



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Simulación numérica de incendios y
dispersión de gases de combustión
en minas de carbón**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Daniel Bautista Antonio

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rubén Ávila Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

A mi familia (a todos y todas) por la gran paciencia y comprensión que me han tenido y por el apoyo incondicional que me brindaron.

A mi mamá, mujer luchona, por su enorme esfuerzo para que yo pudiera llegar hasta este momento.

A mi papá, porque su compañía y sus palabras me han formado para ser un hombre integro.

Al Dr. Rubén Ávila Rodríguez por su enorme paciencia.

Índice general

Agradecimientos	I
Lista de figuras	IV
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Accidentes mineros	3
1.2.1. Accidentes en minas subterráneas en México	3
1.2.2. Accidentes en minas subterráneas en el mundo	4
1.3. Estado del arte de la modelación y simulación numérica de incendios en espacios confinados	5
1.4. Objetivos	8
2. Modelo Físico	9
2.1. Estructura general de una mina subterránea de carbón	9
3. Modelo Matemático	14
3.1. Ecuación de continuidad	14
3.2. Ecuación de cantidad de movimiento	14
3.3. Ecuación de conservación de energía	15
3.4. Ecuación de conservación de especies	15
3.5. Ecuación de estado	16
4. Simulador de Dinámica de Incendios FDS	17

5. Resultados	21
5.1. Validación	21
5.1.1. Dispersión de humo y monóxido de carbono en un túnel largo	21
5.1.2. Dispersión de incendio sobre banda transportadora en un túnel	23
5.1.3. Movimiento del humo bajo el efecto chimenea en un túnel de mina	29
5.2. Resultados de la simulación numérica	33
5.2.1. Análisis de mallado	34
5.2.2. Análisis de velocidad	34
5.2.3. Análisis de temperatura	35
5.2.4. Análisis de visibilidad	35
5.2.5. Concentración de CO y CO ₂	36
5.2.6. Evacuación del personal	37
6. Conclusiones	49
7. Trabajo a futuro	51
Referencias	52

Lista de figuras

1.1. Tasa de incidencia de accidentes 2018.	2
2.1. Esquema mina subterránea.	10
2.2. Modelo físico en FDS6.	11
2.3. Curva típica de la tasa de liberación de calor para polímeros.	13
5.1. Modelo físico en FDS6.	22
5.2. Tasa de liberación de calor en FDS4 por Hu et al. [13].	22
5.3. Tasa de liberación de calor en FDS6.	23
5.4. Variación de la temperatura del humo en FDS4 por Hu et al. [13].	24
5.5. Variación de la temperatura del humo en FDS6.	24
5.6. Distribución vertical de CO a 39 m del incendio en FDS4 por Hu et al. [13].	25
5.7. Distribución vertical de CO a 39 m del incendio en FDS6.	25
5.8. Modelo físico del túnel y banda transportadora en FDS6.	26
5.9. Generación de calor de banda transportadora de SBR.	26
5.10. Tasa de generación de calor en FDS6.	27
5.11. Comparación de temperaturas a 3 m por Yuan et al. [28].	28
5.12. Temperatura de la superficie a 3 m de incendio en FDS6.	28
5.13. Comparación de temperaturas a 6 m por Yuan et al. [28].	29
5.14. Temperatura de la superficie a 6 m del incendio en FDS6.	29
5.15. Temperatura del humo a 12 m del incendio por Yuan et al. [28].	30
5.16. Temperatura del humo a 12 m de incendio en FDS6.	30
5.17. Temperatura del humo a 15 m del incendio por Yuan et al. [28].	31
5.18. Temperatura del humo a 15 m del incendio en FDS6.	31

5.19. Configuración del modelo físico por Fan et al. [9].	32
5.20. Movimiento del humo para $\theta = 10^\circ$ por [9].	32
5.21. Movimiento del humo para $\theta = 10^\circ$ en FDS6.	33
5.22. Campo de velocidades a 1 m de altura en FDS6.	38
5.23. Campo de velocidades, primeros 20 m en FDS6.	39
5.24. Campo de temperaturas a 1 m de altura en FDS6.	40
5.25. Campo de temperaturas en la zona del incendio, plano Y= 2.5 m en FDS6.	41
5.26. Campo de visibilidad a 1 m de altura en FDS6.	42
5.27. Concentración de monóxido de carbono a 1 m de altura en FDS6.	43
5.28. Concentración de monóxido de carbono en la zona del incendio, plano Y=2.5 m en FDS6.	44
5.29. Concentración de dióxido de carbono a 1 m de altura en FDS6.	45
5.30. Concentración de dióxido de carbono en la zona del incendio, plano Y=2.5 m en FDS6.	46
5.31. Distribución inicial de personas en la mina.	46
5.32. Proceso de evacuación de la mina.	47
5.33. Secuencia de evacuación de las personas.	48

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La minería es una de las actividades que mayor impacto tienen en la economía nacional, también proporciona la materia prima para la elaboración de cientos de artefactos que se utilizan en la industria y en el hogar, además representa una parte importante del producto interno bruto nacional.

Tan sólo en el sector minero-metalúrgico, de acuerdo con datos del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), al finalizar el año 2018, el empleo creció en 2 % representando un total de 379 mil 20 plazas de trabajo [7].

La industria de la minería abarca el 1 % de la mano de obra mundial, equivalente a 30 millones de personas, de las cuales una tercera parte trabaja en minas de carbón. Es la minería responsable de cerca del 8 % de accidentes laborales mortales (Amstrong y Menon [3]). La tasa de incidencia de accidentes (fig. 1.1), reportada por la Cámara Minera de México (Camimex) fue de 1.63 (accidentes por cada mil trabajadores), ubicándose por debajo de la tasa de incidencia de accidentes media nacional, la cual es de 2.04.

Las explotaciones mineras representan una forma de empleo bajo condiciones totalmente diferentes a las de cualquier otro; al realizar excavaciones profundas y extraer los minerales es indispensable tomar las medidas necesarias para garantizar la seguridad de los trabajadores y la integridad de la mina entera.

De acuerdo a estadísticas de Japón, EUA y Reino Unido muy pocas personas

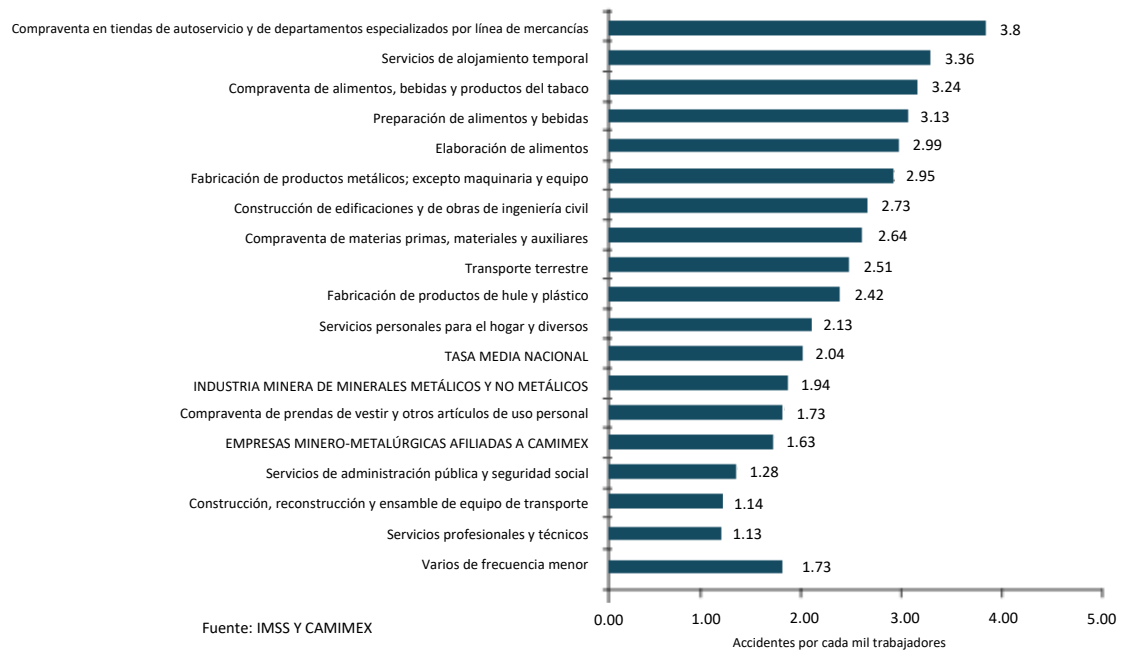


Figura 1.1: Tasa de incidencias de accidentes 2018. Comparativa entre otras ramas o actividades económicas. [7].

mueren directamente a causa de un incendio, pero hasta un 78.9% de las personas mueren por los gases de combustión, Wang et al. [27].

A medida que las excavaciones se van realizando, es inevitable encontrar gases liberados del interior de la tierra, éstos y los minerales presentes, principalmente aquellos que contienen carbono, sulfuros y otros elementos de fácil combinación con el oxígeno del aire, pueden llegar a provocar catástrofes de gran magnitud como explosiones e incendios que desencadenan otros desastres, los derrumbes por ejemplo.

Aunque la ocurrencia de desastres debidos a incendios en una mina es estadísticamente poco probable, la historia muestra que no podemos confiarnos, ya que la mayoría de los incendios son a causa de medidas simples de prevención no adoptadas, y que debido al daño que causa puede provocar la muerte de los trabajadores y dejar la zona inutilizable, representando no sólo pérdidas económicas sino humanas para la industria.

Con base en el conocimiento sobre incendios, se sabe que uno de los gases que más se producen es el monóxido de carbono, un gas tóxico que puede ser en extremo

dañino para los trabajadores de una mina; se puede considerar como el de mayor peligro para la vida de los mineros ya que este gas se dispersa por el movimiento del aire que se localiza en el interior de la mina. El flujo de aire y la dispersión de los gases de combustión pueden ser analizados y modelados aplicando los principios matemáticos de la mecánica de fluidos.

El estudio de la dispersión de los gases de combustión, en particular del monóxido de carbono, y su concentración a lo largo de una mina es de interés para crear rutas de evacuación más adecuadas y elaborar planes que permitan actuar de forma rápida y segura durante un incendio.

En este trabajo se lleva cabo el estudio de la dispersión y concentración de los gases de combustión, los cuales son generados durante el incendio, se lleva a cabo también la simulación numérica de un incendio en una mina subterránea de carbón. Con el propósito de evaluar la localización de las rutas de evacuación instaladas en la mina, también se lleva a cabo la simulación numérica de la evacuación de los mineros. El trabajo tiene como finalidad generar las bases para posteriores diseños de minas que permitan proporcionar las condiciones necesarias para seguir una ruta de evacuación.

Este trabajo tiene aplicación en cualquier tipo de espacio confinado donde pueda llegar a ocurrir un incendio, donde existan personas que evacuar de dicho espacio y se desee mejorar el nivel de seguridad de los trabajadores y la industria.

1.2. Accidentes mineros

1.2.1. Accidentes en minas subterráneas en México

3 de agosto de 2012, Coahuila. Seis mineros murieron en una mina de carbón ubicada en el municipio de Progreso; mina explotada por Altos Hornos de México. El accidente se debió a la formación de una bolsa de gas que provocó desprendimiento (sin explosión), de 100 toneladas de carbón que cayeron sobre los trabajadores.

25 de julio de 2012, Coahuila. Una explosión en un pozo de carbón en el Ejido La Florida, municipio de Muzquiz, acabó con la vida de seis mineros en Minera el Progreso. El hecho provocó el derrumbe de cientos de toneladas de roca, debido a una bolsa de gas metano.

26 de junio de 2012, Querétaro. Luego de inundarse el túnel de ventilación de la mina de mercurio El Mono, en la comunidad de Plazuelas, municipio de Peñami-ller, tres personas quedaron atrapadas, mismos que murieron por la inhalación de monóxido de carbono.

26 de agosto de 2011, Coahuila. Cuatro trabajadores perdieron la vida tras un derrumbe de 100 toneladas de carbón ocurrido en la mina La Esmeralda, de la empresa Minerales Monclova Sociedad Anónima (Mimosa) en San Juan de Sabinas, Coahuila.

3 de mayo de 2011, Coahuila. Una explosión de gas metano (grisú) acabó con la vida de 14 mineros que quedaron atrapados en el interior de un pozo de carbón en el ejido de Sabinas, ubicado en el municipio del mismo nombre. Mina a cargo de la empresa Beneficios Internacionales del Norte.

19 de febrero de 2006, Coahuila. En la mina Pasta de Conchos, una mina de carbón en San Juan de Sabinas, Coahuila, murieron 65 trabajadores tras una explosión. Grupo México argumentó que se generó una explosión a causa de una bolsa de gas, proveniente del subsuelo durante la extracción del carbón, causando temperaturas de hasta 900°C, [26].

1.2.2. Accidentes en minas subterráneas en el mundo

Beijing, China (21/nov/2015). Al menos 21 mineros murieron durante un incendio registrado en una mina de carbón en el noreste de China, en la providencia de Heilongjiang, Jixi.

China (26/nov/2014). Un incendio en una mina de carbón del noreste de China dejó 24 muertos. 52 mineros también quedaron heridos en el incendio subterráneo, ocurrido en la mina Hengda, provincia de Liaoning.

Canadá (2012). Incendio subterráneo en la Mina Rocanville de la empresa PotashCorp (mayor productor de potasio del mundo con el 20%) dejó 20 mineros atrapados.

Chile (2012). Inhalación de monóxido de carbono de motobomba en una mina de cobre en Coquimbo dejó 4 muertos.

China (2010). Incendio en la mina de carbón de Hunan dejó 25 mineros muertos.

EUA (2006). 2 muertos por inhalación de monóxido de carbono generado por la

combustión de una banda transportadora al oeste de Virginia. [1]

1.3. Estado del arte de la modelación y simulación numérica de incendios en espacios confinados

En esta sección se abordan algunas de las investigaciones que se han llevado a cabo relacionadas con simulaciones numéricas de incendios en espacios confinados y evacuación de personas en situación de riesgo por intoxicación y/o quemaduras.

Polonia, Estados Unidos y Japón, han estudiado las condiciones que preceden un incendio, la exploración de la ubicación del incendio, la distribución del flujo de humo, la variación irregular del flujo de aire y un método de control en minas de carbón experimentales o en modelos, Wang et al. [27].

Ryder et al. [23] analizaron la concentración de gases en espacios cerrados por medio un Simulador de Dinámica de Incendios, (Fire Dynamics Simulator, FDS¹, por sus siglas en inglés), midieron las concentraciones y presiones a diferentes alturas, y compararon los datos obtenidos con resultados experimentales.

Gillies et al. [10] realizaron la simulación de la dispersión de gases por medio de Ventgraph² en la red completa de ventilación de una mina de carbón. Estudiaron la distancia que recorren los gases O, CO, CH₄ y sus concentraciones en la red de ductos de ventilación, midiendo parámetros de temperatura, tiempo y posición. Dentro del software programaron sensores de CO para actuar al detectar cierta concentración de este gas.

Edwards y Hwang [8] analizaron la propagación de un incendio en una mina de carbón usando FDS. Evaluaron el modelo a la entrada de una mina, en conjuntos de madera usados como soporte del túnel, y en una cinta transportadora. Los resultados los compararon con otros estudios, e introdujeron diferentes velocidades de ventilación. Observaron que la transferencia de calor más relevante fue por medio de radiación, siendo menos notable la transferencia de calor por convección.

Jalali y Noroozi [14] desarrollaron un método matemático para determinar el

¹Durante el avance del texto aparecen FDS4 y FDS6, correspondientes a las versiones del software 4 y 6, respectivamente.

²Programa de simulación de incendios en minas subterráneas.

tiempo de evacuación más corto desde un punto de riesgo hasta otro punto cualquiera que sea más seguro y su ruta correspondiente.

Orr et al. [20] en un proyecto realizado por la Mine Safety and Health Administration (MSHA), desarrollaron un simulador de realidad virtual de una mina de carbón para entrenar a los mineros ante posibles incidentes. Crearon dos escenarios uno más simple y otro más complejo con obstáculos, incendios y derrumbes. Los resultados mostraron que quienes pasan del escenario más simple al más complejo tienen mayor habilidad en encontrar la salida.

Cuifeng et al. [6] simularon por medio de FDS un incendio que se genera en la instalación eléctrica de una mina de metal. Estudiaron la temperatura del humo, concentración de CO y visibilidad y analizaron cada aspecto con base al nivel de peligro que significa para los trabajadores basado en las normas de regulación de exposición al CO en minas.

Tingyong et al. [24] mostraron las ventajas de utilizar FDS+Evac³ en la simulación de incendios en espacios cerrados, y presentan los factores que intervienen en el comportamiento de las personas durante una evacuación por incendio.

Restrepo Echeverri et al. [22] desarrollaron un software para el monitoreo continuo de la atmósfera dentro de una mina subterránea de carbón con el fin de medir la acumulación de gases potencialmente explosivos como las bolsas de metano, monóxido de carbono e hidrógeno. Mediante este programa que recibe las señales de los sensores dentro de la mina se analizan, mediante dos métodos diferentes (Triángulo de Coward y Diagrama de explosividad del Buro de minas de EUA), la capacidad de explosividad de los gases acumulados y regresa una alarma en caso de peligro.

Brahim et al. [4] estudiaron el efecto de dos sistemas de ventilación sobre la distribución de temperaturas y estratificación de gases en un túnel a pequeña escala.

Adjiski et al. [2] estudiaron la distribución de los gases tóxicos de combustión utilizando Pyrosim⁴, de donde obtuvieron los parámetros de entrada para MINEFIRE PRO+⁵, los resultados arrojaron la propagación de los gases en la red de ventilación de la mina completa, y analizaron la ruta más eficiente de evacuación para los grupos

³Modulo de simulación de evacuación de personas para FDS.

⁴Interfaz gráfica de usuarios para FDS.

⁵Programa de simulación de incendios en minas subterráneas, enfocado en sistemas de ventilación.

de mineros diseminados por toda la mina.

Chen et al. [5] investigaron la influencia del movimiento del humo a causa del incendio de una banda transportadora, bajo diferentes condiciones de ventilación, y variaciones del túnel. Observaron las diferencias entre las temperaturas y la densidad de los humos y el monóxido de carbono. Evaluaron la visibilidad en las ramificaciones del túnel y el tiempo de reacción de los mineros, además estimaron la ruta más segura de evacuación.

Yuan et al. [29] realizaron la simulación numérica del movimiento de monóxido de carbono en una mina subterránea por medio de FDS. En MFIRE⁶ ingresaron los datos obtenidos para evaluar la red de ventilación completa a diferentes velocidades de ventilación. Estudiaron la concentración de CO a distintas distancias y alturas dentro del túnel, y la reacción que presenta al colocar filtraciones de aire. Compararon los datos obtenidos con una prueba de incendio en una mina a escala real.

Rengel et al. [21] evaluaron la capacidad de predecir los efectos de un incendio basado en combustibles hidrocarburos, mediante dos software diferentes de CFD, FDS y FLACS-Fire⁷. Observaron los efectos que tienen la ventilación y el diámetro de la superficie del combustible sobre las variables características de un incendio.

Ji et al. [15] realizaron una serie de simulaciones enfocándose en túneles inclinados, estudiaron el efecto de la presión ambiente sobre el movimiento del humo y la distribución de temperaturas, analizaron también los efectos de modificar la velocidad de la ventilación longitudinal y propusieron una correlación de estos factores para la máxima temperatura del humo debajo del techo.

Sobre los modelos que se han estudiado previamente, Hansen [11] menciona que el principal problema acerca de la minas subterráneas deriva de la complejidad de su construcción, es decir, la cantidad de pozos, túneles, cámaras, rampas, entre otros. Lo que dificulta tomar control del esparcimiento del humo en casos de incendio, y lleva a diferentes tipos de riesgos tanto de evacuación como de rescate de personal.

Uno de los principales focos de estudio se ha puesto en la tasa de liberación de calor de fuentes de combustión diferentes, ya sea de combustibles líquidos o sólidos. Es esta tasa de liberación de calor la responsable del comportamiento de la distribución de los gases en espacios confinados, que influye directamente en las temperaturas

⁶Software libre para simulación de incendios y dispersión de gases en minas subterráneas.

⁷Software de modelación 3D de CFD para escenarios inflamables y emisiones tóxicas.

que pueden llegar a alcanzarse y que podrían provocar fenómenos como el retroceso del humo en contra de la dirección del flujo de aire —*backlayering*, situación que es primordial controlar en caso de incendio.

Otros factores de igual importancia que se han reportado son la influencia del intercambio de calor con las zonas cercanas al incendio y la posición de éste respecto a la entrada de aire, así como la geometría de la mina. Todos los elementos que se encuentran cercanos al incendio tienen diferentes contribuciones con respecto a la generación de calor y la dispersión de gases. Es por esta razón que ante la situación cambiante de dimensiones, materiales y nuevas tecnologías aplicadas a las minas cambia también el grado de riesgo para sus ocupantes.

1.4. Objetivos

1. Llevar a cabo la simulación numérica de un incendio en un modelo simple de una mina subterránea para determinar la concentración de los gases de combustión a lo largo de un conjunto de túneles y estimar el tiempo de evacuación de los mineros.
2. Calcular la distribución de velocidad y temperaturas del aire confinado en la mina.

Capítulo 2

Modelo Físico

2.1. Estructura general de una mina subterránea de carbón

Una mina subterránea de carbón está conformada básicamente por tres elementos: área de explotación, acarreo del carbón a pie de pozo y transporte hasta la superficie. La explotación también comprende la búsqueda de futuras áreas de explotación de la mina, que representa el máximo nivel de riesgo para el personal (ver figura 2.1).

El trabajo al interior de una mina y a grandes profundidades requiere de infraestructura especial; es decir, una red de pozos, galerías y cámaras conectadas con la superficie que permitan el movimiento de trabajadores, máquinas y el mineral. Todas las galerías deben disponer de ventilación y aire fresco, electricidad, agua y aire comprimido, desagües y bombas para el agua subterránea que se filtra, y un sistema de comunicación [3].

El elemento principal que identifica una mina subterránea en la superficie es el castillo, el cual está situado justo sobre el pozo, lugar por donde mineros, suministros y equipos entran y salen de la mina, al igual que los minerales y residuos (ver figura 2.1). Su longitud puede variar de acuerdo a las necesidades de cada mina. Como mínimo debe haber un segundo pozo como salida de emergencia. Este es el punto desde donde se excavan las sucesivas plantas o niveles de explotación. Una galería es un túnel horizontal utilizado para transportar roca y mineral. La rampa interna es una galería inclinada que conecta los niveles subterráneos a distintas profundidades,

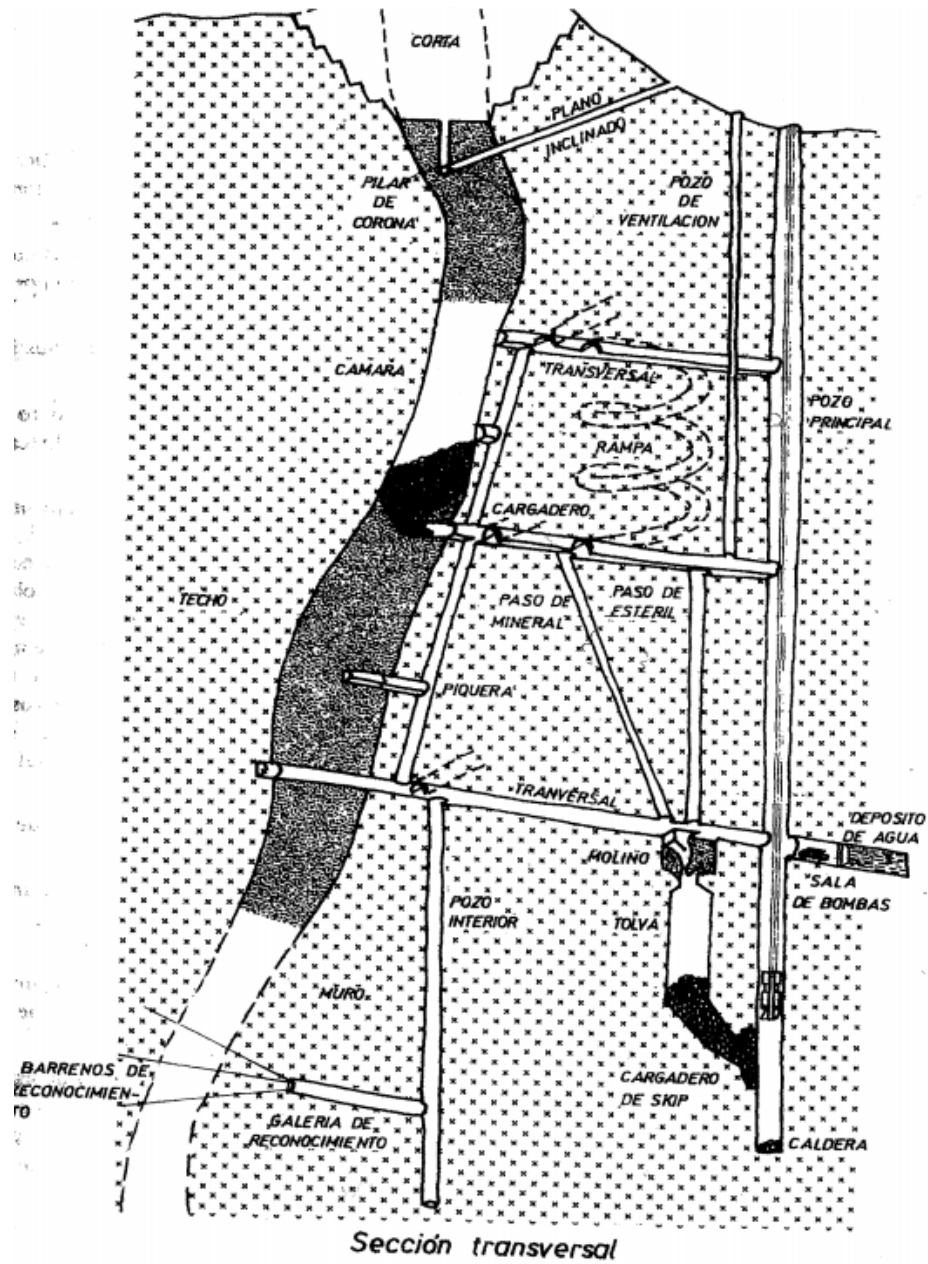


Figura 2.1: Sección transversal de mina subterránea por Herbert y Jaén [12]. (Esquema representativo, no está a escala.)

a menudo en forma de espiral. Las cámaras son los espacios vacíos dejados después de haber extraído el mineral de un frente de explotación. Un esquema de mina subterránea puede verse en la fig. 2.1.

La topografía, la forma del filón, la geología de las rocas de las capas superiores, y limitaciones ambientales, son factores involucrados en la elección del método de extracción del carbón.

En la década de los 1970, se introdujeron las cintas transportadoras instaladas en rampas para la explotación de minas profundas, un método que presentó ventajas sobre el tradicional sistema de pozos en términos de capacidad y fiabilidad.

En este trabajo de tesis se lleva a cabo la simulación numérica de un incendio y el reconocimiento del flujo de aire generado en el interior de una galería principal de la mina. Además, se calcula la dispersión y concentración de los gases producidos durante el proceso de combustión. La galería es horizontal, tiene una geometría rectangular de sección transversal constante (ver figura 2.2).

En el modelo simplificado de la galería principal se considera que existen cuatro ramificaciones transversales, repartidas a lo largo del túnel principal, cuyas dimensiones son: 150 m de largo, 5 m de ancho y 2 m de alto; las dimensiones de las ramificaciones son 30 m de largo, 5 m de ancho y 2 m de alto, que puede apreciarse mejor en la figura 2.2.

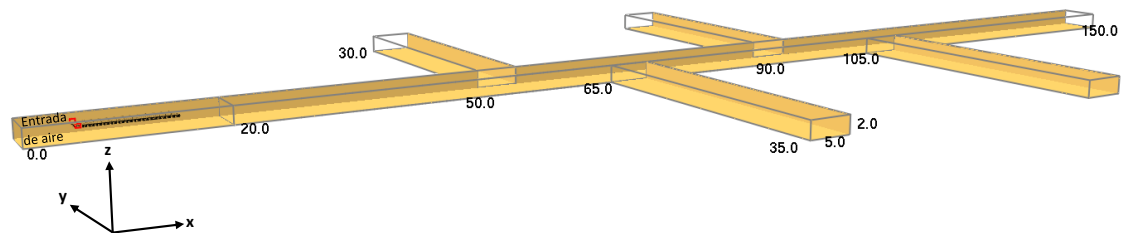


Figura 2.2: Modelo físico en FDS6, dimensiones en metros, entrada de aire en 0 m.

En las investigaciones efectuadas en modelos simplificados de minas —las cuales se han descrito con anterioridad (ver sección 1.3)—, se ha utilizado el software FDS, considerando únicamente un túnel largo. En este trabajo se han incluido en el análisis cuatro ramificaciones, como lo muestra la figura 2.2. Es debido a la naturaleza

variable de un incendio y al avance continuo en las obras de minería, que se forma una red compleja de túneles, donde tiene importancia un modelo de simulación con ramificaciones, que permitirá determinar la distribución los gases cuando existe más de una galería, y con esto generar patrones de dispersión de los gases que hagan posible controlar rápidamente una situación de riesgo.

Primordial es conocer como se distribuyen los gases dentro de túneles largos, además de como interactúan los gases en las conexiones con otros ramales, ya sean horizontales o inclinados, con el fin de tomar las medidas precautorias necesarias ante posibles escenarios de incendios. Aunque las medidas tomadas en la actualidad han sido muchas, no han sido suficientes para evitar catástrofes como las descritas en la sección 1.2, es por eso que con la creciente capacidad de cómputo, es posible realizar simulaciones numéricas cada vez más complejas que nos permitan analizar con más detalle los factores que intervienen en el desarrollo de estos eventos indeseables en la industria.

El diseño simplificado de una mina de carbón, con ventilación longitudinal, permite de manera sencilla conocer el comportamiento de los gases tóxicos generados por la combustión, a través de la mina, lo que posibilita el reconocimiento de zonas de riesgo, donde la acumulación de estos gases es mayor y las altas temperaturas presenten deben ser identificadas.

En este trabajo se considera un material sólido, el cual se somete al proceso de combustión. El material seleccionado para la combustión es SBR (caucho estireno-butadieno), cuyas propiedades térmicas se consideran de acuerdo con Lyon [16]. Las paredes, piso y techo se especificaron de carbón. Las propiedades térmicas de ambos materiales se aprecian en la tabla 2.1. Los resultados obtenidos se han validado con el trabajo de Yuan et al. [28]. El proceso de validación se presenta en la sección 5.1.2.

La contribución principal de esta tesis se enfoca en la simulación del incendio dentro de la galería principal, donde una banda transportadora a 1.2 m de altura, de SBR, con dimensiones: 10 m de largo, 2 m de ancho y 15 mm de espesor, ubicada a 5 m de la entrada de aire se incendia en su extremo corriente arriba mediante dos fuentes de calor ubicadas a los costados de la banda, conforme el método de Yuan et al. [28].

Para lograr reproducir la tasa de liberación de energía descrita en la sección

Tabla 2.1: Propiedades del material tomados de Yuan et al. [28].

Propiedad	SBR	Residuo	Carbón	Unidades
Densidad	1300	600	1323	kg/m^3
Calor específico	1.3	0.6	1.66	kJ/kgK
Conductividad	0.19	0.09	0.214	W/mK
Calor de combustión	28500			kJ/kg
Calor de gasificación	1500			kJ/kg
Temperatura de referencia	370			$^{\circ}C$

5.1.2, se establece que la entrada de aire sea de 1.5 m/s (ubicada en la posición $x = 0$, ver figura 2.2), mientras que las terminaciones de los túneles están abiertas a la atmósfera, para lo cual las condiciones de frontera que se establecen desde el principio en presión y temperatura son: 1 atmósfera y 20 °C, respectivamente.

Ya que se trata de un material que se carboniza, se presenta en la figura 2.3 los tipos de curvatura de liberación de calor para polímeros que se carbonizan (Lyon [16]), por lo que se espera tener un resultado semejante a alguno de los dos casos que se presentan.

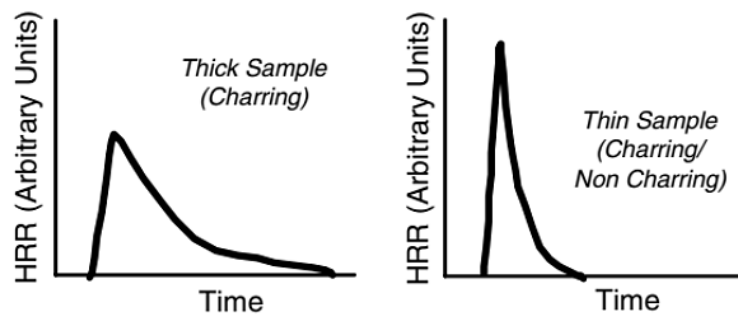


Figura 2.3: Curva típica de la tasa de liberación de calor para polímeros delgados y gruesos que se carbonizan.

En los casos analizados, se reporta la velocidad y temperatura del aire en el interior de la mina, así como también se analiza la concentración de los gases de combustión en distintos puntos a lo largo de los túneles. Se presenta también el tiempo de evacuación de los mineros para el escenario propuesto.

Capítulo 3

Modelo Matemático

En este trabajo se resuelven numéricamente las ecuaciones de la dinámica de los fluidos, las cuales están acopladas con la ecuación de la energía, y la ecuación(es) de conservación de especies. Se considera que el fluido es incompresible, dado que se trabaja con bajos números de Mach, $Ma < 0.3$. Las ecuaciones se presentan a continuación haciendo uso de la notación vectorial.

3.1. Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{m}_b''' \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, \mathbf{u} es el vector velocidad, t es el tiempo y \dot{m}_b''' que representa la adición de gotas evaporadas o partículas a escala de sub-red.

3.2. Ecuación de cantidad de movimiento

La ecuación de cantidad de movimiento descrita a continuación, es en esencia la segunda ley del movimiento de Newton, donde actúan las fuerzas de superficie y las fuerzas de gravedad que mueven al fluido, el gradiente de presión, la fricción y fuerzas externas. Tomando como referencia la ecuación general en forma vectorial,

se escribe como:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3.2)$$

Donde \mathbf{g} es el vector gravedad, τ_{ij} es el tensor de esfuerzos viscosos y \mathbf{f}_b es una fuerza de arrastre generado por las partículas resultado del incendio.

3.3. Ecuación de conservación de energía

La primera ley de la termodinámica aplicada a un fluido que pasa a través de un volumen de control fijo, lleva a la ecuación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \quad (3.3)$$

Ya que se trata con bajos números de Mach, la ecuación se escribe en términos de la entalpía sensible, h_s , que involucra a la energía interna, e , relacionadas en términos de la presión termodinámica, \bar{p} : $h_s = e + \bar{p}/\rho$.

Donde $\frac{D\bar{p}}{Dt}$ es la tasa de cambio de la presión; \dot{q}''' es la tasa de producción de calor por combustión; \dot{q}_b''' es la energía transferida a las partículas generadas durante la combustión; y $\dot{\mathbf{q}}''$ los flujos de calor por conducción, difusión y radiación, que se define como:

$$\dot{\mathbf{q}}'' = -k\nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Z_{\alpha} + \dot{\mathbf{q}}_r'' \quad (3.4)$$

donde k es la conductividad térmica y D_{α} es la difusividad de la especie α .

3.4. Ecuación de conservación de especies

Para simulación de incendios, es necesario considerar explícitamente varias especies de gas individuales, α . Así que, partiendo de la ecuación de conservación de masa 3.1, ésta se escribe como un conjunto de ecuaciones de transporte para las fracciones de masa de las especies de gas individuales:

$$\frac{\partial(\rho Y_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_{\alpha} \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha}) + \dot{m}_{\alpha}''' \quad (3.5)$$

Donde Y_α es la fracción de masa de cada especie de gas α ; $\nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha)$ representa la difusión de la masa y \dot{m}_α''' es la producción de partículas. Cuando se suman todas las ecuaciones de especies, estos términos dan como resultado \dot{m}_b''' , dejando la ecuación de conservación de masa 3.1.

3.5. Ecuación de estado

La ecuación de estado se utiliza para cerrar el sistema de ecuaciones de la dinámica de fluidos, ya que es necesario relacionar diferentes variables termodinámicas (p, ρ, T, e, h) así como relacionar variables de transporte (μ, κ , viscosidad dinámica y conductividad térmica, respectivamente) con las variables termodinámicas, reduciendo así el número de ecuaciones a resolver, McGrattan et al. [18].

Para tratar la presión en aplicaciones con bajos números de Mach ($Ma < 0.3$), como en un incendio, donde se espera una velocidad de flujo promedio de 10 m/s, la solución espacial y temporal de la presión puede descomponerse en una presión local, $\bar{p}(z, t)$, que es la presión termodinámica; más una perturbación, $\tilde{p}(x, y, z, t)$, provocada por el movimiento del fluido. Sólo la presión local se mantiene en la ecuación de estado, donde R es la constante universal de los gases, \bar{W} es el peso molecular de la mezcla de gases, Z_α es la fracción de masa de un conjunto de especies, α , que se transportan juntas y reaccionan juntas, W_α es el peso molecular de cada especie α y T es la temperatura de los gases:

$$\bar{p} = \rho T R \sum_{\alpha} \frac{Z_{\alpha}}{W_{\alpha}} \equiv \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (3.6)$$

Donde $\bar{W} = \frac{1}{\sum Y_{\alpha}/W_{\alpha}}$

Esta modificación es útil en varias aplicaciones, como son: conectar compartimientos con diferentes presiones. También permite relacionar la energía interna, e , y la entalpía sensible, h_s , en términos de la presión termodinámica (presión local), \bar{p} .

La presión local cambia muy poco con la altura o el tiempo en la mayoría de las aplicaciones de incendio en compartimentos.

Capítulo 4

Simulador de Dinámica de Incendios FDS

FDS es un software de código abierto que permite representar flujos de fluidos impulsados por el fuego en un espacio cerrado. Numéricamente resuelve una forma de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos a bajas velocidades y térmicamente impulsados, con énfasis en el transporte de humo y gases calientes.

Las ecuaciones se resuelven mediante diferencias finitas. El procedimiento lleva a subdividir el dominio de cálculo en un número finito de celdas rectangulares, asignando los componentes vectoriales en las respectivas caras de la celda, y las cantidades escalares al centro de cada celda; método que permite resolver las ecuaciones eficientemente. Las derivadas espaciales son aproximadas por medio de diferencias centrales de segundo orden y las variables de flujo se actualizan utilizando un esquema explícito de segundo orden Runge-Kutta.

La característica principal que definirá la precisión de los resultados será el número de celdas incorporadas en la simulación, por tal motivo se recomienda, McGrattan et al. [18], escoger el tamaño de celda en los alrededores cercanos a la fuente de incendio de forma que existan mayor número de celdas dentro del diámetro característico D^* , que el valor resultante de la expresión adimensional: $D^*/\delta x$, para conseguir resultados confiables:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_P T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4.1)$$

donde δx es el tamaño nominal de una celda y $D^*/\delta x$ puede entenderse como el número de celdas de longitud δx que se expande el diámetro característico del incendio; \dot{Q} es la tasa de generación de calor total; ρ_∞ es la densidad del aire c_P es la capacidad térmica específica a presión constante del aire; T_∞ es la temperatura ambiente; g es la aceleración de la gravedad.

Es necesario además un criterio de estabilidad aplicado a esquemas explícitos a través de la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que restringe el intervalo de tiempo para mantener las condiciones físicamente realizables, y estima la convergencia del cálculo. Se establece entonces que un fluido no debe atravesar más de una celda en un intervalo de tiempo, para lograrlo, este número debe ser menor que 1.

Se necesita también añadir condiciones de frontera para el intercambio de masa, momentum y energía con el exterior. Se tiene intercambio de masa en las fronteras en la mayoría de los casos: aire y humo que pasan a través de puertas y ventanas, ventiladores que inyectan o extraen gases, generalmente la presión se especifica a una referencia o valor ambiente y la derivada de la velocidad normal a la frontera se configura en cero. Se tiene intercambio de momentum cuando el fluido entra en contacto con objetos sólidos, donde se asume una condición de velocidad de no deslizamiento en las superficies sólidas. Se tiene intercambio de energía donde las paredes a temperatura ambiente se calientan y la transferencia de calor pasa de mayor a menor.

Combustión

En la simulación de incendios en FDS, puede haber varios tipos de combustibles, pero solo un combustible en forma de gas puede ser simulado; de acuerdo al modelo de combustión de mezcla controlada usado bajo un esquema de química simple, el combustible gaseoso que más predomine en una combustión real es el que reaccionará como sustituto de los demás. Esta simplificación es debida al costo computacional, ya que resolver ecuaciones de transporte para múltiples combustibles es más costoso.

Para las aplicaciones de FDS, en la reacción química del vapor de combustible con el oxígeno, se asume que lo que es mezclado es quemado, una aproximación llamada Eddy Dissipation Concept (EDC) por Magnussen y Hjertager [17]. Este modelo resuelve las ecuaciones de transporte basado en una reacción infinitamente rápida

de combustible y oxígeno. Un modelo apropiado cuando los detalles cinéticos no son importantes, ya que se conocen por medio de datos experimentales, McGrattan y Miles [19].

Este modelo, EDC, permite que el calor liberado se distribuya en un compartimento determinado por una geometría cerrada, tomando en cuenta la disponibilidad de aire. En consecuencia, es responsable también de la altura de las flamas.

La tasa de producción de humo y otros productos usualmente se especifican por el usuario basado en medidas experimentales.

Radiación

Las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía describen la convección y difusión de gases calientes de un fuego. Sin embargo, debido a la importancia de la redistribución de energía por radiación térmica, se debe incluir en la ecuación de transporte de energía.

El modelo más simple de transporte de calor por radiación se basa en un gas gris.

La ecuación de transporte de radiación se resuelve usando el método de volumen finito, empleando ángulos sólidos para su resolución. En general, entre más ángulos sean implementados, mayor será la precisión del flujo de calor y mayor el tiempo necesario para completar la simulación.

Modelo de turbulencia

El uso de la técnica de simulación LES se debe a que en el fuego y dispersión de humos y gases calientes se presenta una mezcla turbulenta de los gases del combustible y productos de la combustión con la atmósfera circundante, efecto que determina la tasa de combustión en la mayoría de los incendios, y que son difíciles de predecir con precisión; así que el esquema LES permite calcular los vórtices suficientemente grandes con adecuada precisión a partir de las ecuaciones de la dinámica de fluidos.

En esencia este modelo reemplaza los términos convectivos irresolubles, o a escala de sub-red (SGS, sub-grid scale) con términos difusivos, por lo que se requiere un modelo de turbulencia para aproximar los términos escalares de flujo y el momentum a esta sub-escala, y obtener un coeficiente para el transporte de turbulencia: la viscosidad turbulenta o difusividad turbulenta. El coeficiente principal —la viscosi-

dad turbulenta, debe ser suficientemente pequeño para evitar suavizar los pequeños vórtices, pero suficientemente grande para asegurar la estabilidad numérica [19].

FDS ocupa una variante del modelo de Deardorff, para obtener el coeficiente de viscosidad turbulenta, μ_t ,

$$(\mu_{LES}/\rho) = C_v \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (4.2)$$

Donde, $C_v = 0,1$; y K_{sgs} , la energía cinética de sub-red.

Otros parámetros de difusividad son: la conductividad térmica y la difusividad material que se relacionan con la viscosidad turbulenta a través de las expresiones:

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} C_p}{Pr_t} \quad ; \quad (\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t} \quad (4.3)$$

El número de Prandtl y el número de Schmidt turbulentos se asumen constantes, ambos con valor de 0.5.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Validación

FDS es un software libre, lo que permite conocer como funciona cada aspecto de la solución que esta herramienta ofrece, además permite variar las condiciones de simulación acorde a nuestras propias necesidades, lo que podría llevar al usuario a un nivel de investigación para distintos escenarios si así se requiriera.

Para la validación de los casos que en esta tesis se estudian, se reprodujeron varios escenarios previamente reportados basados en el mismo software, FDS, con fines de comparar los resultados de la simulación numérica con los reportados en la literatura y asegurar el correcto funcionamiento y manipulación del software. Los casos seleccionados corresponden con túneles largos, donde se quemaran diferentes tipos de combustibles, sólidos y líquidos, y se mide la concentración de los gases a lo largo del túnel bajo distintas condiciones de ventilación.

5.1.1. Dispersión de humo y monóxido de carbono en un túnel largo

En este caso, realizado por Hu et al. [13], se tiene un túnel largo cerrado en el extremo norte (ver figura 5.1) con dimensiones: 88 m de largo, 8 m de ancho y 2.7 m de alto, con paredes, piso y techo de concreto¹ y la entrada sur abierta a la

¹Las propiedades del material pueden consultarse en McGrattan et al. [18].



Figura 5.1: Modelo físico en FDS6.

mitad, en el otro extremo se quema un hidrocarburo, configurado como diésel; de acuerdo a mediciones experimentales la liberación de calor total fue de 0.75 MW bajo ventilación natural. A lo largo del túnel se colocan sensores de medición de temperatura y de concentración de monóxido de carbono a 2.45 m de altura y cada 8 m a partir del lugar del incendio. Lo que permitió la caracterización del incendio para llevarlo de la parte experimental a la simulación numérica.

Comparación de resultados

Los resultados obtenidos de la simulación usando FDS6, figura 5.3, contra los registrados en la literatura, figura 5.2, muestran una clara semejanza en la tasa de liberación de calor para la combustión de diésel.

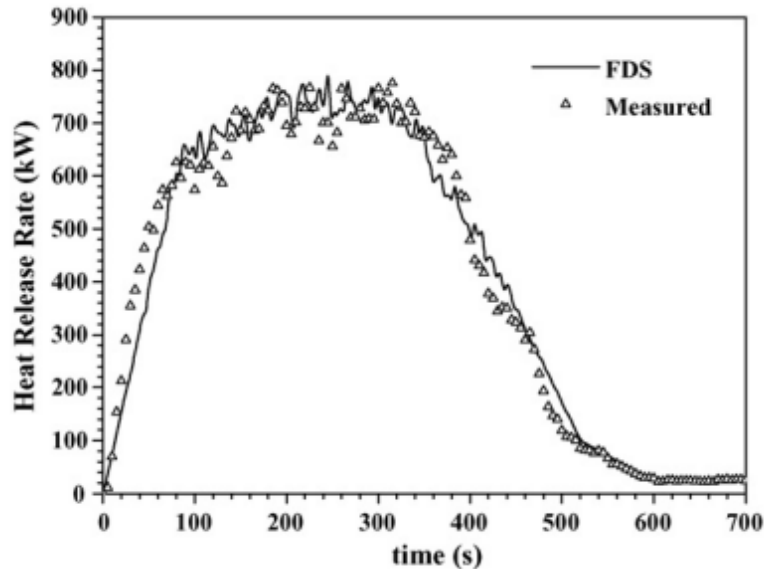


Figura 5.2: Curvatura de la tasa de liberación de calor en FDS4 comparado con valores experimentales por Hu et al. [13].

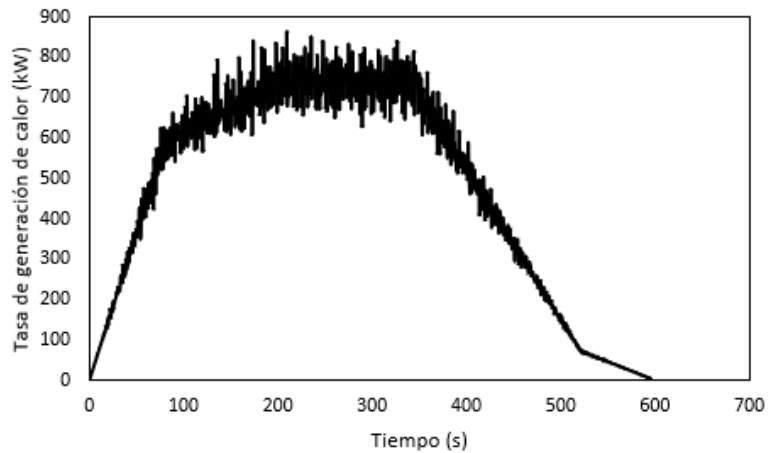


Figura 5.3: Curvatura de la tasa de liberación de calor en FDS6.

La temperatura alcanzada por el humo, medida en diferentes puntos a lo largo del túnel, usando FDS6, figura 5.5, presentan el mismo comportamiento que las curvas reportadas en la literatura, figura 5.4, por Hu et al. [13].

La mayor temperatura se presenta en el punto de medición más cercano a la fuente de incendio, donde alcanza casi 120°C y disminuye con el incremento de la distancia al fuego.

La figura 5.7, obtenida con FDS6 para la distribución vertical de monóxido de carbono (CO) a 39m del incendio, concuerda correctamente con los niveles de concentración encontrados a diferentes alturas por Hu et al. [13] y reportados en la figura 5.6, usando FDS4.

Mediante estas comparaciones se muestra como la concentración de gases es mayor en el techo y va disminuyendo al acercarse al piso, al igual que va disminuyendo al alejarse de la zona del incendio.

5.1.2. Dispersión de incendio sobre banda transportadora en un túnel

Se tiene un túnel con dimensiones: 2.2 m de alto, 5.5 m de ancho y 46 m de largo, en el lado sur se encuentra la entrada de aire y el otro extremo está abierto a la atmósfera, como se visualiza en la figura 5.8.

Una banda transportadora hecha de un elastómero sintético –SBR–, de 11.4 m

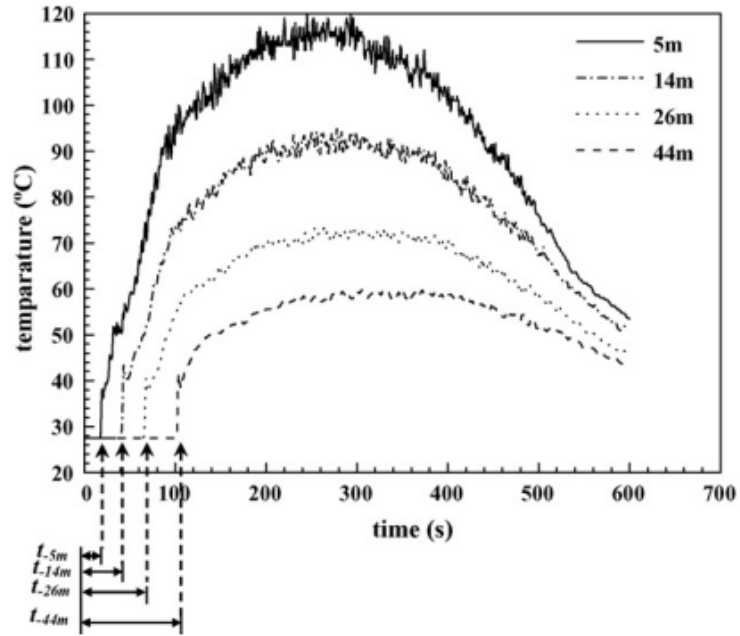


Figura 5.4: Variación de la temperatura del humo en el tiempo a diferentes distancias en FDS4 por Hu et al. [13].

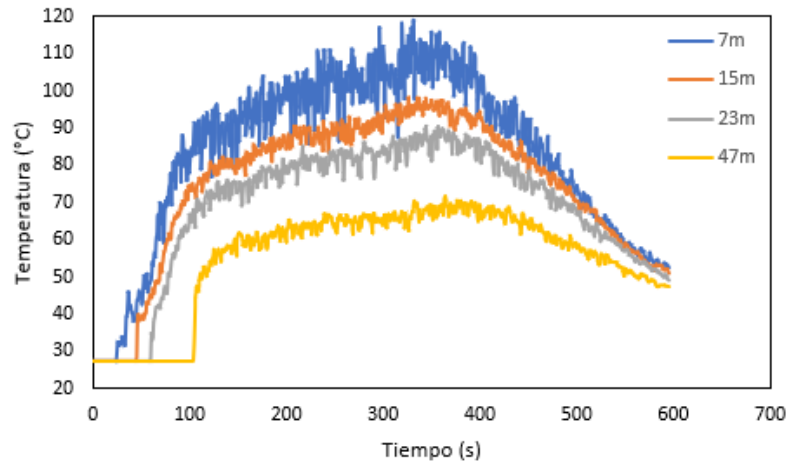


Figura 5.5: Variación de la temperatura del humo en el tiempo a diferentes distancias del incendio en FDS6.

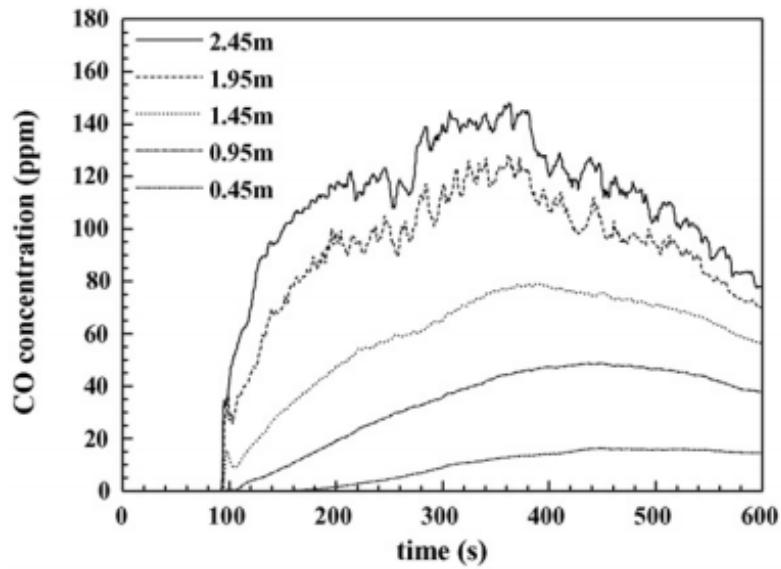


Figura 5.6: Distribución vertical de la concentración de CO medida a 39 m del incendio en FDS4 por Hu et al. [13].

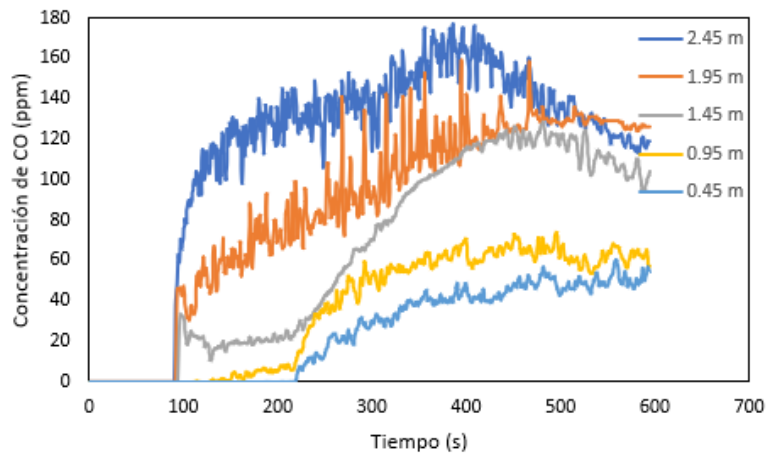


Figura 5.7: Distribución vertical de la concentración de CO medida a 39 m del incendio en FDS6.

de longitud y 1.83 m de ancho se coloca a 5 m de la entrada de aire. Con base en los resultados de simulaciones previas, aunque no es mencionado en el artículo de Yuan et al. [28], el material para las paredes, piso y techo del túnel se han establecido de carbón. Las propiedades de los materiales se muestran en la tabla 2.1.



Figura 5.8: Modelo físico del túnel y banda transportadora en FDS6.

En esta configuración se incendia la banda transportadora, ubicada a 1.2 m de altura. Se realiza la pirólisis del material con base en las propiedades de la tabla 2.1. La velocidad de entrada del aire se establece en 1.5 m/s y se colocan sensores para medición de la temperatura de la banda y de los gases, y para la concentración de CO y CO₂. Los resultados fueron comparados con un test experimental por Yuan et al. [28].

Comparación de resultados

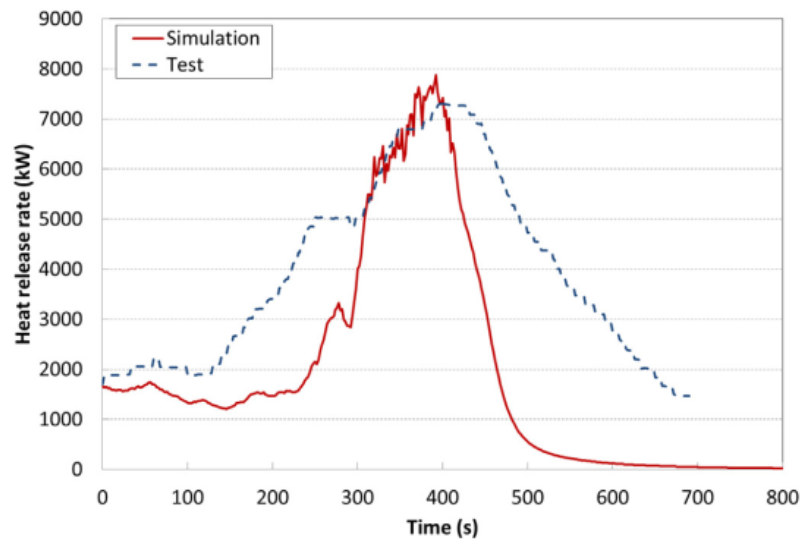


Figura 5.9: Comparación de las tasas de generación de calor entre el test y la simulación por Yuan et al. [28].

En la figura 5.9 se observa la gráfica obtenida por Yuan et al. [28] para la comparación de la tasa de calor generado durante el experimento y la obtenida a través de simulación numérica, donde se liberan entre 2 MW y 7MW de calor. Al comparar

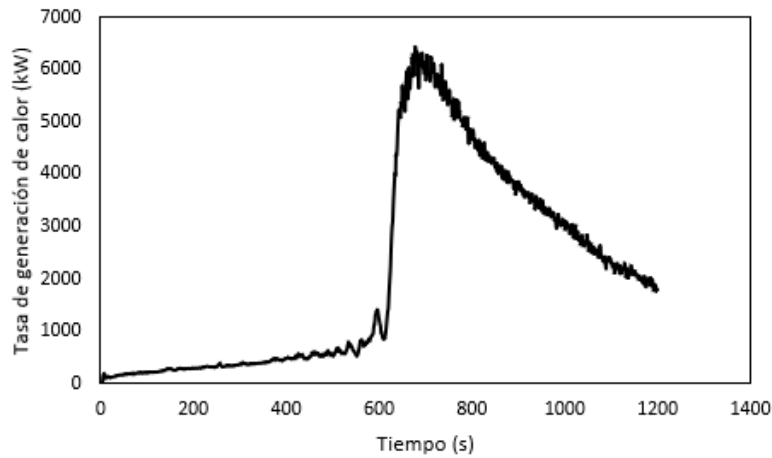


Figura 5.10: Tasa de generación de calor en FDS6.

ésta con la obtenida mediante FDS6, figura 5.10, se observan semejantes en la magnitud de calor liberado, aunque su comportamiento es diferente, pues intervienen distintos parámetros que lo modifican.

En la figura 5.10 la tasa de generación de calor es constante durante aproximadamente 600 s, después ocurre la combustión súbita, lo que eleva de forma incontrolada la tasa de liberación de calor a más de 6 MW en un período de tiempo muy corto, dando lugar a la dispersión de las llamas por toda la superficie de la banda transportadora, reduciendo la tasa de generación de calor lentamente. Por otro lado, en la figura 5.9 (por Yuan et al. [28]) la tasa de liberación de calor es máxima a los 400 s y se extingue rápidamente después de esto. La curva obtenida de la simulación numérica, en FDS6 se asemeja más a la propia de un polímero grueso; la obtenida por Yuan et al. [28] es más parecida a la de un polímero delgado, de acuerdo con las curvas de referencia presentadas en la figura 2.3.

En la figura 5.11, obtenida por Yuan et al. [28], a los 500 s hay un cambio rápido en la temperatura, de 400°C a 1000°C. En la figura 5.12 obtenida en FDS6 el mayor aumento de temperatura se da a los 600 s, siguiendo el patrón de la tasa de liberación de calor, figura 5.10.

Para las figuras 5.13 y 5.14 el patrón de aumento de la temperatura de la superficie es más semejante, ya que a los 600 s la temperatura llega a superar los 1000°C.

Finalmente, las temperaturas registradas del humo a los 12 metros del frente

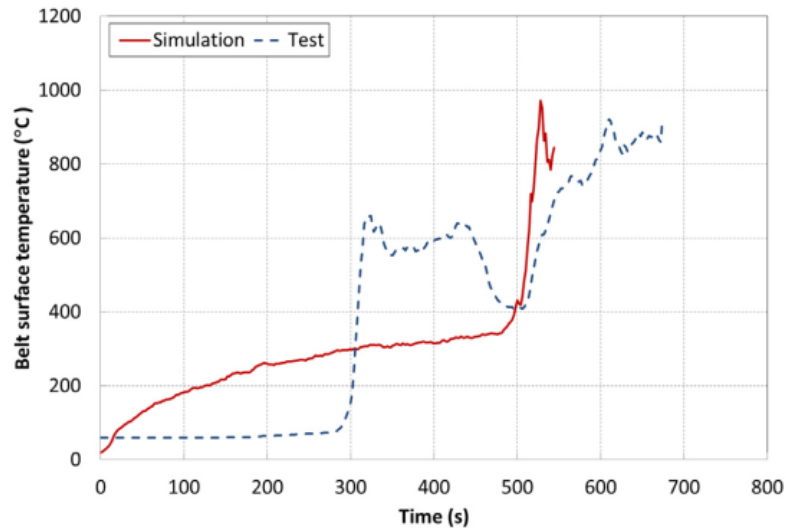


Figura 5.11: Temperaturas de la superficie comparando test y simulación a 3 m del incendio por Yuan et al. [28].

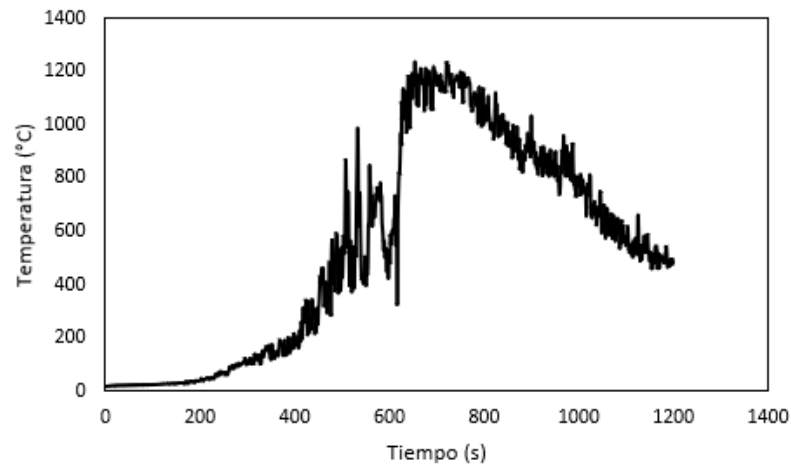


Figura 5.12: Temperatura de la superficie a 3 m de incendio en FDS6.

de la banda, figura 5.15 y 5.16, son máximas después de los 600 s, al igual que las mediciones a los 15 metros de la fuente de calor, figuras 5.17 y 5.18. Las temperaturas máximas para los casos obtenidos en FDS6 a 12 y 15 metros del frente de las banda son de 700°C y 500°C, respectivamente. Lo anterior evidencia la disminución de la temperatura al alejarnos de la fuente del incendio.

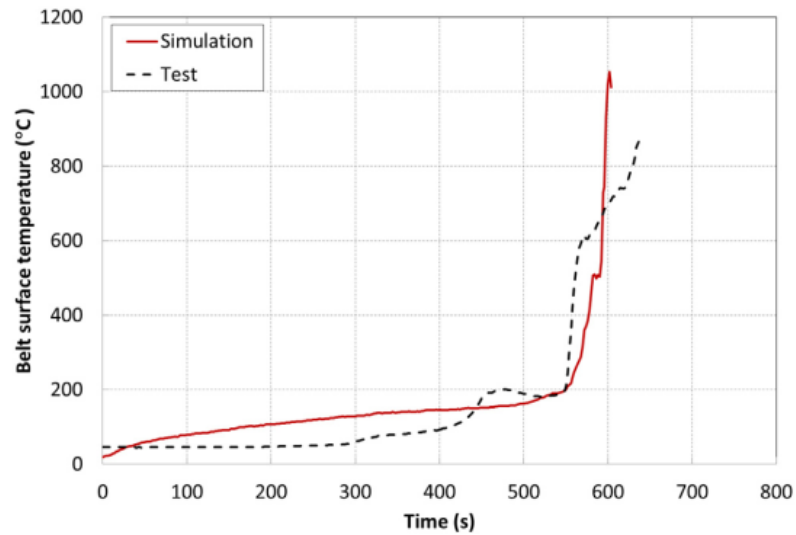


Figura 5.13: Temperaturas de la superficie comparando test y simulación a 6 m del incendio por Yuan et al. [28].

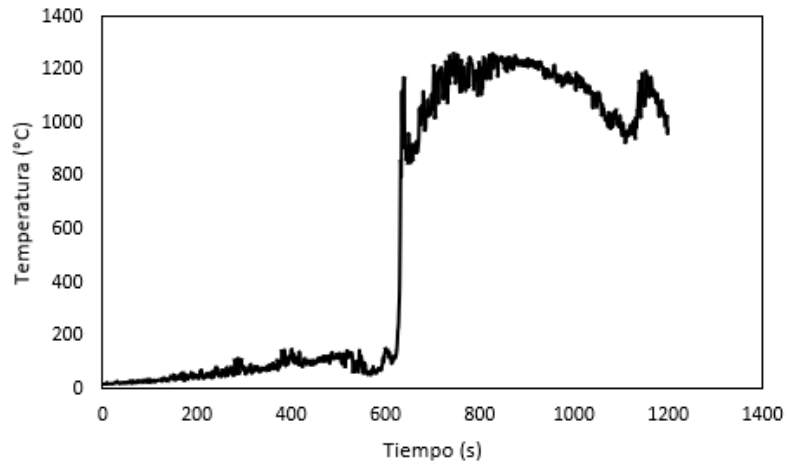


Figura 5.14: Temperatura de la superficie a 6 m del incendio en FDS6.

5.1.3. Movimiento del humo bajo el efecto chimenea en un túnel de mina

Fan et al. [9] realizaron una serie de experimentos, en los que se basaron para realizar la simulación numérica, a través de FDS, de un incendio en un túnel largo horizontal, investigaron las consecuencias de añadir un túnel inclinado, en el cual

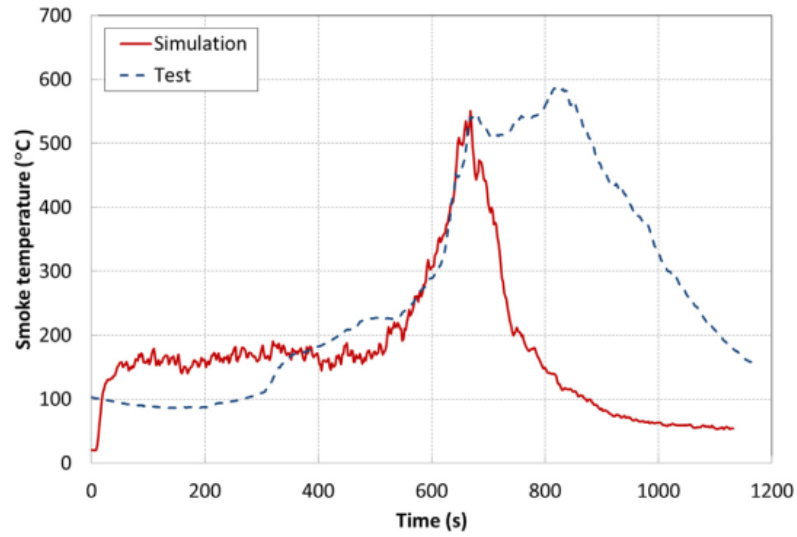


Figura 5.15: Temperatura del humo a 12 m del incendio por Yuan et al. [28].

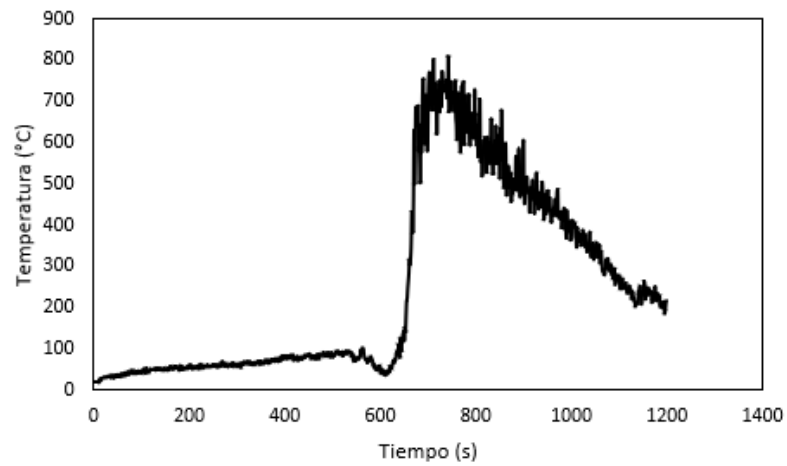


Figura 5.16: Temperatura del humo a 12 m de incendio en FDS6.

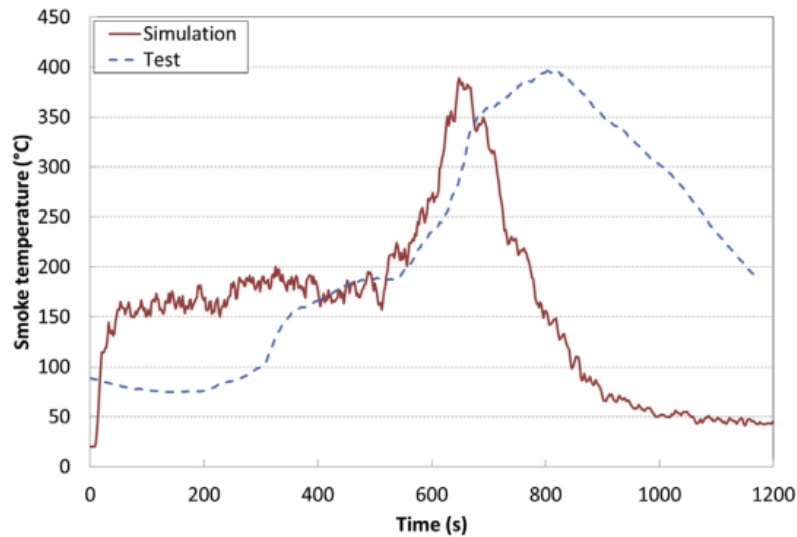


Figura 5.17: Temperatura del humo a 15 m del incendio por Yuan et al. [28].

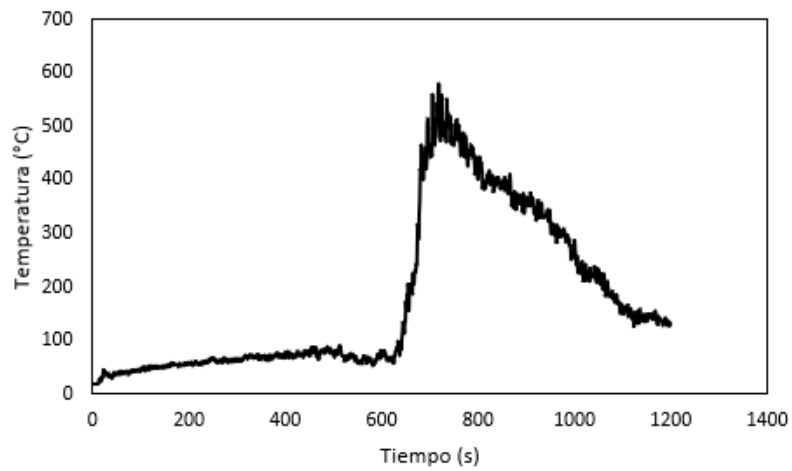


Figura 5.18: Temperatura del humo a 15 m del incendio en FDS6.

observaron el efecto chimenea. Realizaron distintas simulaciones con variaciones en el ángulo de inclinación y la longitud del túnel inclinado. Mostrando que el efecto chimenea es proporcional a la longitud y ángulo de inclinación del túnel.

La configuración del modelo físico se muestra en la figura 5.19, donde L , es la longitud del túnel inclinado; y θ es el ángulo de inclinación. El túnel horizontal tiene una longitud de 50 m, de sección transversal 3 m de ancho y 2 m de alto, y el lugar

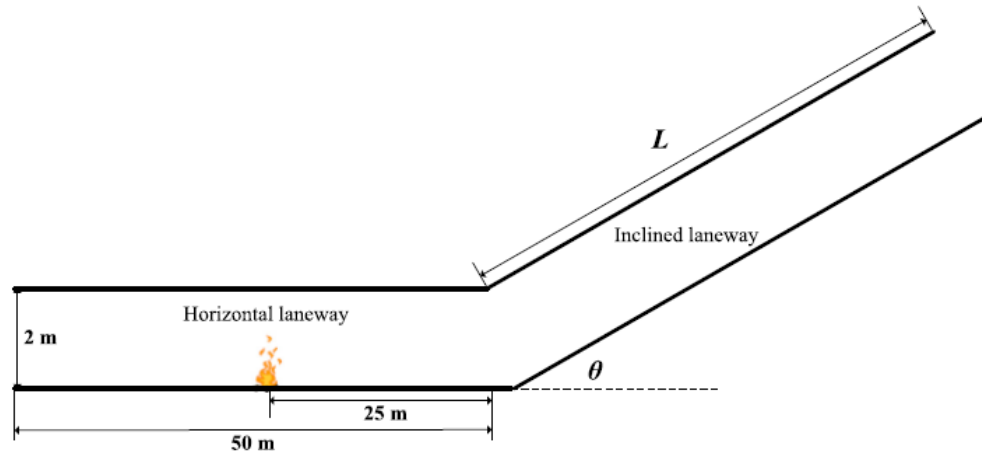


Figura 5.19: Configuración del modelo físico por Fan et al. [9].

del incendio ubicado al centro de este túnel. La entrada del túnel horizontal y la parte final del túnel inclinado se encuentran abiertos a la atmósfera, esto permite la entrada del flujo de aire de acuerdo a los requerimientos de la simulación numérica (ver figura 5.19).

Para este trabajo, se presenta la simulación numérica por medio de FDS6 para los casos, cuando $L = 10\text{ m}, \theta = 10^\circ$, y $L = 50\text{ m}, \theta = 10^\circ$.

Comparación de resultados

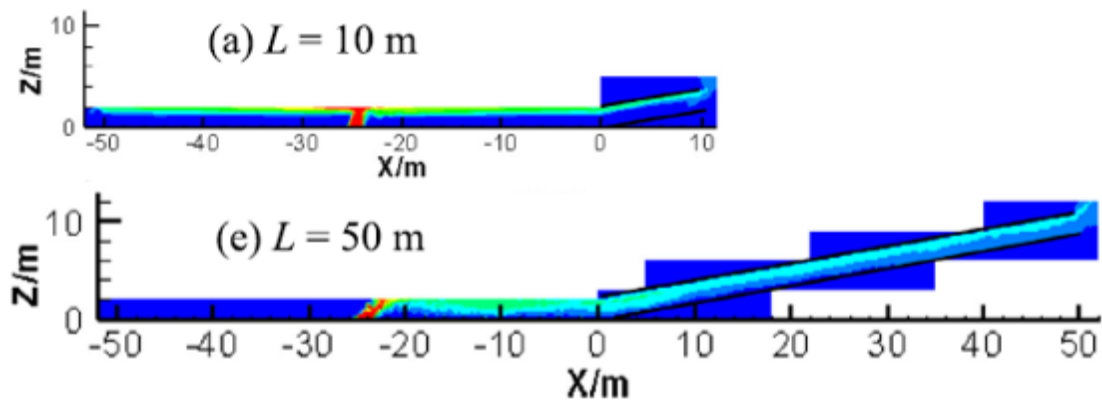


Figura 5.20: Movimiento del humo en estado estacionario para $\theta = 10^\circ$, por [9].

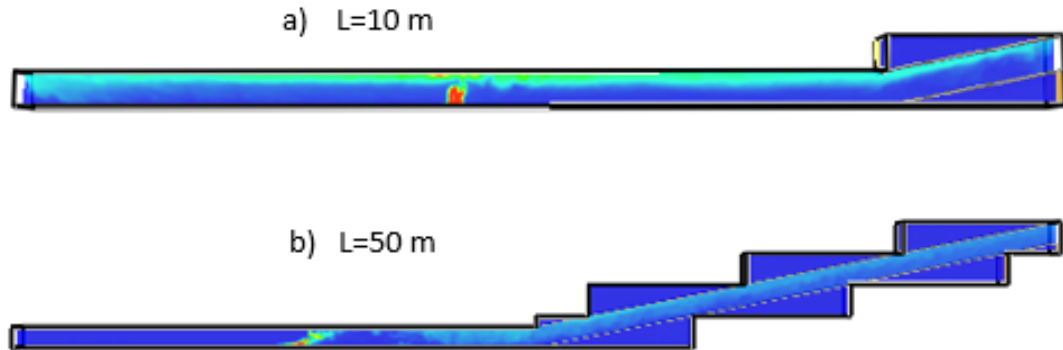


Figura 5.21: Movimiento del humo en estado estacionario para $\theta = 10^\circ$ en FDS6.

La figura 5.20 muestra el movimiento del humo después de que se ha estabilizado. Se observa movimiento en contra de la dirección del flujo de aire cuando la longitud del túnel inclinado es de 10 m y 10° de inclinación; cuando su longitud aumenta, el retroceso de la capa de humo desaparece, fluyendo el humo junto con el viento, como se aprecia cuando L es igual a 50m y $\theta = 10^\circ$.

En las simulaciones realizadas en FDS6, figura 5.21 el comportamiento del humo es similar al presentado en la figura anterior, 5.20; es decir, cuando L tiene 10m de longitud, el retroceso del humo llega hasta la entrada del túnel; mientras que, cuando L vale 50m el humo sigue la dirección del viento hacia el túnel inclinado, y el retroceso del humo desaparece después de estabilizarse su movimiento.

5.2. Resultados de la simulación numérica

Se muestran aquí los resultado para el caso en estudio planteado anteriormente, en el Capítulo 2. Se analizarán los campos de temperatura y de velocidad del flujo

de los gases, y la concentración de los gases de combustión en el interior de la mina. Se presenta también el tiempo de evacuación de mineros.

5.2.1. Análisis de mallado

De acuerdo con la sugerencia realizada por McGrattan et al. [18] para el tamaño de celda en la zona cercana al incendio, que debe ser menor que $D^*/\delta x$, empleando la ecuación 4.1, donde $\delta x = 0,1\text{m}$ como propone McGrattan et al. [18]. Si $T_{ambiente} = 293\text{K}$, $\rho_{aire} = 1,24\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $C_p = 1,005\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, $g = 9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ y \dot{Q} varía entre 2 MW y 7 MW, de acuerdo al test realizado por Yuan et al. [28], entonces D^* está entre 1.25 m y 2.06 m, por lo que el tamaño de celda se selecciona de 0.1 m, que proporciona valores adecuados con respecto a tamaños de celda más pequeños también estudiados.

Por lo tanto se seleccionó una celda cúbica de 0.1 m por lado en los primeros 20 m del túnel principal, mientras que en la parte restante del conjunto de túneles el tamaño de celda fue de 0.2 m por lado, ya que no se tienen fuentes de incendio adicionales.

5.2.2. Análisis de velocidad

Se sabe que la velocidad de ventilación al igual que el tamaño del incendio influyen de manera directa en la distribución de los gases dentro de los túneles de una mina. En el inicio, los gases concentrados por encima de la zona del incendio se distribuyen rápidamente hacia las demás zonas de la mina, transportados por el flujo de aire.

En la figura 5.22 se aprecia el campo de velocidades para distintos tiempos, medido a un metro de altura del suelo a través de la mina. La velocidad del flujo de gases se mantiene constante en la mayor parte del túnel principal, no se presentan cambios significativos, sino hasta el momento de la combustión generalizada de la banda transportadora, a los 700 s; los cambios más notorios se encuentran debajo de la banda, donde la velocidad supera rápidamente 3 m/s; en la región restante del túnel principal la velocidad disminuye al alejarse del incendio, y el flujo de los gases en los ramales permanece casi invariable con velocidades menores a 1 m/s.

De acuerdo con la tasa de generación de calor, figura 5.10, la velocidad del aire se mantiene estable mientras las llamas se dispersan lentamente en la zona frontal de

la banda. Al presentarse la combustión generalizada de la banda, genera un cambio repentino en la velocidad de entrada de aire, apreciable en la figura 5.23, que muestra los primeros 20 m del túnel principal, en el plano central $Y=2.5$ m, espacio donde se encuentra la banda incendiada. Como consecuencia el humo avanza en contra de la dirección del viento, que se inicia a los 400 s y 300 s después llega hasta la entrada de aire. La velocidad del aire sobre la banda disminuye, causada por las partículas de humo producidas que impiden el flujo de aire por esa zona, lo que incrementa el flujo de aire por debajo de la banda transportadora a más de 3 m/s.

5.2.3. Análisis de temperatura

La medición de la temperatura, en la figura 5.24, tomada a 1 m de altura a través de toda la mina, muestra que la mayor temperatura se encuentra cerca de la entrada de aire, donde se inicia el incendio, a los 700 s las temperaturas sobrepasan los 300°C. En el conjunto de túneles secundarios de la mina se mantienen temperaturas que van de 20°C en las salidas a 100°C aproximadamente.

El campo de temperaturas, en la figura 5.25 se modifica en función de la tasa de liberación de calor, figura 5.10, se identifica que, la temperatura aumenta rápidamente a partir de los 600 s, pasa de 400°C a más de 1100°C a los 700 s, mientras la llamas continúan extendiéndose sobre la banda. Los gases calientes que rodean esta zona presentan temperaturas que van de 350°C a 700°C, aproximadamente. Es notorio que, la temperatura desciende al aumentar la distancia al fuego, y la mayor temperatura se encuentra cercana al techo disminuyendo al acercarse al piso.

5.2.4. Análisis de visibilidad

La generación de humo a consecuencia de la combustión reduce la visibilidad del camino, efecto que interfiere con labores de extinción del incendio y evacuación de personas. El humo se dispersa rápidamente por la mina entera a causa del flujo de aire. La figura 5.26 indica que la visibilidad se reduce en menos de 100 s en lugares donde no existe ventilación directa como en las ramificaciones, siendo el lugar con mayor visibilidad la entrada de aire. Al ocurrir la máxima liberación de calor, la velocidad de ventilación ya no es suficiente para mover la cantidad humo y gases

generados por el incendio, por lo que el humo cubre por completo la totalidad de la mina y la visibilidad se hace nula por completo a los 700 s.

5.2.5. Concentración de CO y CO₂

De acuerdo con la NOM-032-STPS-2008, es posible realizar una jornada de trabajo en lugares donde el monóxido de carbono no exceda de 50 ppm² o 0.005 % en volumen.

Se presenta en la tabla 5.1 los efectos que tienen diferentes concentraciones de monóxido de carbono en la salud de los trabajadores [25].

Tabla 5.1: Efectos del monóxido de carbono en la salud.

Concentración de CO (ppm)	Tiempo de inhalación	Síntomas tóxicos
200	2-3 h	Dolor de cabeza ligero, cansancio, fatiga, náuseas y mareos.
400	1-2 h	dolor de cabeza grave, se intensifican otros síntomas. Peligro de muerte después de 3 horas.
800	45 min	Mareos, náuseas y convulsiones. Inconsciente en 2 horas. Muerte después de 2-3 horas.
1600	20 min	Dolor de cabeza, mareos y náuseas. Muerte dentro de 1 hora.
3200	5-10 min	Dolor de cabeza, mareos y náuseas. Muerte dentro de 1 hora.
6400	1-2 min	Dolor de cabeza, mareos, náuseas. Muerte en 25-30 minutos.
12800	1-3 min	Muerte en 1-3 minutos

La concentración de monóxido de carbono presente en los gases expulsados durante la combustión de SBR se observa en la figura 5.27, registrada a 1 m de altura a través de la mina. Durante la combustión generalizada de la banda se registran concentraciones superiores a 3300 ppm en las zonas rojas, cercanas al incendio, y en

²ppm, partes por millón, se define como la masa del componente dividido por el total de masa, multiplicado por 10⁶

los ramales la concentración de monóxido de carbono va de 0 a 2000 ppm (ver figura 5.27).

En la figura 5.28, se muestra un acercamiento a la zona del incendio. La concentración de CO es máxima en las flamas, donde los niveles alcanzan hasta 11300 ppm, y es menor en los bordes, con niveles que van de 8000 ppm a 3000 ppm en relación con la distancia desde el techo.

La concentración máxima permisible de dióxido de carbono es de 5000 ppm o 0.50%, durante una jornada laboral, según lo establecido en la NOM-032-STPS-2008. Como se observa en la figura 5.29, a los 700 s la concentración de CO_2 es mayor a 35000 ppm en las zonas rojas; mientras que en los ramales la concentración alcanza hasta 20000 ppm durante el proceso de combustión.

En un enfoque cercano a la zona del incendio, fig. 5.30, se observa que la concentración de dióxido de carbono alcanza hasta 120000 ppm en las flamas generadas por la combustión. Sus niveles disminuyen al alejarse del incendio, en los alrededores se registran concentraciones mínimas de 40000 ppm.

5.2.6. Evacuación del personal

Cuando un incendio ocurre en una mina subterránea, la preparación del personal, el conocimiento de las salidas, la velocidad de reacción, la visibilidad, entre otros factores intervienen para ponerse a salvo. Estos elementos se integran en EVAC, un programa adicional a FDS, en el que los datos de la simulación del incendio y el algoritmo de EVAC se conjugan para simular numéricamente la evacuación de personas.

Se colocaron dos grupos de personas al interior del túnel principal, un grupo cerca de la fuente de combustión, y otro más alejado de este sitio. La distribución se aprecia en la figura 5.31.

El total de personas evacuan la mina en menos de 140 s (ver figura 5.32). Se observa también la secuencia de evacuación a través de las diferentes salidas colocadas en el túnel en la figura 5.33.

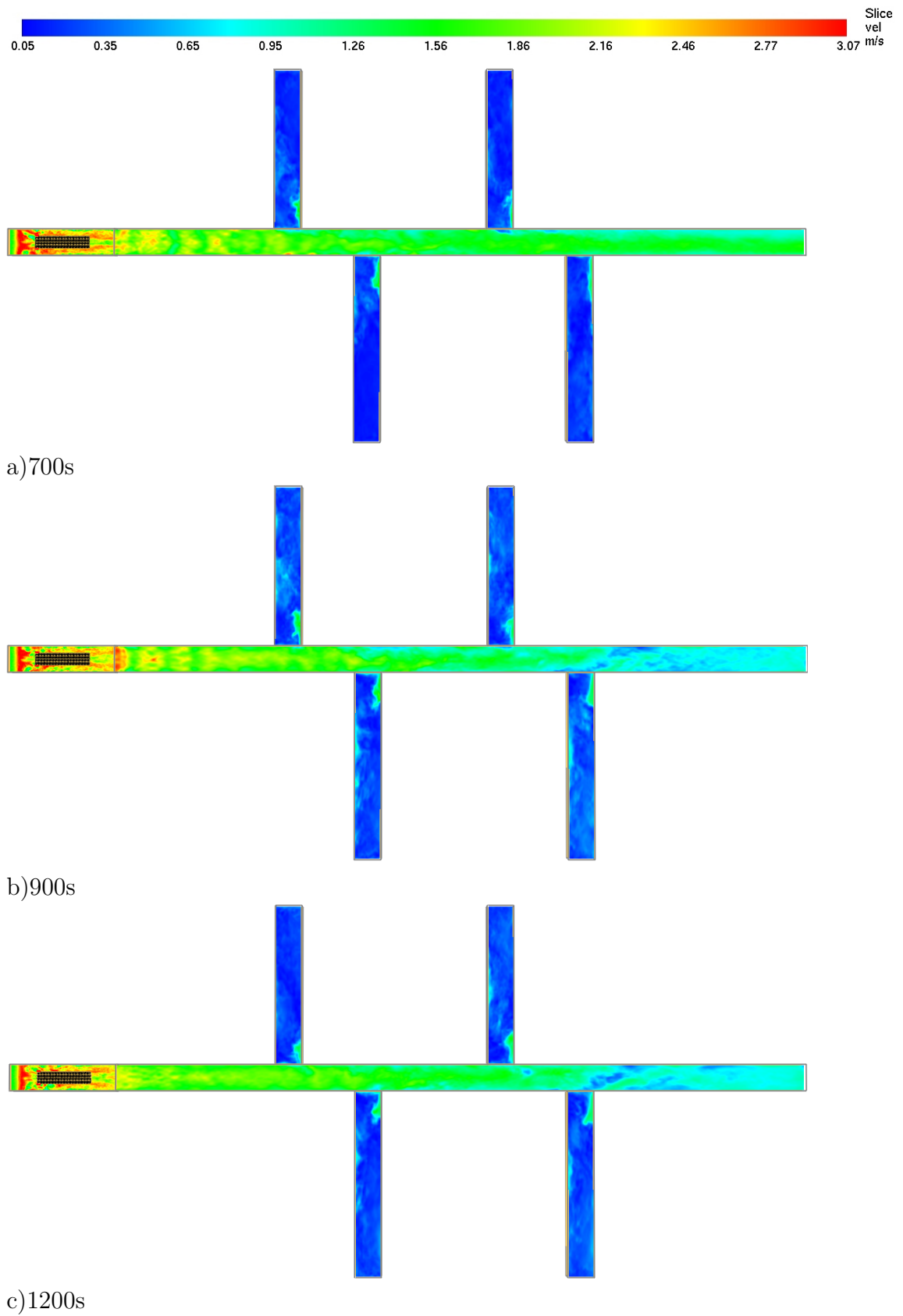


Figura 5.22: Campo de velocidades a 1 m de altura en FDS6.

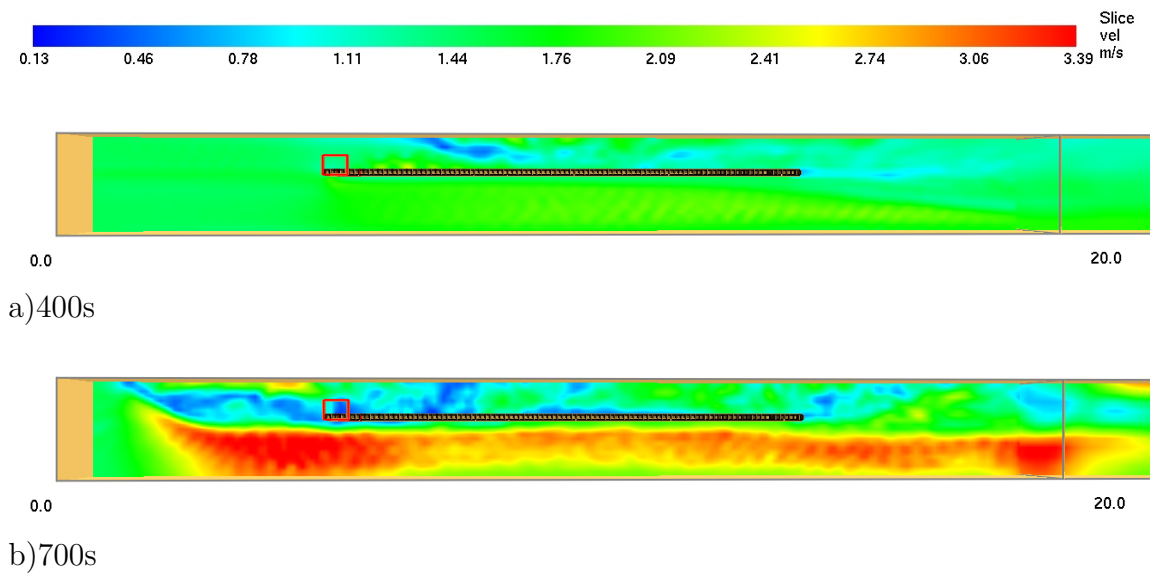


Figura 5.23: Campo de velocidades en los primeros 20 m del túnel principal, plano $Y=2.5$ m en FDS6.

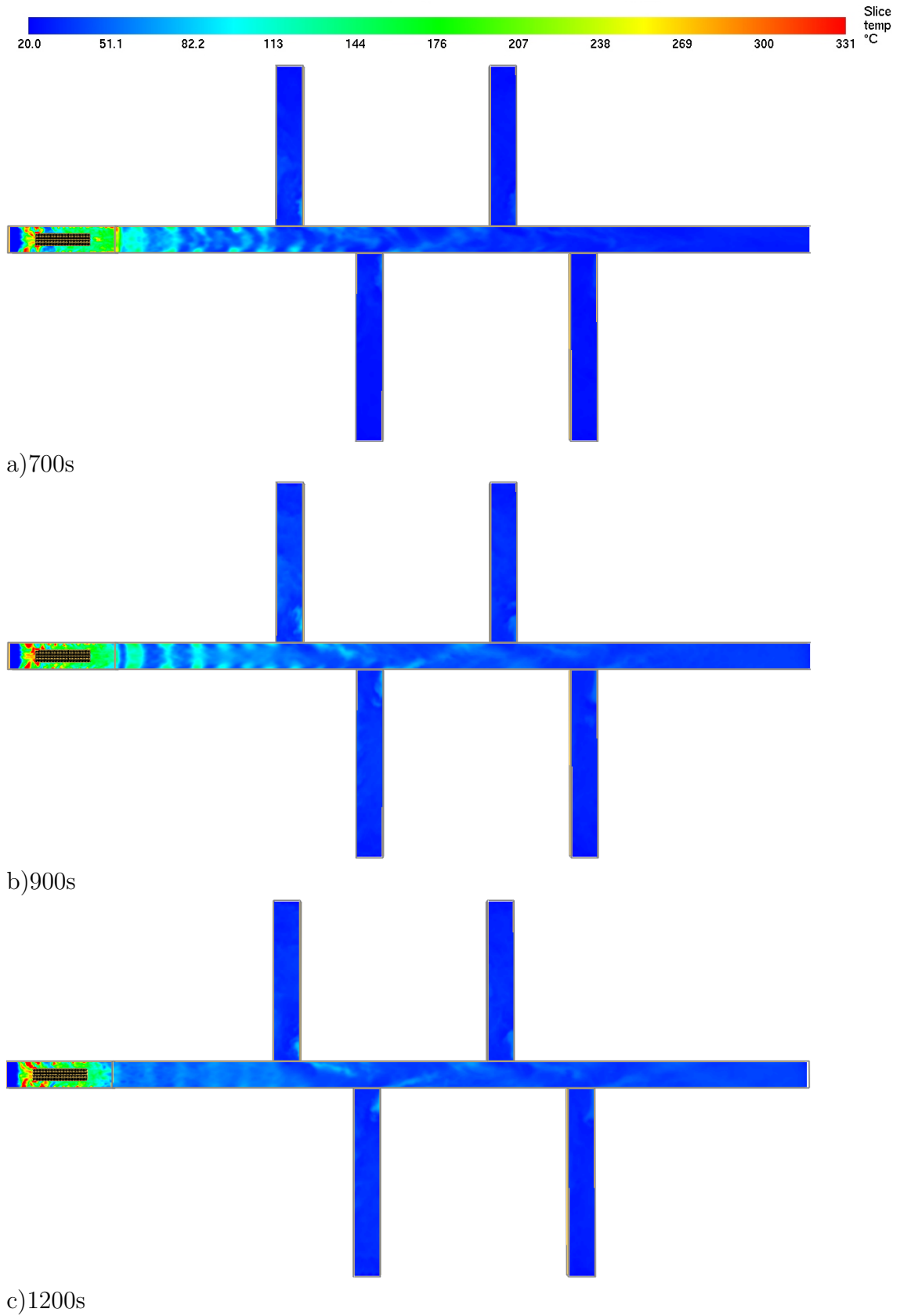


Figura 5.24: Campo de temperaturas en la mina a 1 m de altura en FDS6.

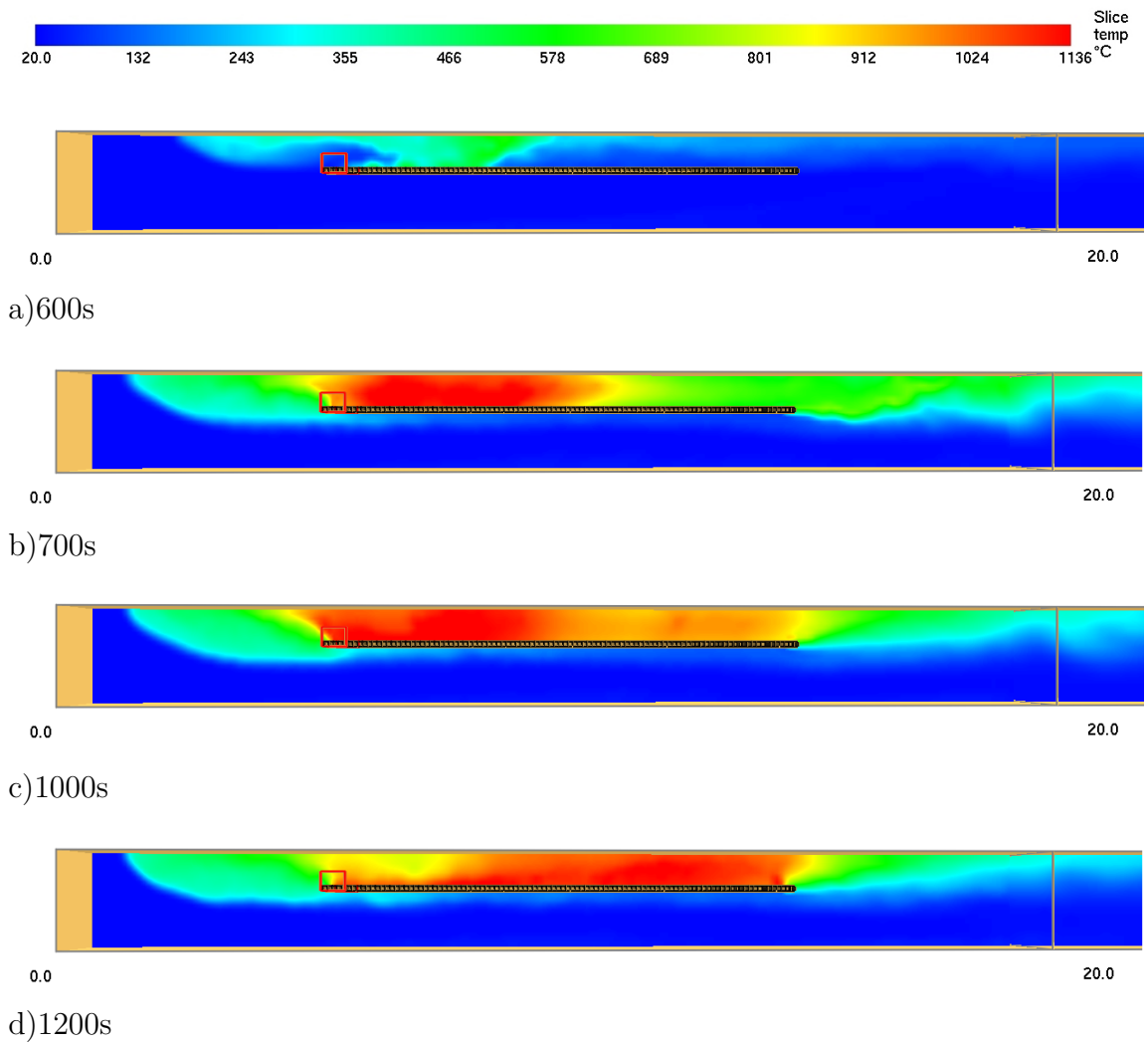


Figura 5.25: Campo de temperaturas en la zona del incendio, plano $Y = 2.5$ m en FDS6.

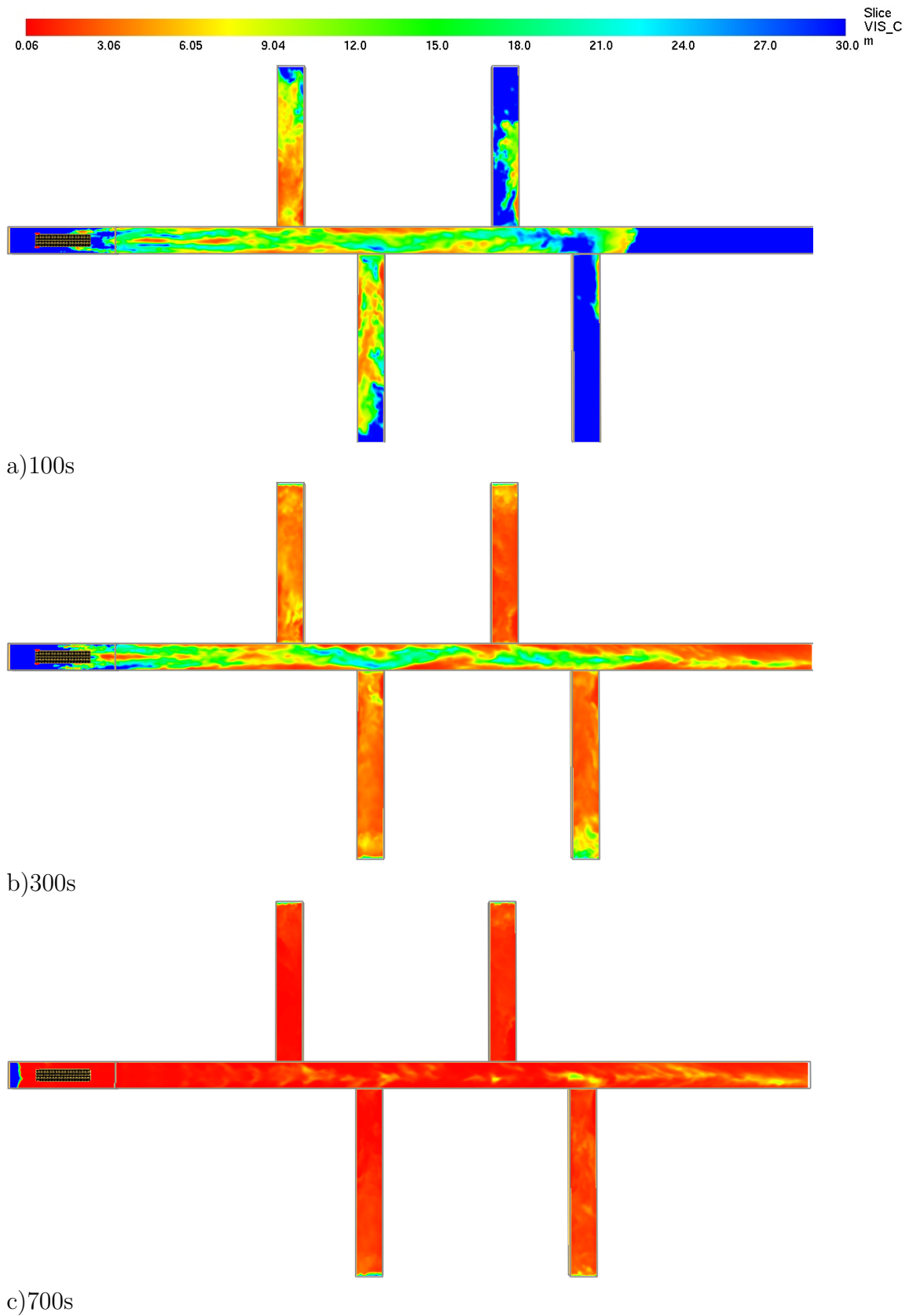


Figura 5.26: Campo de visibilidad a 1 m de altura en FDS6.

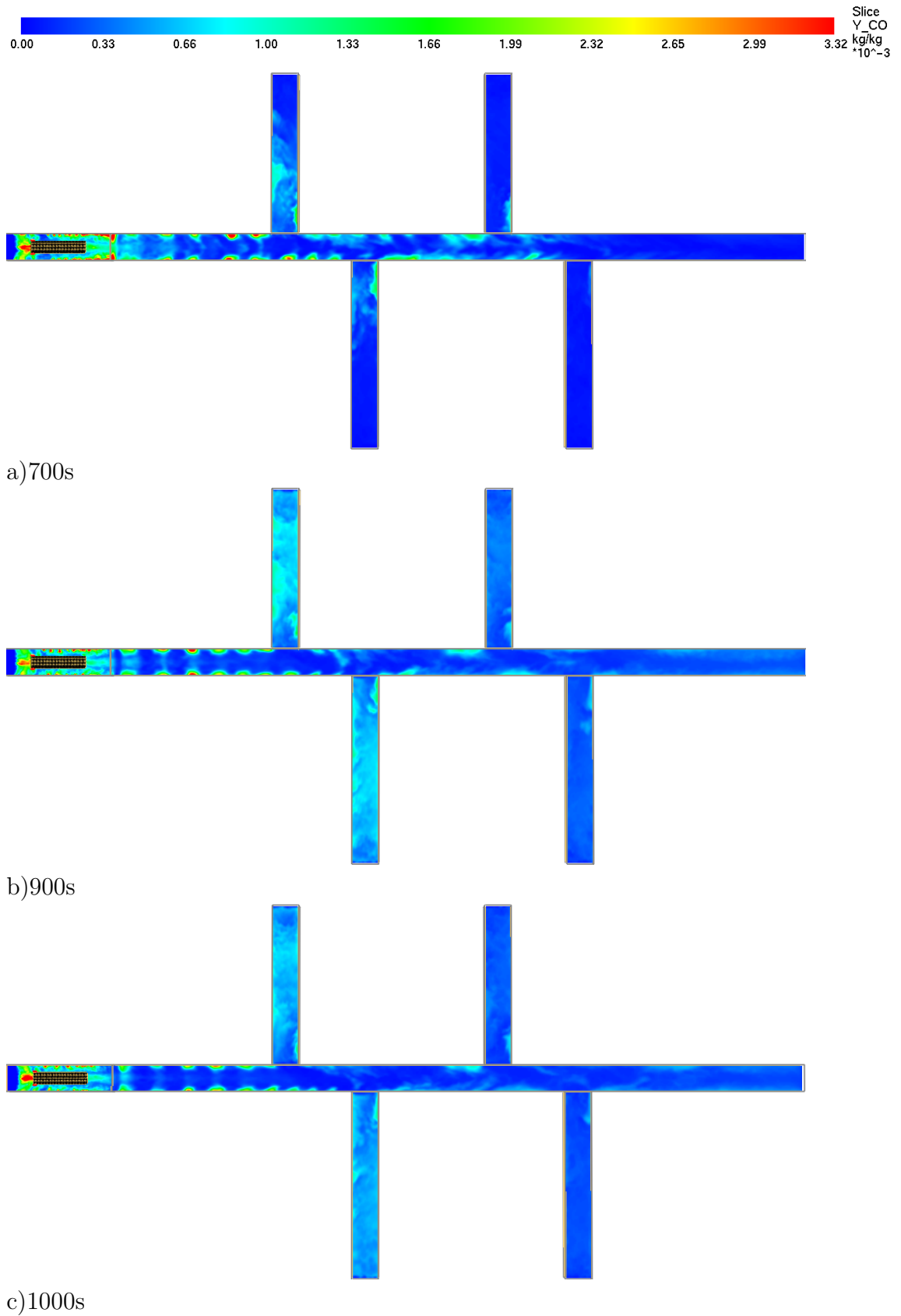


Figura 5.27: Concentración de monóxido de carbono a 1 m de altura en FDS6.

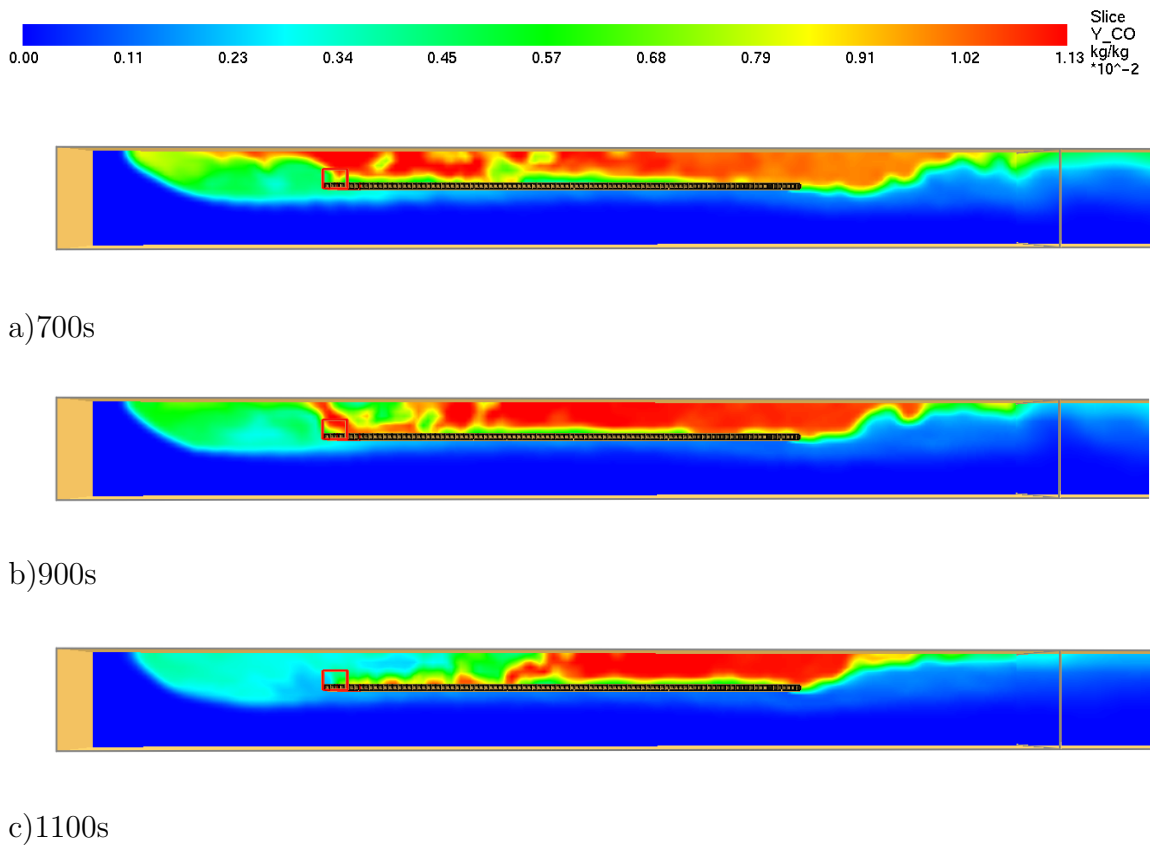


Figura 5.28: Concentración de monóxido de carbono en la zona del incendio, plano Y=2.5 m en FDS6.

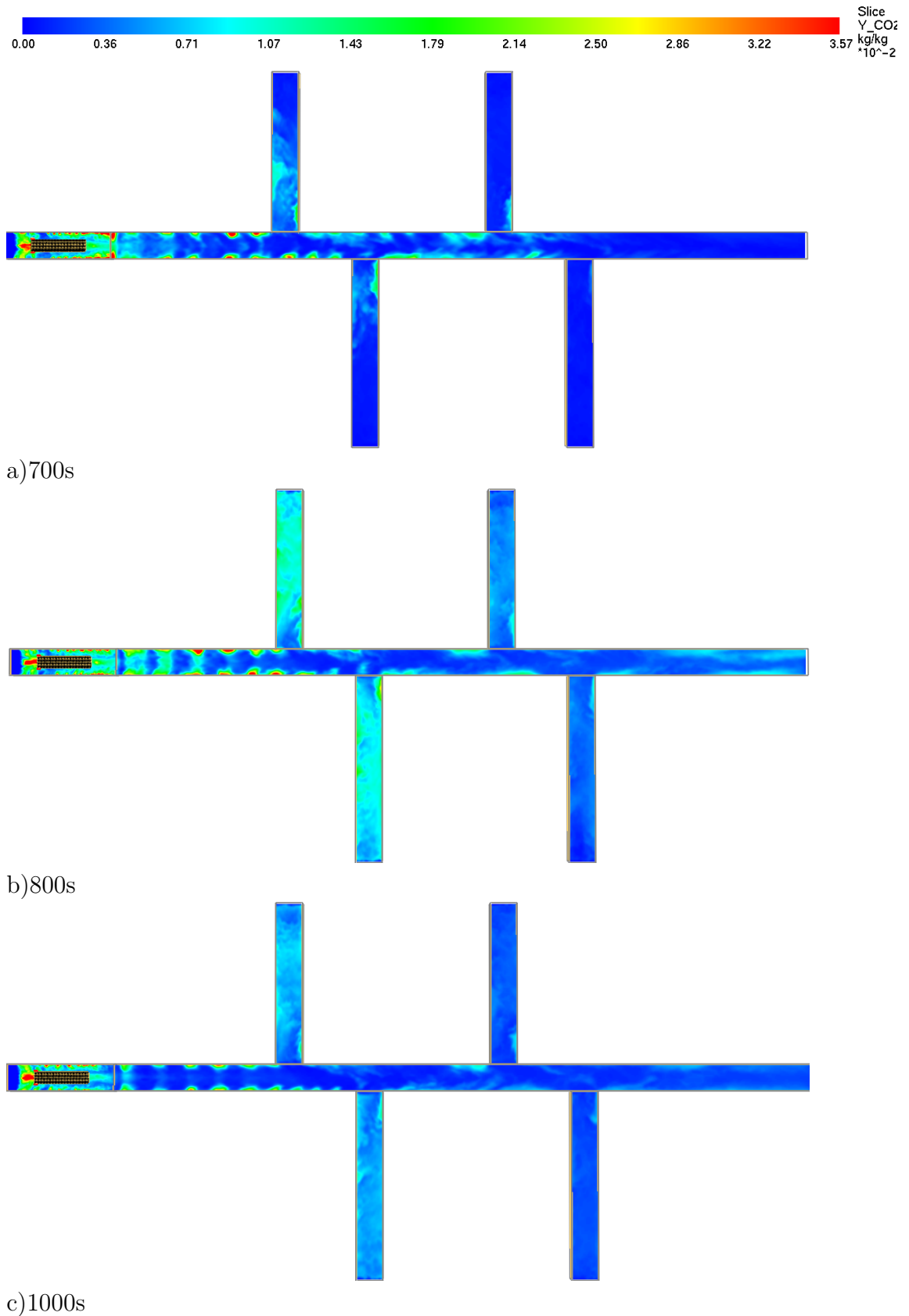


Figura 5.29: Concentración de dióxido de carbono a 1 m de altura en FDS6.

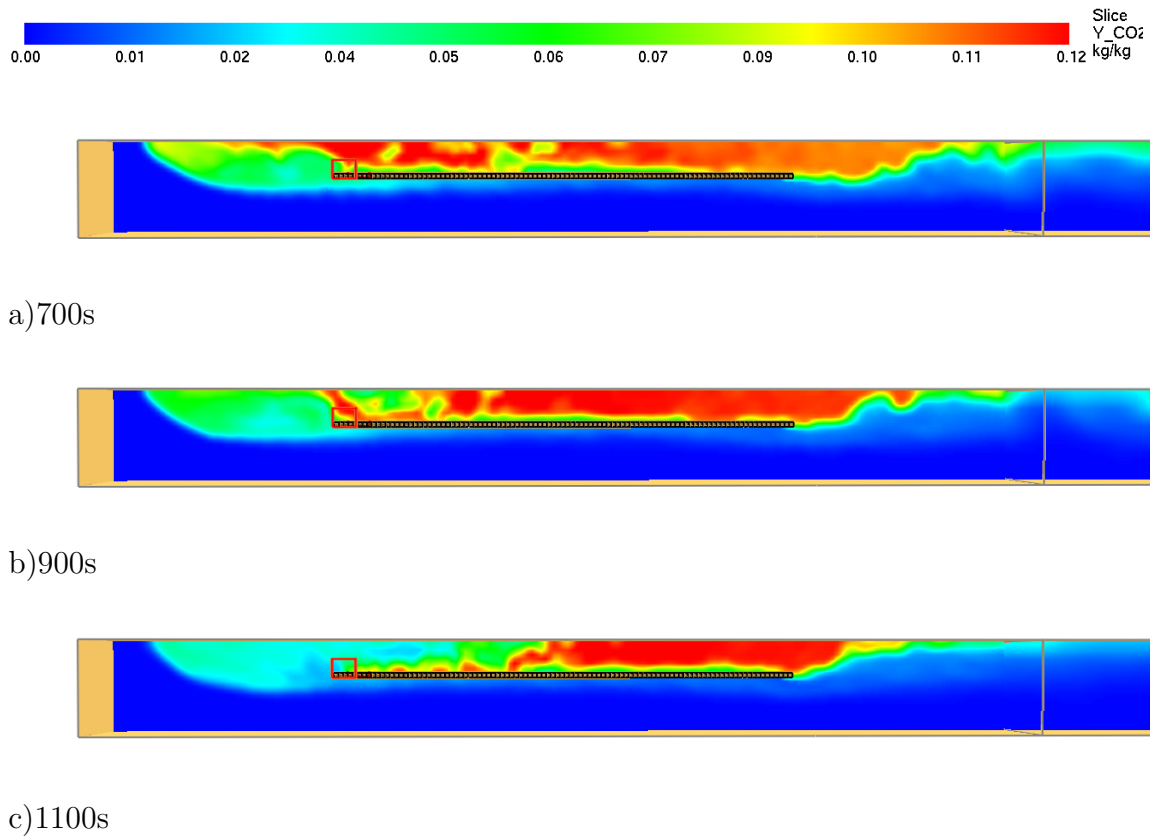


Figura 5.30: Concentración de dióxido de carbono en la zona del incendio, plano Y=2.5 m en FDS6.

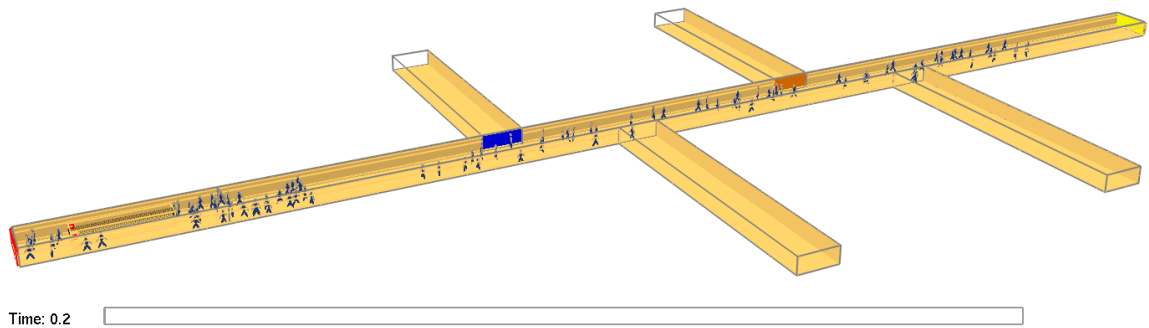


Figura 5.31: Distribución inicial de personas en la mina. Total 100 personas.

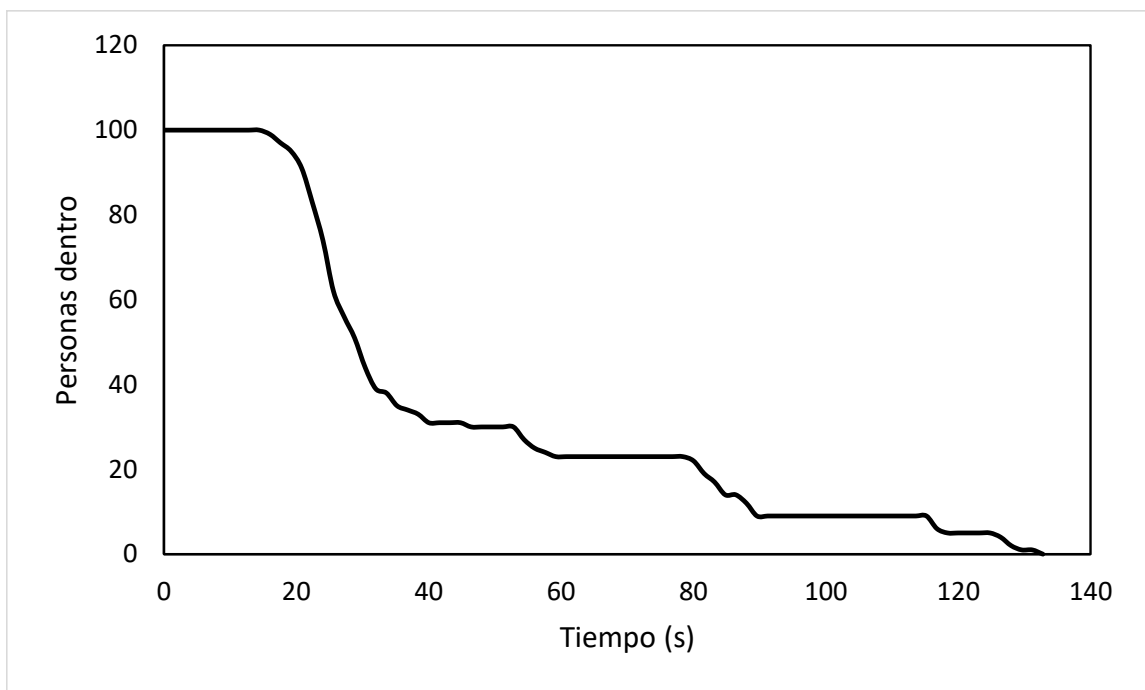


Figura 5.32: Proceso de evacuación de la mina.

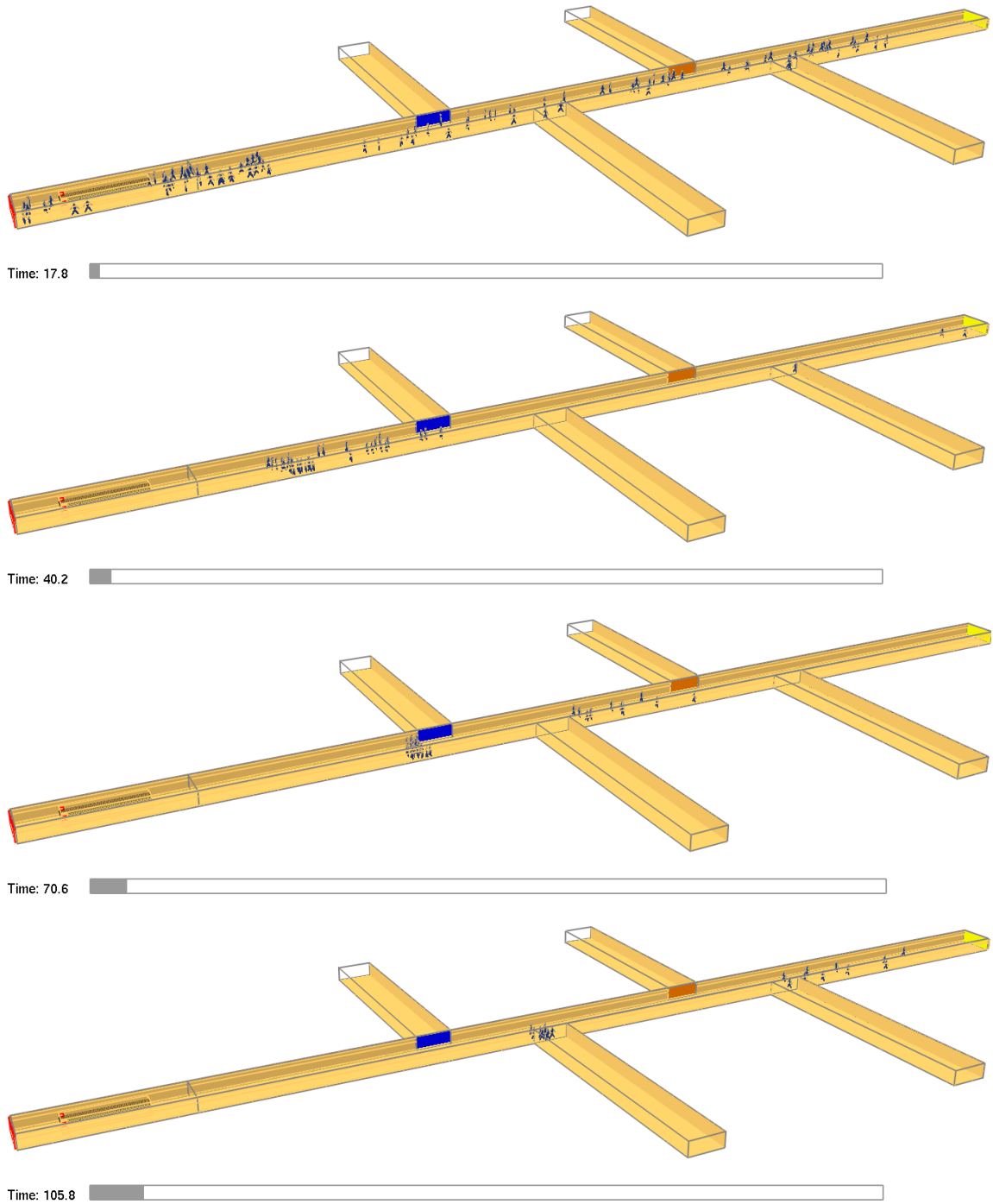


Figura 5.33: Secuencia de evacuación de las personas.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se realizó la simulación numérica de la dispersión de gases contaminantes, en un conjunto de túneles, a partir de una fuente de incendio sólida, los resultados muestran el campo de temperaturas y velocidades, así como la concentración de los gases producto de la combustión y el tiempo de evacuación de mineros.

Las numerosas simulaciones revelan que uno de los principales factores que modifican el movimiento del humo generado durante el incendio es la velocidad del flujo de ventilación; la velocidad del viento tiene influencia sobre una capa de humo que pegada al techo se retorna en dirección contraria al flujo de ventilación, efecto llamado en inglés backlayering. Si la corriente de aire no es lo suficientemente fuerte ante la tasa de calor generado, la capa de humo fluirá en sentido contrario.

El efecto backlayering, provocará que los gases cubran la totalidad de la entrada del túnel, significando la pérdida de una de las principales vías de evacuación del personal dentro de la mina.

La mayor concentración de monóxido de carbono se presenta, cuando la combustión es intensa, en las partes más altas de los túneles subterráneos. No supone algún riesgo para la salud de los mineros, ya que la zona es desalojada en menos de 3 minutos. Según la tabla 5.1 Efectos del monóxido de carbono en la salud, una persona debería estar expuesta a esta concentración de CO (2000 ppm) durante 10 a 20 minutos para presentar síntomas de intoxicación.

Otros factores que influyen en el movimiento del humo son: la cantidad de calor

liberado, el área del incendio, la altura del techo, cada característica de manera individual modifica la cantidad y distribución del humo generado.

A medida que el área incendiada aumenta, la tasa de generación de calor también lo hace, como consecuencia, la producción de humo y gases es mayor y el campo de visión se hace cada vez menor.

Parte importante para la realización de las simulaciones numéricas es la correcta selección del mallado, por lo que es necesario hacer diferentes pruebas para valorar la precisión de los resultados y evitar así mayor costo computacional.

Capítulo 7

Trabajo a futuro

Con las bases para la simulación de incendios en espacios confinados y evacuación de personas, son realmente extensos los posibles casos que se podrían estudiar. Sin duda, los de mayor relevancia son aquellos donde en el entorno existan materiales inflamables y se necesite de rutas de evacuación. Debido a la diversidad de materiales y a los diseños en la construcción, es necesario conocer en cada caso la cantidad de humo y gases tóxicos generados, el rango de temperaturas, entre otros factores, que permitan evaluar la seguridad de cada ruta de evacuación. Con lo que se lograría el objetivo principal de conducir a una persona o a un grupo a través de una ruta suficientemente segura hasta la salida.

En el caso de la minas subterráneas, se hace necesario toda vez que los trabajos de exploración dan como resultados nuevos túneles con diferentes características e ingreso a la mina de equipo con nuevos materiales y tecnologías que podrían ser susceptibles de incendiarse.

Referencias

- [1] Otros Mundos AC. Los accidentes y los mineros muertos. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de <https://otrosmundoschiapas.org/el-escaramujo-27-los-accidentes-y-los-mineros-muertos/>, 2012.
- [2] Vancho Adjiski, Dejan Mirakovski, Zoran Despodov, y Stojance Mijalkovski. Simulation and optimization of evacuation routes in case of fire in underground mines. *Journal of Sustainable Mining*, 14(3):133–143, 2015.
- [3] James R. Amstrong y Raji Menon. *Minas y canteras*, tomo 3, cap. 74. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2001.
- [4] K. Brahim, B. Mourad, E. C. Afif, y B. Ali. Control of smoke flow in a tunnel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 6(1):49–60, 2013.
- [5] Peng Chen, Shilong Guo, y Yong Wang. Human evacuation affected by smoke movement in mine fires. *International Journal of Coal Science & Technology*, 3(1):28–34, 2016.
- [6] Du Cuifeng, Liu Zhiwei, y Guo Qianqian. Numerical simulation of mine fire based on the fds. En *Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*. 2011.
- [7] Cámara Minera de México. Situación de la minería en México 2018. Inf. téc., CAMIMEX, 2018.
- [8] J. C. Edwards y C. C. Hwang. Cfd modeling of fire spread along combustibles in a mine entry. En *2006 SME Annual Meeting and Exhibit*. CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006.

- [9] Chuan Gang Fan, Xu Yan Li, Yan Mu, Fang Yi Guo, y Jie Ji. Smoke movement characteristics under stack effect in a mine laneway fire. *Applied Thermal Engineering*, 110:70 – 79, 2017. ISSN 1359-4311.
- [10] A. D. Gillies, H. W. Hu, y D. Humphreys. Spontaneous combustion and simulation of mine fires and their effects on mine ventilation systems. En *Coal 2005: Coal Operators' Conference*, págs. 225–236. 2005.
- [11] Rickard Hansen. Smoke spread calculations for fires in underground mines. Inf. téc., Mälardalen University, 2010.
- [12] Juan Herrera Herbert y Juan Pedro Gómez Jaén. *Diseño de Explotaciones e Infraestructuras Mineras Subterráneas*. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas., Madrid, España, 2007. URL <http://oa.upm.es/21841/>.
- [13] L.H. Hu, N.K. Fong, L.Z. Yang, W.K. Chow, Y.Z Li, y R. Huo. Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: Fire dynamics simulator comparisons with measured data. *Journal of Hazardous Materials*, 140:293–298, 2007.
- [14] S. E. Jalali y M. Noroozi. Determination of the optimal escape routes of underground mine networks in emergency cases. *Safety Science*, 47:1077–1082, 2009.
- [15] Jie Ji, Zhiyong Wang, Long Ding, Longxing Yu, Zihe Gao, y Huaxian Wan. Effects of ambient pressure on smoke movement and temperature distribution in inclined tunnel fires. *International Journal of Thermal Sciences*, 145:106006, 2019. ISSN 1290-0729. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072919300328>.
- [16] Richard E. Lyon. *Plastics and rubber*, cap. 3. McGraw-Hill, 2004.
- [17] B.F. Magnussen y B.H. Hjertager. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. En *Procee-*

- dings of the Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, pág. 719–729. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1977.
- [18] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Marcos Vanella, Craig Weinschenk, y Kristopher Overholt. *Fire Dynamics Simulator -Technical Reference Guide*, 2017.
- [19] Kevin McGrattan y Stewart Miles. *Modeling Fires Using Computational Dynamics (CFD)*, cap. 32, pág. 1034–1065. Springer-Verlag New York, fifth ed^{ón}., 2016.
- [20] T. J. Orr, L. G. Mallett, y K. A. Margolis. Enhanced fire escape training for mine workers using virtual reality simulation. *Min Eng 2009*, 61(11):41–44, 2009.
- [21] Borja Rengel, Christian Mata, Elsa Pastor, Joaquim Casal, y Eulàlia Planas. A priori validation of cfd modelling of hydrocarbon pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56:18 – 31, 2018. ISSN 0950-4230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423017310975>.
- [22] Daniel Restrepo Echeverri, Sergio Hernán Ríos Cano, y Jovani Alberto Jiménez Builes. Detección y control de atmósferas explosivas en minas subterráneas de carbón usando programación estructurada. *Revista Educación en Ingeniería*, 7(14):10–21, 2012.
- [23] Noah L. Ryder, Jason A. Sutula, Christopher F. Schemel, Andrew J. Hamer, y Vincent Van Brunt. Consequence modeling using the fire dynamics simulator. *Journal of Hazardous Materials*, 115:149–154, 2004.
- [24] Fang Tingyong, Xu Jun, Yu Jufen, y Wu Bangben. Study of building fire evacuation based on continuous model of FDS & Evac. En *Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*. 2011.
- [25] Engineering ToolBox. Carbon monoxide and health effects. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-monoxide-d_893.html, 2005.

-
- [26] El universal. Cronología accidentes en minas en México. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de <https://archivo.eluniversal.com.mx/notas/862596.html>, 2012.
- [27] Kai Wang, Shuguang Jiang, Xiaoping Ma, Zhengyan Wu, Hao Shao, Weiqing Zhang, y Chuanbo Cui. Information fusion of plume control and personnel escape during the emergency rescue of external-caused fire in a coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*, 103:46 – 59, 2016. ISSN 0957-5820. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.026>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582016301136>.
- [28] Liming Yuan, Richard J. Mainiero, James H. Rowland, Richard A. Thomas, y Alex C. Smith. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 30:55–62, 2014.
- [29] Liming Yuan, Lihong Zhou, y Alex C. Smith. Modeling carbon monoxide spread in underground mine fires. *Applied Thermal Engineering*, 100:1319–1326, 2016.