como es este caso, donde los túneles de metro presentan desafíos específicos debido a su longitud y estructura.

La adopción de modelos híbridos 1D-3D en el análisis de incendios en túneles de metro es, por tanto, una estrategia muy recomendable que permite obtener resultados rápidos y precisos, optimizando el uso de los recursos disponibles. Esto es especialmente relevante en escenarios de emergencias donde la rapidez en la obtención de resultados puede marcar la diferencia en la efectividad de las medidas de respuesta y evacuación.

Con el fin de evaluar la eficacia de estos modelos híbridos, se ha realizado también la simulación del mismo tramo de línea de metro empleando en su lugar un modelo tridimensional completo. Observando las gráficas resultantes de las simulaciones, se puede comprobar como la diferencia de temperaturas, velocidades, y alturas de la capa de humo no son significativas en absoluto, todo lo contrario. Salvo por algunas fluctuaciones que aparecen en los resultados de las simulaciones del modelo híbrido (resultantes del acoplamiento entre la parte unidimensional y tridimensional del modelo), las gráficas conseguidas son prácticamente idénticas. Para comprobarlo se han

rescatado varias gráficas de cada modelo para poder analizar la diferencia porcentual entre los dos modelos. Para ello, se ha seleccionado una gráfica de temperatura (la evolución temporal de la temperatura a 60 m aguas abajo del origen), la evolución de la tempera en función de la posición, una gráfica de la velocidad en función de la altura a 60 m aguas abajo en régimen estacionario, y una de la altura de la capa de humo (la evolución temporal de la capa de humo a 30 m aguas debajo de la fuente de fuego)

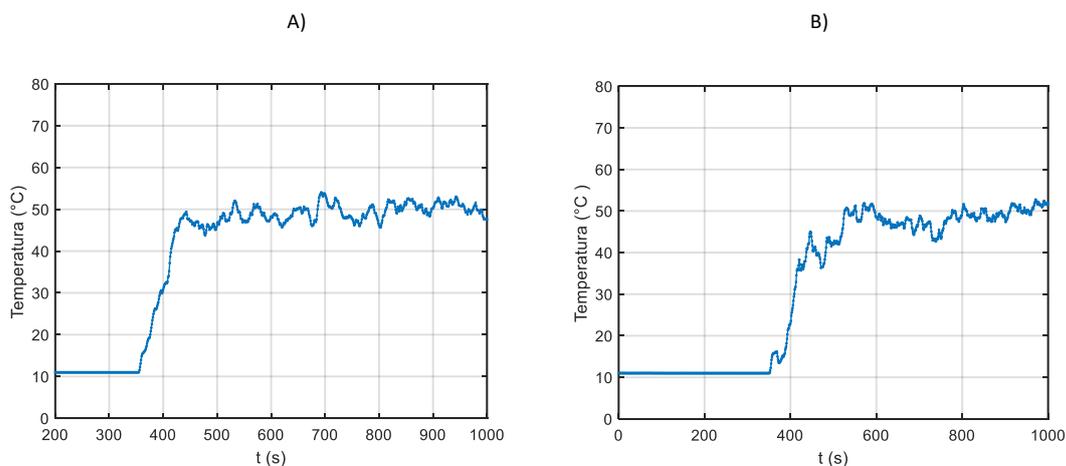


Figura 41. Evolución temporal de la temperatura a 60 m del origen de los modelos 3D y 1D-3D respectivamente

Al comparar ambas gráficas, se observa que ambas siguen un patrón similar de aumento de temperatura tras el inicio del incendio, alcanzando temperaturas muy similares. Sin embargo, existe cierta diferencia entre los segundos 400 y 600 de la simulación. En el modelo 3D, la temperatura alcanza rápidamente un nivel constante alrededor del segundo 450, manteniéndose relativamente estable con ligeras fluctuaciones. En cambio, en el modelo híbrido, se observa un comportamiento más errático en este intervalo, con una mayor variabilidad en la temperatura. Esto puede deberse a las diferencias en la resolución entre ambos modelos, donde el modelo híbrido, no puede capturar con tanto detalle, como si lo hace el modelo 3D.

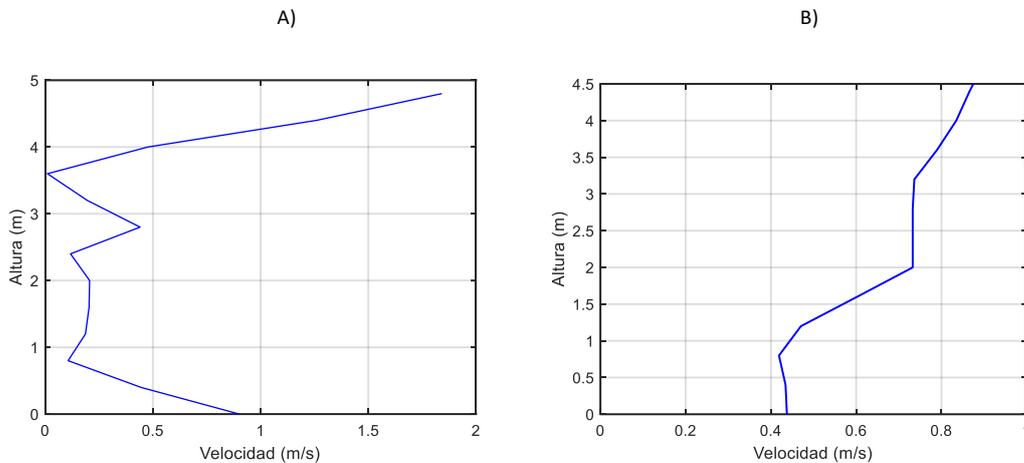


Figura 42. Gráficas de la velocidad en función de la altura a los 800 s a 60 m de los modelos 3D y 1D-3D respectivamente

En la primera gráfica (modelo 3D), se observa una distribución de la velocidad que varía de forma más pronunciada con la altura. Se presenta un aumento inicial de la velocidad hasta aproximadamente 1.6 m, seguido de una ligera disminución en la parte media y un incremento considerable en las capas superiores del túnel. Esto sugiere una dinámica más compleja del flujo de aire, debido a una mayor resolución espacial en el modelo tridimensional. En la segunda gráfica, que se corresponde con el modelo híbrido, la distribución de la velocidad en función de la altura muestra un incremento más uniforme y menos pronunciado, alcanzando valores máximos menores que en el modelo 3D, capturando las tendencias generales con menos detalle pero a un coste mucho menor.

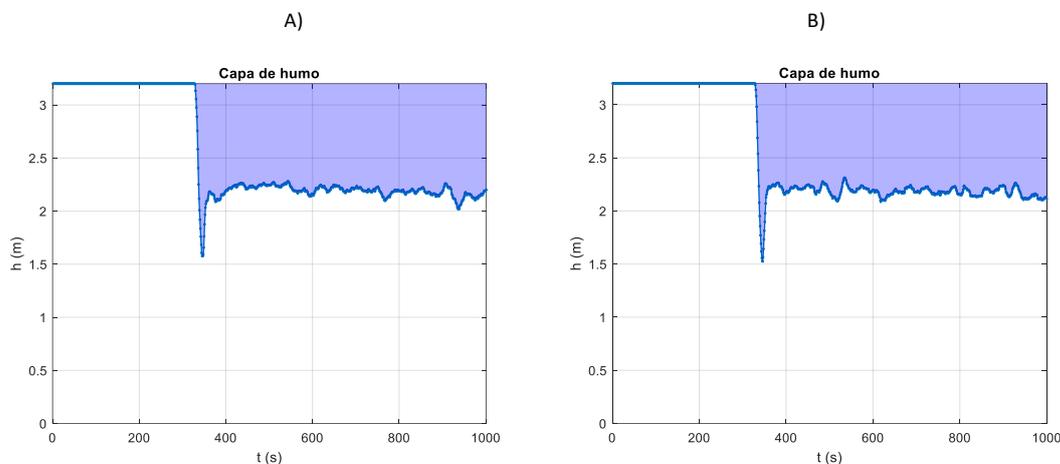


Figura 43. Evolución temporal de la altura de la capa de humo a 30 m del origen de los modelos 3D y 1D-3D respectivamente

Las gráficas anteriores corresponden al volumen de la capa de humo en función del tiempo en los modelos 3D y 1D-3D respectivamente. Al comparar ambas gráficas, se observa un comportamiento casi idéntico en ambos modelos. En ambos casos, la capa de humo desciende bruscamente alrededor del segundo 400, lo que corresponde al momento en que el incendio alcanza su máximo desarrollo. La única variación que existe entre ambos modelos son las fluctuaciones después del segundo 400, puesto que en el modelo 3D, las fluctuaciones son algo más amplias que las que aparecen en el modelo 1D-3D. Como ya se ha comentado, este comportamiento puede explicarse por la diferencia en el nivel de precisión entre los dos modelos. El modelo 3D tiende a capturar con mayor detalle las variaciones en la dinámica del humo debido a su alta resolución, lo que podría causar fluctuaciones más notorias. Por otro lado, el modelo híbrido, al simplificar algunas áreas con modelado unidimensional, presenta una respuesta más suavizada en estas oscilaciones, lo que, aunque más eficiente computacionalmente, podría perder algunos detalles en la dinámica del humo.

A la vista de las gráficas anteriores, se puede apreciar la gran similitud entre ambos modelos, el 3D que ofrece la máxima precisión en la teoría, y el modelo híbrido, que en el papel sacrifica un poco de esa precisión para reducir los costes operacionales. Nada más lejos de la realidad, lo cierto es que ambos modelos poseen un nivel de precisión muy similar habiendo menos de un 5% de diferencia porcentual entre ambos gran parte de la simulación.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha llevado a cabo una simulación detallada de incendios en tramos de metro utilizando un modelo híbrido 1D-3D y otro modelo 3D. El objetivo principal ha sido evaluar la efectividad de la ventilación de estos modelos en la predicción del comportamiento del fuego, la dispersión del humo y las dinámicas del flujo de aire en un entorno subterráneo.

El modelo híbrido 1D-3D ha demostrado ser una herramienta poderosa y eficiente para realizar simulaciones en escenarios tan complejos como un incendio en un túnel de metro. Al combinar las ventajas del modelado unidimensional, que permite una reducción significativa del coste computacional, con la precisión del modelado tridimensional en áreas críticas, se ha logrado un balance óptimo entre precisión y eficiencia. En este proyecto, la implementación del modelo híbrido ha permitido un ahorro de casi el 30%, un ahorro en los tiempos de simulación de 49 horas, en comparación con el modelo 3D, lo que representa un avance considerable en términos de optimización de recursos computacionales.

La selección del tamaño de la malla ha sido otro aspecto clave en este estudio. Se ha demostrado que una malla de 0.2 m³ ofrece una mayor resolución y sensibilidad en la captura de las fluctuaciones térmicas, lo cual es imprescindible para un análisis detallado del comportamiento del fuego y la dispersión de gases. A pesar de que el tiempo de simulación es mayor con esta malla, la precisión adicional obtenida justifica su uso en estudios donde la exactitud es fundamental para el diseño de sistemas de seguridad eficientes.

El análisis de la temperatura y la velocidad del aire en diversos puntos del túnel ha revelado que, aunque el modelo 3D proporciona un mayor nivel de detalle, el modelo híbrido es capaz de capturar de manera efectiva los fenómenos más relevantes, como la propagación del calor y el humo, y la aparición de velocidades negativas del aire en proximidades del incendio, lo que indica la presencia de corrientes de aire descendentes.

Además, el análisis del volumen de la capa de humo, juntos con las gráficas de la temperatura en función de la posición indican que la estación que se encuentra más alejada del origen del fuego no sufre las consecuencias del incendio, la temperatura de la estación no se ve afectada y no se ve una presencia del humo en ningún momento de los 1000 s que dura la simulación. Este hecho indica que los sistemas de ventilación están

funcionando de manera efectiva. Esta observación sugiere que la ventilación longitudinal implementada en el túnel es capaz de contener el calor y el humo generados por el incendio, evitando que estos elementos peligrosos se propaguen hacia áreas más distantes del túnel.

8. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Con el fin de abordar los grandes retos a nivel social, económico y medioambiental que han surgido en los últimos tiempos, se crea el 25 de septiembre de 2015 los 17 objetivos de desarrollo sostenible. Este pacto fue propuesto por la Asamblea General de las Naciones Unidas, y participaron 193 países para comprometerse con un desarrollo que busque responder a las necesidades globales, con la fecha límite de 2030.

A la hora de realizar el trabajo, se ha querido analizar los puntos de este pacto con los que se contribuye este trabajo y como lo hace:

El ODS 3: Salud y bienestar. Este objetivo consiste en garantizar y promover una vida sana para todo el mundo. Con el análisis y las simulaciones ante casos de incendio realizadas para el proyecto, se pueden conseguir mejoras de infraestructura que supongan una mejora en la calidad de vida para las personas usen el metro en su día a día.

El ODS 7: Energía asequible y no contaminante. Este ODS habla de garantizar el acceso a una energía asequible, segura y sostenible para todo el mundo. Con la investigación que se realiza y las simulaciones en donde se presupone unas cantidades numerosas de CO₂, gas muy contaminante, se puede conseguir mejoras en los sistemas de ventilación para reducir la huella de carbono que, se ve negativamente afectada por la aparición de un incendio.

El ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. Este objetivo promueve la industrialización inclusiva y sostenible y fomenta la innovación. En el trabajo se muestra cómo la investigación contribuye a la mejora de la infraestructura de transporte público, haciéndola más eficiente y sostenible.

El ODS 12. Este objetivo es el de Producción y consumo responsables, que consiste en garantizar unos modelos de producción y consumo sostenibles. En el trabajo se analiza como las mejoras en la ventilación del transporte público de metro puede conducir a un uso más eficiente de los recursos, reduciendo todo lo posible los desperdicios e intentando disminuir en la medida de los posible los gastos. [28]

9. Trabajos futuros

En el marco de este proyecto, se ha llevado a cabo un análisis de la dinámica del fuego y el humo en un túnel de metro, empleando una metodología híbrida 1D-3D que combina el modelado unidimensional para secciones con flujo uniforme y el modelado tridimensional en áreas críticas. Sin embargo, a pesar de los avances logrados, existen varias áreas que podrían explorarse en trabajos futuros para ampliar y perfeccionar los hallazgos obtenidos. Los trabajos futuros podrían no solo validar y perfeccionar el modelo híbrido, sino también ampliar su aplicabilidad y robustez en una variedad de escenarios más complejos y realistas.

Durante el desarrollo de este proyecto, algunos factores fueron omitidos para simplificar la simulación y concentrar los recursos en el análisis de los aspectos más críticos. Entre estos factores se encuentran la inclinación del túnel, la diferencia de alturas entre las estaciones, la composición química del fuego, y la presencia de chimeneas de ventilación. La inclusión de estos elementos en futuras simulaciones permitiría obtener un modelo más realista y completo, proporcionando una comprensión más profunda de cómo estos factores influyen en la propagación del fuego y del humo, así como en la eficacia de los sistemas de ventilación.

Por otra parte, el alcance de este proyecto se ha limitado a un modelo específico de tramo de metro. Para ampliar la aplicabilidad del modelo híbrido, futuros estudios podrían explorar una mayor variedad de escenarios, como incendios en estaciones subterráneas con múltiples niveles, intersecciones de túneles, o situaciones donde el sistema de ventilación sufra fallos parciales. Simular estos escenarios permitiría evaluar la robustez del modelo y su capacidad para adaptarse a condiciones más complejas, ofreciendo así soluciones más completas y seguras para la gestión de emergencias en sistemas de transporte subterráneo.

Por último, otra área de trabajo es la optimización para una futura mejor selección de la región 3D en el modelo híbrido. Dado que el costo computacional de las simulaciones tridimensionales es considerablemente mayor que el de las unidimensionales, es esencial definir la delimitación de la región 3D para balancear precisión y eficiencia. Como se ha podido observar en la figura x, en este proyecto, la ampliación de la región 3D podría haber proporcionado una mayor información sobre las temperaturas en esos puntos del túnel que conecta ambas estaciones. Adicionalmente, la implementación de técnicas de optimización, como la inteligencia artificial o algoritmos de aprendizaje

automático, podría automatizar la selección de estas regiones, ajustándolas dinámicamente en función de las condiciones simuladas. Esto permitiría una mejor gestión de los recursos computacionales, haciendo que los modelos híbridos sean aún más eficientes y precisos en la predicción de este tipo de escenarios.

10. Apéndices

Con el objetivo de proporcionar la máxima información posible y conseguir una transparencia total se ha incluido como parte del proyecto, un acceso a los códigos de programación completos utilizados en el programa FDS para conseguir los modelos 3D y 1D-3D, que se han necesitado para poder llevar a cabo las simulaciones y sus posteriores análisis. Hay que mencionar que, a pesar de que se han realizado las simulaciones para tres tamaños diferentes de malla: 0.2, 0.4 y 0.2/0.4, el análisis de resultados se ha hecho con el tamaño de malla 0.2 como ya se comentó, por lo que los códigos de FDS incluidos van a ser de este tamaño de malla.

Modelo 3D de una estación

```
&HEAD CHID='Modelo1_Estacion1'/
&TIME T_END=1000.0/
&DUMP RENDER_FILE='Modelo1_Estacion1.ge1', DT_DEVC=1.0, DT_HRR=1.0, DT_SLCF=1.0, DT_RESTART=150.0 /
&PRES VELOCITY_TOLERANCE=1e-3, TUNNEL_PRECONDITIONER=T, MAX_PRESSURE_ITERATIONS=30 / NUEVA LÍNEA PABLO
&MISC TMPA=11.0/

&MESH ID='Mesh01', IJK=200,60,28, XB=-40.0,0.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=0/
&MESH ID='Mesh02', IJK=175,60,28, XB=0.0,35.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=1/
&MESH ID='Mesh03', IJK=175,60,28, XB=35.0,70.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=2/
&MESH ID='Mesh04', IJK=200,60,28, XB=70.0,110.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=3/

C----- Boundary condition

/&VENT XB=10.0,12.4,-6.0,-6.0,1.6,4.0, SURF_ID = 'OPEN'/puerta1
/&VENT XB=57.6,60.0,-6.0,-6.0,1.6,4.0, SURF_ID = 'OPEN'/puerta2
/&VENT XB=10.0,12.4,6.0,6.0,1.6,4.0, SURF_ID = 'OPEN'/puerta3
/&VENT XB=57.6,60.0,6.0,6.0,1.6,4.0, SURF_ID = 'OPEN'/puerta4
/&VENT XB=33.8,36.2,-6.0,-6.0,1.6,4.0, SURF_ID = 'OPEN'/puert5
/&VENT XB=33.8,36.2,6.0,6.0,1.6,4.0, SURF_ID = 'OPEN'/puerta6

&SURF ID='SUPPLY', VEL=1.2, COLOR='BLUE' /
```

```
&VENT XB=-40,-40,-3.2,3.2,0.0,5.2, SURF_ID = 'OPEN'/inlet
&VENT XB=110.0,110.0,-3.2,3.2,0.0,5.2, SURF_ID='SUPPLY'/outlet
/&VENT XB=110.0,110.0,-3.2,3.2,0.0,5.2, SURF_ID='OPEN'/outlet
```

C----- SURFACE

```
&REAC FUEL='PROPANE', RADIATIVE_FRACTION=0.35/
&SURF ID='fire_ground', HRRPUA=1302.1,RAMP_Q='ramp'/
```

```
&RAMP ID='ramp', T = 0, F=0/
&RAMP ID='ramp', T = 300, F=0/
&RAMP ID='ramp', T = 400, F=1.0/
&RAMP ID='ramp', T = 1000, F=1.0/
```

C---- Materials

```
&MATL ID = 'LIGHT-CONCRETE', DENSITY = 1200., CONDUCTIVITY = 1.0, SPECIFIC_HEAT = 0.88 /
C----- SURFACE
&SURF ID = 'wall', RGB = 170,170,170, MATL_ID = 'LIGHT-CONCRETE', THICKNESS = 0.1, ROUGHNESS = 0.2/
```

C----- Geometry

```
&OBST ID='paredtunnel1', XB=-40.0,0.0,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel2', XB=-40.0,0.0,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='suelotunnel1', XB=-40.0,0.0,-3.2,3.2,-0.4,0.0, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='techotunnel2', XB=-40.0,0.0,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_paredvias', XB=0.0,70.0,2.8,3.2,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_paredvias', XB=0.0,70.0,-3.2,-2.8,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-0.4,70.4,2.8,5.6,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-0.4,70.4,-5.6,-2.8,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-0.4,0.0,2.8,5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-0.4,0.0,-5.6,-2.8,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_finanden', XB=70.0,70.4,2.8,5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_finanden', XB=70.0,70.4,-5.6,-2.8,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/
```

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-0.4,70.4,5.6,6.0,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-0.4,70.4,-6.0,-5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_techoanden1', XB=-0.4,70.4,-6.0,6.0,5.2,5.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='suelotunnel1', XB=-40.0,110.0,-3.2,3.2,-0.4,0.0, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='paredtunnel1', XB=70.0,110.0,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='paredtunnel2', XB=70.0,110.0,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='techo tunnel2', XB=70.0,110.0,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/

&HOLE ID='puerta1', XB=10.0,12.4,-6.2,-5.0,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta2', XB=57.6,60.0,-6.2,-5.0,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta4', XB=10.0,12.4,5.2,6.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta5', XB=57.6,60.0,5.2,6.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta3', XB=33.8,36.2,5.2,6.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta6', XB=33.8,36.2,-6.2,-5.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta2', XB=57.6,60.0,-6.0,-6.0,1.6,4.0/

C-- FIRE

&OBST ID='Fire_ground', XB=-22.0,-20.0,-1.0,1.0,0.0,0.8/

&VENT ID='FIRE_G', SURF_ID='fire_ground', XB=-22.0,-20.0,-1.0,1.0,0.8,0.8, COLOR='RED'/

C----- DEVICES

&DEVC ID='temp00', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-40.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-30.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-20.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=10.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=20.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=30.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=50.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=60.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp14', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp15', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=110.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel1', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=50.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=60.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel14', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel15', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=110.0,0.0,4.0/

C----- TREES

&DEVC ID='temp010_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='temp010_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='temp010_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='temp010_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='temp010_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='temp010_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='temp010_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='temp010_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='temp010_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='temp010_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='temp010_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp010_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.4/

&DEVC ID='temp010_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.8/

&DEVC ID='temp040_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.0/

&DEVC ID='temp040_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.4/

&DEVC ID='temp040_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.8/

&DEVC ID='temp040_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,1.2/

&DEVC ID='temp040_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,1.6/

&DEVC ID='temp040_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.0/

&DEVC ID='temp040_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.4/

&DEVC ID='temp040_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.8/

&DEVC ID='temp040_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,3.2/

&DEVC ID='temp040_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,3.6/

&DEVC ID='temp040_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp040_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.4/

&DEVC ID='temp040_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.8/

&DEVC ID='temp080_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.0/

&DEVC ID='temp080_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.4/

&DEVC ID='temp080_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.8/

&DEVC ID='temp080_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,1.2/

&DEVC ID='temp080_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,1.6/

&DEVC ID='temp080_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.0/

&DEVC ID='temp080_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.4/

&DEVC ID='temp080_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.8/

&DEVC ID='temp080_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,3.2/

&DEVC ID='temp080_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,3.6/

&DEVC ID='temp080_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp080_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.4/

&DEVC ID='temp080_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.8/

&DEVC ID='vel010_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.0/

&DEVC ID='vel010_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.4/

&DEVC ID='vel010_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.8/

&DEVC ID='vel010_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,1.2/

&DEVC ID='vel010_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,1.6/

&DEVC ID='vel010_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.0/

&DEVC ID='vel010_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel010_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel010_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel010_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel010_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel010_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='vel010_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.8/

&DEVC ID='vel040_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel040_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='vel040_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel040_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel040_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel040_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel040_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel040_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel040_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel040_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel040_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel040_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='vel040_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.8/

&DEVC ID='vel080_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel080_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='vel080_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel080_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel080_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel080_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel080_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel080_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel080_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel080_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel080_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel080_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='vel080_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.8/

C----- SLICES

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-40.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-20.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=20.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=40.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=60.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=80.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=100.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=110.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=35.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=70.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=3.5/
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=3.5/
&TAIL /

Modelo 3D de dos estaciones

&HEAD CHID='2estaciones'/
&TIME T_END=1000.0/
&DUMP RENDER_FILE='2estaciones.ge1', DT_DEVC=1.0, DT_HRR=1.0, DT_RESTART=150.0, DT_SLCF=1.0/
&MISC TMPA=11.0/

&MESH ID='Mesh01', IJK=558,60,28, XB=-711.6,-600.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=0/

&MESH ID='Mesh03', IJK=1000,60,28, XB=-600.0,-400.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=1/
&MESH ID='Mesh04', IJK=1000,60,28, XB=-400.0,-200.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=2/
&MESH ID='Mesh05', IJK=500,60,28, XB=-200.0,-100.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=3/
&MESH ID='Mesh06', IJK=500,60,28, XB=-100.0,0.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=4/
&MESH ID='Mesh07', IJK=550,60,28, XB=0.0,110.0,-6.0,6.0,0.0,5.6, MPI_PROCESS=5/

&REAC ID='Reaction1',
FUEL='PROPANE'/

&DEVC ID='temp00', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=50.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=60.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp14', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp15', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=110.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='u_vel1', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=50.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='u_vel10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=60.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel14', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel15', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=110.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp010_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='temp010_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='temp010_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='temp010_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='temp010_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='temp010_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='temp010_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='temp010_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='temp010_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='temp010_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='temp010_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp010_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='temp010_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='temp040_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='temp040_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='temp040_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='temp040_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='temp040_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='temp040_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='temp040_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='temp040_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='temp040_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='temp040_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='temp040_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp040_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='temp040_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='temp080_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='temp080_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='temp080_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.8/

&DEVC ID='temp080_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='temp080_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='temp080_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='temp080_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='temp080_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='temp080_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='temp080_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='temp080_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp080_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='temp080_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.8/

&DEVC ID='vel010_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel010_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='vel010_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel010_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel010_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel010_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel010_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel010_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel010_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel010_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel010_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel010_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='vel010_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='vel040_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel040_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='vel040_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel040_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel040_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel040_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel040_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel040_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel040_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel040_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel040_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel040_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.4/

&DEVC ID='vel040_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='vel080_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel080_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='vel080_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel080_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel080_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel080_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel080_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel080_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel080_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel080_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel080_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel080_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='vel080_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.8/

&DEVC ID='temp16', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-50.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp17', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-60.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp18', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp19', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp20', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp21', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp22', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-110.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp23', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-120.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp24', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-130.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp25', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-140.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp26', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-150.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp27', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-160.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp28', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-170.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp29', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-180.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp30', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-190.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp31', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-200.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp32', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-210.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp33', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-220.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp34', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-230.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp35', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-240.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp36', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-250.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp37', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-260.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp38', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-270.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp39', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-280.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp40', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-290.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp41', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-300.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp42', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-310.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp43', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-320.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp44', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-330.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp45', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-340.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp46', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-350.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp47', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-360.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp48', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-370.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp49', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-380.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp50', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-390.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp51', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-400.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp52', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-410.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp53', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-420.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp54', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-430.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp55', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-440.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp56', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-450.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp57', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-460.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp58', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-470.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp59', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-480.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp60', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-490.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp61', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-500.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp62', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-510.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp63', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-520.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp64', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-530.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp65', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-540.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp66', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-550.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp67', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-560.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp68', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-570.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp69', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-580.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp70', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-590.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp71', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-600.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp72', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-610.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp73', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-620.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp74', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-630.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp75', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-640.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp76', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-650.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp77', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-660.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp78', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-670.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp79', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-680.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp80', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-690.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp81', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-700.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp82', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-710.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='u_vel16', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-50.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel17', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-60.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel18', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel19', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel20', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel21', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel22', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-110.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel23', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-120.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel24', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-130.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel25', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-140.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel26', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-150.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel27', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-160.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel28', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-170.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel29', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-180.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel30', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-190.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel31', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-200.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel32', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-210.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel33', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-220.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel34', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-230.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel35', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-240.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel36', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-250.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel37', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-260.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel38', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-270.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel39', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-280.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel40', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-290.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='u_vel41', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-300.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel42', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-310.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel43', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-320.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel44', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-330.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel45', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-340.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel46', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-350.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel47', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-360.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel48', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-370.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel49', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-380.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel50', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-390.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel51', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-400.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel52', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-410.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel53', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-420.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel54', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-430.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel55', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-440.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel56', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-450.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel57', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-460.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel58', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-470.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel59', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-480.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel60', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-490.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel61', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-500.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel62', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-510.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel63', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-520.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel64', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-530.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel65', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-540.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel66', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-550.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel67', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-560.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel68', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-570.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel69', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-580.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel70', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-590.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel71', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-600.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel72', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-610.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel73', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-620.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel74', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-630.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel75', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-640.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel76', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-650.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='u_vel77', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-660.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel78', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-670.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel79', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-680.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel80', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-690.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel81', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-700.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel82', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-710.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='slh01', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=-5.0,-5.0,0.0,0.0,0.0,4.8/
 &DEVC ID='slh02', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=90.0,90.0,0.0,0.0,0.0,4.8/
 &DEVC ID='slh03', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=10.0,10.0,4.5,4.5,1.6,4.8/
 &DEVC ID='slh04', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=40.0,40.0,4.5,4.5,1.6,4.8/
 &DEVC ID='slh05', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=-660.0,-660.0,4.5,4.5,1.6,4.8/
 &DEVC ID='slh06', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=-630.0,-630.0,4.5,4.5,1.6,4.8/

&SURF ID='SUPPLY',

COLOR='BLUE',

VEL=1.5/

&SURF ID='fire_ground',

HRRPUA=1302.1,

RAMP_Q='fire_ground_RAMP_Q'/

&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/

&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=300.0, F=0.0/

&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=400.0, F=1.0/

&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=1000.0, F=1.0/

&OBST ID='paredtunnel1', XB=-600.0,0.0,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='paredtunnel1', XB=70.0,110.0,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='paredtunnel2', XB=-600.0,0.0,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='paredtunnel2', XB=70.0,110.0,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='suelotunnel1', XB=-711.6,110.0,-3.2,3.2,-0.4,0.0, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='techotunnel2', XB=-600.0,0.0,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='techotunnel2', XB=70.0,110.0,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredvias', XB=0.0,70.0,2.8,3.2,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredvias', XB=0.0,70.0,-3.2,-2.8,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-0.4,70.4,2.8,5.6,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-0.4,70.4,-5.6,-2.8,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-0.4,0.0,2.8,5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-0.4,0.0,-5.6,-2.8,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_finanden', XB=70.0,70.4,2.8,5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_finanden', XB=70.0,70.4,-5.6,-2.8,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-0.4,70.4,5.6,6.0,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-0.4,70.4,-6.0,-5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_techoanden1', XB=-0.4,70.4,-6.0,6.0,5.2,5.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Fire_ground', XB=-22.0,-20.0,-1.0,1.0,0.0,0.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='paredtunel1', XB=-711.6,-670.4,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='paredtunel1', XB=-711.6,-670.4,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='techoatunel2', XB=-711.6,-670.4,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.0,-600.0,-5.6,-2.8,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.8,-670.0,-5.6,-2.8,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.0,-600.0,2.8,5.6,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.8,-670.0,2.8,5.6,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-600.7,-600.0,-5.6,-2.8,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-670.8,-670.4,-5.6,-2.8,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-670.8,-670.4,2.8,5.6,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.0,-600.0,-6.0,-5.6,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.8,-670.0,-6.0,-5.6,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.0,-600.0,5.6,6.0,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.8,-670.0,5.6,6.0,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_techoanden1', XB=-670.0,-600.0,-6.0,6.0,5.2,5.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_techoanden1', XB=-670.8,-670.0,-6.0,6.0,5.2,5.6, SURF_ID='INERT'/

&HOLE ID='puerta1', XB=10.0,12.4,-7.2,-5.0,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta2', XB=57.6,60.0,-7.2,-5.0,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta4', XB=10.0,12.4,5.2,7.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta5', XB=57.6,60.0,5.2,7.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta3', XB=33.8,36.2,5.2,7.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta6', XB=33.8,36.2,-7.2,-5.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta4', XB=-660.2,-657.4,5.2,6.04,1.6,4.0/
 &HOLE ID='puerta3', XB=-636.4,-633.6,5.2,6.04,1.6,4.0/
 &HOLE ID='puerta5', XB=-612.6,-609.8,5.2,6.04,1.6,4.0/
 &HOLE ID='puerta1', XB=-660.2,-657.4,-6.04,-5.2,1.6,4.0/
 &HOLE ID='puerta6', XB=-636.4,-633.6,-6.04,-5.2,1.6,4.0/
 &HOLE ID='puerta2', XB=-612.6,-609.8,-6.04,-5.2,1.6,4.0/

 &VENT ID='puerta1', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,12.4,-6.0,-6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta2', SURF_ID='OPEN', XB=33.8,36.2,-6.0,-6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta3', SURF_ID='OPEN', XB=57.6,60.0,-6.0,-6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta4', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,12.4,6.0,6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta5', SURF_ID='OPEN', XB=33.8,36.2,6.0,6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta6', SURF_ID='OPEN', XB=57.6,60.0,6.0,6.0,1.6,4.0/

 &VENT ID='puerta1', SURF_ID='OPEN', XB=-660.2,-657.4,-6.0,-6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta2', SURF_ID='OPEN', XB=-636.4,-633.6,-6.0,-6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta3', SURF_ID='OPEN', XB=-612.6,-609.8,-6.0,-6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta4', SURF_ID='OPEN', XB=-660.2,-657.4,6.0,6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta5', SURF_ID='OPEN', XB=-636.4,-633.6,6.0,6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta6', SURF_ID='OPEN', XB=-612.6,-609.8,6.0,6.0,1.6,4.0/

 &VENT ID='inlet', SURF_ID='OPEN', XB=-711.6,-711.6,-3.2,3.2,0.0,5.2/
 &VENT ID='outlet', SURF_ID='SUPPLY', XB=110.0,110.0,-3.2,3.2,0.0,5.2/
 &VENT ID='FIRE_G', SURF_ID='fire_ground', XB=-22.0,-20.0,-1.0,1.0,0.8,0.8, COLOR='RED'/

 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=0.0/
 &SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=0.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
 &SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBZ=2.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-40.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-20.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=20.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=40.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=60.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=80.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=100.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=110.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=0.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=35.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=70.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=3.5/
 &SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=3.5/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-600.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-635.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-670.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-600.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-620.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-640.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-660.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-680.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-700.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-710.0/
 &TAIL /

Modelo híbrido 1D-3D

&HEAD CHID='1D3D'/
 &TIME T_END=1000.0/
 &DUMP RENDER_FILE='1D3D.ge1', DT_DEVC=1.0, DT_HRR=1.0, DT_RESTART=150.0, DT_SLCF=1.0/
 &MISC TMPA=11.0/
 &MESH ID='Mesh01', IJK=558,60,28, XB=-711.6,-600.0,-6.0,6.0,0.0,5.6/
 &MESH ID='Mesh03', IJK=50,60,28, XB=-600.0,-590.0,-6.0,6.0,0.0,5.6/
 &MESH ID='Mesh04', IJK=2800,60,28, XB=-590.0,-30.0,-6.0,6.0,0.0,5.6/
 &MESH ID='Mesh05', IJK=150,60,28, XB=-30.0,0.0,-6.0,6.0,0.0,5.6/
 &MESH ID='Mesh06', IJK=550,60,28, XB=0.0,110.0,-6.0,6.0,0.0,5.6/
 &REAC ID='Reaction1',
 FUEL='PROPANE'/
 &DEVC ID='temp00', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-40.0,0.0,4.0/

&DEVC ID='temp01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=50.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=60.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp14', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp15', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=110.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel1', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=20.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=30.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=50.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=60.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=70.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=90.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel14', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=100.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='u_vel15', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=110.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp010_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='temp010_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='temp010_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='temp010_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='temp010_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,1.6/

&DEVC ID='temp010_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='temp010_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='temp010_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='temp010_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='temp010_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='temp010_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp010_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='temp010_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-10.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='temp040_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='temp040_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='temp040_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='temp040_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='temp040_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='temp040_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='temp040_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='temp040_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='temp040_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='temp040_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='temp040_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp040_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='temp040_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=40.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='temp080_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='temp080_02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='temp080_03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='temp080_04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='temp080_05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='temp080_06', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='temp080_07', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='temp080_08', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='temp080_09', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='temp080_10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='temp080_11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='temp080_12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='temp080_13', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=80.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='vel010_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel010_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.4/

&DEVC ID='vel010_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel010_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel010_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel010_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel010_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel010_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel010_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel010_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel010_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel010_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='vel010_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-10.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='vel040_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel040_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='vel040_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel040_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel040_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel040_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel040_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel040_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel040_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel040_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel040_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel040_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.4/
&DEVC ID='vel040_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=40.0,0.0,4.8/
&DEVC ID='vel080_01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='vel080_02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.4/
&DEVC ID='vel080_03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,0.8/
&DEVC ID='vel080_04', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,1.2/
&DEVC ID='vel080_05', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,1.6/
&DEVC ID='vel080_06', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.0/
&DEVC ID='vel080_07', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.4/
&DEVC ID='vel080_08', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,2.8/
&DEVC ID='vel080_09', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,3.2/
&DEVC ID='vel080_10', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,3.6/
&DEVC ID='vel080_11', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.0/
&DEVC ID='vel080_12', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.4/

&DEVC ID='vel080_13', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=80.0,0.0,4.8/
 &DEVC ID='temp70', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-590.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp71', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-600.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp72', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-610.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp73', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-620.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp74', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-630.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp75', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-640.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp76', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-650.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp77', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-660.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp78', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-670.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp79', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-680.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp80', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-690.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp81', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-700.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='temp82', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-710.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel70', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-590.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel71', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-600.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel72', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-610.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel73', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-620.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel74', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-630.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel75', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-640.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel76', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-650.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel77', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-660.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel78', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-670.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel79', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-680.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel80', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-690.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel81', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-700.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='u_vel82', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-710.0,0.0,4.0/
 &DEVC ID='slh01', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=-5.0,-5.0,0.0,0.0,4.8/
 &DEVC ID='slh02', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=90.0,90.0,0.0,0.0,4.8/
 &DEVC ID='slh03', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=10.0,10.0,4.5,4.5,1.6,4.8/
 &DEVC ID='slh04', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=40.0,40.0,4.5,4.5,1.6,4.8/
 &DEVC ID='slh05', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=-660.0,-660.0,4.5,4.5,1.6,4.8/
 &DEVC ID='slh06', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=-630.0,-630.0,4.5,4.5,1.6,4.8/
 &SURF ID='SUPPLY',
 COLOR='BLUE',

VEL=1.5/
&SURF ID='fire_ground',
HRRPUA=1302.1,
RAMP_Q='fire_ground_RAMP_Q'/
&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=300.0, F=0.0/
&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=400.0, F=1.0/
&RAMP ID='fire_ground_RAMP_Q', T=1000.0, F=1.0/

&OBST ID='paredtunnel1', XB=-30.0,0.0,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel1', XB=70.0,110.0,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel1', XB=-711.6,-670.4,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel1', XB=-711.6,-670.4,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel1', XB=-600.0,-590.0,2.8,3.2,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel2', XB=-600.0,-590.0,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel2', XB=70.0,110.0,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='paredtunnel2', XB=-30.0,0.0,-3.2,-2.8,0.0,4.8, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='suelotunnel1', XB=-30.0,110.0,-3.2,3.2,-0.4,0.0, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='suelotunnel1', XB=-711.6,-590.0,-3.2,3.2,-0.4,0.0, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='techo tunnel2', XB=-600.0,-590.0,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='techo tunnel2', XB=70.0,110.0,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='techo tunnel2', XB=-711.6,-670.4,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='techo tunnel2', XB=-30.0,0.0,-3.2,3.2,4.8,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_paredvias', XB=0.0,70.0,2.8,3.2,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_paredvias', XB=0.0,70.0,-3.2,-2.8,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-0.4,70.4,2.8,5.6,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-0.4,70.4,-5.6,-2.8,-0.4,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.0,-600.0,-5.6,-2.8,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.8,-670.0,-5.6,-2.8,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.0,-600.0,2.8,5.6,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_sueloanden', XB=-670.8,-670.0,2.8,5.6,0.0,1.6, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-0.4,0.0,2.8,5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-0.4,0.0,-5.6,-2.8,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-600.7,-600.0,-5.6,-2.8,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-670.8,-670.4,-5.6,-2.8,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Estacion01_inicioanden', XB=-670.8,-670.4,2.8,5.6,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_finanden', XB=70.0,70.4,2.8,5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_finanden', XB=70.0,70.4,-5.6,-2.8,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-0.4,70.4,5.6,6.0,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-0.4,70.4,-6.0,-5.6,-0.4,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.0,-600.0,-6.0,-5.6,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.8,-670.0,-6.0,-5.6,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.0,-600.0,5.6,6.0,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_paredanden', XB=-670.8,-670.0,5.6,6.0,0.0,5.2, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_techoanden1', XB=-0.4,70.4,-6.0,6.0,5.2,5.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_techoanden1', XB=-670.0,-600.0,-6.0,6.0,5.2,5.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Estacion01_techoanden1', XB=-670.8,-670.0,-6.0,6.0,5.2,5.6, SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Fire_ground', XB=-22.0,-20.0,-1.0,1.0,0.0,0.8, SURF_ID='INERT'/

&HOLE ID='puerta1', XB=10.0,12.4,-7.2,-5.0,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta1', XB=-660.2,-657.4,-6.04,-5.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta2', XB=57.6,60.0,-7.2,-5.0,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta2', XB=-612.6,-609.8,-6.04,-5.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta4', XB=10.0,12.4,5.2,7.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta4', XB=-660.2,-657.4,5.2,6.04,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta5', XB=57.6,60.0,5.2,7.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta5', XB=-612.6,-609.8,5.2,6.04,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta3', XB=33.8,36.2,5.2,7.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta3', XB=-636.4,-633.6,5.2,6.04,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta6', XB=33.8,36.2,-7.2,-5.2,1.6,4.0/

&HOLE ID='puerta6', XB=-636.4,-633.6,-6.04,-5.2,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta1', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,12.4,-6.0,-6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta1', SURF_ID='OPEN', XB=-660.2,-657.4,-6.0,-6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta2', SURF_ID='OPEN', XB=33.8,36.2,-6.0,-6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta2', SURF_ID='OPEN', XB=-636.4,-633.6,-6.0,-6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta3', SURF_ID='OPEN', XB=57.6,60.0,-6.0,-6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta3', SURF_ID='OPEN', XB=-612.6,-609.8,-6.0,-6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta4', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,12.4,6.0,6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta4', SURF_ID='OPEN', XB=-660.2,-657.4,6.0,6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta5', SURF_ID='OPEN', XB=33.8,36.2,6.0,6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta5', SURF_ID='OPEN', XB=-636.4,-633.6,6.0,6.0,1.6,4.0/

&VENT ID='puerta6', SURF_ID='OPEN', XB=57.6,60.0,6.0,6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='puerta6', SURF_ID='OPEN', XB=-612.6,-609.8,6.0,6.0,1.6,4.0/
 &VENT ID='inlet', SURF_ID='OPEN', XB=-711.6,-711.6,-3.2,3.2,0.0,5.2/
 &VENT ID='outlet', SURF_ID='SUPPLY', XB=110.0,110.0,-3.2,3.2,0.0,5.2/
 &VENT ID='FIRE_G', SURF_ID='fire_ground', XB=-22.0,-20.0,-1.0,1.0,0.8,0.8, COLOR='RED'/
 &VENT ID='Tunnel in_1', SURF_ID='HVAC', XB=-590.0,-590.0,0.0,4.8,-2.8,2.8/
 &VENT ID='Tunnel out_1', SURF_ID='HVAC', XB=-30.0,-30.0,0.0,4.8,-2.8,2.8/

 &HVAC ID='Tunnel out_1', TYPE_ID='NODE', DUCT_ID='Tunnel_1', VENT_ID='Tunnel out_1'/
 &HVAC ID='Tunnel_1', TYPE_ID='DUCT', AREA=26.8, NODE_ID='Tunnel in_1','Tunnel out_1', ROUGHNESS=0.02, LENGTH=560.0/
 &HVAC ID='Tunnel in_1', TYPE_ID='NODE', DUCT_ID='Tunnel_1', VENT_ID='Tunnel in_1'/

 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=0.0/
 &SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=0.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
 &SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBZ=2.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-40.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-20.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=20.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=40.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=60.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=80.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=100.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=110.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=0.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=35.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=70.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=3.5/
 &SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=3.5/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-600.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-635.0/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-670.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-600.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-620.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-640.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-660.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-680.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-700.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-710.0/
&TAIL /

11. Bibliografía

- [1] Bonet P. (28 de octubre de 1995). 289 muertos por un incendio en el metro de Azerbaiyán. El País.
https://elpais.com/diario/1995/10/30/internacional/815007605_850215.html?event=go&event_log=go&prod=REGCRART&o=cerrado#
- [2] 20minutos (18 de octubre de 2023). Así quedó el vagón de Metro de la línea 2 tras explotar la batería de un patinete eléctrico.
<https://www.20minutos.es/imagenes/madrid/5182495-asi-quedo-vagon-metro-linea-2-tras-explotar-bateria-un-patinete-electrico/>
- [3] Stanford medicine. Children's health. Fire Safety and Burns-Injury Statistics and Incidence Rates.
<https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=seguridadcontraincendiosyquemaduras-estadisticasdelesionesytasasdeincidencia-90-P06071#:~:text=La%20mayor%20de%20las%20muertes,lesiones%20causadas%20por%20los%20incendios>
- [4] A. Dueñas-Laita, et al (2010). Bases del manejo clínico de la intoxicación por humo de incendios «Docohumo Madrid 2010». Medicina intensiva, 34(9), 609-619.
<https://doi.org/10.1016/j.medin.2010.07.007>
- [5] Villafuerte, Eduardo (12 octubre de 2020). Qué es la estratificación y cómo afecta a la detección. Sistemas de prevención y protección contra incendios.
<https://eduardovillafuerteblog.wordpress.com/2020/10/12/que-es-estratificacion-como-afecta-deteccion/>

- [6] Ingason, Haukur & Li, Ying & Lönnemark, Anders. (2015). Tunnel Fire Dynamics. Springer.
- [7] Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an “air–helium reduced scale model”: Principle, limitations, results and future, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 23, Issue 2, 2008, Pages 171-178,
- [8] Liu, Y., Hu, Y., Xiao, Y., Chen, J., & Huang, H. (2020). Effects of different types of entrances on natural ventilation in a subway station. Tunnelling and Underground Space Technology, 105, 103578, pages 333-341.
- [9] Liu, Y., Hu, Y., Xiao, Y., Chen, J., & Huang, H. (2020). Effects of different types of entrances on natural ventilation in a subway station. Tunnelling and Underground Space Technology, 105, 103578, pages 45-81.
- [10] Oka, Y., & Atkinson, G. T. (1995). Control of smoke flow in tunnel fires. Fire safety journal, 25(4), 305-322.
- [11] Vantelon, J. P., Guelzim, A., Quach, D., Son, D. K., Gabay, D., & Dallest, D. (1991). Investigation of fire-induced smoke movement in tunnels and stations: an application to the Paris Metro. In Fire Safety Science (pp. 907-918). Routledge.
- [12] Cheng LH, Ueng TH, Liu CW (2001) Simulation of Ventilation and fire in the underground facilities. Fire Saf J 36(6):597–619
- [13] Colella F (2010) Multiscale modeling of tunnel ventilation flows and fires, Ph.D. Thesis, Torino: Politecnico di Torino
- [14] Chow WK, Gao Y, Zhao JH, Dang JF, Chow N (2016) A study on tilted tunnel fire under natural ventilation. Fire Saf J 81(Supplement C):44–57
- [15] Li YZ, Fan CG, Ingason H, Lönnemark A, Ji J (2016) Effect of cross section and ventilation on heat release rates in tunnel fires. Tunn Undergr Space Technol 51(Supplement C):414–423
- [16] Hsu W, Huang Y, Shen T, Cheng C, Cheng T (2017) Analysis of the Hsuehshan tunnel fire in Taiwan. Tunn Undergr Space Technol 69(Supplement C):108–115
- [17] Floyd J, Hunt S, Williams F, Tatem P (2005) A Network Fire Model for the simulation of fire growth and smoke spread in multiple compartments with complex ventilation. J Fire Prot Eng 15(3):199–299

- [18] Peacock R, Forney G, Reneke P, McGrattan K (2019) CFAST consolidate fire and smoke transport, technical reference guide, gaithersburg. National Institute of Standards and Technology, Maryland
- [19] Colella F, Rein G, Borchiellini R, Torero J (2011) A novel multiscale methodology for simulating tunnel ventilation flows during fires. *Fire Technol* 47(1):221–253
- [20] Ang C, Rein G, Peiro J, Harrison R (2016) Simulating longitudinal ventilation flows in long tunnels: comparison of full CFD and multi-scale modelling approaches in FDS6. *Tunn Undergr Space Technol* 52(Supplement C):119–126
- [21] Vermesi I, Rein G, Colella F, Valkvist M, Jomaas G (2017) Reducing the computational requirements for simulating tunnel fires by combining multiscale modelling and multiple processor calculation. *Tunn Undergr Space Technol* 64:146–153
- [22] Marsar S (2010). Survivability Profiling: How Long Can Victims Survive in a Fire? Buildings on fire. <https://buildingsonfire.com/survivability-profiling-how-long-can-victims-survive-in-a-fire>
- [23] Grein S, et al. (2014). 1D-3D hybrid modeling—from multi-compartment models to full resolution models in space and time. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncel.2014.00063/full>
- [24] Faghri, Amir; Zhang, Yuwen; Howell, John (2010). *Advanced Heat and Mass Transfer*. Columbia, MO: Global Digital Press
- [25] Peng, Z.; Doroodchi, E.; Moghtaderi, B. (2020). “Heat transfer modelling in Discrete Element Method (DEM)-based simulations of thermal processes: Theory and model development”. *Progress in Energy and Combustion Science*
- [26] International Code Council (2012). Chapter 9: Fire protection systems. *International Building Code 2012 (IBC)*. <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2012P13/chapter-9-fire-protection-systems>
- [27] Anderson E (2016). Smoke control design considerations. Consulting- specifying engineer. <https://www.csemag.com/articles/smoke-control-design-considerations/>
- [28] ONU. Objetivos de desarrollo sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>