



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Simulación numérica de incendios y evacuación de
personas en sistemas de transporte subterráneos

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

Ingeniero Mecánico

PRESENTA:

Victor Hugo Huitrón Rodríguez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Rubén Ávila Rodríguez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



A mi familia, que me ha apoyado a lo largo de todo este tiempo y me alienta a seguir mis sueños.

A los amigos que conocí a lo largo de mis estudios en la licenciatura, pasé momentos inolvidables.

A Laura, por estar conmigo en mis peores momentos y animarme a salir adelante.

A Lizet, por ayudarme a salir de mis peores momentos, por darme un nuevo significado a mi vida.

Gracias, maestra de la vida.

A Ariadna, Kenia, Gustavo, Alberto y Jesús, por ser mis más grandes amigos y porque, gracias a ustedes, tengo la motivación para salir adelante, para vivir cada día como si fuera el último...

Resumen

El sistema de transporte subterráneo, STS, es el medio de transporte más utilizado a nivel mundial, dado que es capaz de transportar grandes distancias a millones de usuarios en periodos muy cortos de tiempo, además que reduce significativamente la congestión vehicular y, por ende, la contaminación que éstos producen. Sin embargo, como cualquier otro medio de transporte, el sistema de transporte subterráneo no está exento de accidentes, y aunque estos se producen en menor medida, debido al limitado espacio en el que éste transporte se moviliza, un accidente generalmente conduce a un severo desastre. El fuego es el mayor problema que se puede suscitar durante un accidente en el metro, ya que, el reducido espacio que existe en los túneles y en las estaciones, provocan que los humos generados por el incendio se dispersen rápidamente por el entorno, y, además, su propagación coincida con las rutas de evacuación del usuario, reduciendo la visibilidad y causando muertes por asfixia y/o intoxicación. En esta tesis se presenta un análisis de un incendio y la evacuación de una estación de metro de la Ciudad de México, que carece de ventilación, mediante el uso del programa Fire Dynamics Simulator (FDS versión 6.6), que es un software de simulación CFD que analiza la generación y dispersión de humos a partir de un incendio.

Índice general

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
1. Introducción	1
1.1. Accidentes del sistema de transporte subterráneo (STS) a lo largo de la historia	2
1.1.1. King's Cross, Londres, 1987	2
1.1.2. Baku, Azerbaijan, 1995	4
1.1.3. Kaprun, Austria, 2000	5
1.1.4. Daegu, Corea del Sur 2003	7
1.2. Estado del arte	8
1.2.1. Planteamiento del Problema	8
1.2.2. Metodología analítica	9
1.2.3. Metodología experimental	10
1.2.4. Metodología numérica	12
2. Modelo físico	15
2.1. El Metro de la Ciudad de México	15
2.2. Descripción del modelo	17
3. Modelo matemático	21
3.1. Ecuación de continuidad	21
3.2. Ecuación de momentum	24
3.3. Ecuación de la energía	27
3.4. Ecuación de especies	32
3.5. Movimiento de los agentes	32
3.6. Números adimensionales	33
4. Modelo numérico	35
4.1. Simulación LES	35
4.2. Modelo de turbulencia a escala de submalla	36
4.3. Suposición del número bajo de mach	36
4.4. La ecuación de la energía y masa	37

ÍNDICE GENERAL

4.5. La ecuación de momentum	38
4.6. La ecuación de Poisson	39
5. Resultados	41
5.1. Modelo de verificación	41
5.1.1. Comparación de resultados	42
5.1.1.1. Caso 1	42
5.1.1.2. Caso 2	43
5.2. Estudio del caso de la estación de metro modelada	46
5.2.1. Visibilidad en la estación: Anden	46
5.2.2. Visibilidad en la estación: Vestíbulo	48
5.2.3. Temperatura en la estación	50
5.2.4. Evacuación en la estación: Anden	52
5.2.5. Evacuación en la estación: Vestíbulo	54
6. Conclusiones	57
7. Trabajo a futuro	59
8. Apéndice	61
8.1. Teorema de la divergencia de Gauss	61
8.2. Derivada material/total	61
8.3. Teorema de Leibinz y el teorema de transporte de Reynolds	62
Bibliografía	65

Índice de figuras

2.1. Vista superior del vestíbulo.	18
2.2. Vista superior del andén.	18
2.3. Vista lateral de la estación.	18
5.1. Vista superior del andén.	42
5.2. Caso 1. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS5 (Meng et al., 2014)	42
5.3. Caso 1. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6	42
5.4. Caso 1. Temperatura obtenida en la estación del metro para $t = 360[s]$ (Meng et al., 2014).	43
5.5. Caso1. Temperatura obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6	43
5.6. Caso 2. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ (Meng et al., 2014)	43
5.7. Caso 2. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utilizan los parámetros de gasto volumétrico descritos en el artículo.	44
5.8. Caso 2. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utiliza el 25 % del gasto volumétrico que se describe en el artículo.	44
5.9. Caso 2. Temperatura obtenida en la estación del metro para $t = 360[s]$ (Meng et al., 2014).	44
5.10. Caso 2. Temperatura obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utilizan los parámetros de gasto volumétrico descritos en el artículo.	45
5.11. Temperatura obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utiliza el 25 % del gasto volumétrico que se describe en el artículo.	45

Índice de tablas

2.1. Propiedades de los materiales empleados en la simulación	19
---	----

Introducción

En 1863, con la inauguración del “Metropolitan Railway” en Londres, Inglaterra, se marcó el inicio del transporte subterráneo, que se le abrevió con la palabra Metro, término que se utiliza actualmente en algunas partes de Hispanoamérica en especial donde se utiliza tecnología francesa y “subte” para abreviar la palabra subterráneo. Los trenes utilizados en la primera línea del Metro en el mundo utilizaban locomotoras a vapor como carro guía, donde era necesario disponer de numerosos huecos de ventilación para la salida del vapor. La creación de locomotoras eléctricas permitió construir túneles mucho más profundos en comparación con la técnica del muro pantalla, utilizada hasta ese momento. Con el paso del tiempo, mejoraron las técnicas para la construcción de túneles a gran profundidad con la excavación de túneles en forma de tubo y se electrificaron las líneas. Hoy en día, con la prosperidad y el crecimiento demográfico del orbe, el sistema de transporte subterráneo se ha expandido por todo el mundo, formando una parte fundamental en los sistemas de transporte de muchas grandes ciudades del planeta, abarcando kilómetros de recorrido en túneles. De acuerdo a (Edelman, 2009), los metros de Shanghai, Beijing y Guangzhou han ido creciendo en un rango de 30-50 km por año. Una gran ventaja que ofrecen los metros, es que es el medio de transporte más seguro del mundo ya que son muy raros los casos de muertes por siniestro en este tipo de transportes, logrando identificar los riesgos de posibles precursores de accidentes (Kyriakidis et al., 2012).

Grandes ciudades dependen (enormemente) de los Sistemas de transporte metro ya que no sólo reducen la congestión del tránsito y la contaminación que éstos produce (como lo es la ciudad de Shanghai, en donde en los últimos años han incrementado el recorrido de sus trenes); además de que transportan a millones de usuarios a diario, (como lo es la Ciudad de México, que forma parte de la zona metropolitana del valle de México, una de las ciudades con mayor densidad de población que hay en el mundo); además de que posee una gran efectividad, en un espacio reducido puede efectuar grandes recorridos en poco tiempo. Sin embargo, debido al limitado espacio en el que realiza los recorridos, sumando la cantidad de pasajeros que puede transportar un tren en horas pico, un accidente que involucre un incendio generalmente conduce a un severo desastre (Zhang et al., 2015).

1.1. Accidentes del sistema de transporte subterráneo (STS) a lo largo de la historia

1.1.1. King's Cross, Londres, 1987

El 18 de noviembre de 1987, un incendio se presentó en una de las escaleras en la estación King Cross en Londres. Hasta esa fecha, el fuego sólo había matado a una persona en el metro de Londres desde la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, un incendio grave en la estación de Oxford Circus en noviembre de 1984 provocó un informe independiente para criticar las nulas precauciones acerca de una evacuación por incendio, concluyendo que "la suerte tiene la costumbre de agotarse". A las 19:45 del miércoles, 18 de noviembre de 1987, la suerte del metro de Londres se agotó, siendo el peor incendio de la historia del metro de Londres, 31 personas murieron y otras más resultaron con heridas graves. A pesar de que el incendio no ocurrió en uno de los trenes, o túneles, el desastre es muy llamativo debido a las investigaciones realizadas posteriormente. Una de ellas, detallada por Donald y Canter (1990) analiza el comportamiento de los evacuados, tanto los que sobrevivieron como los que murieron.

El sistema de transporte subterráneo (STS) llegó a King's Cross en 1863 cuando el "Metropolitan Railway" fue inaugurado para realizar un recorrido entre Farringdon y Paddington, ligando a "Great Northern Railway" en King's Cross, el "London and North Western" en Euston y el "Great Western" en Paddington. La estación de King's Cross es una de las más concurridas y complejas de la red de metro de Londres. En 1987, un promedio de 250 mil pasajeros era transportado todos los días de la semana. La estación King's Cross es única en ser construida en cinco niveles diferentes bajo tierra y está conectada por pasillos, escaleras y escaleras mecánicas hechas de madera, instaladas en 1911. Cabe destacar que unos años antes de este hecho, en 1903, hubo un intenso incendio en una estación de Metro de París en la que murieron 83 personas. En un informe sobre este incendio, la Junta de Comercio recomendó que se eliminara la madera de las estaciones subterráneas. Los trenes se conducían de manera convencional y estaban equipados con radio y un sistema de dirección, aunque no había guardia. El área de importancia en la noche del desastre fue el Tube Lines Ticket Hall. Hay dos conjuntos de escaleras mecánicas que unen la sala de boletos con las líneas del metro, uno que sirve las líneas Northern y Piccadilly (donde el fuego comenzó), y el otro que sirve la línea Victoria. En la misma sala de boletos, unos muros temporales se había colocado a través del lado derecho de dicha sala mirando a la calle de la escalera mecánica Piccadilly. Esto era para ocultar de la vista pública a los obreros que estaban construyendo una nueva sala de operaciones de la estación. Los muros temporales habían sido pintados con pintura aprobada, pero también cubrió de vista y al acceso la única manguera contra incendios en la zona de pasillo de la entrada.

Fue a través de este sistema que la gente evacuó. No se encontraron informes de evacuación de personas a través de los túneles. El incendio se inició en una de las escaleras mecánicas que conducían a la línea Piccadilly, a diez metros por debajo de la sala principal de entradas. Una investigación del incendio mostró que un fósforo encendido es la causa más probable del incendio. Se cree que el evento inició encendiendo una mezcla de grasa y detritus debajo de la escalera mecánica (Fennell, 1988). El humo producido en la escalera mecánica se desplazó

gradualmente hasta el vestíbulo principal, el cual fue envuelto en llamas (Canter and Donald, 1990; Fennell, 1988; Persson, 1989).

La magnitud del desastre puede estar vinculada a una combinación de factores organizacionales que fallan. La primera persona que respondió al fuego fue un miembro del personal. Fue a inspeccionar el fuego después de que una alarma fue accionada por uno de los pasajeros. Sin embargo, esta persona no estaba familiarizado con la estación y no había recibido ningún entrenamiento de fuego. Además, no informó ni al director de estación ni al controlador de línea. Además, en el momento del desastre, el metro de Londres no tenía un plan de evacuación (Fennell, 1988).

Una de las conclusiones más interesantes de Canter and Donald (1990), fue que las personas en la estación de King's Cross mantuvieron comportamiento habitual durante el incendio, que no cambió hasta que recibieron suficientes señales sobre el fuego, instrucciones muy claras de las personas que representaban una autoridad o hasta que la evidencia del fuego se hizo tan evidente que un gran cambio en su comportamiento era necesario para la supervivencia. Por ejemplo, muchos pasajeros notaron que el humo salía de la escalera mecánica mientras entraban en la estación, pero a pesar de esto continuaron viajando hasta las líneas del metro. Otra conclusión radica en la respuesta de las personas a las instrucciones subterráneas del personal. (Canter and Donald, 1990). En contraste, cuando la policía comenzó a tomar el control de la evacuación, las personas respondieron a un grado mucho mayor. Además, (Fennell, 1988; Fridolf, 2010) informa que el sistema de sonorización no se utilizó durante el incendio para informar a la gente de la evacuación. No se ha encontrado información sobre si se usó o no una campana de alarma contra incendios. Canter and Donald (1990); Fridolf (2010), también han observado el hecho de que el personal perdió tiempo valioso realizando investigaciones innecesarias acerca del incendio. Las investigaciones fueron llevadas a cabo primero por el personal subalterno, que entonces llamó a personal superior que investigó el fuego y así sucesivamente. Cuatro grupos diferentes adoptaron este tipo de comportamiento antes de tomar las acciones apropiadas. Durante el incendio en la estación de King's Cross, los trenes continuaron circulando por las vías subterráneas, aunque se instruyó a los conductores para que no se detuvieran en la estación de King's Cross (Fennell, 1988). Sin embargo, algunos trenes hicieron parada en la estación y esto dio como resultado a que gente descendiera del convoy. Después del destello de la principal sala de trenes, los trenes continuaron deteniéndose en la estación de King's Cross, pero ahora con el propósito de evacuar a personas atrapadas de la Línea Victoria (Fennell, 1988). Los bomberos llegaron a la estación de King's Cross unos 15 minutos después del primer informe del incendio. Mientras se preparaban para la operación de control del incendio, la sala de boletos acabó envuelta en llamas, por lo que su objetivo principal pasó de combatir el fuego a ayudar a evacuar a los pasajeros que todavía salían de la estación. Después de más de dos horas informaron haber controlado el incendio y después de cuatro horas el fuego se apagó (Fennell, 1988; Persson, 1989).

La investigación científica descubrió un fenómeno previamente desconocido llamado *“el efecto de la zanja”* (trench fire effect en inglés). Esto fue descubierto después de que el modelo numérico del fuego se llevó a cabo usando un programa informático para el análisis del flujo de fluidos. A continuación, se realizaron pruebas de escala para confirmar los resultados del modelo realizado en computadora. El efecto de la zanja se produjo porque el fuego ardía

1. INTRODUCCIÓN

sobre una superficie inclinada, rodeada por el suelo y los dos lados de la escalera mecánica, todos ellos contruidos con material inflamable, formando una zanja. Una vez que el fuego se desarrolló, las llamas se extendieron a una tasa aproximadamente exponencialmente creciente por el eje de la escalera mecánica, ya que la madera fue precalentada a la temperatura de ignición (McNulty and Rielly, 1992).

1.1.2. Baku, Azerbaijan, 1995

El 28 de octubre de 1995, la peor tragedia del Metro de la historia mundial tuvo lugar en Baku cuando un fallo eléctrico causó un incendio en el cuarto vagón de cinco coches e hizo que el tren se detuviera entre dos estaciones, Uldus y Narimanov, 200 metros después de dejar la estación de Uldus, posteriormente generando un incendio en la hora punta del sábado por la noche. Para la mayoría de las 300 víctimas, la muerte fue rápida. Los humos mortales del envenenamiento del monóxido de carbono de los materiales sintéticos ardientes en los vagones los intoxicaron en cuestión de minutos (ya que el 90 % de los vagones estaban fabricados con materiales que son propensos a emitir vapores nocivos si se incendian).

El Metro, abrió sus puertas en 1967, sirviendo 18 estaciones en 29 kilómetros (18 millas).

Según expertos suecos que investigaron el accidente del metro, el fuego comenzó accidentalmente de una chispa eléctrica en el cableado cerca de engranajes debajo de uno de los coches. El tren afectado, que consistía en cinco coches completamente cargados, acababa de salir de la estación de Ulduz para Nariman Narimano. Los pasajeros del quinto vagón percibieron con el olfato el humo. Más tarde, los pasajeros del vagón 4 observaron humo blanco, que pronto se volvió negro y causó irritación. Exactamente lo que inició la evacuación no está claro, pero como el tren se detuvo el humo pronto comenzó a llenar el túnel y al mismo tiempo los pasajeros iniciaron la evacuación. El conductor del tren notó que había algo mal, salió y usó uno de los teléfonos del túnel para contactar con el centro de información de tráfico. El conductor pidió a los operadores que cortaran el suministro de electricidad en los vagones en los que aún se suministraba electricidad (Fridolf, 2010).

Las emisiones letales de monóxido de carbono de los materiales sintéticos ardientes del convoy afectaron rápidamente a los pasajeros. Debido a las dificultades para abrir las puertas en uno de los coches, los pasajeros se vieron obligados a evacuar a través de otro vagón. Al desactivar el suministro eléctrico, los abrepuertas de emergencia no habrían funcionado de todos modos. La única manera de abrir las puertas era deslizarlas con la energía manual, un procedimiento complicado cuando la gente está apoyada contra las puertas. En cambio, las ventanas se rompieron para proporcionar salidas. Desafortunadamente, esto permitió que el humo viajara por los vagones. El conductor del tren ayudó a la evacuación abriendo las puertas en el frente y el final del tren, haciéndolo más fácil viajar de la parte posterior del tren al frente. Los pasajeros que lograron salir de los vagones tenían inicialmente la opción de evacuar de nuevo a Uldus (200 metros) o en la dirección del tren a Narimanov (2000 metros). Pero a medida que el fuego crecía, la opción de evacuar a Uldus disminuyó (Carvel and Marlair, 2005; Fridolf, 2010).

La evacuación no sólo fue impedida por el humo tóxico, que hizo difícil respirar, sino también por la reducción de la iluminación en el túnel y por una zanja que corría entre los rieles. El humo producido por el fuego efectivamente cubrió estas bombillas, reduciendo así la visibilidad (Fridolf, 2010). La zanja que corría entre los rieles hacía difícil caminar por las vías, lo que obligaba a los pasajeros a viajar cerca de la pared del túnel, cogiendo cables a lo largo de la pared. Varias personas fueron electrocutadas mientras trataban de agarrar los cables con el fin de escapar del tren ardiente.

Inicialmente las condiciones de ventilación tendían a mover el humo lentamente hacia la parte trasera del tren, hacia Uldus. Pero unos 15 minutos después de que el tren se detuvo, el sistema de ventilación cambió a modo de escape y gran parte del humo se extrajo en la dirección hacia Narimanov, lo que impidió aún más las condiciones para los evacuados (Carvel and Marlair, 2005; Fridolf, 2010). La mayoría de los fallecidos (incluidos 28 niños) murieron dentro del tren sin salir nunca. Los sobrevivientes recordaron las chispas que volaban de los cables de alto voltaje justo después de que el tren abandonara la estación de Ulduz. Uno de los pasajeros, Tabil Huseynov, de 45 años, describió la situación de la siguiente manera: "Tan pronto como el tren entró en el túnel, vi un destello, luego las llamas envolvieron al vagón de tren. La gente empezó a romper ventanas para salir, empezábamos a sofocarnos. "

El crecimiento rápido del fuego jugó su papel, pero lo más contundente fue la inhabilidad de abrir las puertas del tren lo que afectó el resultado. Los pasajeros evacuando a Narimanov no recibieron ningún tratamiento médico cuando llegaron a la estación porque todos los bomberos estaban en Uldus. Además, parece que la información del personal del tren hacia los pasajeros era más o menos inexistente (Fridolf, 2010; Rohlen and Wahlström, 1996).

La comisión de investigación gubernamental concluyó que el incendio fue causado por una falla eléctrica. No se encontraron explosivos. Sin embargo, dos misteriosos grandes agujeros en el costado de uno de los vagones fueron localizados. y la televisión nacional azerí citó a expertos que dijeron que los agujeros indicaban el uso de un artefacto explosivo. El Tribunal Supremo de Azerbaiyán condenó al operador del metro y el operador del control de tráfico por negligencia criminal.(Encyclopedia, 1995)

1.1.3. Kaprun, Austria, 2000

El sábado 11 de noviembre de 2000 se produjo un incendio dentro del tren subterráneo que conduce a la zona de esquí de alta montaña en el glaciar de Kitzsteinhorn, en Kaprun, Austria. El desastre cobró la vida de 155 personas y sólo doce de los pasajeros de los vagones de tren sobrevivieron. El fuego comenzó en un ventilador de aire caliente colocado en la parte trasera del tren debido al sobrecalentamiento y, finalmente, se extendió al resto del tren. Debido al incendio, el tren se detuvo a 600 metros del túnel (Bergqvist, 2001; Larsson, 2004; Fridolf, 2010; Meyer, 2001).

El tren en Kaprun fue utilizado para transportar esquiadores a la tapa de Kitzsteinhorn, una montaña en el condado de Salzburg. Para llegar a la cima, un tren de 30 metros de largo tuvo que recorrer 3,9 kilómetros, pasando por un túnel ascendente de 3,3 kilómetros de largo

1. INTRODUCCIÓN

con un gradiente de 45° (Larsson, 2004; Fridolf, 2010). El tren no tenía motor, por lo que supuestamente no había objetos inflamables en el túnel. Así, el tren y el túnel se consideraron a prueba de fuego, por lo que el túnel no tenía ninguna salida apropiada del fuego y el tren no estaba equipado con salidas de emergencia o equipo de combate contra incendios. Asimismo, el personal del tren no había sido entrenado para este tipo de situación; habían recibido capacitación para otros tipos de accidentes, pero no para un incendio en un túnel. Sin embargo, las investigaciones que se llevaron a cabo después mostraron que un material de fibra de vidrio mejorado que forma parte en la construcción del tren en combinación con el aceite hidráulico alimentó el fuego. También se cree que la ropa y equipo de esquí del los pasajeros pudieron haber contribuido a la carga de fuego (Bergqvist, 2001; Larsson, 2004; Channel, 2004; Fridolf, 2010). Dos trenes ocupaban la pista al mismo tiempo; un tren que sube de la estación del valle y un tren que desciende de la estación superior. Los trenes estaban atados con un cable y eran operados desde las estaciones. Dentro del túnel había un pasaje para que los trenes pasaran uno al otro. En este pasaje se ubicó un túnel de emergencia de 600 metros de largo, perpendicular al túnel principal. Era el tren que ascendía de la estación del valle el que inicio el incendio y se detuvo. No había ningún conductor de tren a bordo de los trenes, sin embargo, un asistente en la parte delantera del tren controlaba las puertas (Bergqvist, 2001; Larsson, 2004; Channel, 2004; Fridolf, 2010). El humo generado por el fuego se extendió rápidamente. El escarpado túnel actuaba como una chimenea gigante, aspirando el aire desde el fondo y enviando humo tóxico.

Dentro del tren que viajaba de regreso que se encontraba en la estación superior, viajaban dos personas: un pasajero y el encargado del tren. Este tren también se detuvo en el túnel debido a un cable que conectaba al otro tren. No pasó mucho tiempo hasta que el humo llegó a ellos y no tenían ninguna posibilidad de sobrevivir. El humo continuó hasta la estación superior donde empezó a llenar el edificio. Cinco trabajadores lograron escapar de la estación antes de que se llenara de humo tóxico (Larsson, 2004; Fridolf, 2010).

Apenas unos minutos después de que se hubiera enviado la alarma de incendio, las primeras fuerzas de rescate llegaron a Kaprun. Tuvieron dificultades para evaluar la situación ya que el fuego estaba a 600 metros dentro del túnel. El humo era espeso y el calor era extremadamente intenso. La necesidad de más equipos de rescate se consideró necesaria, y pronto hubo cientos de bomberos, socorristas de montaña, personal del ejército, médicos, trabajadores de la Cruz Roja y voluntarios en el lugar. Se desarrolló una gran organización de crisis. Un equipo formado por tres bomberos con equipo de protección especial investigó la estación del valle y la estación superior; allí encontraron a cuatro personas. Lamentablemente, sólo uno estaba vivo cuando los trabajadores de rescate llegaron a ellos. La esperanza por encontrar supervivientes se desvaneció ya que tuvieron que pasar casi tres horas antes de que un equipo pudiera entrar en el túnel y llegar al tren incendiado. Esta fue una operación muy peligrosa, ya que el humo y el calor seguían siendo muy intensos. (Fridolf, 2010; Meyer, 2001).

La magnitud del desastre puede estar ligada a una combinación de deficiencias. La incapacidad de los pasajeros para entrar en contacto con el conductor del tren, así como la ausencia de salidas de emergencia. Pero la falta de instalaciones técnicas también tuvo un impacto en el resultado. Por ejemplo, no había señales de emergencia dentro de los túneles para dirigir a los pasajeros de evacuación, y no se dieron instrucciones a los pasajeros (Larsson, 2004; Fridolf,

2010; Beale, 2001). Los trenes disponían de algunos aparatos de incendio, sin embargo, éstos se encontraban en las cabinas de los auxiliares de tren y, por lo tanto, no estaban disponibles para los pasajeros que viajaban (Larsson, 2004; Fridolf, 2010). Además, el hecho de que nadie haya considerado un incendio dentro del túnel es probable que haya contribuido al desastroso resultado.

La falta de preparación para un incendio de túnel hizo el trabajo de rescate extremadamente difícil. La percepción de ser invulnerable puede ser muy peligrosa, ya que puede contribuir a resistir información y opiniones contradictorias. Larsson (2004) llama a este tipo de falsa seguridad el “síndrome del Titanic” en su informe. El Titanic era supuestamente insumergible, y el ferrocarril de montaña en Kaprun era supuestamente ignífugo. No fue el primer incendio del túnel en la región, y por lo tanto el peligro era bien conocido. El accidente del túnel de Tauern un año antes podría haber sido una advertencia, sobre todo porque había ocurrido en el mismo país.

1.1.4. Daegu, Corea del Sur 2003

Un tren fue incendiado con dos litros de gasolina en la estación de metro de Jungangno en Daegu, Corea del Sur el 18 de febrero de 2003. El incendiario usó dos paquetes de leche llenos de un líquido inflamable (presumiblemente gasolina) para incendiar el tren, y no pasó mucho tiempo hasta que el tren entero fue envuelto en llamas. El fuego se extendió en el aislamiento entre las capas de aluminio que forman la carcasa de los coches, en el material de vinilo y plástico en los cojines de los asientos y en la alfombra de plástico en los suelos, ninguno de los cuales era ignífugo. El incendio provocó la muerte de al menos 192 personas e hirió a unas 148 personas (Carvel and Marlair, 2005; Kirk, 2003). La línea 1 del metro de Daegu fué abierta en mayo de 1998, era 25.9km de la extensión total y conectado de la estación de Jin-cheon a la estación de Dae-gok. El incendio se inició en el tren que funcionaba desde la estación Jin-Cheon hasta la estación An-shim. Muchos de los pasajeros en el tren en llamas lograron escapar junto con el autor de incendio (Hwa, 2004; Tsujimoto, 2003). Sin embargo, un segundo tren que se dirigía en la dirección opuesta fue detenido en la estación de Jungangno y el fuego se expandió hacia ese tren ya que un detector automático de incendios detectó el incendio y apagó la electricidad evitando que saliera de la estación. El daño humano causado por el incendio fue de 440 personas, de las cuales 192 eran de los muertos, 148 de los heridos. Sin la electricidad, las puertas no podían abrirse con los abridores de emergencia, lo que efectivamente atrapó a los pasajeros en donde la mayoría de las víctimas fueron a causa de los humos tóxicos y el humo creado por los cojines de plástico de vinilo (News, 2003; Carvel and Marlair, 2005; Kirk, 2003).

La magnitud del desastre se vinculó más tarde con una combinación de señales de emergencia defectuosas, malas comunicaciones malas evaluaciones y malas reacciones por parte del personal del metro que había recibido poca o ninguna capacitación sobre cómo lidiar con la situación (Palma, 2003). De acuerdo con el director de un equipo de bomberos de emergencia la sala de control se encontraba apagada, dando a la imposibilidad de apagar las llamas.(Kirk, 2003)

1.2. Metodologías usadas para modelar incendios y evacuación de personas en STS

1.2.1. Planteamiento del Problema

El humo es el mayor riesgo que se puede presentar durante un incendio en el sistema de transporte subterráneo debido a la coincidencia con la dirección de evacuación. En caso de un incendio generado en un vagón de un metro, es muy probable que grandes cantidades de humo se disperse rápidamente a toda la estación del metro debido al confinamiento de la pared del túnel. Además, la trayectoria de propagación del humo por lo general coincide con el camino de evacuación del pasajero, reduciendo la visibilidad y causando muertes por asfixia (Roh et al., 2009).

El control del humo y la conservación de las rutas de evacuación durante un incendio en el sistema de transporte subterráneo son cuestiones importantes para su modelación, análisis y diseño. En las estaciones de metro, las rutas de evacuación corresponden a los accesos a la estación. Los operadores del transporte subterráneo utilizan sistemas de control de humo manteniendo una óptima ventilación. Para alcanzar esta meta es necesario realizar una investigación extensa. Es difícil saber si un plan de respuesta de emergencia es factible o no, y no se puede aplicar por completo utilizando los protocolos de emergencia convencionales. En escala real la prueba puede realizarse en túneles y estaciones de metro para generar retroalimentación útil (Hu et al., 2009; Pan et al., 2011; Simcox et al., 1992; Casalé et al., 2006). Sin embargo, esto induciría a grandes costos que van dirigidos a la implementación de instrumentales, y que, no puede hacerse sin interrumpir el funcionamiento del transporte. Incluso es muy difícil implementar ejercicios de emergencia en una estación de metro o en un túnel ya que la realización de estos eventos afectaría de manera grave la movilidad de las personas. El desempeño del plan de emergencia difícilmente puede ser evaluado antes de su aplicación (Couton and Plourde, 2017).

El manejo de una emergencia en el metro juega un rol importante en la respuesta inmediata, en el control y reducción de accidentes en este tipo de transportes. Debido al singular diseño estructural del transporte subterráneo, los accidentes que involucran un incendio normalmente sus consecuencias terminan siendo muy serias, planteando una amenaza grave para la seguridad de los pasajeros y la infraestructura. Una emergencia de incendio en el sistema de transporte subterráneo es una situación que compromete la salud, la integridad e incluso la vida de los usuarios (Zeng et al., 2013; Liu et al., 2015). Una emergencia es una serie de procesos ejecutados linealmente que responde de acuerdo a la gravedad del evento. Sin embargo, la gran aleatoriedad que presenta un accidente, compromete en gran medida la predicción del tiempo, el lugar, la intensidad, la gravedad del daño en la emergencia (Lu et al., 2013) y el tiempo de evacuación, provocando una situación de alta incertidumbre. El modelado y el análisis a los procesos de respuesta de una emergencia de incendio en el transporte subterráneo son muy importantes en las operaciones del metro. La seguridad de un sistema de transporte subterráneo está directamente relacionada con un saludable desarrollo y estabilidad de una gran ciudad (Li et al., 2016).

1.2.2. Metodología analítica

Qiming Li realiza modelados y análisis en los procesos de respuesta de emergencia de incendios en el metro con el fin de localizar vulnerabilidades y/o conflictos en dichos procesos, optimizando los tiempos de reacción en respuesta a la emergencia.

Li et al. (2016) proponen un modelado y análisis para un proceso de respuesta a emergencias de incendios en el metro basado en la red Petri, para modelar y analizar los problemas de tiempo y recursos de los procesos de respuesta a emergencias de incendios en el metro, proponiendo métodos de detección de conflictos de recursos junto con los algoritmos correspondientes para detectar posibles conflictos de recursos; y un criterio que constituye la estrategia de prioridad de tarea clave y la estrategia de prioridad de espera-corta para resolver los conflictos de recursos detectados y optimizar todo el tiempo de ejecución del proceso. El modelado se utilizó para simular y capacitar un plan de respuesta de emergencia para detectar posibles conflictos en tiempo, secuencia y recursos, antes de su aplicación real. La eliminación de emergencias contra incendios es uno de los problemas más desafiantes para los gerentes de metro y los funcionarios políticos. Si un plan de respuesta a emergencias pudiera simularse y capacitarse utilizando el enfoque propuesto una vez que se estableció por primera vez, los posibles conflictos en el tiempo, la secuencia y los recursos se pueden identificar a tiempo. Luego, podrían mejorar el plan de respuesta de emergencia para reducir o eliminar estas vulnerabilidades.

Las principales contribuciones de este documento se pueden resumir en varios aspectos: introducen una definición de un tipo de proceso de respuesta de emergencia ante incendios en el metro; proponen métodos de detección de conflictos de recursos junto con algoritmos para detectar posibles conflictos de recursos; propone un criterio de prioridad que incluye la estrategia de prioridad de tarea clave y la estrategia de prioridad de espera-corta para resolver los conflictos detectados y optimizar el tiempo de ejecución del proceso.

Para Li et al. (2017), un accidente en el metro puede considerarse como una propiedad emergente que surge de las interacciones inusuales de los componentes del sistema. Estas interacciones pueden dar lugar al fenómeno en el que varios peligros interrelacionados surgen simultáneamente en un solo accidente. Comprender estas interrelaciones entre los peligros es indispensable para estudiar la seguridad de la operación del metro. Desde este punto de vista, identificaron 28 peligros y 48 interrelaciones entre los peligros a partir de 134 accidentes y entrevistas de expertos, que fueron la base de la creación de la red de riesgo de operación del metro (MOHN). Por medio de la teoría de redes complejas, se aplicaron siete parámetros para revelar aún más las propiedades estructurales de MOHN. Como consecuencia, al comparar con enfocarse en el peligro simple, prestar suficiente atención a los riesgos secundarios y derivados sería la mejor contramedida para reducir o incluso eliminar la pérdida de accidentes. En aras de la claridad y la simplicidad, las posibles interacciones de los accidentes no observados, así como los pesos de las interacciones, no se toman en consideración en este documento, que podría afectar la propiedad topológica de MOHN.

Zhang et al. (2015) presentan una base de datos de incidentes de operaciones de metro (MOID) adaptable que contiene todos los incidentes ocurridos en la operación de metro, utilizando el software Microsoft Access 2010. En base a MOID, descubrieron características en las

1. INTRODUCCIÓN

estadísticas del incidente, como los tipos, las causas, el tiempo y la gravedad, y se identifican 24 precursores de accidentes en el metro de Shanghai. Se demuestra cómo el MOID se puede utilizar para identificar tendencias en los incidentes que se han producido y para anticipar y prevenir futuros accidentes. Con el fin de promover la aplicación de MOID, proponen una estructura organizacional a partir de los cuatro aspectos de supervisión, investigación, implementación y fabricante. Esta investigación es conducente al análisis de riesgos de seguridad en la identificación de precursores relevantes en la gestión de la seguridad operacional y la evaluación del nivel de seguridad como una herramienta cualitativa. Kyriakidis et al. (2012) propuso un modelo de madurez de seguridad para abordar la cultura conductual y actitudinal, los elementos técnicos y metodológicos, y los logros reales de acuerdo con los resultados de seguridad. Yan et al. (2012), por ejemplo, usan el Análisis de involucrimiento de datos (DEA) para evaluar el riesgo de ser aplastado por multitudes y pisotear accidentes de acuerdo con las características de riesgo involucradas.

Zhang and Hu (2014), presentan un modelo de mantenimiento multiobjetivo de rentabilidad, con el objetivo de optimizar la estrategia de mantenimiento de los vehículos metropolitanos, ya que el nivel de mantenimiento de todo tipo de equipos es un factor crucial para reducir la frecuencia de fallas.

1.2.3. Metodología experimental

Meng et al. (2017) investigaron la temperatura del flujo de humo debajo del techo del túnel para un tren que se incendia y se detiene en una estación de metro. Los experimentos se llevaron a cabo en una estación de metro modelo a escala 1/10, que se compone de tres partes: el piso del vestíbulo, el piso de la plataforma y la vía del túnel. Un vagón de tren modelo se encuentra en el espacio de la vía del túnel para simular un tren en llamas además de una estación de metro. Con este modelo se buscó estudiar la temperatura máxima de humo y la distribución longitudinal de la temperatura bajo el techo del túnel, considerando las puertas conjuntas plataforma-túnel de dos tipos: la puerta de sellado completo (full seal platform screen door, PSD en inglés) y la puerta de seguridad de altura completa. Cuando se UTILIZA el PSD de sello completo, la pista de la correa del túnel y la plataforma se conectan solo a través de las puertas abiertas. Cuando se usan las puertas de seguridad de media altura, la vía del túnel y la plataforma están conectadas no solo a través de las puertas abiertas sino también a través del espacio abierto encima de la puerta. Tal diferencia en la estructura del espacio afectaría las características de flujo de humo del fuego del tren además de una estación de metro. En general, la mayor parte del humo del fuego que se derrama del vagón del tren fluiría por debajo del techo del túnel debido al bloqueo de la puerta de conjunción plataforma-túnel, mientras que parte del humo se propagará a la plataforma. En cuanto al efecto del tipo de puerta, la temperatura máxima es más baja y la temperatura longitudinal decae más rápido para la puerta de seguridad de altura media que para la PSD de sello completo. Esto se debe a que, con la puerta de seguridad de altura completa, el ancho efectivo del techo del túnel se ensancha, y una parte de humo debajo del techo se extiende al techo de la plataforma, lo que intensifica la pérdida de calor del flujo de humo hacia el techo a una disminución en la temperatura del humo.

Couton and Plourde (2017) realizaron un estudio experimental de la propagación del humo

en una estación de metro mediante un modelo a subescala basado en la similitud de Froude. La dispersión del humo se analizó de acuerdo con la geometría del metro (número de aberturas) y la tasa de flujo volumétrico de la ventilación. En este contexto, la vía de evacuación debe permanecer libre de humo para garantizar la seguridad de los pasajeros en caso de incendio en la plataforma. Todos los experimentos exhibidos tenían como objetivo determinar las condiciones de ventilación que evitaban el efecto chimenea en las escaleras de pasajeros. Mientras que se eligió un conjunto de parámetros para el estudio, se inició fuego sin ventilación para producir posibles efectos de chimenea, y la tasa de flujo volumétrico (en modo extracción y soplado) necesaria para eliminar el humo de las escaleras fue investigado.

Como la vertical del aire caliente puede iniciar el efecto de chimenea, lo cual debe evitarse, es necesario determinar las condiciones de ventilación apropiadas. Se estudió una estrategia para que las escaleras estuvieran libres de humo en términos de tres parámetros: número de túneles de apertura, número de accesos y método de ventilación (“push-pull” o modo de extracción). El fuego fue simulado por un quemador de aire-butano para estudiar el desarrollo y realizar experimentos hasta que se alcanzara la convergencia.

La eficiencia de “push-pull” y todos los modos de extracción se compararon con un único modo de extracción con una reducción del flujo volumétrico crítico. También se estudió la influencia de la pérdida de presión en el túnel opuesto a la ventilación en el efecto chimenea. Las temperaturas de salida de las escaleras y las áreas libres de humo fueron la principal preocupación, y se señaló el criterio de seguridad.

La variación de temperatura se trazó con respecto a la condición ventilada y la velocidad de flujo extraída. Los resultados muestran que la velocidad de flujo crítica existe y aumenta cuando incrementa el número de accesos en la estación. Cerrar los túneles opuestos al sistema de ventilación permite que las escaleras se encuentren libres de humo al disminuir la velocidad de flujo volumétrico del umbral.

Zhang et al. (2016) investiga la influencia del tren de metro en la capa de humo en los incendios del túnel del metro. Debido a la reducción del área de sección transversal del túnel del metro, la velocidad de ventilación aumentará cuando el aire ventilado fluya a través del tren del metro. Tanto la fuerza de inercia del aire ventilado como la pérdida de calor del gas de humo retroactivo se verán potenciados por la ventilación a mayor velocidad. Luego, la capa de humo hacia atrás será diferente de la del túnel del metro sin tren de metro. Se llevaron a cabo una serie de experimentos a pequeña escala para estudiar la capa de humo en el túnel con el tren subterráneo dentro y los resultados mostraron que la longitud de la capa de humo voló en gran medida por el tren de metro. En comparación con el túnel sin tren de metro, la longitud de la capa posterior del estudio actual fue muy reducida debido a la mayor fuerza de inercia y la pérdida de calor. Con base en la distribución de la temperatura del gas de humo y la teoría de la dinámica del fuego, se desarrolló un nuevo modelo físico que incluye el factor de la longitud del tren del metro para predecir la longitud de la capa posterior del humo en el túnel. Este trabajo investigó la influencia del bloqueo del tren de metro en la capa de humo hacia atrás en el fuego del túnel del metro utilizando análisis teóricos y experimentos de túnel a pequeña escala. Se desarrolló un nuevo modelo para predecir la longitud de la capa posterior de humo bajo el efecto de bloqueo del tren de metro en el túnel del metro. Las principales conclusiones se hacen de la siguiente manera: El tren del metro tiene efectos significativos en la capa posterior

1. INTRODUCCIÓN

de humo, que no se puede ignorar más. Los modelos anteriores sobreestimaron la longitud de la capa posterior en el túnel del metro con el tren del metro, porque estos modelos subestimaron el efecto de bloqueo del tren del metro. El bloqueo del tren de metro mejora la pérdida de calor del gas de humo retroiluminado, así como la fuerza de inercia del aire ventilado. Tener en cuenta una fuente de fuego virtual en el túnel ascendente puede mejorar la precisión de la predicción del modelo. Se propone un nuevo modelo que incluye el factor de la longitud del tren del metro para predecir la longitud de la capa posterior de humo en el túnel.

1.2.4. Metodología numérica

Tsukahara et al. (2011), analizaron el incendio de la estación de Jungangno, Daegu en 2003 a través de CFD mediante el uso de Fire Dynamics Simulator. Los cálculos mostraron que las escaleras de evacuación tenían una alta densidad de humo, temperatura y concentraciones de CO y CO₂ en el fuego del metro. Por lo tanto, estos factores afectaron en gran medida todas las escaleras de evacuación hacia arriba debido a la coincidencia del flujo de humo y las rutas de evacuación. Adicional a este estudio, propusieron una nueva estación de metro con un cuarto piso del sótano que tiene rutas de evacuación hacia abajo que están en la dirección opuesta al flujo de humo. Los resultados del análisis muestran que estos factores apenas afectaron las escaleras de del nivel inferior y del nivel propuesto, llegando a la conclusión de que la evacuación hacia abajo puede ser más efectiva que la evacuación hacia arriba para el fuego en una estación del metro.

Meng et al. (2014) realizaron una simulación CFD basandose en el programa Fire Dynamics simulator para estudiar la efectividad de diferentes modos de ventilación en caso de incendio de un tren en una estación de metro típica con dos plantas bajo tierra. Estos sistemas de ventilación son: el sistema de suministro de aire del piso del vestíbulo, que es una serie de entradas de aire ubicadas a lo largo del techo del piso del vestíbulo; el sistema de suministro de aire de la plataforma, que es una serie de entradas de aire pero que se encuentran debajo de ambos extremos del techo de la plataforma; el sistema de escape de humo en la plataforma, que es una serie de salidas de aire debajo del techo de la plataforma; el sistema de escape por sobre oruga (over track exhaust system u OTE) es una serie de aberturas a lo largo del techo del túnel, que agota el humo en la vía del túnel; el sistema de ventilador de ventilación del túnel (tunnel ventilation fan system o TVF) está ubicado en el túnel, bastante cerca de los dos extremos de la plataforma, extrayendo humo en el túnel; el sistema de escape bajo plataforma (under platform exhausts system o UPE) es una serie de aberturas debajo de la plataforma. En circunstancias normales, los sistemas de suministro de aire en el piso de la plataforma y en el piso del vestíbulo se activan para proporcionar aire fresco a la estación de metro. El UPE se activa para eliminar el calor y la humedad generados por el funcionamiento normal de los trenes. Los otros tres sistemas están cerrados bajo la condición de que no haya fuego. Adicionalmente se incluyen barreras de humo alrededor del atrio y barreras anti humo en las puertas de seguridad de media altura para mejorar la eficacia de los sistemas de control de humo. Los contornos de temperatura y visibilidad se calculan para comparar el rendimiento de varios modos de ventilación para la estación de metro con puerta de malla de plataforma (PSD) y para la puerta de seguridad de media altura. Ellos determinaron que la optimización del modo de ventilación

depende mucho del sistema de suministro de aire mecánico y la eficiencia de escape de los sistemas de ventilación; además de que señalaron recomendaciones para los dos sistemas de puertas de seguridad y concluyeron que el sistema PSD con sello completo ayuda a restringir el humo en la vía del túnel y mejora la eficiencia del sistema de ventilación.

Modelo físico

En esta sección se describe brevemente el modelo de la estación de metro que es utilizado para la simulación de evacuación. El objetivo de este trabajo es simular la dispersión del humo, y analizar, el incremento de temperatura ocasionada por el incendio en una estación simple, generado en el convoy; la pérdida de visibilidad y los decesos, producto de la inhalación de los humos tóxicos.

2.1. El Metro de la Ciudad de México

El metro de la Ciudad de México es uno de los sistemas de transporte más importantes utilizados, transporta a más de 1400 millones de pasajeros por 177 km cada año. Sirve a extensas áreas de la Ciudad de México y parte del Estado de México, uniendo gran parte de la zona metropolitana del Valle de México y permitiendo que personas que viven en extremos puedan transportarse para realizar todas sus actividades. Aparece como el pionero del modernismo urbano de las grandes ciudades latinoamericanas y se presentó; a los ojos del tercer mundo, como ejemplo de implantación y precisión exitosas de una extensa red con todas las tensiones que impone una urbe del subdesarrollo.

Los trenes del Sistema de Transporte Colectivo (STC) son en su mayoría neumáticos, que es la base de otros sistemas de Metro en el mundo como en París y Santiago de Chile dando un total de 321 trenes, 292 de 9 vagones y 29 de 6 vagones, estos circulan con ruedas de caucho o de hule, que al circular los hace más silencioso que los antiguos trenes de llantas metálicas. Adquiere su fuente de energía a nivel de piso a través una barra guía. En los años cincuenta se tuvo la idea de construir un Metro para la Ciudad de México, cuando la capital tenía 4 millones de habitantes y para el año 1964, la población se duplicó, mientras las extensiones de la ciudad pasaron de 200 a 320 kilómetros cuadrados, lo que provocó que la concentración de población, en especial de la zona centro, fuera enorme para la capacidad de los servicios de transporte público. Era cuando los viejos tranvías entrecruzaban la ciudad, el tráfico comenzaba a incrementarse y el sistema del autobús, ya no era suficiente para cubrir todas las demandas de las personas que vivían fuera de la ciudad. En ese entonces se buscaba la necesidad de un sistema que desahogara las principales avenidas y calles donde se concentraba el conflicto y

2. MODELO FÍSICO

diera movilidad a un mayor número de personas en un espacio más reducido, solucionando los problemas de vialidad y contaminación.

Antes de la inauguración del Metro, alrededor del 40 por ciento de los viajes de la Ciudad de México se realizaban dentro del perímetro central, es decir, dentro del área que hoy en día conforman las delegaciones Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza y Benito Juárez. Sin embargo, el rápido crecimiento tanto de la población como de la urbe rebasó rápidamente la capacidad de las rutas camioneras y tranviarias. Ni siquiera la creación del Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal, en 1956, logró cubrir la creciente demanda en materia de transporte masivo de pasajeros para la ciudad capital. La primera línea del metro fue abierta al público el 4 de septiembre de 1969, la gente de la ciudad estaba realmente fascinada con esta nueva forma de transporte, rápido, limpio y seguro, pero con la construcción del metro nace una nueva ciudad, una ciudad subterránea, que se inaugura el 4 de septiembre de 1969, e inicia su servicio el 5 del mismo mes, con la puesta en operación del primer tramo de la Línea “1”, de Zaragoza a Chapultepec y con la tarifa de un peso y para el día 8 de septiembre, del mismo año sale su reglamento con 21 artículos, entre ellos los que prohíben escupir, fumar, ejercer actividades comerciales, o activar aparatos de radio u otros objetos sonoros que molesten a las personas en las estaciones, los andenes o vagones. El indudable éxito del Metro como medio de transporte público, motivaron a las gestiones de José López Portillo, como Presidente, y de Carlos Hank González, como Regente de la Ciudad, a planear nuevas líneas y estaciones. El Plan Maestro del Metro (de 1977) vislumbraba la construcción de 5 líneas nuevas y la ampliación de las 3 líneas hasta entonces construidas (Líneas 1, 2 y 3). El 7 de septiembre de 1977 inicia la segunda etapa del proyecto del metro con la creación de la Comisión Técnica Ejecutiva del Metro, para hacerse cargo de la construcción de las ampliaciones de la red y posteriormente, el 15 de enero de 1978, también se crea la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano del Distrito Federal (COVITUR), hoy en día llamada Secretaría de Movilidad (SEMOVI), que sería el organismo responsable de proyectar, programar, construir, controlar y supervisar las obras de ampliación, adquirir los equipos requeridos y hacer entrega de instalaciones y equipos al Sistema de Transporte Colectivo para su operación y mantenimiento.

En esta etapa se creó la línea 4 y la línea 5. La línea 4 que va de Martín Carrera a Santa Anita como un viaducto elevado teniendo un costo menor que las líneas subterráneas. Consta de 10 estaciones, ocho elevados, dos superficiales y cinco de correspondencia con otras líneas. La línea 5 se construyó en tres tramos. El primer tramo que va de Pantitlán a Consulado, se inauguró el 19 de diciembre de 1981. El segundo tramo que va de Consulado a la Raza se inauguró el 1 de junio de 1982 y el tercer tramo que va de la Raza a Politécnico, se inauguró en agosto de ese mismo año. La construcción de esa línea fue superficial del tramo Pantitlán – Terminal Aérea y subterránea tipo cajón del tramo Valle Gómez – Politécnico.

La tercera etapa de construcción consta de ampliaciones a las líneas 1, 2 y 3 alcanzando su tramo actual y se inician dos líneas nuevas, la 6 y la 7. El tramo de la línea 3 inaugurada el 30 de agosto de 1983 llega a su límite actual en la estación terminal del Metro denominada Ciudad Universitaria. El tramo de la línea 1 inaugurado el 22 de agosto de 1984 que va de Zaragoza a Pantitlán permitiendo conectar a la línea 1 con la línea 5. El tramo de la línea 2 se amplía de Tacuba a Cuatro Caminos, en el límite con el Estado de México, tramo inaugurado el 22 de agosto de 1984.

La cuarta etapa de construcción comienza en 1985 con la ampliación de la línea 6 (tramo de Instituto del Petróleo a Martín Carrera) que se inauguró el 8 de julio de 1988; y la línea 7 (tramo de Tacuba a El Rosario) inaugurándose el 29 de noviembre de 1988. También se da inicio a la construcción de la línea 9 que va de Pantitlán a Tacuba, siguiendo una ruta al sur en comparación de la línea 1 con el propósito de descongestionarla, principalmente en las horas pico. En la construcción de la línea 9 se utilizó el túnel circular profundo, túnel tipo cajón y de viaducto elevado en el tramo restante.

La quinta etapa de construcción inicia en 1988 en la que se construyen las líneas A y 8. La línea A, que va de Pantitlán a la Paz, en el Municipio de los Reyes la Paz en el Estado de México donde fue la primera extensión de la red del Metro al Estado de México. En esta línea se optó por una solución de superficie y trenes de ruedas férreas en lugar de neumáticos, ya que se reducían los costos de construcción y mantenimiento. Esta línea se inauguró el 12 de agosto de 1991. En el trazo original de la línea 8 fue modificado del plan maestro anterior ya que se consideró que su cruce por el Centro Histórico de la Ciudad y la correspondencia con la estación Zócalo pondrían en peligro la estabilidad de las estructuras de varias construcciones coloniales dañando los restos de la ciudad prehispánica que se encuentra debajo del primer cuadro. Así que el tramo inicial de la línea 8, iría de Constitución de 1917 a Garibaldi, se inauguró el 20 de julio de 1994.

En la sexta y última etapa se elaboran los estudios y proyectos de la línea B los cuales se iniciaron a fines de 1993, el 29 de octubre de 1994 dio inicio su construcción en el tramo subterráneo comprendido entre Buenavista Plaza Garibaldi. En diciembre de 1997 el Gobierno del Distrito Federal recibió 178 kilómetros de red de Metro en operación y en proceso de construcción la línea B, de Buenavista a Ecatepec, con un avance global del 49 %. Al 15 de octubre del 1999 se había alcanzado un avance del 77.6 %, para terminarla y ponerla en operación en toda su longitud durante el segundo semestre del año 2000. Adicionalmente forman parte del proyecto diversas obras de vialidad que contribuyen a la integración y reestructuración de los otros medios de transporte.

2.2. Descripción del modelo

La estación de metro modelado representa una estación de metro sencilla, con dos plantas bajo tierra, sin conexiones a otras líneas del transporte, basado en la estación de metro Çopilco". El primer piso debajo del suelo es el vestíbulo o lobby, con un tamaño de 84.4 metros x 19.8 metros x 3.7 metros en el extremo más largo y de 7 metros x 49.2 metros x 3.7 metros en el extremo corto. En la intersección de los dos extremos del lobby hay 40 torniquetes, con un tamaño de 1 metros x 0.4 metros x 1.2 metros.

El segundo piso que se sitúa debajo del lobby es la plataforma o andén, con un tamaño de 150 metros x 12 metros con una altura que varía de los 6 metros a los 11.2 metros; en los extremos de esta se representó una pequeña fracción del túnel del metro, teniendo una dimensión de 50 metros x 12 metros x 7.5 metros. Hay cuatro salidas de la estación, con un tamaño de 4.3 metros x 3.7 metros, que se ubican en los extremos de la parte más corta del vestíbulo. La zona en donde se desplazan los convoyes está ubicada en la región central de la

2. MODELO FÍSICO

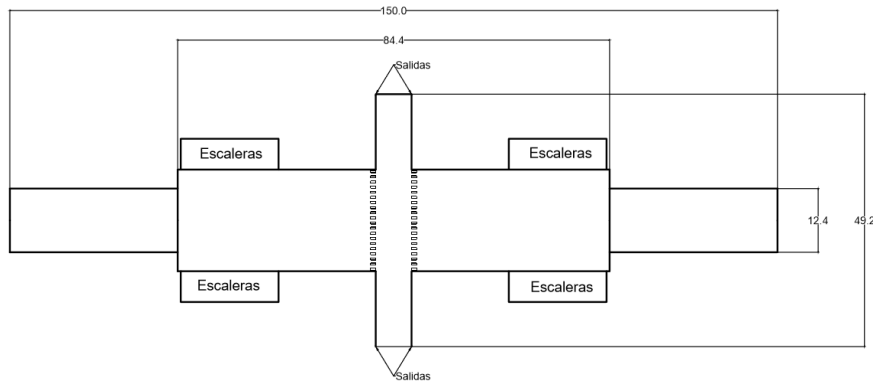


Figura 2.1: Vista superior del vestíbulo.

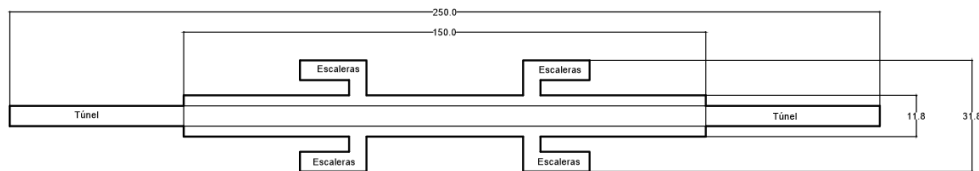


Figura 2.2: Vista superior del andén.

plataforma, con un tamaño de 150 metros x 3.8 metros x 6 metros. El convoy del metro se compone de 9 vagones, con un tamaño total de 150 metros x 3 metros x 2.75 metros. Cada vagón tiene unas dimensiones de 16 metros x 2.5 metros x 2.58 metros; éstos tienen 4 puertas, a excepción de los vagones que se ubican en los extremos, que contienen 5 puertas, está puerta adicional es del cuarto de mando, en donde se encuentra el operador del metro. Hay un total de 78 puertas instaladas en el tren, con un tamaño de 2 metros de ancho x 2.2 metros de alto. Una partícula a alta temperatura que da origen al incendio se coloca en el centro de un vagón de tren.

Las propiedades de incendio se establecen de acuerdo con (McGrattan et al., 2017; Meng et al., 2014; Haack, 2005; Cheong et al., 2008). En FDS por defecto, la fracción radiativa es de 0.35. La condición de límite de las paredes, los pisos y los techos de la estación de metro es térmicamente gruesa. El material de la pared se especifica como concreto y el tren como acero. Las características de los agentes se establecen por defecto de acuerdo a Korhonen (2018). El tipo de agentes que se implementaron fue de adultos y niños. Las dimensiones físicas de las personas fueron modificadas con el fin de colocar una capacidad similar de acuerdo a los datos mostrados en STC. Las propiedades físicas y térmicas de estos materiales se muestran en la tabla 2.1, obtenidos de McGrattan et al. (2017). La condición de límite para las cuatro salidas

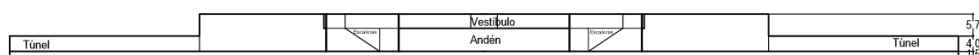


Figura 2.3: Vista lateral de la estación.

	Materiales			
	ACERO	CONCRETO	PVC	UNIDADES
Conductividad	45.8	1.6	.19	$\frac{W}{m \cdot K}$
Calor específico	.46	1	1.3	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
Densidad	7850	2300	1300	$\frac{kg}{m^3}$
Emisividad	1	1	1	-

Tabla 2.1: Propiedades de los materiales empleados en la simulación

y los dos extremos del túnel está configurada para ser abierta.

El estudio del caso es el siguiente: en horas pico, en una estación se ubica un convoy que sufre un incendio en el tercer vagón, el conductor se percata del incidente y abre las puertas del convoy, con lo que comienza la evacuación de los pasajeros hacia las salidas. Dado la naturaleza de los materiales del vagón, el fuego se propaga por todo el convoy. No hay sistemas de ventilación.

El policloruro de vinilo (PVC), un material termoplástico, ocupa el tercer lugar detrás del polietileno y el polipropileno en términos de consumo mundial debido a su bajo precio y excelentes propiedades mecánicas, como película adhesiva y tarjetas de crédito, alambre y cable, materiales de construcción, tapicería, etc. Sin embargo, el PVC, cuando se quema, produce muchos contaminantes perjudiciales, como el ácido clorhídrico (HCl), el cloro gaseoso y especialmente la dioxina, lo que ocasiona graves problemas de contaminación que contaminan aún más el medio ambiente (Zhang et al., 2007)

El HCl presenta dos peligros significativos en los incendios, causando la incapacitación por irritación sensorial (que provoca respiración dolorosa, hinchazón de las vías respiratorias y finalmente la muerte) e inhibición de la conversión de CO en CO₂. A concentraciones suficientemente altas, o cuando están unidas a partículas submicrométricas como el hollín, los irritantes también pueden penetrar más profundamente en los pulmones (Pope et al., 1992). Se ha demostrado que las partículas más pequeñas (mayor a 0,5 μm) son particularmente peligrosas, causando irritación pulmonar también conocida como Síndrome Respiratorio Agudo Severo (SARS) que conduce a dificultad respiratoria posterior a la exposición y muerte por edema pulmonar, que generalmente ocurre a partir de unas horas a varios días después de la exposición. Además, las partículas pueden actuar como vehículos para el transporte de moléculas nocivas a lo profundo de los pulmones (Stec et al., 2013).

Modelo matemático

Para poder comprender el fenómeno de flujo en superficie libre es necesario comprender las leyes físicas que rigen su comportamiento, así también los modelos matemáticos que describen dichas leyes.

En estas leyes se pueden obtener ecuaciones que rindan cuenta del flujo de masa, de energía y de momento hacia un sistema a través de lo que se denomina ecuación de transporte de Reynolds. En términos generales dicha ecuación relaciona los cambios de alguna propiedad del fluido al seguir un elemento de fluido determinado moviéndose en el espacio, con los cambios temporales de la misma propiedad pero manteniendo fijo un determinado volumen de control (Sandino and Castellón, 2010).

A continuación se presentan las ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos.

3.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de conservación describe que la cantidad de masa que fluye a un volumen estacionario por unidad de tiempo equivale a la salida de masa por unidad de tiempo de ese mismo volumen más la cantidad de acumulación de masa por unidad de tiempo de dicho volumen (Hurley et al., 2016). Por lo tanto, los elementos de masa individuales de moléculas, partículas de un fluido, pueden rastrearse dentro de un campo de flujo porque no desaparecerán y no aparecerán nuevos elementos espontáneamente (Kundu et al., 2016).

El volumen ocupado por una colección específica de partículas de fluido se denomina volumen material $V(t)$. Tal volumen se mueve, se expande, se contrae y/o se deforma dentro de un flujo de fluido de manera que siempre contiene los mismos elementos de masa. Esto implica que la superficie del material $A(t)$, debe moverse a la velocidad del fluido local $\mathbf{u}$ para que las partículas de fluido dentro de $V(t)$ permanezcan dentro y las partículas de fluido fuera de $V(t)$ permanezcan afuera. Por lo tanto, el principio conservación de la masa para un volumen de material en un fluido es:

3. MODELO MATEMÁTICO

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\mathbf{x}, t) dV = 0 \quad (3.1)$$

donde ρ es la densidad del fluido.

Esta ecuación limita la densidad del fluido. Las implicaciones para el campo de la velocidad del fluido pueden mostrarse mejor utilizando el teorema de transporte de Reynolds, para expandir el tiempo derivativo, quedando la ecuación:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\mathbf{x}, t) dV = \int_{V(t)} \frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} dV + \int_{A(t)} \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} dA = 0 \quad (3.2)$$

Esta es una ecuación de balance de masa entre los cambios de densidad integrados dentro de $V(t)$ y el movimiento integrado de su superficie $A(t)$. Esta ecuación puede ser difícil de utilizar en la práctica porque el movimiento y la evolución de $V(t)$ y $A(t)$ están determinados por el flujo, que puede ser desconocido. Para desarrollar la integración completa que representa una gran conservación para un volumen de control que se mueve de forma irregular $V^*(t)$ con la superficie $A^*(t)$, 3.2 debe modificarse para incluir integraciones sobre $V^*(t)$ y $A^*(t)$. Esta modificación está motivada por la frecuente necesidad de conservar la masa dentro de un volumen que no se encuentre en coordenadas materiales, por ejemplo, un volumen de control estacionario.

$$\frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \rho(\mathbf{x}, t) dV = \int_{V^*(t)} \frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} dV + \int_{A^*(t)} \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.3)$$

Ahora, hay que elegir un volumen de control arbitrario $V^*(t)$ para ser instantáneamente coincidente con el volumen $V(t)$, así que, en ese instante, $V(t) = V^*(t)$ y $A(t) = A^*(t)$; $\frac{d}{dt} \int \rho(\mathbf{x}, t) dV$ en 3.2 y 3.1 no son iguales. Sin embargo, $\frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$ es igual en ambas ecuaciones y la superficie de $\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ en $A(t)$ es igual en $A^*(t)$:

$$\int_{V^*(t)} \frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} dV = \int_{V(t)} \frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} dV = - \int_{A(t)} \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} dA = - \int_{A^*(t)} \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.4)$$

De ésta ecuación, los dos extremos permiten que el término integral de volumen, pueda ser reemplazado en 3.3 para encontrar:

$$\frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \rho(\mathbf{x}, t) dV + \int_{A^*(t)} \rho(\mathbf{x}, t) (\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{b}) \cdot \mathbf{n} dA = 0 \quad (3.5)$$

Donde $\mathbf{u}$ y $\mathbf{b}$ deben de observarse en el mismo marco de referencia. 3.5 es la ecuación integral general de conservación de la masa para un volumen de control que se mueve arbitrariamente. Se puede especializar a volúmenes de control estacionarios, en constante movimiento, aceleración o deformación mediante la elección adecuada de $\mathbf{b}$. En particular, cuando $\mathbf{b} = \mathbf{u}$, el volumen de control arbitrario se convierte en un volumen de material y 3.5 se reduce a 3.1. La ecuación diferencial que representa la conservación de masa se obtiene aplicando el teorema de divergencia de Gauss a la integración de la superficie en 3.2:

$$\int_{V(t)} \frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} dV + \int_{A(t)} \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} dA = \int_{V(t)} \left\{ \frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \right\} dV = 0 \quad (3.6)$$

Esta igualdad sólo puede ser posible si la integral es válida en cada punto en el espacio. Para que esto se cumpla, la ecuación 3.6 requiere que:

$$\frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (3.7)$$

ó

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.8)$$

ó

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.9)$$

Donde el operador nabla se define a como:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} \mathbf{i}_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \mathbf{i}_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \mathbf{i}_3 \quad (3.10)$$

Para describir el comportamiento del humo generado por fuego, FDS utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b^m \quad (3.11)$$

En donde $\dot{m}_b^m$ es la generación de masa en el volumen de control.

3.2. Ecuación de momentum

La segunda ley de Newton establece que durante un intervalo de tiempo corto, el impulso de una fuerza aplicada a una masa producirá un cambio de momento en esa masa. Cuando se aplica a un volumen de control, este principio se convierte:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \mathbf{F} \quad (3.12)$$

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} + \mathbf{M}_{sal} - \mathbf{M}_{ent} = \mathbf{F} \quad (3.13)$$

La ecuación 3.13, $\mathbf{M}$ se define como un momento dentro de un volumen de control ocurrido en un instante:

$$\mathbf{M}(t) = \int_{VC} \rho \mathbf{u} dV \quad (3.14)$$

Los términos $\mathbf{M}_{sal} + \mathbf{M}_{ent}$ son evaluados por una integral de superficie del flujo de momento en la frontera:

$$\mathbf{M}_{sal} + \mathbf{M}_{ent} = \int_{SC} \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{u} dA \quad (3.15)$$

La fuerza $\mathbf{F}$ describe dos fenómenos:

Fuerza ejercida en el cuerpo. Estas fuerza actua en el fluido que se encuentra dentro del volumen de control. Un ejemplo es la fuerza gravitacional.

$$\mathbf{F}_{Gravitacional} = \int_{VC} \rho \mathbf{g} dV \quad (3.16)$$

Fuerza ejercida en la superficie. Estas fuerzas actúan en la superficie del volumen de control. Estás son separadas por fuerzas viscosas y fuerzas de presión.

$$\mathbf{F}_{presion} = - \int_{SC} p \mathbf{n} dA \quad (3.17)$$

$$\mathbf{F}_{viscosas} = \int_{SC} \mathbb{T} dA \quad (3.18)$$

En donde $\mathbb{T}$ representa un tensor de fuerzas.

Sustituyendo 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18 en 3.13 obtenemos:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \mathbf{u} dV + \int_{SC} \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{u} dA = \int_{VC} \rho \mathbf{g} dV + \int_{SC} \mathbb{T} dA - \int_{SC} p \mathbf{n} dA \quad (3.19)$$

La ecuación 3.19 es integral general de conservación de momento para un volumen de control que se mueve arbitrariamente.

Para obtener la ecuación diferencial que representa el momentum es necesario que todos los términos se encuentren en el mismo volumen de integración. Esto se obtiene aplicando el teorema de divergencia de Gauss a las integraciones de la superficie en la ecuación 3.19:

$$\int_{SC} \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{u} dA = \int_{VC} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) dV = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) dV \quad (3.20)$$

3. MODELO MATEMÁTICO

$$\int_{SC} \mathbb{T} \cdot \mathbf{n} dA = \int_{SC} \nabla \cdot \mathbb{T} dA = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial x_i} T_{ij} dV \quad (3.21)$$

y

$$-\int_{SC} p \mathbf{n} dA = -\int_{VC} \nabla p dV = -\int_{VC} \frac{\partial}{\partial x_i} p dV \quad (3.22)$$

Sustituyendo 3.20, 3.21 y 3.22 en 3.19 obtenemos:

$$\int_{VC} \left\{ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla p - \rho \mathbf{g} - \nabla \cdot \mathbb{T} \right\} dV = 0 \quad (3.23)$$

Al igual que en la ecuación de conservación de masa, esta igualdad sólo puede ser posible si la integral es válida en cada punto en el espacio. Para que esto se cumpla, la ecuación 3.23 requiere que:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla p - \rho \mathbf{g} - \nabla \cdot \mathbb{T} = 0 \quad (3.24)$$

ó

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} p - \rho g_i - \frac{\partial}{\partial x_i} T_{ij} = 0 \quad (3.25)$$

La ecuación 3.24 puede escribirse en términos de la derivada material:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} - \nabla p \quad (3.26)$$

3.3. Ecuación de la energía

La rapidez de cambio temporal de la suma total de la energía cinética y de la energía interna (calor y deformación elástica, disipación viscosa) en el cuerpo es igual a la suma de la rapidez de trabajo realizado por las cargas de supercie y de cuerpo al producir la deformación (o flujo) junto con la energía calorífica que puede liberar o entrar en el cuerpo a cierta rapidez.

$$\frac{d}{dt}(\varepsilon + \kappa) = Q + W \quad (3.27)$$

En donde la energía interna total de un cuerpo ε :

$$\varepsilon = \int_{VC} \rho e dV \quad (3.28)$$

y κ es la energía cinética total de un cuerpo:

$$\kappa = \int_{VC} \frac{1}{2} \rho (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) dV \quad (3.29)$$

El trabajo W total es la de las fuerzas que actúan dentro del volumen de control (fuerzas de cuerpo) y las fuerzas que actúan sobre la superficie del volumen de control (fuerzas superficiales):

$$W = \int_{VC} \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} dV + \int_{SC} \mathbf{t} \cdot \mathbf{u} dA \quad (3.30)$$

El calor Q es el que se transfiere del volumen de control a la superficie (calor superficial):

$$Q = - \int_{SC} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.31)$$

En donde h es la fuente de calor $\frac{W}{kg}$ y $\mathbf{q}$ es el vector del flujo de calor que está definido por la ley de la conducción de calor de Fourier:

$$\mathbf{q} = k \cdot \nabla \theta \quad (3.32)$$

Sustituyendo 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31 en 3.27 obtenemos:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \rho \left(e + \frac{1}{2} \rho (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) \right) dV \right) = \int_{VC} \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} dV + \int_{SC} \mathbf{t} \cdot \mathbf{u} dA - \int_{SC} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.33)$$

Factorizando ρ en el término de la izquierda y aplicando la igualdad $\mathbf{u} \cdot \mathbf{u} = \|\mathbf{u}\|^2$, la ecuación 3.33 puede escribirse:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \rho \left(e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \right) dV \right) = \int_{VC} \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} dV + \int_{SC} \mathbf{t} \cdot \mathbf{u} dA - \int_{SC} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.34)$$

Finalmente, al aplicar el teorema de transporte de Reynolds en el término de la izquierda obtendremos la ecuación integral de la energía:

$$\int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \right) dV + \int_{SC} \rho \left(e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \right) (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dA = \int_{VC} \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} dV + \int_{SC} \mathbf{s} \cdot \mathbf{u} dA - \int_{SC} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.35)$$

De la misma manera que en las ecuaciones de conservación de masa y momentum, para obtener la ecuación diferencial que representa la ecuación de la energía es necesario que todos los términos se encuentren en el mismo volumen de integración. Esto se obtiene aplicando el teorema de divergencia de Gauss a las integraciones de la superficie en la ecuación 3.35:

$$\int_{SC} \rho \left(e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \right) (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dA = \int_{VC} \nabla \cdot \rho \left(e \mathbf{u} + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \mathbf{u} \right) dV = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \left(e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \right) u_i \right) dV \quad (3.36)$$

$$\int_{SC} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA = \int_{SC} q_i n_i dA = \int_{VC} \nabla \cdot \mathbf{q} dV = \int_{VC} \frac{\partial q_i}{\partial x_i} dV \quad (3.37)$$

y para el vector de esfuerzos $\mathbf{n}$ de la ecuación 3.35 se utiliza la hipótesis de Cauchy, que relaciona el vector de esfuerzos con un tensor de esfuerzos:

$$\mathbf{s} = \mathbb{T}^T \cdot \mathbf{n} \quad (3.38)$$

y utilizando la identidad:

$$(\mathbb{S}^T \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{n} \cdot (\mathbb{T} \cdot \mathbf{v}) \quad (3.39)$$

podemos aplicar el teorema de la divergencia:

$$\int_{SC} \mathbf{s} \cdot \mathbf{u} dA = \int_{SC} \mathbb{S}^T \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} dA = \int_{SC} \mathbf{n} \cdot (\mathbb{S} \cdot \mathbf{u}) dA = \int_{VC} \nabla \cdot (\mathbb{T} \cdot \mathbf{u}) dV = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial x_i} (S_{ij} u_j) dV \quad (3.40)$$

Sustituyendo 3.36, 3.37 y 3.40 en 3.35:

$$\int_{VC} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \right) + \nabla \cdot \rho \left(e\mathbf{u} + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \mathbf{u} \right) - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot (\mathbb{T} \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot \mathbf{q} \right\} dV = 0 \quad (3.41)$$

Esta igualdad sólo puede ser posible si la integral es válida en cada punto en el espacio. Para que esto se cumpla, la ecuación 3.41 requiere que:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \right) + \nabla \cdot \rho \left(e\mathbf{u} + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \mathbf{u} \right) - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot (\mathbb{T} \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3.42)$$

$e + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2$ es igual a la energía total del sistema E , por lo que sustituyendo en 3.42 y reordenando términos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\mathbb{T} \cdot \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.43)$$

3. MODELO MATEMÁTICO

Expandiendo el lado izquierdo de la ecuación 3.43 y ordenando términos:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho E u_i}{\partial x_i} = \rho \left(\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} \right) + E \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \right) \quad (3.44)$$

El segundo término del lado derecho es la ecuación de la conservación de la energía por lo que el término desaparece, quedando:

$$\rho \left(\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} \right) = \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla E \quad (3.45)$$

Sustituyendo en 3.43:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla E = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\mathbb{T} \cdot \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.46)$$

Ahora, de 3.46, el tercer término de la derecha puede reordenarse, dando como resultado:

$$\nabla \cdot (\mathbb{T} \cdot \mathbf{u}) = \frac{\partial T_{ij} v_j}{\partial x_j} = v_j \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + T_{ij} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \mathbb{T}) + \varphi \quad (3.47)$$

Donde φ es el término difusivo. Sustituyendo 3.47 en 3.46:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla E = \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \mathbb{T}) + \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.48)$$

El término de la izquierda se puede escribir en términos de la derivada material:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \mathbb{T}) + \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.49)$$

La ecuación de la energía se puede reescribir en términos de la entalpía estática, que se define como:

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad (3.50)$$

Despejando e de 3.50, sustituyendo E de la ecuación de la energía y a su vez sustituyendo en la ecuación 3.48:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(h + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \right) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \mathbb{T}) + \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.51)$$

Espandiendo el término de la izquierda de la ecuación 3.51 se obtiene:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} + \rho \frac{Dp}{Dt} + \rho \frac{1}{2} \frac{D(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})}{Dt} = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \mathbb{T}) + \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.52)$$

El tercer término de la izquierda de la ecuación 3.52 puede reescribirse como:

$$\rho \frac{1}{2} \frac{D(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})}{Dt} = \rho \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \rho \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{u} \cdot \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \quad (3.53)$$

Se debe observar que $\frac{D\mathbf{u}}{Dt}$ corresponde a la ecuación de momentum (3.26), por lo que el término de la extrema izquierda de la ecuación 3.53 se reescribe con la ecuación de momentum y se sustituye en la ecuación 3.52:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} + \rho \mathbf{u} \cdot \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \mathbb{T}) + \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.54)$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} + \mathbf{u} \cdot (\rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} - \nabla p) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \mathbb{T}) + \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.55)$$

Finalmente, al eliminar términos de ambos extremos, la ecuación de la energía en términos de la entalpía se define como:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.56)$$

6

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{Dp}{Dt} + \varphi - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.57)$$

3.4. Ecuación de especies

La descripción más básica de la química del fuego es una reacción de un combustible de hidrocarburo con oxígeno que produce dióxido de carbono y vapor de agua. El fuego es un proceso de combustión relativamente ineficiente que involucra múltiples gases combustibles conteniendo más que solo átomos de carbono e hidrógeno. Mientras que el combustible es generalmente una sola especie de gas, el aire y los productos son los que a menudo se denominan "especies concentradas".

La ecuación de conservación de masa a menudo se escribe en términos de las fracciones de masa del compuesto primitivo de una especie, Y_α :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_\alpha^m + \dot{m}_{b,\alpha}^m \quad (3.58)$$

Esta ecuación también se puede usar para cada una de las especies agrupadas (aire, combustible y productos):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z_\alpha) + \nabla \cdot \rho Z_\alpha \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Z_\alpha + \dot{m}_\alpha^m + \dot{m}_{b,\alpha}^m \quad (3.59)$$

Donde Z_α es la tasa de producción de las especies α mediante la evaporación de gotas pequeñas y partículas; $\dot{m}_{b,\alpha}^m$ es la fracción de masa de los productos de las especies; $\dot{m}_\alpha^m$ es el flujo de las especies α y D_α es el coeficiente de difusión de las especies.

3.5. Movimiento de los agentes

El método del grupo de Helbing se utiliza como el punto de partida del algoritmo de movimiento del agente de FDS + Evac, donde se introduce una llamada "fuerza social", esto es

mantener distancias razonables del agente con respecto las paredes y otros agentes. FDS + Evac usa las leyes de la mecánica para seguir las trayectorias de los agentes durante el cálculo. Cada agente sigue su propia ecuación de movimiento:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i(t)}{dt^2} = \mathbf{f}_i(t) + \xi_i(t) \quad (3.60)$$

donde $\mathbf{x}_i(t)$ denota la posición del agente i en el tiempo t , $\mathbf{f}_i(t)$ es la fuerza ejercida por el entorno sobre el agente i , y $\xi_i(t)$ es una pequeña fuerza de fluctuación aleatoria.

La velocidad el agente i está dada por:

$$\mathbf{v}_i(t) = \frac{d\mathbf{x}_i(t)}{dt} \quad (3.61)$$

Estas ecuaciones describen los grados de libertad traslacionales de los agentes que evacúan. Los grados de libertad rotacionales son descritos de manera similar, en donde cada agente tiene su propia ecuación de movimiento rotacional:

$$\mathbf{I}_i^z \frac{d^2 \varphi_i(t)}{dt^2} = \mathbf{M}_i(t) + \eta_i(t) \quad (3.62)$$

en donde $\varphi_i(t)$ es el ángulo del agente i en el tiempo t , $\mathbf{I}_i^z$ es el momento de inercia, $\eta_i(t)$ es una pequeña par que fluctúa de manera aleatoria, y $\mathbf{M}_i(t)$ es el par total ejercido por el entorno sobre el agente.

3.6. Números adimensionales

Los números adimensionales Re, Pr, Nu y Sc se definen como:

- Número de Reynolds $\frac{\rho U L}{\mu}$

Donde ρ es la densidad del fluido, U una velocidad característica, L una distancia característica y μ la viscosidad dinámica del fluido. El número de Reynolds es siempre importante haya o no superficie libre, su efecto puede ser despreciado sólo en las regiones donde hay altos gradientes de velocidad, por ejemplo, lejos de las superficies fijas, chorros o estelas.

3. MODELO MATEMÁTICO

- Número de Prandtl $\frac{\nu}{\alpha}$

El número de Prandtl es la medida de la efectividad de la difusión de movimiento sobre la difusión de un fluido.

- Número de Nusselt $\frac{hL}{k}$

Se define al número de Nusselt como el flujo de calor relativo al flujo de calor por conducción cuando el fluido carece de movimientos convectivos. Este número es la razón del flujo de calor por unidad de área debido a la convección entre el flujo de calor comparada con la transferencia de calor por conducción.

- Número de Schmidt $\frac{\nu}{D}$

El número de Schmidt (Sc) es un número adimensional definido como el cociente entre la difusión de cantidad de movimiento y la difusión de masa, y se utiliza para caracterizar flujos en los que hay procesos convectivos de cantidad de movimiento y masa.

Modelo numérico

4.1. Simulación LES

La simulación de grandes vorticidades (Large-Eddy Simulation, LES) se propuso originalmente para simular flujos atmosféricos en la década de 1960 y se ha convertido en uno de los métodos más prometedores y exitosos para simular flujos turbulentos con la mejora de la potencia de cálculo. Es factible simular flujos de ingeniería complejos usando LES.

En LES, los movimientos a gran escala (grandes vorticidades) de flujo turbulento se calculan directamente y, por lo tanto, se aplica un filtro espacial de paso bajo a las ecuaciones de conservación instantáneas para formular las ecuaciones gobernantes inestables 3D para movimientos a gran escala. Solo se modelan los movimientos a pequeña escala (escala de subred (SGS)), dando como resultado una reducción significativa en el tiempo computacional.

El resultado de la simulación numérica es bastante sensible al tamaño de malla utilizado. La determinación del tamaño de la malla es muy importante cerca del lugar del incendio, debido a la gran temperatura y gradiente de velocidad que son originados por el fuego. Para las simulaciones que implican columnas de incendio, el tamaño de malla cerca del fuego está determinado originalmente por la expresión no dimensional $\frac{D^*}{\partial x}$, donde ∂x es el tamaño nominal de una celda de malla y D^* es el diámetro de fuego característico, que se obtiene a partir de:

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

Las investigaciones sugieren que el tamaño de la malla debe ser mayor que $0.1D^*$ para obtener resultados viables.

4.2. Modelo de turbulencia a escala de submalla

En FDS, la difusión de gradiente es el modelo de turbulencia utilizado para cerrar tanto el momentum a escala de submalla como los términos de flujo escalar. Esto requiere un modelo para el coeficiente de transporte turbulento: la viscosidad turbulenta o la difusividad turbulenta.

La difusividad turbulenta se obtiene utilizando un número constante de Schmidt (para la difusividad material) o el número de Prandtl (conductividad térmica) por lo que el coeficiente de transporte más importante es la viscosidad turbulenta, μ_t . Siguiendo el análisis de Smagorinsky, la viscosidad turbulenta se define:

$$\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 \left(2S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) \quad (4.2)$$

En donde C_s es el coeficiente de Smagorinsky que varía de 0.1 a 0.23, Δ es la longitud de la celda de la malla. Los otros parámetros difusivos, la conductividad térmica y la difusividad del material, están relacionados con la viscosidad turbulenta mediante:

$$\kappa_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr} \quad (4.3)$$

y

$$(\rho D)_{t,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (4.4)$$

4.3. Suposición del número bajo de mach

Rehm y Baum [9] observaron que para aplicaciones de baja velocidad como el fuego, la presión espacial y temporal, se puede descomponer en una presión dinámica (o "presión de fondo"), $\bar{p}(z, t)$, más una perturbación, $\tilde{p}(x, y, z, t)$. Utilizando solo la presión de dinámica en la ecuación de estado (ley de gas ideal) la expresión queda:

$$\bar{p} = \rho T R \sum_{\alpha} \frac{Z_{\alpha}}{W_{\alpha}} \equiv \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (4.5)$$

La perturbación $\tilde{p}$, describe el impulso del movimiento del fluido.

La presión p en las ecuaciones de estado y energía es reemplazada por la presión de fondo $\bar{p}$ para filtrar ondas de sonido que viajan a velocidades que son mucho más rápidas que las velocidades de flujo típicas esperadas en aplicaciones de incendios.

Las ecuaciones utilizando la suposición del bajo número de Mach se resuelven numéricamente al dividir el espacio físico donde se debe simular el fuego en una gran cantidad de celdas rectangulares. Dentro de cada celda, se supone que la velocidad, la temperatura del gas son uniformes; cambiando solo con el tiempo. Una consecuencia de la suposición del bajo número de Mach es que la energía interna, e , se relacionan con la presión dinámica y el filtrado de ondas acústicas significa que el paso de tiempo en el algoritmo numérico está limitado solo por la velocidad del flujo en oposición a la velocidad del sonido, y la ecuación de estado modificada conduce a una reducción en el número de variables dependientes en el sistema de ecuaciones en uno.

4.4. La ecuación de la energía y masa

Para describir la energía generada por fuego, FDS utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{Dp}{Dt} + -\nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}^n + \dot{q}^m + \dot{q}_b^m \quad (4.6)$$

En donde $\dot{q}^m$ es el calor generado por unidad de volumen mediante una reacción química; $\dot{q}_b^m$ es la energía transferida a partículas pequeñas gotas; $\dot{\mathbf{q}}^n$ representa el flujo de calor por convección conducción radiación y difusión.

$$\dot{\mathbf{q}}^n = -k \nabla T - \sum_a h_{s,\alpha} \rho D_\alpha \nabla Z_\alpha + \dot{\mathbf{q}}_r^n \quad (4.7)$$

En donde k es la conductividad térmica y D_α es la difusividad de las especies α . La ecuación 4.6 nunca se resuelve de manera explícita, por lo que se reordena la ecuación de tal forma que ésta quede en función de la divergencia de $\mathbf{u}$:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho h} \left(\frac{D}{Dt} (p - \rho h) + -\nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}^n + \dot{q}^m + \dot{q}_b^m \right) \quad (4.8)$$

Expandiendo la derivada material en el lado derecho de la ecuación 4.8 produce una expresión bastante complicada para la divergencia que incluye la fuente y los términos de difusión

de la masa, las especies y las ecuaciones de conservación de energía. Su importancia para el algoritmo general es que se puede calcular utilizando solo las variables termodinámicas ρ , Z_α y p . Como se muestra a continuación, la evolución del flujo de velocidad con el paso del tiempo primero estimar las variables termodinámicas en el siguiente paso de tiempo, calcular la divergencia y luego resolver una ecuación para la presión que garantizará la divergencia de la velocidad actualizada es idéntica a la calculada únicamente a partir de las variables termodinámicas.

4.5. La ecuación de momentum

La ecuación del momentum se simplifica para que sea más sencilla su resolución de manera numérica. La ecuación de momentum que emplea FDS es la siguiente:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} + \mathbf{f}_b \quad (4.9)$$

En donde $\mathbf{f}_b$ representa la fuerza de arrastre ejercida por las partículas y gotas pequeñas a escala de submallado.

Para simplificarla, primero, se debe de sustraer la enérgica zona de presión $\rho_n(z, t)g$ de ambos extremos de la ecuación, de tal forma que podemos reescribir el gradiente de la presión como:

$$\nabla p = \nabla \rho_n \mathbf{g} + \nabla \tilde{p} \quad (4.10)$$

sustituyendo 4.10 en 4.11 y dividiendo la ecuación entre ρ :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{(\nabla \rho_n \mathbf{g} + \nabla \tilde{p})}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left[(\rho - \rho_n) \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} + \mathbf{f}_b \right] \quad (4.11)$$

de la ecuación 4.11 se aplica la identidad en el segundo término de la izquierda:

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \frac{\|\mathbf{u}\|^2}{2} - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} \quad (4.12)$$

por lo que:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \frac{\|\mathbf{u}\|^2}{2} - \mathbf{u} \times \omega + \frac{(\nabla \rho_n \mathbf{g} + \nabla \tilde{p})}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left[(\rho - \rho_n) \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} + \mathbf{f}_b \right] \quad (4.13)$$

Finalmente se simplifica la ecuación del lado izquierdo definiendo:

$$\mathcal{H} = \frac{\|\mathbf{u}\|^2}{2} + \frac{\rho_n \mathbf{g}}{\rho} \quad (4.14)$$

Por lo que finalmente la ecuación de momentum se define como:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times \omega + \nabla \mathcal{H} + \frac{\nabla \tilde{p}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left[(\rho - \rho_n) \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} + \mathbf{f}_b \right] \quad (4.15)$$

4.6. La ecuación de Poisson

Es conveniente escribir la ecuación 4.15 en la forma:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{F} + \nabla \mathcal{H} = 0 \quad (4.16)$$

Por lo que al despejar $\nabla \mathcal{H}$ y al aplicarle la divergencia obtenemos la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \mathcal{H} = \left[\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot \mathbf{F} \right] \quad (4.17)$$

De la ecuación 4.15 el término $\tilde{p}$ aparece en los dos extremos de la ecuación. La presión en el lado derecho se toma del paso de tiempo anterior y explica el par baroclínico. Puede despreciarse si el par baroclínico no se considera importante en una simulación dada. La presión en el lado izquierdo (incorporada en la variable $\mathcal{H}$) se resuelve directamente. La razón de la descomposición del término de presión es que el sistema algebraico lineal que surge de la discretización de la ecuación 4.17 tiene coeficientes constantes (es decir, es separable) y puede resolverse con la precisión de la máquina mediante un método directo y rápido (es decir, no iterativo) optimizado para mallas uniformes, que utiliza transformadas rápidas de Fourier (FFT).

4. MODELO NUMÉRICO

Las condiciones de frontera para un volumen de control sin flujo o flujo forzado se especifican al afirmar que:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial n} = - \left[\frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial t} + \mathbf{F}_n \right] \quad (4.18)$$

Donde $\mathbf{F}_n$ es el componente normal de $\mathbf{F}$ para una ventilación o pared, y $\frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial t}$ es la velocidad de cambio escrita en la componente normal de la velocidad para una ventilación forzada. Inicialmente, la velocidad es cero en todos los puntos del volumen de control. Para una condición de frontera en donde el sistema es abierto, el término de la presión $\mathcal{H}$ se escribirá dependiendo la dirección del flujo, en donde:

$$\mathcal{H} = \frac{\|\mathbf{u}\|^2}{2} \quad \text{flujo saliente}$$

$$\mathcal{H} = 0 \quad \text{flujo entrante}$$

La condición de frontera en donde el fluido sale, supone que la presión $\tilde{p}$ es cero en el límite saliente y $\mathcal{H}$ es condicional a lo largo de las líneas de corriente. Una condición mas allá de la frontera asume que $\mathcal{H}$ es cero en el infinito. En el límite entre dos mallas, la condición de frontera de la presión es similar a la de un límite de sistema abierto, con la excepción de que cuando el flujo entra, $\mathcal{H}$ se toma de la malla adyacente.

Resultados

5.1. Modelo de verificación

El modelo realizado para verificar la fiabilidad de la simulación se basa en (Meng et al., 2014), en el cual se presenta una estación de metro simple con dos plantas bajo tierra. El primer piso debajo de la superficie es el vestíbulo, con un tamaño de 150 metros x 12 metros x 4 metros. El segundo es la plataforma, con un tamaño de 140 metros x 12 metros x 4.5 metros. Hay un atrio en la estación. Hay cuatro salidas, con un tamaño de 6 metros x 3 metros, en las cuatro esquinas del piso del vestíbulo. La vía está ubicada en un lado del piso de la plataforma, con un tamaño de 180 metros x 5 metros x 6 metros. El tren en la estación se compone de 9 vagones, con un tamaño total de 140 metros x 3 metros x 2.75 metros. Cada vagón tiene 5 puertas y hay un total de 30 puertas instaladas en el tren, con un tamaño de 2 metros de ancho x 2,2 metros de alto. Una fuente de fuego se coloca en el centro del tren. Las propiedades de fuego se establecen de acuerdo con investigaciones previas o los valores predeterminados en (McGrattan et al., 2017). La tasa de liberación de calor de la fuente de fuego es de 10 MW y la fracción de combustible convertida en partículas de humo se denota como se establece en 0.1 para la simulación. Por defecto, la fracción radiativa es .35 para la simulación.

La condición de frontera de las paredes, los pisos y los techos de la estación de metro es térmicamente gruesa. El material de la pared se especifica como concreto y el tren como acero. Las propiedades térmicas de estos materiales están disponibles en (McGrattan et al., 2017). La condición de frontera para las cuatro salidas y los dos extremos del túnel está configurada para ser abierta.

En el modelo se coloca unas puertas de andén de sellado completo, cuya pared vertical es tan alta como la plataforma, cuando se cierran las puertas del andén los espacios entre la plataforma y la vía del túnel están completamente separados. También se instalan instalaciones adicionales, como cortinas de humo, para ayudar al sistema de control de humo. La cortina de humo se coloca en el techo de la plataforma alrededor del atrio, 1.5 metros de altura y 3 metros sobre el piso de la plataforma.

De los casos analizados en el artículo, en esta tesis se simulieron únicamente dos casos.

5. RESULTADOS

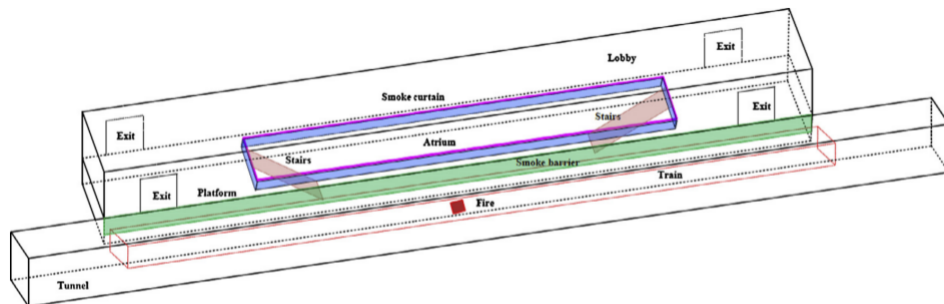


Figura 5.1: Vista superior del andén.

5.1.1. Comparación de resultados

5.1.1.1. Caso 1

Se genera un incendio que ocurre en la mitad del convoy en una estación en donde no existe ningún sistema de ventilación y/o extractor de humo. El tiempo de simulación es de 360 segundos. Se analiza la visibilidad de la plataforma en el plano $z = 2$ y la temperatura en el plano $y = 6.5$ (que es en mitad de la estación).

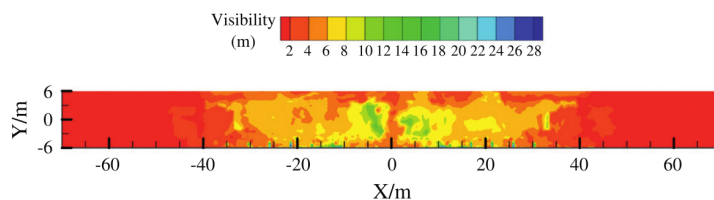


Figura 5.2: Caso 1. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS5 (Meng et al., 2014)

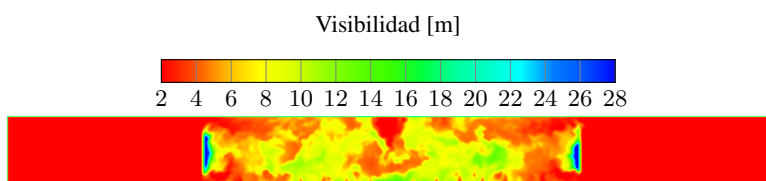


Figura 5.3: Caso 1. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6

Se puede observar que en ambas imágenes se generan vórtices en la zona central de la estación y cuya visibilidad máxima ronda en los 18 metros. Las diferencias se visualizan en la región en donde se ubican las escaleras $x \approx \pm 35$ metros. En la Fig. 5.2 se observa una muy baja visibilidad mientras que en la Fig. 5.3 existen pequeñas zonas en donde aun hay una alta visibilidad; en el artículo hay parámetros que se desconocen, que debido a éstos pudieron influenciar en el resultado del modelo.

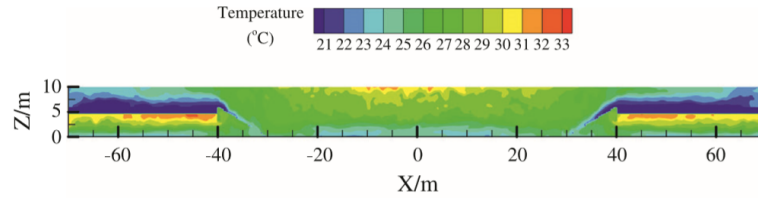


Figura 5.4: Caso 1. Temperatura obtenida en la estación del metro para $t = 360[s]$ (Meng et al., 2014).

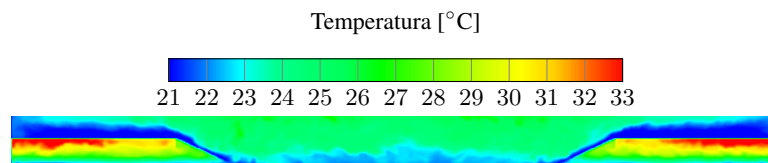


Figura 5.5: Caso 1. Temperatura obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6

Con respecto a la temperatura, se observa que el mayor incremento se tiene en la plataforma, justamente donde el humo se encuentra contenido por la cortina de humo y por las escaleras. Bajo estas circunstancias, una evacuación aun sería posible ya que la temperatura aun no representa un riesgo para el ser humano, sin embargo, la falta de visibilidad (la visibilidad mínima para una evacuación es de 10 metros (Meng et al., 2014)) representaría un problema al ubicar las rutas de evacuación.

5.1.1.2. Caso 2

Se genera un incendio que ocurre en la mitad del convoy en una estación en donde existe un sistema de escape de aire ubicado en el techo de la plataforma y un sistema de extracción de humo que se ubica en el techo túnel (OTE). Se analiza la visibilidad de la plataforma en el plano $z = 2$ y la temperatura en el plano $y = 6.5$.

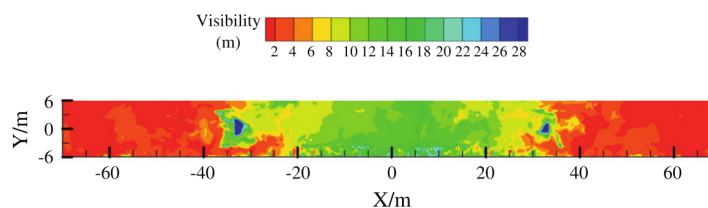


Figura 5.6: Caso 2. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ (Meng et al., 2014)

Se puede observar que en la figura 5.9, existe poca visibilidad en la región del atrio, que es la zona en donde se accede al piso del vestíbulo, mientras que en las zonas que se ubican por detrás de las escalera (± 40 metros) no existe visibilidad para una evacuación para $t = 360[s]$.

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la figura 5.7 no coinciden con los obtenidos en el artículo ya que los resultados muestran que en las mismas zonas en que se localizan detrás de las escaleras existe una mínima visibilidad para realizar una evacuación, incluso, en la región del atrio, no aparecen cantidades suficientes de humo en las que el usuario pueda verse afectado en su visibilidad. Las diferencias radican en que en el artículo, las condiciones de frontera no se especifican completamente, por lo que al realizar del caso 2 en donde involucra el uso de sistemas de ventilación, los resultados no coinciden con los del artículo. Para eso se tuvo que reconsiderar la condición de frontera para los sistemas de ventilación, en donde, a modo de ensayo y error, se obtuvieron resultados en los que éstos tendían al resultado del artículo. Finalmente, la figura 5.8 muestra resultados muy parecidos a los obtenidos en el artículo.

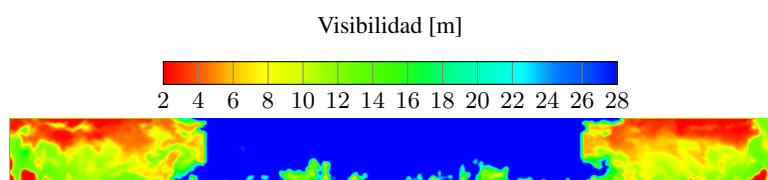


Figura 5.7: Caso 2. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utilizan los parámetros de gasto volumétrico descritos en el artículo.

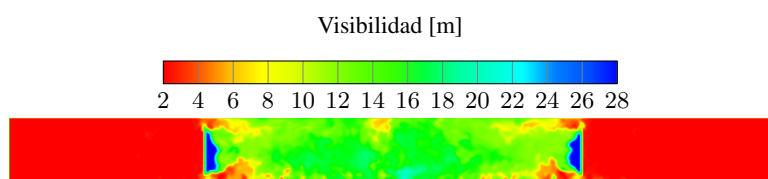


Figura 5.8: Caso 2. Visibilidad obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utiliza el 25 % del gasto volumétrico que se describe en el artículo.

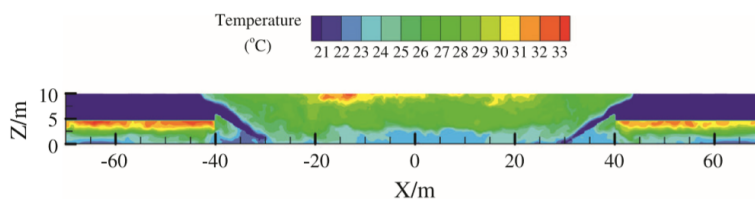


Figura 5.9: Caso 2. Temperatura obtenida en la estación del metro para $t = 360[s]$ (Meng et al., 2014).

El mismo problema sucede con los resultados de temperatura obtenidos. En la figura 5.9 se observa que hay cambios de temperatura en el atrio, así como también en el techo de las zonas que se encuentran detrás de las escaleras; mientras que en la figura 5.10, no se aprecian cambios considerables de la temperatura de la estación. Con los cambios en las condiciones de frontera de los sistemas de ventilación, los resultados de la figura 5.11 muestran cambios de

temperatura, tanto en la zona del atrio como en el techo de las zonas que se ubican detrás de las escaleras, son similares a los obtenidos en el artículo.

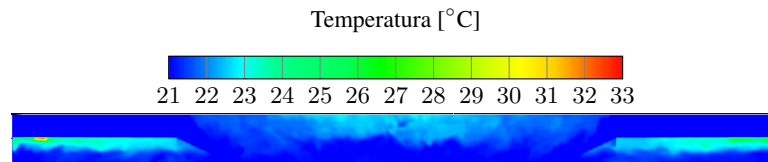


Figura 5.10: Caso 2. Temperatura obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utilizan los parámetros de gasto volumétrico descritos en el artículo.

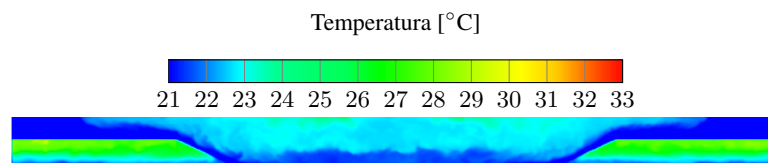
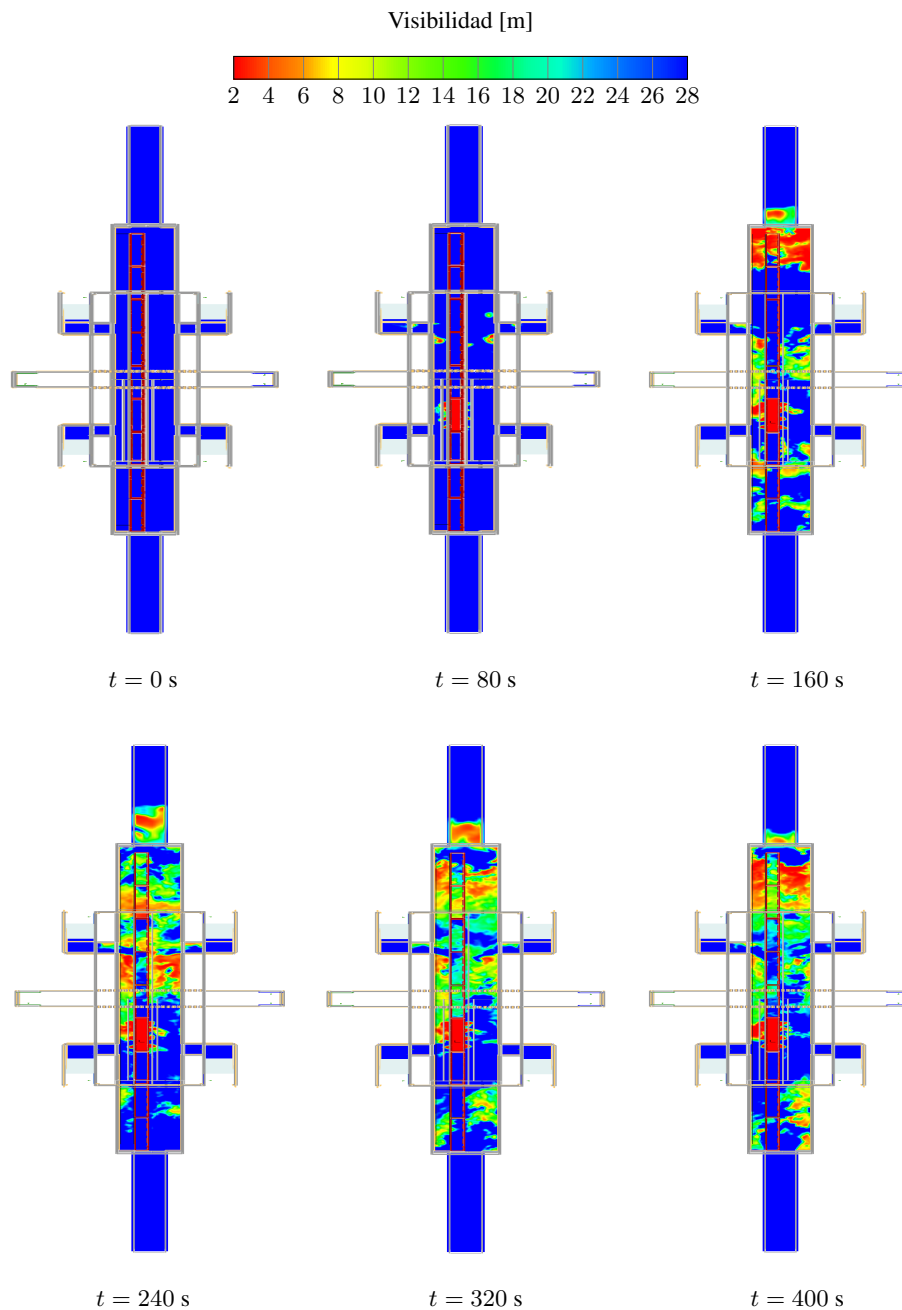


Figura 5.11: Temperatura obtenida en la plataforma del metro para $t = 360[s]$ usando FDS6. Se utiliza el 25 % del gasto volumétrico que se describe en el artículo.

5.2. Estudio del caso de la estación de metro modelada

5.2.1. Visibilidad en la estación: Anden



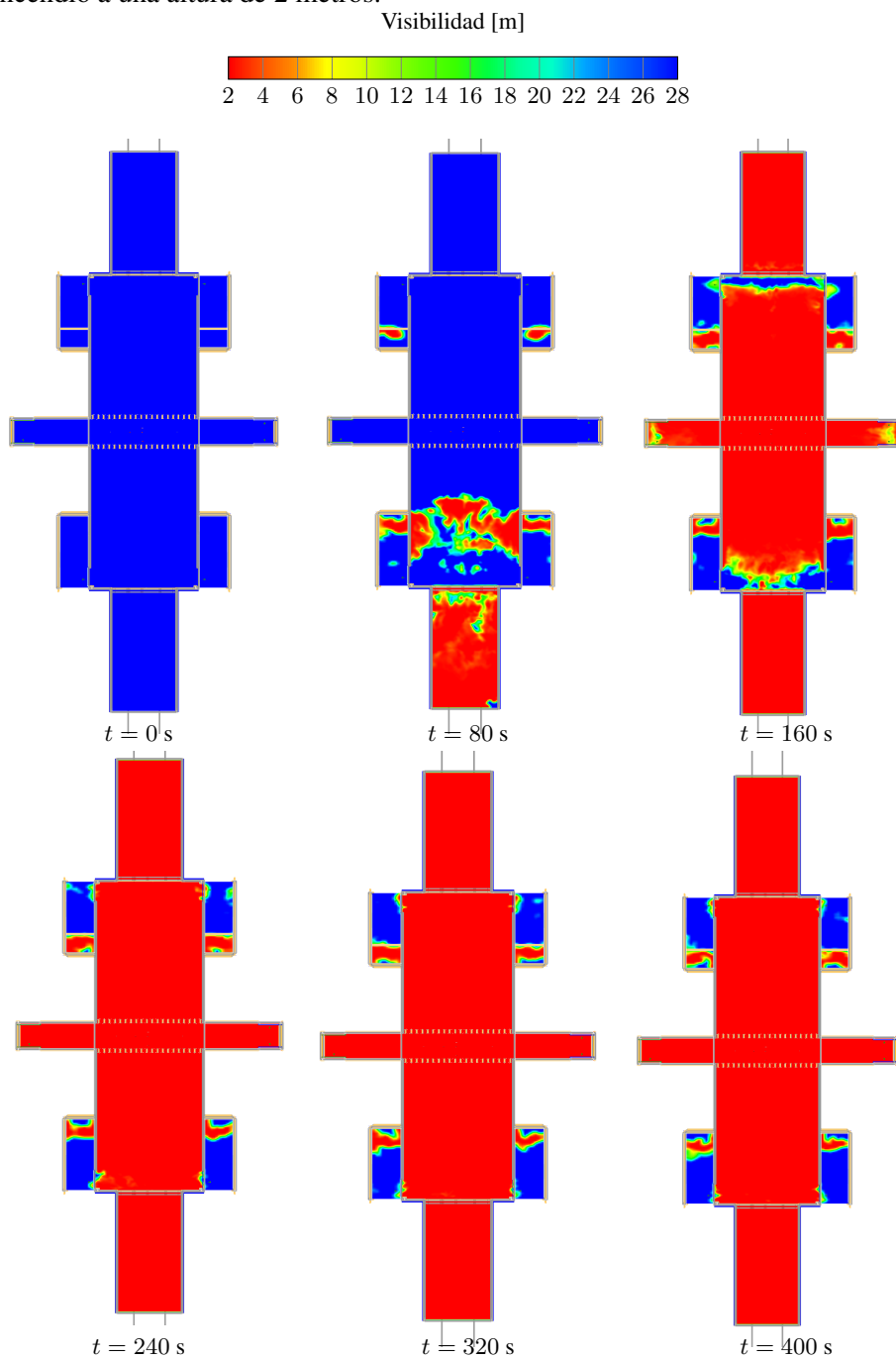
En una evacuación, la visibilidad es un factor importante ya que es el sentido con los que más interactuamos con nuestro entorno, por lo que la pérdida de este sentido en una situación de

riesgo, generaría pánico entre los agentes e interferiría con la evacuación. Para una condición ideal en la que exista una evacuación, la visibilidad no debe estar por debajo de los 10 metros a 2.1 metros de altura (Hurley et al., 2016). En estas imágenes se analiza la visibilidad que hay en el piso del andén durante un incendio a una altura de 2 metros. Se puede observar que la visibilidad es lo suficientemente buena como para proceder con una evacuación a pesar de ya han transcurrido 400 segundos. Evidentemente no existe visibilidad en el tercer vagón del convoy debido a que es en esa zona donde se origina el incendio. Los túneles no se ven afectados por el humo, por lo que, de existir un caso crítico en donde no existan sistemas de ventilación en la estación, éstos podrían ser una zona de evacuación segura.

5. RESULTADOS

5.2.2. Visibilidad en la estación: Vestíbulo

Las siguientes imágenes muestran la visibilidad que existe en el piso del vestíbulo durante un incendio a una altura de 2 metros.



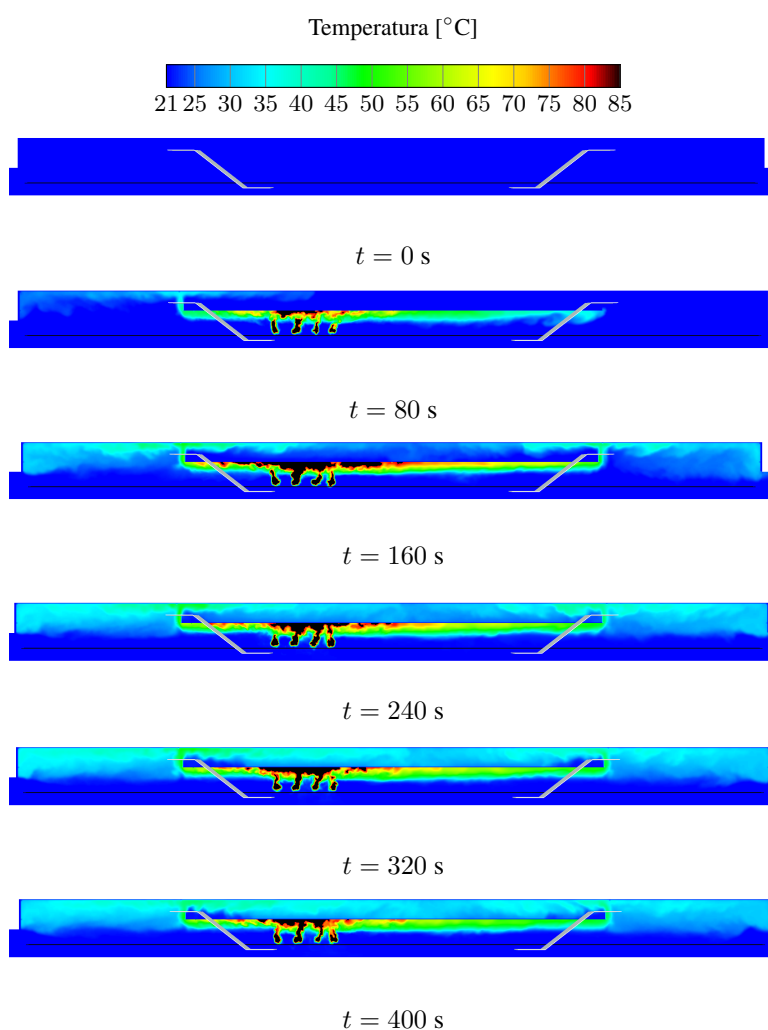
Se puede observar que al haber transcurrido 80 segundos, ya existe una pérdida considera-

ble de visibilidad. Esto es debido a que es esa zona donde se observa una mayor concentración de humo, existen miradores que comunican directamente con el andén, además la densidad del humo es menor en comparación con la del aire, y las únicas zonas en donde existe circulación de aire es en las entradas/salidas a la estación, por lo que no existen obstáculos que eviten una rápida propagación del humo hacia el vestíbulo y como consecuencia, la trayectoria de dispersión del humo coincide con la de la evacuación, dificultando en gran medida la salida de los agentes. Para $t = 160$ segundos la visibilidad en el piso del vestíbulo es nula.

5. RESULTADOS

5.2.3. Temperatura en la estación

La temperatura es otro factor a tomar en cuenta en el análisis de un incendio, ya que altas temperaturas pueden provocar efectos negativos en el cuerpo humano, lo que dificultaría la evacuación de los agentes. El nivel insostenible de temperatura para realizar una evacuación es de 80°C a una altura de 2.1 metros (Hurley et al., 2016).

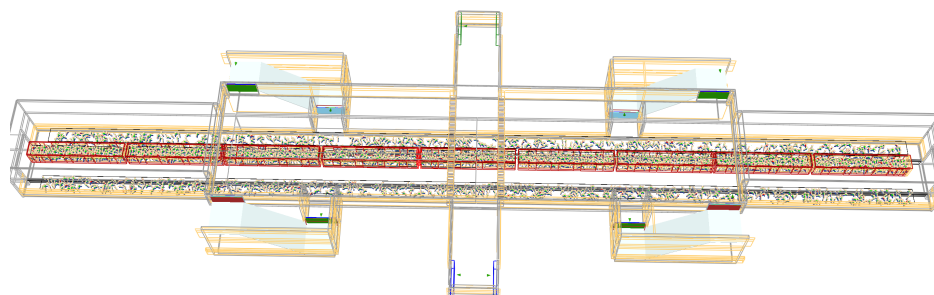


En estas imágenes, se puede observar que la mayor temperatura se encuentra en el origen del incendio y en el "techo bajo" del andén, con una temperatura que oscila entre los 45°C y los 60°C. Para $t = 160$ segundos, la temperatura comienza a incrementar en el "techo alto" del andén y en algunas partes del piso del vestíbulo, producto de la concentración de los humos en dichas zonas y debido al mirador que interactúa de manera directa con el piso del andén. Para $t = 240$ segundos, la temperatura en el piso del vestíbulo ya oscila entre los 35°C y 40°C, temperatura que podría perjudicar a los agentes y dificultar aun más su evacuación, añadiendo

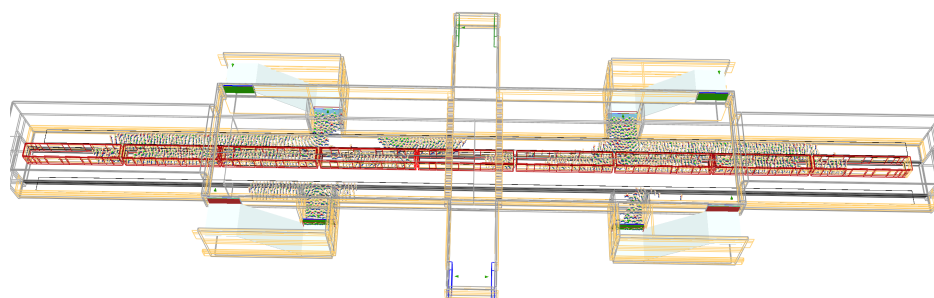
que, para ese mismo tiempo, la visibilidad es nula. La temperatura de los túneles aun no se ve afectada por el incendio. Las zonas coloreadas en negro son temperaturas que oscilan entre los 80°C y 220°C.

5. RESULTADOS

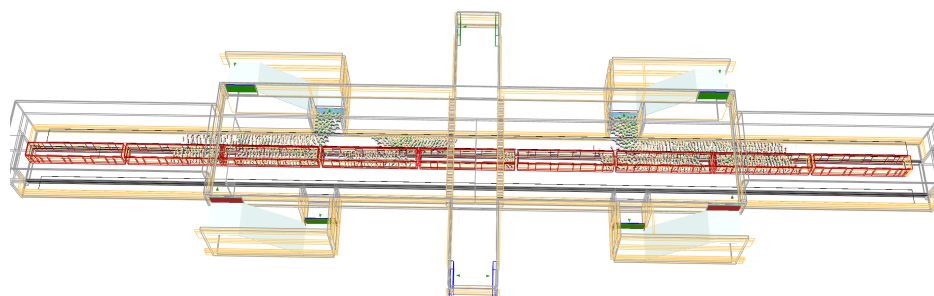
5.2.4. Evacuación en la estación: Anden



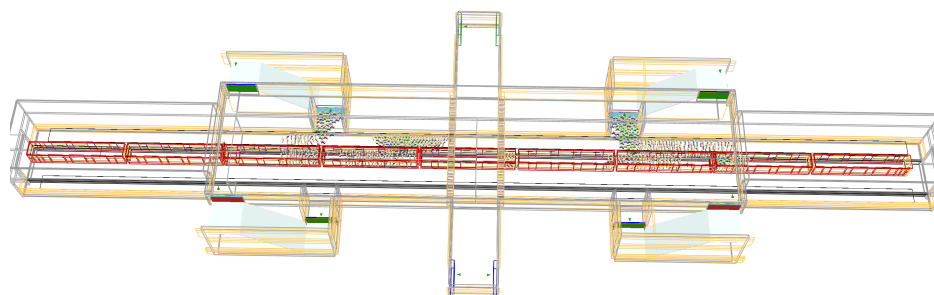
$t = 0 \text{ s}$



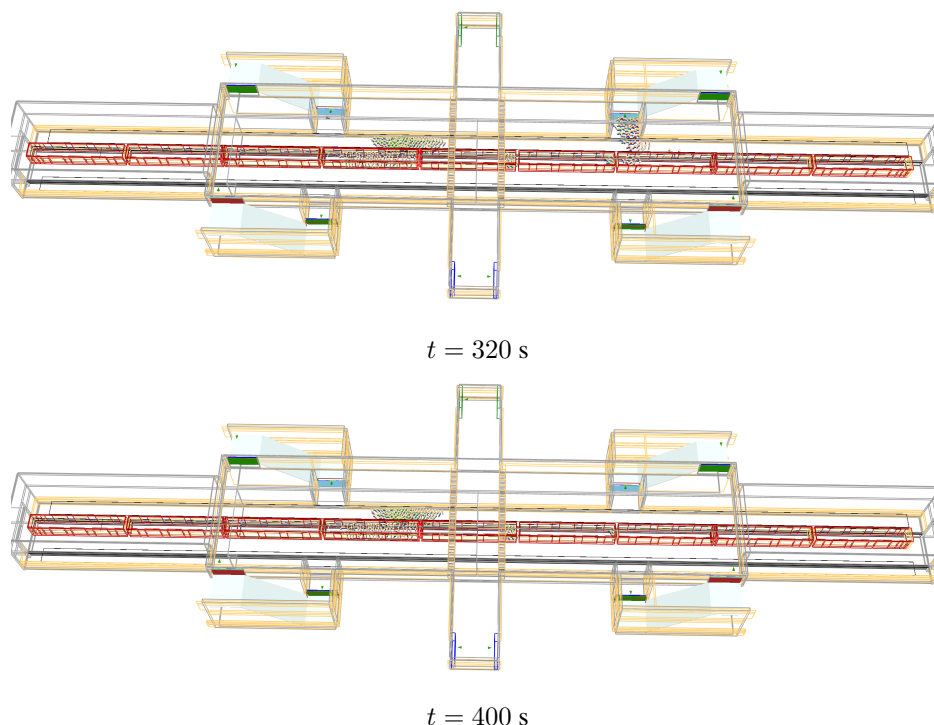
$t = 80 \text{ s}$



$t = 160 \text{ s}$



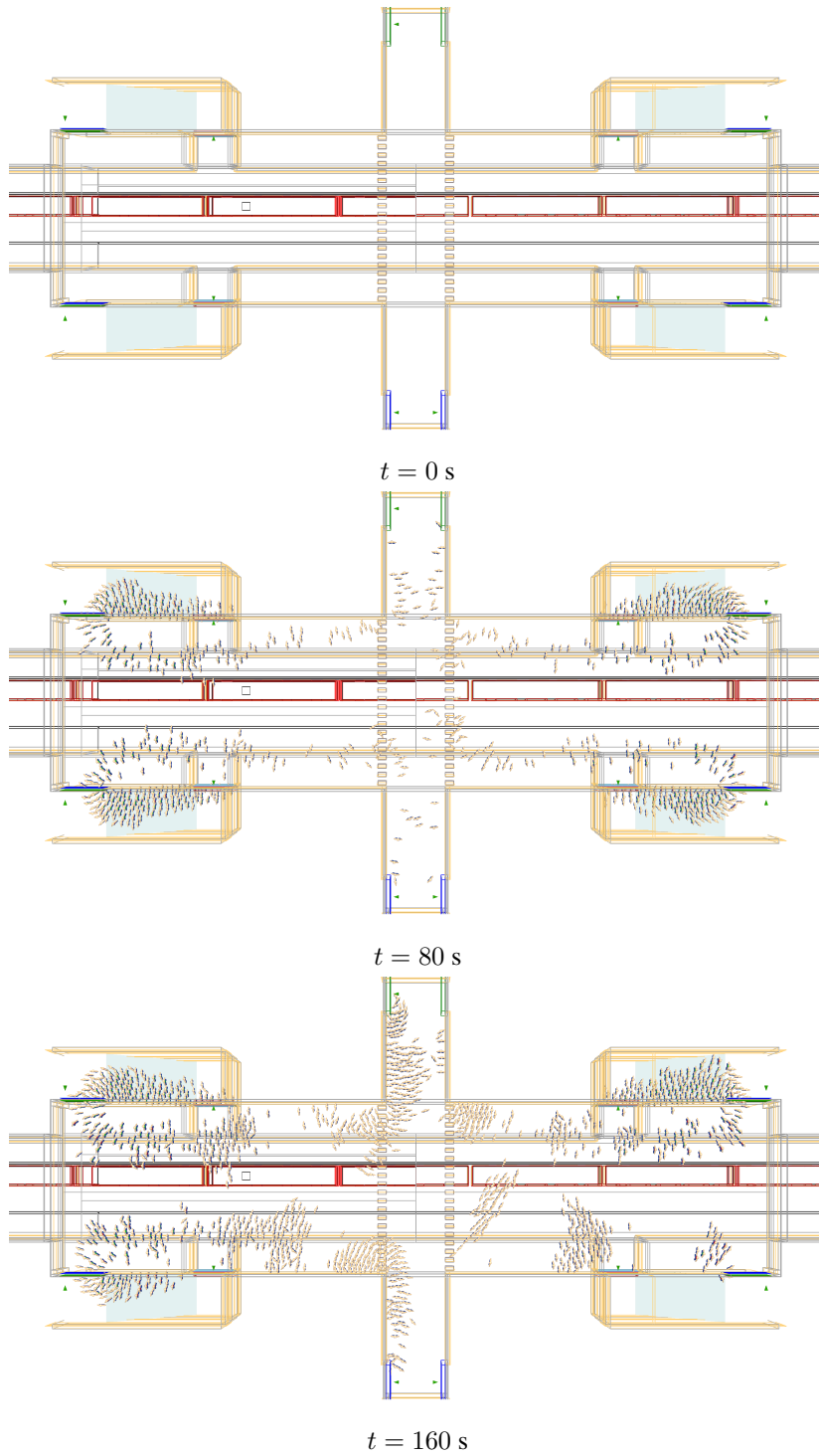
$t = 240 \text{ s}$

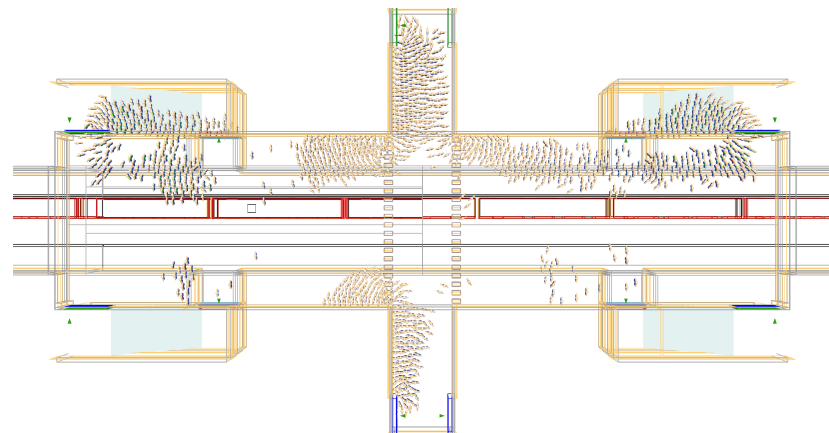


En esta sección se observa la evacuación de los agentes durante el incendio generado en el tercer vagón del convoy. Para $T = 80$ segundos, la evacuación en los vagones extremos del convoy se ha realizado en su casi en su totalidad, así como los vagones centrales y la plataforma que esperaba la llegada del convoy opuesto. Sin embargo, al generarse la evacuación los agentes de los vagones opuestos, el espacio ocupado por éstos impide la salida de los agentes de los vagones centrales, sobre todo en los que están cercanos al incendio y al mismo vagón en donde se está generando el fuego, por lo que éstos últimos, tienen menos posibilidades de sobrevivir debido a la exposición de los humos. Para $t = 160$ segundos, se observa que la plataforma que esperaba el convoy opuesto ha sido evacuada completamente, mientras que el andén opuesto muestra dificultades en la evacuación, esto debido a la nula visibilidad que hay, a la temperatura y a la concentración de los humos generados, dado la cercanía del incendio con un acceso al vestíbulo. La mayoría de los agentes del tercer vagón han perecido. Para $t = 240$ la evacuación continúa, teniendo muchas dificultades para los agentes de los vagones centrales que optaron por evacuar hacia el acceso izquierdo, mientras que los demás agentes, pueden evacuar sin problemas. Para $t = 320$ la evacuación en el andén se ha realizado casi en su totalidad, con la excepción de los agentes de los vagones centrales y de algunos agentes de los últimos vagones del convoy. Para $t = 400$ la evacuación se ha realizado con la excepción de los agentes de los vagones centrales que muestran muy poco movimiento hacia el acceso al vestíbulo.

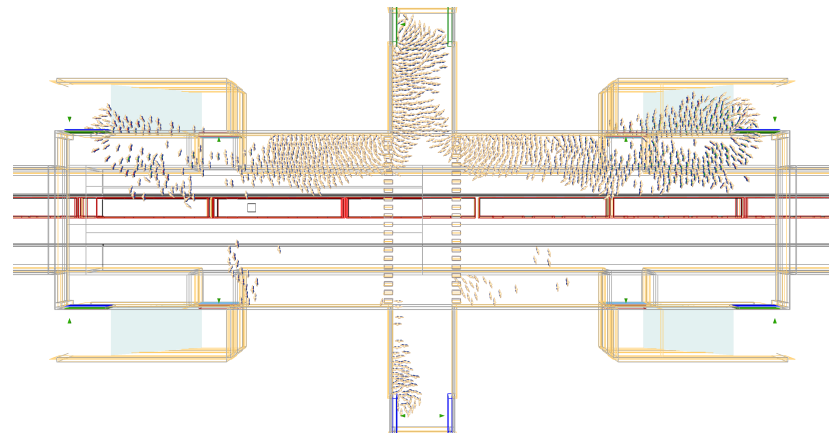
5. RESULTADOS

5.2.5. Evacuación en la estación: Vestíbulo

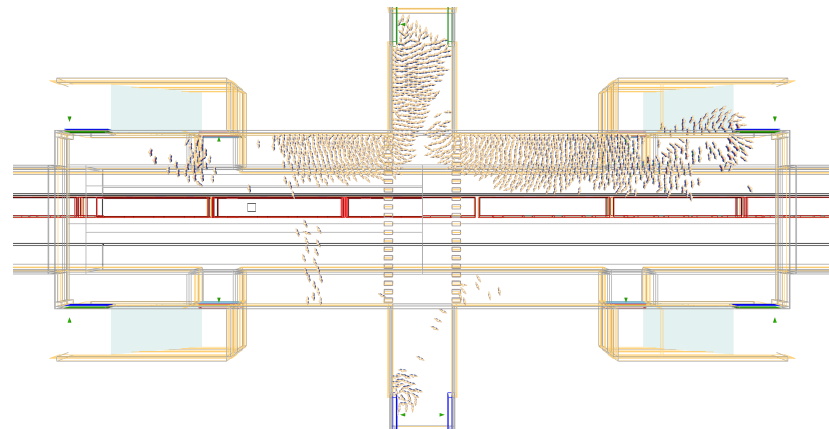




$t = 240 \text{ s}$



$t = 320 \text{ s}$



$t = 400 \text{ s}$

En esta sección se observa la evacuación de los agentes que se realiza en el vestíbulo, durante el incendio generado en el tercer vagón del convoy. Para $T = 80$ segundos, ya existe

5. RESULTADOS

una evacuación que va del anden hacía el vestíbulo, se muestra una ruta que siguen los agentes, con la finalidad de llegar hacia la salida. Para $t = 160$ segundos, el flujo de los agentes que evacúan en el vestibulo se ha incrementado, sin embargo, en algunos puntos el flujo se corta, recordemos que para ese mismo tiempo, la visibilidad es casi nula para casi todo el vestíbulo, por lo que, para los agentes que recién ingresan al vestíbulo, tienen muchas dificultades para seguir el ritmo de los agentes que están cerca de la salida, por lo que su velocidad de evacuación será menor. Para $t = 240$ el flujo de agentes que evacúan por el vestíbulo continúa en aumento y a pesar de la poca visibilidad que existe, el movimiento de los agentes que evacúan por las salidas no es lenta. Para $t = 320$ la evacuación en el vestíbulo de los agentes que buscan las salidas que se encuentran en el extremo superior se mantiene en un movimiento constante, caso contrario a los agentes que buscan evacuar por las salidas que se encuentran en el extremo inferior. Esto puede deberse a que, a pesar de la poca visibilidad, la fila que se genera en la evacuación del vestíbulo hacia la salida superior permite que los agentes puedan movilizarse de manera mas rápida, caso contrario con los agentes que buscan la salida inferior, ya que al no haber un flujo de agentes al cual seguir, a éstos les es muy complicado llegar a la salida. Para $t = 400$ la evacuación de los agentes hacia la salida superior sigue realizandose sin problemas y los agentes que evacúan hacia la salida inferior tienen muchos problemas para continuar un movimiento rápido por la poca visibilidad que hay y por el incremento de temperatura en el vestíbulo.

Conclusiones

Al existir múltiples aperturas en el vestíbulo que permiten una interacción más directa con el andén, provocaron que la dispersión de los humos se realizara con mayor rapidez en el piso del vestíbulo, dando como resultado que exista no solo una mayor concentración de humo en el vestíbulo en comparación al piso del andén, sino también existe un rápido incremento en la temperatura del piso. Como consecuencia, los agentes que aun se encuentren en el piso del andén y estén en proceso de evacuación, tendrán muchas dificultades de localizar la salida debido a poca/nula visibilidad que hay en el vestíbulo y correran el riesgo de verse seriamente afectados por la temperatura y que puedan morir asfixiados producto de los humos tóxicos. Como medida de prevención para evitar una rápida dispersión de humo en el vestíbulo, se recomienda colocar barreras de humos en aquellos lugares del vestíbulo que contengan una conexión directa con el piso del andén. De no existir sistemas de ventilación en las estaciones subterráneas del metro o que éstas se encuentren descompuestas, un accidente que involucre un incendio tendrá consecuencias catastróficas, ya que las entradas a la estación son las únicas medios de ventilación natural y se ubican en el piso del vestíbulo, esto provoca que la trayectoria de las dispersiones del humo sea en dirección a las salidas y coincida con la dirección de la evacuación. La simulación de los agentes es simple y buena para predecir el flujo de una evacuación, sin embargo, es un apartado que aún requiere de trabajo, sobre todo a la hora de tomar decisiones, ya que los agentes de los vagones centrales tomaron la decisión de evacuar por el acceso izquierdo y el en cual debían de pasar muy cerca del vagón en donde se originó el incendio; en un caso real, los pasajeros buscarían la manera de estar lo más lejos posible del incendio.

Trabajo a futuro

El objetivo de este trabajo fué el de simular un incendio en una estación de la ciudad de México en la que ésta careciera de sistemas de ventilación. Este análisis puede ser un punto de partida para el inicio del estudio de incendios en el STS de la ciudad de México, con el fin de crear un plan de contingencia en caso de incendio, con el fin de salvar la mayor cantidad de vidas posibles.

Los siguientes pasos que pueden realizar es el de, con la ayuda de STC Metro, modelar la estación copilco con las medidas reales, además de añadir los sistemas de ventilación y extractor de humo que utilizan, con el fin de generar casos que ayuden a:

Reducir la velocidad de dispersión de los humos en la estación. Modificar la trayectoria de propagación de los humos con el fin de evitar que coincida con las rutas de evacuación.

Finalmente extrapolar el análisis a todas las estaciones del metro, principalmente en aquellas estaciones que tienen conexiones con otras líneas del metro.

Apéndice

8.1. Teorema de la divergencia de Gauss

Sea E una región sólida simple y S la superficie de frontera de E , con orientación positiva (hacia afuera), es decir, el vector normal unitario $\mathbf{n}$ se dirige hacia afuera de E . Sea $\mathbf{F}$ un campo vectorial, cuyas funciones componentes tienen derivadas parciales continuas en una región abierta que contiene E , por lo que:

$$\iint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = \iiint_E \nabla \cdot \mathbf{F} dV \quad (8.1)$$

8.2. Derivada material/total

La descripción lagrangiana se basa en el movimiento de las partículas de fluido. Es la extensión directa de la cinemática de partículas individuales a un campo completo de partículas de fluido que están rotuladas por su ubicación, $\mathbf{r}_0$, en un momento de referencia, $t = t_0$. La posición posterior $\mathbf{r}$ de cada partícula de fluido en función del tiempo, $\mathbf{r}(t; \mathbf{r}_0, t_0)$, especifica el campo de flujo. Aquí, $\mathbf{r}_0$ y t_0 son condiciones de frontera que etiquetan las partículas de fluido, y no son variables independientes.

La descripción euleriana de la cinemática de fluidos se centra en las propiedades del campo de flujo en ubicaciones o regiones de interés, e involucra cuatro variables independientes: las tres coordenadas espaciales representadas por el vector de posición $\mathbf{x}$, y el tiempo t . Por lo tanto, en esta descripción euleriana basada en el campo del movimiento del fluido, una propiedad de campo de flujo $\mathbf{F}$ depende directamente de $\mathbf{x}$ y t , por lo que $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$. Las relaciones cinemáticas entre las dos descripciones pueden determinarse requiriendo igualdad de propiedades de campo de flujo cuando $\mathbf{r}$ y $\mathbf{x}$ se definen el mismo punto en el espacio, ambos se resuelven en el mismo sistema de coordenadas y se determinan en el mismo tiempo t :

$$\mathbf{F}[\mathbf{r}(t; \mathbf{r}_0, t_0), t] = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) \quad (8.2)$$

Ésta ecuación describe la trayectoria seguida por la partícula. Este requisito de compatibilidad forma la base para determinar e interpretar las derivadas del tiempo en la descripción euleriana del movimiento del fluido. De la ecuación 8.2, aplicamos la derivada de tiempo total y utilizamos la regla de la cadena:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{F}[\mathbf{r}(t; \mathbf{r}_0), t_0] = \frac{d}{dt} \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$$

$$\frac{\partial F}{\partial r_i} \frac{\partial r_i}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{d}{dt} \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$$

$$\frac{\partial F}{\partial r_1} \frac{\partial r_1}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial r_2} \frac{\partial r_2}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial r_3} \frac{\partial r_3}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{d}{dt} \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) \quad (8.3)$$

En donde los componentes de $\mathbf{r}$ son r_i . Se puede observar de la ecuación 8.3 que los componentes r_i de la derivada con respecto al tiempo son términos de la velocidad de la partícula $\mathbf{u}$. Además, $\mathbf{x} = \mathbf{r}(t; \mathbf{r}_0, t_0) = \mathbf{r}$, por lo que hacemos una sustitución de términos de la ecuación 8.3 para reescribir completamente la derivada material en el campo euleriano:

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} u_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} u_2 + \frac{\partial F}{\partial x_3} u_3 + \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{d}{dt} \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$$

$$\nabla F \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{D}{Dt} \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) \quad (8.4)$$

8.3. Teorema de Leibinz y el teorema de transporte de Reynolds

El teorema del transporte de Reynolds es la extensión tridimensional del teorema de Leibniz para diferenciar una integral de una sola variable que tiene un integrando dependiente del tiempo y límites dependientes del tiempo. El teorema de transporte de Reynolds es necesario

para desarrollar las versiones diferenciales y de volumen de control de las ecuaciones de conservación para el movimiento de fluidos. Considere una función F que depende de una variable espacial independiente, x y tiempo t . Además, suponga que la derivada temporal de su integral es de interés cuando los límites de integración, a y b , son en sí mismos funciones del tiempo. El teorema de Leibniz establece que la derivada temporal de la integral de $F(x, t)$ entre $x = a(t)$ y $x = b(t)$ es:

$$\frac{d}{dt} \int_{x=a(t)}^{x=b(t)} F(x, t) = \int_a^b \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial b}{\partial t} F(b, t) - \frac{\partial a}{\partial t} F(a, t) \quad (8.5)$$

De la ecuación 8.5, del lado derecho, el segundo término describe la ganancia de F en el límite superior que se mueve a una velocidad $\frac{db}{dt}$ y el tercer término de la derecha es la pérdida de F en el límite inferior que se mueve a una velocidad $\frac{da}{dt}$.

Las características esenciales de la ecuación 8.5 son: la derivada de tiempo total de la izquierda, la integral sobre la derivada de tiempo parcial del integrando de la derecha, y los términos que explican la dependencia temporal de los límites de integración de la derecha. Estas características persisten cuando esta ecuación se generaliza a tres dimensiones.

Considere un volumen en movimiento $V(t)$ que tiene una superficie cerrada $A(t)$ con un vector $\mathbf{n}$ normal en dirección exterior a $A(t)$ y que el vector $\mathbf{b}$ denote la velocidad local de A que se mueve a una razón de cambio Δt . Cuando Δt es lo suficientemente pequeño, el incremento de volumen $\Delta V = V(t + \Delta t) - V(t)$ estará muy cerca de $A(t)$, por lo que el elemento de incremento de volumen adyacente a dA será $(\mathbf{b}\Delta t) \cdot \mathbf{n}dA$. La situación es bastante general. El volumen y su superficie no necesitan coincidir con ningún límite, interfaz o superficie particular. La velocidad $\mathbf{b}$ no necesita ser constante o uniforme sobre $A(t)$. El objetivo es determinar la derivada en el tiempo de la integral de una función continua de un solo valor $F(\mathbf{x}, t)$ en el volumen $V(t)$. El punto de partida es la definición de la derivada temporal:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} F(\mathbf{x}, t) dV = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \int_{V(t+\Delta t)} F(\mathbf{x}, t + \Delta t) dV - \int_{V(t)} F(\mathbf{x}, t) dV \right\} \quad (8.6)$$

El primer término del límite se puede expandir a cuatro términos si utilizamos la definición del incremento del volumen $\Delta V = V(t + \Delta t) - V(t)$ y si utilizamos la expansión de Taylor en la función que se está integrando, quedando $F(\mathbf{x}, t + \Delta t) \cong F(\mathbf{x}, t) + \Delta t \left(\frac{\partial F}{\partial t} \right)$ quedando nuestra expresión como:

$$\begin{aligned}
\int_{V(t+\Delta t)} F(\mathbf{x}, t + \Delta t) dV &= \int_{V(\Delta t)} F(\mathbf{x}, t + \Delta t) dV + \int_{V(t)} F(\mathbf{x}, t + \Delta t) dV \\
&= \int_{\Delta V} F(\mathbf{x}, t) dV + \int_{\Delta V} \Delta t \left(\frac{\partial F(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right) dV + \int_{V(t)} F(\mathbf{x}, t) dV + \int_{V(t)} \Delta t \left(\frac{\partial F(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right) dV
\end{aligned} \tag{8.7}$$

El tercer término de la ecuación 8.7 se cancela con el último término de la derecha de la ecuación 8.6 y la expresión donde están involucrados al mismo tiempo ΔV y Δt tiende a cero, ya que es una expresión de segundo orden y no contruye a la ecuación. Se sustituye 8.7 en 8.6:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} F(\mathbf{x}, t) dV = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \int_{V(t)} \Delta t \left(\frac{\partial F(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right) dV + \int_{\Delta V} F(\mathbf{x}, t) dV \right\} \tag{8.8}$$

Para encontrar la relación entre ΔV y Δt se considera el movimiento de un área pequeña dA . En el tiempo Δt , dA se desplaza un volumen elemental $(\mathbf{b}\Delta t) \cdot \mathbf{n}dA$ para un incremento de volumen ΔV . Además, este pequeño elemento de ΔV se encuentra adyacente a la superficie $A(t)$. Todas estas contribuciones elementales a ΔV pueden sumarse juntas a través de una integral de superficie y, cuando Δt llega a cero, el valor de la integral de $F(x, t)$ dentro de estos volúmenes elementales puede tomarse como el de F en la superficie $A(t)$, por lo tanto:

$$\int_{\Delta V} F(\mathbf{x}, t) dV \cong \int_{A(t)} F(\mathbf{x}, t) (\mathbf{b}\Delta t \cdot \mathbf{n}) dA \tag{8.9}$$

Se sustituye 8.9 en 8.8, se resuelve el límite para llegar al teorema de transporte de Reynolds:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \int_{V(t)} F(\mathbf{x}, t) dV &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \int_{V(t)} \Delta t \left(\frac{\partial F(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right) dV + \int_{A(t)} F(\mathbf{x}, t) (\mathbf{b}\Delta t \cdot \mathbf{n}) dA \right\} \\
\frac{d}{dt} \int_{V(t)} F(\mathbf{x}, t) dV &= \int_{V(t)} \frac{\partial F(\mathbf{x}, t)}{\partial t} dV + \int_{A(t)} F(\mathbf{x}, t) \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} dA
\end{aligned} \tag{8.10}$$

Bibliografía

- Atwell, E. and Khanlou, P. (1995). Baku's metro accident: A challenge to strategize. *Azerbaijan International*.
- Beale, C. J. (2001). Recent railway industry accidents: learning points for the process industries. *ICHEME*. [7](#)
- Bergqvist, A. (2001). Rapport ifrån besöket vid brandplatsen i kaprun, Österrike [report from the visit at the fire scene in kaprun, austria]. [5](#), [6](#)
- Canter, D. and Donald, I. (1990). *Fires and Human Behaviour*. David Fulton, London, second edition. [3](#)
- Carvel, R. and Marlair, G. (2005). *The Handbook of Tunnel Fire Safety: A history of fire incidents in tunnels*. Thomas Telford, London. [4](#), [5](#), [7](#)
- Casalé, E., Doucet, J., Marlier, E., and Forcet, S. (2006). Influence of the natural ventilation on the longitudinal ventilation conditions. *12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. [8](#)
- Channel, N. G. (2004). *Seconds From Disaster: Fire on the Ski Slope*. National Geographic Channel, United States. [6](#)
- Cheong, M., Spearpoint, M. J., and Fleischmann, C. M. (2008). Design fires for vehicles in road tunnels. *Seventh International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*, pages 229–240. [18](#)
- Couton, B. G. D. and Plourde, F. (2017). Smoke spreading analyses in a subway fire scale model. *Elsevier, Tunnelling and Underground Space Technology*, 70:233–239. [8](#), [10](#)
- Cuevas, J. O. (2014). *El metro es de todos*. Sistema de Transporte Colectivo.
- Edelman, T. (2009). Ge security provides solutions to 25 metro lines in china. *Security Industry Association*. [1](#)
- Encyclopedia, W. H. (1995). *1995 Baku Metro fire*. World Heritage Encyclopedia. [5](#)

BIBLIOGRAFÍA

- Fennell, D. (1988). *Investigation into the King's Cross Underground Fire*. London: The Department of Transport. The department of transport. [2](#), [3](#)
- Fridolf, K. (2010). *Fire evacuation in underground transportation systems: a review of accidents and empirical research*. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University. [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#)
- Gutiérrez, J. R. (2008). El sistema de transporte colectivo metro como una solución viable al problema del transporte de la ciudad de México 1994-2006 (tesis de licenciatura).
- Gutiérrez, J. R. (2013). La movilidad de pasajeros en el sistema de transporte colectivo metro 1997-2012 y su repercusión en el área metropolitana de la ciudad de México (tesis de maestría).
- Haack, A. (2005). Technical report - part 1. design fire scenarios. *European Thematic Network Fire in Tunnels*. [18](#)
- Hu, L., Huo, R., and Chow, W. (2009). Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires. *Exp. Thermal Fluid Sci.* [8](#)
- Hurley, M. J., Gottuk, D., Jr., J. R. H., Harada, K., Kuligowski, E., Puchovsky, M., Torero, J., Jr., J. M. W., and Wieczorek, C. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association Quincy, Massachusetts, fifth edition. [21](#), [47](#), [50](#)
- Hwa, H. W. (2004). The progress and controlling situation of daegu subway fire disaster. *International Association for Fire Safety Science*. [7](#)
- Juárez, J. C. S. (2012). La ampliación del sistema de transporte colectivo-metro como solución a los problemas de transporte y vialidad de la zona metropolitana de la ciudad de México (tesis de licenciatura).
- Kirk, D. (2003). Effort to fix responsibility for deadly Korean subway fire. *The New York Times*. [7](#)
- Korhonen, T. (2018). *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac. Technical Reference and User's Guide*. VTT Technical Research Centre of Finland, sixth edition. [18](#)
- Kundu, P. K., Cohen, I. M., and Dowling, D. R. (2016). *Fluid Mechanics*. Elsevier: Academic Press, sixth edition. [21](#)
- Kyriakidis, M., Hirsch, R., and Majumdar, A. (2012). Metro railway safety: An analysis of accident precursors. *Elsevier, Safety Science*, 50:1535–1548. [1](#), [10](#)
- Larsson, S. (2004). *Tunnelolyckan i Kaprun 2000 [The tunnel accident in Kaprun 2000]*. Försvarshögskolan, Stockholm. [5](#), [6](#), [7](#)
- Li, Q., Deng, Y., Liu, C., Zeng, Q., and Lu, Y. (2016). Modeling and analysis of subway fire emergency response: An empirical study. *Elsevier, Safety Science*, 84:171–180. [8](#), [9](#)

- Li, Q., Song, L., List, G. F., Deng, Y., Zhou, Z., and Liu, P. (2017). A new approach to understand metro operation safety by exploring metro operation hazard network (mohn). *Elsevier, Safety Science*, 93:50–61. [9](#)
- Liu, C., Zeng, Q., Duan, H., Zhou, M., Lu, F., and Cheng, J. (2015). E-net modeling and analysis of emergency response processes constrained by resources and uncertain durations. *IEEE Trans. Syst.* [8](#)
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Vanella, M., Weinschenk, C., and Overholt, K. (2017). *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. National Institute of Standards and Technology, sixth edition. [18](#), [41](#)
- McNulty, D. and Rielly, P. (1992). King's cross fire in the london underground: November 18, 1987. *Dept. of Civil Engineering Canterbury University*. [4](#)
- Meng, N., Hu, L., Wu, L., Yang, L., Zhu, S., Chen, L., and Tang, W. (2014). Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station. *Elsevier, Tunnelling and Underground Space Technology*, 40:151–159. [vii](#), [vii](#), [vii](#), [vii](#), [12](#), [18](#), [41](#), [42](#), [43](#), [44](#)
- Meng, N., Wang, Q., Liu, Z., Li, X., and Yang, H. (2017). Smoke flow temperature beneath tunnel ceiling for train fire at subway station: Reduced scale experiments and correlations. *Elsevier, Applied Thermal Engineering*, 115:995–1003. [10](#)
- Meyer, H. J. (2001). The kaprun cable car fire disaster-aspects of forensic organization following a mass fatality with 155 victims. *Elsevier Limited*, pages 1–7. [5](#), [6](#)
- News, B. (2003). Daegu's unanswered questions. *BBC News*. [7](#)
- Palma, A. D. (2003). After korean subway fire, new york rechecks safety. *The New York Times*. [7](#)
- Pan, L. W., Lo, S., xuang Liao, G., and hua Cong, B. (2011). Experimental study of smoke control in subway station for tunnel area fire by water mist system. *Elsevier, Procedia Engineering*, 11:335–342. [8](#)
- Persson, B. W. (1989). *Stora Olyckor: Branden vid Kings Cross tunnelbanestation i London*. Statens räddningsverk, Karlstad. [3](#)
- Roh, J. S., Ryou, H. S., Park, W. H., and Jang, Y. J. (2009). Cfd simulation and assessment of life safety in a subway train fire. *Elsevier, Tunnelling and Underground Space Technology*, 24:447–453. [8](#)
- Rohlen, P. and Wahlström, B. (1996). *Stora olyckor - Tunnelbaneolyckan i Baku, Azerbaijan 28 oktober 1995 [Major accidents - The subway fire in Baku, Azerbaijan 28 october, 1995]*. Statens räddningsverk, Karlstad. [5](#)
- Sandino, J. M. and Castillón, A. (2010). Conservación de masa y ecuación de navier - stokes para un fluido ideal desde la relatividad especial. *Revista Tumbaga*, 5:165–182. [21](#)

BIBLIOGRAFÍA

- Simcox, S., Wilkes, N., and Jones, I. P. (1992). Computer simulation of the flows of hot gases from the fire at king's cross underground station. *Elsevier; Fire Safety Journal*, 18:49–73. [8](#)
- Stec, A., Readman, J., Blomqvist, P., Gylestam, D., Karlsson, D., Wojtalewicz, D., and Dlugogorski, B. (2013). Analysis of toxic effluents released from pvc carpet under different fire conditions. *Elsevier; Chemosphere*, 90:65–71. [19](#)
- Tsujimoto, M. (2003). Issues raised by the recent subway fire in south korea. *International Center for Urban Safety Engineering / Institute of Industrial Science*. [7](#)
- Tsukahara, M., Koshiba, Y., and Ohtani, H. (2011). Effectiveness of downward evacuation in a large-scale subway fire using fire dynamics simulator. *Elsevier; Procedia Engineering*, 26:573–581. [12](#)
- Yan, L., Tong, W., Hui, D., and Zongzhi, W. (2012). Research and application on risk assessment dea model of crowd crushin and trampling accidents in subway stations. *Elsevier; Procedia Engineering*, 43:193–203. [10](#)
- Zamorano, O. F. V. (2013). Investigación sobre el cruce de la línea 12 con periférico oriente (tesis de maestría).
- Zeng, Q. T., Lu, F. M., Liu, C., and Meng, D. C. (2013). Modeling and analysis for crossorganizational emergency response systems using petri nets. *Chinese Journal of Computers*. [8](#)
- Zhang, D. and Hu, H. (2014). An optimization on subway vehicle maintenance using a multi-population generic algorithm. *International Conference on Sustainable Deve*. [10](#)
- Zhang, S., Cheng, X., Yao, Y., Zhu, K., Li, K., Lu, S., Zhang, R., and Zhang, H. (2016). An experimental investigation on blockage effect of metro train on the smoke back layering in subway tunnel fires. *Elsevier; Applied Thermal Engineering*, 99:214–223. [11](#)
- Zhang, X., Deng, Y., Li, Q., Skitmore, M., and Zhipeng (2015). An incident database for improving metro safety: the case of shangai. *Elsevier; Safety Science*, 84:88–96. [1](#), [9](#)
- Zhang, Y., Fang, Y., Huang, X., Xiang, J., and Qin, J. (2007). Experimental study of the interation between the water mists and pvc fire. *Elsevier; Process Safety and Environmental Protection*, 85:39–44. [19](#)