



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA



MÁSTER UNIVERSITARIO EN CONSTRUCCIONES E INSTALACIONES INDUSTRIALES

DISEÑO PRESTACIONAL DE TÚNELES
EN SITUACIÓN DE INCENDIO.
MODELOS FDS.
APLICACIÓN A UN TÚNEL DE METRO.

AUTOR: ANTONIO HOSPITALER PÉREZ
TUTOR: ANTONIO HOSPITALER PÉREZ

Curso Académico: 2015-2016

Resumen

El objeto del presente trabajo final de máster consiste en la aplicación de la metodología del diseño prestacional para la definición de un sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio en un túnel de metro.

Se recurre a esta metodología ya que no es posible realizar el diseño del sistema de ventilación de emergencia basándose en las prescripciones normativas.

En primer lugar se realiza una introducción a la problemática de los incendios en túneles donde se definen motivación, objeto, alcance, objetivos y una introducción a la metodología basado en prestaciones o eficacia que es la adoptada para la elaboración del presente trabajo final de master (TFM). Posteriormente se realiza una introducción histórica de los túneles realizados por el hombre, las tipologías de túneles, sus secciones y sus usos. También se definen los elementos de una sección y las instalaciones de los túneles ferroviarios. Para ello se aborda como los diferentes modelos de la curva de tasa de liberación de calor en túneles de metro a lo largo de la historia, partiendo de modelos empíricos hasta los actuales modelos computacionales. También se analiza la obtención de otros parámetros de los modelos de incendio en túneles como la producción de productos tóxicos derivados de la combustión de la carga de fuego en el interior del túnel. Para abordar el problema se estudiarán métodos de modelado de los escenarios de incendio, centrándose en los modelos de campo y en particular en el software FDS. Una vez definido el software a emplear, se realiza un estudio sobre la ventilación en túneles en particular en túneles de metro. Se estudiarán diferentes sistemas de ventilación de emergencia empleado en túneles. Para abordar el diseño de la instalación de ventilación de emergencia se definirán los conceptos de velocidad crítica y backlayering y se aplicarán para la realización de un diseño de prueba. Se analizará también el modelado del sistema de ventilación elegido para el túnel mediante el software FDS y se realizará un predimensionado de la instalación de ventilación de emergencia.

Por otra parte se definen los conceptos ASET (Available Safety Egress Time) y RSET (Required Safety Egress Time) y se proponen diferentes métodos para el cálculo del RSET eligiéndose el método propuesto por la Guía Europea CFPA No. 19 basado en una simulación computacional. Para realizar esta simulación se empleará el software Pathfinder, explicándose su utilización y se generará un modelo de evacuación.

Finalmente se empleará la formulación prestacional del problema de seguridad en caso de incendio en túneles aplicándolo al caso de una línea de metro ejemplo empleando todos los conceptos introducidos mediante un caso práctico.

Palabras Clave

Tunnel, Subway, Performance Based Fire Engineering, ASET, RSET, Backlayering, Critical Velocity, CFD, FDS6

1. Introducción a la problemática de los incendios en túneles	3
1.1. Motivación	3
1.2. Objeto	7
1.3. Alcance	12
1.4. Objetivos	13
1.5. Metodología diseño prestacional	14
1.6. Organización del trabajo. Capítulos	32
2. Túneles	33
2.1. Introducción	33
2.2. Tipologías de túnel	34
2.3. Tipos de secciones	39
2.4. Secciones tipificadas. Elementos de una sección.	44
2.5. Vías de evacuación en túneles ferroviarios	46
2.6. Instalaciones en túneles ferroviarios	52
3. Modelos de incendio en túneles ferroviarios	63
3.1. Introducción	63
3.2. Obtención de la curva HRR	67
3.3. Obtención de la reacción de incendio	100
3.4. Curvas de diseño	104
3.5. Curvas normalizadas T (t)	113
4. Dinámica de incendio en túneles. Escenarios	117
4.1. Introducción. Modelos de representación de escenarios de incendio.	117
4.2. Modelos de incendios empleados en túneles	118
4.3. Modelos de campo	122
4.4. Fire Dynamic Simulator	125
5. Ventilación en túneles	155
5.1. Introducción	155
5.2. Sistemas de ventilación en túneles	156
5.3. Sistema de ventilación de emergencia	158
5.4. Diseño prestacional de un sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio para túneles de metro.	163
5.5. Velocidad crítica	164

5.6. Predimensionado del sistema de ventilación de emergencia	167
5.7. Diseño de prueba	180
6. Modelo de evacuación. RSET y ASET	203
6.1. Introducción	203
6.2. ASET y RSET. Cálculo del RSET	204
6.3. Software para el modelado de la evacuación (RSET)	217
6.4. Cálculo del RSET para el escenario de incendio de predimensionado del sistema de ventilación de emergencia	223
6.5. Calculo del ASET	233
7. Caso de estudio	235
7.1. Introducción	235
7.2. Presentación del problema	235
7.3. Definición de los escenarios de incendio tipo	243
7.4. Análisis de los resultados	254
7.5. Resultados y conclusiones	422
8. Bibliografía	427

1. Introducción a la problemática de los incendios en túneles

1.1. Motivación

En general un incendio en un túnel produce cuatro efectos adversos: pérdidas de vidas humanas, daños a la infraestructura, interrupción del servicio y en el caso de extinción por medidas activas puede ocasionar daños medioambientales.

A lo largo de la historia se han producido gran cantidad de incendios dentro de túneles de metros siendo alguno de estos incendios fortuitos por causas de diversas índoles, y otros generalmente más graves, provocados (arson fires).

Las principales causas de incendios en túneles de metro se resumen en la siguiente figura [1]:

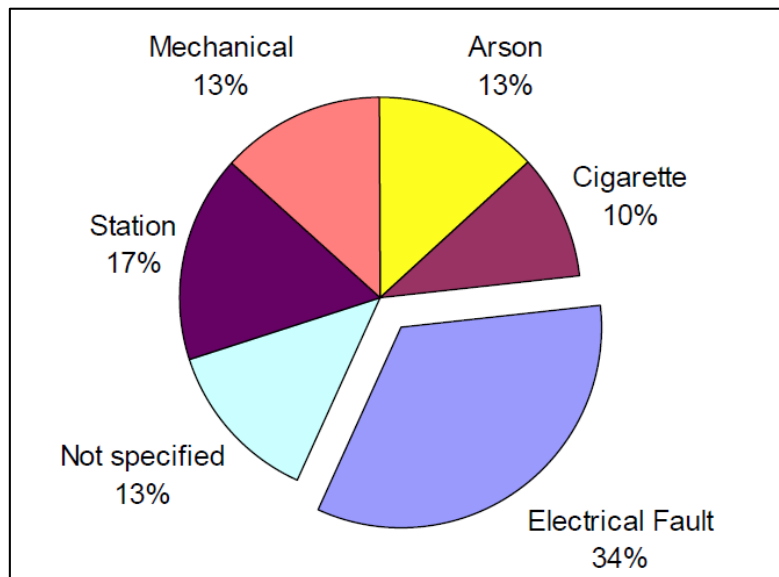


Figura 1. Principales causas de incendios en túneles de metro.

Entre los años 1866 y 214 se han registrado 177 incendios en túneles en 29 países causados por fuegos eléctricos, accidentes de coches, ataques con bombas, incendios, descarrilamientos, colisiones, fuegos provocados, roturas de catenarias, incendios en los motores de las locomotoras entre otras causas [2].

De esos 177 incendios se analizan en la próxima tabla los 28 incendios (1949- 2008) que tuvieron como consecuencias más de 700 muertes, 1000 personas heridas, la pérdida de más de 500 vehículos y una pérdida económica de más de un billón de euros.

De los tres incendios más graves dos fueron producidos en túneles de ferrocarril:

- 1) Incendio del túnel ferroviario del Canal, 1996 (pérdida económica de 250 M €)
- 2) Incendio túnel carretero Mont Blanc, 1999 (39 muertes, pérdida económica 392 M €)
- 3) Incendio túnel ferroviario del Canal, 2008 (pérdida económica 250-286 M €)



Figura 2 . Restos del incendio en el túnel del Canal

En la siguiente tabla se muestran algunos de los incendios más importantes en túneles desde la década de 1990:

Año	Localización/Longitud/Año construcción	País	Evento/Circunstancias / Duración y Temperatura	Pérdidas humanas	Pérdidas Económicas
2008	Túnel ferroviario del Canal. 2x50 km túneles con una vía por túnel. Sección de 7,6 m de diámetro. Construido entre 1988-1994	Francia/UK	Fuego producido en un tren. Duración de 24 horas, 1200°C	0	250-286 M €
2007	Túnel carretero Interestatal 5 Los Ángeles. 167 m longitud. Construido 1975	USA	Incendio de camión con 38 m ³ combustible tras choque por pinchazo	3 muertos 10 heridos	Daños estructural
2007	Túnel carretero Melbourne Burnley. Longitud 3,4 km. Construido 1996-2000	Australia	Colisión múltiple entre 3 camiones y 4 coches. Derivó en una explosión 1000°C	3 muertos.	Poco daño estructura
2003	Metro de Daegu. 25 km. Inauguración 1997-1998	Korea del Sur	Arson en vagón	130 muertos. 140 heridos	410 M € [3]

Año	Localización/Longitud/Año construcción	País	Evento/Circunstancias / Duración y Temperatura	Pérdidas humanas	Pérdidas Económicas
2001	Túnel carretero Gleinalm. 8,3 km. 1978	Austria	Colisión entre dos coches	5 muertos. 4 heridos	No existen datos
2001	Túnel carretero Gotthard . 1980	Suiza	Fuego derivado del choque de dos camiones	11 muertos. 19 heridos	13 coches y 10 camiones destruidos
2000	Funicular Kitzsteinhorn. 10 km, 1974	Austria	Fallo en sistema de calefacción	155 muertos	No existen datos
1999	Túnel carretero Mont Blanc. 11,6 km. 1957-1965	Francia/Italia	Incendio en camión. 53 horas, 1200 °C	39 muertos. Múltiples heridos	392 M €
1999	Túnel carretero Tauern. 6km. 1975	Austria	Accidente de vehículos. 14 horas , 1200°C	12 muertos. 49 heridos	28,5 M €
1998	Túnel carretero Gleinalm. 8,3 km. 1978	Austria	Incendio en autobús	0	Autobús destruido
1996	Túnel ferroviario del Canal. 2x50 km túneles con una vía por túnel. Sección de 7,6 m de diámetro. Construido entre 1988-1994	Francia/UK	Incendio en tren. 10 horas, 1100°C	0	250M €
1996	Túnel carretero Palermo. 148 m. 1972	Italia	Choque entre minibús y camión cisterna	5 muertos. 26 heridos	1 coche, 1 camión cisterna y 1 minibús destruidos
1995	Metro de Baku. 1966	Azerbaiyán	Cortocircuito en vagón	289 muertos. 270 heridos	No existen datos
1995	Túnel carretero Pfander. 6,75 km. 1974-1980	Austria	Colisión entre 1 camión 2 coches y 1 minibús	3 muertos	1 camión 2 coches y 1 minibús destruidos
1994	Túnel carretero Huguenot	Sudáfrica	Incendio en autobús	3 muertos	Daño en la estructura. Túnel cerrado 1 semana

Como puede observarse los incendios producidos en túneles de metro son los que mayor cantidad de pérdidas humanas producen, además de las importantes pérdidas económicas. Las pérdidas económicas no solo se derivan de la destrucción directa de instalación y equipos producida por el incendio sino también por el tiempo durante el cual el metro se encuentra fuera de servicio.

Por tanto la motivación principal de este trabajo es el diseño de un sistema de ventilación de emergencia en un túnel de metro con el objeto de que en caso de incendio, los ocupantes del túnel puedan realizar una evacuación en condiciones de seguridad.

Para el diseño de una instalación de ventilación de emergencia el planteamiento clásico es prescriptivo, basado en limitación de los recorridos de evacuación y en la verificación de la estructura con curvas nominales del tipo $T(t)$.

Cabe resaltar que ni la limitación de recorridos de evacuación garantiza la seguridad de vida ni una curva $T(t)$ como modelo de incendio reproduce las condiciones de desarrollo de incendio asociado a un escenario con un conjunto de instalaciones determinado. Este trabajo tiene un enfoque prestacional lo que requiere de una definición diferente del incendio para poder verificar el cumplimiento del conjunto de metas o estados límite establecidos en el diseño.

1.2. Objeto

El objeto del presente trabajo es el diseño de un sistema de ventilación axial reversible de emergencia en caso de incendio en un túnel de metro de 1,5 km de longitud, situado entre una estación y una boca de túnel. La estación dispone en la entrada y la salida de dos chimeneas de ventilación los cuales también emplean ventiladores axiales reversibles.

El túnel presenta una sección de 10,5 metros de ancho por 6,5 metros de alto. Cuenta con dos plataformas para vías de 2,5 metros de ancho por 0,5 metros de alto y dos pasillos para evacuar los ocupantes anexos a los hastiales de 1,5 metros de ancho por 0,5 metros de canto. En la siguiente figura se muestra la sección del túnel.

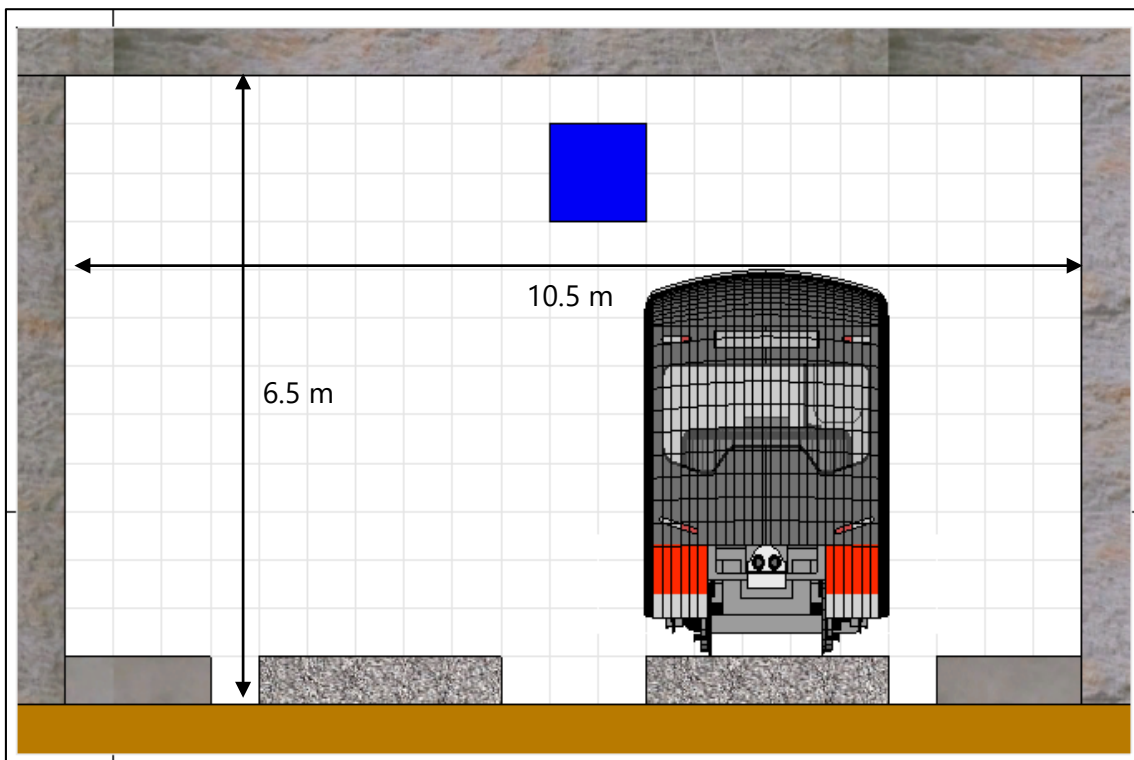


Figura 3. Sección tipo del túnel objeto del trabajo.

El túnel presenta una longitud de 1500 metros desde la entrada del túnel hasta la estación de metro donde finaliza. A la entrada de la estación se bifurcan las vías del túnel para ubicar en cada uno de los extremos de ésta, un sistema de extracción de humos perteneciente a la estación. Estos sistemas están compuestos por dos ventiladores axiales reversibles con una etapa previa de silenciadores tienen como único fin extraer humo de proveniente de un incendio producido en el túnel con el objeto de sacarlo de éste y que en ningún caso el humo llegue a la estación. También se emplearán como sistema de apoyo al sistema de ventilación de emergencia a plantear en el túnel. Por otra parte presenta un sistema de ventilación de salubridad el cual puede emplearse en caso de emergencia para extraer humo en caso de producirse un incendio en la propia estación.

En la siguiente figura se muestra en el modelo computacional la unión entre la el túnel y la estación.



Figura 4. Conexión del túnel con la estación. Ubicación de los ventiladores de extracción con los silenciadores.

En la siguiente figura se muestra el esquema de funcionamiento del sistema de extracción de humos del túnel presente en la conexión entre la estación y el túnel. Como ya se ha dicho el objeto principal de este sistema es no permitir que el humo producido en un incendio en el túnel, entre dentro de la estación, siendo evacuado por el sistema de ventilación hacia la calle.

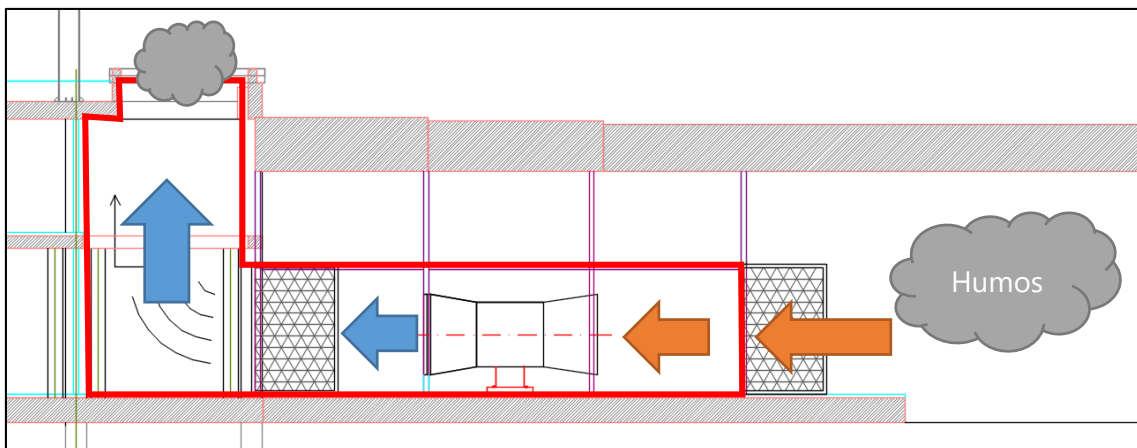


Figura 5. Sección del sistema de extracción de humos del túnel de la estación mediante ventiladores axiales reversibles.

En la siguiente imagen se muestra el sistema de evacuación de humos presente en la estación para que en caso de producirse un incendio en el interior de esta, el humo producido sea evacuado a la calle permitiendo a los ocupantes de la estación evacuar de esta en condiciones de seguridad. Este sistema está compuesto por unos ventiladores axiales reversibles que mediante conductos permiten el trasiego mecánico de aire entre la calle y la estación. Estos ventiladores axiales están preparados para actuar en modo de emergencia trasegando los humos y gases calientes de un eventual incendio producido en la estación hacia la calle, tal como se especifica en la Instrucción de Seguridad de Túneles IST2006 [4].

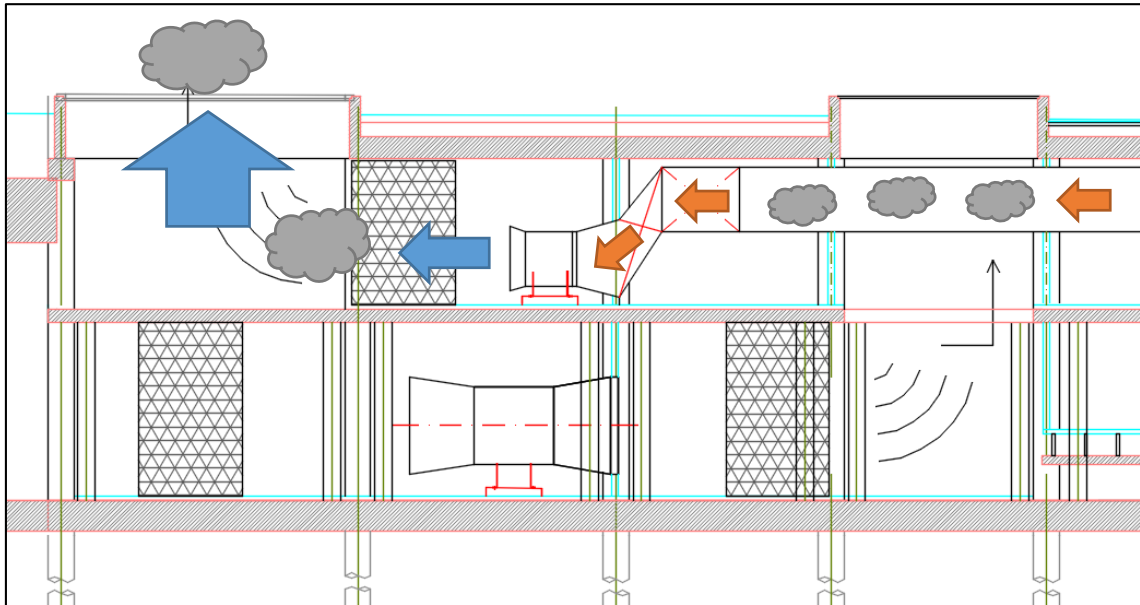


Figura 6. Sección del sistema de extracción de la estación mediante ventiladores axiales reversibles a través de una red de conductos.

Puesto que el objeto del trabajo es el diseño prestacional de túneles en situación de incendio, no se va a diseñar el sistema de ventilación de emergencia de la estación considerándose este como una condición de contorno del problema.

La estación se encuentra ubicada entre las dos vías y presenta las siguientes secciones. En la primera figura se muestra la estación de metro y la calle. Se observa en esta sección la vía de evacuación principal de la estación compuesta por una escalera central. Cabe notar que la estación cuenta con dos escaleras mecánicas adyacentes a la escalera central las cuales no se emplearán para realizar la evacuación.

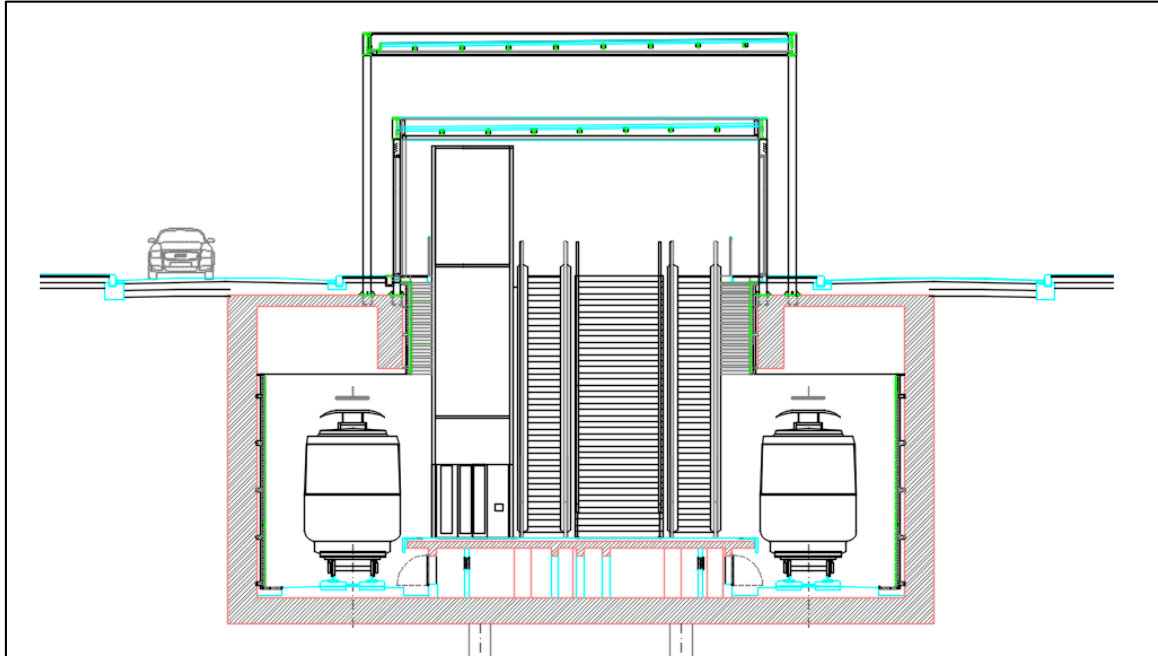


Figura 7. Sección transversal de estación de metro.

En la figura se muestra la sección longitudinal de la estación de metro. Debido a su geometría se presenta con más detalle en las siguientes figuras.

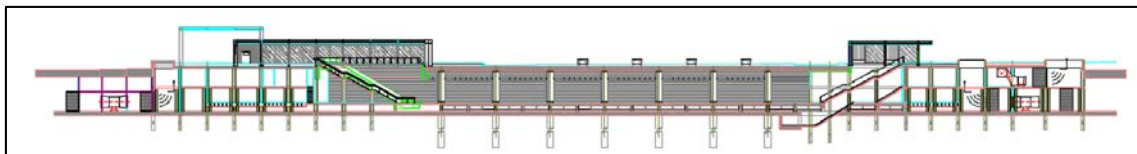


Figura 8. Sección longitudinal de la estación de metro

En la figura se muestra el sistema de ventilación de emergencia encargado de extraer el humo proveniente del túnel para evitar su entrada en la estación. También se muestra la escalera principal de la estación hacia la calle.

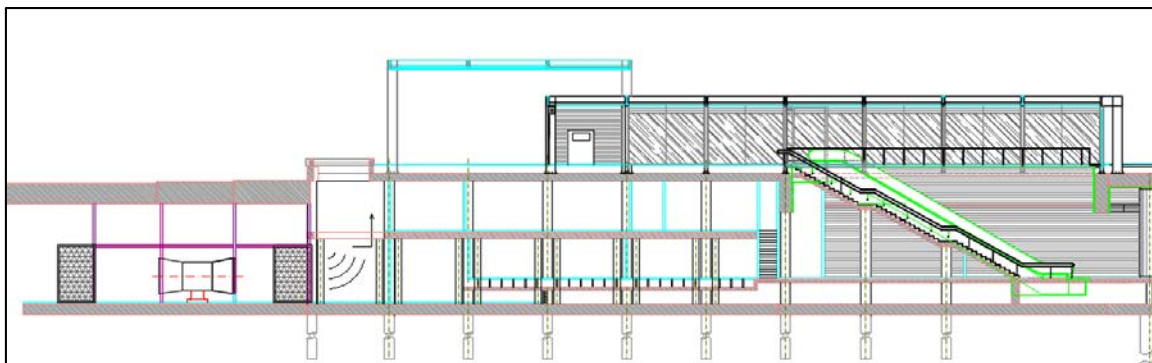


Figura 9. Sección zona conexión túnel (dcha) estación (izq).

En la siguiente figura se muestra el andén de la estación.

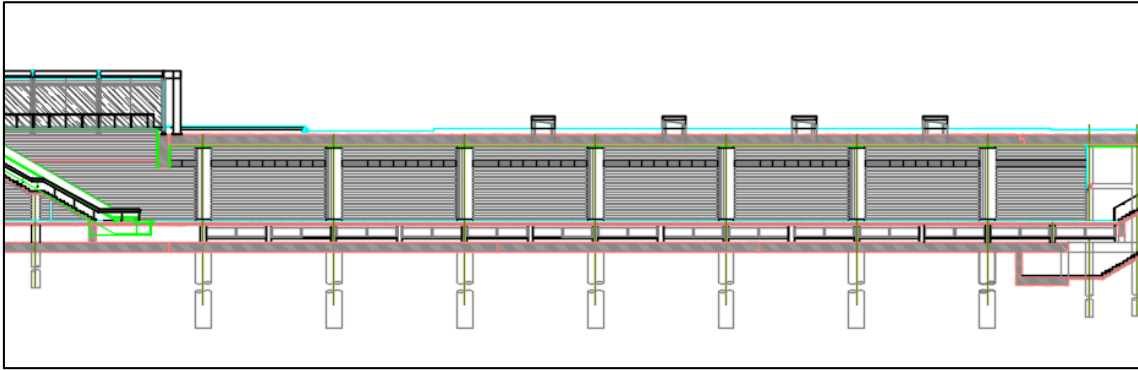


Figura 10. Zona central de la estación donde se encuentra el andén.

En la siguiente figura se muestra la escalera de emergencia de la estación accesible a través de una puerta de emergencia con barra antipánico y la ubicación de los ventiladores axiales reversibles de emergencia encargados de extraer humo y gases calientes de un incendio producido en la estación hacia la calle (resaltado en rojo).

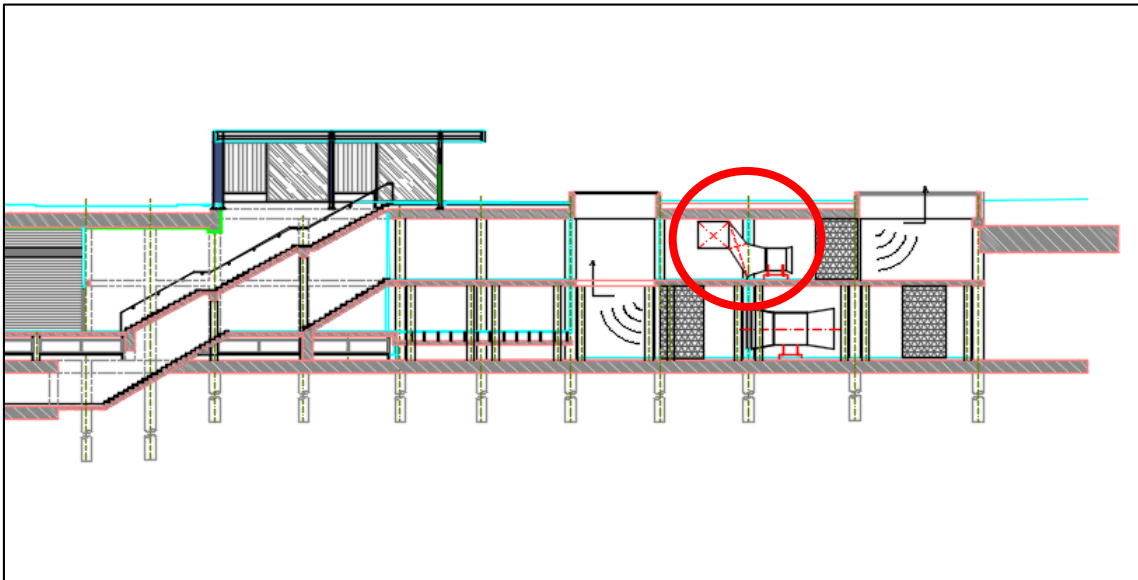


Figura 11. Sección zona final de la estación.

1.3. Alcance

El alcance del proyecto es el diseño de un sistema de ventilación de emergencia compuesto por ventiladores axiales reversibles para la evacuación del humo y gases calientes producidos por el incendio de un vagón de metro en el interior de un túnel de 1.500 metros de longitud.

El diseño consiste en el cálculo y selección del número y tipo de ventiladores axiales así como su disposición y su modo de instalación en el túnel para verificar los criterios de eficacia asociados a la meta de "seguridad de vida" de los ocupantes de un convoy de vehículos de metro en situación accidental de incendio.

Se realizará un diseño de prueba el cual será probado mediante diferentes escenarios de incendio tipo a través de una aplicación CFD (computational fluid dynamics) llamada FDS (Fire Dynamics Simulator) del NIST (National Institute of Standards and Technology).

El modelo de incendio será determinista en el cual se empleará una curva de tasa de liberación de calor HRR en función del tiempo (Heat Release Rate) y el incendio contará con un modelo de combustión asociado que librerá en función del tiempo hollín y otros productos derivados de la combustión.

Se considerará un incendio de una potencia pico o HRR Peak de 15 MW tal y como propone la Instrucción de Seguridad en Túneles IST2006 [4] para este tipo de túneles.

Los diferentes escenarios de incendio, empleados para validar el diseño de prueba, se modelarán mediante volúmenes finitos (FVM) y estarán compuestos por el túnel, la estación y el convoy de metro.

Finalmente se procederá a la elaboración de un informe técnico sobre la eficacia de un sistema de ventilación de emergencia en túneles de metro para la validación de un diseño de prueba como diseño final en el marco de un conjunto de escenario tipo asociados a la infraestructura del túnel.

1.4. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología específica de diseño prestacional para el proyecto de sistemas de ventilación de emergencia en túneles de metro el cual se desarrolla a partir de los siguientes objetivos específicos:

- 1) Estudio del estado del arte en la materia y estudio de la bibliografía y de la normativa de aplicación en el diseño de túneles.
- 2) Estudio de la metodología de diseño prestacional y su aplicación al diseño de túneles.
- 3) Definición de metas, objetivos y criterios para el caso particular de diseño de túneles y en particular para el caso de túneles de metro.
- 4) Estudio de diferentes modelos de incendio y sus elementos en túneles y sus ámbitos de aplicación.
- 5) Conocimiento de las bases científicas de los CFD y en particular las de FDS (Fire Dynamic Simulator)
- 6) Estudio del modelado con FDS a través del pre-procesador Pyrosim de Thunderhead Engineering. Mallas, geometría, superficies, materiales, dispositivos, funciones.
- 7) Definición de los escenarios de incendio y de los escenarios tipo de incendio. Modelado.
- 8) Estudio de los sistemas y equipos de ventilación en túneles
- 9) Sistemas de predimensionado de los equipos. Velocidad crítica. Backlayering.
- 10) Modelado de los equipos de ventilación mediante FDS del NIST. Configuración de diseños de prueba.
- 11) Conocimiento del software de postprocesado y análisis de la información con Smokeview del NIST.
- 12) Conocimiento de los métodos de cálculo del ASET (Available Safe Egress Time) y REST (Required Safe Egress Time)
- 13) Conocimiento del modelado de sistemas de evacuación con el software PATHFINDER de Thunderhead Engineering. Cálculo de REST.
- 14) Elaboración de un informe técnico sobre la eficacia de un sistema de ventilación de emergencia en túneles de metro para la validación de un diseño de prueba como diseño final.

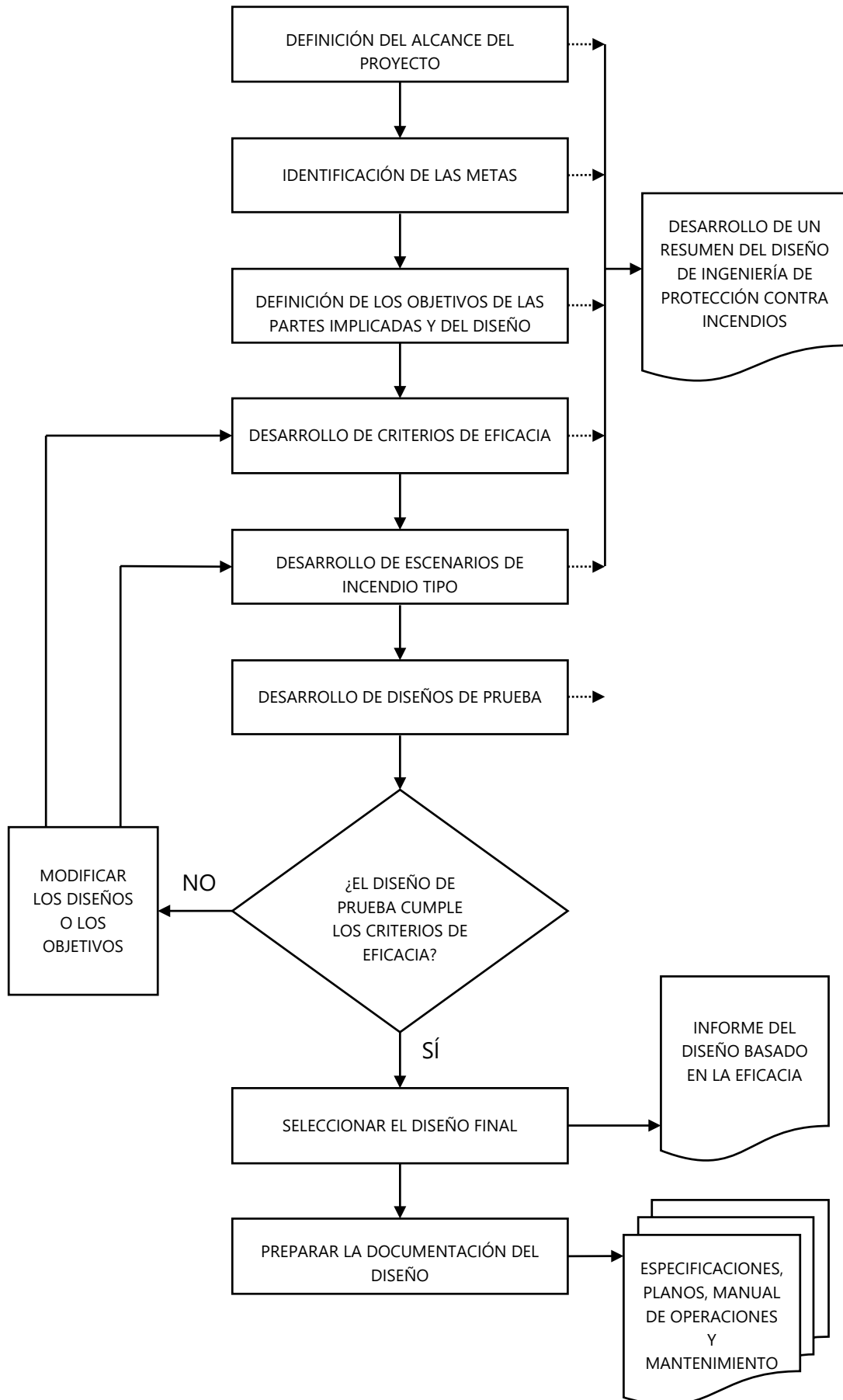
1.5. Metodología diseño prestacional

En primer lugar se debe definir qué es el diseño prestacional también llamado diseño basado en prestaciones, diseño basado en la eficacia (Cepreven) o diseño basado en el desempeño (Latinoamérica). Este concepto proviene de lo que se conoce en el mundo anglosajón como Performance Based Fire Engineering, Performance Based Fire Safety Design y Performance Based Fire Protection.

Tal como se define en *SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection* [5] el diseño prestacional es un enfoque ingenieril de diseño de protección frente al fuego basado en metas y objetivos relativos a la seguridad contra incendios, el análisis de escenarios de incendios desde enfoques tanto determinísticos como probabilísticos (cuál es el peor escenario de incendio y cuál es el más probable) y la evaluación cuantitativa de las alternativas de diseño para lograr las metas y objetivos en protección contra incendios mediante la utilización de herramientas, metodologías y criterios basados en prestaciones aceptados.

El concepto básico del enfoque basado en prestaciones no es prescribir soluciones, sino más bien demostrar que el diseño propuesto o diseño de prueba cumple con los objetivos definidos a través del estudio de diferentes escenarios de incendio tipo, para conformar una vez superados los criterios de aceptación de las metas y objetivos un diseño final. Un enfoque integral basado en prestaciones requiere la capacidad de traducir los objetivos en parámetros o indicadores cuantificables, establecer los límites de estos parámetros y tener medios para estimar el comportamiento de un diseño de prueba para de este modo validar el cumplimiento de los objetivos requeridos.

El diseño prestacional consta de una metodología sólida que tal y como se recoge en la Guía de Ingeniería SFPE de Protección contra Incendios Basada en la Eficacia. Análisis y diseño de edificios [6] presenta el siguiente diagrama de flujo, el cual se empleará durante el desarrollo de este trabajo.



Cabe resaltar que este esquema es una traducción realizada por Cepreven del libro Performance-Based Fire Safety Design [7] por tanto al diseño prestacional o basado en prestaciones se le llama diseño basado en la eficacia o criterios de eficacia.

Del esquema mostrado se desarrolla los siguientes pasos:

- 1) Definición del alcance del estudio.
- 2) Identificación de las metas.
- 3) Definición de los objetivos de las partes implicadas y del diseño.
- 4) Desarrollo de criterios de aceptación.
- 5) Desarrollo de escenarios de incendios tipo.
- 6) Desarrollo de diseños de prueba.
- 7) Desarrollo de un resumen del diseño de ingeniería de protección contra incendios.
- 8) Evaluación de los diseños de prueba.
- 9) Selección del diseño final.
- 10) Documentación de diseño.

Una vez presentado el flujo de trabajo propuesto para un diseño prestacional, se procede a definir los diferentes conceptos que se emplean en el flujo de trabajo del diseño prestacional de acuerdo a la Guía de Ingeniería SFPE de Protección contra Incendios Basada en la Eficacia. Análisis y diseño de edificios [6] :

Alcance del proyecto: Una identificación del rango o extensión de la materia de diseño que se está considerando incluyendo cualquier límite específico de un diseño basado en la eficacia. El proyecto podría ser un subconjunto de mayor desarrollo, evaluación o esfuerzo de diseño o el análisis aislado de seguridad contra incendios y proyecto de diseño [6].

Metas de la seguridad contra incendios: Son los resultados generales de protección contra incendios que se pretenden obtener, expresados en términos cualitativos [6].

Objetivos: Los objetivos son una exigencia del incendio, túnel, sistema u ocupantes que necesita satisfacerse para alcanzar una meta de seguridad contra incendios [6]. Los objetivos se pueden establecer en virtud de la experiencia, o en términos del cumplimiento de las exigencias de las disposiciones de un código específico (basado en prescripciones) o de la autoridad competente. Los objetivos deben ser claros y cuantificables, es decir, traducibles a valores numéricos.

Criterios de aceptación o criterios de eficacia: Los criterios de aceptación son los valores límite, rangos de valores límite o bien distribuciones que se emplean para evaluar los diseños de prueba para una situación de obra dada [6]. Los criterios de aceptación pueden incluir temperaturas de materiales, alturas libres de gases calientes, concentración de humos o niveles de oscurecimiento.

Los criterios de aceptación se definen pues a partir de los objetivos de diseño, ya que éstos carecen de la especificidad exigida para la comparación con los resultados de las valoraciones analíticas de peligro o riesgo. Los criterios de aceptación deben reflejar la intención de los objetivos y deben ser medidas cuantitativas de las consecuencias del incendio que necesitan evitarse para completar los objetivos de las partes implicadas.

Escenarios de incendio tipo: Consiste en un conjunto de condiciones que describen o definen los factores críticos para determinar los resultados de los diseños de prueba [6]. En este trabajo el escenario consta de tres elementos fundamentales, el incendio, el recinto conformado por el túnel y la estación y la ocupación del recinto. Se plantearán diferentes escenarios de incendio basándose en criterios determinísticos y probabilísticos con el objeto de poner a prueba el diseño de prueba.

Diseño de prueba: Es un sistema de protección contra incendios el cual se probará si alcanza las metas de seguridad contra incendios establecidas y que se expresa en términos que hacen posible su valoración [6]. El diseño de prueba que se realizará será el diseño y cálculo del sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio para un túnel de metro y se validará a partir de diferentes escenarios de incendio donde a través de los criterios de aceptación se comprobará que se cumplen los objetivos definidos por las metas del proyecto.

Diseño final: Es el diseño escogido entre todas las pruebas de diseño satisfactorias que se selecciona y escoge para su implantación [6].

Una vez definido el alcance se deben de identificar las metas de seguridad contra incendios y su priorización dentro de un proyecto específico. Estas metas deberán cumplir, al menos, las exigencias básicas planteadas en la normativa de referencia de aplicación al proyecto como la directiva europea de productos de construcción, el CTE [8], la norma IST2006 [4] o la NFPA 130 [9].

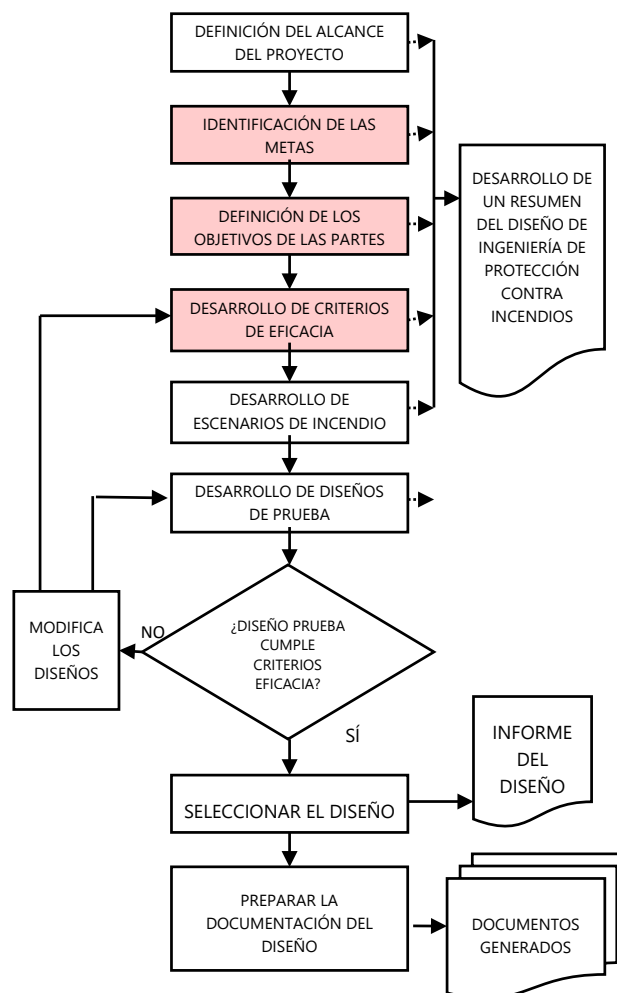
Las metas en el diseño prestacional recogen el conjunto de estados limite que permiten confirmar un diseño de prueba como solución o diseño final en el marco de un conjunto de escenarios tipo de validación. Todo diseño de prueba que verifica las metas de diseño se denomina en terminología de diseño prestacional diseño final.

Este planteamiento permite obtener un conjunto de diseños finales o soluciones, todas aquellas que alcancen las metas establecidas, de entre las que se deberá seleccionar de acuerdo con un conjunto de criterios, como pueden ser económicos, de conservación y mantenimiento, sostenibilidad, constructibilidad, etc.,... el diseño final solución o solución definitiva.

Las metas definen el propósito general de la protección contra incendios y declaran las intenciones de alto nivel relacionadas con la seguridad de las personas, la protección de bienes, la interrupción de las operaciones, la protección del medio ambiente, o la protección del patrimonio histórico y artístico.

Los objetivos son declaraciones más detalladas que describen cómo pueden alcanzarse las metas, típicamente presentadas en términos funcionales o de ingeniería.

Los criterios de aceptación son parámetros que pueden ser estimados, medidos o calculados para demostrar el cumplimiento de los objetivos de diseño (por ejemplo: temperatura máxima, mínimo nivel del estrato de humos sobre el suelo, límites de visibilidad, límites de toxicidad, etc.)



Las metas fundamentales en seguridad contra incendios pueden enunciarse como:

- 1) Minimizar lesiones relacionadas con el incendio y prevenir la pérdida de vidas humanas. Esta meta se conoce como meta de seguridad de vida y afecta tanto a los usuarios de la instalación (viajeros y tripulación) como a los equipos de intervención y rescate (bomberos, sanitarios y protección civil) que actuarían en situación de emergencia. Según el CTE [] esta meta de seguridad de vida consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de la instalación, edificio, vehículo, etc., sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.
- 2) Minimizar daños que cause el incendio al edificio o infraestructura, en el caso de túneles, a sus contenidos, y a sus características históricas y atributos.
- 3) Minimizar las pérdidas económicas derivadas de la paralización de la actividad debido a daños por el incendio.
- 4) Limitar el impacto medioambiental del incendio y de las que pudieran causar las medidas de protección contra incendios adoptadas.

Estas **metas** deberán cumplir al menos las exigencias básicas planteadas en la legislación aplicable IST2006 o NFPA 130. La meta fundamental, seguridad de vida, puede resumirse como "Minimizar los daños personales por incendio y prevenir excesivas pérdidas de vidas"

Una vez establecidas las metas de protección contra incendios, se definen los **objetivos** de las partes implicadas para cumplir las metas de protección contra incendios. Estos objetivos deben ser claros y cuantificables, es decir, traducibles a valores numéricos. Sin embargo, no es posible crear un ambiente completamente libre de riesgo o peligro, por lo que los objetivos no pueden ser tan estrictos que sea imposible cumplirlos y no exista solución alguna que verifique el conjunto de metas.

El siguiente paso en el proceso de diseño por prestaciones requiere la selección de criterios de eficacia que satisfagan los objetivos de diseño, y que se utilizarán para evaluar los diseños de prueba. Los criterios de eficacia son los valores límite, rangos de valores límite o distribuciones que se utilizan para evaluar los diseños de prueba para una situación de diseño dada. Los criterios de diseño pueden incluir temperaturas de materiales, temperaturas de gases, concentraciones de CO, O₂, concentración de humos o visibilidad expresada en metros,...

En este trabajo la meta fundamental consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de los viajeros, tripulación del tren y de los equipos de rescate e intervención sufran daños derivados de un incendio de origen accidental.

Una vez se han establecido las metas de protección contra incendios, se deben definir los objetivos de las partes implicadas para cumplir las referidas metas. Estos objetivos se pueden establecer en virtud de la experiencia, o en términos del cumplimiento de las exigencias de las disposiciones de un código específico (basado en prescripciones) o de la autoridad competente.

En cualquier caso, los objetivos deben ser claros y cuantificables, es decir, traducibles a valores numéricos. Sin embargo, no es posible crear un ambiente completamente libre de riesgo, por lo que los objetivos no pueden ser tan estrictos que sea imposible cumplirlos.

En el estudio específico que nos ocupa, los objetivos correspondientes a las metas identificadas son:

Metas	Objetivos
<p>Meta 1. Seguridad de vida</p> <p>Reducir a límites aceptables el riesgo de que los viajeros y de la tripulación del convoy de vehículos de metro sufran daños derivados de un incendio de origen accidental.</p>	<p><u>Objetivo 1.1</u></p> <p>Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para facilitar la evacuación de los viajeros y de la tripulación.</p> <p style="text-align: center;">ASET > RSET</p> <hr/> <p><u>Objetivo 1.2</u></p> <p>Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para facilitar la intervención de los equipos de intervención y rescate.</p> <p style="text-align: center;">ASRT* > 120'</p>
<p>Meta 2. Seguridad estructural</p>	<p><u>Objetivo 2.1</u></p> <p>Verificar la seguridad estructural en situación accidental de incendio.</p>
<p>Meta 3. Mantenimiento del servicio</p>	<p><u>Objetivo 3.1</u></p> <p>Verificar la seguridad de las instalaciones y de la estructura después de controlado el incendio.</p>
<p>Meta 4. Limitar impacto ambiental</p>	<p><u>Objetivo 4.1</u></p> <p>Verificar la existencia de medidas correctoras en el diseño de la infraestructura para situación accidental de incendio. Recogida separativa.</p>

Tabla 1. Objetivos para la consecución de las metas.

*Se define ASRT (Available Secure Rescue Time) como el tiempo disponible para un rescate seguro.

Los objetivos anteriores se establecen por las partes implicadas, pero para realizar un análisis de ingeniería estos objetivos deben traducirse en valores que puedan ser cuantificados en términos de ingeniería de protección contra incendios. Cada uno de

los objetivos anteriores se traducirá en uno o más objetivos de diseño más concretos hasta que el nivel de concreción adquirida permita su traducción numérica.

En relación con la meta de seguridad estructural la norma IST06 [], en su apartado 3.1.8.2. Protección contra el fuego, establece el siguiente cuadro de nivel de daños

TIPO DE VEHÍCULO INCENDIADO	POTENCIA MÁXIMA DEL INCENDIO (Mw)	DURACIÓN DEL INCENDIO (horas)	AFECCIÓN AL SOSTENIMIENTO/ REVESTIMIENTO	NIVEL DE LOS DAÑOS
Locomotora eléctrica o coche de viajeros	15	1	PROBABLE	MUY BAJO
Locomotora Diesel o vagón de mercancías	30	2	MUY PROBABLE	BAJO
Vagón de mercancías peligrosas	300	4	SEGURA	INTENSO

Tabla 2. Nivel de daños IST2006

Como criterios de proyecto establece los siguientes requisitos generales frente al fuego:

- 1) Todos los materiales susceptibles de exposición al fuego, utilizados en la construcción de túneles y dependencias anejas, deberán tener una reacción al fuego de clase M0 (A1), según la norma UNE 23727. (A1 según el Real Decreto 842/2013)
- 2) Mediante una justificación específica podrán utilizarse materiales de clase M1 (Bs2d0, A2). En ningún caso deberán emitir gases tóxicos.
- 3) Los conductos de ventilación serán capaces de soportar una temperatura de 400 °C durante 2 h sin sufrir daños.
- 4) Elementos estructurales (portantes) del túnel y de las dependencias anejas: estabilidad al fuego de dos horas (EF-120).
- 5) Elementos separadores (incluidas las puertas): resistencia al fuego de dos horas (RF-120).
- 6) Revestimientos de túneles cuyo colapso pueda provocar su inundación, o que soporten directamente las cargas de cimentación de edificios: estabilidad al fuego de cuatro horas (EF-240).

En relación con los métodos de comprobación del comportamiento frente al fuego indica los siguientes cuatro métodos de comprobación:

- 1) Realización de **ensayos** de verificación de la resistencia al fuego, según las normas UNE-EN 1363 (2000) y UNE 23727 correspondientes al tipo de elemento estructural estudiado.
- 2) **Comprobación analítica** de los Estados Límites Últimos. El método más general y completo incluirá los siguientes pasos:
- 3) Utilización de métodos simplificados.
- 4) **Comprobación mediante las tablas** del anejo de recomendaciones para la protección contra el fuego de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), de que los espesores y recubrimientos mecánicos de los elementos estructurales, superan los valores del lado de la seguridad indicados en ellas. Como criterio simplificado variante del anterior, para el proyecto de elementos de revestimiento, se puede adoptar el siguiente:
- 5) Espesor mínimo de pieza: 15 cm.
- 6) Recubrimiento geométrico mínimo de las armaduras de acero: 4 cm para EF-120 y 6 cm para EF-240 (en ambos casos, sin interposición de mallazo).
- 7) Incorporar a la masa de hormigón una proporción de fibras de polipropileno de 2 kg/m³.
- 8) Prestar atención especial al cumplimiento de las relaciones agua/cemento, cuantías geométricas mínimas y condiciones de curado de la Instrucción EHE, a fin de evitar fisuras iniciales por retracción plástica.
- 9) Preferentemente se escogerán barras de armadura de diámetro pequeño, distribuidas uniformemente.
- 10) Prestar atención, en su caso, a las juntas de estanqueidad entre elementos de hormigón, pues si no están bien selladas pueden facilitar la penetración del calor, reduciendo la resistencia al fuego del elemento.

La comprobación de esta meta no se realizara en este trabajo ya que se supone que el proyecto cumple las seis condiciones que se acaban de relacionar además de las condiciones generales derivadas de los criterios de proyecto.

Los objetivos de diseño de la Meta 1, Seguridad de Vida, se recogen en las siguientes tablas adjuntas:

Meta	Objetivos	Objetivos de diseño
<p>Meta 1</p> <p>Reducir a límites aceptables el riesgo de que los viajeros y de la tripulación del convoy de vehículos de metro sufran daños derivados de un incendio de origen accidental</p>	<p>Objetivo 1.1</p> <p>Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para permitir la evacuación segura de los ocupantes del convoy de metro (viajeros y tripulación)</p> <p>ASET > RSET</p>	<p><u>Objetivo 1.1.1</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones de salubridad (tenability) en las vías de evacuación.</p>
		<p><u>Objetivo 1.1.2</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones adecuadas de visibilidad en las vías de evacuación.</p>
		<p><u>Objetivo 1.1.3</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones térmicas adecuadas en las vías de evacuación.</p>
		<p><u>Objetivo 1.1.4</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, limitar una velocidad del aire de ventilación de modo que no dificulte la evacuación.</p>
	<p>Objetivo 1.2</p> <p>Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para facilitar la intervención segura de los equipos de intervención y rescate.</p> <p>ASRT > 120'</p>	<p><u>Objetivo 1.2.1</u></p> <p>Durante el periodo de intervención, garantizar unas condiciones de salubridad, visibilidad y condiciones térmicas (tenability) sobre las vías de acceso/evacuación.</p>
		<p><u>Objetivo 1.2.2</u></p> <p>Durante el periodo de intervención, garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de ventilación.</p>

Tabla 3. Objetivos de diseño derivados de la Meta 1

El siguiente paso en el proceso de diseño por prestaciones implica la selección de criterios de aceptación que permitan alcanzar los objetivos de diseño definidos que se utilizarán para evaluar los diseños de prueba, entendiendo como diseño de prueba el diseño del SCTEH predimensionado propuesto tal como se explicará en el apartado correspondiente.

Los criterios de aceptación son los valores límite, rangos de valores límite o bien distribuciones que se emplean para evaluar los diseños de prueba para una situación de obra dada. Los criterios de aceptación pueden incluir temperaturas de materiales, alturas libres de gases calientes, concentración de humos o niveles de oscurecimiento.

Los criterios de aceptación se definen pues a partir de los objetivos de diseño, ya que éstos carecen de la especificidad exigida para la comparación con los resultados de las valoraciones analíticas de peligro o riesgo. Los criterios de aceptación deben reflejar

la intención de los objetivos y deben ser medidas cuantitativas de las consecuencias del incendio que necesitan evitarse para completar los objetivos de las partes implicadas.

En este estudio específico relacionado con la seguridad en túneles de metro se aplican las normas IST2006 [4] y la norma NFPA 130 [9], cada uno de los objetivos de diseño determinados, dará lugar a uno o varios criterios de aceptación, que se pueden formular en dos formatos: en concentraciones o en FEDs (Fractional Effective Dose).

El índice FED (Fractional Effective Dose) desarrollado por Purser [10], se emplea habitualmente para medir la incapacitación de los ocupantes debida a los gases de combustión, es decir incapacitación por toxicidad. Para cualquier especie tóxica de combustión se aplica la Regla de Haber, que establece que $W = C \cdot t$, donde W es la dosis de incapacitación y t es el tiempo de exposición a una concentración constante C , es decir a menor tiempo mayor concentración y a menor concentración mayor tiempo con un límite superior tal que $W \leq W_{\max}$.

Un valor de FED igual a 0,5 corresponde al umbral límite típico a partir del cual puede considerarse que un ambiente es insalubre para poblaciones adultas, un valor umbral de 0,3 es el valor límite que permite asegurar condiciones adecuadas para el escape de las poblaciones más sensibles. Otro indicador también utilizado es AEGL2 (Acute Exposure Guideline Levels-2) que es la concentración en el aire de una sustancia (expresada en ppm o en mg/m³) por encima de la cual la población general, incluido individuos susceptibles, puede experimentar efectos adversos de larga duración para su salud y un deterioro de la capacidad de escapar.

La norma IST2006 [4] del Ministerio de Fomento establece los siguientes valores límite utilizando un sistema híbrido de límites, FED para CO e indicadores/concentraciones para el resto de variables:

PARÁMETRO	CONDICIONES NORMALES (VALORES MÁXIMOS)	SITUACIÓN DE EMERGENCIA (VALORES MÁXIMOS)
Contenido CO	50 ppm (valor medio en 30 min)	$\sum_{i=1}^n CO_i^{1.036} * t_i < 3 \cdot 10^4$ Siendo CO la concentración en % y t_i el tiempo de exposición
Contenido medio de NOx	0,4 ppm (en 60 min)	---
Coefficiente de extinción (k)	0.005 m ⁻¹	0.4 m ⁻¹
Temperatura del aire	40°C	60°C
Velocidad del aire	10 m/s	10 m/s

Tabla 4. Valores límite de salubridad

Por otra parte, el software que va a emplearse, FDS6 [11] calcula el índice FED teniendo en cuenta el efecto de diferentes especies de combustión de acuerdo con la siguiente expresión:

$$FED_{tot} = (FED_{CO} + FED_{CN} + FED_{NO_x} + FLD_{irr}) \cdot HV_{CO_2} + FED_{O_2} \quad Ec (1.1)$$

Siendo FED_{CO} la fracción de incapacitación por CO que se calcula con la siguiente expresión:

$$FED_{CO} = \int_0^t 2,764 \cdot 10^5 (C_{co}(t))^{1,036} dt \quad Ec (1.2)$$

Donde t se mide en minutos y C_{co} en la concentración de CO en ppm.

La fracción FED_{CN} de incapacitación por CN se calcula con la siguiente expresión:

$$FED_{CO} = \int_0^t \left(\frac{e^{\frac{C_{CN}(t)}{43}}}{200} - 0,0045 \right) dt \quad Ec (1.3)$$

Donde t se mide en minutos y C_{CN} en la concentración de HCN en ppm corregida por el efecto del NO_2 :

$$C_{NC} = C_{HCN} - C_{NO_2} - C_{NO} \quad Ec (1.4)$$

La fracción de incapacitación por dosis de NO_x se calcula con la siguiente expresión :

$$FED_{NO_x} = \int_0^t \frac{C_{NO_x}(t)}{1500} dt \quad Ec (1.5)$$

Donde t se mide en minutos y C_{NO_x} es la suma de concentración de NO y NO_2 en ppm.

La dosis de fracción letal FLD (Fractional Lethal Dose) de irritantes se calcula con la siguiente expresión:

$$FLD_{irr} = \int_0^t \sum_i \left(\frac{C_i(t)}{F_{FLD,i}} \right) dt \quad Ec (1.6)$$

Donde i es un índice sobre las diferentes especies irritantes producto de la combustión; HCL, HBr (Bromuro de Hidrógeno), HF, SO_2 , NO_2 , C_3H_4O (Acroleína) y CH_2O (metanal), $C_i(t)$ es la concentración de cada especie i en ppm y $F_{FLD,i}$ es la exposición a cada especie irritante que causa un efecto letal al 50% de la población. $F_{FLD,i}$ es igual a LC_{50} (concentración que causa efecto letal al 50% de la población a la que se le expone).

	HCl	HBr	HF	SO ₂	NO ₂	C ₃ H ₄ O	CH ₂ O
F _{FLD} (ppm × min)	114000	114000	87000	12000	1900	4500	22500
F _{FIC} (ppm)	900	900	900	120	350	20	30

Tabla 5. FFLD de FDS6. User's Guide pg. 225 [12]

La incapacidad por hipoxia se calcula con la expresión:

$$FED_{O_2} = \int_0^t \frac{1}{e^{8,13-0,54(20,9-C_{O_2}(t))}} dt \quad Ec (1.7)$$

El factor de hiperventilación se calcula a través de la siguiente expresión:

$$HV_{CO_2} = (e^{0,1903 \cdot C_{CO_2}(t) + 2,0004}) / 7,1 \quad Ec (1.8)$$

Donde C_{O₂} y CO₂ concentraciones de O₂ y CO₂ en tanto por ciento por unidad de volumen.

$$FED_{tot} = (FED_{CO} + FED_{CN} + FED_{NO_x} + FLD_{irr}) \cdot HV_{CO_2} + FED_{O_2} \quad Ec (1.9)$$

$$F_{IN} = [(F_{ICO} + F_{ICN} + FLC_{irr}) \times VCO_2 + FED_{IO}] \text{ or } F_{ICO_2} \quad Ec (1.10)$$

Donde la aportación de CO₂ queda definida por la siguiente expresión:

$$F_{ICO_2} = \left\{ \exp[6.1623 - 0.5189 \times [CO_2]] \right\}^{-1} \quad Ec (1.11)$$

La NFPA130 [9] en la edición de 2017 simplifica el uso de los índices FED y en su apartado B.2.2.1. y establece que la exposición térmica puede conllevar amenaza para la vida en tres formas básicas: (1) Hipertermia, (2) Quemaduras superficiales y (3) Quemaduras en el tracto respiratorio.

Para empleo en modelos de seguridad de vida, debidos a la exposición al calor de incendios, es necesario considerar dos criterios: el umbral de quemaduras cutáneas y la exposición a la cual la hipertermia es suficiente para ocasionar deterioro mental y por tanto riesgo de subsistencia. Las quemaduras por calor del tracto respiratorio por inhalación de aire que contiene menos del 10% de vapor de agua no se producen en ausencia de quemaduras en la piel o la cara; por tanto, los límites de habitabilidad para las quemaduras cutáneas son inferiores a las quemaduras del tracto respiratorio. Las quemaduras del tracto respiratorio pueden producirse por inhalación de aire que está saturado con vapor de agua a más de 60°C (140°F).

Mode of heat transfer	Intensity	Tolerance time
Radiation	$<2.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$	$>5 \text{ min}$
	$2.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$	30 s
	$10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$	4 s
Convection	$<60 \text{ }^\circ\text{C}$ 100 % saturated	$>30 \text{ min}$
	$100 \text{ }^\circ\text{C}$ $<10 \text{ \% H}_2\text{O}^a$	12 min
	$120 \text{ }^\circ\text{C}$ $<10 \text{ \% H}_2\text{O}$	7 min
	$140 \text{ }^\circ\text{C}$ $<10 \text{ \% H}_2\text{O}$	4 min
	$160 \text{ }^\circ\text{C}$ $<10 \text{ \% H}_2\text{O}$	2 min
	$180 \text{ }^\circ\text{C}$ $<10 \text{ \% H}_2\text{O}$	1 min

Tabla 6. Condiciones límite de salubridad por calor BRE.

El límite de habitabilidad para exposición cutánea al calor radiante es aproximadamente de $2,5 \text{ kW/m}^2$. Por debajo de este nivel de calor la exposición puede ser tolerada durante 30 minutos o más sin que afecte de forma significativa al tiempo disponible para evacuar. Por encima de este umbral, el tiempo para quemaduras cutáneas debido al calor radiante o tiempo de incapacitación por radiación t_{rad} decrece rápidamente según la ecuación:

$$t_{\text{rad}} = 1,33 \cdot q^{-1,35} \quad \text{Ec (1.12)}$$

Donde t es el tiempo en minutos y q es el flujo de calor radiante en kW/m^2 .

Como con los gases tóxicos, puede considerarse que un ocupante expuesto durante un periodo de tiempo acumula una dosis de calor radiante. La fracción de dosis equivalente (FED) de calor radiante acumulado por minute es el inverso de t_{rad} . Una radiación de $2,5 \text{ kW/m}^2$ podría corresponder a una temperatura superficial de la fuente de aproximadamente 200°C .

El cálculo del tiempo de incapacitación bajo condiciones de exposición a calor de convección desde aire conteniendo menos del 10% de vapor de agua puede realizarse usando las ecuaciones B.2.1. I.b o B.2.1. Ic. Como con los gases tóxicos, un ocupante expuesto durante un periodo de tiempo puede considerarse que acumula una dosis de calor de convección. La fracción de dosis equivalente (FED) de calor radiante acumulado

por minuto es el inverso de $t_{I_{conv}}$. El calor de convección acumulado por minute depende de hasta qué punto está vestido el ocupante y de la naturaleza de la ropa. Para personas completamente vestidas se sugiere la ecuación:

$$t_{I_{conv}} = (4,1 \cdot 10^8) \cdot T^{-3,61} \quad Ec (1.13)$$

Donde $t_{I_{conv}}$ es el tiempo en minutos y T es la temperatura en °C en minutos

Puede considerarse que un ocupante expuesto adquiere una "dosis" acumulada al cabo de un periodo de tiempo. Una exposición corta a un elevado flujo de calor radiante es menos tolerable que una larga exposición a un flujo de calor o a una temperatura más bajos. Puede aplicarse una metodología basada en la suma de FEDs parecida a la que se usa con los gases tóxicos e irritantes. Suponiendo que la temperatura en el incendio es estable o se incrementa, el total de la fracción de dosis equivalente de calor adquirida durante la exposición puede calcularse con las siguientes expresiones:

A partir de las expresiones del tiempo de incapacitación por radiación Ec (1.12) y el tiempo de incapacitación por convección, en la NFPA 130 versión de 2017 se determina el FED térmico a partir de la siguiente ecuación:

FED térmico NFPA 130 (2017)	
Tiempo de incapacitación por radiación	Tiempo de incapacitación por convección
$t_{I_{rad}} = 1,33 \cdot q^{-1,35}$	$t_{I_{conv}} = (4,1 \cdot 10^8) \cdot T^{-3,61}$
$FED_T = \sum_{t_1}^{t_2} \left[\frac{1}{t_{I_{rad}}} + \frac{1}{t_{I_{conv}}} \right] \cdot \Delta t \leq 0,3 \quad Ec (1.14)$	

Tabla 7. Determinación del ED térmico NFPA 130 2007

Si la radiación es inferior a 2,5 kW/m², el término de radiación puede considerarse cero. Un valor de FED_T=0,3 representa el umbral de incapacitación.

El contenido de monóxido de carbono (CO) en aire máximo permitido adopta los valores como sigue:

- | | | |
|------------|-------------|--|
| (1) Máximo | de 2000 ppm | en unos pocos segundos |
| (2) Media | ≤ 1150 ppm | para los primeros 6 minutos de exposición |
| (3) Media | ≤ 450 ppm | para los primeros 15 minutos de exposición |
| (4) Media | ≤ 225 ppm | para los primeros 30 minutos de exposición |
| (5) Media | ≤ 50 ppm | para el resto de exposiciones. |

En términos de FED la dosis de CO puede expresarse como:

$$FED_{CO} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{[CO]}{35000} \cdot \Delta t \quad Ec (1.15)$$

Este FED también debe ser menor que 0,3 para evitar la incapacitación de los ocupantes.

Time (min)	Tenability Limit		
	AEGL 2	0.3	0.5
4	–	1706	2844
6	–	1138	1896
10	420	683	1138
15	–	455	758
30	150	228	379
60	83	114	190
240	33	28	47

Tabla 8. Máxima exposición a monóxido de carbono. NFPA 130-2017

Otros indicadores relacionados con el cumplimiento de los objetivos de la meta Seguridad de Vida quedan definidos a continuación.

- 1) Los niveles de oscurecimiento por humo deberán mantenerse por debajo de una concentración o coeficiente de extinción tal que sea discernibles a 30 m una señal iluminada a 80lx y a 10m las puertas y paredes.
- 2) Las velocidades de aire en vías de tren cerradas deberán estar comprendidas entre 0.75 m/s y 11.0 m/s
- 3) Los niveles de ruido deberán ser como máximo 115dB durante unos pocos segundos y un máximo 92dB para el resto de la exposición.
- 4) Según la guía CFP-19 para una concentración de O₂ inferior al 17% se puede producir asfixia por CO₂. Se adopta un límite del 18%.
- 5) Para la elaboración de los criterios se adopta un tiempo máximo de evacuación de 12 minutos lo que corresponde a un recorrido máximo de 750m a una velocidad de 1,0416 m/s de acuerdo con la norma IST06.

A continuación en las tablas siguientes se va a presentar los diferentes criterios de aceptación para la verificación de los objetivos del cumplimiento de las diferentes metas.

La primera tabla hace referencia a valores límite de los criterios de aceptación mientras que la segunda tabla emplea los FED para la verificación de los criterios de aceptación.

Metas	Objetivos	Objetivos de diseño	Criterios de Aceptación (Concentraciones)	
<p>Meta 1</p> <p>Reducir a límites aceptables el riesgo de que los viajeros y de la tripulación del convoy de vehículos de metro sufran daños derivados de un incendio de origen accidental</p>	<p>Objetivo 1.1 Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para permitir la evacuación segura de los ocupantes del convoy de metro (viajeros y tripulación)</p> <p>ASET > RSET</p>	<p><u>Objetivo 1.1.1</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones de salubridad (tenability) en las vías de evacuación.</p>	<p><u>Criterio A</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de oxígeno (O₂) no inferior al 18% a 2,00 metros de altura. CFPA-19</p> <p><u>Criterio B</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de monóxido de carbono (CO) inferior a 450 ppm a 2,00 metros de altura. NFPA 130. B.2.1.1</p> <p><u>Criterio C</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de dióxido de carbono (CO₂) inferior a 0,03 mol/mol a 2,00 metros de altura.</p>	
		<p><u>Objetivo 1.1.2</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones adecuadas de visibilidad en las vías de evacuación</p>	<p><u>Criterio D</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar un nivel de visibilidad por encima de los 10m. a 2,00 metros sobre el suelo.</p>	
		<p><u>Objetivo 1.1.3</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones térmicas adecuadas en las vías de evacuación.</p>	<p><u>Criterio E</u> Durante el periodo de evacuación, garantizar una temperatura inferior a 60°C a 2,00 metros de altura. NFPA 130. ANEXO B.2.1.1.</p> <p><u>Criterio F</u> Durante el periodo de evacuación, limitar la radiación incidente a 2,5 kW/ a 2,00 metros de altura en las vías de evacuación. NFPA 130. ANEXO B.2.1.1.</p>	
		<p><u>Objetivo 1.1.4</u> Durante el periodo de evacuación, limitar una velocidad del aire de ventilación de modo que no dificulte la evacuación.</p>	<p><u>Criterio G</u> Durante de evacuación, limitar la velocidad del viento en contra de la dirección de evacuación a 11m/s. NFPA130. B.2.1.4</p>	
		<p>Objetivo 1.2 Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para facilitar la intervención segura de los equipos de intervención y rescate.</p> <p>ASRT > 120'</p>	<p><u>Objetivo 1.2.1</u> Durante el periodo de intervención, garantizar unas condiciones de salubridad, visibilidad y condiciones térmicas (tenability) sobre las vías de acceso/evacuación.</p>	<p><u>Criterio H</u> Asegura que no haya retroceso de la capa de humos (backlayering) durante el periodo de intervención estimado, 120'</p> <p><u>Criterio I</u> Asegurar un nivel de presión sonora inferior a 92 dB. NFPA 130</p>
			<p><u>Objetivo 1.2.2</u> Durante el periodo de intervención, garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de ventilación.</p>	<p><u>Criterio J</u> Asegurar que la temperatura que alcanzan los equipos de ventilación es inferior a 400°C durante 120' IST06</p>

Tabla 9. Definición de los criterios de aceptación derivados de la Meta 1 Seguridad de Vida

Metas	Objetivos	Objetivos de diseño	Criterios de Aceptación (FEDs)
<p>Meta 1</p> <p>Reducir a límites aceptables el riesgo de que los viajeros y de la tripulación del convoy de vehículos de metro sufran daños derivados de un incendio de origen accidental</p>	<p>Objetivo 1.1</p> <p>Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para permitir la evacuación segura de los ocupantes del convoy de metro (viajeros y tripulación)</p> <p>ASET > RSET</p>	<p><u>Objetivo 1.1.1</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones de salubridad (tenability) en las vías de evacuación.</p>	<p><u>Criterio A-B-C</u></p> <p>FED_{co} < 0,3 NFPA 130</p> <p>FED_{tot} < 0,3</p>
		<p><u>Objetivo 1.1.2</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones adecuadas de visibilidad en las vías de evacuación</p>	<p><u>Criterio D</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, garantizar un nivel de visibilidad por encima de los 10 m. a 2,00 metros sobre el suelo. NFPA 130. B.2.1.3.</p>
		<p><u>Objetivo 1.1.3</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones térmicas adecuadas en las vías de evacuación.</p>	<p><u>Criterio E-F</u></p> <p>FED_T < 0,3</p>
		<p><u>Objetivo 1.1.4</u></p> <p>Durante el periodo de evacuación, limitar una velocidad del aire de ventilación de modo que no dificulte la evacuación.</p>	<p><u>Criterio G</u></p> <p>Durante de evacuación, limitar la velocidad del viento en contra de la dirección de evacuación a 11m/s. NFPA 130. B.2.1.4</p>
	<p>Objetivo 1.2</p> <p>Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para facilitar la intervención segura de los equipos de intervención y rescate.</p> <p>ASRT > 120'</p>	<p><u>Objetivo 1.2.1</u></p> <p>Durante el periodo de intervención, garantizar unas condiciones de salubridad, visibilidad y condiciones térmicas (tenability) sobre las vías de acceso/evacuación.</p>	<p><u>Criterio H</u></p> <p>Asegura que no haya retroceso de la capa de humos (backlayering) durante el periodo de intervención estimado, 120'</p>
			<p><u>Criterio I</u></p> <p>Asegurar un nivel de presión sonora inferior a 92 dB. NFPA 130</p>
		<p><u>Objetivo 1.2.2</u></p> <p>Durante el periodo de intervención, garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de ventilación.</p>	<p><u>Criterio J</u></p> <p>Asegurar que la temperatura que alcanzan los equipos de ventilación es inferior a 400°C durante 120' IST06.</p>

Tabla 10. Definición de los criterios de aceptación derivados de la Meta 1 Seguridad de Vida mediante FEDS

1.6. Organización del trabajo. Capítulos

Este trabajo final de master se organiza en 8 capítulos los cuales quedan definidos a continuación:

1. Introducción a la problemática de los incendios en túneles. El primer capítulo corresponde a la introducción donde se definen motivación, objeto, alcance, objetivos y una introducción a la metodología basado en prestaciones o eficacia que es la adoptada para la elaboración del presente trabajo final de master (TFM)
2. Túneles. En este capítulo realiza una introducción histórica de los túneles realizados por el hombre, las tipologías de túneles, sus secciones, sus ámbitos de aplicación. También se definen los elementos de una sección y las instalaciones de los túneles ferroviarios.
3. Modelos de incendios en túneles. En este capítulo se aborda cómo se han definido los diferentes modelos de la curva de tasa de liberación de calor en túneles de metro a lo largo de la historia, partiendo de modelos empíricos hasta los actuales modelos computacionales. También se analiza la obtención de otros parámetros de los modelos de incendio en túneles como la producción de productos tóxicos derivados de la combustión de la carga de fuego en el interior del túnel.
4. Dinámica de incendio en túneles. Escenarios. Este capítulo trata de métodos de modelado de los escenarios de incendio centrándose en los modelos de campo y en particular en el software FDS.
5. Ventilación en túneles. Este capítulo aborda la ventilación en túneles en particular en túneles de metro. Se estudiarán diferentes sistemas de ventilación de emergencia empleados en túneles. Se definirán los conceptos de velocidad crítica y backlayering y se aplicarán para la realización de un diseño de prueba. En este capítulo se analizará también el modelado del sistema de ventilación elegido para el túnel mediante el software FDS. Este capítulo finaliza con el predimensionado de la instalación de ventilación de emergencia.
6. Cálculo ASET y RSET. En el capítulo sexto se definen los conceptos ASET (Available Safety Egress Time) y RSET (Required Safety Egress Time). Se proponen diferentes métodos para el cálculo del RSET eligiéndose el método propuesto por la Guía Europea CFP no 19 [13] basado en una simulación computacional. Para realizar esta simulación se empleará el software Pathfinder, explicándose se utilización y se generará un modelo de evacuación.
7. Caso de estudio. Formulación prestacional del problema de seguridad en caso de incendio en túneles. Aplicación al caso de una línea de metro ejemplo. En el capítulo séptimo se procederá a aplicar todos los conceptos introducidos mediante un caso práctico.
8. Bibliografía. El octavo y último capítulo recoge la bibliografía consultada para la redacción del presente trabajo de fin de master.

2. Túneles

2.1. Introducción

Los túneles son obras subterráneas de carácter lineal ejecutadas para salvar accidentes geográficos como montañas o lagos o núcleos urbanos. La finalidad de un túnel es el transporte de personas o bienes mediante diferentes tipos de vehículos.

En particular los túneles de metro son una tipología de túnel ferroviario, de carácter urbano y cuyo fin es el transporte de pasajeros entre dos puntos.

El primer túnel obra de un ingeniero, fue ejecutado en la Isla de Samos y contaba con un kilómetro de longitud. Su diseñador fue Eupalino de Megara, hijo de Naustrofo. El citado túnel fue ejecutado en el 530 a.C. y se empleó para el abastecimiento de agua a la capital de la isla a través del monte Kastro llegándose a considerar una de las tres maravillas del mundo Heleno [14].



Figura 12. Túnel de Eupalino. Zach Marshall.

A lo largo de la historia se han empleado los túneles con diferentes propósitos. Los Egipcios empleaban los túneles como monumentos funerarios, en el Imperio Romano se emplearon túneles como galerías mineras, para el abastecimiento de agua o para canalizar las aguas residuales mediante un sistema de alcantarillado.

La topología de los túneles se reduce a cruces, giros y bifurcaciones, siendo durante el diseño de trazado de las líneas uno de los objetivos, el simplificar al máximo la geometría.

Es fundamental antes de iniciar la construcción de un túnel de metro la realización de un estudio geotécnico. A partir de este estudio se determinará que sistemas constructivo es el óptimo para llevar a cabo a la ejecución del túnel, y a la postre determinará la tipología de sección que presentará el túnel.

A continuación se presentan algunas tipologías de túnel mediante diferentes clasificaciones:

Uso:

Entre los usos más frecuentes de los túneles se encuentran los túneles de transporte de vehículos (túneles carreteros o ferroviarios) túneles para peatones, túneles mineros, túneles para transporte de aguas (abastecimiento o aguas sucias) o incluso el almacenamiento de residuos.

En este trabajo se estudiarán los túneles ferroviarios y en particular los túneles de metro.



Figura 14 Túnel carretero.



Figura 15. Túnel ferroviario de doble vía.



Figura 16. Túnel para peatones.



Figura 17. Túnel con rail para mina.



Figura 18. Túnel hidráulico.



Figura 19. Alcantarillado.



Figura 20. Túnel para almacén de residuos.



Figura 21. Galería de servicio. UJI.Castellón

Profundidad:

En función de la profundidad del túnel se pueden clasificar de la siguiente manera. Cabe notar que los túneles de metro presentarán una profundidad superficial o poco profunda la línea de metro más profunda del mundo la de San Petersburgo con una profundidad de hasta 110 metros.

Superficiales: Cobertura menor a los 50 m.

Poco Profundos: Profundidad se encuentran entre 50 y 200 m.

Medianamente profundos: Cuando la cobertura está entre 200 y 500 m.

Profundos: La cobertura oscila entre 500 y 1000 m.

Muy profundos: La cobertura es superior a los 1000 m.

Longitud:

De acuerdo con la Instrucción de seguridad en túneles IST2006 [4] en función de la longitud del túnel se presenta la siguiente clasificación para túneles ferroviarios. A efectos de la Instrucción IST2006 se considera como longitud del túnel la distancia entre sus bocas a cielo abierto, por lo que las estaciones subterráneas forman parte de su longitud.

LONGITUD DEL TÚNEL (L)	
Cortos	$300 \text{ m} < L \leq 1.500 \text{ m}$
Medios	$1.500 \text{ m} < L \leq 6.000 \text{ m}$
Largos	$6.000 \text{ m} < L \leq 10.000 \text{ m}$
Singulares	$L > 10.000 \text{ m}$

Tabla 11. Clasificación de los túneles en función de su longitud.

Intensidad de tráfico prevista:

De acuerdo con la Instrucción de seguridad en túneles IST2006 [4] en función del número de circulaciones al día y la tipología de vehículos se presenta la siguiente clasificación para túneles ferroviarios.

INTENSIDAD DE TRÁFICO PREVISTA (I)	
Muy alta	> 200 circulaciones/día. En su mayoría tráfico de viajeros y eventualmente de mercancías.
Media-alta	Entre 50 y 200 circulaciones/día.
Baja	< 50 circulaciones/día.

Tabla 12. Clasificación de los túneles en función de su intensidad de tráfico.

Nivel de explotación:

En función de la intensidad de tráfico y la longitud del túnel, la instrucción de seguridad IST2006 [4] clasifica los túneles en función de su nivel de riesgo de explotación. En la siguiente tabla se presenta la caracterización del nivel de explotación en función del tráfico y la longitud:

NIVEL DE EXPLOTACIÓN SEGÚN TIPO DE TÚNEL				
Longitud del túnel		Intensidad de tráfico prevista		
		Muy alta ($I > 200$)	Media-alta ($200 \geq I \geq 50$)	Baja ($I < 50$)
Cortos	$L \leq 1.500 \text{ m}$	II*	II	III
Medios	$1.500 \text{ m} < L \leq 6.000 \text{ m}$	I*	II**	II
Largos	$6.000 \text{ m} < L \leq 10.000 \text{ m}$	I*	I	I
Singulares	$L > 10.000 \text{ m}$	I*	I*	I*

* Pueden requerir medidas adicionales a las de esta Instrucción.
** En líneas con trenes de alta ocupación (≥ 1.000 viajeros/tren) se considerarán de tipo I.

Tabla 13. Clasificación del nivel de explotación en función del tráfico y la longitud del túnel.

Cabe señalar que el caso particular de los túneles de metros presentan una intensidad de tráfico que oscila entre media-alta a muy alta en función del tipo de línea y por su tipología constructiva presentan largas longitudes presentando un nivel de explotación Nivel I.

Los niveles de explotación son los siguientes:

Nivel I: Túneles que por sus especiales condiciones requieren una organización específica y permanente para el control y vigilancia de sus instalaciones. Estos túneles dispondrán de una sala de control donde se recogerá y explotará toda la información procedente de las diversas instalaciones.

Nivel II: Túneles que requieren ciertas instalaciones y una vigilancia particular con respecto al resto del trazado.

Nivel III: Túneles cortos o de poco tráfico, que no requieren ningún tipo de instalación específica.

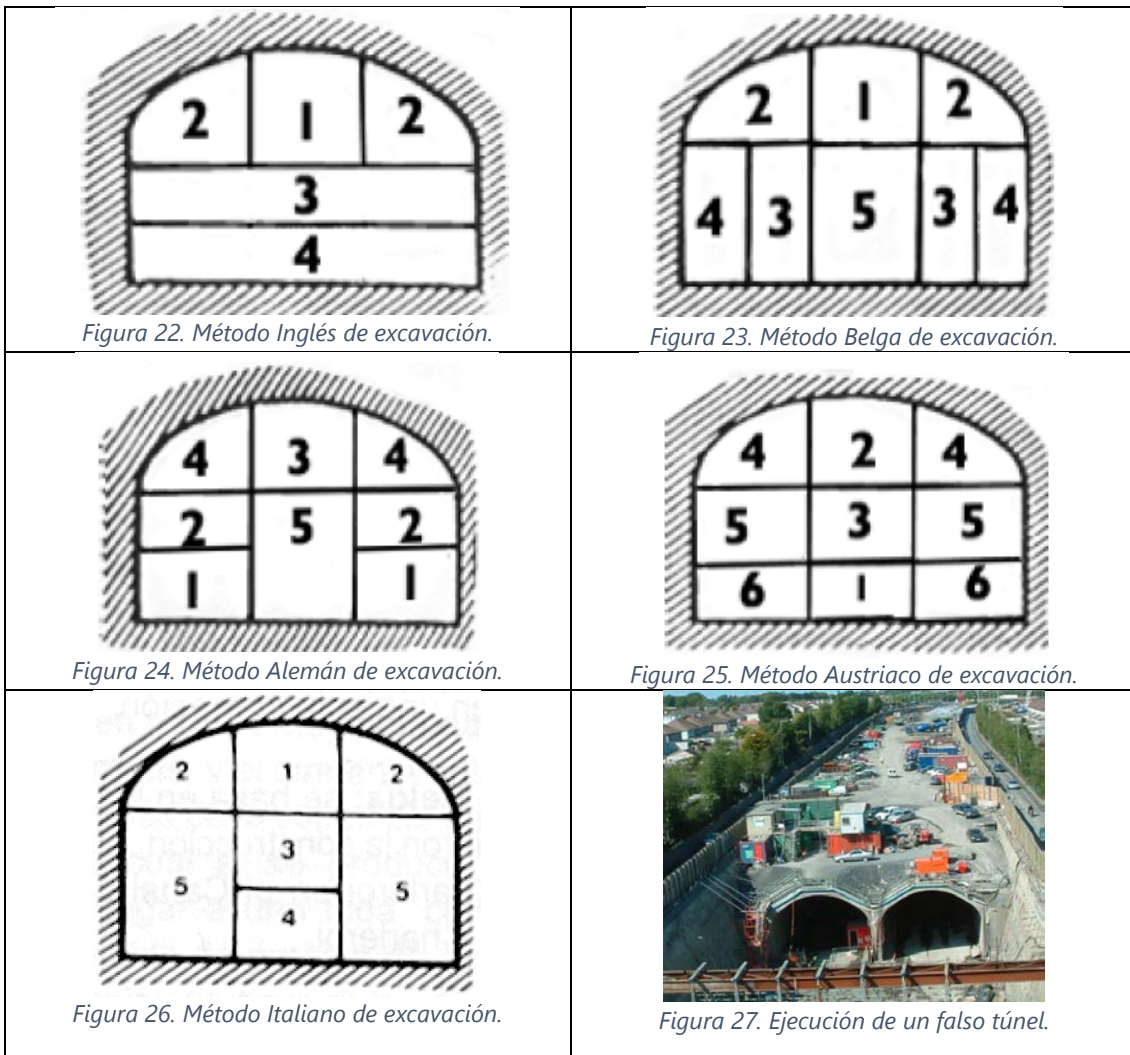
2.3. Tipos de secciones

Además de las clasificaciones vistas anteriormente los túneles quedan clasificados por su tipo de sección. A continuación se presentan diferentes tipos de secciones de túneles con sus principales características:

- a) Sección semicircular o de herradura
- b) Sección circular
- c) Sección rectangular

2.3.1. Túneles de sección semi-circular o de herradura:

Esta tipología de túneles presenta esta geometría derivada del método constructivo con el que se ha ejecutado el túnel. Para realizar este tipo de túneles se han empleado metodologías contractivas tradicionales como los métodos Inglés, Belga, Alemán Italiano o Austriaco o mediante un falso túnel mediante la técnica de "cut and cover". La diferencia entre los métodos tradicionales radica en el orden de excavación y el método de avance en la excavación.



Estos túneles se caracterizan por contar con dos hastiales o muros una bóveda y una contrabóveda o suelo.

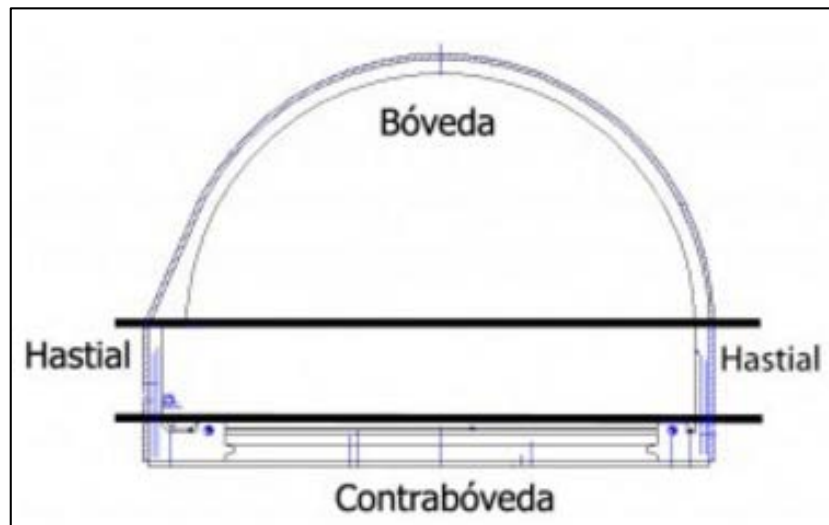


Figura 28. Elementos básicos de un túnel.

Normalmente estos túneles presentan una sección útil para el tráfico de vehículos, empleándose los espacios fuera de esta sección útil para el emplazamiento de las instalaciones que dan servicio al túnel y las vías de evacuación de los ocupantes del túnel mediante aceras laterales.

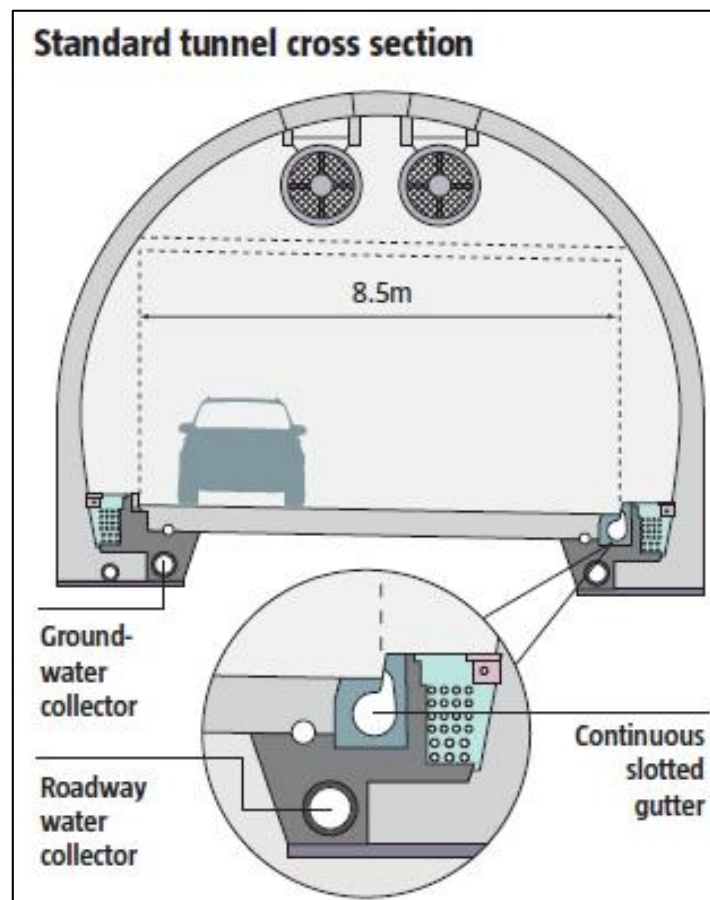


Figura 29. Sección de túnel. Detalle de zona de instalaciones.

2.3.2. Túneles circulares

Esta tipología de túneles presenta esta geometría derivada del método constructivo con el que se ha ejecutado el túnel. Para realizar este tipo de túneles se han empleado máquinas tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machine). Estas máquinas cuentan con una cabeza giratoria con elementos de corte que a su vez es accionada mediante gatos perimetrales apoyados en puntos fijos a partir del cual se empuja la cabeza giratoria.

Existen tres tipos de tuneladoras:

Tipo Topo:

Diseñadas para excavar rocas duras o medianas, no están dotadas con ningún elemento de entibación provisional en la zona próxima al cabezal de corte. Se emplean zapatas móviles como punto fijo.



Figura 30. TBM tipo Topo.

Tipo Escudo:

Se emplean para suelos blandos o terrenos que necesitan sistemáticamente la colocación de un sostenimiento a medida que se avanza en la perforación del túnel. Son similares a las TBM tipo Topo pero cuentan con un escudo o carcasa metálica exterior que soportan el terreno provisionalmente hasta la colocación del sostenimiento definitivo del túnel. Esta TBM incluso pueden estar preparadas para avanzar por debajo del nivel freático del terreno.

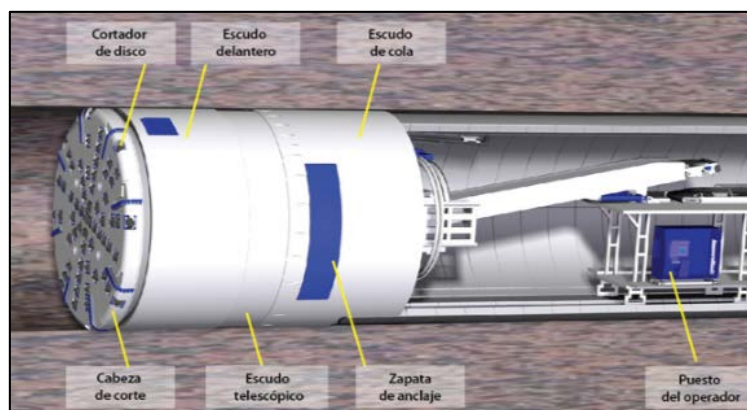


Figura 31. Tuneladora tipo Escudo.

Tipo Doble Escudo:

Este tipo de tuneladora es capaz de trabajar como Topo o como Escudo en función del tipo de terreno. Cuenta con dos partes. En el frontal tiene la cabeza cortadora y tras ella la cola del escudo donde se montan las dovelas del túnel.

El movimiento entre la cabeza y el escudo es independiente pudiendo abrirse un hueco entre ellas donde se situarán las zapatas móviles o grippers que actuarán como punto fijo mientras que en la cola del escudo se van montando los anillos de dovelas.

En caso de que el terreno no permita este tipo de operación debido a su poca dureza, la tuneladora actuará como una tuneladora tipo escudo.

A partir de este sistema constructivo se generan los túneles de sección circular. Cabe notar que al presentar este tipo de sección no toda la sección se puede emplear para el transporte de vehículos, empleándose para las instalaciones del túnel.

A continuación se presentan varias secciones de túneles de sección circular.

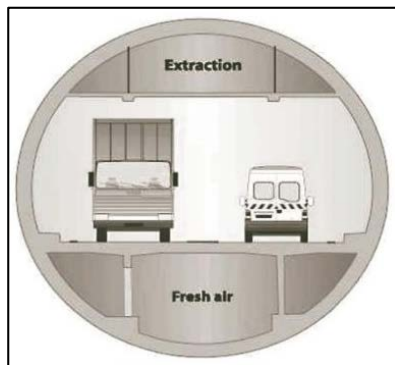


Figura 32. Sección de túnel carretero circular con una calzada y un sistema de ventilación conducido.

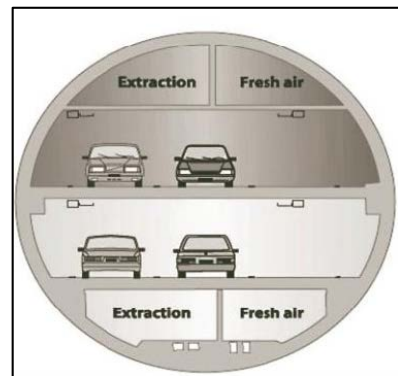


Figura 33. Sección de túnel carretero con dos calzadas en altura y sistemas de ventilación conducidos independientes.

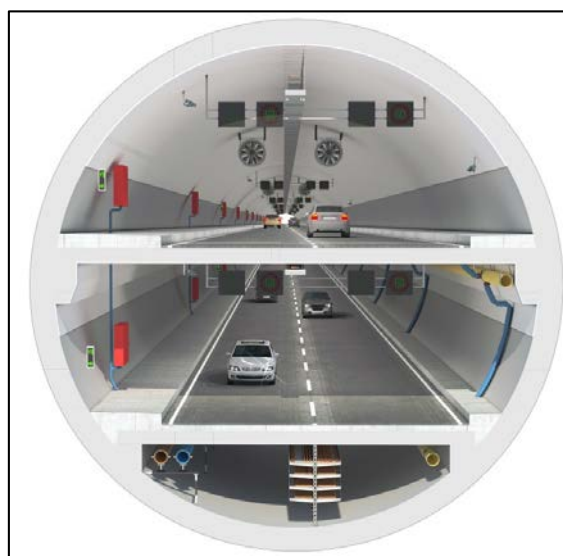


Figura 34. Sección de túnel carretero con dos calzadas en altura, sistemas de ventilación mediante jet fans independientes y galería inferior de instalaciones.

2.3.3. Túneles de sección rectangular

Esta tipología de túneles presenta esta geometría derivada del método constructivo con el que se ha ejecutado el túnel. Para realizar este tipo de túneles se han empleado una construcción por pantallas o un sistema de túnel por corte y relleno (cut and cover). Este sistema de construcción básicamente consiste en la ejecución de las pantallas que constituirán los hastiales del túnel bien ejecutadas in situ o hincadas en el terreno. Posteriormente se procederá al descabezado de las pantallas para construir una viga de atado. Una vez realizada la viga de atado se realizará la ejecución de una losa de cubierta. A continuación se realizará la instalación de un nivel de arrostamientos metálicos o de hormigón, provisionales o definitivos, que permiten la excavación bajo la losa. Una vez se han realizado los arrostamientos, se excavará bajo la losa hasta la cota inferior. Sobre la plataforma de máxima excavación se extenderá hormigón de limpieza para construir la losa de fondo o contrabóveda que, finalmente se hormigonará.



Figura 35. Proceso de excavación de un túnel de sección rectangular.

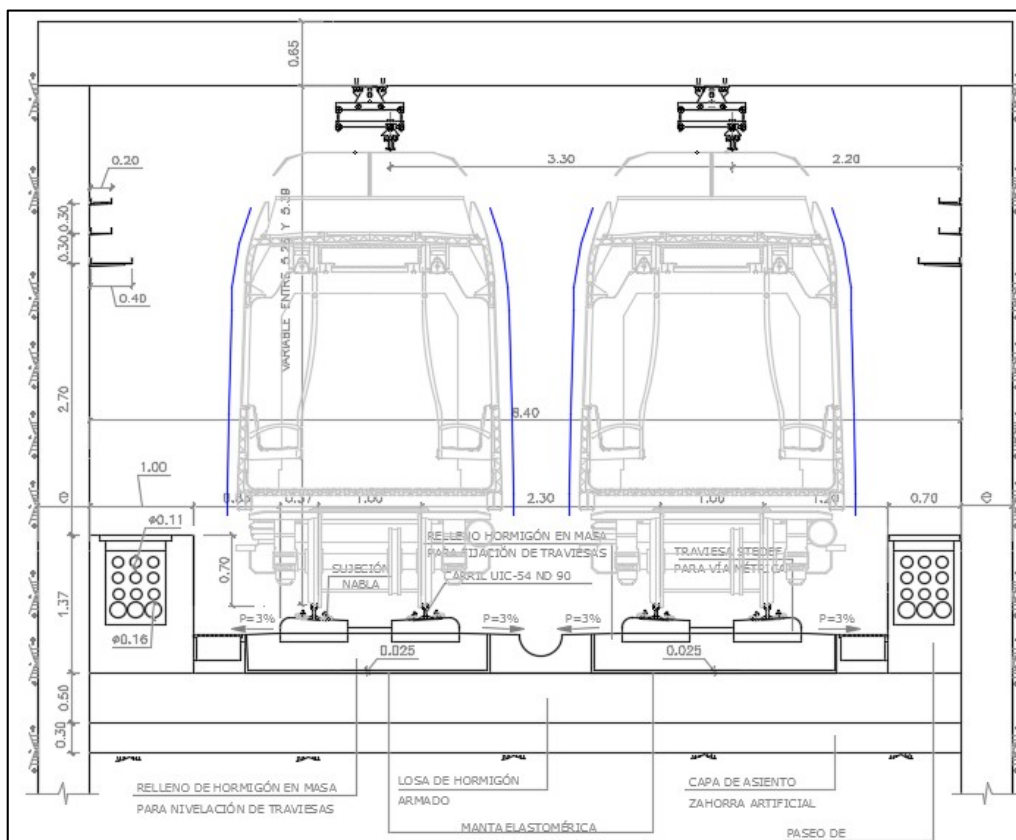


Figura 36. Túnel de sección rectangular de doble vía.

Los condicionantes mínimos que debe cumplir una sección transversal de túnel ferroviario según su tipología según la IST2006 [4]:

CONDICIONANTES MÍNIMOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	TIPO DE TÚNEL			
	III	II	I	
			L ≤ 6.000 m	L > 6.000 m
Doble tubo. Túneles paralelos de vía única	---	---	A estudiar	Recomendado en ausencia de estaciones subterráneas intermedias
Drenaje de aguas de infiltración, escorrentía, etc.	Si	Si	Si	Si
Sistema separativo de recogida de vertidos líquidos	A estudiar	A estudiar	A estudiar	A estudiar
Vía en placa por condiciones de drenaje	---	---	A estudiar	A estudiar
Espacio para equipos de ventilación	---	---	Si	Si
Espacio para conductos de ventilación de dependencias anejas	A estudiar	A estudiar	Si	Si
Espacio para canalizaciones	Si	Si	Si	Si
Aceras o vía en placa transitable para evacuación de pasajeros.	Si	Si	Si	Si
Calzadas para circulación de vehículos	---	---	A estudiar	A estudiar
Espacio para instalac. ferroviarias: catenaria, señalización, etc.	Si	Si	Si	Si
Espacio para instalac. no ferrov. (generales)	Si	Si	Si	Si

Tabla 14. Condicionantes mínimos de una sección transversal.

2.5. Vías de evacuación en túneles ferroviarios

Uno de los elementos fundamentales de un túnel son sus vías de evacuación. Son aquellas zonas destinadas para que a través de ellas los ocupantes del túnel puedan llegar a una zona segura en condiciones de seguridad.

En función de la tipología de túnel las vías de seguridad presentan diferentes tipologías.

En el caso de España, de acuerdo con la Instrucción de Seguridad de Túneles IST2006 [4] las vías de evacuación se definen como "itinerarios generalmente de uso exclusivo para las personas, que se inician en un punto del túnel y finalizan en una zona segura".

El objeto de las vías de evacuación es que en caso de incidente grave en el túnel, permitir la evacuación rápida y segura de las personas, en especial en caso de incendio donde las condiciones ambientales del túnel empeoran rápidamente debido al calor y a los humos producidos a la vez que facilitar el acceso a los equipos de intervención.

Todos los túneles contarán con vías de evacuación adecuadas conformadas por uno o varios de los siguientes elementos:

- Aceras o plataformas transitables para peatones a lo largo del túnel.
- Galerías o pozos de conexión entre túneles paralelos.
- Salidas de emergencias mediante galerías o pozos.

El proyectista definirá las que considere necesarias. Sus características físicas, estructurales y funcionales, su equipamiento e instalaciones y cuanto sea preciso para cumplir su función.

Para su selección se recomienda seguir el siguiente orden de preferencia:

1. Conexión a túnel paralelo.
2. Salida a la boca del túnel.
3. Salida de emergencia al exterior.

Características comunes de las vías de evacuación:

- **Atmósfera respirable y con cierta visibilidad, al menos durante el tiempo necesario para la evacuación.** El aire tendrá las características mínimas para situación de emergencia indicadas lo que se justificará en el correspondiente estudio de ventilación.
- Distancia máxima desde cualquier punto del túnel hasta una zona libre de humos fuera del tubo afectado: 750 m (equivalente a un tiempo aproximado de recorrido de **12 minutos**), salvo que se justifique que se alcanza un nivel de seguridad equivalente con la implantación de medidas alternativas. Esta distancia es un máximo *maximorum* de tipo general, aplicable en ausencia de otros valores más limitativos establecidos para determinados tipos de ruta, en función del tráfico.
- Altura libre mínima: **2,25 m**.
- **Ausencia de obstáculos** (armarios eléctricos, seccionadores o tensores de catenaria, teléfonos, etc.) que no respeten la anchura mínima establecida o dificulten el tránsito (p.ej. cables o tuberías en la solera). El alojamiento de estos equipos e instalaciones deberá preverse en el proyecto de la sección transversal.
- Las aceras del túnel dispondrán de **pasamanos junto al hastial**; en galerías y pozos, se proyectarán a ambos lados.
- Pavimento antideslizante.
- Reacción al fuego: **M0 en los materiales** constituyentes y al menos M1 en los materiales instalados.
- Se recomienda **evitar el uso de escaleras**. En su defecto deberán cumplir la norma "NBE-CPI: Condiciones de protección contra incendios en los edificios" vigente.
- Dispondrán de las instalaciones de **comunicación** con el Centro de Control
- Adicionalmente, cada tipo de ruta deberá cumplir los requisitos técnicos específicos que se indican en los apartados siguientes.

La NFPA 130 [9] en el apartado 6.2.2.2. indica en relación con el número y ubicación de los Medios de Evacuación que en el interior de vías de tren subterráneas y cerradas la distancia máxima entre salidas no deberá ser mayor de 762 m (2500 ft).

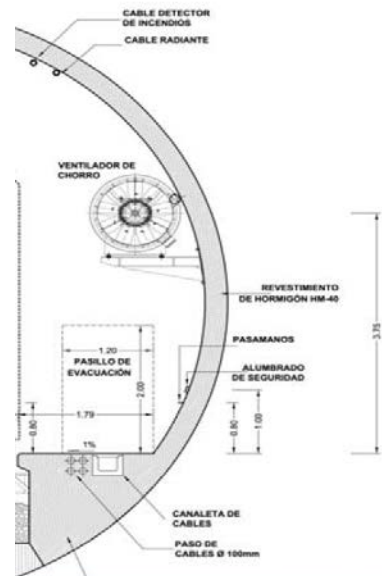
2.5.1. Aceras o plataformas transitables para peatones

Todos los túneles deberán disponer de **aceras** o de **plataformas** transitables para peatones.

Características específicas de las aceras

Además de las especificaciones generales para las rutas de evacuación deberán cumplir las siguientes:

- En túneles de vía doble, se dispondrán **en ambos hastiales**. En vía única bastará en uno solo, que en caso de doble tubo será el más próximo al otro tubo.
- **Anchura mínima: 1,2 m.** Con transiciones adecuadas, se admite su reducción puntual hasta 0,9 m, en una longitud máxima de 2 m.
- Borde de la acera situado a la distancia mínima del eje de vía que marque el gálibo cinemático.
- Nivel de acera situado entre 35 y 50 cm sobre la cota del carril, al objeto facilitar las transiciones tren- acera- vía.



En túneles de vía única con una sola acera, se dejará en el **hastial opuesto** a ésta, una **zona de paso de 0,9 m de ancho por 2 m de alto**, como mínimo, dotada de pavimento antideslizante, para permitir el desplazamiento de los equipos de intervención entre los extremos del tren.



Figura 39. Aceras de evacuación en túneles ferroviarios.

En relación con las vías de evacuación la NFPA 130 [9] establece:

- 6.2.1.11. Los medios de evacuación de la vía de tren deberán tener un ancho libre de 610 mm (24 in.) a lo largo de todo su recorrido, medido en los siguientes puntos de la superficie de paso:
- (1) 610 mm (24 in.) sobre la superficie de paso
- (2) 760 mm (30 in.) a 1420 mm (56 in.) de altura la superficie de paso.
- (3) 610 mm (24 in.) a 2050 mm (80 in.) de altura la superficie de paso.
- Las galerías transversales deberán tener un ancho mínimo libre de 1120 mm (44 in.) y una altura de 2100 mm (7 ft).
- El ancho de las escaleras de emergencia no debe exceder de 1120 mm (44 in.)
- Las puertas de salida de las vías de evacuación deber tener un mínimo de 810mm (32 in.) de ancho de paso.

Características específicas de las plataformas ferroviarias transitables

Cuando se prevea la evacuación a través de la plataforma ferroviaria, además de las especificaciones generales para las rutas de evacuación, se deberán cumplir las siguientes:

- La plataforma será transitable para los peatones, situada a nivel de la cota del carril y sin obstáculos ni huecos en su superficie que puedan dificultar la evacuación.
- El sistema de control del tráfico ferroviario permitirá interrumpir la circulación en el túnel, en un plazo máximo de 3 min, tras producirse una incidencia en éste que obligue a la evacuación.
- Se garantizará que los vehículos ferroviarios que vayan a circular por el túnel incorporen dispositivos para salvar el desnivel entre la plataforma del vehículo y la de la vía.

Cabe resaltar que en muchos túneles de metro, pese a cumplir con lo establecido en cuanto a recorridos de emergencia, las aceras por las que discurren las vías de evacuación solo permiten el desalajo de los ocupantes de uno en uno.



Imagen 1. Pasajeros evacuando de un tren siniestrado.

Ante una situación de emergencia puede provocar que los ocupantes del tren comiencen el desalojo por una zona no designada como vía de evacuación como puede ser la plataforma de las vías.

Puesto que dicha zona no es una vía de evacuación, no queda afectada por los requisitos derivados de la instrucción de seguridad en túneles IST2006 para alumbrado de emergencia, y teniendo en cuenta la posible presencia de obstáculos como vías o traviesas, sería necesario realizar un estudio de alumbrado de dicha zona del túnel para garantizar que la evacuación en caso de incendio no supone ningún riesgo para los ocupantes.

2.5.2. Galerías o pozos de conexión entre túneles paralelos

Todos los túneles de sección bitubo, o monotubo con galería auxiliar longitudinal, se interconectarán mediante galerías transversales o pozos.

Características específicas

Además de las especificaciones generales para las rutas de evacuación, deberán cumplir las siguientes:

- 1) Separación máxima entre galerías o pozos contiguos: 500 m, reduciéndose a 250 m en el caso de trenes de alta ocupación (≥ 1.000 viajeros/tren).
- 2) Anchura mínima del itinerario: 2,25 m.
- 3) Pendiente máxima en galerías: 8%, con ausencia de puntos bajos en su perfil longitudinal.
- 4) Dispondrán, en ambos extremos, de puertas estancas con apertura hacia la vía (para evitar que el agolpamiento de pasajeros en el extremo de salida de la galería impida su apertura) y retranqueadas hacia la galería o pozo, para no interrumpir el paso por la acera del túnel. Sus dimensiones mínimas serán de 1,8 m de ancho por 2 m de alto. Deberán abrirse, en cualquier circunstancia, aplicando una fuerza inferior a 250 N y dispondrán de dispositivos para informar de su apertura al Centro de Control Técnico.
- 5) Atmósfera adecuada durante el tiempo necesario para la evacuación, cumpliendo las limitaciones del Cuadro 5.1.12.I para condiciones normales, lo que se justificará en el correspondiente estudio de ventilación.
- 6) Los entronques con el túnel estarán señalizados conforme a lo indicado en el apartado 5.1.4, de forma que se puedan identificar desde lejos.
- 7) Dispondrán de un extintor manual similar al indicado en el apartado 5.1.13 para los locales técnicos.

2.5.3. Salidas de emergencia

Son aquellas que conectan directamente el túnel con el exterior.

Pueden ser pozos (habituales en zonas urbanas y con túneles de poca profundidad), galerías o combinaciones de ambos.

Características específicas

Se diseñarán simultáneamente para facilitar el autorrescate (evacuación de personas) y el rescate (ayuda externa).

Además de las especificaciones generales para las **rutas de evacuación**, deberán cumplir las siguientes:

- 1) Separación máxima entre galerías o pozos contiguos:
- 2) 1.500 m, en túneles de longitud $L > 3.000$ m.
- 3) **750 m**, en túneles de longitud $L > 2.000$ m con trenes de alta ocupación (≥ 1.000 viajeros/tren).
- 4) **Anchura mínima** del itinerario: 2,25 m.

En el caso de galerías:

- 1) Pendiente máxima: 8%
- 2) Las de longitud superior a 300 m deberán ser accesibles a vehículos ligeros, siendo recomendable en el resto. En ese caso, deberán permitir el paso simultáneo de vehículos y personas, además de disponer de zonas de estacionamiento y maniobra en su interior y acceso viario a la boca desde la red de carreteras.

En el caso de pozos:

- 1) Profundidad máxima: 50 m. Los mayores de 30 m, además de las escaleras, dispondrán de ascensores de emergencia, siendo recomendable instalarlos también en los de más de 15 m.
- 2) Los ascensores, en su caso, cumplirán las especificaciones de la norma NBE-CPI vigente para los ascensores de emergencia, con dimensiones en planta análogas a las de uso hospitalario y capacidad de carga mínima de 2.000 kg.
- 3) Dispondrán de un sistema de drenaje para mantener en seco la superficie de tránsito de las personas.

- 4) Atmósfera adecuada durante el tiempo necesario para la evacuación, cumpliendo las limitaciones de la Tabla Características mínimas del aire en condiciones normales y de emergencia en el interior de un túnel para condiciones normales, lo que se justificará en el correspondiente estudio de ventilación. Por ello, las eventuales salidas de humos o gases procedentes de un incendio o vertido, así como las entradas de aire fresco, se canalizarán por espacios independientes a los de circulación de personas o vehículos, en su caso.
- 5) Los entronques con el túnel estarán señalizados conforme a lo indicado en el apartado de Centro de Control Técnico de forma que se puedan identificar desde lejos.
- 6) El extremo de la salida de emergencia que conduce al exterior dispondrá de una puerta de dimensiones mínimas 1,8 m (ancho) x 2 m (alto), con barra antipánico por el interior y cerradura de seguridad por el exterior. Además dispondrá de una superficie mínima de 6 m² para entrada de aire de ventilación. Se recomienda disponer los elementos anteriores en una construcción de tipo templete.
- 7) En el extremo próximo al túnel se instalará un extintor manual similar al indicado en el apartado de elementos de seguridad en locales técnicos para los locales técnicos.

2.6. Instalaciones en túneles ferroviarios

La norma IST06 establece dos clases de instalaciones en túneles ferroviarios:

a) Instalaciones ferroviarias

- Sistemas de energía eléctrica de tracción
- Instalaciones de control de tráfico.
- Comunicaciones ferroviarias.
- Sistemas de detección de cajas calientes.
- Sistemas de detección de caída de objetos a la vía.

b) Instalaciones generales

De acuerdo a la instrucción de seguridad en túneles IST2006 un túnel ferroviario y en particular un túnel de metro pueden contar con las siguientes instalaciones generales siempre que sean requeridas por la citada instrucción:

- Cableado y elementos de protección eléctrica
- Alimentación eléctrica
- Alumbrado de emergencia
- Señalización de evacuación
- Red de tomas de corriente
- Red de hidrantes
- Sistema de comunicaciones de emergencia
- Sistema de detección de incendios
- Sistema de detección de gases
- Sistema anti-intrusión
- Sistema de bombeo de drenajes y vertidos
- Sistema de ventilación
- Elementos de seguridad en Locales Técnicos
- Centro de Control Técnico (CCT)

A continuación se enuncia el ámbito de aplicación de cada instalación así como las características exigibles por la instrucción de seguridad IST2006. En este trabajo final de master se aborda la instalación de ventilación en situación de emergencia.

2.6.1. Cableado y elementos de protección eléctrica

Se trata de los conductores ópticos o eléctricos, con sus elementos de protección, por los que se transmite energía, señales o datos y tienen por objeto interconectar los distintos sistemas para su funcionamiento en situación normal o en caso de incendio.

El ámbito de aplicación son la totalidad de las instalaciones del túnel, con excepción de la línea aérea de contacto y del cable radiante de la red de radiocomunicaciones.

2.6.2. Alimentación eléctrica

Son el conjunto de fuentes de energía eléctrica bien seas proporcionadas por un agente externo al túnel como la compañía suministradora o bien sea generada o almacenada en el propio túnel mediante SAI o grupos electrógenos.

Estos elementos tienen por objeto el suministro de energía eléctrica a las distintas instalaciones de seguridad del túnel, siendo las instalaciones receptoras, la de alumbrado de emergencia, la red de tomas de corriente, los equipos de bombeo el sistema de comunicaciones de emergencia, los diferentes sistemas de detección y el sistema de ventilación del túnel.

2.6.3. Alumbrado de emergencia

Consiste en una instalación de alumbrado que garantice un nivel mínimo de iluminación en el túnel en caso de incidente. Cuenta con un sistema de alumbrado principal alimentado por la compañía suministradora y respaldado por un grupo electrógeno y un sistema de alumbrado de emergencia autónomo con alimentación mediante baterías anexas a las luminarias.

El objeto de este sistema es facilitar la orientación y evacuación de los ocupantes del túnel en caso de emergencia así como ofrecer respaldo visual a los equipos de emergencia.

Si se compara con otra normativa de reconocido prestigio como la **NFPA 130 [9]** *Estándar sobre Sistemas Ferroviarios para Transporte de Vehículo y Viajeros sobre guías Fijas* en el punto 6.2.5.5 enuncia:

Los niveles de iluminación de las vías de tren, subterráneas, cerradas o elevadas, y las superficies de paso (p.e. vías de tren y pasa-re las laterales) no deberán ser inferiores a 2,7 lx (0,25 ft-candles) en la superficie de paso.

Además en el punto 6.2.5.5.1 enuncia: *Los niveles de iluminación de las vías de tren deberán producir en los caminos una iluminación que no deberá exceder una relación de 10:1 entre las iluminancias máxima y mínima mantenida horizontalmente.*

2.6.4. Señalización de evacuación

Consisten en el conjunto de indicaciones fijas para la orientación de los ocupantes, instaladas a lo largo de las rutas de evacuación con el objeto de facilitar de manera clara y concisa el camino a seguir hasta alcanzar una zona segura.

2.6.5. Red de tomas de corriente

Consiste en una instalación de tomas de corriente monofásica y trifásica a lo largo del túnel con el objeto de facilitar la actuación de los equipos de intervención mediante el suministro de energía eléctrica para el funcionamiento de herramientas, maquinaria o alumbrado portátil.

2.6.6. Red de hidrantes

Consiste en una instalación hidráulica en carga, con hidrantes, para suministro de agua a presión a lo largo del túnel con el objeto de que los equipos de intervención tengan acceso a una conexión de mangueras o suministro de agua para la extinción de incendios o dilución de líquidos vertidos entre otros.

2.6.7. Sistema de comunicaciones de emergencia

Consiste en el conjunto de instalaciones y redes de comunicación entre el túnel y el exterior concebidas para transmitir mensajes de alerta y alarma y comunicar con el centro de control, en situaciones de riesgo o emergencia. Está integrado por una red telefónica interna y por una red de radiocomunicaciones para uso exclusivo de los servicios de intervención.

El objeto de esta instalación es en el caso de la red telefónica permitir la comunicación entre el túnel y los Centros de Control de Tráfico y Operativo y en para la red de radiocomunicaciones, facilitar la comunicación dentro y fuera del túnel entre los distintos servicios de intervención, los agentes de la explotación y los trenes.

2.6.8. Sistema de detección de incendios

Se trata de una instalación constituida por sensores que controlan magnitudes físicas o químicas asociadas a un incendio (temperatura, ionización del aire, dispersión o atenuación de la luz, etc.) enviando la información a un equipo de control (central de detección) con el objeto de detectar y comunicar con la mayor celeridad posible la presencia y localización de un incendio para extinguirlo antes de su desarrollo y propagación.

Se instalará en los túneles urbanos de tipo I. También se instalará en las dependencias anejas (subestaciones de energía eléctrica de tracción, locales técnicos, estaciones de ventilación, etc.), con riesgo de incendio por el tipo de materiales o equipos que contengan. En particular, en los locales técnicos donde se ubiquen equipos eléctricos y electrónicos.

2.6.9. Sistema de detección de gases

Se trata de una instalación constituida por distintos tipos de sensores capaces de detectar en el túnel gases potencialmente peligrosos para la salud y la seguridad (tóxicos, inflamables o explosivos) con el objeto de comunicar los niveles de concentración de estas sustancias con el fin de acuerdo a lo establecido en el plan de autoprotección activar los mecanismos necesarios para volver los umbrales de seguridad.

Se instalará en el túnel en función de sus características (perfil longitudinal, longitud y intensidad de tráfico), del tipo de tracción y de las mercancías susceptibles de transitar por él.

2.6.10. Sistema antiintrusión

Consiste en un sistema de vigilancia perimetral con grabación de eventos asociados, para el control de los accesos al interior del túnel y dependencias anejas con el fin de Detectar y comunicar en tiempo real el acceso de intrusos al túnel, evitando posibles accidentes, sabotajes o actos vandálicos causados por éstos.

Se instalará en todos los accesos (boquillas o salidas de emergencia) a los túneles con intensidad de tráfico media o superior. En el resto se analizará la necesidad de instalarlo o no.

2.6.11. Sistema de bombeo de drenajes y vertidos

Consiste en una instalación de equipos de bombeo, con su correspondiente sistema de tuberías, para la impulsión de los líquidos acumulados en puntos bajos del túnel, desde un pozo de bombeo, hasta el exterior o hasta un punto intermedio a partir del cual puedan discurrir por gravedad, para su vertido, o recogida y tratamiento de aquellos, que por exigencias de seguridad o medioambientales, lo requieran con el fin de evacuar las aguas, de infiltración o escorrentía, y los posibles vertidos líquidos (agua para la extinción de incendios, vertidos accidentales de los trenes, etc.) acumulados en puntos .

2.6.12. Elementos de seguridad en Locales Técnicos

Consisten en el conjunto de instalaciones y equipos necesarios para garantizar la seguridad en los locales técnicos del túnel, protegiendo las instalaciones ubicadas en los citados locales y en particular aquellas relacionadas con la seguridad del túnel evitando que queden fuera de servicio en caso de accidente.

2.6.13. Centro de Control Técnico (CCT)

Son aquellas dependencias donde se centralizan las señales de funcionamiento y alarma de las instalaciones del túnel así como sus elementos de control, permitiendo actuar en caso de emergencia con el objeto de:

1. Recoger y supervisar la información monitorizada sobre el estado del túnel y sus instalaciones, detectando cualquier anomalía que se produzca.
2. Comunicar al Centro de Control de Tráfico las incidencias relevantes que puedan afectar a la explotación.
3. Manejar y controlar el funcionamiento de las instalaciones no ferroviarias.
4. Posibilidad de actuar, en su caso, como centro de toma de decisiones en situación de emergencia.

El CCT se instalará en los túneles tipo I, aunque podrá compartirse para varios túneles.

2.6.14. Sistema de ventilación

Se trata de un sistema de renovación de aire natural o por medios mecánicos que permita introducir aire fresco y extraer aire viciado del interior del túnel, tanto en condiciones normales como de emergencia. El objeto de esta instalación es garantizar unas condiciones mínimas del aire en el túnel que lo hagan respirable y que permitan cierta visibilidad, tanto en condiciones normales de explotación, como durante el tiempo necesario para la evacuación, en caso de incendio o fuga de gases tóxicos.

Todos los túneles deberán tener su correspondiente estudio de ventilación.

En las rutas de evacuación de los túneles de tipo I se instalará un sistema de ventilación forzada para un mayor control del movimiento del aire en su interior.

También se instalará ventilación forzada en los refugios y en los locales técnicos donde se ubiquen baterías u otros materiales que puedan desprender hidrógeno o gases peligrosos.

Criterios del proyecto:

El sistema deberá garantizar unas condiciones mínimas del aire en el interior del túnel, tanto en situación normal, como de emergencia (incendio o fuga de gases tóxicos), caracterizadas por las siguientes limitaciones:

PARÁMETRO	CONDICIONES NORMALES (VALORES MÁXIMOS)	SITUACIÓN DE EMERGENCIA (VALORES MÁXIMOS)
Contenido CO	50 ppm (valor medio en 30 min)	$\sum_{i=1}^n CO_i^{1,036} * t_i < 3 \cdot 10^4$ Siendo CO la concentración en % y t_i el tiempo de exposición
Contenido medio de NOx	0,4 ppm (en 60 min)	---
Coeficiente de extinción (k)	0.005 m ⁻¹	0.4 m ⁻¹
Temperatura del aire	40°C	60°C
Velocidad del aire	10 m/s	10 m/s

Tabla 15. Características mínimas del aire en condiciones normales y de emergencia en el interior de un túnel.

Para cada escenario de incendio o fuga de gases tóxicos en el túnel, se definirá la estrategia de actuación más adecuada: arrastre y dilución de los humos y gases, o confinamiento y estratificación de éstos.

Si no existe corriente de aire en el túnel, los humos tienden a desplazarse por el techo (estratificación), hasta que se enfrían, y caen al suelo (por aumento de su densidad). Así, inicialmente, se mantiene un colchón de aire limpio en la parte baja del túnel, que debe ser aprovechado por los usuarios para alcanzar zonas seguras.

Posteriormente los humos se abaten ocupando toda la sección del túnel y haciendo irrespirable la atmósfera. En cualquier caso, pasados los primeros 5 o 10 min de desarrollo de un incendio, es prácticamente imposible el control de los humos.

El sistema se dimensionará para que, en el escenario más desfavorable de incendio, a lo largo de la ruta de evacuación seleccionada y durante el tiempo necesario para alcanzar una zona segura (considerando un mínimo de 30 min), las condiciones del aire cumplan las limitaciones del cuadro anterior.

En las fugas de gases tóxicos, el sistema deberá mantener la ruta de evacuación libre de ellos.

El proyectista, en función del tipo de tráfico, fijará las características del incendio con el que proyectar el sistema de ventilación. A falta de datos más precisos, utilizará los valores indicados en la tabla siguiente. En ningún caso proyectará con incendios de potencia calorífica inferior a 30 MW.

TIPO DE VEHÍCULO INCENDIADO	POTENCIA MÁXIMA DEL INCENDIO (MW)	DURACIÓN DEL INCENDIO (horas)	CAUDAL DE HUMOS PRODUCIDO (m³/s)
Locomotora eléctrica o coche de viajeros	15	2	60
Locomotora diésel o coche de mercancías	30	2	82
Vagón de mercancías peligrosas	300	4	460

Tabla 16. Parámetro de caracterización de incendios.

Se analizará la conveniencia de proyectar chimeneas o pozos de ventilación para la impulsión o extracción directa de humos o gases al exterior, verificando que no se producen recirculaciones del aire viciado entre ellas o con las bocas (p.ej.: alejándolas o colocando dispositivos separadores).

Se utilizarán modelos numéricos de dinámica de fluidos en régimen transitorio, en los que el túnel, las galerías de evacuación, las chimeneas y los pozos de ventilación afectados, se asimilarán a una malla de tuberías. Se admite el uso de modelos unidimensionales.

En el caso de explotación a alta velocidad, se considerarán los efectos de compresibilidad del aire.

El proyectista deberá realizar un estudio paramétrico con distintas hipótesis de:

- Posición del incendio y rutas de evacuación a utilizar.
- Diferencia de presión entre bocas.
- Condiciones de funcionamiento del sistema de ventilación al inicio del incendio.

En el foco del incendio, los volúmenes de emisión de CO y de partículas negras (hollín), así como las potencias caloríficas (proporcionales a los incrementos de temperatura) transmitidas al aire y transportadas por éste, puede suponerse que siguen una curva de variación con el tiempo semejante a la de la *Curva paramétrica de evolución de la potencia (W) de un incendio*, con los tiempos característicos de la tabla de *Tiempos característicos de la curva paramétrica de evolución de un incendio*. A falta de datos más precisos, se puede estimar que:

La emisión de CO es la correspondiente a una concentración de 500 p.p.m. en el volumen total de humos producidos.

La emisión de partículas negras (opacidad) es la correspondiente a un coeficiente de extinción $k = 3 \text{ m}^{-1}$.

El incremento de temperatura del aire es el correspondiente a una potencia calorífica igual a $2/3$ de la del incendio. Se supone que el tercio restante se emplea en calentar la estructura del túnel, por lo que el modelo deberá considerar las pérdidas de calor por convección y radiación a través de los hastiales.

Para cada hipótesis, el modelo deberá cuantificar, en cada instante de tiempo y a lo largo del túnel, la velocidad del aire, los niveles de concentración de CO y de partículas negras y el incremento de temperatura.

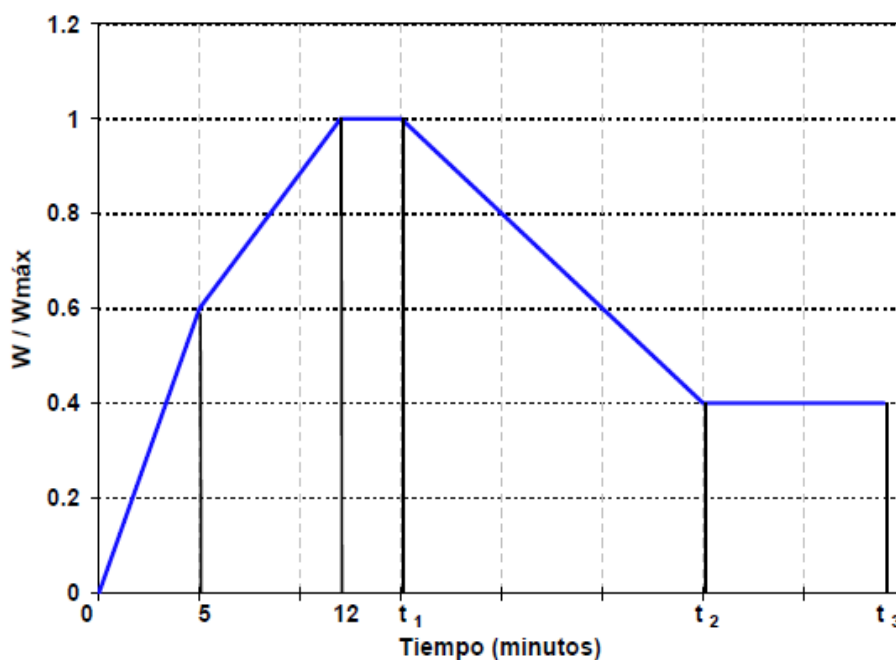


Figura 40. Curva paramétrica de evolución de la potencia (W) de un incendio.

POTENCIA MÁXIMA DEL INCENDIO (MW)	TIEMPOS CARACTERÍSTICOS (minutos)		
	t ₁	t ₂	t ₃
15	18	30	60
30	30	60	120
300	240	--	--

Tabla 17. Tiempos característicos de la curva paramétrica de evolución de un incendio.

Características:

A partir de los cálculos anteriores, el proyectista definirá el sistema de ventilación más idóneo; el tipo y caudal de los ventiladores; su ubicación, etc.

Los túneles con ventilación forzada dispondrán de estaciones meteorológicas en ambas bocas, para medir la pluviometría, temperatura y presión del aire exterior, así como, de anemómetros para medir la velocidad y dirección del flujo de aire en el interior.

En túneles bitubo, la ventilación deberá impedir, en caso de incendio, el paso de humos de un tubo al otro, a través de las bocas o de las galerías de conexión (utilizando sobrepresiones, trampillas para cierre de conductos, ventilación reversible, etc.).

Los ventiladores serán reversibles para, en función del escenario, impulsar o extraer aire a pleno rendimiento. Sometidos a una atmósfera de 400 °C, aportarán el caudal y la velocidad requeridos, como mínimo durante 1h, en ventiladores axiales y durante 2h, en aceleradores.

Todos los elementos del sistema de ventilación deberán ser capaces de soportar, además de su peso, las rápidas y frecuentes variaciones de presión generadas por el paso de los trenes, así como las presiones dinámicas del aire durante su funcionamiento.

La alimentación de los ventiladores será redundante, a través de las fuentes de energía indicadas en el apartado 5.1.2 de la Instrucción sobre seguridad en túneles y con grupos de transformación a baja tensión independientes. Dichas líneas dispondrán de los elementos de protección necesarios para minimizar los efectos de una avería en el funcionamiento de la instalación.

Los cuadros eléctricos de mando local de los motores, con los arrancadores y dispositivos de protección, se colocarán, preferentemente, fuera del túnel, es decir, en locales técnicos, galerías de conexión, etc. Transmitirán la información sobre su estado de funcionamiento (incluidas vibraciones) y averías al Centro de Control Técnico, del que a su vez recibirán órdenes telemandadas para su funcionamiento.

El sistema informático de gestión centralizada de operaciones, ubicado en el Centro de Control Técnico, permitirá ordenar la transición automática del modo de funcionamiento normal al de emergencia, fijando las condiciones de funcionamiento de los ventiladores en función de la ventilación natural (contrapresiones, etc.), de la posición del incendio y de la situación de partida de los ventiladores. El sistema garantizará la transición del modo de funcionamiento normal al de emergencia en un tiempo máximo de 3 minutos.

La NFPA 130 **[9]** establece que debe instalarse un sistema mecánico de ventilación de emergencia en

- a) Estaciones cerradas
- b) Subterráneos, vías de tren cerradas o túneles de más de 305 metros de longitud

El sistema mecánico de ventilación de emergencia deberá estar previsto para la protección frente a fuego y humo a pasajeros, empleados y personal de emergencia durante una emergencia de incendio y deberá estar diseñado para mantener los niveles de caudal de aire durante 1 hora como mínimo pero no menos del tiempo previsto de evacuación.

Los motores de los ventiladores de emergencia deben diseñarse para alcanzar la máxima velocidad de operación en no más de 30 segundos si parten del reposo y 60 segundos para motores de velocidad variable.

3. Modelos de incendio en túneles ferroviarios

3.1. Introducción

Un escenario de incendio contiene tres elementos fundamentales: el recinto el cual queda definido mediante un modelo geométrico que recoge las propiedades físico químicas del recinto, el incendio a través de un modelo de incendio y la ocupación del recinto la cual queda definida a través de un modelo de evacuación. Cada uno de estos tres elementos presenta unas características determinadas y su caracterización debe ser fiel a la realidad.

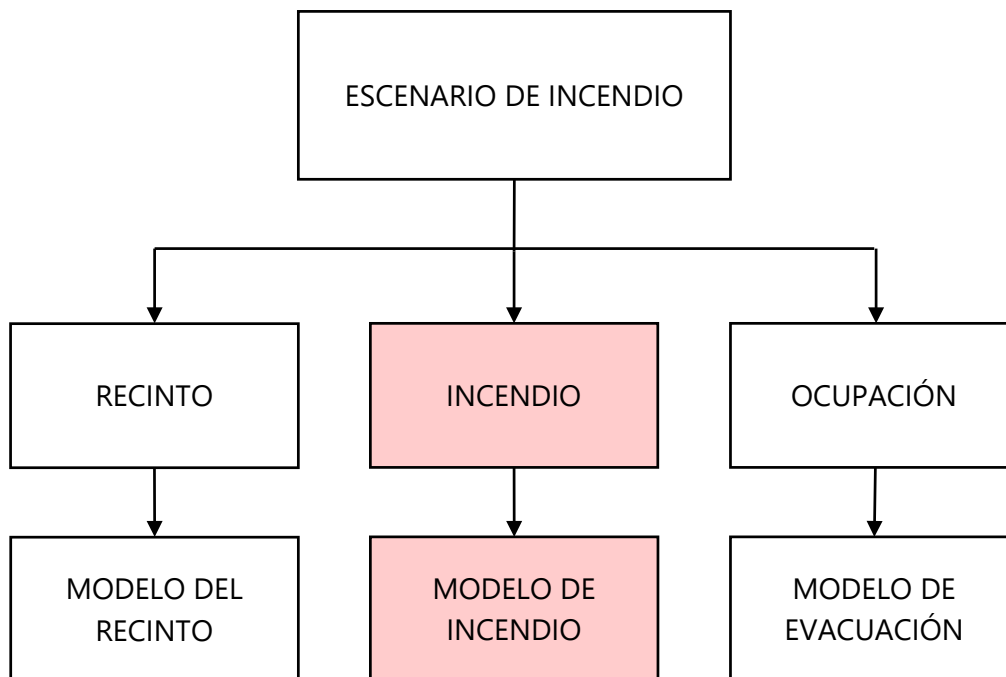


Figura 41. Elementos de un escenario de incendio.

El objeto del presente capítulo consiste en definir el modelo de incendio del escenario de incendio.

Fundamentalmente existen dos clases de modelos para incendios en recintos, los basados en temperatura y los basados en la combustión de la carga de fuego o combustible.

Los primeros se denominan curvas nominales y representan la temperatura del gas dentro del recinto en una situación post-flashover, no se corresponden con ningún incendio real y tiene como finalidad exclusiva la verificación del cumplimiento de la exigencia básica de seguridad estructural en caso de incendio.

Los segundos proporcionan un modelo de tasa de liberación de calor (Heat Release Ratio-HRR) derivado de la combustión de la carga de fuego y a la vez un conjunto de especies productos de la reacción de combustión. Este tipo de modelo permite, mediante

el uso de modelos computacionales, determinar las variables de campo, temperatura, presión, velocidad y concentración de especies, asociada a la evolución del incendio y evaluar las condiciones de evacuación dentro del recinto donde se desarrolla el incendio. El diseño prestacional de sistemas de protección contra incendio requiere de un modelo de este tipo para la verificación de la metas de diseño.

El modelo de incendio contempla dos aspectos, la liberación de calor y de especies, que son datos para el modelo del escenario de incendio.

La definición del incendio depende de las condiciones en las que se desarrolla, en el interior de un recinto o al aire libre, que influye en la ventilación y esta a su vez en el desarrollo del incendio. En este caso particular el recinto, con unas características específicas, es un túnel y el modelo de incendio requiere precisar los siguientes aspectos: fases del incendio, fuente de ignición, velocidad de crecimiento, flashover, HRRPUA en la fase de desarrollo total, extinción, reacción química, modelo de combustible, productos de combustión, hollín, y un modelo de incendio que recoja todos los aspectos indicados.

El concepto de flashover que en el caso de recintos de edificación implica el incendio súbito generalizado del toda la carga de fuego del recinto, en el caso particular de incendios de ferrocarril en túneles hace referencia al incendio generalizado del vagón, maquina tractora o vehículo en el que se inicia y desarrolla el incendio y no del propio túnel. Como se verá más adelante los vagones de metro generalmente están compartimentados entre ellos mediante puertas con una resistencia al fuego determinada que aísla los vagones generalmente hasta que se produce el flashover en el vagón donde se produce el incendio original.

El objeto de este capítulo es el estudio de los diferentes métodos de obtención de la curva de la tasa de liberación de calor empleados históricamente y su posterior aplicación en modelos computacionales para realizar el diseño del sistema de ventilación de emergencia.

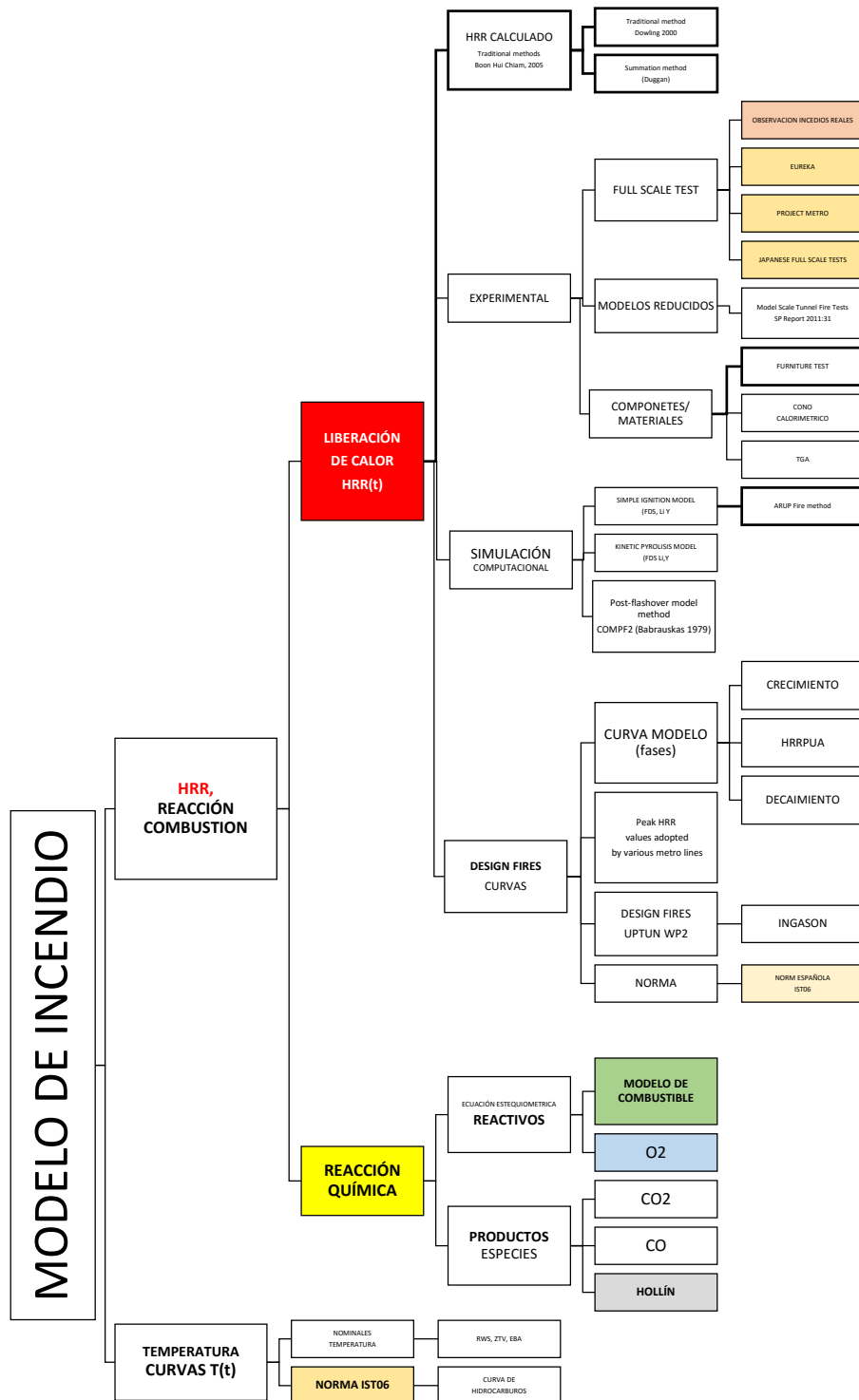
Los modelos de tasa de liberación de calor se obtienen a partir de ensayos, a partir de métodos tradicionales y a partir de métodos computacionales de simulación.

Los ensayos se realizan a tres niveles o escalas: modelos o incendios a escala real en el que se quema un vehículo del que se quiere obtener las tasas de liberación, modelos a escala reducida o sobre maquetas o ensayos de los materiales constitutivos de los componentes de los vehículos del ferrocarril.

Estos ensayos de materiales son los correspondientes al cono calorimétrico (ISO 5660-1, ASTM E 1354, NFPA 264, CAN ULC 135, BS 476) y la TGA o análisis termo gravimétrico (ASTM E1131, ISO 11358) que persiguen determinar la temperatura de ignición, las constantes de la cinética de la reacción química de combustión del modelo de Arrhenius y las tasas de pirólisis, liberación de calor y de especies producto de la combustión del material ensayado. Los ensayos de materiales son la base de los modelos de simulación para la obtención del modelo de incendio que bien se puede acoplar o desacoplar del modelo de escenario. Los modelos computaciones de simulación de incendios se

clasifican en tres categorías: HRRPUA o tasa de liberación de calor por unidad de superficie método, Simple Ignition Model basado en la temperatura de ignición del material y su tasa de liberación de calor por unidad de área (HRRPUA) y Kinetic Pyrolysis Model basado en la ecuación de Arrhenius.

Adicionalmente se dispone de modelos normativos que recogen los resultados obtenidos en la investigación para su aplicación tecnológica en el proyecto de sistemas de protección contra incendios.



El siguiente esquema muestra los puntos que se van a tratar en este capítulo.

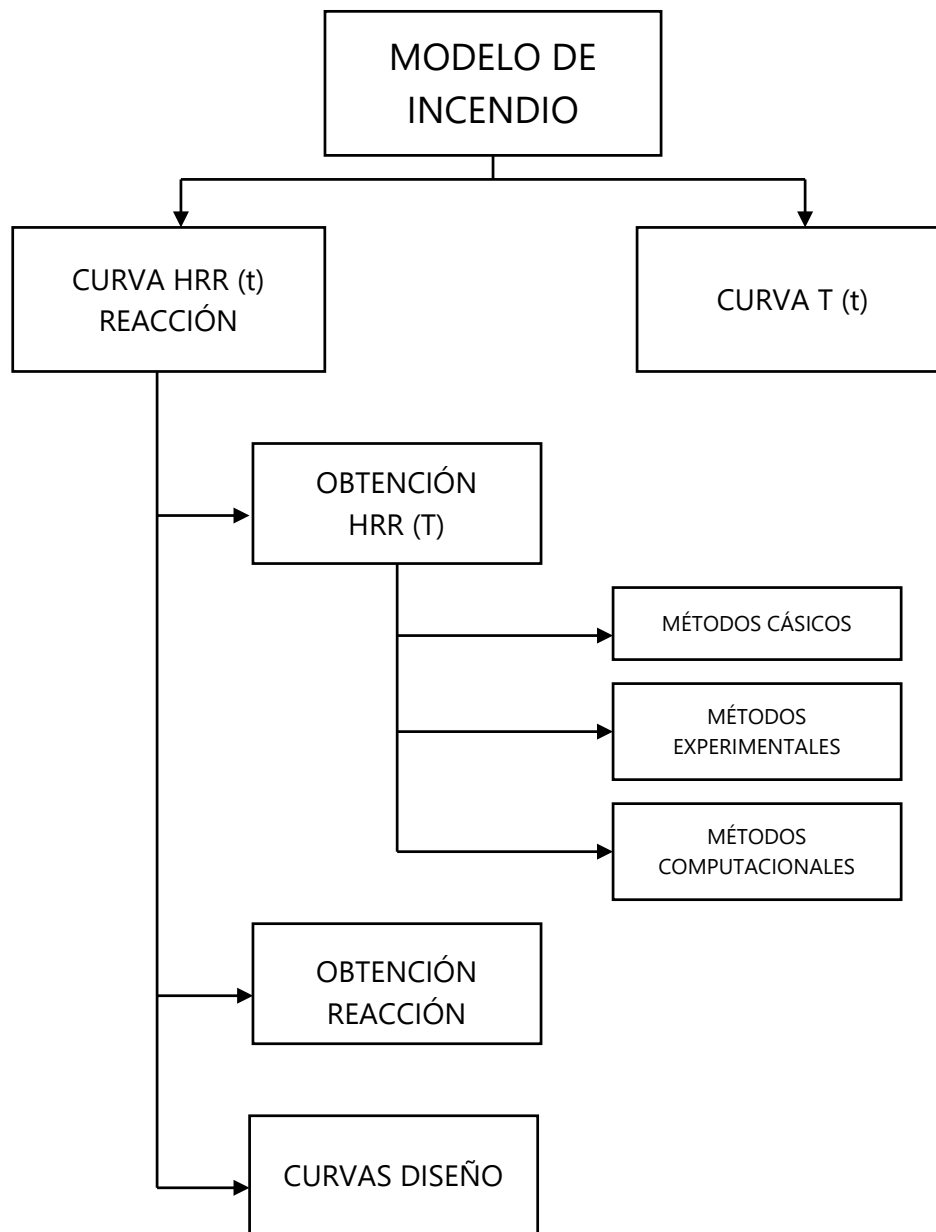


Figura 42. Esquema de modelos de incendio

3.2. Obtención de la curva HRR

Los primeros estudios que se realizaron para determinar la tasa de liberación de calor, HRR de incendios de vagones de metro en el interior de túneles fueron a partir de los restos de incendios reales. Muestra de ellos son los múltiples análisis de diferentes incendios que han sucedido a lo largo de la historia en los túneles de metro.

Sin embargo a partir de la observación de los incendios, en los diferentes estudios realizados, solo se obtenía la tasa de liberación pico del incendio o HRRPEAK.

A partir de las observaciones de los incendios, diferentes autores idearon métodos no solo para obtener la tasa de liberación pico del incendio, sino la curva de tasa de liberación de calor en función del tiempo HRR (t).

Sin embargo el método más exacto de determinar la tasa de calor liberada por un incendio de un tren en un túnel es mediante un ensayo a escala 1:1 . Debido al elevado coste material que esto supone, el número de estos ensayos de este tipo es reducido aunque no nulo.



Figura 43. Incendio a escala 1:1 realizado por White [15]

Ante esta situación los investigadores han propuesto modelos a escala de incendios en vagones que luego han calibrado con ensayos a escala 1:1.



Figura 44. Incendio realizado a escala 1:3 en Metro Project [16].

Por otra parte, gracias a la aparición de equipos como el Cono Calorimétrico o la técnica TGA (thermo gravimetric analysis) se ha podido realizar un enfoque alternativo al ensayo clásico. Este enfoque consiste realizar ensayos parciales, analizando la tasa de liberación de calor de los diferentes materiales que componen un vagón de tren mediante pequeñas muestras o bien analizar los elementos que los componen como asientos o recubrimientos, para después contabilizar la tasa de liberación de calor emitida por todos los elementos materiales que componen un vagón a medida que se van quemando en un incendio. Esta técnica es mucho más económica que realizar un ensayo completo.



Figura 45. Cono Calorimétrico de la Universidad de Canterbury [17].

Adicionalmente con la aparición de los ordenadores modernos, se han desarrollado diferentes softwares que permiten simular incendios en túneles de metro a partir de los resultados obtenidos mediante ensayos parciales o ensayos completos o bien curvas HRR normativas exigidas por las autoridades locales competentes. Estos softwares resuelven modelos escalares, modelos de zona o modelos de campo.



Figura 46. Incendio simulado mediante software de un modelo de campo a partir de una curva HRR

3.2.1. Métodos clásicos de obtención de la curva HRR (t)

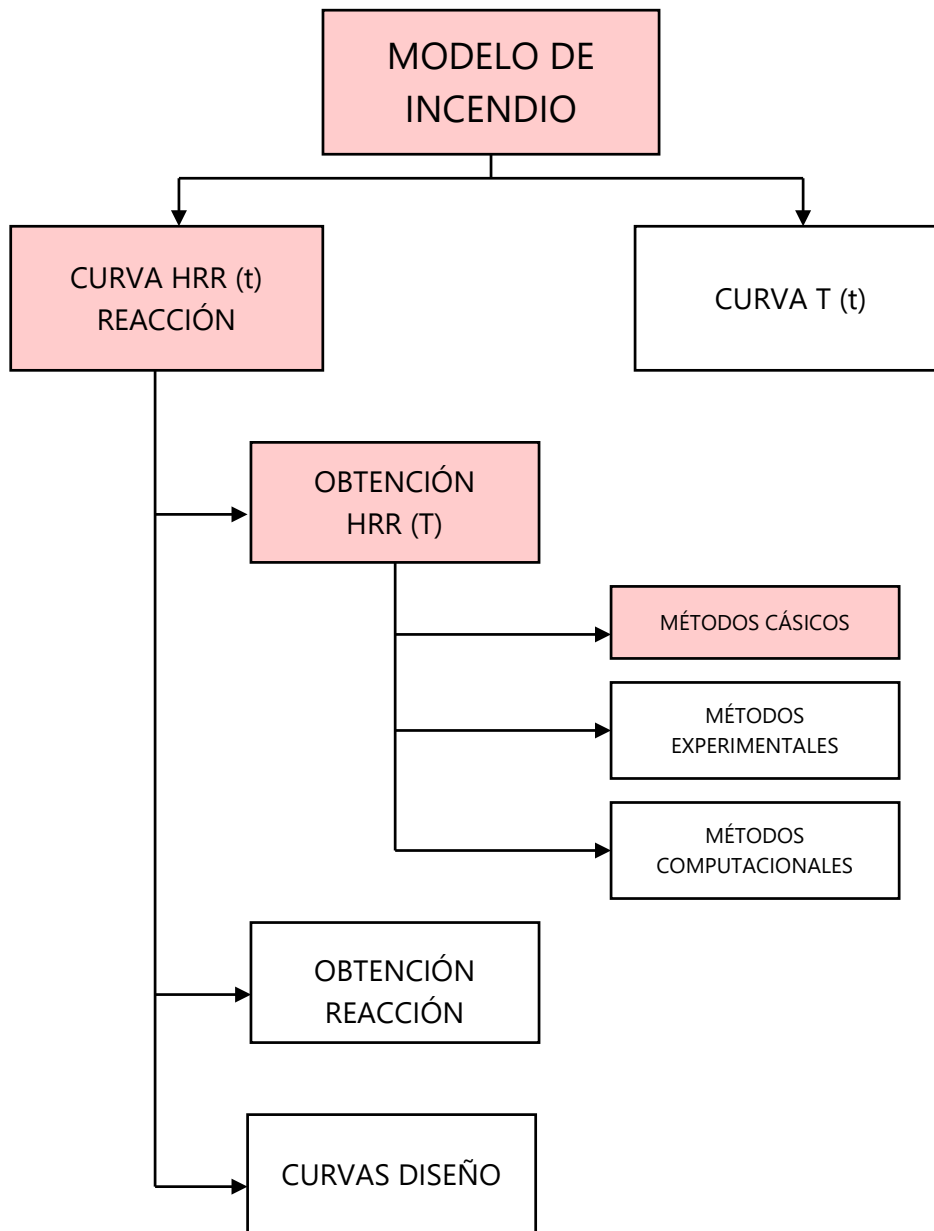


Figura 47. Esquema de modelos de incendio. Obtención de curvas HRR (t). Métodos clásicos.

Históricamente se han empleado varios métodos para determinar la tasa de liberación de calor pico o HRR PEAK de los incendios en túneles de metro.

Inicialmente comenzó a estudiar el HRR PEAK a de algunos incendios reales en los cuales a partir de los efectos producidos en el túnel y estimando la carga de fuego de los vagones se calculaba el HRR PEAK o tasa de liberación de calor máxima del incendio.

A partir de los incendios de metro de Montreal en los años 70 se desarrolló un método para calcular la tasa de liberación de calor. Posteriormente se presenta el método de la adición en el cual a partir de resultados experimentales mediante el cono calorimétrico se obtiene por adición la tasa de liberación de calor de un vagón entero.

3.2.1.1. Estudio histórico del HRR en incendios reales en túneles

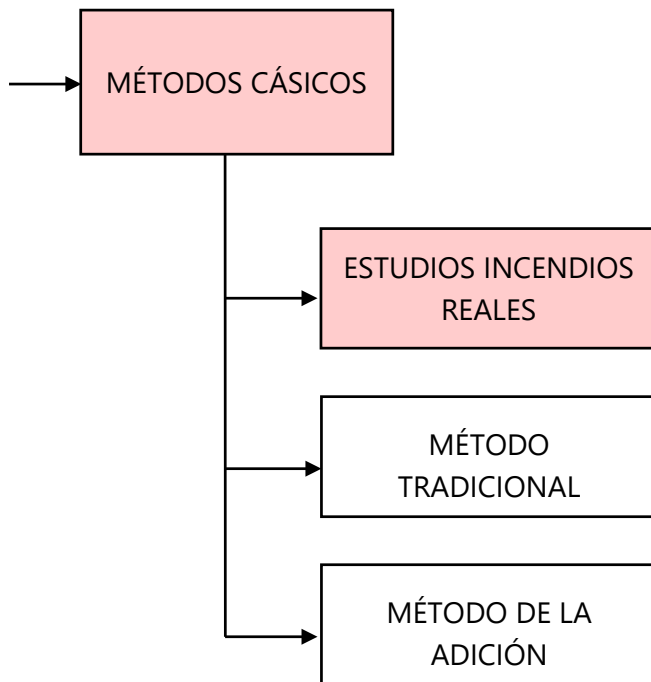


Figura 48. Esquema métodos clásicos de cálculo del HRR. Incendios de metro.

Los incendios en túneles de metro son fenómenos ampliamente estudiados que han permitido estimar en cada caso en función de la tipología de túnel y de tren, la tasa de liberación de calor producida o HRR. A continuación se exponen algunos de los incendios más significativos que se han estudiado.

3.2.1.1.1. Incendio en el metro en Daegu, Korea 2003

El origen de este incendio fue provocado, mediante dos botellas de plástico llenas de gasolina. El convoy estaba compuesto por 6 vagones produciéndose el fuego a la llegada de la estación Jungangno. Los investigadores estimaron una tasa de liberación de calor de 20 MW de acuerdo con Chow [18] and Park [19].



Figura 49. Imagen del tren incendiado en Daegu.

3.2.1.1.2. Incendio en el túnel de Kaprun, Austria 2000

El incendio no fue en un vagón de metro si no en un vagón de un tren tipo cable-rail empleado para salvar grandes pendientes. En este caso el incendio se produjo en un tramo en un túnel con una pendiente de 43°. El origen del incendio fue un calefactor defectuoso en la cabina del conductor, y se estima que la tasa de liberación de calor osciló entre 15-50 MW de acuerdo a FIT Workpackage2 [20].



Figura 50. Restos del tren de Kaprun

3.2.1.1.3. Incendio en el metro de Baku, Azerbaijan 1995

Se produjo un incendio a 200 metros de la estación de Ulduz en el cuarto coche de un convoy de 5 coches debido a un fallo eléctrico en el equipamiento de los bogies. El fuego se expandió al 5º coche alcanzándose un valor pico de HRR de 100 MW tras 30-45 minutos del inicio del incendio de acuerdo a FIT Workpackage2 [20].



Figura 51. Restos del convoy tras el incendio en el metro de Baku. Ilgar Jafarov

3.2.1.1.4. Incendios en el metro de Montreal, 1971 y 1974 Canadá

En 1971 un accidente debido a un choque entre un convoy de metro con el final de línea, derivó en un incendio que se expandió a los convoyes anexos en la estación de metro Henri Bourassa. De acuerdo a Associated Engineers la tasa de liberación de calor media fue de 20,5 MW.



Figura 52. Bomberos de Montreal apagando el incendio en la estación Henri Bourassa, Montreal 1971

En 1974 unos neumáticos defectuosos de un vagón produjeron un cortocircuito al sur de la estación Rosemard, también en Montreal. El fuego se expandió a nueve vehículos y de acuerdo a Associated Engineers la tasa de liberación de calor media fue de 26,4 MW.



Figura 53. Restos del interior de uno de los vagones incendiados en las cercanías de la estación Rosemard.

Los valores de tasa de liberación de calor estimados por Associated Engineers para ambos incendios son valores medios estimando que los valores pico de HRR fueron mucho mayores.

3.2.1.2. Método tradicional

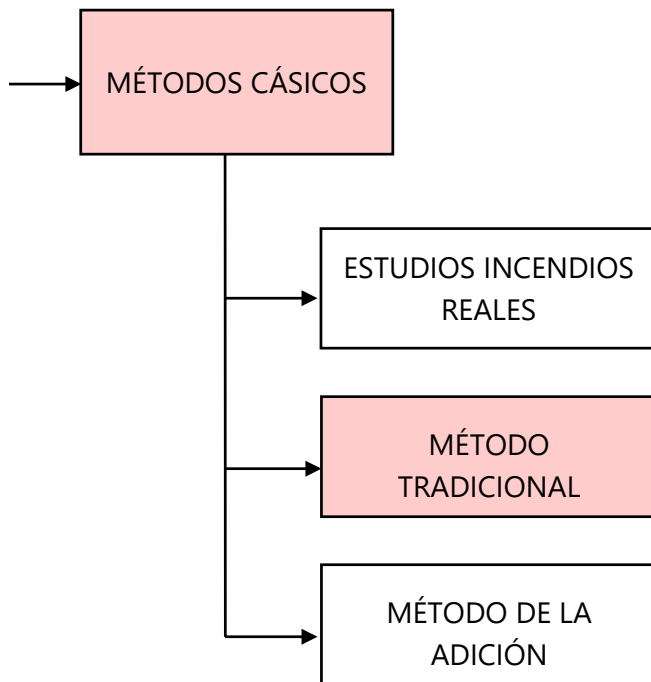


Figura 54. Esquema métodos clásicos de cálculo del HRR. Método tradicional.

Este método propuesto por Dowling y Delichatsios [21] y Dowling y White [22] consiste en calcular la carga total de fuego del convoy en MJ y dividirla en un tiempo asumido. Este método fue puesto en práctica por primer vez en 1975 tras los incendios de los metros de Montreal, y se ha empleado para diseñar las instalaciones de protección contra incendios de diferentes sistemas de metro por todo el mundo.

Con el tiempo este método ha sufrido revisiones conforme han ido cambiando las normativas de protección contra incendios y los materiales empleados en los vagones.

Las diferentes revisiones y propuestas que ha sufrido el método tradicional son las siguientes:

3.2.1.2.1. Escenario de diseño 1975

Esta fue la primera iteración del método tradicional. Se empleó para determina la tasa de calor liberada por los incendios de los túneles de Montreal (Diciembre de 1971 y Enero de 1974). En ambos incendios el flashover o incendio súbito generalizado tuvo lugar a los 20 minutos del inicio del incendio, siendo el tiempo medio del incendio de los vehículos de 1 hora. El Escenario de Diseño de 1975 propone que una tasa de liberación constante basándose en que la tasa de liberación de calor del incendio durante su duración es igual a la de un único vagón quemándose:

$$HRR = \frac{\text{Carga total de un vagón (MJ)}}{\text{Tiempo (s)}} \quad Ec (3.1)$$

Esta primera iteración para determinar la tasa de liberación del calor se empleó para el diseño del sistema de ventilación de los primeros túneles del metro de Atlanta, así como los metros de Baltimore, Buffalo, Hong Kong y Pittsburg.

3.2.1.2.2. Escenario de diseño 1983

Esta fue la primera revisión que se aplicó al método tradicional, derivadas de las observaciones realizadas al incendio de metro de San Francisco en Enero de 1979 y al incendio del metro de Toronto en Octubre de 1976.

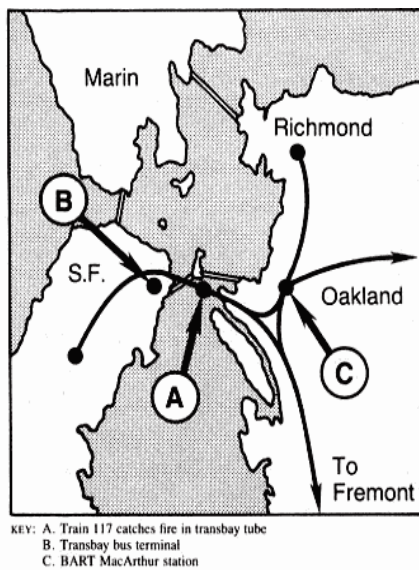


Figura 55. Ubicación del metro incendiado en el túnel de la línea de metro de San Francisco en 1979.



Figura 56. Bomberos en la estación Chrisite de Toronto observando los restos del vagón de metro calcinados.

En ambos incendios se observó que el incendio se propagó al vagón contiguo 20 minutos después de que se produjera el flashover en el vagón donde se originó el incendio. Cabe recordar que los vagones de metro de estos trenes estaban compartimentados entre sí mediante puertas tal como se observa en la siguiente imagen:



Figura 57. Puerta de separación entre vagones.

En esta iteración del método tradicional para determinar la carga de fuego así como la tasa de liberación de calor se subdivide un vagón de metro en tres partes diferenciadas:

Floor (F): Estructura de suportación de los viajeros sobre el cual va montado el habitáculo del vagón. En la imagen siguiente queda resaltado en naranja.

Above floor (AF): Interior del tren, cerramientos u equipamiento situado por encima del suelo del vagón. En la imagen siguiente queda resaltado en verde.

Below Floor (BF): Equipamiento y maquinaria situada por debajo del suelo del vagón. En la imagen siguiente queda resaltado en rojo.

En adelante se emplearán estos términos traducidos al castellano siendo suelo, sobre suelo y bajo suelo los términos a emplear.

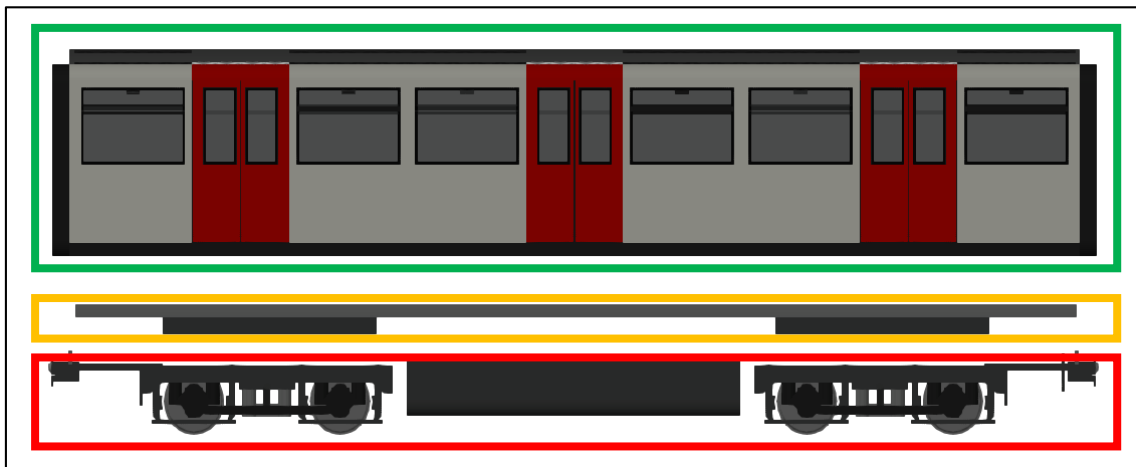


Figura 58. Divisiones del vagón de metro empleadas en la estimación del HRR en el método tradicional.

En ambos incendios se quemaron todos los elementos combustibles bajo suelo y sobre el suelo, quedando únicamente la mitad del suelo del tren por quemar en el primer coche, donde se produjo el incendio. En el resto de coches una vez se propagó el incendio, este se limitó únicamente al combustible sobre el suelo. Esto queda patente en la siguiente foto del incendio en la estación Christie de Toronto.



Figura 59. Restos de un vagón del incendio en la estación Christie en Toronto.

Para la estimación del HRR se estima un fuego inicial de un vagón i \dot{Q}_{int_1} de 0,7 MW de 20 minutos de duración. El HRR liberado por el primer coche \dot{Q}_1 se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_1 = \frac{Q_{AF} (MJ) + Q_{BF} (MJ) + \frac{1}{2} Q_F - \dot{Q}_{int} (MW) \cdot 1200 (s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.2)$$

Para el segundo coche incendiado y los siguientes siendo n el número del vagón se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_n = \frac{Q_{AF} (MJ) - \dot{Q}_{int} (MW) \cdot 1200 (s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.3)$$

La tasa de liberación de calor pico se obtiene sumando las tasas de liberación de calor de los diferentes vagones quemados en función del tiempo. Se

Periodo de tiempo (min)	Vagones involucrados	HRR Pico (MW)	Notas
0-20	1	\dot{Q}_{int_1}	Fase inicial de combustión en vagón 1.
20-40	1+2	$\dot{Q}_{int_2} + Q_1$	Flashover del vagón1. Fase inicial del vagón 2.
40-60	1+2+3	$\dot{Q}_{int_3} + Q_1 + Q_2$	Vagón 1 continua quemándose, flashover del vagón 2. Fase inicial del vagón 3.
60-80	1+2+3+4	$\dot{Q}_{int_4} + Q_1 + Q_2 + Q_3$	Vagones 1 y 2 continúan quemándose. Flashover del vagón 3. Fase inicial del vagón 4.
80-100	2+3+4+5	$\dot{Q}_{int_5} + Q_2 + Q_3 + Q_4$	Vagón 1 completamente quemado. Continúan quemándose vagones 2 y 3. Flashover del vagón 4. Fase inicial del vagón 5.

Tabla 18. Evolución de la tasa de liberación de calor.

Esta iteración del Método Tradicional de 1983 fue empleado para el diseño de la la sección MOS-1 de la Línea Roja del metro y la Línea Azul de Los Ángeles así como el metro de Filadelfia y las nuevas secciones del metro de Atlanta.

3.2.1.2.3. Escenario de diseño 1989

Esta segunda revisión del método tradicional se realiza para introducir el impacto de las recomendaciones de la NFPA-130 "Standard for Fixed Guideway Transit Systems" [23] en 1983, la cual limitaba las características de inflamabilidad y emisión de humos de los materiales empleados en la construcción de los vagones de metro.

Muchos sistemas de metro anteriores a la publicación de la NFPA 130 fueron modificados para cumplir (o exceder) con los requerimientos expuestos en la NFPA 130.

En esta iteración del método tradicional se incrementó el tiempo en alcanzarse el flashover en un vagón incendiado de 20 minutos a 30 minutos. No pudo comprobarse la idoneidad de esta medida ya que desde la aparición de la NFPA 130 hasta esta segunda revisión del Método Tradicional no se produjo ningún incendio en metros en los Estados Unidos.

Tras la revisión del Método tradicional las ecuaciones de tasa de liberación de calor quedaron de la siguiente manera.

Para la estimación del HRR se estima un fuego inicial de un vagón i \dot{Q}_{int_i} de 0,7 MW de 20 minutos de duración. El HRR liberado por el primer coche \dot{Q}_1 se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_1 = \frac{Q_{AF} (MJ) + Q_{BF} (MJ) + \frac{1}{2} Q_F - \dot{Q}_{int} (MW) \cdot 1800 (s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.4)$$

Para el segundo coche incendiado y los siguientes siendo n el número del vagón se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_n = \frac{Q_{AF} (MJ) - \dot{Q}_{int} (MW) \cdot 1800 (s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.5)$$

En este diseño se consideran hasta dos vagones completamente incendiados debido al tiempo que tarda en alcanzarse el flashover. En la siguiente tabla se muestra la evolución temporal del incendio.

Periodo de tiempo (min)	Vagones involucrados	HRR Pico (MW)	Notas
0-30	1	\dot{Q}_{int_1}	Fase inicial de combustión en vagón 1.
30-60	1+2	$\dot{Q}_{int_2} + Q_1$	Flashover del vagón 1. Fase inicial del vagón 2.
60-90	2+3	$\dot{Q}_{int_3} + Q_2$	Vagón 1 continua quemándose, flashover del vagón 2. Fase inicial del vagón 3.
90-120	3+4	$\dot{Q}_{int_4} + Q_3$	Vagones 1 y 2 continúan quemándose. Flashover del vagón 3. Fase inicial del vagón 4.
120-150	4+5	$\dot{Q}_{int_4} + Q_4$	Vagón 1 completamente quemado. Continúan quemándose vagones 2 y 3. Flashover del vagón 4. Fase inicial del vagón 5.

Tabla 19. Evolución de la tasa de liberación de calor.

Como puede observarse la tasa de liberación de calor es mucho menor aunque la duración del incendio se extiende.

Aunque este método se ha empleado para estimar el HRR con el fin de diseñar el sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio, en algunos diseños se ha empleado un factor de seguridad de 2, para contemplar incertidumbres con contempladas en el diseño.

3.2.1.2.4. Revisión del diseño de la Línea Orbital de Singapur 2011

La Línea Orbital de Singapur fue terminada en Octubre 2011, tiene una longitud de 35,5 km y esta completamente automatizada. Para el diseño de esta línea de metro, el cual comenzó a finales de los años 80 se emplearon los Escenarios de Incendio del Método Tradicional (1983, 1989) con ciertas modificaciones.

En el cálculo de la tasa de liberación de calor para la Línea Orbital se consideró que el fuego incendio se propagaba 10 minutos después del flashover del vehículo contiguo. Por otra parte se consideraba que el fuego inicial Q_{int_i} tenía una duración de 30 minutos.

Además se incluyó un factor de eficiencia de combustión $\chi = 0,7$ para representar que no todo el material combustible disponible en los vagones ardería en el incendio. Este

valor es similar al coeficiente de combustión m empleado en el Eurocódigo1: Acciones en Estructuras Parte 1-2 en su Anexo E, densidades de carga de fuego [24].

Finalmente se consideraba que el suelo del metro tenía una resistencia al fuego de 45 minutos. Teniendo en cuenta todo lo expuesto y que al igual que en la revisión del Méto Tradicional de 1989, únicamente dos vagones están quemándose simultáneamente, el cálculo de la tasa de liberación de calor empleada en la Línea Orbital de Singapur queda de la siguiente manera:

Para la estimación del HRR se estima un fuego inicial de un vagón $\dot{Q}_{int,1}$ de 0,7 MW de 30 minutos de duración. El HRR liberado por el primer coche \dot{Q}_1 producido por los elementos combustibles existentes debajo del suelo del primer vagón se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_1 = \frac{\chi \cdot Q_{BF} (MJ) - \dot{Q}_{int}(MW) \cdot 1800(s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.6)$$

Tasa de liberación de calor del primer vagón:

$$\dot{Q}_2 = \frac{\chi \cdot \left[Q_{AF} (MJ) + Q_{BF} (MJ) + \frac{1}{2} Q_F \right] - \dot{Q}_{int}(MW) \cdot 1800(s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.7)$$

Tasa de liberación de calor de la carga de fuego de los materiales combustibles del suelo y encima del suelo del primer vagón incendiado una vez que el material combustible de debajo del suelo se ha consumido:

$$\dot{Q}_3 = \frac{\chi \cdot \left[Q_{AF} (MJ) + \frac{1}{2} Q_F \right] - \dot{Q}_{int}(MW) \cdot 1800(s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.8)$$

Para el segundo coche incendiado y los siguientes siendo n el número del vagón se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_n = \frac{\chi \cdot [Q_{AF} (MJ)] - \dot{Q}_{int}(MW) \cdot 1800(s)}{3600 (s)} \quad Ec (3.9)$$

3.2.1.3. Método de la adición

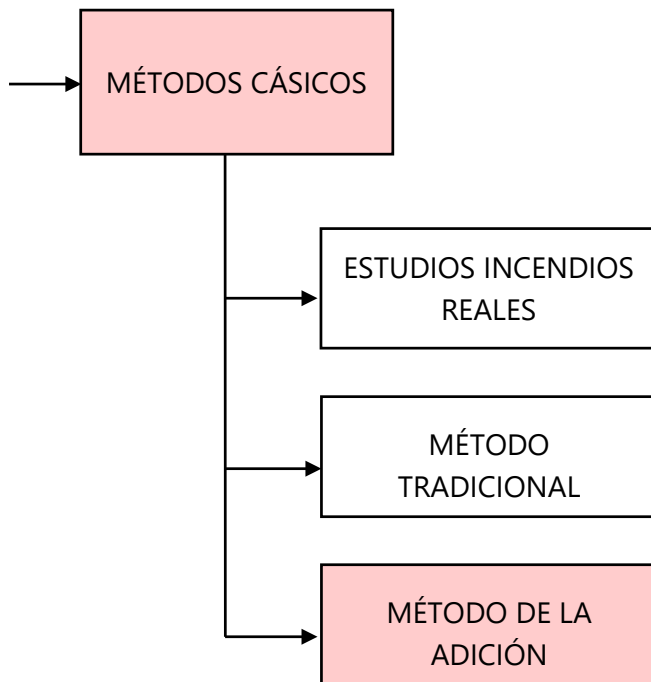


Figura 60. Esquema métodos clásicos de cálculo del HRR. Método de la adición.

Derivado del coste de realizar ensayos a escala completa de un vagón de tren y gracias a la aparición de equipos como el Cono Calorimétrico o los equipos de Análisis Termo gravimétrico (TGA) se ha desarrollado el método de la adición. Este método consiste en analizar la tasa de liberación de calor de diferentes elementos del vagón de metro para posteriormente sumar las tasas de liberación de calor y obtener la tasa total producida por el incendio.

En el anexo D de la NFPA 130 [23] se define un método de no obligado cumplimiento para determinar la "carga peligrosa" en MJ/m³ dentro de un vagón de tren. Basándose en el trabajo de Smith [25] se emplea un flujo de calor durante 180 segundos (para provocar la ignición) para determinar la tasa de liberación de calor media así como la tasa de emisión de humos de diferentes elementos que componen tanto la estructura como el equipamiento de un vagón de metro.

La superficie de los diferentes elementos es expuesta a los flujos de calor de la siguiente tabla con el objeto de simular un conato de incendio. La tasa de exposición de flujo de calor empleada, es función de la posición y orientación de las piezas en el interior del vagón. Así pues en caso de producirse un incendio las superficies del techo del vagón serán las mas expuestas al flujo de calor, seguidas de las superficies verticales.

Las superficies menos expuestas a un fuego en el interior de un vagón serían los suelos y resto de superficies horizontales distintas del techo tal y como se muestra en los valores de la tabla siguiente:

Superficie	Flujo de calor (kW/m ²)
Asiento	10
Suelo	10
Ventana	15
Cobertura Ligera	15
Pared inferior	15
Techo	35

Tabla 20. Flujo de calor aplicado a los diferentes elementos del vagón.

Los ensayos se realizan mediante el equipamiento de la Universidad Estatal de Ohio (ASTM-E-906 2004) expuesto en la imagen inferior.

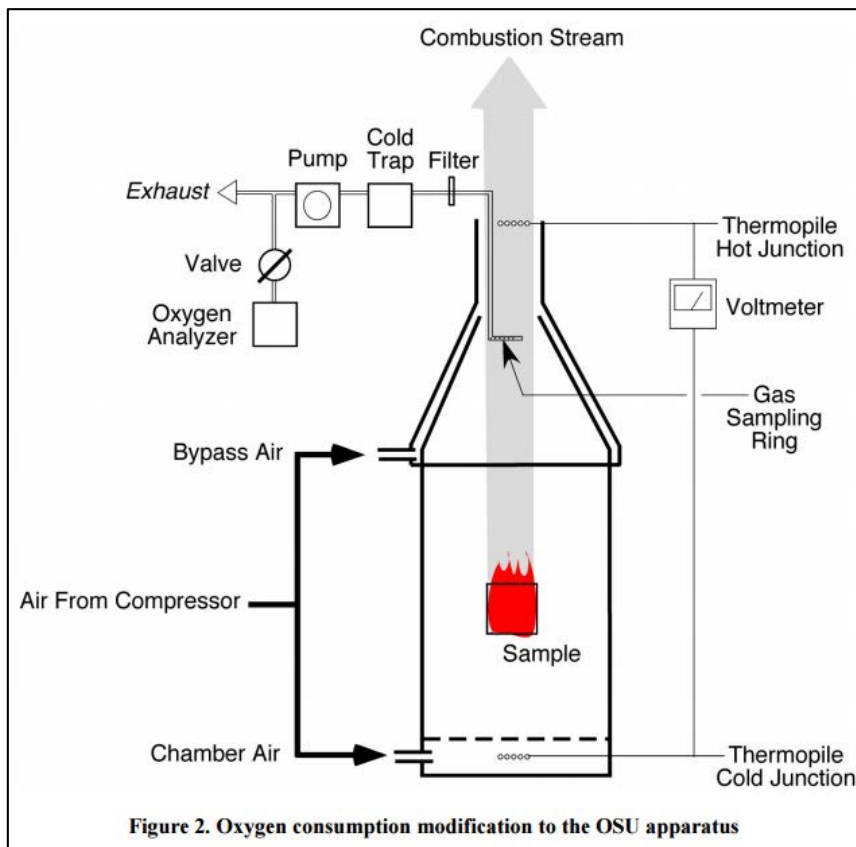


Figura 61. OSU apparatus ASTM-E-906 2004 empleado para la determinación del HRR de los diferentes elementos de un vagón de metro.

Para cada elemento se mide una tasa de liberación de calor media y una tasa de liberación de humos, teniendo en cuenta las superficies de las probetas o elementos a ensayar. Finalmente los valores totales obtenidos se dividen por el volumen total existente en el tren para determinar la carga de fuego y humo por unidad de volumen de cada vagón. Se sugiere que la carga de fuego se inferior a 3 MJ/m³ con el fin de conseguir que un fuego provocado por la ignición de 0,45 kg de periódico o 0,23 kg de

combustible para encender fuegos no produzca un incendio con capacidad de propagarse.

Este método se emplea para determinar la inflamabilidad de los elementos de un vagón de metro pero no aporta una completa descripción del incendio ni de su tamaño [26].

Por otra parte Duggan [27] publicó un método que sumaba las tasas de liberación de calor por unidad de superficie (**HRRPUA** o heat reléase rate per unit area) de los materiales expuestos de un vagón. Duggan ensayaba todos los materiales y componentes a estudiar en un cono calorimétrico obteniendo las curvas completas de las tasa de liberación de calor. Para simular las condiciones de un fuego real dentro del vagón sometía a las piezas y materiales a ensayar a un elevado flujo de calor tal como se muestra en la siguiente tabla.

Superficie a ensayar	Flujo de calor (kW/m ²)
Supina horizontal (típica de suelos); Revestimiento de suelos y asientos.	20-25
Vertical. Paneles de paredes, respaldo de asientos y revestimiento trasero de asientos.	35
Prono horizontal (típica de techos); Paneles de techo.	50

Tabla 21. Flujo de calor aplicado a los diferentes elementos del vagón.

Como puede observarse los valores empleados por Duggan son superiores a los propuestos por la NFPA 130 [9].

A partir de las **HRRPUA** obtenido de cada superficie, se multiplicaba por la superficie de cada tipo presente en el vagón obteniendo una curva HRR.

$$HRR = \sum_i^{material} (HRRPUA_{material_i} \cdot Superficie_{material_i}) \quad Ec (3.10)$$

Además Duggan propuso añadir una fuente de ignición continua de 1,5 MW con el objeto de simular un incendio en un compartimento de equipaje. Tras revisar los datos obtenidos frente al diseño de un sistema de ventilación de emergencia en un túnel, Duggan propuso añadir a la tasa de liberación de calor una tasa adicional de 3MW con el objeto de simular la combustión de elementos no contemplados en sus cálculos como equipajes, papeleras u otros elementos presentes en el vagón los cuales contribuirían con el incendio.

Dowling y Delichatsios [21] recogen en su publicación que la Mass Transit Rail Corporation (MTRC) de Hong Kong, no permite que la suma de la tasas de liberación de calor de los materiales de un vagón de metro no puede exceder de 5MW en ningún momento.

Para poder realizar esta comprobación la MTRC los materiales presentes en un vagón de metro deben ser ensayados en un cono calorímetro, aceptando el método propuesto por Duggan en 1997 como válido.

Downling y White [22] comentan acerca del método de Duggan que es contrario acerca de lo que actualmente se conoce sobre incendios en entornos cerrados. El método propuesto por Duggan puede sobreestimar la tasa de liberación de calor ya que asume que todos los materiales presentes en el tren se queman simultáneamente. Además el cálculo propuesto por Duggan se realiza para un único vagón sin tener en cuenta la contribución al incendio de los elementos por debajo del suelo del vagón.

Dowling y Delichatsios [28] publicaron en el año 2000 una metodología la cual intentaba modelar el efecto del crecimiento del incendio dentro del habitáculo del vagón de tren. Para ello en su modelo de incendio se encendía arbitrariamente una región que suponía el 10% de la superficie del vagón cada minuto.

3.2.2. Ensayos para determinar el HRR

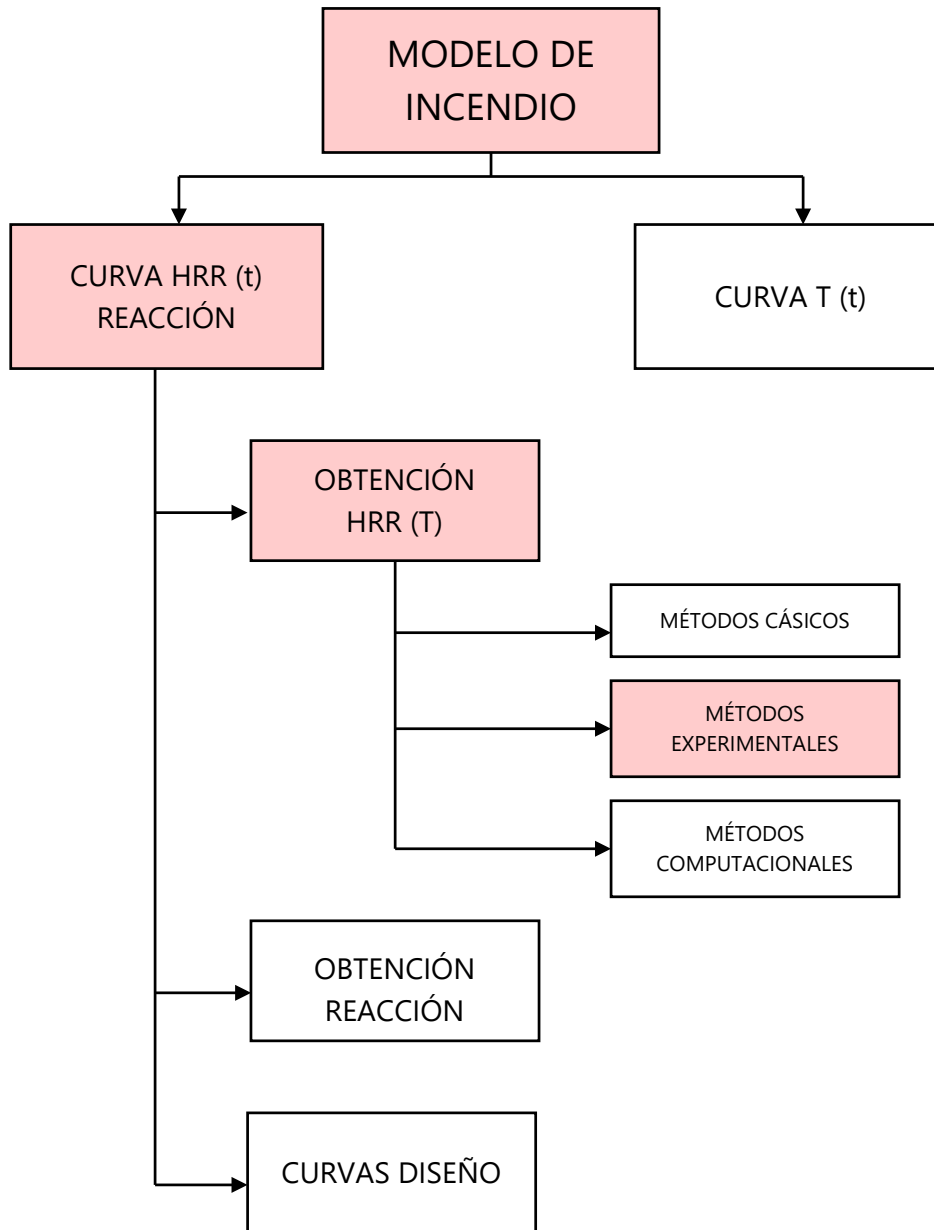


Figura 62. Esquema de modelos de incendio. Obtención de curvas HRR (t). Métodos experimentales.

Como ya se ha comentado el método más exacto de determinar la tasa de calor liberada por un incendio de un tren en un túnel es mediante un ensayo a escala 1:1.

La problemática de este tipo de ensayos es:

- Elevado coste tanto por los equipos a emplear.
- Elevado coste de las instalaciones necesarias para realizar el ensayo.
- Necesidad de personal muy calificado para controlar el experimento y poder validar los resultados.

- Los experimentos no representan todas las casuísticas posibles por lo tanto se debe elegir qué condiciones del test son más representativas para la obtención de la curva.

Derivado de este problema los grandes estudios donde se realizan simulación a escala 1:1 llevan asociados modelos a escalas menores, los cuales se calibran con el modelo a escala 1:1 para poder llevar a cabo estudios de diferentes casuísticas (vagón con ventanas abiertas, cerradas, diferentes combinaciones de materiales, diferente disposición de la carga de fuego...). Además gracias a la aparición del Cono Calorimétrico o del análisis ATG se ha podido estudiar la tasa de liberación de calor de los diferentes materiales empleados en la construcción de vagones de metros y a partir de esta información obtener estimar o modelar la curva del incendio completo del vagón bien sea mediante métodos tradicionales como el método de la adición o mediante técnicas más modernas como los actuales modelos computacionales.

A continuación se analizan algunos de los ensayos Full Scale Test para la obtención de la tasa de liberación de calor de vagones de metro.

3.2.2.1. Método Full Scale Test

El método Full Scale Test consiste en reproducir un incendio bajo unas condiciones determinadas en un vagón real de tren, adecuadamente instrumentado para medir in situ la tasa de calor liberada o HRR entre otros parámetros.

Debido al elevado coste que ello supone (no solo es necesario un vagón de tren en un entorno controlado como es un túnel con un sistema de ventilación adecuado y asistido por los servicios de extinción si no un sistema de medición de los diferentes parámetros del incendio correctamente calibrado e instalado) este tipo de estudios no son muy abundantes sin embargo son obras de referencia para posteriores autores.

Por otra parte cabe señalar que este tipo de ensayos suele llevar asociados múltiples ensayos a escala reducida [15] [16], así como modelos computacionales de incendio. El objetivo es conseguir un modelo de un menor coste económico que el modelo a escala 1:1 y calibrarlo a partir de los resultados obtenidos en el incendio a escala real. Un vez se han podido calibrar los diferentes modelos, bien a escala, o computacionales, es posible obtener la tasa de liberación de calor de un incendio en un vagón de metro en diferentes configuraciones a las ensayadas en el incendio a escala 1:1 con un coste económico mucho menor.

A continuación se van a exponer algunos de los test realizados a escala 1:1.

3.2.2.1.1. Proyecto Eureka

Este estudio llevado a cabo por 9 países europeos bajo el nombre EUREKA EU 499 "Fire in tunnels" consistió en realizar una serie de ensayos escala 1:1 de incendios de diferentes vehículos en el interior de un túnel de una mina de 2,3 km de longitud en Noruega.

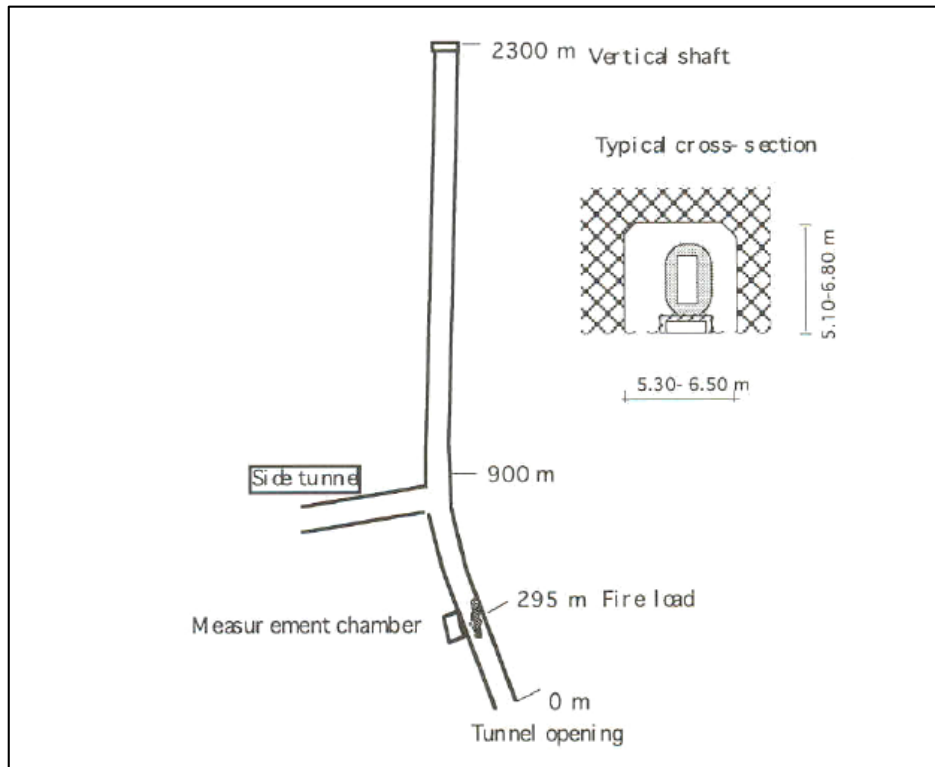


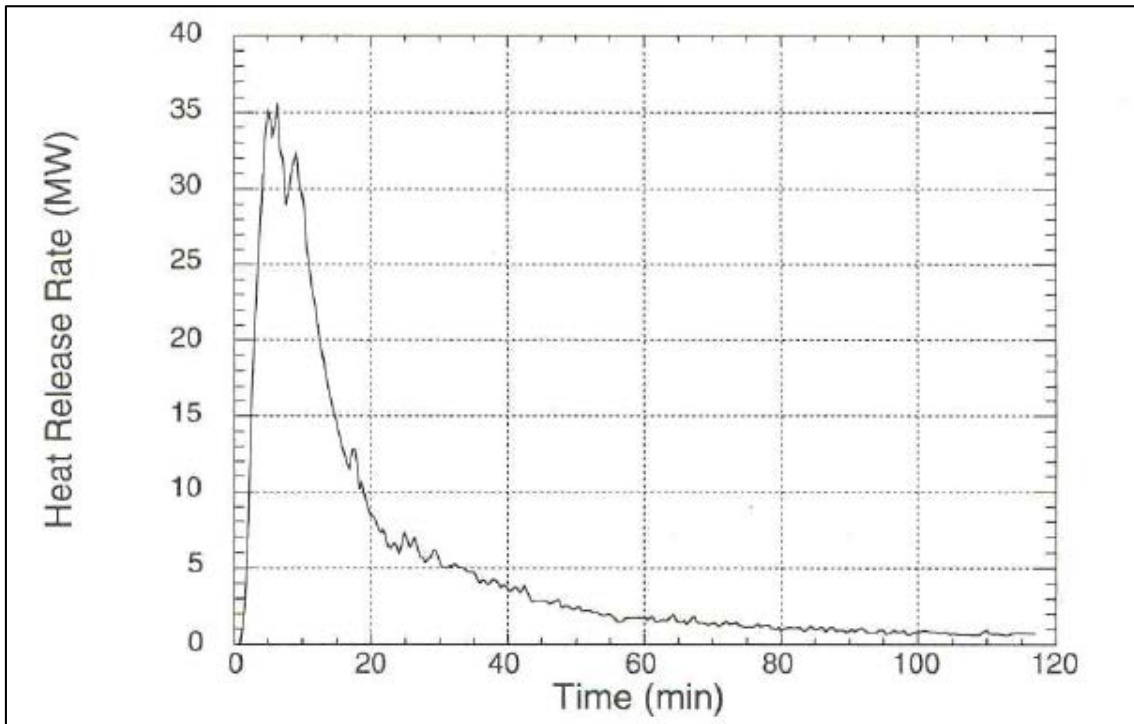
Figura 63. Planta del túnel, distribución y sección del túnel.

En particular se ensayaron un vagón de pasajeros, un vagón de metro, un camión con carga simulada y dos piras de madera.

Para medir la tasa de liberación de calor de cada ensayo se empleó la técnica de medición del consumo de oxígeno.

En particular el vagón de metro presentaba unas dimensiones de 18 metros de largo por 2,8 metros de ancho y una altura de 3 metros, con una estructura de aluminio. Contaba con 40 plazas acolchadas con espuma de poliuretano. Se estimó que la carga de fuego de los asientos era de 6000 MJ mientras que la carga total del coche era de 41300 MJ (nótese por tener un orden de magnitud que un kilogramo de material celulósico presenta una carga de fuego de unos 17 MJ mientras que un kilogramo de material derivado de hidrocarburos presenta una carga de fuego de unos 42 MJ).

En la siguiente imagen se presenta la tasa de liberación de calor del ensayo.



Gráfica 1. Tasa de liberación de calor del ensayo del proyecto EUREKA

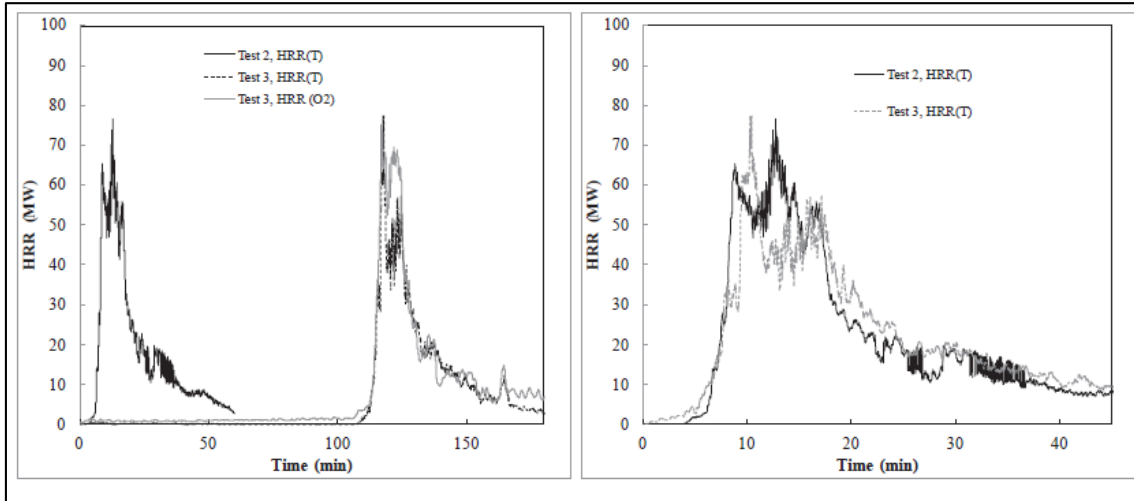
Al integrarse la potencia liberada se calcula que se liberaron 36900 MJ, el 90% de la carga total estimada con un pico de potencia de 35 MW a los 5 minutos de comenzar el ensayo.

3.2.2.1.1.1 Test Japanese escala 1:1

En el año 2004 Hasemi y su colaboradores [29] realizaron varios ensayos de incendio en trenes de acuerdo con la normativa japonesa, obteniendo tasas de liberación de calor de los diferentes ensayos de incendios en trenes comprendidas entre 10 y 20 MW.

3.2.2.1.1.2 Project Metro, Arvika 2011

El 7 de Septiembre de 2011 Ignason y sus colaboradores llevaron a cabo un ensayo de incendio de varios vagones de metro en un túnel en Arvika[16], Suecia. Los ensayos se prepararon durante 3 años con un presupuesto de 1,5 millones de €.



Gráfica 2. Tasa de liberación de calor de los Test 2 y 3 de los ensayos de Arvika.



Figura 64. Izq. Retropropagación desarrollada en test 2. Dcha. Inicio del proceso de la retropropagación de los humos en el test 3

Las recomendaciones del Project Metro aplicables a este trabajo las siguientes:

Para el diseño de sistemas de extracción de humos en estaciones de metro se propone un incendio de diseño de 60 MW con una tasa de crecimiento del fuego rápida. Si se demuestra que el tren cumple con normativas restrictivas en cuanto a la resistencia al fuego de los materiales que componen el mobiliario del tren, se debe considerar un valor menor; 20 MW.

Para el diseño de túneles de metro conectados a estaciones se recomienda un incendio de diseño de 20 MW con una tasa de crecimiento media.

Para el diseño basado en prestaciones se recomienda el método propuesto por Ignason y Li **[30]** . Como alternativa se propone emplear una curva tiempo-temperatura utilizando la Curva Europea TSD 2008/57/EG.

Se recomienda tomar como velocidad de evacuación de referencia para una visibilidad comprendida entre 1,5-3,5 metros de 0,9 m/s.

3.2.3. Métodos Computacionales

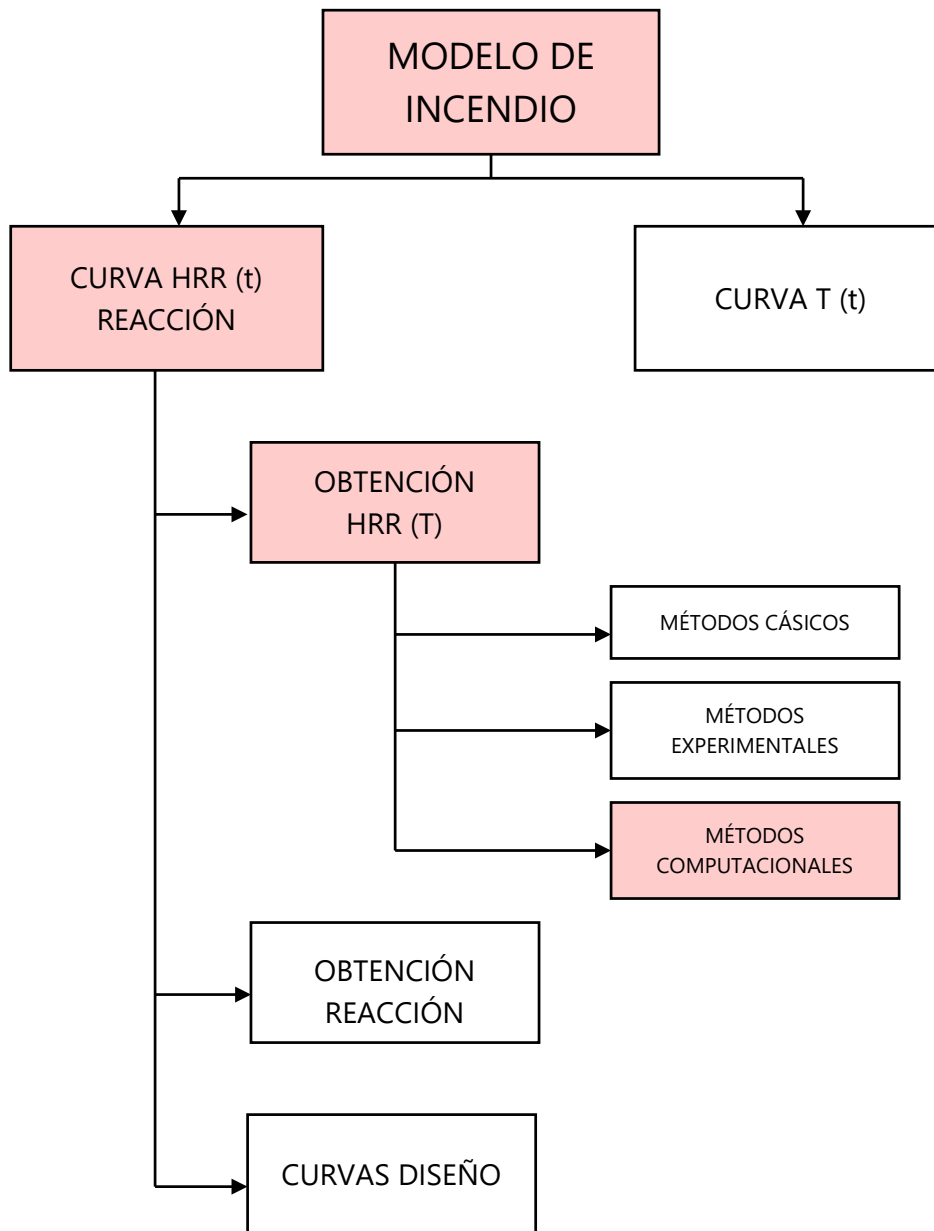


Figura 65. Esquema de modelos de incendio. Obtención de curvas HRR (t). Métodos computacionales.

A continuación se presentarán diversos métodos computacionales para determinar la tasa de liberación de calor de un incendio en un vagón de metro.

En primer lugar se hablará sobre un método post-flashover basado en el software desarrollado en Fortran 90, COMPF-2 por Brabauskas [31] para incendios en recintos cerrados. Modificando el software COMPF-2, Hettinger y Barnett simulaban un incendio en un vagón de metro obteniendo la tasa de liberación de calor.

A medida que avanzó la informática y los equipos de computación aparecieron programas de mecánica de fluidos computacional (CFD) los cuales permiten modelar y analizar mediante el método de los volúmenes finitos, y en este caso en particular, flujos de fluidos conducidos por fuego.

Existen diferentes softwares CFD empleados en simulaciones de incendios en túneles de metro, pero en cuanto a determinar la tasa de liberación de calor de un incendio en un vagón de metro en un túnel, el software más empleado es Fire Dynamic Simulator (en adelante FDS) del NIST (National Institute of Standards and Technology).

FDS es un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) concebido de manera específica para reproducir el fenómeno del incendio en recintos cerrados. FDS resuelve numéricamente un tipo de ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para baja velocidad y flujo considerado desde un punto de vista térmico con énfasis en el transporte de humo y calor derivados de incendios [32].

El sistema de resolución de las ecuaciones diferenciales es método predictor corrector de segundo orden [33].

Estas ecuaciones describen la conservación de la masa, cantidad de las especies, cantidad de movimiento y la energía para un flujo de fluido además de la ecuación de estado.

Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad \text{Ec (3.11)}$$

Conservación de las especies:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad \text{Ec (3.12)}$$

Conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + f \quad \text{Ec (3.13)}$$

Conservación de la energía:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u \right) = \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + \dot{q}''' - \nabla \cdot q_{rad} + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \quad \text{Ec (3.14)}$$

Ecuación de estado:

$$p = \rho T \mathcal{R} \sum_i (Y_i / M_i) \quad \text{Ec (3.15)}$$

El algoritmo principal tiene un esquema predictor-corrector explícito, de segundo orden de exactitud en el espacio y en el tiempo. La turbulencia es tratada por medio de la forma Smagorinsky de Simulación de Grandes Remolinos (Large Eddy Simulation, LES) desde la versión 1 a la 5 de FDS. En la última versión se emplea el modelo de viscosidad turbulenta

de Deardorff, pese a que se puede activar la forma de Smagorinsky o el modelo de viscosidad de Vreman a elección del usuario.

Es posible realizar una Simulación Directa Numérica (Direct Numerical Simulation, DNS) si la rejilla numérica es lo suficientemente fina. LES es el modo de operación por defecto.

Para la mayoría de las aplicaciones, FDS utiliza un modelo de combustión de fracción de mezcla. La fracción de mezcla es una cantidad escalar que se define como la fracción de gas en un punto dado del campo fluido combustible. El modelo asume que esta combustión está controlada por la mezcla, y que la reacción del combustible y el oxígeno es infinitamente rápida.

La transferencia de calor por Radiación se incluye en el modelo mediante la solución de la ecuación de la transmisión por radiación para un gas gris que no se dispersa, y en algunos casos limitados empleando un modelo de banda ancha. La ecuación se resuelve utilizando una técnica similar a la de los métodos de volúmenes finitos (Finite Volume Method, FVM).

Mediante este software es posible modelar cada una de las partes del vagón de incluyendo las propiedades físico-químicas de cada uno de los elementos que lo componen.

A partir de ensayos realizados mediante el Cono Calorimétrico o análisis termo gravimétrico se obtiene el comportamiento frente al fuego, temperatura de ignición, energía de activación, calor de combustión así como muchos otros parámetros que permiten modelar el fenómeno de la combustión de los diferentes elementos o materiales que componen el vagón de metro.

Para obtener la tasa de liberación de calor de un vagón mediante FDS se emplean dos modelos de combustión [34], simple ignition model y kinetic pyrolysis model.

3.2.3.1. Método COMPF2

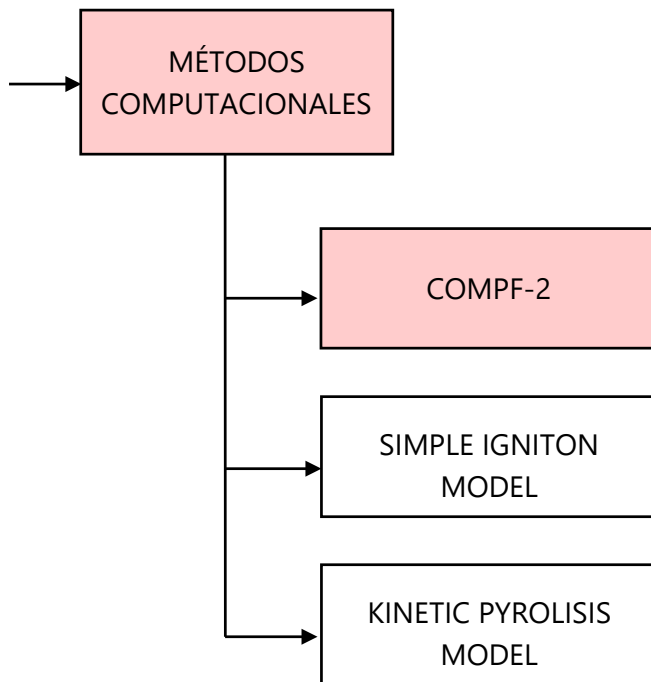


Figura 66. Esquema métodos computacionales de cálculo del HRR. COMPF-2.

Tal como recoge Boon en su tesis final de master **[17]** en 1991 Hettinger y Barnett emplearon el método computacional de Babaruskas COMPF2 para predecir el HRR de un vagón de metro en su interior (incendio sobre el suelo del tren).

COMPF2 es un software desarrollado por Vytenis Brabauskas en 1979 **[31]**. COMPF2 es un software escrito en Fortran para calcular las características de un incendio en la etapa post flashover en un único compartimento o local, basado en un incendio controlado por ventilación a través de una única puerta o ventana del local. El software se desarrolló tanto para calcular modelos de incendio como para realizar análisis experimentales de la combustión de diversos materiales tales como madera, termoplásticos o líquidos inflamables. Este software proporcionaba como resultados las temperaturas de los gases, flujos de calor y variables de flujo entre otros.

Una de las conclusiones del estudio que realizaron Hettinger y Barnett fue que el aporte adicional de oxígeno realizado por el sistema de ventilación de emergencia del túnel no incrementa significativamente la tasa de liberación de calor.

Dos escenarios fueron modelados con diferentes comportamientos de puertas y ventanas. Para ello los autores tuvieron que modificar el software para introducir más de una abertura en el local así como sus posiciones relativas respecto al suelo del local.

En el primer escenario las puertas del vagón permanecían cerradas mientras que las ventanas estaban abiertas ya que se consideraba que debido a las altas temperaturas del incendio, o bien los cristales o bien los marcos iban a fallar produciendo la rotura de la ventana.

El segundo escenario tanto puertas como ventanas se encontraban abiertas.

Debido a las limitaciones del software empleado, pese a que era posible modelar las pérdidas térmicas por conducción, solo era posible contemplar las propiedades térmicas de un elemento compartimentador. Así pues aunque paredes, techos, suelos y puertas poseían diferentes composiciones y espesores, fueron modelados como un único material equivalente con las propiedades medias de los presentes en el vagón.

Se empleó como material combustible el policarbonato en el software ya que Hettinger y Barnett opinaban que el comportamiento de los plásticos resistentes al fuego presentes en los vagones, presentan una combustión similar a la del policarbonato después de producirse el flashover.

Los autores realizaron un análisis de sensibilidad del modelo variando entre otros parámetros el factor de eficiencia $\chi \in (0,55-0,8)$, el calor neto de combustión de los elementos combustibles $H_c \in (13,65-19,77 \text{ MJ/kg})$. Los resultados obtenidos en función de las diferentes combinaciones de calor neto de combustión y factor de eficiencia de combustión dieron unas tasas de liberación de calor comprendidas entre 4 y 15.1 MW.

Los autores recomendaron una tasa de liberación de calor de 12.9 MW basándose en el segundo escenario con un factor de eficiencia $\chi = 0,8$ y un calor neto de combustión $H_c = 13.650 \text{ kJ/kg}$.

Como ya se ha mencionado, a diferencia del método tradicional que tenía en cuenta la carga de fuego debajo del suelo, del suelo y encima del suelo del vagón, el método post flashover de Hettinger y Barnett solo tenía en cuenta la carga de fuego encima del suelo.

Tras realizar varios test de incendio del suelo de un vagón de tren, comprobaron que aproximadamente el 25% del suelo de vagón ardía en un incendio (en el método tradicional se consideraba el 50%). Debido a este hecho modificaron los resultados de su estudio obteniendo finalmente una HRR pico de 18 MW.

En el estudio llevado cabo por Hettinger y Barnett concluían que únicamente se vería involucrado un vagón el incendio. Tras producirse el flashover y romperse los cristales del vagón la temperatura que se alcanzaba en el interior del túnel con COMPF2 era de 540°C, insuficiente para producir la propagación del incendio a otros vagones.

Kennedy realizó un estudio similar 7 años después empleando el mismo software COMPF2, introduciendo una modificación sustancial. En este caso las ventanas del vagón eran de policarbonato las cuales se derretían por el efecto del fuego en vez de cristales templados de seguridad como habían considerado Hettinger y Barnett. Este hecho producía que el incendio si se propagara de un vagón a otro quedando involucrados un coche adicional cada 30 minutos.. La HRR pico para la duración del fuego se estimó en 23,1 MW, con dos coches plenamente involucrados en cualquiera instante.

3.2.3.2. Modelo de ignición sencillo (simple ignition model)

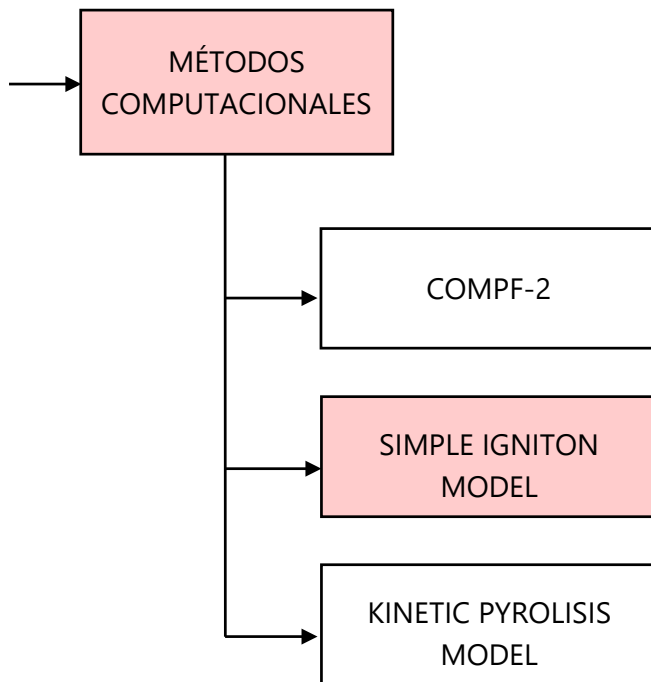


Figura 67. Esquema métodos computacionales de cálculo del HRR. Simple Ignition Model

En este modelo se asigna una temperatura de ignición a cada material combustible el cual arderá una vez que la superficie del combustible alcance la temperatura de ignición. Después de la ignición la tasa de liberación de calor seguirá una HRRPUA prescrita a partir de los pertinentes tests realizados mediante el Cono Calorimétrico u otras técnicas al material a modelar.

Arup Fire [17] desarrolló en 2004 un método para predecir la tasa de liberación de calor basándose en un cálculo CFD (computational fluid dynamics) mediante el software Fire Dynamic Simulator (**FDS** en adelante). En este trabajo se calculó la tasa de liberación de calor de un modelo antiguo de vagón y un modelo actual. El escenario de incendio contemplaba que en el tren se producía flashover cuando entraba a la estación de metro (Conexión St Paul's City Thames, Londres). Para modelar el incendio realizaron ensayos mediante un Cono Calorimétrico para determinar la tasa de liberación de calor de los diferentes elementos que componían los vagones de tren.

En el caso del modelo de tren antiguo se obtuvo una tasa de liberación de calor de 16 MW mientras que en el modelo de tren más reciente se obtuvo una tasa de liberación de calor de 7 MW.

Un trabajo similar fue desarrollado para el cálculo de la tasa de liberación de calor de los vagones de tren de Tailandia. Sin embargo en este caso no se realizaron ensayos mediante Cono Calorimétrico si no que se emplearon los valores de HRR especificados en el SFPE Handbook [35]. Los valores de tasa de liberación de calor obtenidos eran de 16,3 MW para un coche cama y de 14 MW para un vagón con asientos de madera.

3.2.3.3. Modelo de pirólisis cinética (Kinetic pyrolysis model)

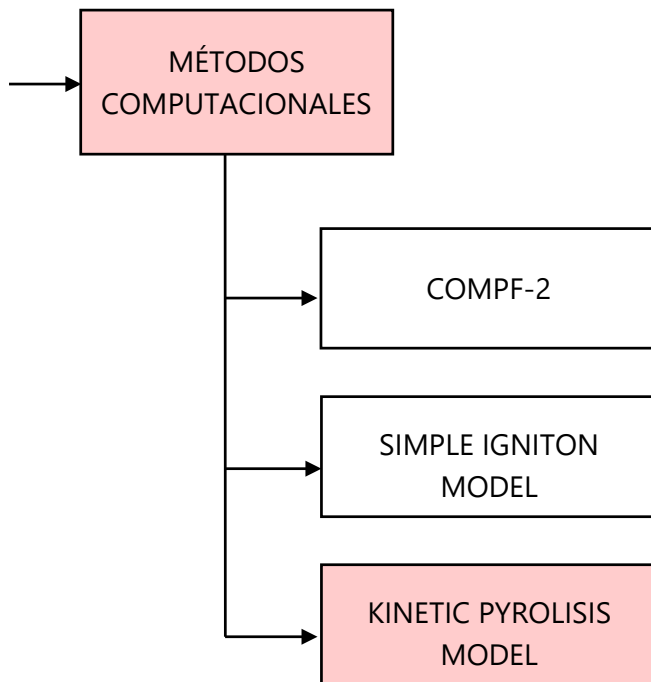


Figura 68. Esquema métodos computacionales de cálculo del HRR. Simple Ignition Model

En este modelo los sólidos no siguen una tasa de liberación de calor preestablecida sino que se deberá modelar los parámetros de la tasa de pirólisis o tasa de reacción de la ecuación de Arrhenius.

$$r = -\frac{dY}{dt} = AY^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad Ec (3.16)$$

De acuerdo al trabajo realizado por Li empleando FDS 6 en el 2015 [34] solo los modelos de ignición sencilla y modelo de pirólisis cinética son adecuados para determinar de manera fidedigna la tasa de liberación de calor de un incendio en un vagón de metro al comparar los resultados de varios modelos CFD con un ensayo Full Scale Test.

El modelo de ignición sencillo predice la tasa de liberación de calor relativamente bien durante todo el incendio con la única excepción de que la tasa de liberación de calor predicho es ligeramente inferior a los datos de los test realizados por Li. Una posible razón es que los períodos de crecimiento del incendio para diferentes combustibles se estimaron a partir pruebas de laboratorio que podrían ser más largas que los del Full Scale Test, donde el nivel de radiación en el interior del vagón era mucho mayor. La tasa de liberación de calor máxima se predijo correctamente por el modelo de encendido simple.

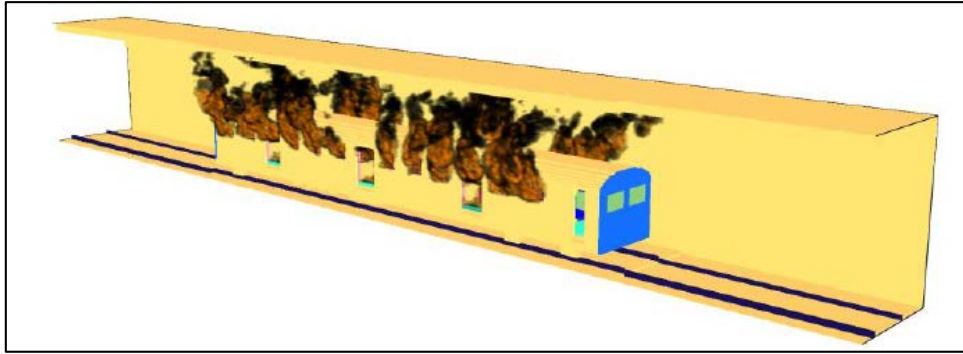


Figura 69. Imagen del modelo de incendio de Li

El modelo de pirólisis cinética predice el período de crecimiento bien mientras que la tasa máxima de liberación de calor es mucho menor y el fuego se extingue antes. El contenido de energía que se consume en la simulación es también mucho menor que en el Full Scale Test. Este hecho puede ser debido a que algunas incertidumbres podrían ser introducidas en los parámetros obtenidos a partir de pruebas a pequeña escala pudiendo haber algunos combustibles que no se han contabilizado en estos test. Li también constata que el modelo de pirólisis cinética es muy sensible a muchos parámetros.

En general, el modelo de encendido simple podría ser considerado mejor que el modelo cinético de pirólisis para predecir el desarrollo del incendio en los vagones de tren. Sin embargo, para cualquier simulación utilizando estos modelos de pirólisis, siempre se requiere validación, debido a la sensibilidad de estos modelos de pirólisis a los parámetros de entrada, especialmente para el modelo de pirólisis cinética.

Por otra parte Chiam [17] ya realizó un estudio de este tipo empleando FDS 4 en el año 2005 en el cual realizaba varias simulaciones de incendio de vagones de metro en el interior de túneles para la obtención de la tasa de liberación de calor y a partir de esta poder realizar el diseño de los sistemas de ventilación de emergencia de la línea orbital de metro de Singapur.

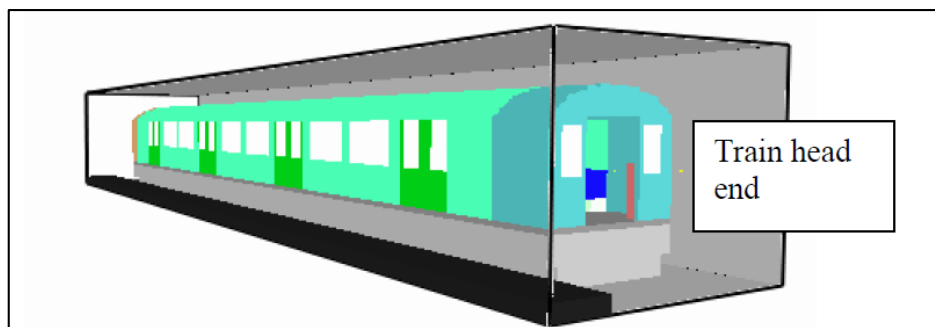


Figura 70. Modelo de vagón de metro de Chiam.

Realizó un total de 13 escenarios de incendio localizando el origen del incendio en un asiento (arson) en una esquina del vagón (arson y fallo eléctrico) y debajo del suelo del tren (fallo eléctrico). Los materiales con los que estaba fabricado el vagón y que fueron sometidos a tests mediante el Cono Calorimetrico presentaron grandes dificultades en prender y quemarse debido a la inclusión de retardantes de llama (especialmente cuando

son expuestos a bajos flujos de calor). Esto contrasta con la información de estudios existentes del pasado cuando la normativa frente a incendios era más laxa que la actual.

Chiam propone dos HRR pico para el diseño del sistema de ventilación de emergencia. Para un incendio en la estación propone considerar una tasa de liberación de calor pico de 5MW mientras que si el incendio sucede en el túnel propone un valor de tasa de liberación de calor pico de 10 MW.

3.3. Obtención de la reacción de incendio

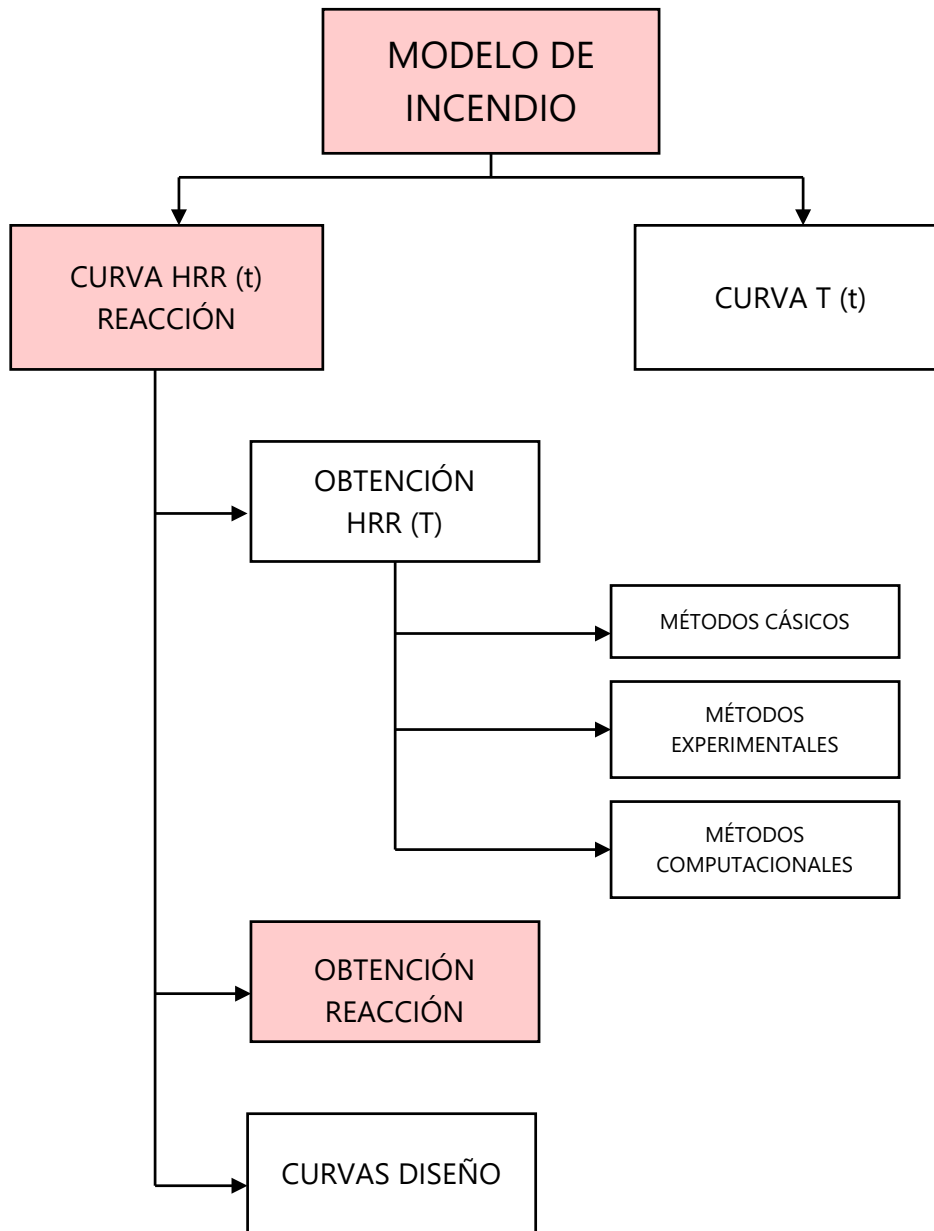


Figura 71. Esquema de modelos de incendio. Obtención de curvas HRR (t). Métodos clásicos.

Además de la obtención de la tasa de liberación de calor otro parámetro fundamental a la hora de reproducir un incendio en un túnel de metro es parametrizar de manera adecuada la cantidad de gases y humos calientes que se libran durante los procesos de pirólisis y combustión.

El modelado del fenómeno de la pirolisis ha sido ampliamente estudiado en el ámbito de la ingeniería del fuego. En la década de 1980 Parker propuso un modelo de tasa de liberación de calor basado en el modelo de pérdida de masa (mass lose rate) de Atreya. Este modelo consiste básicamente en asumir un proceso de transferencia de calor unidimensional para calcular la temperatura del combustible y empleando una ecuación

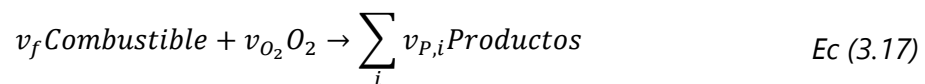
tipo Arrhenius se estima la tasa de pirolisis. A día de hoy este modelo es el que se sigue empleando.

Sin embargo, este modelo plantea la problemática de la obtención de las propiedades cinéticas y térmicas de los combustibles a modelar. Para obtener estas propiedades son necesarios mediciones precisas de los procesos de combustión. Además se debe tener en cuenta que en el modelado no se emplean propiedades físicas del combustible si no constantes obtenidas experimentalmente para que representen con la mayor exactitud posible el fenómeno de la pirolisis. Teniendo en cuenta que además las propiedades de los combustibles varían con la temperatura, es necesario una comparación de los modelos obtenidos con los resultados experimentales antes de cualquier tipo de aplicación del modelo.

Uno de las mayores causas de confusión en FDS es la distinción entre la **combustión** (de la fase gas) y la **pirolisis** (de un elemento sólido). La **combustión** hace referencia a una reacción de un combustible tipo vapor con el oxígeno presente en el aire. La **pirolisis** hace referencia a la generación de un combustible tipo vapor a partir de una superficie sólida o líquida.

A continuación se va a explicar cómo funciona el modelo de combustión en FDS 6 ya que en esta versión el modelo empleado hasta ahora, modelo de Fracción de Mezcla, ha cambiado.

En versiones anteriores de FDS, tal como explica Chiam [17] se empleaba el modelo de fracción de mezcla. La combustión se calculaba a partir de las proporciones de mezcla entre el oxígeno presente en el aire y el combustible del modelo. Las reacciones químicas entre el combustible se tomaban siguiendo la siguiente reacción estequiométrica:



En esta ecuación, v_i son los coeficientes estequiométricos para el proceso de combustión completa.

El modelo asumía que la combustión estaba controlada por la mezcla y que todas las especies a estudiar se presentaban mediante una única variable conocida como fracción de mezcla $Z(x,t)$.

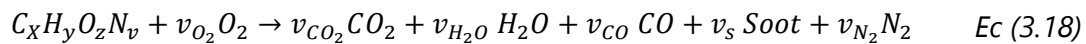
Ahora bien el modelo de combustión en FDS 6 puede definirse de dos modos, en función del modelo de turbulencia a emplear. Cuando se requiere simular grandes incendios se recomienda el modelo de combustión por defecto, llamado Simple Chemistry Model. Para modelos en los cuales se vaya a realizar una Simulación Numérica Directa (Direct Numerical Simulation, DNS) si la rejilla numérica es lo suficientemente fina se empleara un modelo de combustión de ratio finito (finite rate combustion) el cual no es objeto del presente trabajo.

El Simple Chemistry Model es un modelo de combustión turbulenta también llamado en la FDS Technical Reference Guide [33] Modelo químico rápido controlado por mezcla (Mixing-Controlled Fast Chemistry)

El modelo Simple Chemistry Model considera que en el modelo existe un único combustible, compuesto principalmente por Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno (C, H, O y N). Este combustible reacciona con el oxígeno a través de una reacción simple de un único paso para formar los productos de combustión. Estos productos son H₂O, CO₂, hollín (soot) y CO.

A diferencia de las versiones anteriores de FDS, en la versión 6 es necesario introducir una reacción ya que el software no cuenta con ninguna reacción por defecto.

En un Simple Chemistry Model la reacción de combustión presenta la siguiente forma:



El usuario de FDS solo tiene que especificar la fórmula química del combustible así como las tasas de producción de CO, hollín (Soot) y la fracción volumétrica de hidrogeno en el hollín X_H. FDS emplea esta información para calcular los coeficientes estequiométricos de la siguiente manera:

$$v_{O_2} = \rightarrow v_{CO_2}CO_2 + \frac{v_{H_2O}}{2} + \frac{v_{CO}}{2} - \frac{z}{2} \quad Ec (3.19)$$

$$v_{CO_2} = x - v_{CO} - (1 - X_H) v_s \quad Ec (3.20)$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} - \frac{X_H}{2} v_s \quad Ec (3.21)$$

$$v_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad Ec (3.22)$$

$$v_s = \frac{W_F}{W_S} y_s \quad Ec (3.23)$$

$$v_{N_2} = \frac{v}{2} \quad Ec (3.24)$$

$$W_s = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad Ec (3.25)$$

Cuando se emplea el Simple Chemistry Model, al especificar un combustible, FDS calcula internamente las propiedades termo físicas de las especies presentes tales como la viscosidad o el calor específico. FDS cuenta con una serie de combustibles predefinidos que el usuario puede emplear los cuales quedan expuestos así como sus propiedades en la tabla 11.1 de la guía del usuario de FDS 6.3.2 [12]. En el caso de no emplear ninguno de esos combustibles, FDS emplea las propiedades termo físicas del gas etileno así como el peso molecular de la **fórmula** del combustible o bien los valores de C, H, O y N.

Pese a que pueden definirse muchos tipos de combustible en FDS, en el modelo de combustión Simple Chemistry Model se emplea un único combustible en el modelo. La razón de esta simplificación es el coste computacional que conllevaría resolver la ecuación de transporte de múltiples combustibles gaseosos. Por tanto la tasa de combustión de los diferentes sólidos y líquidos es automáticamente ajustada por FDS para tener en cuenta la diferencia de los calores de combustión de los diferentes combustibles. Así pues se definirá un único combustible que simule todos los combustibles del modelo.

3.4. Curvas de diseño

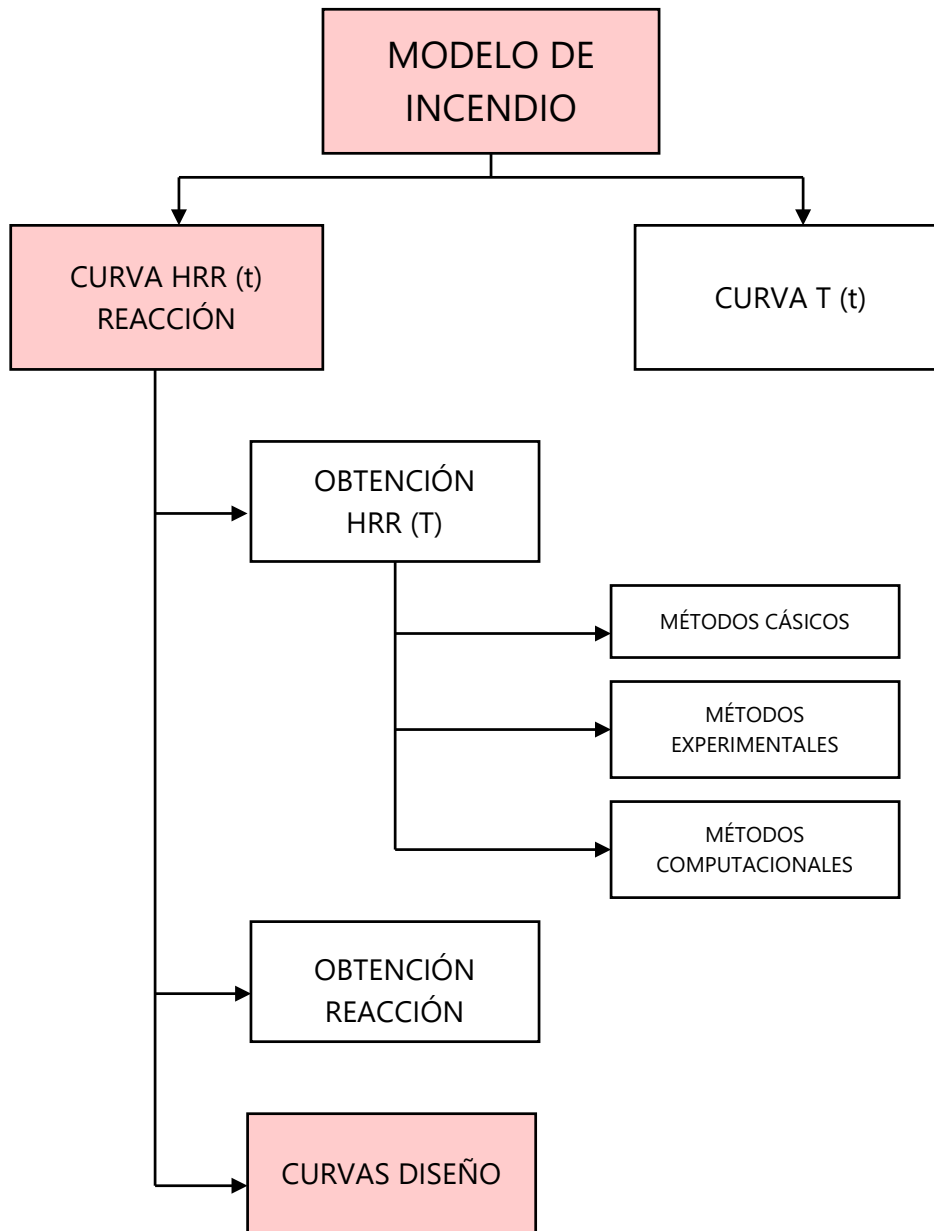


Figura 72. Esquema de modelos de incendio. Obtención de curvas HRR (t). Métodos clásicos.

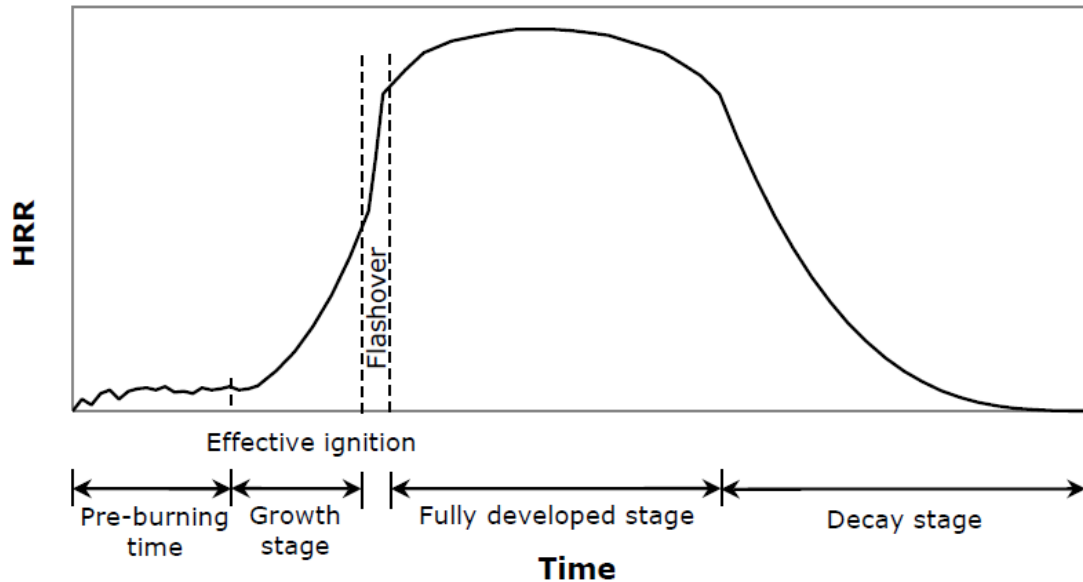
Como se ha podido comprobar en este punto, existen multitud de herramientas para obtener la tasa de liberación de calor HRR (t) de un incendio en un vagón de metro.

Ahora bien, tal y como se mostraba al principio de este punto, la obtención de estas curvas tenía por objetivo el ser introducidas en un escenario de incendio, como modelo de incendio.

A continuación se muestra como se modelan los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos estudiados y como diferentes normativas adoptan diferentes curvas en función del tipo de incendio.

3.4.1. Curva modelo

La tasa de liberación de calor o HRR (Heat Release Rate) es la evaluación de la potencia liberada por el incendio en función del tiempo. De acuerdo a numerosos estudios y observaciones la tasa de liberación de un incendio presenta cinco etapas diferenciadas que se presentan a continuación en la siguiente gráfica:



Gráfica 3. Esquema del HRR según Staffansson [36]

Fase incipiente (Incipient/Pre-burning time): Es cuando se da el origen del incendio, bien sea accidental o provocado (arson). El fuego apenas libera potencia puesto que la cantidad de material que se quema es muy pequeña y consecuentemente el tiempo que tarda en crecer y propagarse es elevado. En función de la naturaleza del origen del incendio y del combustible, la fase incipiente será de mayor o menor duración. La potencia liberada por esta fase del incendio es del orden de 50 kW.

Fase de crecimiento (Growth): En esta fase el incendio comienza a crecer produciendo liberando potencia. Generalmente se representa la curva de crecimiento mediante una curva cuadrática e.g. *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego. Anexo E [24]* donde se indica que la fase creciente de un incendio sigue una curva dada por la siguiente expresión:

$$Q = 10^6 \cdot \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 [W] \quad Ec (3.26)$$

Donde:

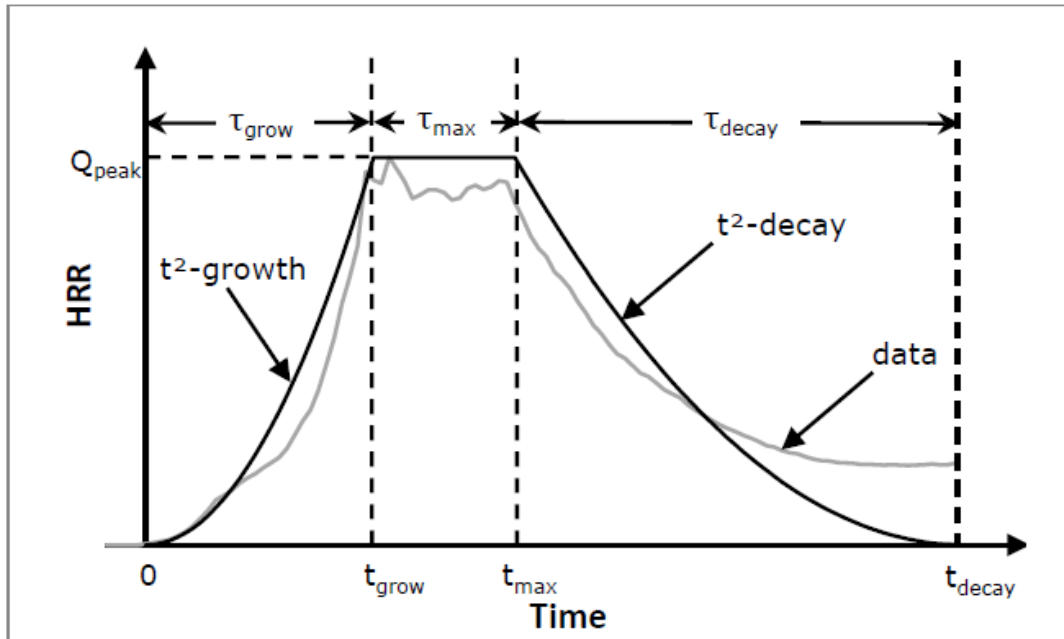
Q: velocidad de liberación de calor (W)

t: tiempo de crecimiento (s)

t_α : tiempo necesario para alcanzar una velocidad de liberación de calor de 1 MW.

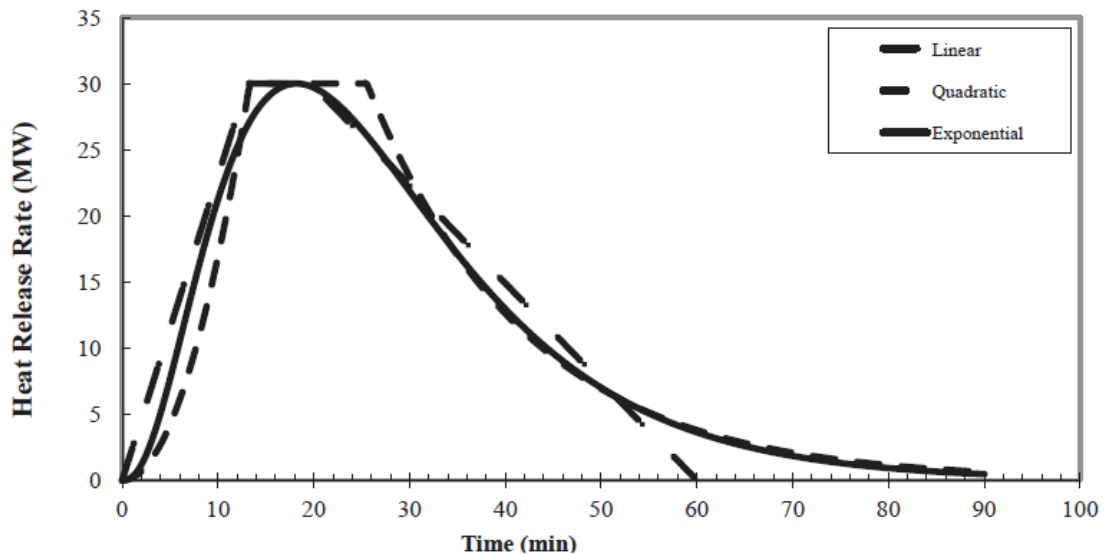
En función del t_{α} que depende de la naturaleza del combustible a quemar, la curva liberara potencia más rápido o más despacio. A menor t_{α} el incendio tendrá una mayor velocidad de propagación con lo que liberará potencia con mayor velocidad.

Estas curvas se aproximan a las curvas reales obtenidas en ensayos a escala o ensayos reales tal como se ve a continuación:



Gráfica 4 Comparación entre una curva real y una curva modelada de acuerdo a Staffansson [36]

Otros autores como Ingason y Li [37] proponen otras aproximaciones matemáticas diferentes como combinaciones de rectas o curvas exponenciales tal como se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 5. Representación de los modelos matemáticos propuestos en Tunnel Fire Dynamics [37].

Incendio súbito generalizado (Flashover): Cuando se produce una acumulación de humo y gases calientes en el techo del local o emplazamiento cerrado donde se produce el incendio, y estos alcanzan una temperatura elevada (500- 550 °C) se produce un fenómeno conocido como flashover o incendio súbito generalizado. Debido a la radiación proyectada por los humos y gases calientes de los estratos superiores del local donde se produce el incendio, todos los elementos combustibles que se encuentra en las zonas inferiores, comienzan a arder súbitamente tal como se presenta en el siguiente esquema:

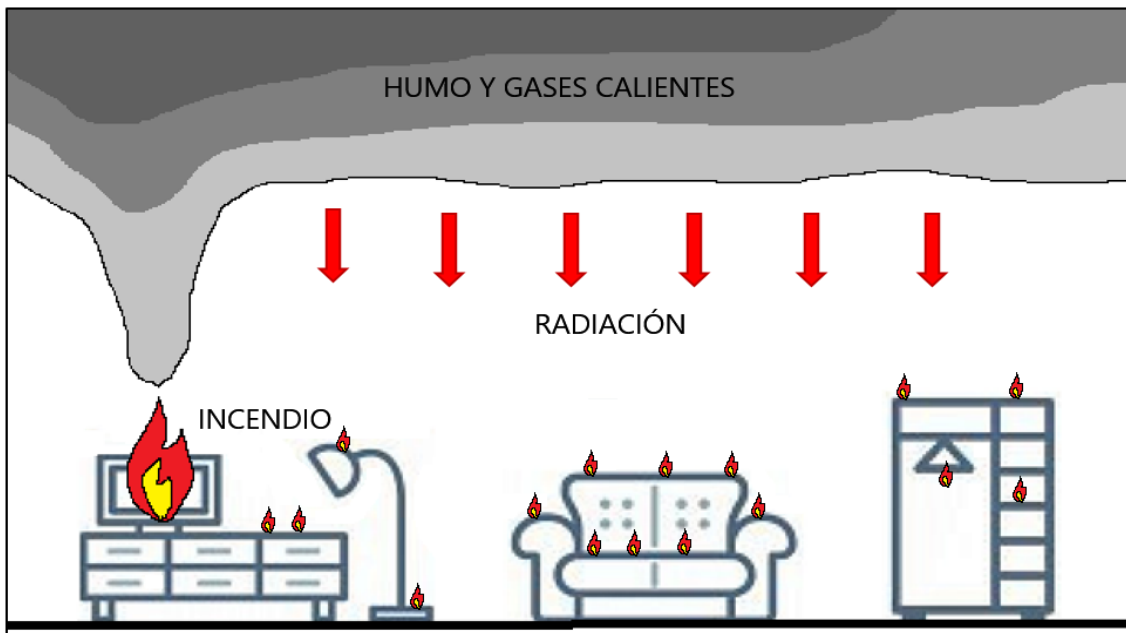


Figura 73. Esquema propagación Flashover

Una vez que se produce el flashover el incendio alcanza su máxima dimensión ocupando toda la planta del local. Debido a esto el incendio alcanza el valor de potencia máxima o HRR Peak.

Incendio desarrollado (fully growth fire): Una vez que el incendio a alcanzando su superficie máxima comienza a pirolizar todo el combustible disponible liberando una tasa de calor aproximadamente constante.

Fase de decaimiento (Decay): A medida que se va consumiendo el combustible disponible en el local del incendio la potencia que se va liberando disminuye hasta finalmente apagarse el incendio.

3.4.2. Fuego de diseño

Además de estudiar el valor de HRR PEAK o tasa de liberación pico o máxima de un incendio algunos autores como Ingason [38] ponen especial énfasis en el estudio de la fase de crecimiento del incendio. Esto queda patente en el estudio Design Fire in Tunnels [38] en el cual se recogen no solo el HRR PEAK, valor estudiado habitualmente, sino el tiempo que se tarda en alcanzar dicho valor desde el inicio del incendio.

En el citado estudio se recopilan los valores obtenidos en diferentes ensayos a escala 1:1 realizados a lo largo de la historia de incendios en túneles, clasificados por el tipo de vehículo ensayado. En particular para incendios en túneles de metro recoge los siguientes resultados:

Tipo de vehículo. U=ventilación longitudinal m/s	Valor Calorífico (GJ)	HRR Peak (MW)	Tiempo hasta HRR Peak (min)	Temperatura máxima (°C)
Vagón Alemán de metro, EUREKA 499, u=0.5	41	35	5	1060
Vagón Alemán de metro de acero, EUREKA 499, u=0.3	33	NA	NA	630

Tabla 22. Valores obtenidos en ensayos de túneles de metro.

Existen numerosos métodos para representar la fase de crecimiento para un modelo de incendio en túneles. Estos modelos poseen diferentes tasas de crecimiento pudiendo ser de crecimiento lineal ($\propto t$) de crecimiento cuadrático ($\propto t^2$) o de crecimiento exponencial ($\propto (1-e^{-t})$). Estas funciones de crecimiento se combinan con un HRR Peak, para representar el incendio desarrollado y con funciones de decaimiento ($\propto -t$ o e^{-t}) para representar la fase de decaimiento del incendio.

Mientras que para los modelos de incendio empleados en edificación se suele emplear únicamente la fase de crecimiento del incendio, para fuegos en túneles y en particular cuando una de las metas es la integridad estructural del túnel, se considera la curva completa. A continuación se resumen los cuatro métodos empleados para modelar la curva de tasa de liberación de calor HRR.

Crecimiento lineal: Las recomendaciones francesas para túneles carreteros para el diseño de sistema de ventilación de emergencia consisten en modelar una fase de crecimiento lineal hasta alcanzar la tasa de liberación de calor pico HRR PEAK entre el inicio del incendio y un valor t_{max} , una meseta a potencia máxima desde t_{max} a t_D , y finalmente una fase de decaimiento lineal también desde t_D hasta t_d .

Crecimiento cuadrático: Ingason [38] propone para diferentes tipos de incendios en túneles una curva con crecimiento cuadrático hasta t_{max} , una meseta a potencia máxima desde t_{max} a t_D y una fase de decaimiento exponencial desde la potencia máxima hasta cero en el infinito. Este método para representar la tasa de liberación de calor es el más empleado siendo adoptado por diferentes normativas.

Crecimiento exponencial- fuego controlado por combustible: De nuevo Ingason [38] propone un método para estimar el HRR mediante una única expresión matemática basándose en los trabajos de Numajiri y Furukawa empleado únicamente para incendios controlados por combustible, esto es con una ventilación tal que la tasa de combustión no se verá afectada por la falta de oxígeno.

Crecimiento exponencial- fuego controlado por ventilación: Ingason [38] propone un método para estimar el HRR mediante una única expresión matemática por medio de la suma de dos curvas exponenciales empleado únicamente para incendios controlados por ventilación.

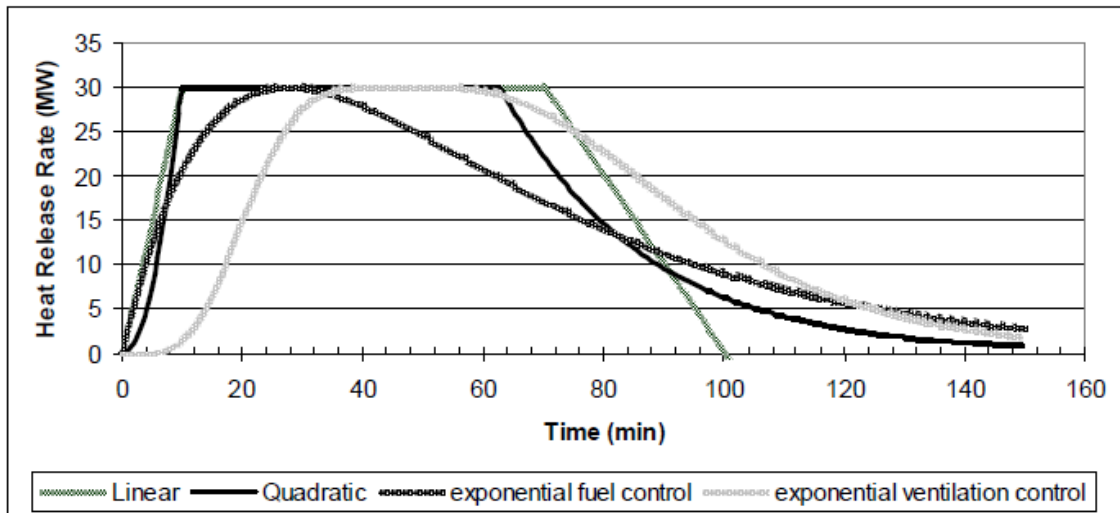
En la siguiente tabla se recogen los diferentes modelos matemáticos de representación de curvas de incendio.

Method Reference	HRR as a function of time t (s)	Time interval (s)	Time to maximum HRR (s)	Time to decay starts, t_D , and/or fire duration, t_d (s)	Other conditions
Linear growth Lacroix [32]	$HRR = \alpha_{g,L} t$	$0 \leq t_{max}$	$t_{max} = \frac{\dot{Q}_{max}}{\alpha_{g,L}}$	$t_D = t_{max} - \sqrt{\frac{2}{\alpha_{D,L}} \left(\frac{\alpha_{D,L} t_{max}^2 + \dot{Q}_{max} (t_{max} - t_D) - E_{tot}}{2} \right)}$	
	$HRR = \alpha_{g,L} t_{max} = \dot{Q}_{max}$	$t_{max} < t < t_D$			
	$HRR = \dot{Q}_{max} - \alpha_{D,L} (t - t_D)$	$t_D < t < t_d$			
Quadratic growth Ingason [33]	$HRR = \alpha_{g,q} t^2$	$0 \leq t_{max}$	$t_{max} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{max}}{\alpha_{g,q}}}$	$t_D = \frac{\gamma E_{tot}}{\dot{Q}_{max}} + \frac{2}{3} t_{max} - \frac{1}{\alpha_{D,q}}$	If $t_D \leq t_{max}$ no constant period, then $\dot{Q}_{max} = \gamma \alpha_{D,q} E_{tot} \left(1 - \frac{\alpha_{D,q}^{3/2}}{6} \sqrt{\frac{\dot{Q}_{max}}{\alpha_{g,q}}} \right)^2$ and $t_{max} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{max}}{\alpha_{g,q}}} = t_D$
	$HRR = \alpha_{g,q} t_{max}^2 = \dot{Q}_{max}$	$t_{max} < t < t_D$			
	$HRR = \dot{Q}_{max} e^{-\alpha_{D,q} (t - t_D)}$	$t \geq t_D$			
Exponential growth (fuel control) Ingason [34, 35]	$HRR = \dot{Q}_{max} \cdot n \cdot r \cdot (1 - e^{-kt})^{n-1} \cdot e^{-kt}$	$t \geq 0$	$t_{max} = \frac{\ln(n)}{k}$	$t_d = \frac{1}{k} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \beta_d \frac{1}{n}} \right)$	$r = \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{1-n}$ $k = \frac{\dot{Q}_{max}}{E_{tot}} \cdot r$
Exponential growth (ventilation control) Ingason [35]	$HRR = \dot{Q}_{max} (18.96 \cdot e^{-10t/t_d} (1 - e^{-10t/t_d})^7 + 37.59 \cdot e^{-7t/t_d} (e^{-7t/t_d} - 1)^{20})$	$t \geq 0$	$t_{max} = 0.24 \cdot t_d$	$t_d = 2.03 \times \frac{E_{tot}}{\dot{Q}_{max}}$	

Tabla 23. Modelos de curvas de incendio.

Por tanto a partir de los resultados obtenidos en un ensayo 1:1 se puede modelar mediante diferentes expresiones la tasa de liberación de calor de un incendio en un túnel. Ingason propone emplear una curva exponencial ya que el resultado es más realista que la representación lineal o cuadrática y por la robustez del método el cual emplea una única expresión matemática para modelar toda la curva de tasa de liberación de calor.

En la siguiente gráfica se representa mediante las diferentes curvas mencionadas la tasa de liberación de calor de la tabla anterior.



Gráfica 6. Diferentes curvas de tasa de liberación de calor.

3.4.3. Utilización de curvas en normativa

Existen diferentes métodos para obtener la curva de tasa de liberación de calor de un incendio en túnel. Pese a ello en muchos casos no es decisión del ingeniero proyectista la elección de la curva a elegir para introducir en el escenario de incendio sino que debe adoptar una curva impuesta por la normativa vigente.

Un ejemplo de ello es el modelo de curva cuadrático del *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego. Anexo E [24]* para el ámbito de la edificación.

En el Eurocódigo 1 la curva presenta esta estructura:

$$Q = 10^6 \cdot \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 [W] \quad Ec (3.20)$$

Donde:

Q: velocidad de liberación de calor (W)

t: tiempo de crecimiento (s)

t_α : también llamada tasa de crecimiento del incendio indica el tiempo necesario para alcanzar una velocidad de liberación de calor de 1 MW.

A menor t_α el incendio es más rápido.

Máxima velocidad de liberación de calor RHR_f			
Actividad	Rapidez de desarrollo del fuego	t_e [s]	RHR_f [kW/m ²]
Vivienda	Medio	300	250
Hospital (habitación)	Medio	300	250
Hotel (habitación)	Medio	300	250
Biblioteca	Rápido	150	500
Oficina	Medio	300	250
Aula de escuela	Medio	300	250
Centro comercial	Rápido	150	250
Teatro (cine)	Rápido	150	500
Transporte (espacio público)	Lento	600	250

Tabla 24. Tasas de crecimiento del incendio y HRRPUA en función de la actividad para la edificación.

En la siguiente tabla se presentan diferentes tasas de crecimiento de incendio en función del uso de los edificios así como se presenta el HRRPUA (también llamado RHR_f).

En el caso de túneles ferroviarios y de aplicación para túneles de metro se tiene la Instrucción de Seguridad de Túneles IST2006 [4] la cual con el objeto de garantizar unas adecuadas condiciones de ventilación tanto en situación normal como de emergencia, insta a realizar un estudio de ventilación del túnel con un incendio en su interior.

El proyectista, en función del tipo de tráfico, deberá fijar las características del incendio con el que proyectar el sistema de ventilación y en caso de no disponer datos precisos utilizará los valores indicados en la tabla siguiente.

TIPO DE VEHÍCULO INCENDIADO	POTENCIA MÁXIMA DEL INCENDIO (MW)	DURACIÓN DEL INCENDIO (horas)	CAUDAL DE HUMOS PRODUCIDO (m ³ /s)
Locomotora eléctrica o coche de viajeros	15	2	60
Locomotora diésel o coche de mercancías	30	2	82
Vagón de mercancías peligrosas	300	4	460

Tabla 25. Parámetro de caracterización de incendios.

La curva de tasa de liberación incluida en la IST2006 [4] es la siguiente:

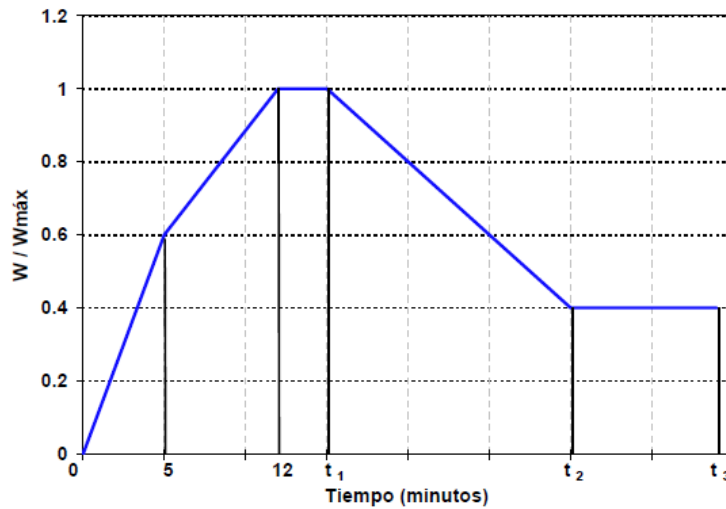


Figura 74. Curva paramétrica de evolución de la potencia (W) de un incendio.

POTENCIA MÁXIMA DEL INCENDIO (MW)	TIEMPOS CARACTERÍSTICOS (minutos)		
	t_1	t_2	t_3
15	18	30	60
30	30	60	120
300	240	--	--

Tabla 26. Tiempos característicos de la curva paramétrica de evolución de un incendio.

Esta será la curva de tasa de liberación de calor a emplear en este trabajo final de master.

Puesto que el incendio se produce en un vagón de metro, la potencia máxima del incendio será de 15 MW. El incendio cuenta con dos fases de crecimiento iniciales. La primera fase comprende desde el inicio del incendio hasta los 5 minutos (300 segundos) alcanzando una potencia en ese instante de 9 MW. Cabe señalar que el t_α de este incendio es de 33,3 segundos, valor por debajo de los 75 segundos de los incendios ultra-rápidos empleados en edificación.

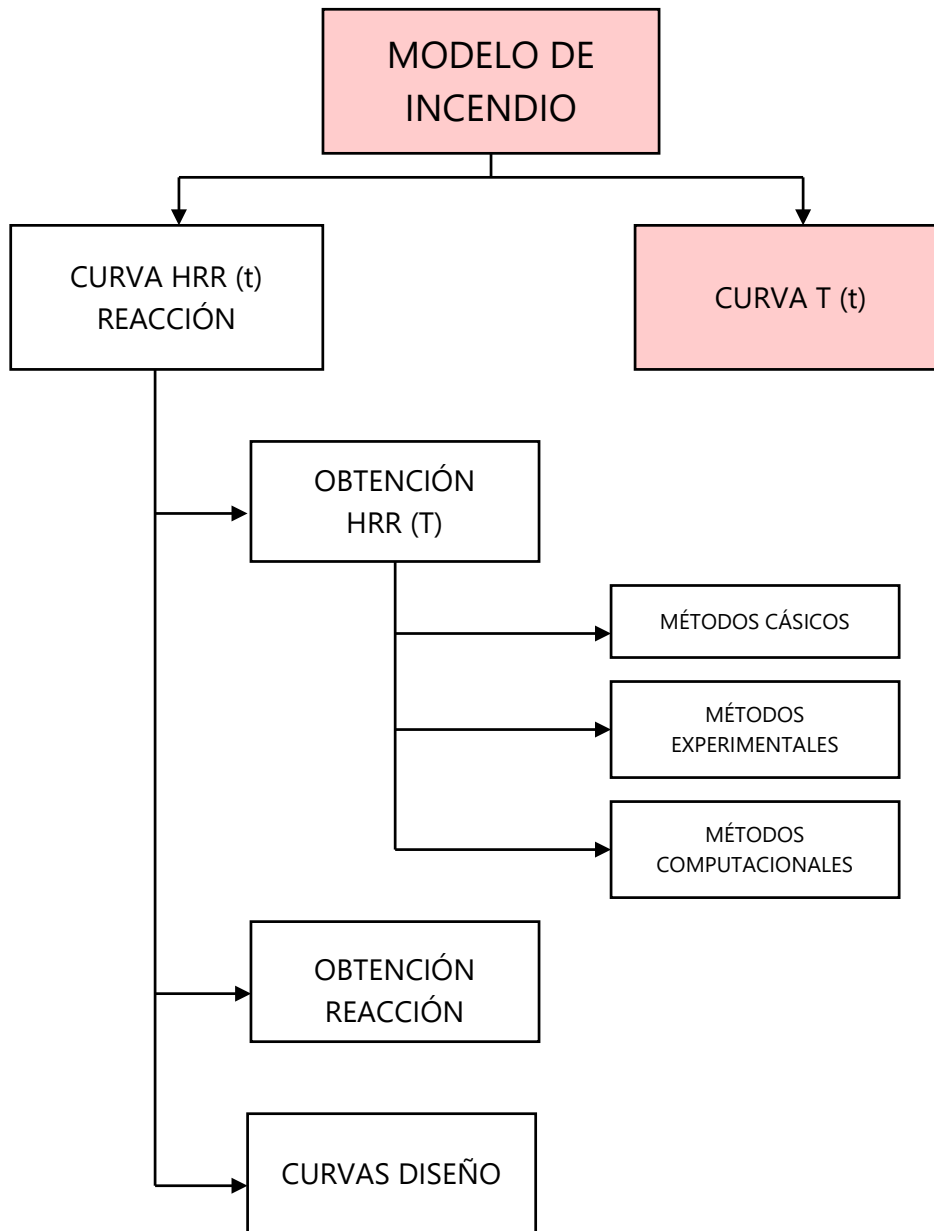
La segunda fase de crecimiento, de menor pendiente comprende desde los 5 minutos (300 segundos) hasta los 12 minutos (720 segundos) instante en el cual se alcanza la potencia máxima de incendio de 15 MW.

Posteriormente el incendio cuenta con una meseta a potencia máxima desde los 12 minutos (720 segundos) hasta los 18 minutos (1080 segundos).

Finalmente tiene una fase de decaimiento con una meseta final a baja potencia. La primera etapa de decaimiento comienza a los 18 minutos (1080 segundos) con una potencia de 15 MW para alcanzar de manera lineal hasta una potencia de 6 MW a los 30 minutos (1800 segundos).

Finalmente el incendio continúa a esta potencia de 6 MW durante 30 minutos más finalizando la curva a los 60 minutos (3600 segundos).

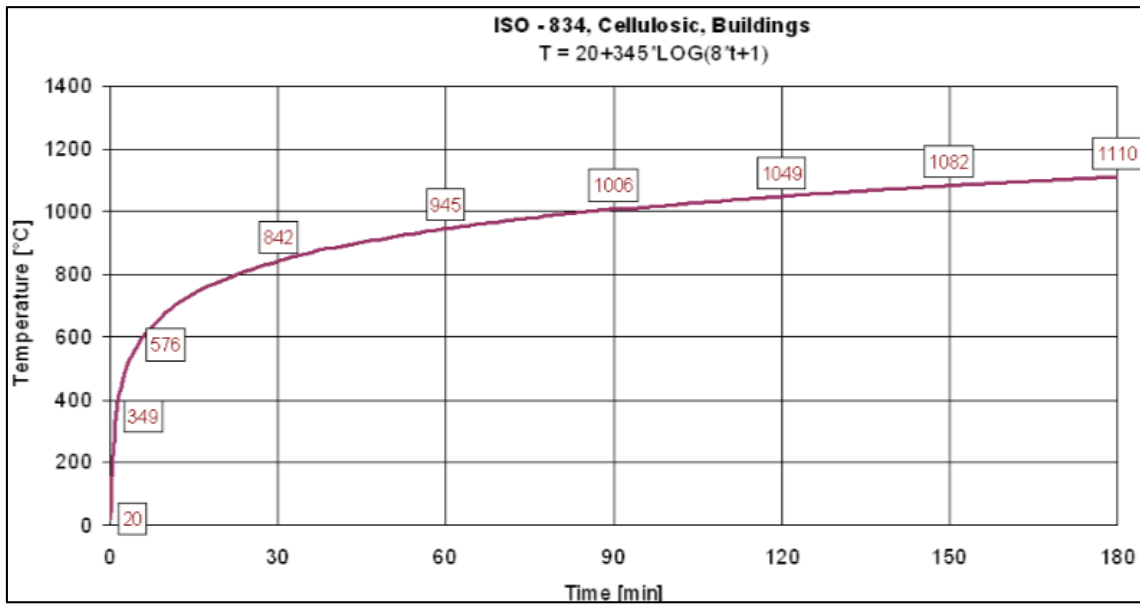
3.5. Curvas normalizadas T (t)



Las curvas nominales representan la temperatura del gas dentro del recinto en una situación post-flashover, no se corresponden con ningún incendio real y tiene como finalidad exclusiva la verificación del cumplimiento de la exigencia básica de seguridad estructural en caso de incendio.

En particular la curva normalizada más conocida es la ISO 834 , de uso internacional en ensayos en hornos de material de construcción.

Como ya se ha su finalidad no es la de reproducir las condiciones reales de un incendio, sino permitir una comparación del comportamiento frente al fuego de diferentes elementos constructivos de base y establecer de este modo una clasificación relativa o jerarquización, con relación a un fuego de referencia fácilmente reproducible en laboratorio.

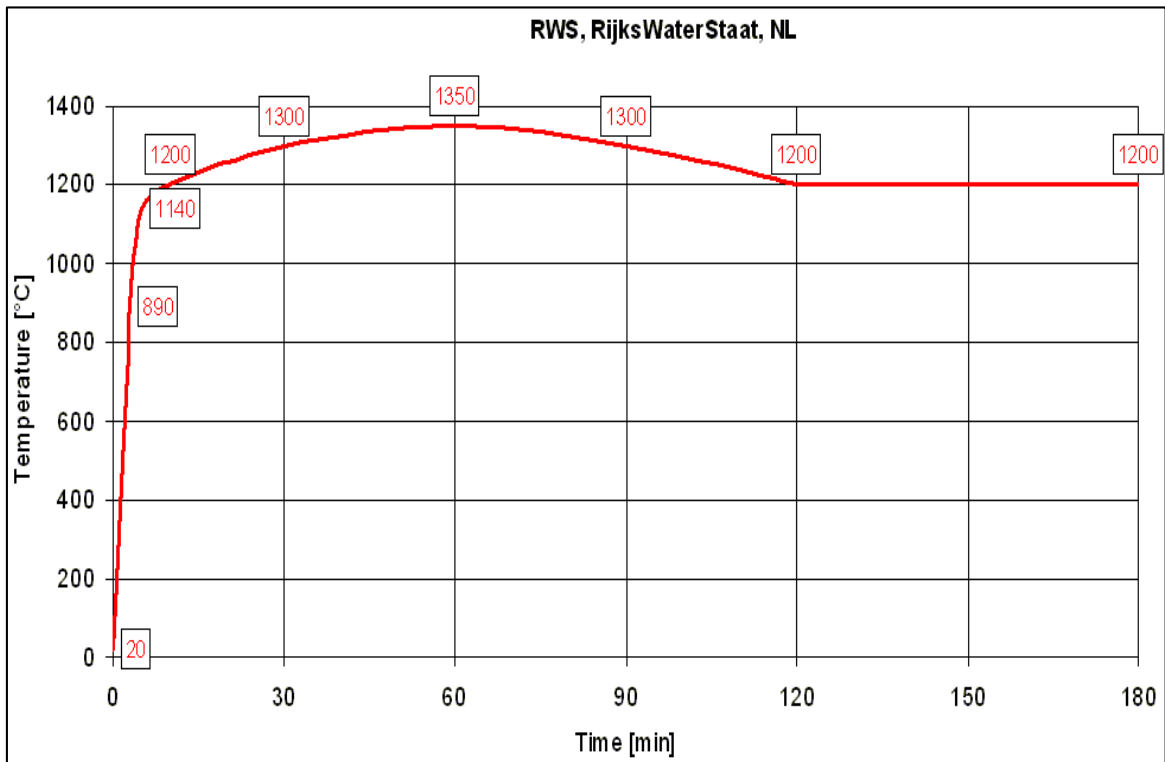


Gráfica 7. Curva nominal ISO 834.

Sin embargo para el caso de los túneles se ha comprobado que son necesarias curvas nominales más severas que las empleadas en la edificación debido a las condiciones especiales que se suceden en el interior de un túnel en particular en un fuego completamente desarrollado. Para dar respuesta a este inconveniente, Holanda ha establecido una curva de fuego "RWS" (**RijksWaterStaat**, Ministerio de Transportes Holandés) para la evaluación del material de protección pasiva en túneles.

La curva propuesta es más severa que la de hidrocarburos, con un rápido crecimiento hasta 1200° C y con un pico de 1.350° C (temperatura de fusión del hormigón) a los 60 minutos, una fase de decaimiento hasta los 1.200°C en los 120 minutos, manteniéndose esta temperatura hasta los 180 minutos.

La curva RWS pretende simular el incendio de un camión cisterna de 50 m³ con una carga de fuego de 300 MW con una duración del incendio de 2 horas y se ha obtenido a partir de modelos de fuego en túneles.



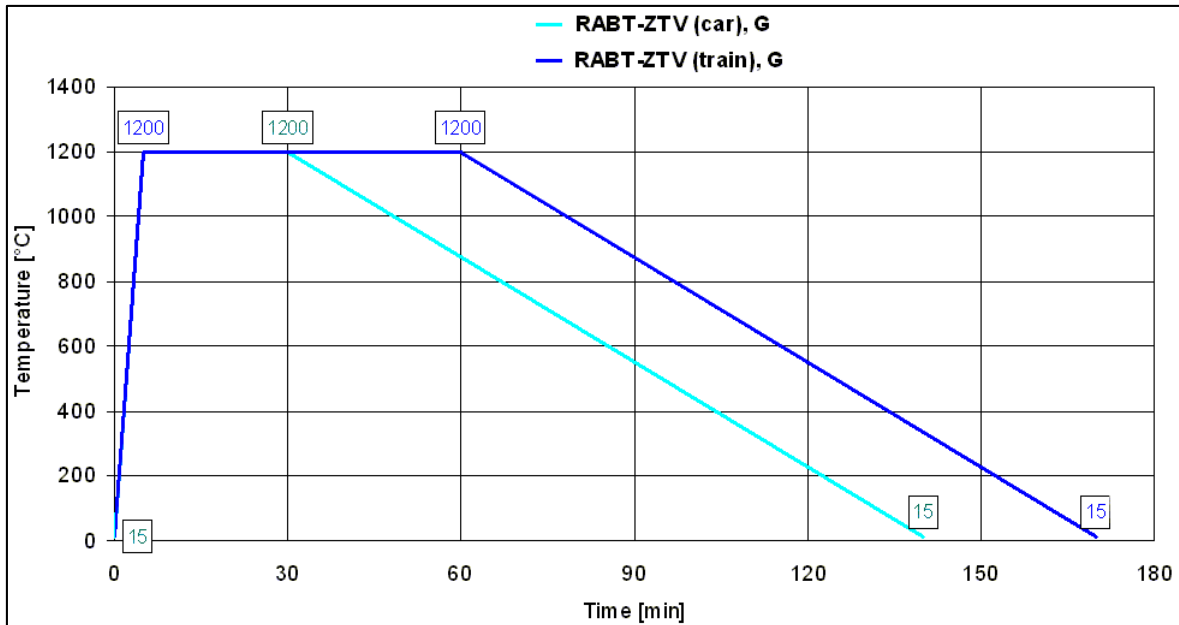
Gráfica 8. Curva nominal RWS para túneles.

Como puede observarse la curva RWS es mucho más severa que la ISO 834.

El criterio de fallo para elementos expuestos a la curva tiempo-temperatura RWS es que:

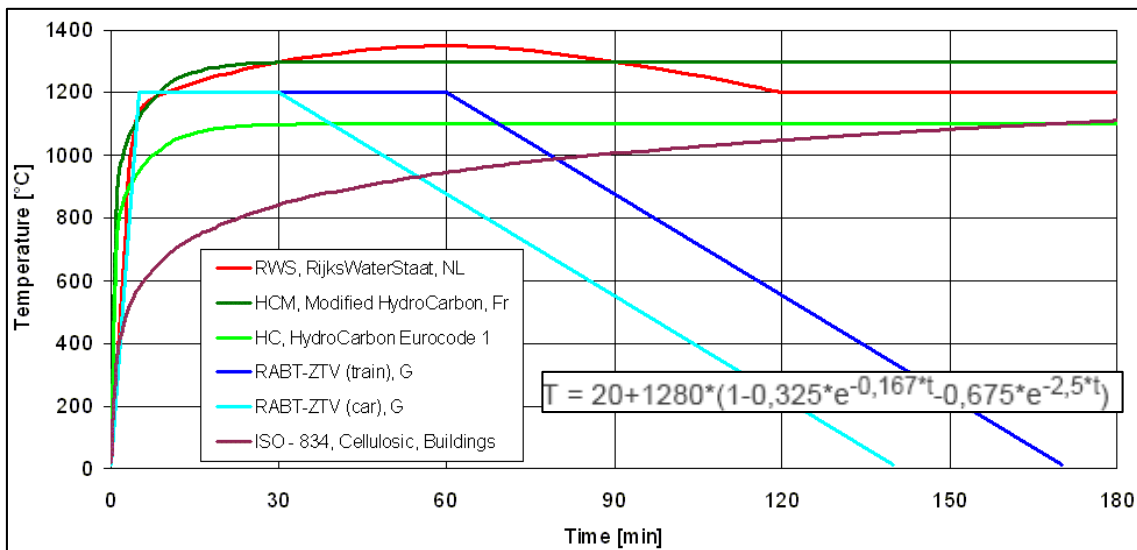
- 1) la temperatura en la interfase entre el hormigón de la losa y el recubrimiento de protección pasiva no debe exceder 380 °C (716 F) y
- 2) la temperatura en la armadura no debe exceder de 250 °C (482 F) (para un recubrimiento de 25 mm /1 inch).

Por su parte Alemania ha establecido la curva RABT (también conocida como ZTV) que incluye una rama descendente y representa un escenario menos severo que la RWS. Esta curva alcanza un máximo de 1.200° a los 5 minutos (temperatura de fusión de algunos áridos) que se mantiene durante media hora) para fuego de vehículos y una hora para fuego ferroviario, para posteriormente decaer hasta la temperatura ambiente en un periodo de 110 minutos.



Gráfica 9. Curva nominal alemana RABT

En los últimos años se ha propuesto una nueva curva de hidrocarburos, modificada y ampliada (HCM), para sustituir las curvas RWS y RABT. Esta curva de hidrocarburos modificada se corresponde con un flujo de calor de 345 kW/m² para simular un modelo de fuego severo en un túnel. En esta curva la temperatura crece hasta 1.200° C en menos de 10 minutos y alcanza un máximo de 1.300 ° C a los 20 minutos con una duración no mayor de 120 minutos.



Gráfica 10. Curva nominal de hidrocarburos modificada.

4. Dinámica de incendio en túneles. Escenarios

4.1. Introducción. Modelos de representación de escenarios de incendio.

Existen diferentes métodos para modelar un escenario de incendio siendo algunos métodos más adecuados que otros en función del tipo de incendio que se desee representar. Así en primer lugar se categorizan los diferentes posibles incendios, para ubicar dentro del conjunto a los incendios en túneles de metro.

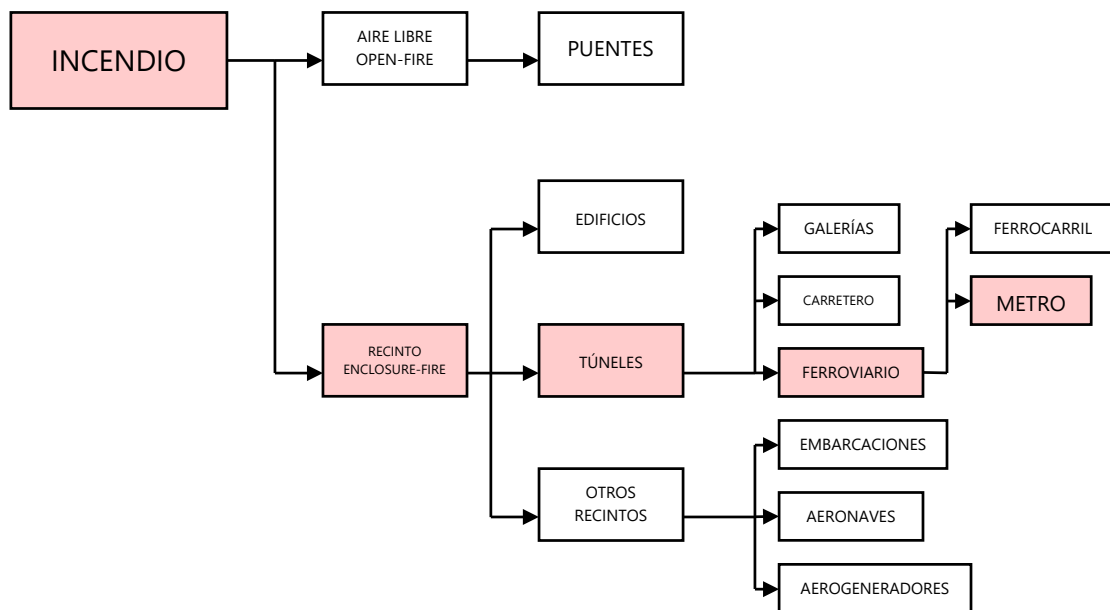


Figura 75. Tipologías de incendios.

Como puede verse en el esquema anterior existen dos grandes familias de incendios. Los incendios al aire libre y los incendios en recintos cerrados.

Incendios al aire libre (open-fire): Esta tipología de incendio se caracteriza por que el proceso de combustión está controlado por el combustible. Esto significa que mientras que exista combustible el fuego seguirá las etapas habituales ya vistas; fase incipiente, crecimiento, fuego completamente desarrollado y decaimiento. Es muy importante recalcar que en este tipo de incendios no se produce el fenómeno de flashover ya que no existe acumulación de gases calientes. Estos incendios suceden generalmente en campas o vertederos o en puentes debido a accidentes de tráfico.

Incendios en recinto (enclosure-fire): Esta tipología de incendio se caracteriza por que se produce en el interior de un recinto. Este recinto o conjunto de recintos puede ser cualquier tipo de edificio, nave industrial, túnel u otro tipo de construcciones como un buque, avión o una góndola de un aerogenerador.

Cabe resaltar de este tipo de incendios que al producirse en el interior de un recinto, el fuego puede quedar controlado por la falta de oxígeno a medida que el incendio se va desarrollando lo cual se conoce como incendios controlados por ventilación.

Este tipo de incendios también siguen las fases habituales de un fuego, pero a diferencia de los open-fires, en el caso de consumirse todo el oxígeno, la tasa de crecimiento del fuego se verá limitada por la cantidad de aire que entre en el recinto del incendio. Además de esto, puesto que se pueden acumular humos y gases calientes en cotas relativamente bajas se puede producir el fenómeno de flashover.

4.2. Modelos de incendios empleados en túneles

Desde la aparición de las computadoras modernas se han empleado múltiples modelos computacionales para el modelado de incendios en túneles, y en particular en túneles de metro. Estos modelos tienen como objetivo el análisis de diferentes variables tales como:

- 6) Sistema de ventilación de salubridad
- 7) Estrategias de ventilación
- 8) Propagación de humos
- 9) Campos de temperatura
- 10) Producción y difusión de contaminantes
- 11) Evacuación de ocupantes

De acuerdo a Borchiellini [39] los diferentes modelos de incendio que se emplean para analizar incendios en túneles se pueden agrupar en :

- 12) Modelos mono-dimensionales
- 13) Modelos de zona
- 14) Modelos de campo
- 15) Modelos multi-escala

A continuación se describirá cada uno de estos modelos hablando de sus características y aplicaciones.

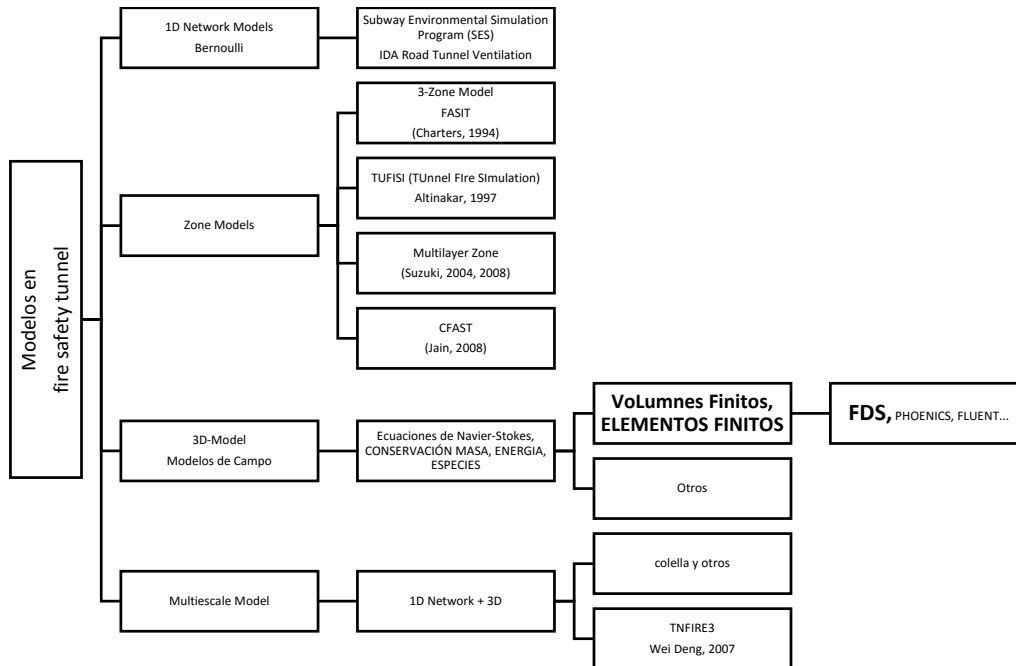


Figura 76. Modelos computacionales de simulación de incendio.

4.2.1. Modelos uni-dimensionales

Este tipo de modelos se basan en la ecuación de Bernoulli y se emplean para simulaciones rápidas, bien de estados estacionarios como de estados transitorios. Se emplean fundamentalmente para el diseño de sistemas de ventilación de túneles y estaciones ya que predicen de manera acertada el comportamiento general de un túnel y su sistema de ventilación. Existen múltiples softwares que emplean modelos uni-dimensionales siendo quizá el más famoso el SES (Subway Enviromental Simulation Computer Programme) publicado en 2002 [40]. Sin embargo este software tal y como apunta Tarada [41] presenta ciertas debilidades metodológicas, incluyendo la incapacidad para tener en cuenta la interacción entre el túnel y el origen del incendio, así como los campos de flujos más complejos que aparecen en las proximidades del incendio.

Otro software unidimensional desarrollado por EQUA es IDA Tunnel, el cual trabaja con un modelo unidimensional del túnel presentando un resultado en 3D tal y como se presenta en la siguiente figura:

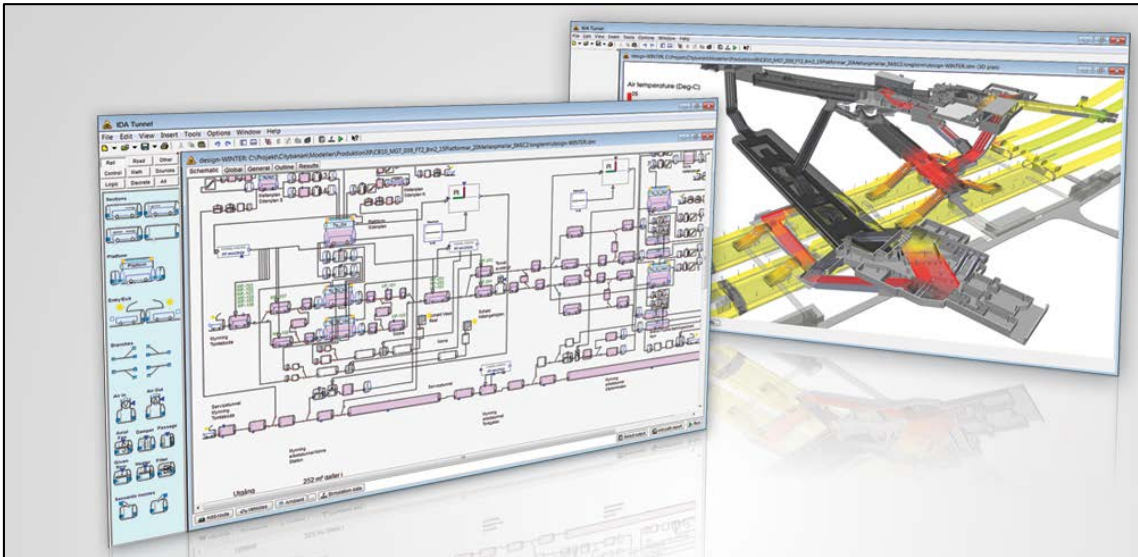


Figura 77. Software IDA Tunnel.

Estos modelos permiten una definición del túnel y sus sistemas de ventilación compacta la cual permite el cálculo de múltiples escenarios complejos. Por otra parte este tipo de modelos considera que la sección del túnel es homogénea no adecuada para el cálculo en las proximidades de ventiladores o del incendio donde el humo se encuentra estratificado. Sería necesario la introducción de parámetros correctores para simular este tipo de situaciones.

Otras referencias sobre modelos unidimensionales pueden encontrarse en [42] sobre predicción de la calidad del aire y temperatura en sistemas de tráfico subterráneo y en [43] para el diseño óptimo del sistema de control ambiental en túneles de metro.

4.2.2. Modelo de zona

Los modelos numéricos de dos o más zonas se emplean para calcular la estratificación de temperaturas en los recintos. Una de sus principales ventajas frente a los modelos de campo es que necesitan mucho menos coste computacional para obtener los resultados.

Los softwares clásicos empleados sobre todo en incendios en la edificación son Ozone de la Universidad de Lieja y CFAST del NIST, los cuales emplean únicamente 2 zonas, una fría y otra caliente para el estudio de la estratificación de gases calientes durante un incendio.

Una aplicación de CFAST para la simulación de túneles puede encontrarse en la referencia, [44] donde se realiza un estudio comparativo del resultado ofrecido al simular un incendio en un túnel modelado por una parte con CFAST y el resultado obtenido mediante un software que emplea un modelo de campo para simular el incendio, en particular CFX.

Más enfocados en los incendios en túneles se pueden nombrar el software FASIT [39], el cual emplea una zona o capa adicional de mezcla entre la capa fría y la capa caliente de gases o el modelo de zonas multicapa de Suzuki [45].

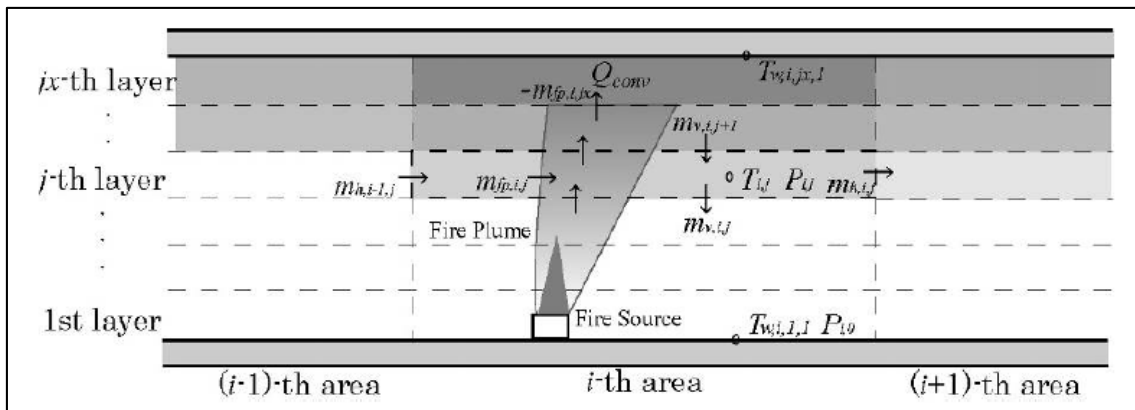


Figura 78. Modelo de zona MLZ de Suzuki.

Sin embargo estos modelos presentan la problemática de que requieren una adecuada calibración con un modelo real para el adecuado cálculo del arrastre que produce el penacho del incendio y la mezcla entre las diferentes capas.

4.3. Modelos de campo

Los programas de mecánica de fluidos computacional (CFD) permiten modelar y analizar mediante el método de los volúmenes finitos, y en este caso en particular, flujos de fluidos conducidos por fuego. A este tipo de modelos se les denomina modelo de campo.

Una de las primeras aplicaciones de modelos CFD para la simulación de incendios en túneles [46],[47] trataban de a partir de los resultados experimentales de un incendio en un túnel llevado a cabo por el UK Health and Safety Executive calibrar un modelo CFD que se ajustara a los resultados obtenidos.

Existen diferentes softwares CFD empleados en simulaciones de incendios en túneles de metro, pero en cuanto a determinar la tasa de liberación de calor de un incendio en un vagón de metro en un túnel, el software más empleado es Fire Dynamic Simulator (en adelante FDS) del NIST (National Institute of Standards and Technology).

FDS es un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) concebido de manera específica para reproducir el fenómeno del incendio en recintos cerrados. FDS resuelve numéricamente un tipo de ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para baja velocidad y flujo considerado desde un punto de vista térmico con énfasis en el transporte de humo y calor derivados de incendios [32].

El sistema de resolución de las ecuaciones diferenciales es método predictor corrector de segundo orden [33].

Estas ecuaciones describen la conservación de la masa, cantidad de las especies, cantidad de movimiento y la energía para un flujo de fluido además de la ecuación de estado.

Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad \text{Ec (4.1)}$$

Conservación de las especies:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad \text{Ec (4.2)}$$

Conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + f \quad \text{Ec (4.3)}$$

Conservación de la energía:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u \right) = \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + q'' - \nabla \cdot q_{rad} + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \quad Ec (4.4)$$

Ecuación de estado:

$$p = \rho T R \sum_i (Y_i / M_i) \quad Ec (4.5)$$

El algoritmo principal tiene un esquema predictor-corrector explícito, de segundo orden de exactitud en el espacio y en el tiempo. La turbulencia es tratada por medio de la forma Smagorinsky de Simulación de Grandes Remolinos (Large Eddy Simulation, LES) desde la versión 1 a la 5 de FDS. En la última versión se emplea el modelo de viscosidad turbulenta de Deardorff, pese a que se puede activar la forma de Smagorinsky o el modelo de viscosidad de Vreman a elección del usuario.

Es posible realizar una Simulación Directa Numérica (Direct Numerical Simulation, DNS) si la rejilla numérica es lo suficientemente fina. LES es el modo de operación por defecto.

Para la mayoría de las aplicaciones, FDS utiliza un modelo de combustión de fracción de mezcla. La fracción de mezcla es una cantidad escalar que se define como la fracción de gas en un punto dado del campo fluido combustible. El modelo asume que esta combustión está controlada por la mezcla, y que la reacción del combustible y el oxígeno es infinitamente rápida.

La transferencia de calor por Radiación se incluye en el modelo mediante la solución de la ecuación de la transmisión por radiación para un gas gris que no se dispersa, y en algunos casos limitados empleando un modelo de banda ancha. La ecuación se resuelve utilizando una técnica similar a la de los métodos de volúmenes finitos (Finite Volume Method, FVM).

La problemática que presentan este tipo de modelos es el coste computacional asociado a la resolución de una simulación. En particular en 2012 la longitud de los túneles que podían modelarse con este tipo de softwares era de 1km aproximadamente [39].

4.3.1. Modelos mutli-escala

En esta tipología de modelos se descompone el problema a analizar en varios en función de la tipología de las zonas a estudiar.

Aquellas zonas en las que el humo y los gases calientes se desplacen a bajas velocidades y no existan elevados gradientes de temperaturas en la sección (secciones homogéneas) se emplearán modelos unidimensionales.

Sin embargo en aquellas zonas del recinto existan geometrías complejas, altas velocidades o gradientes de temperatura elevados se emplearán modelos de campo.

Es posible acoplar diferentes modelos con lo que el coste de computación se reduce considerablemente al no tener que resolver el problema completo mediante un modelo de campo.

En la actualidad este tipo de modelos multi-escala están siendo desarrollados con el objetivo de resolver el coste computacional tal y como publica Ding [48].

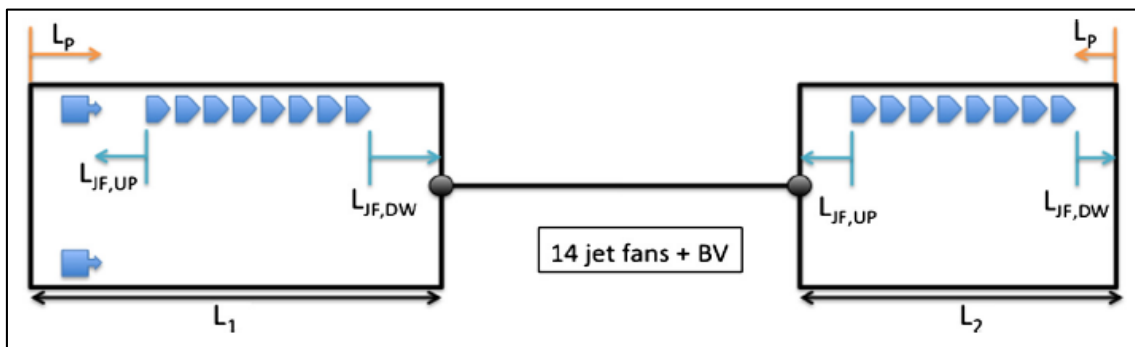


Figura 79. Modelo multi-escala de un túnel de metro.

4.4. Fire Dynamic Simulator

Para la definición de los escenarios de incendio tipo con los cuales se validará el diseño de prueba se va a emplear el software FDS (Fire Dynamic Simulator) y SmokeView, ambos desarrollados por el Building and Fire Research Laboratory del NIST (National Institute of Standards and Technology) de EEUU.

Una de las primeras aplicaciones de FDS desarrollada por McGrattan para la simulación numérica del incendio del túnel de Howard Street. Puede encontrarse en la publicación NISTIR 6902 [49]. Más ejemplos de la utilización de FDS pueden encontrarse en [50], donde se aplica para el cálculo de la salubridad en situaciones de incendio en túneles ferroviarios y en [51] donde se estudia la evacuación del humo en un túnel ferroviario en situación de incendio.

FDS está escrito en Fortran90 y en la actualidad no tiene ningún tipo de interfaz gráfica para generar el escenario de incendio. Para escribir el archivo con formato de FDS se empleará un software que permite modelar a través de su interfaz gráfica el escenario de incendio, para posteriormente ejecutar la simulación de incendio mediante FDS.

Este software mediante el cual se generará el escenario de incendio es Pyrosim de Thunderhead Engineering.

El escenario de incendio modelado en FDS consta de los siguientes elementos:

- 16) Mallas
- 17) Reacción
- 18) Materiales
- 19) Superficies
- 20) Dispositivos
- 21) Controles
- 22) Resultados
- 23) HVAC
- 24) Modelo geométrico

A continuación se describe cada uno de los elementos a la vez que se genera un escenario de incendio tipo.

4.4.1. Mallas

Todos los cálculos realizados en FDS deben realizarse dentro de un dominio de computación formado por volúmenes rectangulares llamados mallas. Cada malla a su vez está dividida en celdas rectangulares, y en función de su número, la simulación presentará mayor o menor resolución.

La resolución de una malla es de capital importancia ya que si el tamaño de las celdas es muy pequeño, el coste de computación será muy elevado. En caso contrario si el tamaño de las celdas es muy grande, el resultado de la simulación puede que no se ajuste a la

realidad. Para conocer si el tamaño de malla es adecuado es necesario realizar un análisis de sensibilidad de la malla.

Un análisis de sensibilidad de malla consiste en realizar la misma simulación con diferentes tamaños de malla variando el tamaño progresivamente. Al llegar a un tamaño de malla adecuado, el cual no solo es función de la geometría del problema sino también del tamaño y potencia del incendio, no se verá modificado cualitativamente el resultado obtenido en el caso de continuar variando el tamaño de malla.

Se ha realizado un análisis del tamaño de malla estudiando el comportamiento del incendio así como del sistema de ventilación a emplear fijándose como tamaño de celda cúbica 0,5 metros.

Por otra parte otro elemento clave es el número de mallas a emplear en la simulación.

FDS permite cálculos en paralelos empleando varios núcleos, u ordenadores conectados en red. Generalmente se asigna una malla por núcleo del ordenador. En el caso de disponer de un servidor o múltiples ordenadores conectados es posible asignar a una malla varios procesadores.

Para el mallado del túnel de 1,5 km de longitud, se emplearán 6 mallas con una resolución de 0,5 metros de arista por malla.

El número de mallas se ha decidido a partir del número de procesadores disponible para realizar el cálculo.

Así pues el túnel cuenta con 6 mallas de 250 metros de longitud cada una con una sección de 11,5 metros de ancho por 7,5 metros de alto.

La sección de la malla presenta estas dimensiones para poder modelar la sección completa del túnel. En la siguiente imagen se presenta la sección del túnel. En gris claro se aprecia las celdas de la sección.

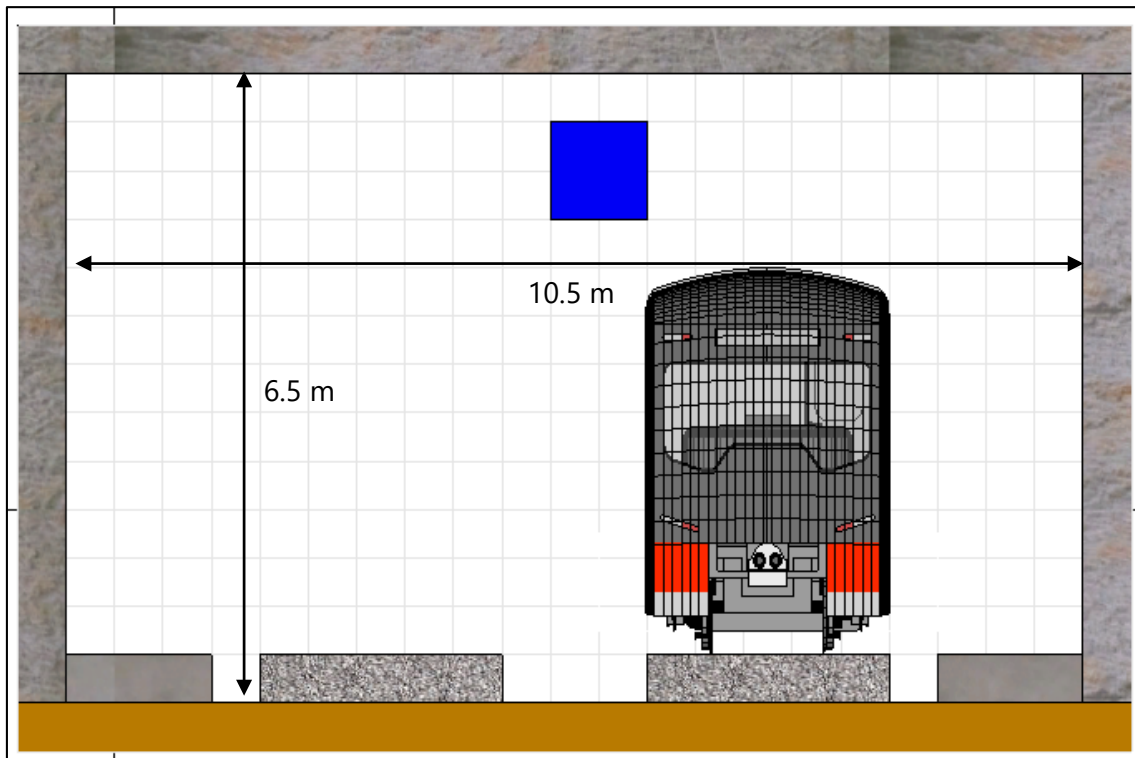


Figura 80. Sección tipo del túnel objeto del trabajo.

La línea de código de FDS para generar una malla queda representada a continuación:

```
&MESH ID='Túnel-a', IJK=500,23,15, XB=0.0,250.0,-10.5,1.0,-2.5,5.0/
```

EL modelo consta por tanto de 172.500 celdas por malla lo que hace un total de 1.035.000 celdas de 0,5 metros de arista.

4.4.2. Reacción

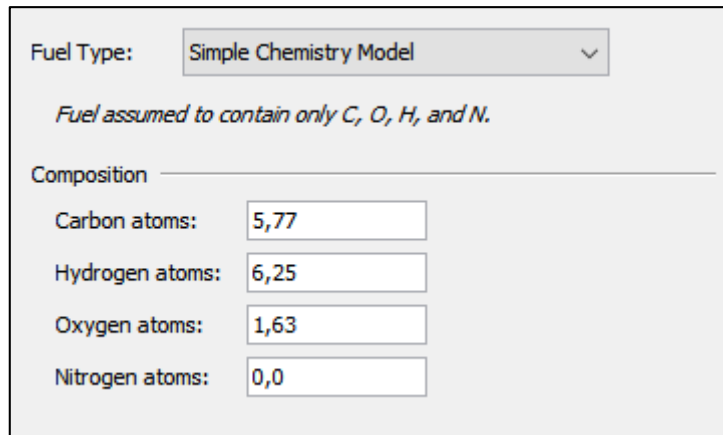
Como ya se introdujo en el capítulo 3 FDS puede emplea para modelar la reacción química de combustión el modelo Simply Chemistry Model. En este modelo se asume que cualquier material que entre en combustión en el modelo lo hace como un único material.

La elección de la reacción no es banal ya que debe representar la combustión de toda la carga de fuego presente en el modelo.

De acuerdo con las investigaciones de Chiam [17] en las que tras analizar varios vagones de metro moderno concluye que la mayor parte de la carga de fuego de un vehículo de metro es FRP Polyester (Fiberglass reinforce polymer) y tras haber cotejado este dato con la compañía gestora de metro así como el fabricante de las unidades del convoy, se empleará la reacción del FRP Polyester como reacción de combustión del modelo.

Gracias a los múltiples experimentos realizados por Chiam [17] mediante un Cono Calorimétrico, se tiene la reacción modelada en FDS el FRP Polyester.

A continuación se presentan los parámetros con los que se ha modelado la reacción:



Fuel Type: Simple Chemistry Model

Fuel assumed to contain only C, O, H, and N.

Composition

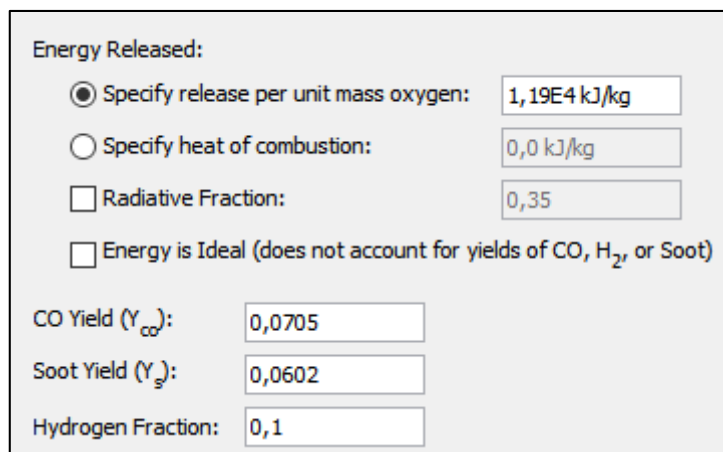
Carbon atoms: 5,77

Hydrogen atoms: 6,25

Oxygen atoms: 1,63

Nitrogen atoms: 0,0

Figura 81. Composición del FRP Polyester.



Energy Released:

Specify release per unit mass oxygen: 1,19E4 kJ/kg

Specify heat of combustion: 0,0 kJ/kg

Radiative Fraction: 0,35

Energy is Ideal (does not account for yields of CO, H₂, or Soot)

CO Yield (Y_{CO}): 0,0705

Soot Yield (Y_S): 0,0602

Hydrogen Fraction: 0,1

Figura 82. Tasas de producción de energía y productos del FRP Polyester.

En la figura anterior se muestra la tasa de liberación de energía por kg de oxígeno consumido, y las tasas de producción de tanto de hollín como de monóxido de carbono. La línea de código en FDS que representa la reacción es la siguiente:

```
&REAC ID='FRPPOLYESTER', FYI='C_5.77 H_6.25 O_1.63, SFPE Handbook',
FUEL='REAC_FUEL', C=5.77, H=6.25, O=1.63, CO_YIELD=0.0705, SOOT_YIELD=0.0602,
EPUMO2=1.19E4/
```

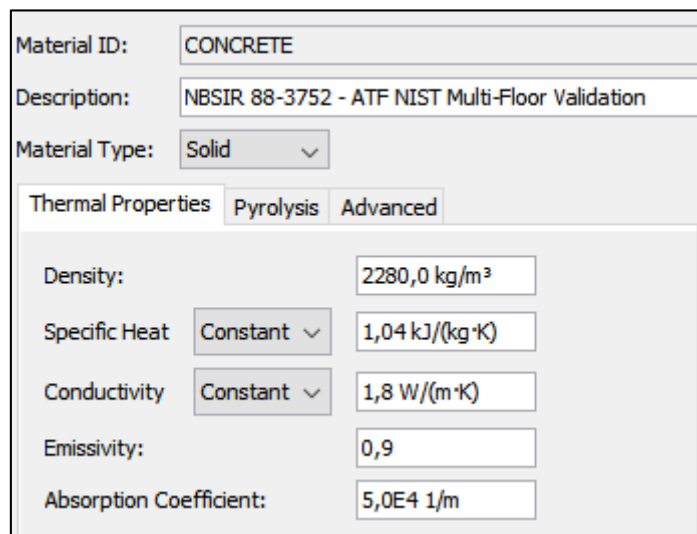
4.4.3. Materiales

En este apartado se deben definir todos los materiales que se emplean en la simulación y cobra especial importancia cuando dichos materiales se consideran carga de fuego.

Puesto que el modelo de incendio a emplear es el prescrito por la Instrucción de Seguridad en Túneles IST2006 [4] a través de burners con una tasa de liberación de calor por unidad de superficie prescrita (HRRPUA) no se va a modelar ningún material que contribuya al incendio a través de su pirolisis y posterior combustión.

Sin embargo es necesario modelar las propiedades de los materiales que aparecen en el escenario de incendio tales como hormigón del cual está constituido todos los elementos

del túnel y el acero, material con el cual está constituida la estructura de los vagones de metro. A continuación se muestra el menú donde se definen las propiedades de un material:



Material ID:	CONCRETE
Description:	NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation
Material Type:	Solid
Thermal Properties	
Density:	2280,0 kg/m ³
Specific Heat:	Constant 1,04 kJ/(kg·K)
Conductivity:	Constant 1,8 W/(m·K)
Emissivity:	0,9
Absorption Coefficient:	5,0E4 1/m

Figura 83. Modelo de hormigón empleado en escenario de incendio.

Como puede observarse las propiedades a modelar son la densidad, el calor específico, la conductividad térmica, la emisividad y el coeficiente de absorción.

También es posible modelar las propiedades de pirolisis de un material en su correspondiente menú no siendo objeto del presente trabajo. A continuación se presenta la línea de código en FDS para modelar un material.

```
&MATL ID='CONCRETE', FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',  
SPECIFIC_HEAT=1.04, CONDUCTIVITY=1.8, DENSITY=2280.0/
```

4.4.4. Superficies

El funcionamiento de FDS es particular ya que los objetos modelados no tienen las propiedades del Material del que están compuesto, sino de las Superficies que componen las caras de los objetos modelados.

Cunado en FDS se genera un elemento geométrico u obstrucción (en FDS a este tipo de elementos se les llama OBST del inglés Obstruction) se realiza mediante ortoedros cuyas aristas coinciden con las aristas de las celdas. Las caras de estos ortoedros deben tener asignada una Superficie.

Cada Superficie puede tener unas propiedades determinadas que a continuación se exponen.

4.4.4.1. Burner

Los burners son superficies que emiten combustible (gas) y reaccionan de acuerdo a la Reacción prescrita. La cantidad de gas que emiten estas superficies queda determinada a través del parámetro HRRPUA que indica la tasa de liberación de calor por unidad de superficie que presentará un elemento del modelo con esta superficie.

Por otra parte en las propiedades de la superficie es donde se modela la curva de tasa de liberación de calor del burner. En Pyrosim, el software empleado para realizar el modelo en FDS hay un asistente de creación de curvas de tasa de liberación de calor, presentando además de varios tipos de curva, la opción de introducir mediante una tabla la curva que desee el usuario.

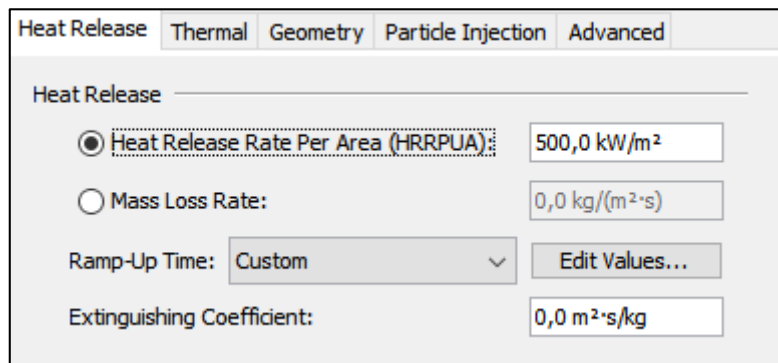


Figura 84. Menú de generación de una Superficie tipo Burner.

Como puede observarse en la imagen anterior además de poder prescribir la HRRPUA y la curva de la tasa de liberación de calor (Ramp-Up Time) es posible definir otras propiedades del burner las cuales no van a ser empleadas en el presente trabajo.

Cabe resaltar que un incendio puede modelarse mediante un único burner o un conjunto de ellos con el objeto de modelar el crecimiento de un incendio en superficie en función del tiempo. A continuación se presenta la línea de código de una superficie tipo Burner:

```
&SURF ID='BURNER01', COLOR='WHITE', HRRPUA=500.0,
RAMP_Q='BURNER01_RAMP_Q' / &RAMP ID='BURNER01_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='BURNER01_RAMP_Q', T=50.0, F=1.0 /
```

4.4.4.2. Superficie general

Este tipo de superficie permite modelar prácticamente todas las propiedades de los diferentes tipos de superficies existentes. Generalmente se emplean como elementos de nexo en modelos multi-escala ya que permiten la introducción en el modelo de especies, calor y flujos a una tasa prescrita por el usuario a través de múltiples tablas.

Figura 85. Menú de generación de una Superficie General.

4.4.4.3. Calentador/Enfriador

Este tipo de superficies se emplean para modelar elementos a temperaturas distintas a las calculadas por FDS. Mediante ellas es posible modelar el calentamiento de un elemento que ha sufrido un fallo eléctrico hasta llegar a una temperatura tal que produzca la pirolisis y consiguiente combustión de un elemento del modelo. También es posible su utilización para el modelado de elementos anormalmente fríos como las paredes de una cámara frigorífica.

Figura 86. Menú de generación de una superficie tipo Calentador/Enfriador.

4.4.4.4. Suministro

Este tipo de superficies se emplean para introducir un flujo de aire con unas determinadas propiedades en el modelo. En antiguas versiones de FDS antes de la aparición del módulo HVAC se empleaban para el modelado de elementos de climatización de impulsión como difusores o rejillas. Este tipo de superficies debe emplearse con precaución ya que si se inyecta un flujo de aire en el modelo y este modelo

no dispone de superficies Abiertas, la presión en el modelo aumentará pudiendo llevar a una inestabilidad numérica y consiguiente error en la simulación.

Figura 87. Menú de generación de una superficie tipo Suministro.

4.4.4.5. Escape

Este tipo de superficies funcionan exactamente que las de Suministro pero extrayendo un flujo del modelo. Pueden presentar los mismos problemas que las superficies de Suministro en recintos cerrados.

4.4.4.6. Multicapa

Este tipo de superficies son las que se emplean para determinar las propiedades físicas de los elementos geométricos en FDS conocidos como Obsts. Así pues si se desea asignar a un Obst las propiedades de un material se realizará a través de este tipo de Superficie.

	Thickness (m)	Material Composition	Edit
1	0,5 m	1,0 CONCRETE	Edit...
*			Edit...

Figura 88. Menú de generación de una superficie tipo Multicapa.

Como puede observarse en la figura anterior se ha generado una Superficie tipo Multicapa compuesta por una capa compuesta 100% por el Material Hormigón previamente generado, de un espesor de 0,5 metros de espesor.

Al utilizar esta Superficie en las caras de una Obst, se asume que dicha cara tiene un espesor de 0,5 metros de profundidad desde la cara hacia el interior del ortoedro que compone la Obst con independencia del tamaño del Obst.

Cabe señalar que es posible generar superficies multicapas añadiendo varias capas de diferente espesor a la Superficie. Por otra parte cada capa puede estar compuesta por una mezcla de varios materiales.

Finalmente y enlazando con el siguiente subpunto es posible definir la rugosidad de la superficie a través de una línea de código, concepto de cobra especial importancia cuando se simulan sistemas de ventilación en el interior de túneles. A continuación se presenta el código en FDS de una superficie multicapa con la propiedad de rugosidad superficial añadida.

```
&SURF ID='PARED', TEXTURE_MAP='TECTURA PARED.JPG', TEXTURE_WIDTH=8.0,  
TEXTURE_HEIGHT=4.0, BACKING='INSULATED', MATL_ID(1,1)='CONCRETE',  
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0, THICKNESS(1)=0.5, GEOMETRY='CARTESIAN',  
LENGTH=0.0, WIDTH=0.0, ROUGHNESS=0.02/
```

4.4.4.7. HVAC

Este tipo de superficie se emplea para conectar un sistema HVAC al dominio de computación. Es de capital importancia ya que a diferencia de las superficies tipo Suministro o Escape, las superficies HVAC si permiten el transporte de especies entre una varias superficies tipo HVAC tal como se verá más adelante.

4.4.4.8. Abierta

Se trata de una superficie que representa una apertura en la frontera del dominio de computación. Se emplean para representar las aperturas al exterior en el dominio de computación.

4.4.4.9. Espejo

Se trata de una superficie para generar un plano de simetría en el cual el flujo es exactamente opuesto al del otro lado de la superficie.

4.4.5. Dispositivos

Los Dispositivos son una serie de elementos que se pueden modelar en FDS y simulan generalmente dispositivos reales de instalaciones de protección contra incendios. Mediante los Dispositivos es posible realizar medidas en el modelo como si de dispositivos reales se tratara permitiendo a través de los Controles de FDS realizar cambios en el modelo como la bajada de una cortina corta humos o la activación de los ventiladores de extracción de humos y gases calientes.

También existen Dispositivos en FDS ficticios que permiten extraer información relevante del modelo como sensores de flujo de calor adiabático los cuales permiten a partir de la información obtenida el cálculo de una estructura frente la acción del fuego simulado en lugar de emplear una curva paramétrica tiempo-temperatura, mucho más severa, y no real.

A continuación se presentan los Dispositivos que se pueden modelar en FDS:

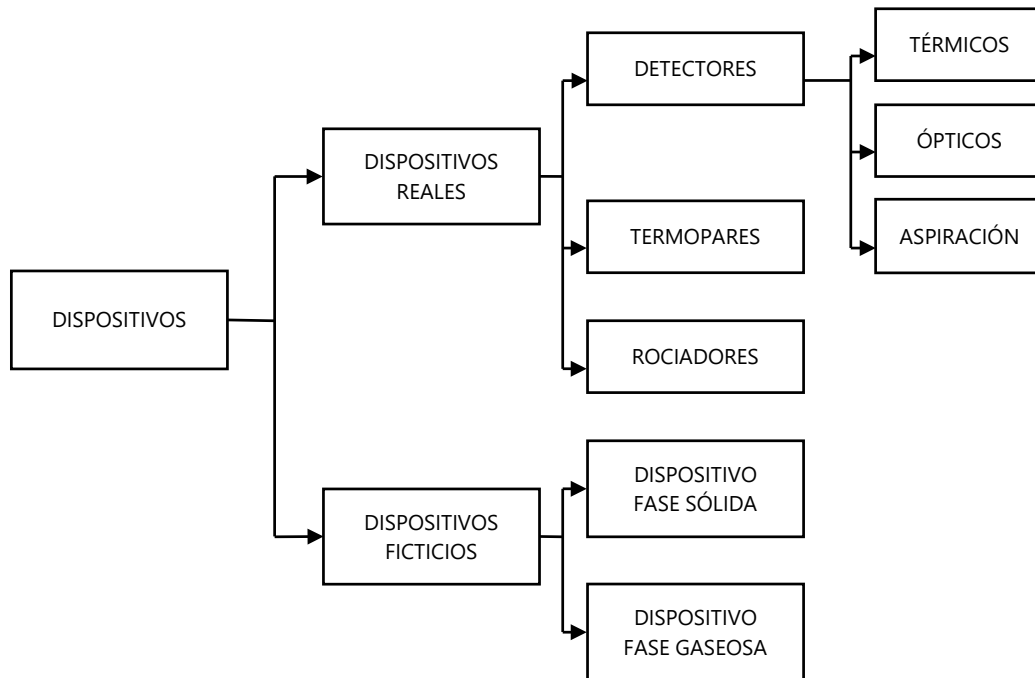


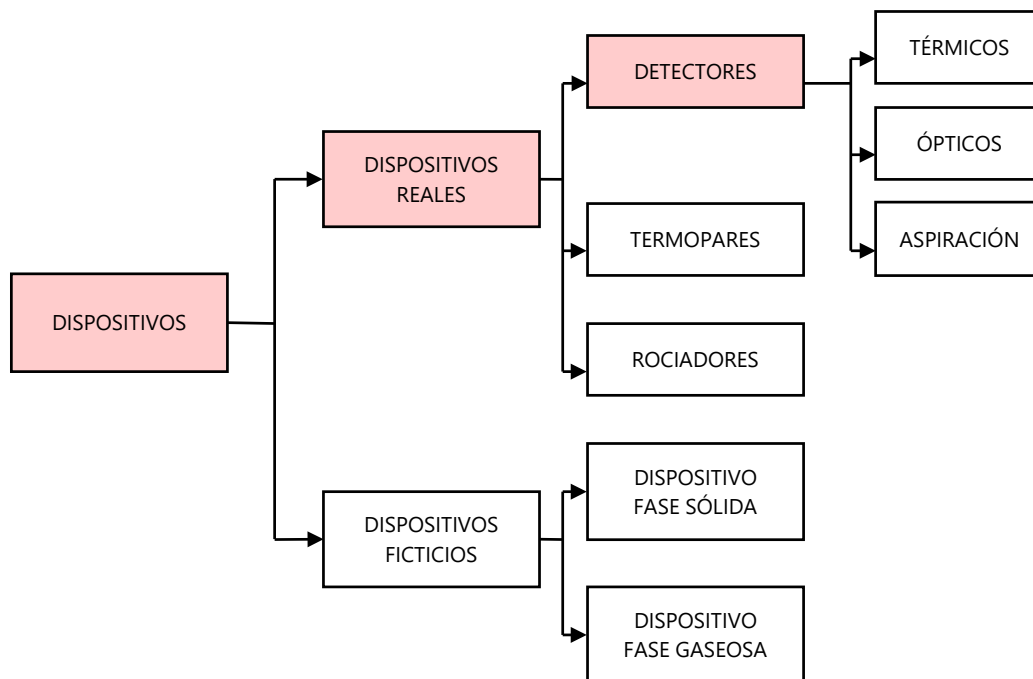
Figura 89. Esquema de Dispositivos en FDS.

4.4.5.1. Dispositivos reales

Con el objeto de modelar las instalaciones de protección contra incendios que entran en juego de manera automática en un incendio, FDS cuenta con diferentes tipos de detectores, termopares y rociadores.

A continuación se presenta los menús de generación de este tipo de elementos.

Detectores: En muchas ocasiones los incendios son detenidos en su fase incipiente o de crecimiento gracias a las alarmas generadas por los detectores automáticos. Puesto que este tipo de elemento es de vital importancia, FDS incluye en su código diferentes tipos de detectores de incendio con su sensibilidad, parámetros y tiempo de reacción como parámetros para generar este tipo de dispositivos.



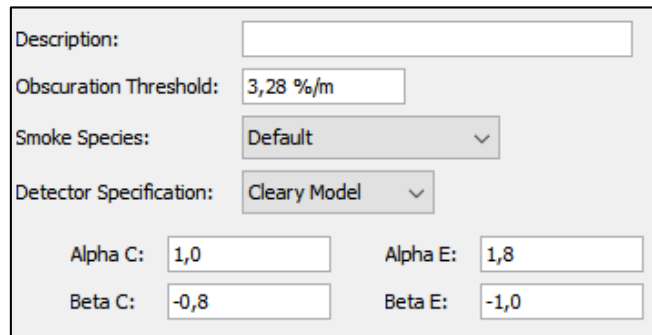
En particular FDS cuenta con:

Detector térmico: Se caracteriza por su temperatura de activación y su RTI (Response Time Index)

Heat Detector Model ID:	Default
Description:	
<input type="checkbox"/> Initial Temperature:	20,0 °C
Activation Temperature:	74,0 °C
Response Time Index:	100,0 $\sqrt{m \cdot s}$

Figura 90. Menú de generación de un Dispositivo de detección térmica.

Detector óptico: Los detectores ópticos de humo pueden ser fotoeléctricos o iónicos y se caracterizan por el nivel de oscurecimiento umbral de detección, el modelo de funcionamiento y los parámetros alfa y beta del detector.



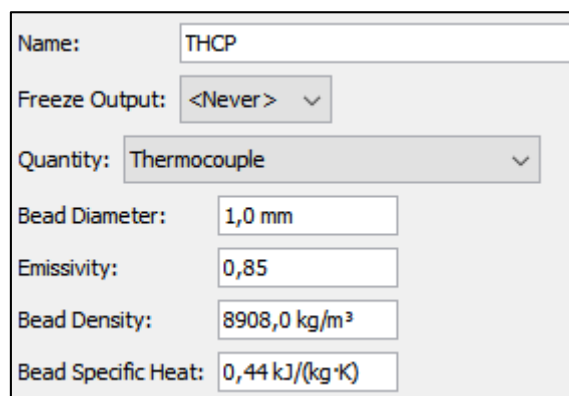
Description:	<input type="text"/>
Obscuration Threshold:	<input type="text" value="3,28 %/m"/>
Smoke Species:	<input type="text" value="Default"/>
Detector Specification:	<input type="text" value="Cleary Model"/>
Alpha C:	<input type="text" value="1,0"/>
Alpha E:	<input type="text" value="1,8"/>
Beta C:	<input type="text" value="-0,8"/>
Beta E:	<input type="text" value="-1,0"/>

Figura 91. Menú de generación de un Dispositivo de detección óptica.

Detectores por aspiración: En FDS es posible modelar detectores por aspiración, empleados para detectar incendios en grandes recintos como las naves de almacenamiento industrial robotizadas. Es posible modelar tanto los cabezales de aspiración (samplers) como la central de aspiración donde se ubica el detector. Los parámetros que definen este tipo de detectores es el caudal aspirado en cada sampler y el nivel umbral de oscurecimiento de disparo de la central de aspiración.

Termopares: Los termopares se emplean con frecuencia en ensayos de incendio, tanto en hornos donde se somete a elementos de construcción a ensayos según curvas nominales como en ensayos a escala 1:1 donde se instala una matriz tridimensional de termopares a lo largo del vagón. El objeto de estos dispositivos es determinar la temperatura en un punto determinado en función del tiempo. Con esta información obtenida de los ensayos y en las simulaciones es posible calibrar el modelo computacional para que el error sea el mínimo posible.

Los parámetros que definen un termopar son las propiedades físicas del elemento sensor:



Name:	<input type="text" value="THCP"/>
Freeze Output:	<input type="text" value="<Never>"/>
Quantity:	<input type="text" value="Thermocouple"/>
Bead Diameter:	<input type="text" value="1,0 mm"/>
Emissivity:	<input type="text" value="0,85"/>
Bead Density:	<input type="text" value="8908,0 kg/m³"/>
Bead Specific Heat:	<input type="text" value="0,44 kJ/(kg·K)"/>

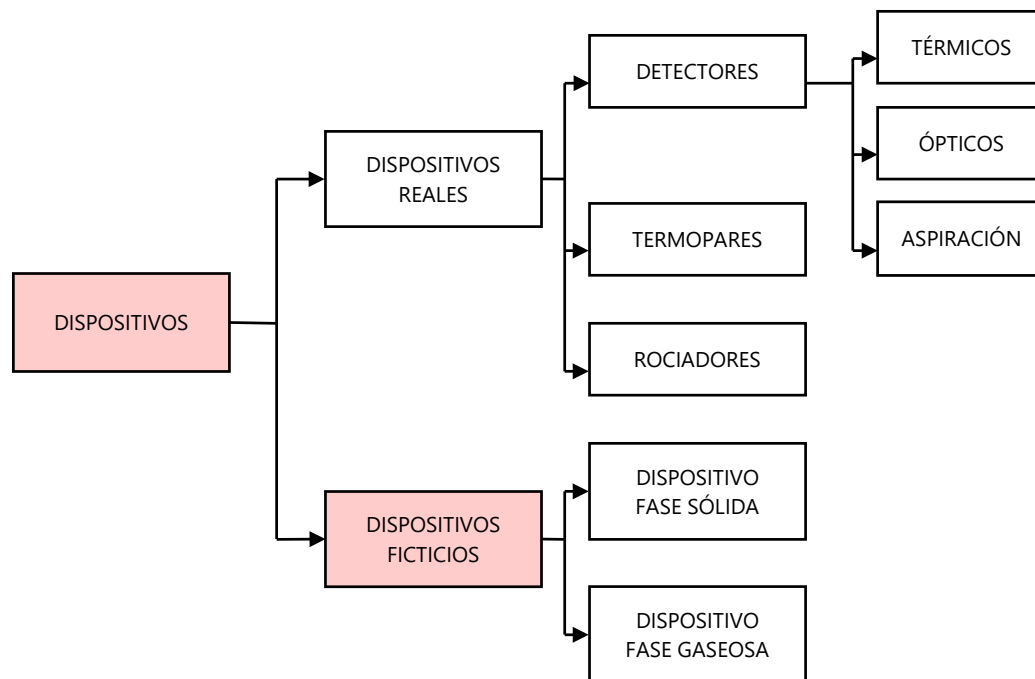
Figura 92. Menú de generación de un Dispositivo del tipo termopar.

Rociadores: En FDS es posible generar un sistema de rociadores los cuales una vez sean activados bien por la explosión de la ampolla de un rociador o por la activación del grupo de bombeo de los rociadores procedan a la difusión de agua con diferentes modelos de spray a elegir por el usuario. En la actualidad es posible simular cualquier tipo de instalación de rociadores mediante FDS. En particular los rociadores quedan definidos por el modelo de difusión del agua (Water Spray), parámetro fundamental para la definición de un rociador, el tipo de sistema de tubería (seca o húmeda) y el tipo de capsula que emplea el rociador, la cual determina la temperatura de activación. En la siguiente imagen se muestra el menú de generación.

The image shows a software interface for defining a fire sprinkler device. The form is organized into several sections:

- Name:** A text input field containing "SPRK".
- Freeze Output:** A dropdown menu set to "<Never>".
- Spray Model:** A dropdown menu set to "Water Spray" with an "Edit..." button next to it.
- Dry Pipe:** A dropdown menu set to "None" with a "New..." button next to it.
- Activator:** A section with several options:
 - Temperature Link:** A dropdown menu set to "Default" with an "Edit..." button.
 - Quantity:** A dropdown menu set to "Temperature" with a value field set to "74,0 °C".
 - Trigger Only Once**
 - Initially Activated**
- Location:** Three input fields for X, Y, and Z coordinates, all set to "0,0 m".
- Orientation:** Three input fields for X, Y, and Z orientation values, set to "0,0", "0,0", and "-1,0" respectively.
- Rotation:** An input field set to "0,0 °".

Figura 93. Menú de generación de un Dispositivo del tipo rociador.

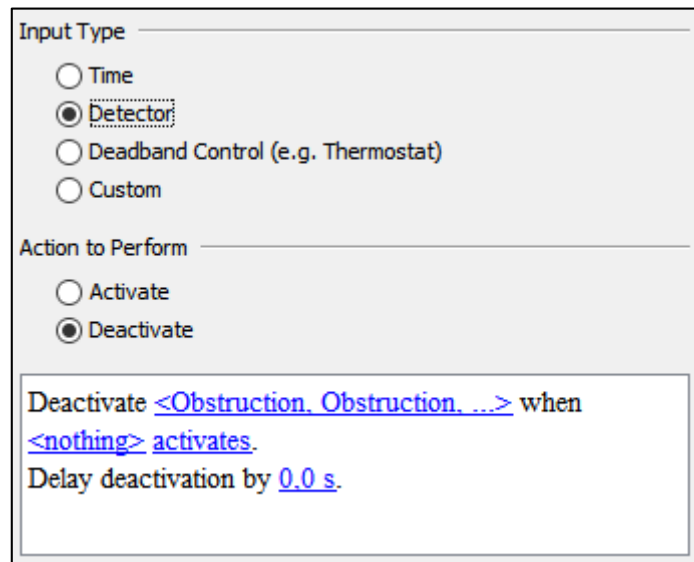


Dispositivos ficticios: Este tipo de Dispositivos son elementos de medición no reales que se emplean para determinar cualquier tipo de propiedad mensurable dentro del modelo. Existen los dispositivos de medición en fase sólida los cuales pueden se emplean para medir dentro de un elemento solido en una de sus caras a una profundidad determinad, y los de fase gaseosa que se emplean para medir las propiedad elegida por el usuario en cualquier punto del modelo no sólido.

4.4.6. Controles:

Los Controles es la herramienta que presenta FDS para realizar ciertos automatismos dentro del modelo de incendio. Mediante los controles es posible activar o desactivar elementos del modelo para representar ciertas situaciones que se dan en el incendio real. Un ejemplo del uso de controles sería el modelado de la rotura de una ventana por altas temperaturas. Para realizar el modelo de manera correcta la ventana se modela como un elemento geométrico tipo Obst plano, con una Superficie del espesor de la ventana real conformado por el Material Vidrio. Se instalarían dos Dispositivos (uno en cada de la ventana) en las cotas superiores de la ventana que midieran la temperatura del gas adyacente a la ventana. Cunado alguno de estos dos dispositivos alcanzase la temperatura de rotura de la ventana (600°C aprox.) el Control entraría en juego desactivando la ventana del modelo, quedando un hueco en su lugar.

Los parámetros que definen un control son los siguientes:



Input Type

Time

Detector

Deadband Control (e.g. Thermostat)

Custom

Action to Perform

Activate

Deactivate

Deactivate [<Obstruction. Obstruction. ...>](#) when [<nothing> activates.](#)
Delay deactivation by [0.0 s.](#)

Figura 94 Menú de generación de un Control.

Como puede observarse los controles funciona a través de la activación de un input el cual puede ser un temporizador, un sensor, un detector, un parámetro a elección del usuario. Es posible el empleo de ciertos comandos para la activación del input como por ejemplo que el arranque de un ventilador esté supeditada a la detección de humo por al menos n detectores.

La activación de este input genera una acción que puede ser la activación o desactivación de uno o varios elementos del modelo.

4.4.7. Resultados

En FDS es posible la introducción de elementos ficticios diferentes a los Dispositivos de Fase Sólida o Fase Gaseosa para obtención de datos del modelo. Este tipo de nuevos elementos ficticios a diferencia de los detectores ficticios ya descritos permiten la obtención de resultados en volúmenes, superficies, en las superficies del modelo o en isosuperficies. A continuaciones se exponen los diferentes resultados que se pueden obtener en la simulación.

Slices: Las Slices son superficies donde se mide una determinada propiedad física en la visualización del resultado de la simulación. En una Slice se puede representar cualquier tipo de parámetro mensurable en FDS. Quedan definidas por el plano donde se ubican así como el parámetro que van a medir.

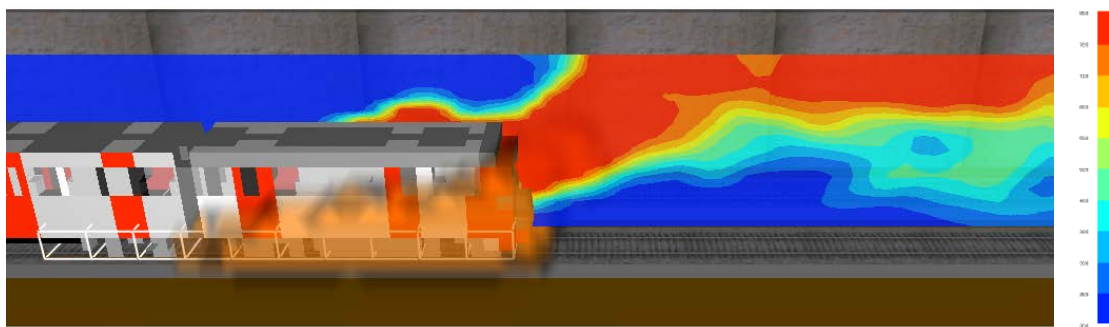


Figura 95. Visualización de una Slice de medición de temperatura.

Como puede observarse en la figura anterior en la que se representa una Slice de medición de temperatura en el plano central de un túnel de metro, los colores más cálidos indican una mayor temperatura y los más fríos representan la temperatura ambiente.

Mediante este tipo de planos de medición colocados de manera adecuada es posible determinar si el resultado de la simulación es válido o no. Un ejemplo sería la medición de un parámetro determinado a dos metros por encima de una vía de evacuación. Si se alcanza un valor peligroso durante la evacuación de emergencia, el diseño de prueba no es válido.

Los Slices también pueden mostrar la información mediante vectores en un plano tal como se presenta en la siguiente figura en la que se mide la velocidad.

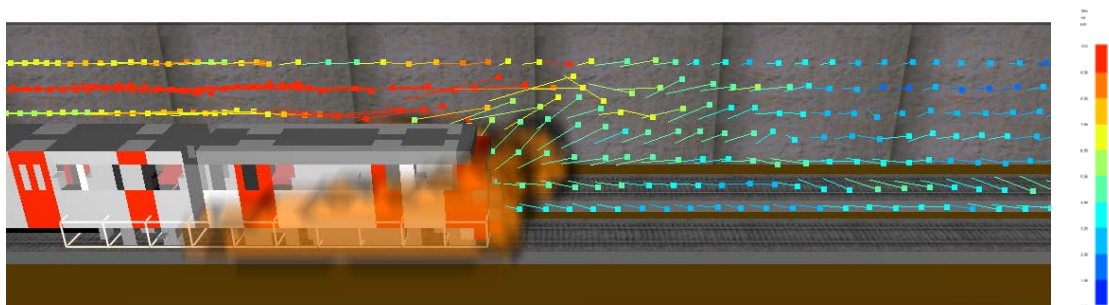


Figura 96. Visualización de una Slice de medición de velocidad mediante vectores.

Boundaries: Mediante los Boundaries es posible visualizar en todas las superficies de los objetos geométricos del modelo un parámetro mensurable. Para su definición solo hay que definir que parámetro se desea registrar durante la simulación. Cabe resaltar que a mayor cantidad de resultados a medir, mayor será el tamaño en datos generados por la simulación siendo a veces no posible cargar los resultados por falta de memoria RAM en los equipos actuales.

En la siguiente figura se representa la temperatura en la superficie de los elementos geométricos de un incendio en una nave industrial.

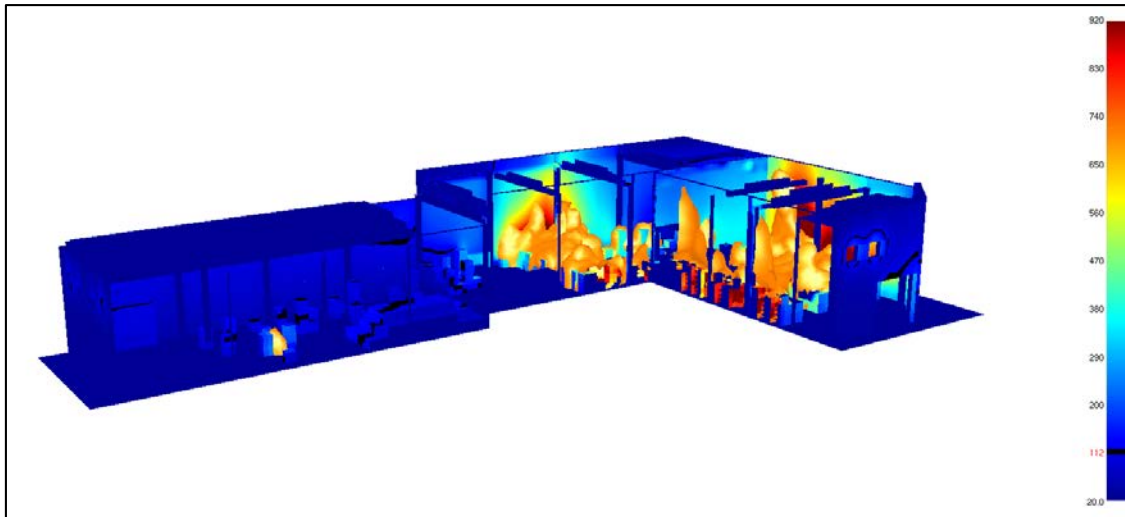


Figura 97. Utilización de Bondaries para determinar la temperatura en las paredes de una nave.

Isosuperficies: Mediante este tipo de elemento se puede generar un volumen de control tridimensional en la visualización del resultado que permite observar en función del tiempo la variación de un parámetro en el espacio. Para su definición en el modelo hay que determinar que parámetro se quiere observar y los valores que define el contorno de la isosuperficie.

Este tipo de Resultado presenta el mismo problema que las Bondaries en cuanto al tamaño de la cantidad de datos generados y la capacidad de los ordenadores actuales para cargar dichos datos.

En la siguiente figura se presenta una imagen donde además de verse una Slice de temperatura se presenta una Isosuperficie con la tasa de liberación de calor por unidad de volumen de 60 kW/m^3 para representar el contorno de las llamas del incendio en un vagón de tren.

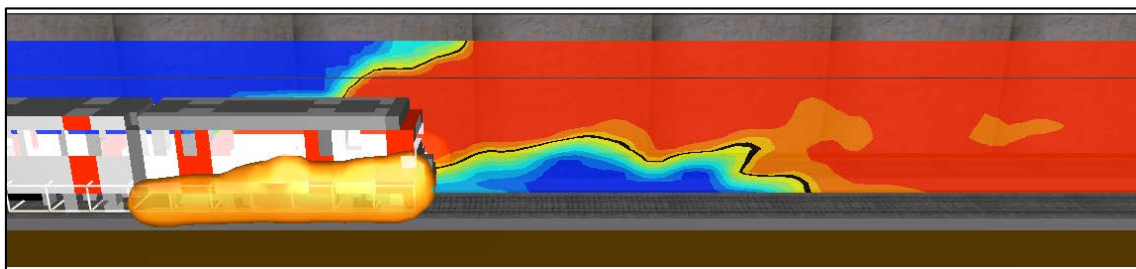


Figura 98. Representación de las llamas de incendio mediante una Isosurface.

Plot3D: Mediante la herramienta Plot3D es posible la representación en todo el dominio de computación de una serie de parámetros elegidos por el usuario. Puesto que la cantidad de datos generada es muy grande, esta operación no es continua en el tiempo siendo el usuario el que fije el intervalo de las tomas de datos del modelo para su posterior representación gráfica.

La representación gráfica de los resultados se realiza mediante dos planos tipo Slice, en los ejes X ó Y además del eje Z. A diferencia de las Slices estos ejes son móviles a voluntad del usuario, pero solo están disponibles en los instantes marcados por el usuario.

En la siguiente figura se muestra el Plot3D realizado para el estudio de la temperatura en un túnel en un instante dado:

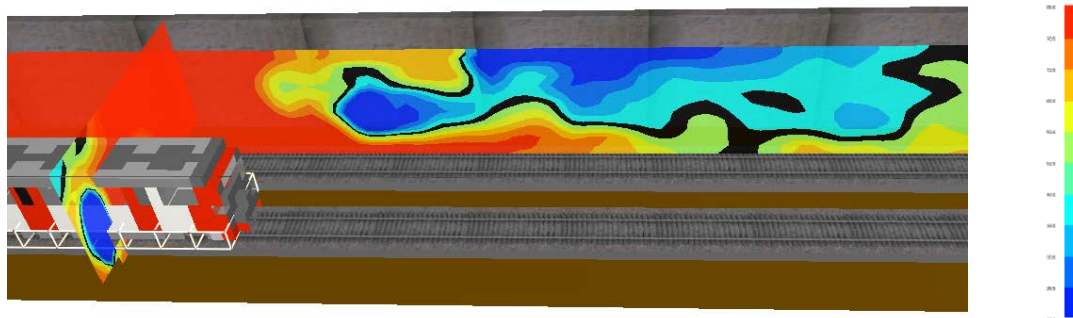


Figura 99. Representación del Resultado Plot3D para la medición del parámetro temperatura en un instante dado.

Estadísticas: Mediante esta herramienta es posible la obtención de valores máximos, mínimos y medios de diferentes parámetros de estudio de la simulación en un volumen de control definido por el usuario. Este resultado no se muestra gráficamente sino que se vuelca en una hoja de cálculo con los resultados en función del tiempo. Los parámetros que definen este tipo de medición son el parámetro a estudiar, los valores que se desea obtener y el volumen de control donde se desea realizar la medición.

Quantity: Velocity

Statistics

- Minimum
- Maximum
- Mean
- Volume Mean
- Mass Mean
- Time Integral

Record in a volume:

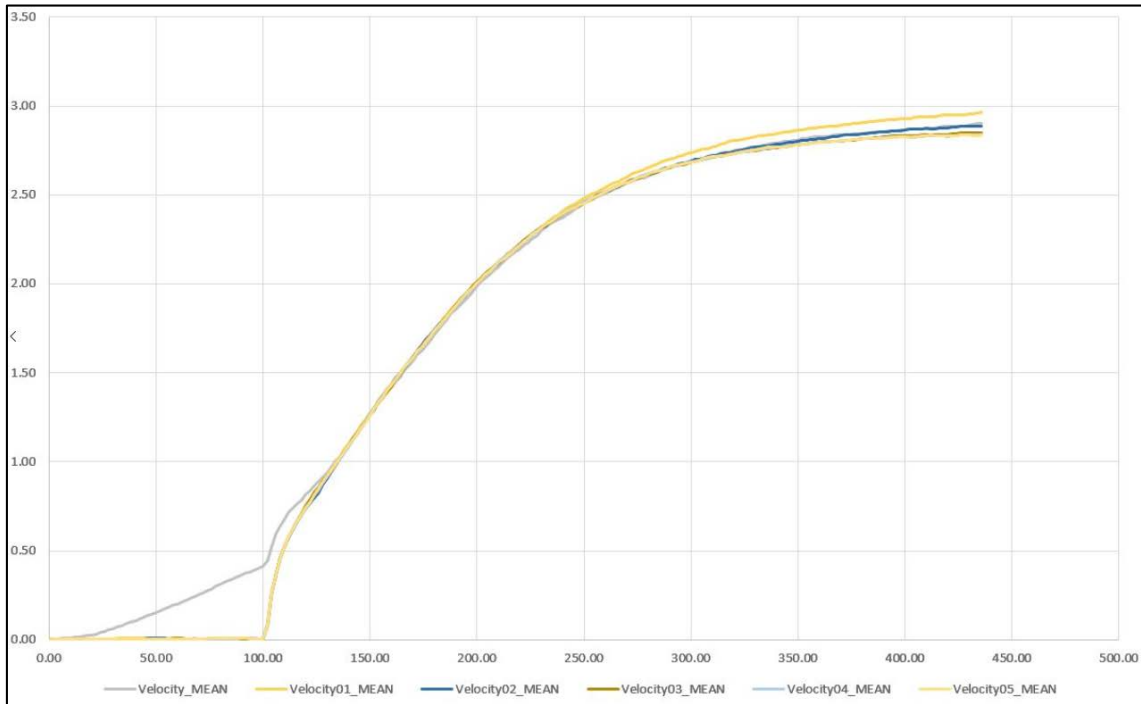
Min X: 0,0 m Min Y: 0,0 m Min Z: 0,0 m

Max X: 1,0 m Max Y: 1,0 m Max Z: 1,0 m

Record in an entire mesh: Túnel-a

Figura 100. Menú de generación de resultados tipo Estadístico.

A partir de los resultados obtenidos es posible la realización de gráfica y la interpretación de fenómenos que visualmente no es posible realizar. En la siguiente gráfica se muestra la velocidad media del aire en las 6 mallas que componen el túnel de metro objeto del presente trabajo de final de master en función del tiempo.



Gráfica 11. Velocidad media de las mallas de un modelo de incendio en un túnel.

4.4.8. HVAC

En FDS desde la versión 6 es posible la implementación de redes de conductos capaces de transportar especies simulando un sistema de ventilación por conductos. En la actualidad el modelo HVAC presenta una problemática considerable que limita su utilización para la realización de modelos multi-escala y es que el transporte de especies a través de los dos extremos de un conducto es instantánea independientemente de la longitud del conducto y la velocidad del fluido en el interior de este.

El funcionamiento del modelo HVAC de FDS funciona de la siguiente manera:

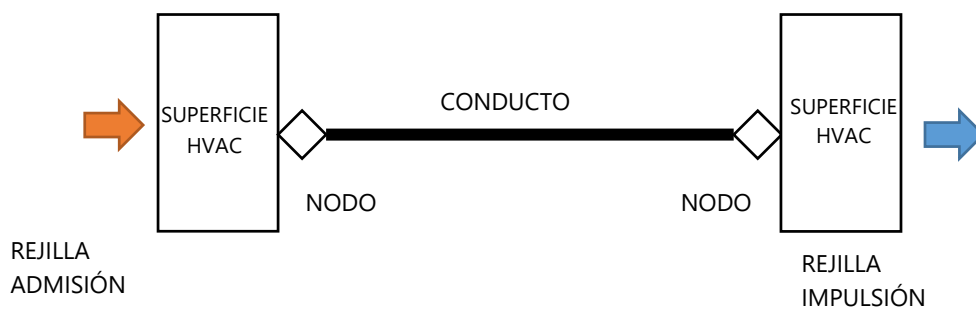


Figura 101. Esquema de funcionamiento del sistema HVAC en FDS

El sistema de HVAC de FDS funciona a través de Conductos los cuales se encuentran conectados a dos Nodos en su origen y su final. A un Nodo puede conectarse más de un Conducto. Para concretar la red HVAC generada con la malla de simulación es necesario conectar un Nodo terminal de la red a una Superficie tipo HVAC. Esta superficie HVAC actuará como interfase entre el modelo de computación y la red HVAC.

El modelo matemático que emplea FDS para resolver los cálculos en las redes unidimensionales HVAC se basan en el solver termo hidráulico MELCOR, desarrollado para simular accidentes en los edificios de contención de plantas nucleares. El modelo de acoplamiento entre el modelo unidimensional que resuelve HVAC y el modelo de campo que resuelve FDS se basa en los resultados obtenidos por GOTHIC, otros software de análisis de contaminación en recintos enfocado en el acoplamiento en CFD y modelos unidimensionales.

El funcionamiento del Solver HVAC se basa en la conservación de masa, energía y cantidad de movimiento en los nodos de la red. Puesto que los nodos no tienen volumen, la conservación de la masa y energía produce que lo que entra por un nodo salga por el siguiente.

Las pérdidas en el interior de los conductos se calculan a partir de la ecuación de Colebrook a través de la aproximación de Zigrang y Silvester donde ε es la rugosidad absoluta del conducto:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{4.518}{Re_D} \log_{10} \left(\frac{6.9}{Re_D} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right) \right) \quad Ec (4.6)$$

En el capítulo 10 de la Technical Reference Guide de FDS [33] se presenta el modelo matemático de todos los elementos HVAC que emplea FDS.

A continuación se procede a describir los elementos que generan una red HVAC en FDS los cuales son Dispositivos de Flujo, Conductos, Nodos y Superficies HVAC.

4.4.8.1. Dispositivos de flujo

Los dispositivos de flujo van alojados en el seno de los Conductos y son los elementos encargados de generar, modificar o ralentizar el flujo de las redes HVAC. Pueden ser de tres tipos, Aircoil, Ventilador o Filtro.

Aircoil: Este tipo de elemento está diseñado para representar la influencia de una batería de refrigerante en la red de HVAC. Mediante este elemento se puede representar la influencia de una unidad de tratamiento de aire u otros equipos que tratan térmicamente el aire a través de baterías.

En la siguiente imagen se presenta el menú de generación de un Aircoil en una red HVAC.

Properties

Activation: <Always On> v

Heat Transfer Model

Direct

Heat Exchange Rate: 0,0 kJ/s

Ramp-Up Time: Default v 1,0 s

Coolant Properties

Coolant Specific Heat: 0,0 kJ/(kg·K)

Coolant Mass Flow Rate: 0,0 kg/s

Coolant Temperature: 0,0 °C

Heat Exchanger Efficiency: 0,0

Figura 102. Menú de generación de un dispositivo de flujo tipo Aircoil.

Filtro: Mediante este elemento es posible modelar los filtros presentes en los equipos de las redes de climatización o por ejemplo los filtros terminales empleados en quirófanos. Es posible generar un modelo de pérdidas en función del caudal del conducto, o bien introducirse las pérdidas de manera directa por el usuario. En la siguiente figura se muestra el menú de generación de un filtro en de una red HVAC en FDS.

Filter Id: Filter01

Description:

Properties

Flow Loss Model:

Linear

Clean Loss: |

Loss: |

Custom

Loss: Edit Values...

Species Filtration:

Species	Efficiency	Initial Loading	Loading Multiplier
*			

Figura 103. Menú de generación de un dispositivo de flujo tipo Filtro.

Ventilador: Este dispositivo de flujo tiene como objetivo generar un caudal al través del conducto en el cual es definido. Existen tres modos de definir un ventilador. Mediante un caudal constante, mediante una curva cuadrática o a través de una curva introducida por el usuario.

El modelo cuadrático que emplea HVAC para el funcionamiento de los ventiladores viene determinado por la siguiente ecuación donde la presión es proporcional al cuadrado del caudal:

$$\dot{V}_{fan} = \dot{V}_{max} \text{sign}(\Delta p_{max} - \Delta p) \sqrt{\frac{|\Delta p - \Delta p_{max}|}{\Delta p_{max}}} \quad Ec (4.7)$$

Donde:

\dot{V}_{fan} : Es el caudal producido por el ventilador.

\dot{V}_{max} : Es el caudal máximo del ventilador.

Δp : Es la diferencia de presión entre la admisión y el escape del ventilador.

Δp_{max} : Es la presión máxima a la cual trabaja el ventilador.

En la siguiente gráfica se comparan los tres tipos de ventiladores que pueden modelarse en una red HVAC en FDS.

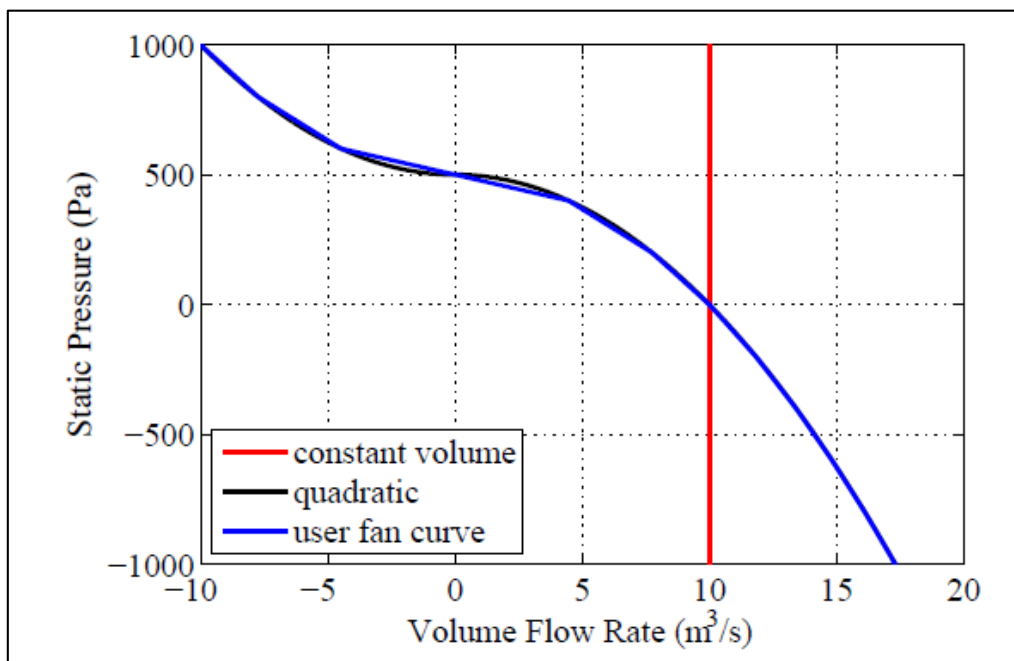


Figura 104. curvas de funcionamiento de los diferentes ventiladores de HVAC en FDS.

A continuación se presenta el menú de generación de Ventiladores de HVAC en FDS.

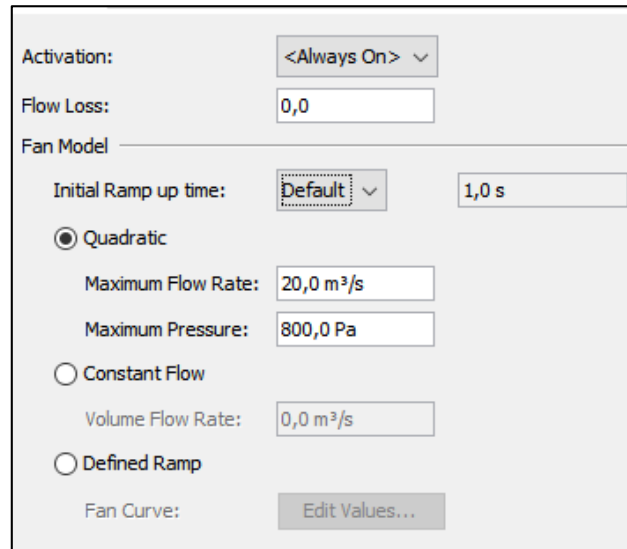


Figura 105. Menú de generación de un Dispositivo de Flujo tipo Ventilador.

Para emplear el modelo de curva cuadrática en un ventilador es necesario introducir los valores de caudal máximo y presión máxima del ventilador.

4.4.8.2. Conductos

A través de los Conductos se modela las redes HVAC de FDS. Puesto que HVAC es un modelo unidimensional acoplado a FDS, es posible simplificar el trazado de un red de conductos a través eliminando elementos de la red como condos, o reducciones de la red, por su longitud equivalente. En la siguiente figura del FDS User Guide se ilustra lo descrito.

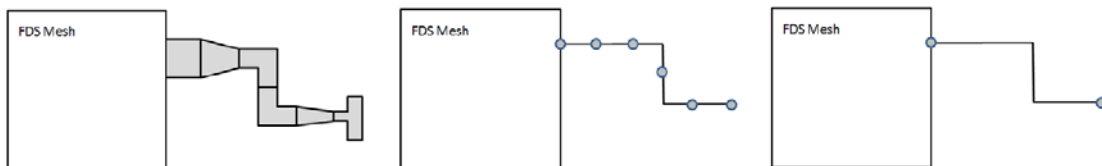


Figura 106. Simplificación de una red HVAC mediante la sustitución de elementos por su longitud equivalente.

Un conducto puede llevar implícito un único Dispositivo de flujo por tanto en el caso de querer simular una UTA es posible hacerlo a través de varios conductos en serie unidos por sus correspondientes nodos.

En la siguiente figura se muestra el menú de generación de un Conducto en FDS.

The image shows the 'Generate Duct' menu in FDS. It is split into two columns of controls. The left column includes: ID (text input: P3C05), Description (text input), Group (dropdown: jetfan 6), FYI (text input), Node 1 (dropdown: P3C_IN05), Node 2 (dropdown: P3C_OUT05), Length (radio buttons for Automatic (0,5 m) and Fixed (0,65 m)), Shape (radio buttons for Circular (Diameter: 0,9 m) and Non-circular (Area: 0,0 m², Perimeter: 0,0 m)), and Bounding Box (six text inputs for Min/Max X, Y, Z). The right column includes: Forward Loss (0,0), Reverse Loss (0,0), Roughness (0,0 m), Flow Device (Fan), Fan (JZR 9-22/4), Flow Direction (Node 1 to Node 2), and Activation (Ventilacion, with a link 'Activate at t = 100,0 s.').

Figura 107. Menú de generación de un Conducto.

Como puede observarse en la figura anterior en primer lugar debe definirse los Nodos a los cuales está conectado el Conducto. La posición de los Nodos no genera la longitud del Conducto, sino que esta debe ser introducida por el usuario, teniendo en cuenta las longitudes equivalentes aquellos elementos que haya simplificado entre los Nodos del Conducto.

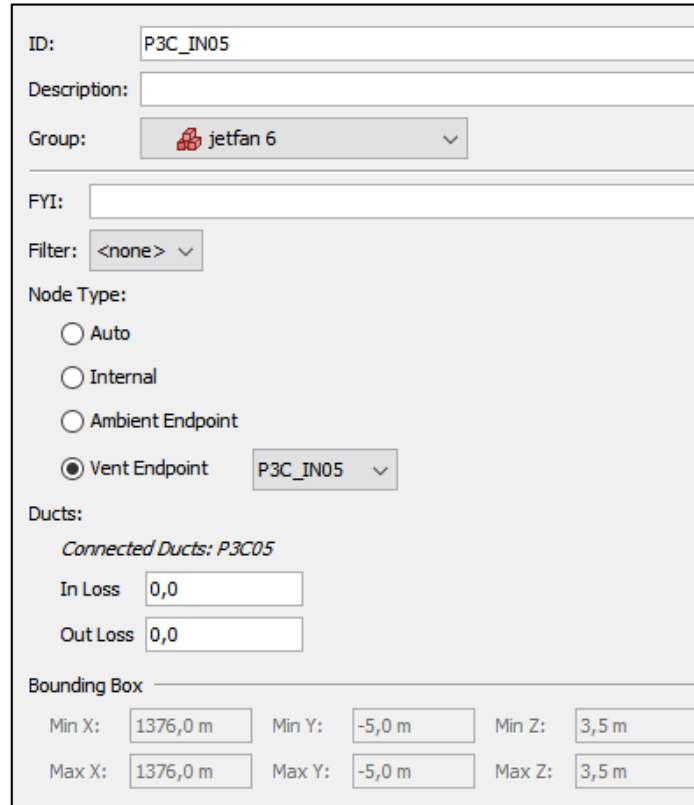
Por otra parte debe introducirse el tipo de sección del conducto y su diámetro o diámetro hidráulico en función de la geometría de la sección.

Se debe definir la rugosidad del conducto para el cálculo de las pérdidas de presión en su seno así como la presencia de un Dispositivo de Flujo en el propio conducto.

Finalmente se pueden introducir parámetros de Control para la activación de los Dispositivos de Flujo tal como se ha visto en el subpunto Controles.

4.4.8.3. **Nodos**

Los nodos son los elementos a los que se conectan los conductos o bien los puntos en los cuales la red HVAC se acopla al modelo de FDS. En la siguiente imagen se muestra el modelo de generación de los Nodos:



The image shows a software interface for defining a node. The fields are as follows:

- ID: P3C_IN05
- Description: (empty)
- Group: jetfan 6
- FYI: (empty)
- Filter: <none>
- Node Type: Vent Endpoint (dropdown: P3C_IN05)
- Ducts: Connected Ducts: P3C05
- In Loss: 0,0
- Out Loss: 0,0
- Bounding Box:
 - Min X: 1376,0 m
 - Min Y: -5,0 m
 - Min Z: 3,5 m
 - Max X: 1376,0 m
 - Max Y: -5,0 m
 - Max Z: 3,5 m

Figura 108. Menú de generación de Nodos.

En la definición de un Nodo se debe indicar a que tipo de elemento esta conectado pudiendo estarlo al exterior (Ambient) o bien a una superficie tipo HVAC que simula una rejilla o difusor (Vent Endpoint). Es posible modelar un Dispositivo de Flujo tipo Filtro en un nodo, así como introducir pérdidas en función de la dirección del flujo en el nodo.

4.4.8.4. **Superficies HVAC**

Se trata de elementos tipo Vent con una Superficie HVAC acoplada. Un Vent es un elemento geométrico especial de FDS concebido para modificar las propiedades en una región de una superficie de un Obst. En particular en las primeras versiones de FDS se empleaba para colocar Superficies tipo Suministro o Escape en una Obst que modelaba una pared o techo para recrear una rejilla de ventilación.

Una superficie HVAC es una superficie por donde se acopla el modelo unidimensional de HVAC con el modelo de campo de FDS.

4.4.9. Modelo geométrico

El modelo geométrico define todos los elementos sólido que generan el escenario de incendio mediante un conjunto de ortoedros como si de un juego de construcciones se tratara.

El tamaño de estos ortoedros como ya se ha mencionado con anterioridad depende del tamaño de la malla. En el caso de realizar utilizar un ortoedro de tamaño menor a una celda, FDS automáticamente modifica dicho elemento para que o bien ocupe un celda entera un una cara de esta en función del tamaño.

Un ejemplo de este proceso sucede al introducir geometrías complejas en el modelo tal y como se muestra en la siguiente figura:

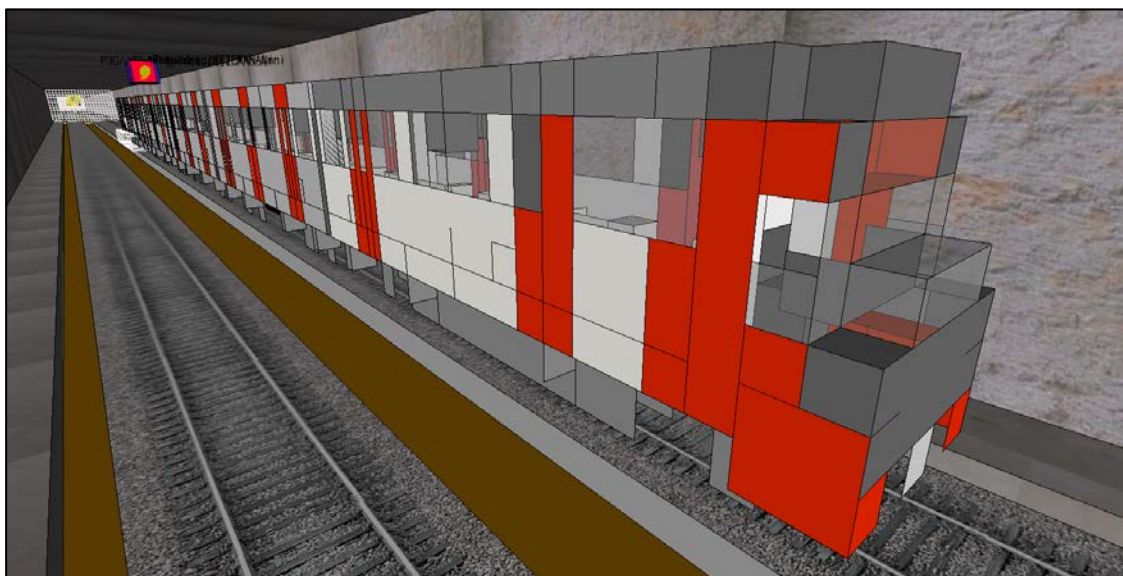


Figura 109. Resultado obtenido tras introducir geometrías complejas en FDS.

Así pues el modelo geométrico se construye mediante elementos ortoédrico llamados Obst, elementos superficiales que se ubican en las caras de los Obst llamadas Vents, y elementos tipo agujero que generan huecos por sustracción en los elementos tipo Obst.

4.4.9.1. Elemento tipo Obst

A partir de estos elementos se define toda la geometría del modelo. Se trata de ortoedros cuyo tamaño mínimo es el de una celda de la malla y el tamaño máximo es ilimitado.

Mediante la adición de multiples Obst se puede generar desde las geometrías más simples hasta las mas complejas.

En particular el túnel objeto del presente trabajo de fin de master está compuesto por 8 Obsts, uno para cada hastial, uno para la bóveda (plana), otro para la contrabóveda, uno para cada una de las dos aceras de evacuación y uno para cada vía.

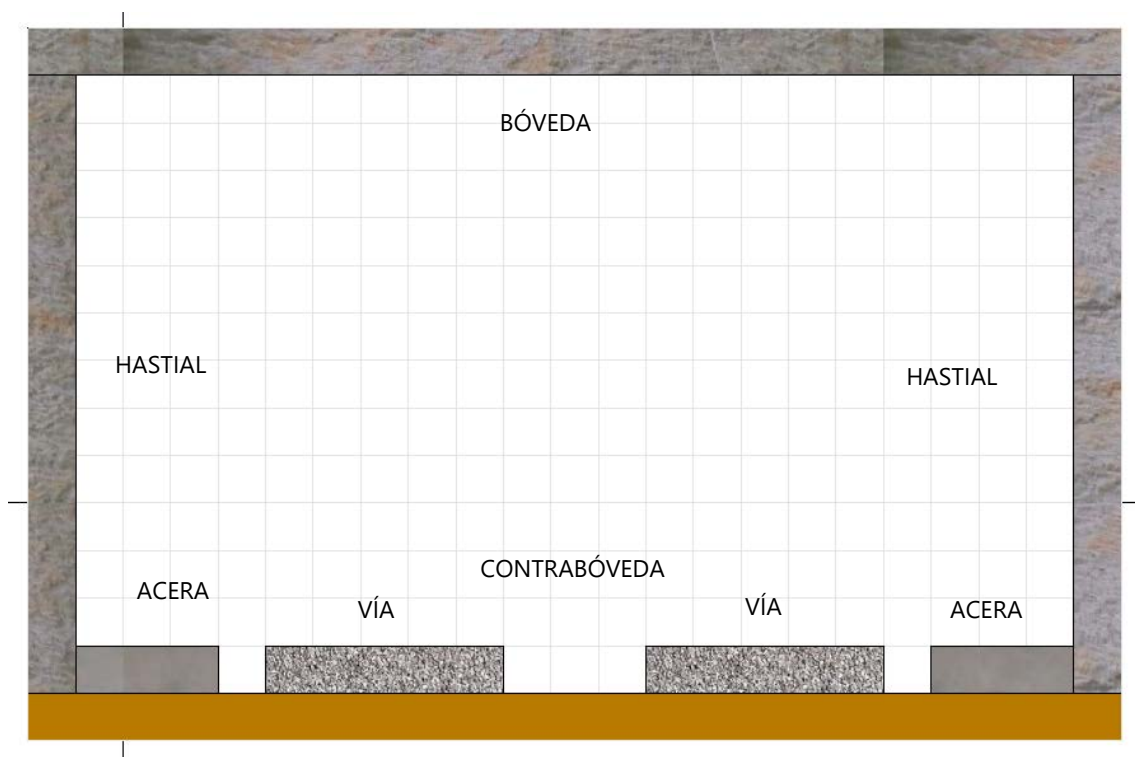


Figura 110. Obsts que componen el túnel de metro a simular.

Como puede apreciarse, todos los elementos presentan un espesor geométrico de 0,5 metros que posteriormente ha sido modificado a través de las Superficies que tiene asignado cada una de las caras del Obst.

El Obst queda definido por su geometría así como por las superficies asociadas a cada una de sus caras. En la siguiente imagen se muestran los menús de generación de Obsts:

Box Properties

Min X: 0,0 m Min Y: -2,0 m Min Z: 2,0 m

Max X: 2,75 m Max Y: -1,5 m Max Z: 2,5 m

Single INERT

Multiple

Face	Surface
Min X	INERT
Max X	INERT
Min Y	PLATAFORMA
Max Y	TECHO TREN
Min Z	INERT
Max Z	FGV

Figura 111. Menú de generación de un Obst

4.4.9.2. Elemento tipo Vent

Como ya se ha descrito anteriormente en la definición de un elemento Superficie HVAC, un Vent es una superficie plana colocada en la cara de un Obst con una Superficie asociada.

Gracias a las Vents se pueden modelar rejilas o difusores en medio de grandes Obsts sin necesidad de partir la geometría del Obst en varios elementos más pequeños para modificar la superficie del área deseada.

También se pueden emplear para el modelado de Burners en una zona determinada de un Obst.

En la definición de un Vent además de seleccionar que Superficie contine se debe introducir las propiedades geométricas tal como se ve en la siguiente figura:

Vent Geometry Properties

Normal Direction: +X

Plane: X = 0,0 m

Bounds

Min X: 0,0 m Min Y: -0,568281 m Min Z: 2,38173 m

Max X: 1,0 m Max Y: -0,5 m Max Z: 2,5 m

Center Point: Auto

X: 0,0 m Y: -0,534141 m Z: 2,44087 m

Circular Vent

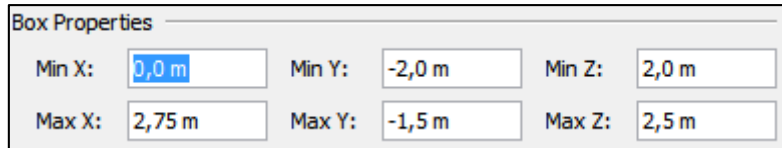
Radius: 0,0 m

Figura 112. Menú de generación de Vents

4.4.9.3. Elemento tipo Hole

Los elementos tipo Hole eliminan una Porción de un elemento tipo Obst por sustracción geométrica. Mediante este tipo de elementos se facilita la construcción del modelo. Además, combinado con los Controles de FDS los elementos tipo Hole permiten dar flexibilidad a la simulación pudiendo recrear roturas parciales de la geometría entre otras acciones.

Un elemento tipo Hole queda definido por su geometría tal y como se muestra en la siguiente imagen.



Box Properties					
Min X:	0,0 m	Min Y:	-2,0 m	Min Z:	2,0 m
Max X:	2,75 m	Max Y:	-1,5 m	Max Z:	2,5 m

Figura 113. Menú de generación de un elemento tipo Hole

5. Ventilación en túneles

5.1. Introducción

En este capítulo se estudiarán los diferentes sistemas de ventilación de túneles clasificándolos en función de su tipología o uso. Cabe resaltar que de los diferentes sistemas de ventilación de emergencia que se pueden instalar en un túnel, se va a estudiar un sistema de ventilación longitudinal mediante jet fans reversibles.

Puesto que el objetivo del trabajo de fin de master es el diseño de un sistema de ventilación de emergencia, se describirá la metodología del diseño, basada en el diseño prestacional. Una vez descrita la metodología se plantearán las metas y objetivos del diseño de un sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio en túneles de metro para realizar un diseño de prueba.

El diseño de prueba se comprobará a través de escenarios de incendio tipo. El diseño de prueba se realizará a través de un sistema de predimensionado de la instalación de ventilación de emergencia en caso de incendio, empleando ventiladores axiales reversibles como elemento ventilador.

La meta de esta instalación es que los eventuales ocupantes del túnel puedan evacuar hacia una zona segura en condiciones de seguridad. Esta meta se consigue a través de la no existencia del fenómeno del backlayering o retropropagación de los humos.

Este fenómeno se da cuando el sistema de ventilación no ofrece un empuje (thrust en inglés) suficiente produciendo que el humo avance en sentido contrario al flujo de ventilación de emergencia. En la siguiente figura se presenta un ejemplo de backlayering [52].

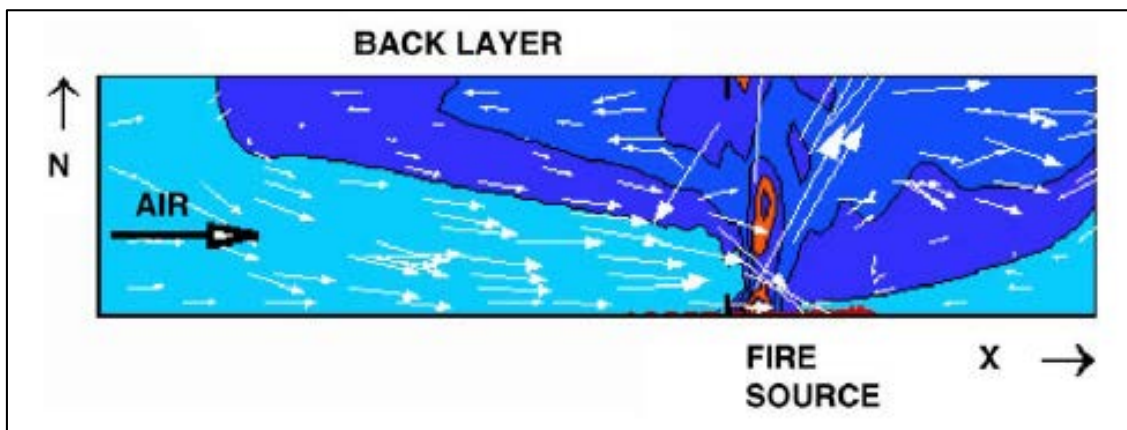


Figura 114. Esquema del fenómeno del backlayering.

Para validar el escenario de prueba se diseñaran múltiples escenarios de incendio en los cuales se modelará el sistema de ventilación de emergencia en FDS.

5.2. Sistemas de ventilación en túneles

Un sistema de ventilación de un túnel está compuesto por un conjunto de instalaciones que permiten la extracción del aire contaminado del túnel y su reemplazamiento por aire limpio desde el exterior del túnel.

El sistema de ventilación se diseñará en función del uso del túnel (tipo de tráfico, intensidad del tráfico) y la tipología del túnel (tipo de sección, tamaño, longitud del túnel).

A continuación se presenta un esquema de los tipos de sistema de ventilación en túneles:

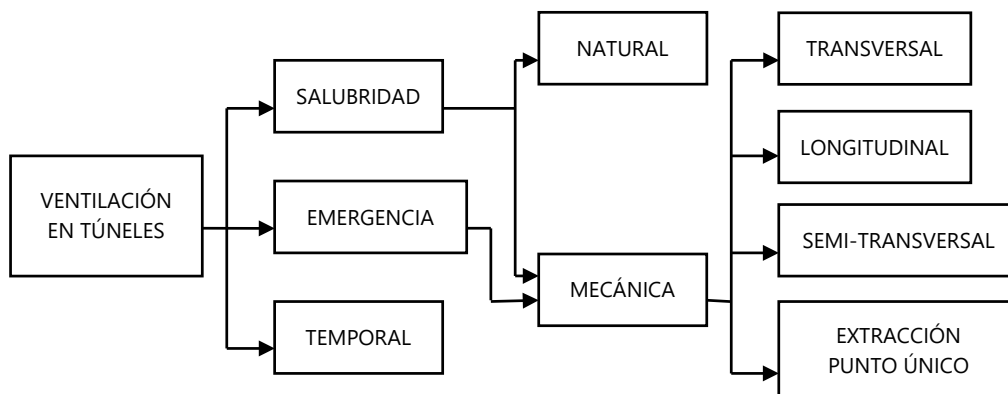


Figura 115. Sistemas de ventilación en túneles.

Tal como se presenta en el esquema anterior las tipologías de instalaciones de ventilación en un túnel en función de su uso pueden ser:

Sistema de ventilación de salubridad: Este tipo de instalación es la requerida durante la operación normal del túnel. El objetivo principal de esta instalación es garantizar unas condiciones de confort térmico y concentración de contaminantes aceptable en el interior del túnel.

La ventilación de salubridad en un túnel puede realizarse mediante un sistema de ventilación mecánica o si las condiciones del túnel lo permiten, por su uso, sección y longitud, con un sistema de ventilación natural.

Las instalaciones de ventilación de salubridad no solo se centran en la temperatura del túnel sino en la concentración de contaminantes nocivos en la atmósfera interior del túnel. A partir de una red de detectores tanto de temperatura, concentración de gases contaminantes (generalmente monóxido de carbono) y de anemómetros, mediante el sistema de gestión del túnel se activará el sistema de ventilación de salubridad. Muchas veces este sistema es ayudado por el efecto pistón que generan los vehículos al circular por el túnel, arrastrando el aire viciado hacia el exterior del túnel siendo en ocasiones no necesario la instalación de un sistema mecánico de ventilación en el túnel.

Sistema de ventilación de emergencia: Este sistema de ventilación se activa en situaciones de emergencia, generalmente incendios y tiene por objetivo permitir que los eventuales ocupantes del túnel logren realizar una evacuación a una zona segura en condiciones de seguridad. Para ello el objetivo principal es una instalación de ventilación de emergencia en caso de incendio es evitar el fenómeno del backlayering o retropropagación del humo de incendio.

Para ello es necesario la instalación de un sistema mecánico de ventilación que permita la extracción de los humos y gases caliente y su remplazamiento por aire con condiciones de salubridad del exterior.

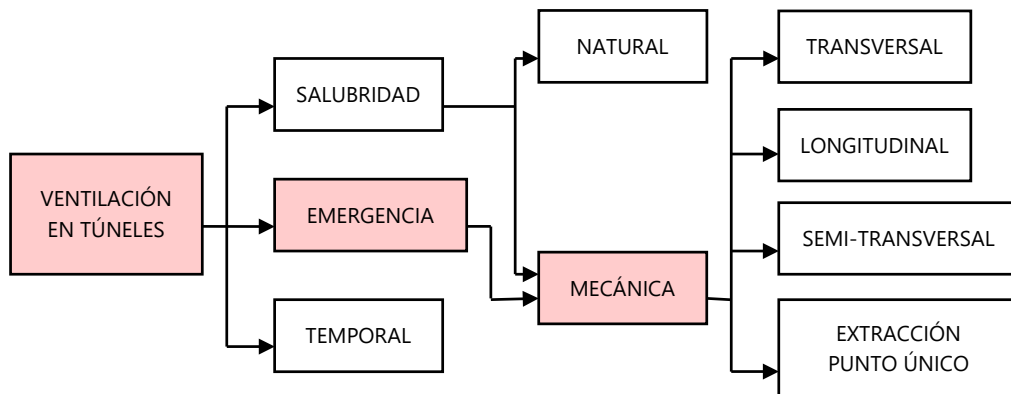
Puesto que en la mayoría de los túneles que es necesario un sistema de ventilación de salubridad también lo es un sistema de ventilación de emergencia, se unifica la instalación siendo el sistema de ventilación mecánico ambivalente.

Por tanto el diseño del sistema de los sistemas de ventilación de salubridad quedan mayorados por las condiciones más desfavorables presentes en situación accidental de incendio.

Los sistemas de ventilación de emergencia en caso de incendio en túneles se diseñan en función del uso del túnel, su sección y su longitud, empleándose para cada caso el sistema más apropiado.

Sistema de ventilación temporal: Este sistema de ventilación se emplea durante la fase de ejecución de un túnel o durante de las tareas de mantenimiento realizadas fuera del horario de uso del túnel.

5.3. Sistema de ventilación de emergencia



Puesto que el objeto del presente trabajo de final de master es el diseño de un sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio de un túnel de metro a continuación se van a presentar los diferentes tipos de sistema de ventilación que podrían emplearse y sus características de acuerdo a lo expuesto en la NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways [53] en su anexo I:

Sistema de ventilación longitudinal:

Un sistema de ventilación longitudinal introduce o extrae aire de un túnel a través de un número limitado de puntos, tales como portales o pozos (del inglés shaft que generalmente se emplea como patinillo), creando un flujo longitudinal a lo largo del túnel.

Los sistemas de ventilación longitudinal pueden sub-clasificarse tal y como se presenta en las siguientes figuras:

5.3.1. Sistema de ventilación longitudinal.

Este sistema de ventilación se caracteriza por que los humos y gases calientes se extraen por el portal de salida del túnel o bien por un pozo de extracción.

Los sistemas de ventilación longitudinal mediante un sistema de ventilación central emplean ventiladores para inyectar aire en el túnel bien a través de un pozo de ventilación, una boquilla de alta velocidad por ejemplo tipo Saccardo. La introducción del aire se puede realizar cerca del portal de entrada del túnel, o en un punto medio del túnel.

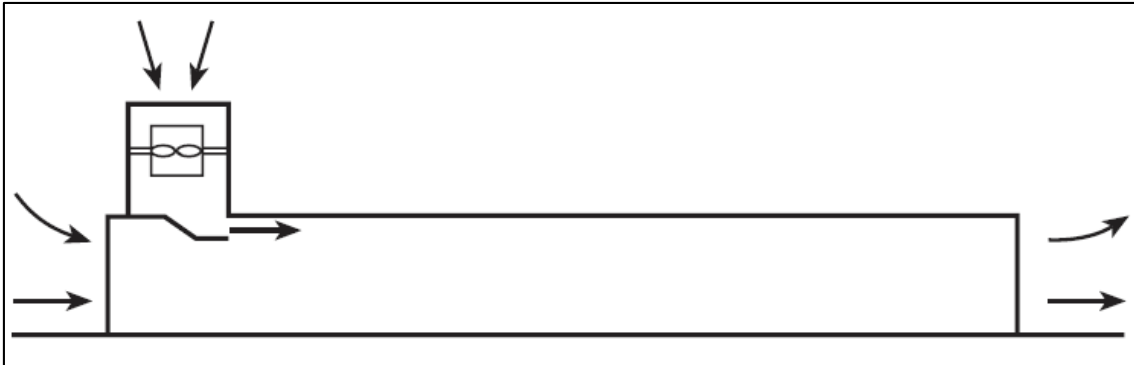


Figura 116. Sistema de ventilación longitudinal con ventiladores centrales y boquilla tipo Saccardo en el portal de entrada.

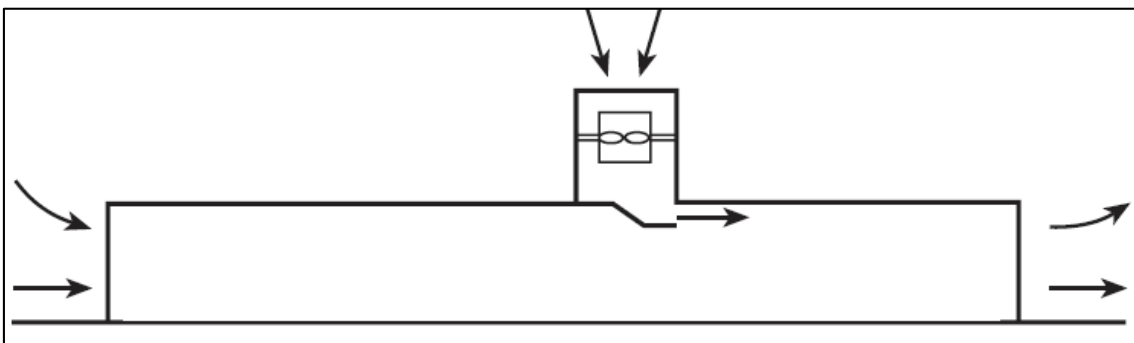


Figura 117. Sistema de ventilación longitudinal con ventiladores centrales y boquilla tipo Saccardo en medio del túnel.

Un sistema de ventilación longitudinal mediante Jet Fans emplea ventiladores axiales en serie (generalmente reversibles) montados en las cotas altas del túnel. Estos ventiladores gracias a su alta velocidad de descarga inducen un flujo longitudinal a lo largo del túnel. Este será el sistema que se va a estudiar en el presenta trabajo final de máster.

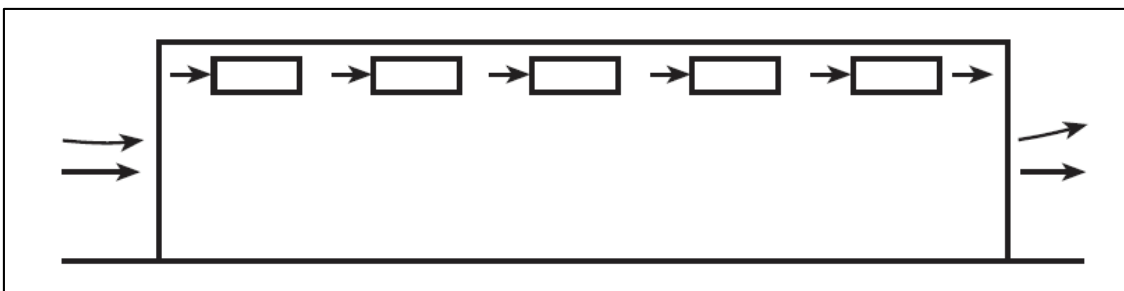


Figura 118. Sistema de ventilación longitudinal mediante Jet Fans.

Los sistemas de ventilación longitudinal mediante extractor central y pozo de extracción extraen todos los gases y humos calientes a través de un pozo de extracción central, entrando el caudal de reemplazamiento de aire fresco a través de los portales de entrada y salida del túnel.

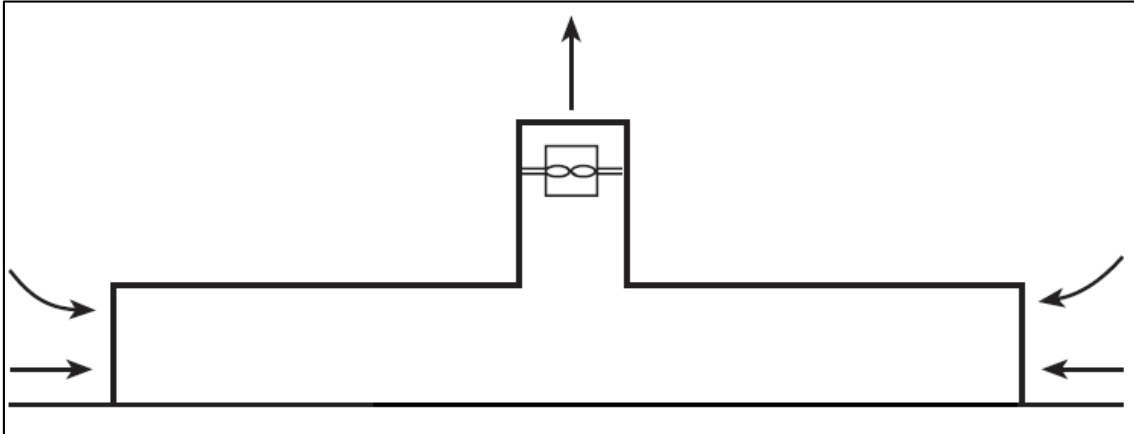


Figura 119. Sistema de ventilación longitudinal mediante extractor central y pozo de extracción

Existen también sistema híbridos con boquillas de inducción de aire a alta velocidad con el fin de generar una corriente longitudinal en el túnel reforzado por un sistema de extracción anterior mediante un pozo de ventilación.

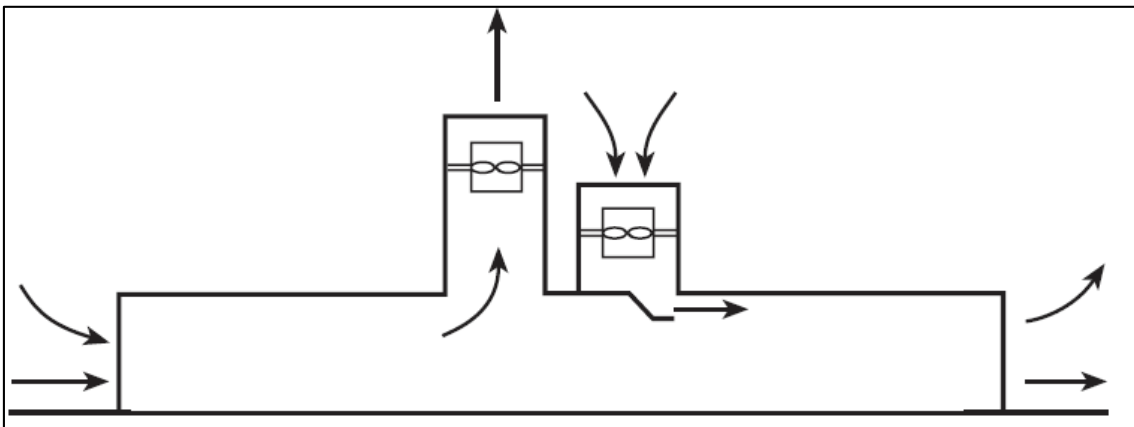


Figura 120. Sistema de ventilación longitudinal mediante boquilla tipo Saccardo y extractor central.

5.3.2. Sistemas de ventilación transversal

Estos sistemas de ventilación se caracterizan por contar con un colector de humos y gases calientes a lo largo del túnel en su cota superior. También pueden contar con un sistema de aporte de aire fresco similar en su cota inferior. Los sistemas de ventilación transversal se dividen en transversal y semi-transversal en función de si cuentan o no con el sistema de aporte de aire exterior.

En los sistemas transversales cuentan con aporte de aire exterior la mayoría de los humos y gases calientes son extraídos a través de los huecos practicados para tal fin, siendo la porción de humos y gases calientes que salen a través de los portales de entrada y salida muy pequeña.

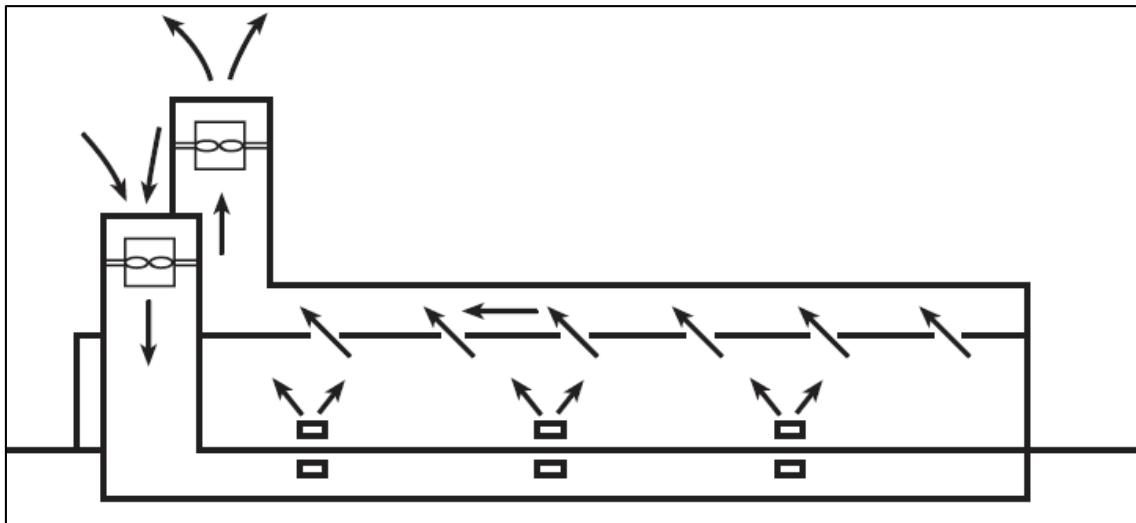


Figura 121. Sistema de ventilación transversal.

Por otra parte los sistemas transversales pueden estar equilibrados cuando el caudal de aporte de aire es el mismo que el de extracción o desequilibrados cuando la extracción es mayor que el aporte de aire fresco desde el exterior del túnel.

Los sistemas semi-transversales solo cuentan con uno de los dos sistemas, extracción o aporte de aire fresco. En este tipo de sistemas los humos y gases calientes son expulsados a través de los portales o mediante un pozo de extracción.

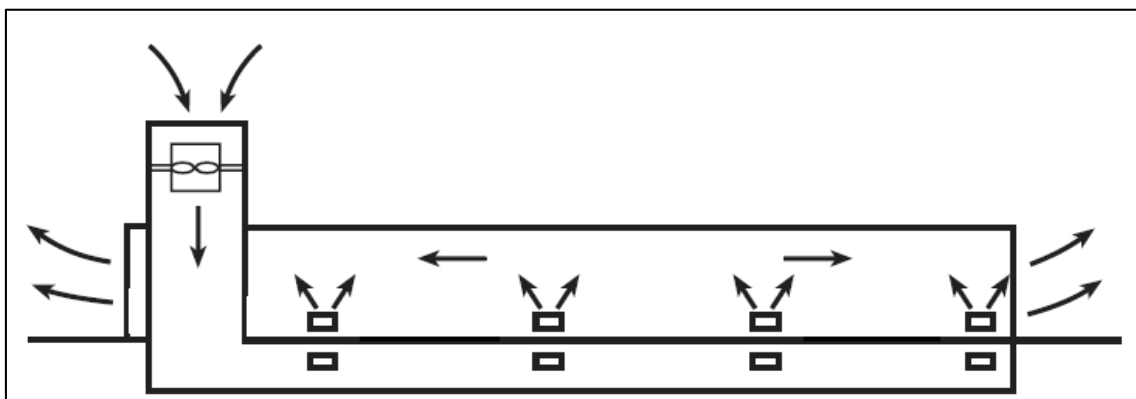


Figura 122. Sistema semi-transversal con aporte de aire exterior.

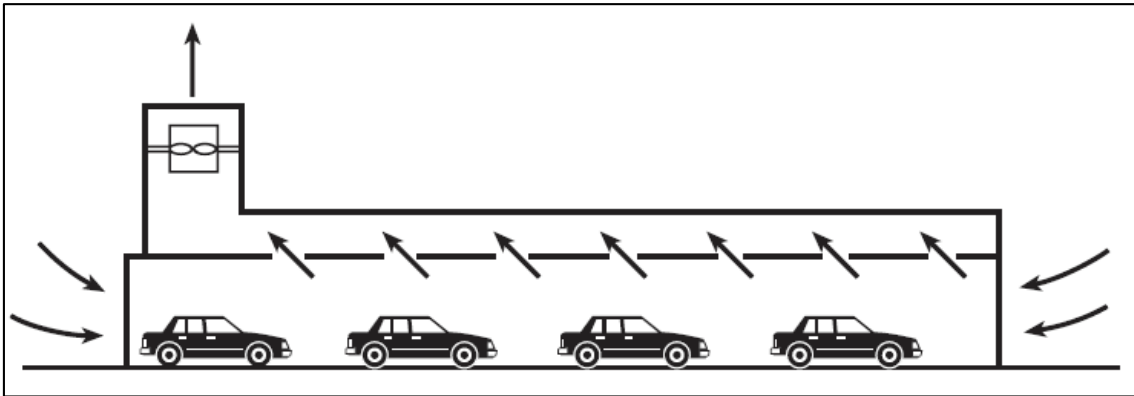


Figura 123. Sistema semi-transversal con extracción de humos y gases calientes.

5.3.3. Sistema de extracción de punto único

El sistema de extracción de punto único o SPE (single point extraction) son conceptualmente similares a los sistemas longitudinales y transversales. Los SPE cuentan al igual que los sistemas transversales con múltiples orificios para la extracción de humos y gases calientes en la zona superior del túnel, pero a su vez estos orificios cuentan con dispositivos de regulación de caudal llamados dámperes. En caso de detectarse un incendio se actuara sobre los dámperes (en función de su estado en condiciones normales) dejando abiertos únicamente los más próximos al fuego optimizando la extracción de humos y gases calientes.

Estos sistemas pueden apoyarse por diferentes sistemas de ventiladores como pozos de extracción o jet fans reversibles.

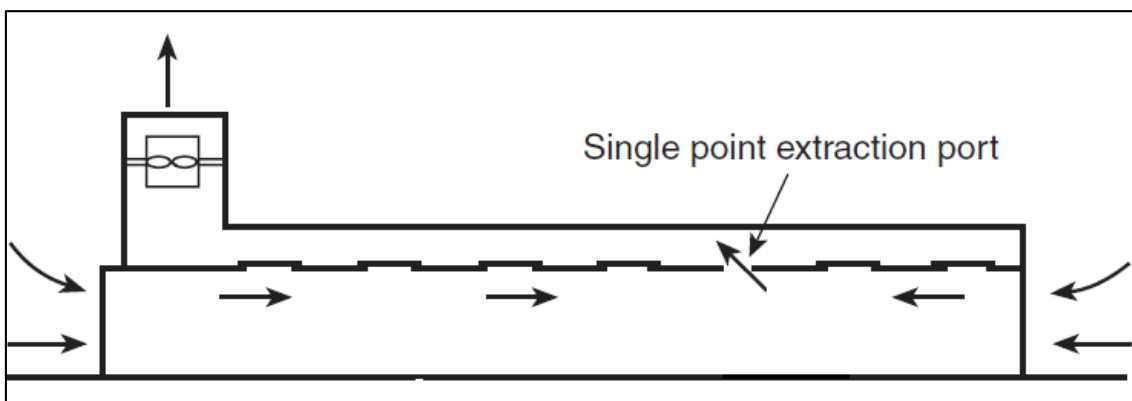
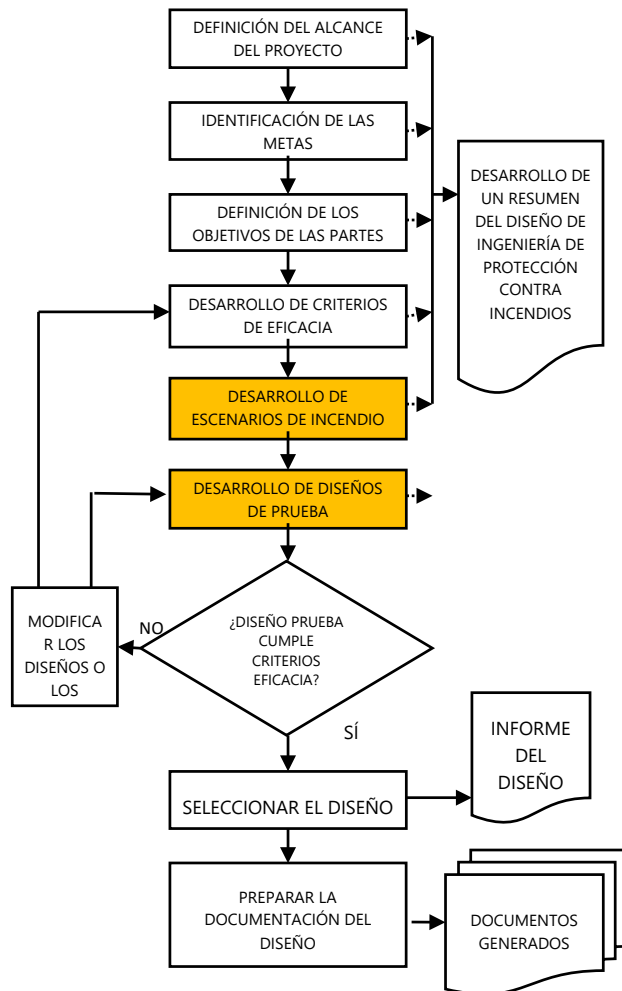


Figura 124. Sistema de ventilación de extracción de punto único.

5.4. Diseño prestacional de un sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio para túneles de metro.

5.4.1. Metas del diseño de ventilación de emergencia



A continuación se procede al diseño mediante el método prestacional de un sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio para túneles de metro siguiendo el esquema metodológico presentado en el capítulo 1 del presente trabajo final de master.

En particular se va a realizar el predimensionado del sistema de ventilación de emergencia a través del cumplimiento de la meta de predimensionado, la no existencia del fenómeno de backlayering.

El requisito exigible a los sistemas de ventilación de emergencia en túneles es evitar la retropropagación de los humos o **back-layering**. Este fenómeno se estudia a través de un parámetro conocido como **velocidad crítica**, la cual es el parámetro más investigado en la investigación de incendios en túneles [54].

Así pues una vez sea haya calculado la velocidad crítica de un túnel, se puede proceder al predimensionado de la instalación de ventilación de emergencia en caso de incendio a través del cálculo del empuje necesario para que el sistema de ventilación se capaz de evitar la retropropagación de los humos y gases calientes.

Una vez se haya realizado el predimensionado, se realizará una simulación mediante FDS para comprobar que el predimensionado es capaz de evitar el backlayering en la situación más desfavorable.

En caso de que el sistema de ventilación de emergencia cumpla con la meta de predimensionado impuesta se adoptará el sistema para realizar los correspondientes escenarios de incendio y la verificación de que se cumplen las metas del proyecto.

5.5. Velocidad crítica

Thomas [55] determinó qué velocidad del aire en un túnel era necesaria para impedir el movimiento en contra del sistema de ventilación de los humos generados por un incendio. En dicha publicación se proponía la relación entre el flujo de humo producido con la flotabilidad de éste en para una sección determinada de un túnel. Esa relación se realizaba a través del número de Froude Fr_m :

$$Fr_m = \frac{g H \Delta\theta}{U^2 T} \quad Ec (5.1)$$

Donde :

g : Aceleración debida a la gravedad.

H : La altura del túnel

$\Delta\theta$: Incremento de temperatura sobre la temperatura ambiente

U : Velocidad del aire en el túnel debido al sistema de ventilación

T : Temperatura de la capa caliente de humos

Thomas asumió que no se producía el backlayering cuando el numero de Froude era del orden de la unidad ya que se igualaban las fuerzas de inercia y de flotabilidad.

Por otra parte, gracias a los experimentos realizados por Lee [56], eran necesarios numero de Froude inferiores a 4,5 para prevenir la aparición del backlayering.

Finalmente Kennedy [57] propuso la fórmula de la velocidad crítica al relacionar el incremento de temperatura de los gases calientes con el calor convectivo del fuego (aproximadamente el 80% del HRR de un incendio):

$$V_c = \left(\frac{g H \dot{Q}_c}{\rho C_p A T_f Fr_m} \right)^{1/3} \quad Ec (5.2)$$

$$Fr_m = 4.5 (1 + 0.0374 |\min(\text{grade}, 0)|^{0.8})^{-3} \quad Ec (5.3)$$

$$T_f = \frac{\dot{Q}_c}{\rho C_p A V_c} + T \quad Ec (5.4)$$

Donde

Fr_m :es el número crítico de Froude

T_f : es la temperatura de los gases calientes

grade : Es la pendiente del túnel en tanto por cien

A : Sección del túnel en m^2

ρ : Densidad del aire en kg/m^3

Para obtener el cálculo de la ventilación crítica Tarada **[41]** genera la siguiente expresión a partir de las ecuación es Ec (5.2) y Ec (5.4):

$$(Fr_m \cdot A \cdot C_p \cdot T \cdot \rho) \cdot V_c^3 + (Fr_m \cdot \dot{Q}_c) \cdot V_c^2 - g \cdot H \cdot \dot{Q}_c = 0 \quad Ec (5.5)$$

La expresión anterior representa una ecuación cúbica de la velocidad crítica V_c , con tres soluciones o raíces distintas. En general para una ecuación cuadrática se tiene:

$$A \cdot x^3 + B \cdot x^2 + C \cdot x + D = 0 \quad Ec (5.6)$$

La naturaleza de las raíces se obtiene a través del discriminante Δ :

$$\Delta = 18ABCD - 4B^3D + B^2C^2 - 4AC^3 - 27A^2D^2 \quad Ec (5.7)$$

Los siguientes casos deben ser considerados:

$\Delta > 0$. La ecuación presenta tres raíces distintas reales.

$\Delta = 0$. La ecuación presenta una raíz múltiple, y todas las raíces son reales.

$\Delta < 0$. La ecuación presenta una raíz real y dos raíces complejas conjugadas.

Ahora bien, de la ecuación Ec (5.5) se observa el coeficiente linear C vale 0, por ende el discriminante $\Delta < 0$, siempre que :

$$\dot{Q}_c < \frac{\rho C_p A T}{2} \sqrt{\frac{27 g H}{Fr_m}} \quad Ec (5.8)$$

Por tanto si se cumple la condición de la Ec (5.8) la velocidad crítica se puede obtener como:

$$V_c = \hat{S} + \hat{T} - \frac{a}{3} \quad Ec (5.9)$$

Donde:

$$a = \frac{\dot{Q}_c}{\rho C_p A T} \quad Ec (5.10)$$

$$c = -\frac{g H \dot{Q}_c}{Fr_m \rho C_p A T} \quad Ec (5.11)$$

$$\hat{Q} = -\frac{a^2}{9} \quad Ec (5.12)$$

$$\hat{R} = \frac{-27c - 2a^3}{54} \quad Ec (5.13)$$

$$\hat{S} = \left(\hat{R} + \sqrt{\hat{Q}^3 + \hat{R}^2} \right)^{1/3} \quad Ec (5.14)$$

$$\hat{T} = \left(\hat{R} - \sqrt{\hat{Q}^3 + \hat{R}^2} \right)^{1/3} \quad Ec (5.15)$$

5.5.1. Cálculo de la velocidad crítica para el túnel de diseño

Con el fin de obtener la velocidad crítica para el túnel de diseño se ha generado una hoja de cálculo en la cual introduciendo los parámetros del túnel se obtiene la velocidad crítica. A continuación se introduce presenta los datos introducidos resaltados en amarillo así como los resultados obtenidos:

Convective fire heat release rate (\dot{Q}_c)	12,000,000	W
Tunnel Area (A_T)	68.25	m ²
Ambient Temperature (T_a)	10.8	°C
Ambient Pressure (P_a)	101325	Pa
Gas Constant (R_a)	287	J / (kg K)
Specific heat at constant pressure (C_p)	1004.948026	J / (kg K)
Grade (in percent)	0	%
Acceleration due to gravity (g)	9.81	m/s ²
Tunnel height (H_T)	6.5	m
Tunnel width W_T	10.5	m
Tunnel Lenght	1500	m
Check: Qcrit	236,819,677	W
Hot gas temperature (T_f)	363.76	K
Ambient Temperature (T_a)	283.95	K
Density (ρ)	1.243	kg / m ³
Froude Number (Fr_m)	4.500	
a	0.496	
c	-7.022	
\hat{R}	3.507	
\hat{Q}	-0.027	
\hat{S}	1.914	
\hat{T}	0.014	
Critical Velocity (V_c)	1.763	m/s

Tabla 27. Resultados del cálculo de la velocidad crítica.

La tasa de liberación de calor convectiva \dot{Q}_c , es una fracción de la tasa de liberación de calor pico, que de acuerdo a Ingason [37] fluctúa entre el 60 y el 80% del HRR máximo. Puesto que el incendio se origina en un vagón de metro de acuerdo con la IST2006 [4] el HRR PEAK es de 15 MW. Se ha tomado como \dot{Q}_c el 80% del HRR PEAK ya que esta del lado de la seguridad, predimensionado para un incendio más severo.

Por otra parte de acuerdo a la experiencia del autor, las peores condiciones en las cuales puede producirse un incendio son en invierno ya que debido a las bajas temperaturas, se produce una pérdida de flotabilidad de los humos. Esto conlleva a que los humos tienden a caer, llegando a cotas bajas y afectando a las condiciones de salubridad en las vías de evacuación. Por tanto se considera una temperatura en el interior del túnel de 10,8 °C.

El túnel presenta una sección rectangular de 10,5 metros de ancho por 6,5 metros de alto y una longitud de 1500 metros y una pendiente del 0%.

Introduciendo estos datos se obtiene una velocidad crítica de 1,763 m/s.

5.6. Predimensionado del sistema de ventilación de emergencia

Una vez que se conoce la expresión de la velocidad crítica de un túnel se va a emplear un sistema de predimensionado de un sistema de ventilación longitudinal mediante jet fans reversibles.



Figura 125. Jet Fan

Un jet fan es un ventilador axial cuya característica principal es el empuje o Thrust que ofrece. Dicho empuje queda definido mediante la siguiente expresión [58]:

$$T_m = \frac{\rho q_{vF}^2}{A_f} \quad \text{Ec (5.16)}$$

Donde

T_m : Es el empuje del jet fan

ρ : Es la densidad del aire aguas arriba del jet fan

A_f : Es el área de la sección del jet fan

q_{vF} : Es el caudal de impulsión del jet fan

El método de dimensionado de un sistema de ventilación de emergencia de un túnel mediante jet fans consiste en determinar a partir de la velocidad crítica de un túnel, que cantidad de ventiladores axiales son necesarios instalar para que el empuje generado por estos sea capaz de evitar el fenómeno de retropropagación o backlayering así como todas las pérdidas que se generan a lo largo del túnel.

Se va a emplear el método de diseño planteado por Cory [58] para la ventilación de túneles mediante jet fans. Se tomará como velocidad de aire presente en el túnel la velocidad crítica calculada [59].

El empuje total T_t a instalar en el túnel será igual a las pérdidas totales en el túnel p_T por la sección de éste A_T .

$$T_t = p_T \cdot A_T \quad \text{Ec (5.17)}$$

A su vez las pérdidas totales p_T , es el sumatorio de todas las pérdidas de presión que se oponen al empuje del sistema de ventilación de emergencia.

$$p_T = p_{en-ex} + p_{drag} + p_L + p_{Fire} + p_{Chim} \quad \text{Ec (5.18)}$$

El término p_{en-ex} corresponde a las pérdidas que se producen en la entrada o salida del túnel. Estas pérdidas pueden variar en función del tipo de portal de túnel. De acuerdo con Cory [58] se puede tomar del lado de la seguridad 1,5 veces la presión dinámica en el túnel cuya expresión es:

$$p_{en-ex} = 1.5 \cdot p_{dT} \quad \text{Ec (5.19)}$$

$$p_{dT} = \frac{1}{2} \rho v_c^2 \quad \text{Ec (5.20)}$$

Donde ρ es la densidad del aire en el túnel y v_c es la velocidad crítica. Ahora bien aunque el túnel se encuentra en situación de incendio para el predimensionado se tomará la densidad del aire en condiciones exteriores ya que puesto que genera más pérdidas por ser más pesado se encuentra del lado de la seguridad.

Por otra parte debe aplicarse un factor de corrección de temperatura ya que el humo y gases calientes que abandonan el túnel lo hacen a mayor velocidad que el aire fresco de reemplazamiento que entra en el túnel derivado de la temperatura de los gases [59].

Así pues la ecuación Ec (5.20) al aplicar el factor de corrección de temperatura queda de la siguiente manera:

$$p_{dT} = \frac{1}{2} \rho v_c^2 \left(\frac{T}{T_o} \right) \quad \text{Ec (5.21)}$$

Donde T_o es la temperatura del aire fresco en el exterior del túnel y T es la temperatura de salida de los humos y gases caliente del túnel. De acuerdo a lo expuesto por la PIARC [59] T se puede calcular como:

$$T = \frac{\frac{2}{3} \dot{Q}_c}{\rho_o C_p A_t V_c} + T_o \quad \text{Ec (5.22)}$$

Donde ρ_o es la densidad del aire exterior.

Volviendo a p_T , el siguiente término es p_{drag} .

$$p_T = p_{en-ex} + p_{drag} + p_L + p_{Fire} + p_{Chim} \quad Ec (5.18)$$

El término p_{drag} denominado por otros autores como p_{veh} [59] son las pérdidas derivadas del tráfico presente en el túnel. El término p_{drag} tiene en cuenta el tipo de vehículo, su velocidad así como se circula a favor o en contra del flujo del sistema de ventilación de emergencia. Este término para un túnel ferroviario presenta la siguiente expresión:

$$p_{drag} = C_d \frac{A_v}{A_T} \cdot \frac{1}{2} \rho [(N_{T1})(V_{v1} + V_c)^2 - (N_{T2})|V_{v2} + V_c|(V_{v2} + V_c)] \quad Ec (5.23)$$

Donde:

C_d : Es el coeficiente de arrastre del metro que puede tomarse como la unidad [58]

A_v : Es el área frontal del metro en m^2

ρ : Es la densidad del aire en el túnel tomándose del lado de la seguridad la densidad del aire exterior

N_{T1} : Es el número de trenes presentes en el túnel siendo como máximo igual al número de vías

V_{v1} : Es la velocidad del metro que se encuentra circulando a contracorriente

V_{v2} : Es la velocidad del metro que se encuentra circulando a favor de la corriente

V_c : Es la velocidad crítica del túnel

Cabe resaltar que para el dimensionado del sistema de ventilación de emergencia se tendrán en cuenta las pérdidas generadas por la presencia del convoy de metro en el cual se produce el incendio, el cual se encuentra parado.

Volviendo a p_T , el siguiente término es p_L .

$$p_T = p_{en-ex} + p_{drag} + p_L + p_{Fire} + p_{Chim} \quad Ec (5.18)$$

El término p_L hace referencia a las pérdidas generadas por fricción en el interior del túnel. Para el calculo de este término se volverá a emplear el factor corrector de temperatura tal y como recomienda el PIARC [59]. La expresión para el calculo de las pérdidas por fricción queda así:

$$p_L = \frac{1}{2} \rho v_c^2 f \frac{L}{D_h} \left(\frac{T}{T_o} \right) \quad Ec (5.24)$$

Donde

ρ : Es la densidad del aire en el túnel tomándose del lado de la seguridad la densidad del aire exterior

v_c : Es la velocidad crítica del túnel

f : Es el factor de fricción en el túnel. De acuerdo a Jang y Chen [48] el factor de fricción en los túneles ferroviarios puede tomarse como $f = 0,026$. De acuerdo con Cory [58] valor puede oscilar entre 0.02 y 0.04 aconsejando para el dimensionado $f = 0,025$

L : Es la longitud del túnel

D_h : Es el diámetro hidráulico del túnel igual a 4 veces su sección partido por su perímetro

$\frac{T}{T_o}$: Es el factor de corrección de temperaturas en el túnel

Volviendo a p_T , el siguiente término es p_{Fire} .

$$p_T = p_{en-ex} + p_{drag} + p_L + p_{Fire} + p_{Chim} \quad Ec (5.18)$$

El término p_{Fire} hace referencia a las pérdidas generadas por el efecto del incendio en el túnel. Pese a que en el documento Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels publicado por PIARC [59] se habla de la importancia del cálculo de este término, no aparece su expresión para su cálculo. En el documento sobre ventilación en túneles del CETU francés [60] define las pérdidas de presión en túneles producidas por el incendio mediante la siguiente expresión:

$$p_{Fire} = c \frac{\dot{Q}_c}{v_c \cdot D_H^2} \quad Ec (5.25)$$

Donde:

c : Coeficiente adimensional de valor 9×10^{-5}

v_c : Es la velocidad crítica del túnel

D_h : Es el diámetro hidráulico del túnel igual a 4 veces su sección partido por su perímetro

En la siguiente tabla [60] se recogen las pérdidas derivadas por el efecto del fuego en el túnel para diferentes tipologías de túnel.

\dot{Q}_a	D_H	W_0	ξ_{exp}	ΔH_{exp}
5,3 MW	4 m	2 m/s	6,3	15 Pa
10 MW	4 m	2,5 m/s	6	25 Pa
20 MW	8,5 m	3 m/s	1,5	10 Pa
130 MW	8,5 m	4 m/s	4	40 Pa

Tabla 28. Pérdidas derivadas del efecto del fuego en un túnel.

El único elemento que queda para obtener p_T , es el término es p_{Chim} derivado del efecto chimena que puede producirse en un túnel por su pendiente.

$$p_T = p_{en-ex} + p_{drag} + p_L + p_{Fire} + p_{Chim} \quad Ec (5.18)$$

El término p_{Chim} puede calcularse de acuerdo a la siguiente expresión [61]:

$$p_{Chim} = g (\rho_o - \rho_T) D_c \quad Ec (5.26)$$

Donde

g : Es la aceleración de la gravedad

ρ_o : Es la densidad del aire en el exterior del túnel

ρ_T : Es la densidad del aire en el interior del túnel tomándose calculándose a partir de la temperatura T_f de la Ec (5.4)

D_c : Es la diferencia de cotas entre los portales del túnel

Una vez que se ha calculado p_T , pérdidas totales del túnel y por ende T_t el empuje necesario en el túnel de acuerdo a la ecuación Ec(5.17) se procederá a seleccionar un número de jet fans que ofrezcan un empuje igual o superior a T_t .

Así pues el número total de jet fans a instalar se calculara de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N_F = \frac{T_T}{T_i} \quad Ec (5.27)$$

Donde N_F es el numero entero redondeado hacia arriba entre el cociente entre T_T , el empuje total necesario en el túnel y T_i el empuje instalado en el túnel.

Los fabricante de jet fans a la hora de presentar sus catálogos de equipos ofrecen el empuje de los equipos, T_m de acuerdo a las condicione prescritas por la ISO 13350, es decir a 20°C, 101325 Pa de presión y con una densidad del aire de 1,2 kg/m³. Para obtener el empuje instalado es necesario calcular el empuje que produce un jet fan en las condiciones del túnel. El empuje en las condiciones del túnel se calcula a partir de la siguiente expresión:

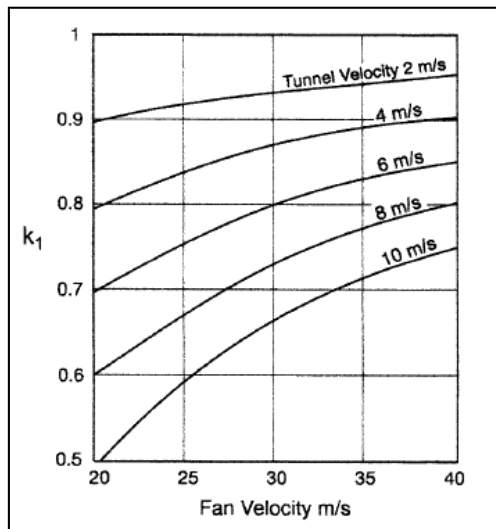
$$T_i = T_m \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad Ec (5.28)$$

Donde

T_m : Es el impulso que ofrece un jet fan de acuerdo a la ecuación Ec (5.16). Se toma como densidad de cálculo la densidad de los humos y gases calientes a la temperatura T_f de la ecuación Ec (5.4) estando del lado de la seguridad.

$$T_m = \frac{\rho q_{vF}^2}{A_f} \quad \text{Ec (5.16)}$$

k_1 : Es el coeficiente de reducción derivado de la velocidad presente en el túnel, siendo dicha velocidad la velocidad crítica. Este coeficiente se calcula a partir del siguiente gráfico.

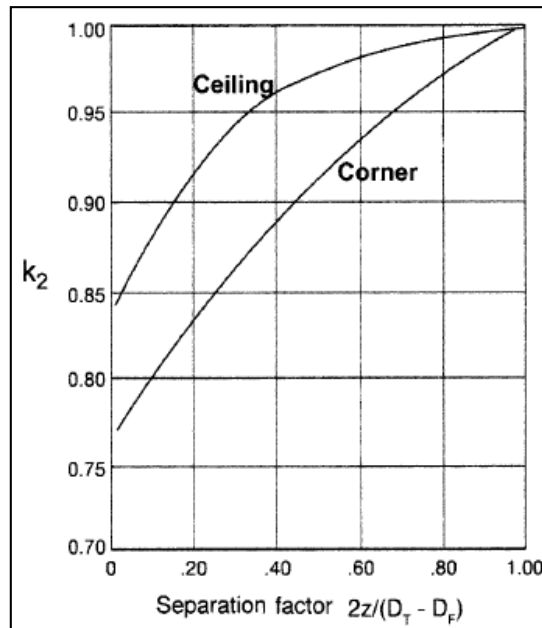


Gráfica 12. Coeficiente de reducción por velocidad del aire en el túnel.

k_2 : Es el coeficiente de reducción derivado de la proximidad de un jet fan a una pared o esquina del túnel al ser instalado. Dicho coeficiente se calcula a partir del factor de separación y la siguiente gráfica:

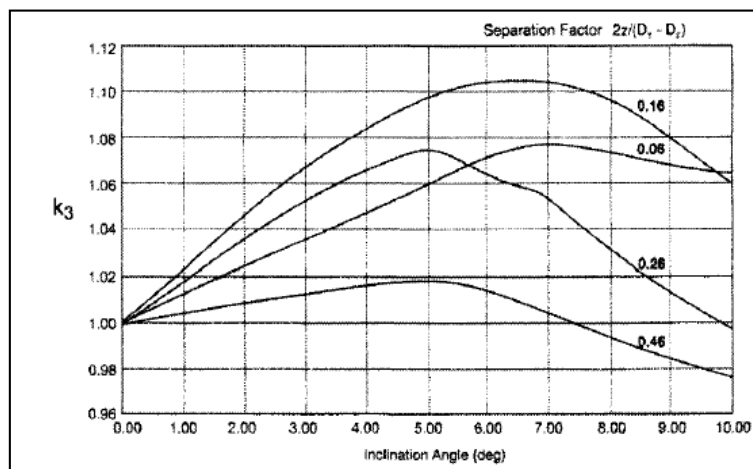
$$\text{Factor de separación} = \frac{2z}{D_t - D_H} \quad \text{Ec (5.29)}$$

Donde z es la distancia del centro del jet fan a la superficie horizontal más cercana, D_f es el diámetro del jet fan y D_H es el diámetro hidráulico del túnel.



Gráfica 13. Coeficiente de reducción por proximidad.

k_3 : Es el coeficiente de reducción derivado del Angulo de inclinación la tobera del jet fan. A partir del factor de separación obtenido en la ecuación Ec (5.27), la inclinación de la tobera del jet fan y la siguiente gráfica se obtiene le coeficiente de reducción por inclinación.



Gráfica 14. Coeficiente de reducción por inclinación de la tobera del jet fan.

5.6.1. Predimensionado del sistema de ventilación de emergencia para el túnel de diseño

A partir de todas las expresiones expuestas en el punto anterior se procede al predimensionado del sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio del túnel objeto del presente trabajo de final de máster.

El cálculo se ha realizado mediante una hoja de cálculo presentándose a continuación los resultados obtenidos.

El empuje total se calcula como:

$$T_t = p_T \cdot A_T \text{ (N)} \quad \text{Ec (5.17)}$$

Siendo las pérdidas totales en el túnel:

$$p_T = p_{en-ex} + p_{drag} + p_L + p_{Fire} + p_{Chim} \quad \text{Ec (5.18)}$$

Las pérdidas derivadas de las entradas o salidas en el túnel son:

$$p_{en-ex} = 1.5 \cdot p_{dT} \quad \text{Ec (5.19)}$$

$$p_{dT} = \frac{1}{2} \rho v_c^2 \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad \text{Ec (5.20)}$$

Para resolver las ecuaciones Ec (5.19) y Ec (5.21) se emplean los siguientes valores.

Ambient Temperature (T_0)	283.95	K
Warm gas temperature exit (T)	337.15	K
Density (ρ)	1.243	kg / m ³
Critical Velocity (V_c)	<u>1.763</u>	m/s

Por tanto se obtiene:

$$p_{dT} = 2.29 \text{ Pa}$$

$$p_{en-ex} = 3.44 \text{ Pa}$$

Las pérdidas derivadas del tráfico en el túnel son:

$$p_{drag} = C_d \frac{A_v}{A_T} \cdot \frac{1}{2} \rho [(N_{T1})(V_{v1} + V_c)^2 - (N_{T2})|V_{v2} + V_c|(V_{v2} + V_c)] \quad \text{Ec (5.23)}$$

Para obtener las pérdidas derivadas del tráfico en el túnel únicamente se tiene en cuenta el convoy siniestrado el cual presenta una superficie frontal A_v de 10 m². Se considera que el tren está parado. Por tanto las pérdidas derivadas del tráfico son:

$$p_{drag} = 0.28 \text{ Pa}$$

Las pérdidas derivadas a la fricción en el túnel son:

$$p_L = \frac{1}{2} \rho v_c^2 f \frac{L}{D_h} \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad Ec (5.24)$$

Empleando la densidad del aire exterior, y como factor de fricción $f = 0,025$ valor recomendado por Cory [58] se tiene:

$$p_L = 10.72 Pa$$

Las pérdidas derivadas del incendio en el túnel son:

$$p_{Fire} = c \frac{\dot{Q}_c}{v_c \cdot D_H^2} \quad Ec (5.25)$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$p_{Fire} = 9.50 Pa$$

Al comparar con la tabla de pérdidas derivadas del incendio que se adjunta con la definición de la expresión de la pérdida se observa que el valor obtenido de 9.5 Pa para una potencia de incendio de 15MW, una velocidad crítica de 1,763m/s y un túnel con un D_H de 8.03 m es muy similar al valor de 10 Pa para un incendio de 20 MW.

\dot{Q}_a	D_H	W_0	ξ_{exp}	ΔH_{exp}
5,3 MW	4 m	2 m/s	6,3	15 Pa
10 MW	4 m	2,5 m/s	6	25 Pa
20 MW	8,5 m	3 m/s	1,5	10 Pa
130 MW	8,5 m	4 m/s	4	40 Pa

Tabla 29. Pérdidas derivadas del efecto del fuego en un túnel.

Las pérdidas derivadas del efecto chimenea son nulas en este caso ya que se trata de un túnel plano.

Por tanto se tiene que las pérdidas total del túnel son:

$$p_T = p_{en-ex} + p_{drag} + p_L + p_{Fire} + p_{chim} \quad Ec (5.18)$$

Sustituyendo valores se tiene que:

$$p_T = 23.94 Pa$$

Por tanto el empuje necesario sustituyendo valores será:

$$T_t = 1634.16 N$$

Para el diseño de la instalación se van a emplear jet fans reversibles de la marca Zitron, en particular el modelo JZR 7-11/2. Las características de este ventilador quedan reflejadas en las siguientes tablas:

MODELO TYPE	Diam. Diam. D mm.	Diam. Diam. d mm.	Longit. Length L mm.	Longit. Length L1 mm.	Longit. Length L2 mm.	Longit. Length L3 mm.	Peso Weight (Kg)*
JZR 5	700	500	1600	600	400	600	275
JZR 6	800	600	2700	1025	650	1025	500
JZR 7	900	700	2700	1025	650	1025	650
JZR 9	1100	900	2700	1025	650	1025	750
JZR 10	1200	1000	2700	1025	650	1025	850

Tabla 30. Características geométricas de la serie de ventiladores JZR

MODELO TYPE	Caudal Air Flow m³/s	Velocidad del chorro Jet Velocity m/s	Empuje Teórico Theoretical Thrust N.	Empuje Nominal Nominal Thrust N.	Potencia Absorbida Input Power Kw.	Potencia Instalada Installed Power Kw.	Niv. Sonoro a 10 mts. Noise level at 10 mts. dB(A)
JZR 5-5.5/2	5.5	28.0	185	168	4.9	5.5	67
JZR 5-7.5/2	6.3	32.1	243	221	7.3	7.5	71
JZR 6-7.5/2	8.0	28.3	272	258	6.6	7.5	67
JZR 6-11/2	9.3	32.9	367	349	10.4	11.0	70
JZR 6-15/2	10.3	36.4	450	428	14.1	15.0	72
JZR 7-11/2	11.3	29.4	398	380	9.9	11.0	68
JZR 7-15/2	12.7	33.0	503	481	14.1	15.0	70
JZR 7-18.5/2	13.5	35.1	569	543	16.9	18.5	71
JZR 7-22/2	14.5	37.7	656	626	20.9	22.0	73
JZR 9-15/4	17.6	27.7	585	558	13.7	15.0	71
JZR 9-18.5/4	19.0	29.9	681	647	17.2	18.5	72
JZR 9-22/4	20.4	32.1	785	746	21.3	22.0	74
JZR 10-15/4	20.7	26.4	655	626	14.4	15.0	70
JZR 10-22/4	23.0	29.3	809	768	19.7	22.0	72
JZR 10-30/4	26.3	33.5	1057	1004	29.5	30.0	74
JZR 10-37/4	28.0	35.7	1198	1139	35.6	37.0	75

Tabla 31. Propiedades de la serie de ventiladores JZR.

Puesto que la densidad del aire dentro del incendio es menor se procede al calculo del empuje del jet fan.

$$T_m = \frac{\rho q_{vF}^2}{A_f} \quad \text{Ec (5.16)}$$

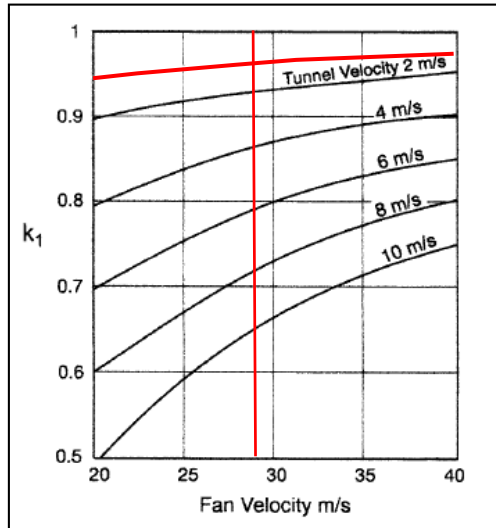
Sustituyendo valores para la densidad del aire en el interior del túnel se tiene que:

$$T_m = 322.03 \text{ N}$$

Por otra parte aplicando los coeficientes de reducción se obtiene el empuje instalado.

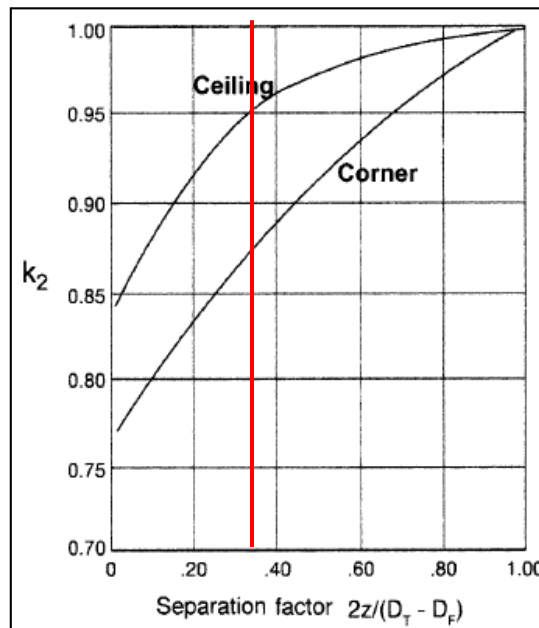
$$T_i = T_m \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad \text{Ec (5.26)}$$

Donde k_1 vale 0.95.



Gráfica 15. Coeficiente de reducción por velocidad del aire en el túnel.

Donde k_2 vale 0.94 ya que la separación del eje del jet fan al techo del túnel es de un metro. De esta manera el coeficiente de separación vale 0.27



Gráfica 16. Coeficiente de reducción por proximidad.

Donde k_3 vale la unidad ya que el jet fan no impulsa el aire con inclinación.

Sustituyendo valores se tiene que :

$$T_i = 287.57 N$$

Por tanto de acuerdo a la ecuación Ec (5.26) se necesitarán:

$$N_F = \frac{T_T}{T_i} \quad \text{Ec (5.26)}$$

Sustituyendo valores se tiene que:

$$N_F = 6 \text{ jet fans JZR 7 - 11/2}$$

5.6.2. Instalación del sistema de ventilación elegido en el túnel

Una vez conocido el número de jet fans necesarios para evitar la retropropagación de los humos es necesario decidir en qué puntos del túnel se instalarán los jet fans seleccionados.

Para determinar estas posiciones se emplearan las reglas que propone Cory para la instalación de jet fans en túneles.

En primer hay que señalar que el empuje desarrollado por los jet fans en el túnel es la suma de los empujes individuales de cada jet fan. Los jet fans pueden ser colocados en grupos, operando en paralelo o en serie, separados longitudinalmente a lo largo de tunel. También es posible hacer una combinación de grupos de jet fans en paralelo instalados en serie a lo largo del túnel.

5.6.2.1. Colocación de jet fans en paralelo (seccional)

Los jet fans pueden instalarse en paralelo en el túnel de acuerdo con la siguiente figura.

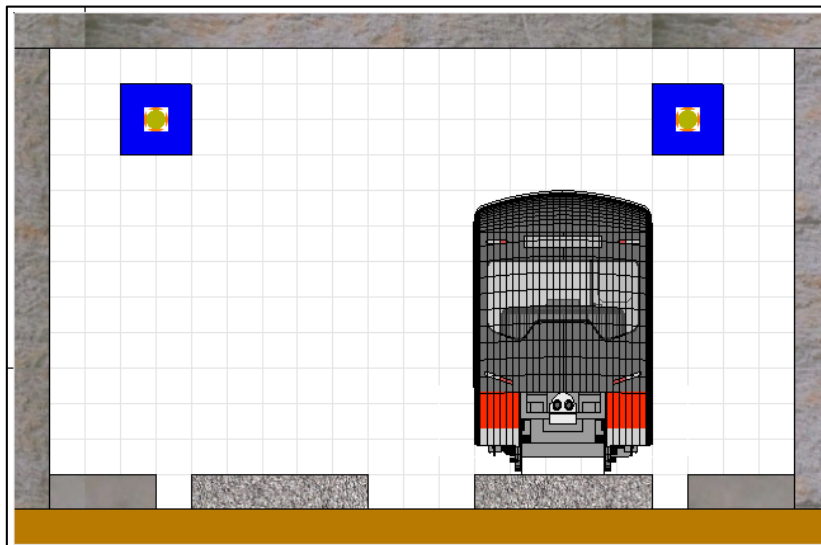


Figura 126. Sección con jet fans en paralelo.

Con el objeto de que los jet fans en paralelo no queden afectados por la influencia del jet fan anexo Cory propone dos criterios de separación.

25) La separación de los jet fans debe ser del orden del diámetro hidráulico del túnel

26) Como regla empírica la separación en metros entre jet fans en metros debe ser mayor a la presión dinámica del jet fan en mm Hg.

Así pues para el túnel dado con una sección de 10,5 metros de ancho por 6,5 metros de alto y un diámetro hidráulico de 8,03 metros la separación debería ser del orden de 8 metros.

En particular, para la presión dinámica máxima del jet fan, obtenida a partir del empuje teórico del jet fan ofrecida por el fabricante se tiene:

$$P_d = T_m/A_f \quad Ec (5.28)$$

Puesto que el diámetro interior del jet fan es de 0,7 metros y el empuje teórico de acuerdo al fabricante es de 398 N se obtiene una presión dinámica de 1034.18 Pa o 7.75 mm Hg. Por tanto de acuerdo a la regla de predimensionado los jet fans deberían estar separados 7.75 metros entre sí.

Este cálculo de predimensionado se ha realizado para condiciones ambientales normales.

En el caso de haberse tomado las condiciones de incendio puesto que el empuje queda reducido, esta separación sería menor.

Por tanto se tomarán los valores obtenidos como valores de referencia a la hora de dimensionar la instalación.

5.6.2.2. Colocación de jet fans en serie (longitudinal)

Para evitar que los jet fans en serie queden afectados por otros equipos en serie, aguas arriba, se recomiendan los siguientes criterios de separación.

27) La separación entre jet fans en serie debe ser mayor a 10 veces el diámetro hidráulico del túnel.

28) Como regla empírica se puede tomar una separación igual a la décima parte de la presión dinámica del jet fan.

Puesto que el diámetro hidráulico del túnel es de 8,03 metros como mínimo debe mantenerse una separación entre jet fans de 80 metros.

Si se emplea la regla empírica puesto que la presión dinámica máxima de los jet fans de acuerdo al fabricante es de 1034.18 Pa, debería tomarse una separación entre jet fans de 103 metros.

5.7. Diseño de prueba

Una vez realizado un predimensionado del sistema de ventilación de emergencia se propone un diseño de prueba con el fin de validar la instalación.

Para ello se realizará una simulación computacional mediante FDS para simular un escenario de incendio tipo que valide el predimensionado de la instalación.

Dada la configuración del túnel y el coste computacional asociado al cálculo de una simulación, para la validación del predimensionado, se realizará una única simulación de un escenario de incendio.

La meta de este diseño es validar el buen funcionamiento de la instalación de ventilación que se ha predimensionado.

El objetivo de la meta es garantizar que no se produce el fenómeno del backlayering o retropropagación de los humos y gases calientes.

El criterio de aceptación que se va a validar mediante una simulación computacional es que para el modelo de incendio propuesto por la IST2006 se consigue controlar el avance del humo, no existiendo backlayering.

Para ello se realizará una única simulación de incendio, en la cual se modelará el escenario de incendio más crítico, el cual se da cuando el tren se incendia tras entrar por el portal del túnel. El sistema de ventilación a instalará deberá aspirar el humo hacia la zona de la estación para garantizar que los ocupantes puedan evacuar el tren a través de las vías de evacuación hacia el portal de entrada del túnel.

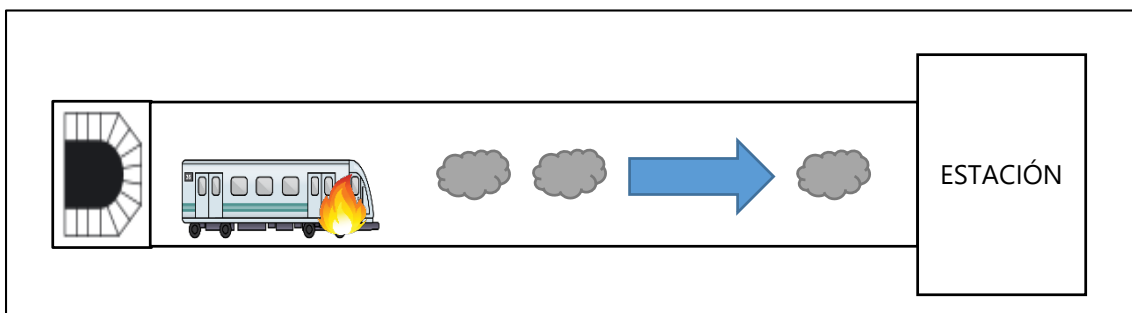


Figura 127. Esquema de escenario de incendio del predimensionado del sistema de ventilación de emergencia.

Para el predimensionado se ha obtenido los siguientes datos:

- 29) Se necesitan 6 jet fans JZR 7-11/2.
- 30) Su separación en paralelo será del orden de 8 metros o superior.
- 31) Su separación en serie será del orden 103 metros o superior.

Para el diseño de prueba se realizará una distribución equitativa de los ventiladores. Se divide la longitud del túnel en 6 sectores de 250 metros, instalándose un jet fan en medio de cada sector, planteándose la siguiente configuración longitudinal:

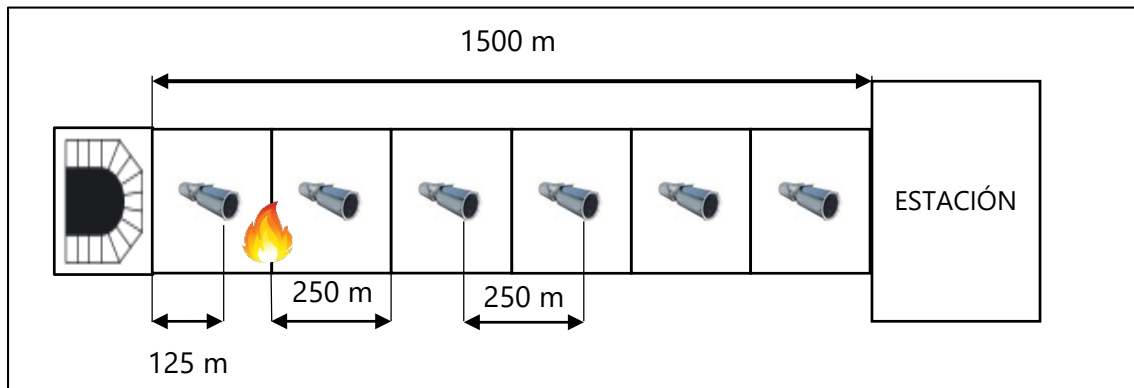


Figura 128. Configuración diseño de prueba.

La separación entre jet fans será de 250 metros entre sí superior a los 103 metros del predimensionado y a una distancia del portal de entrada como de la estación de 125 metros.

El incendio se produce en el primer vagón del convoy de metro que se dirige en dirección a la estación al inicio de la simulación. La distancia del incendio al portal de entrada es de 150 metros. El modelo de incendio es de 15 MW de acuerdo a la IST2006 tal como se ha especificado en capítulos anteriores.

Los jet fans se instalarán en serie de acuerdo a la siguiente sección:

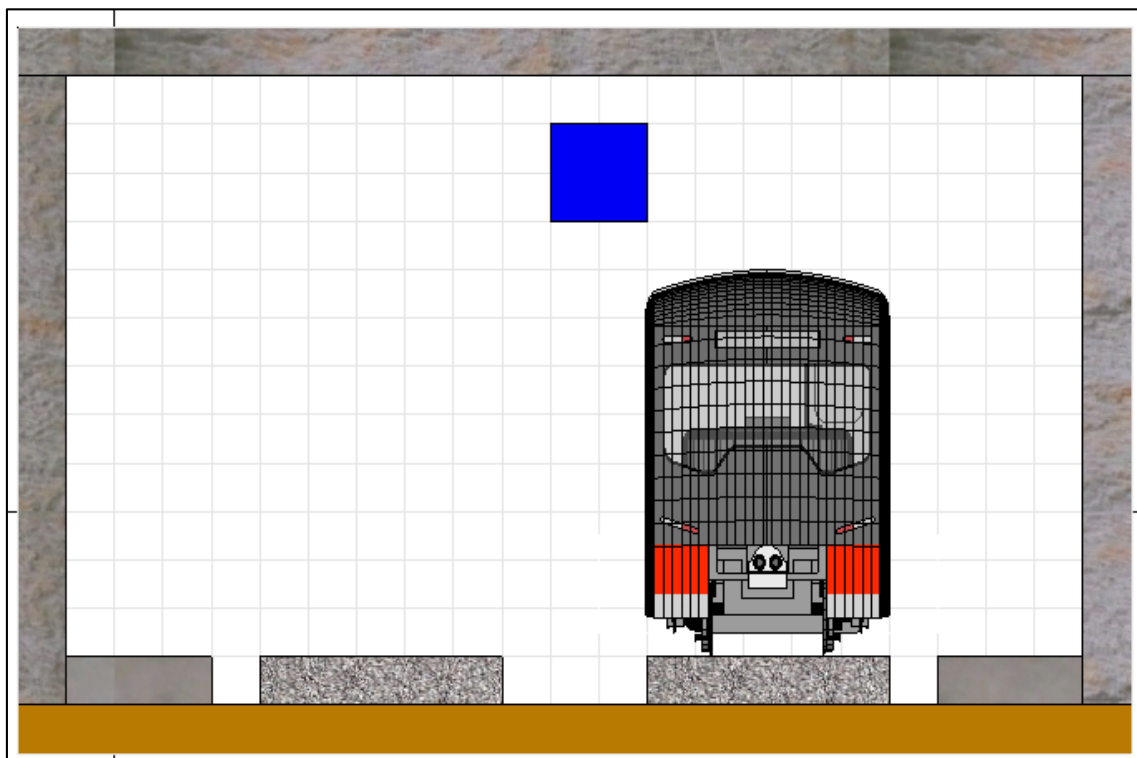


Figura 129. Sección del diseño de prueba.

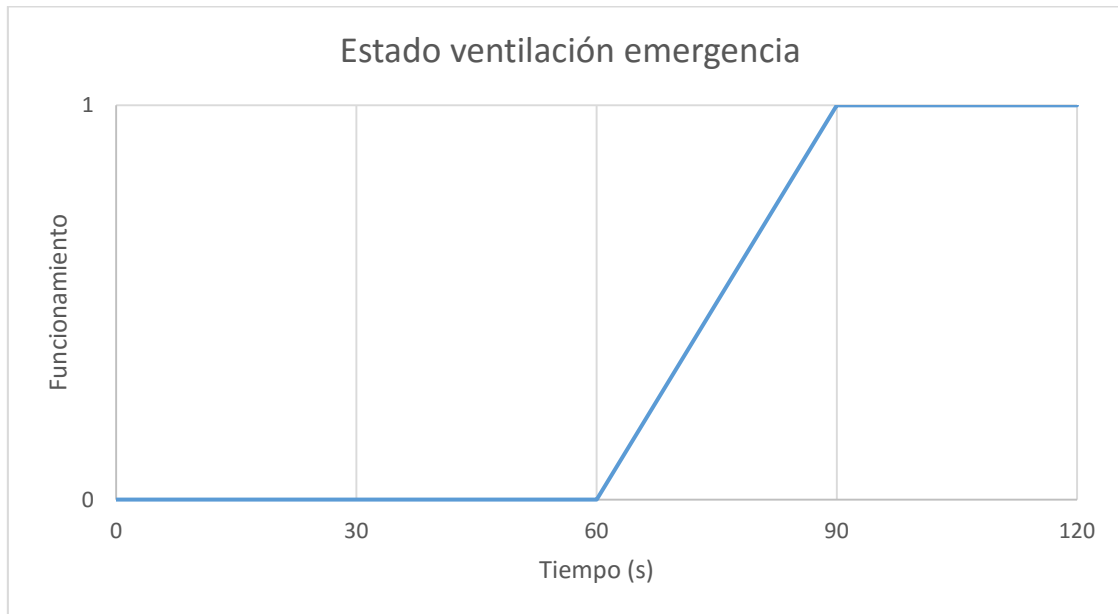
Del centro del jet fan a la superficie más próxima (el techo del túnel) hay un metro de distancia. El jet fan se monta a una altura de 5,5 metros sobre la plataforma de la vía.

La secuencia de funcionamiento de los ventiladores de acuerdo a lo establecido con la empresa gestora de la línea de metro se modela de la siguiente manera:

T=0 segundos. El tren está detenido y comienza el incendio.

T=60 segundos. Tras la detección del incendio por parte de un miembro de la empresa gestora de la línea de metro, se da la alarma al centro de control y se procede al arranque del sistema de ventilación de emergencia.

T=90 segundos. El sistema de ventilación de emergencia alcanza el régimen permanente del funcionamiento.



Gráfica 17. Arranque del sistema de ventilación de emergencia.

5.7.1. Modelado de un jet fan mediante FDS

Para realizar el correcto modelado de un jet fan en FDS se empleará el módulo HVAC, con el objeto de que todo el humo y gases calientes que entran por la admisión del jet fan, aparezcan por la tobera. Si no se empleará el módulo HVAC y cada jet fan se modelara mediante una superficie FDS tipo Escape para la admisión y otra superficie FDS tipo Suministro, al no estar acopladas, todo el humo y gases calientes que salieran a través del Escape no volverían a aparecer en el modelo. Por otra parte habría que modelar la superficie tipo Suministro para que introdujera humos y gases calientes en la misma proporción que son extraídos por la superficie tipo Escape, lo cual no es factible.

Para resolver este problema cada jet fan se modela de la siguiente manera:

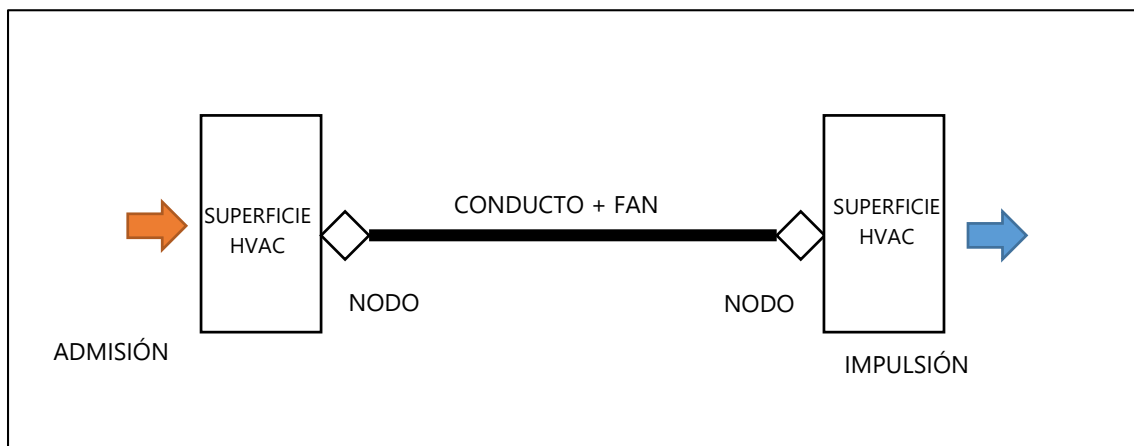


Figura 130. Modelo de Jet Fan mediante HVAC en FDS

A la hora de modelar el dispositivo de flujo tipo FAN tal y como se explicó en el capítulo 4 existen tres posibilidades, mediante un caudal constante, mediante una curva cuadrática o a través de una curva introducida por el usuario.

Para modelar el jet fan se debe tener en cuenta que el empuje F tiene dos componentes, la estática y la cinemática.

$$T_m = \Delta p \cdot A_f + \rho \cdot q_{vf} \cdot v_f \quad \text{Ec (5.30)}$$

En el caso de querer modelar el dispositivo de flujo FAN mediante una curva cuadrática se puede obtener de la ecuación Ec (5.29) dos puntos de funcionamiento para realizar el modelo.

El primer punto para $\Delta p = 0$, se obtiene la componente cinemática $T_m = \rho \cdot q_{vf} \cdot v_f$ empleando los datos del fabricante de caudal y velocidad obteniéndose el empuje teórico.

Para segundo punto con $v_f = 0$ se obtiene $T_m = \Delta p \cdot A_f$ y de ella se obtiene $\Delta p_{max} = T_m/A_f$ donde T_m es el empuje teórico

El modelo cuadrático que emplea HVAC para el funcionamiento de los ventiladores viene determinado por la siguiente ecuación donde la presión es proporcional al cuadrado del caudal:

$$\dot{V}_{fan} = \dot{V}_{max} \text{sign}(\Delta p_{max} - \Delta p) \sqrt{\frac{|\Delta p - \Delta p_{max}|}{\Delta p_{max}}} \quad Ec (5.31)$$

Donde:

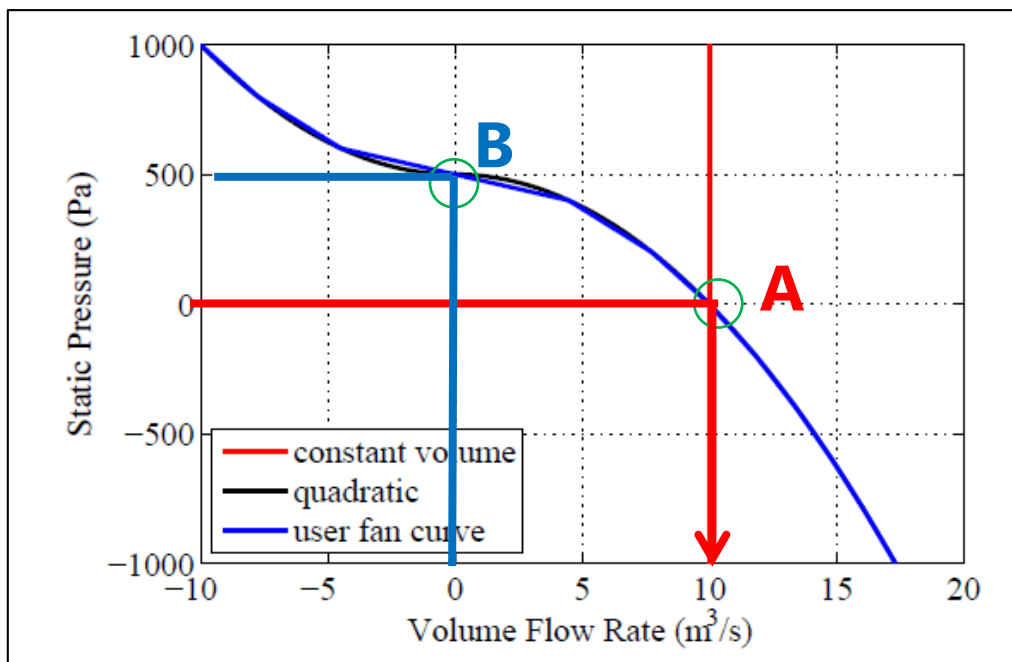
\dot{V}_{fan} : Es el caudal producido por el ventilador

\dot{V}_{max} : Es el caudal máximo del ventilador

Δp : Es la diferencia de presión entre la admisión y el escape del ventilador

Δp_{max} : Es la presión máxima a la cual trabaja el ventilador

En la siguiente gráfica se representan los dos puntos para obtener la curva cuadrática de un FAN HVAC en FDS.



Gráfica 18. Obtención de la curva cuadrática de un jet fan

Punto A. Caudal de descarga libre, con presión estática cero, corresponde al caudal del modelo m³/s, en la primera columna.

Punto B. Corresponde a flujo cero (está cerrada la salida del ventilador), en este caso hay empuje, el teórico

Por otra parte también se puede modelar el FAN mediante la hipótesis de caudal constante para túneles ya que no hay diferencias de presión significativas $\Delta p \approx 0$ puesto que como los ventiladores se encuentran lo suficientemente alejados se consideran que trabajan a descarga libre funcionando el ventilador en el entorno del punto A.

Para comprobar esto se han realizado varias simulaciones de un jet fan y se comprueba que el funcionamiento es similar. En las siguientes imágenes se presenta el caudal impulsado por un jet fan JZR 7-11/2 modelado en el recuadro izquierdo mediante un FAN con caudal constante y en el recuadro derecho modelado mediante curva cuadrática.

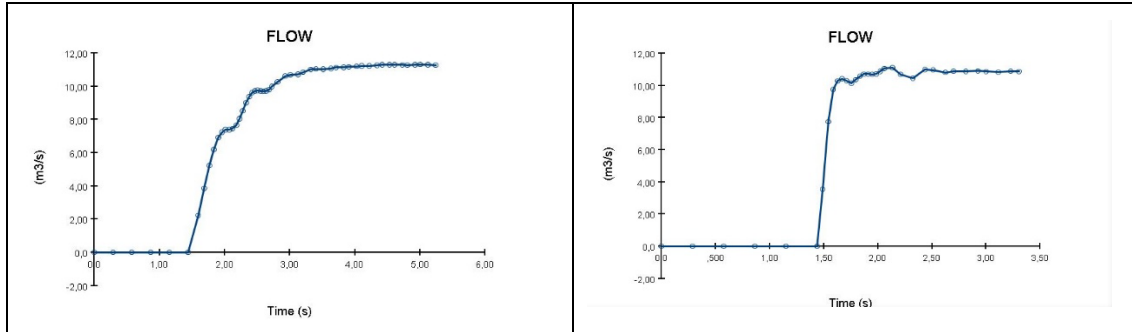


Figura 131. Caudales de un jet fan JZR 7-11/2 modelados con diferentes técnicas.

Por otra parte es fundamental al realizar el modelo del jet fan realizar un modelo del cajado de admisión y escape del jet fan. En la siguiente imagen se presenta el modelo del jet fan simulado en un segmento del túnel:

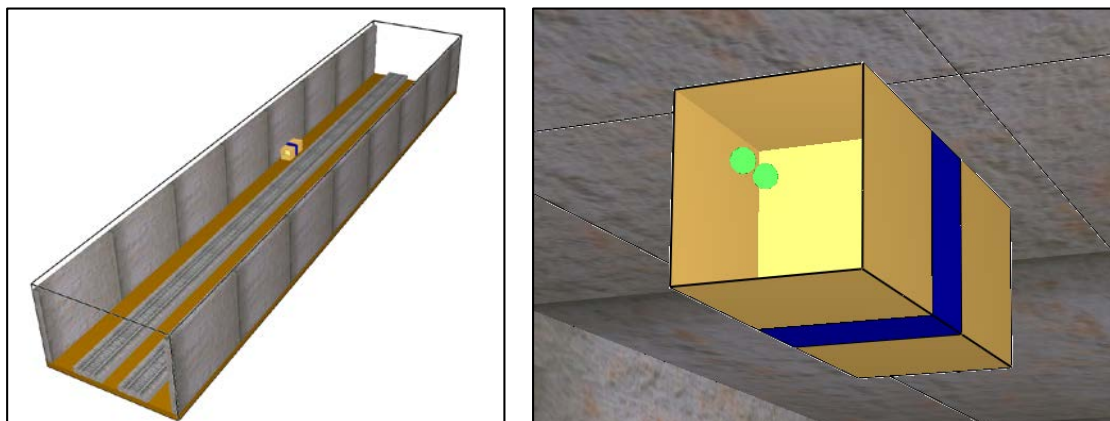


Figura 132. Ubicación del jet fan en el modelo y detalle del jet fan.

El modelo HVAC del jet fan queda ubicado en la zona azul central, siendo los elementos color beige el cajado de impulsión y escape.

En caso de no realizar este tipo de cajado, es posible que se produzca una interferencia entre la admisión y la impulsión con la consiguiente pérdida de eficiencia del jet fan, y por tanto su modelado no sería adecuado

Para representar la importancia de modelar estos elementos se presenta a continuación los resultados de diferentes experimentos realizados. En la imagen superior se presenta el modelo de jet fan a emplear en la simulación en el cual se ha modelado el cajeadado de admisión y escape. En la imagen inferior se presenta el mismo modelo sin los cajeados.

Como puede observarse se produce una reducción drástica de la velocidad de impulsión del jet fan derivada de la interferencia entre la admisión y el escape del jet fan por encontrarse demasiado próximos.

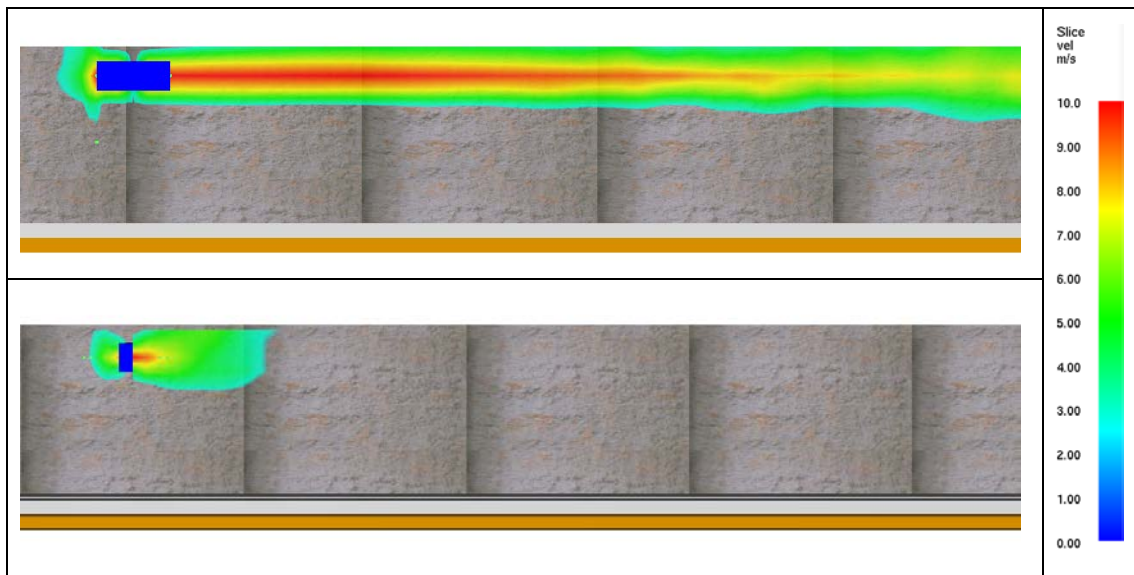


Figura 133. Representación de la velocidad de dos jet fans modelados con y sin cajeadado.

Si se compara el caudal impulsado por ambos modelos se comprueba que la reducción producida es considerable. En la imagen izquierda se presenta el caudal impulsado por el modelo a emplear en la simulación en la cual el jet fan cuenta con cajeados y e impulsa un caudal de $11,3 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que en la imagen derecha se presenta el caudal del jet fan sin cajeadado el cual alcanza un valor de $7 \text{ m}^3/\text{s}$.

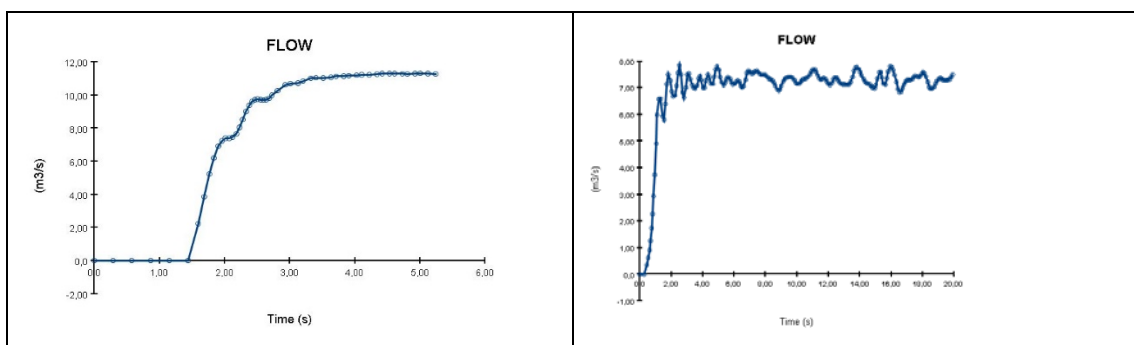


Figura 134. Caudales de un jet fan JZR 7-11/2 modelados con diferentes técnicas.

5.7.2. Resultado del diseño de prueba 1

Tal y como se indica anteriormente en el diseño de prueba se realiza una distribución equitativa de los ventiladores. Se divide la longitud del túnel en 6 sectores de 250 metros, instalándose un jet fan en medio de cada sector, planteándose la siguiente configuración longitudinal:

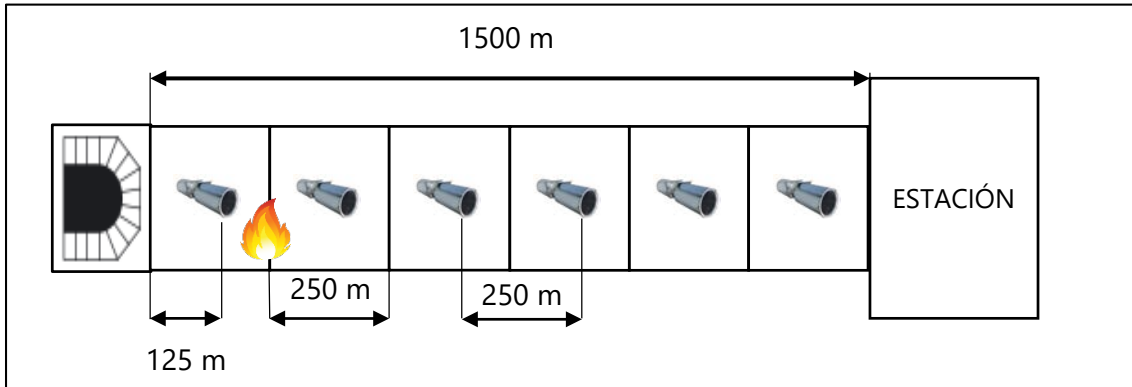


Figura 135. Configuración diseño de prueba.

La separación entre jet fans será de 250 metros entre sí superior a los 103 metros del predimensionado y a una distancia del portal de entrada como de la estación de 125 metros.

El incendio se produce en el primer vagón del convoy de metro que se dirige en dirección a la estación. La distancia del incendio al portal de entrada es de 150 metros.

Los jet fans se instalarán en serie de acuerdo a la siguiente sección:

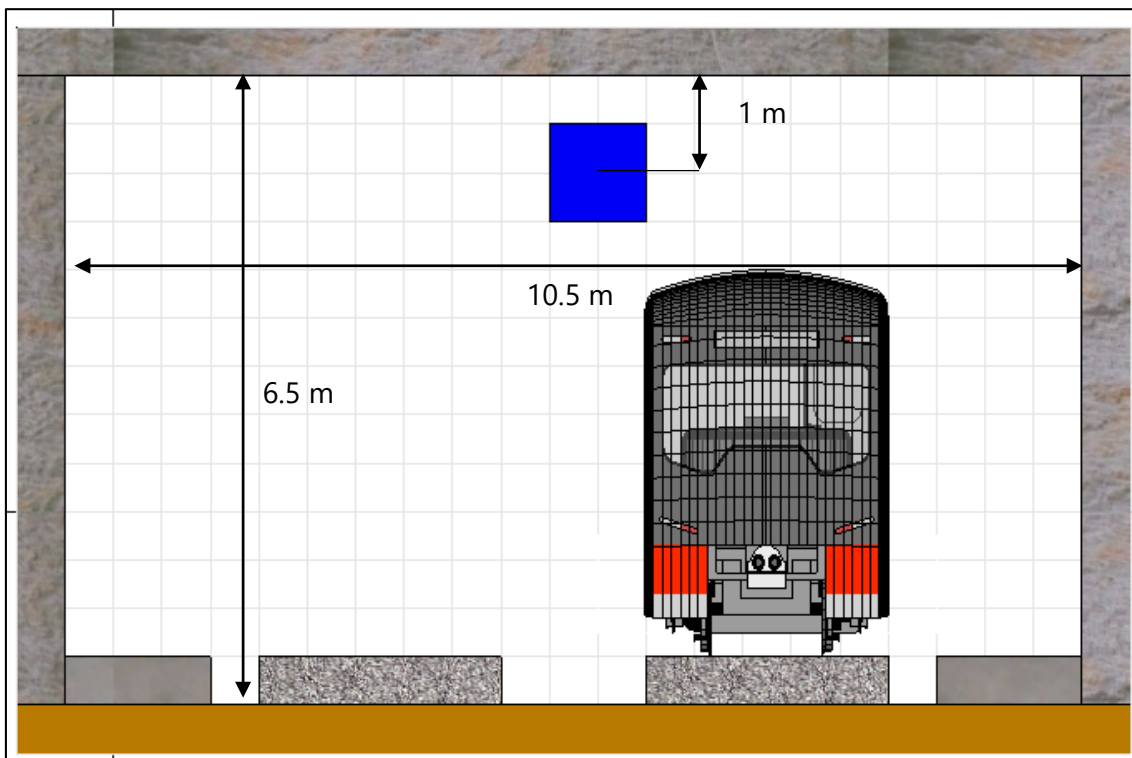


Figura 136. Sección del diseño de prueba.

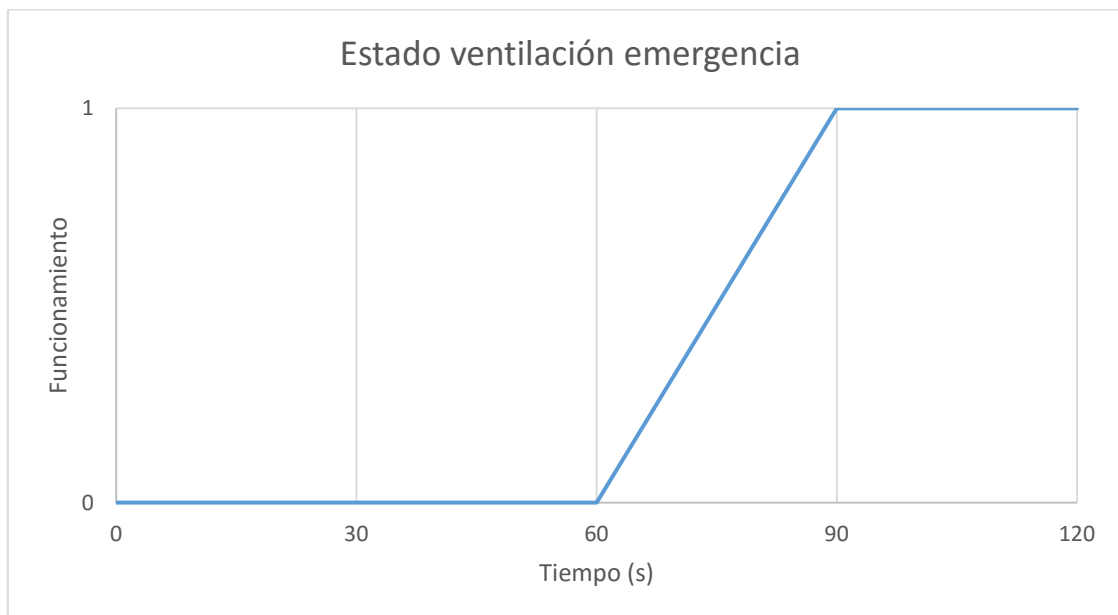
Del centro del jet fan a la superficie más próxima (el techo del túnel) hay un metro de distancia. El jet fan se monta a una altura de 5,5 metros sobre la plataforma de la vía.

La secuencia de funcionamiento de los ventiladores de acuerdo al establecido con la empresa gestora de la línea de metro se modela de la siguiente manera:

T=0 segundos. El tren está detenido y comienza el incendio.

T=60 segundos. Tras la detección del incendio por parte de un miembro de la empresa gestora de la línea de metro, se da la alarma al centro de control y se procede al arranque del sistema de ventilación de emergencia.

T=90 segundos. El sistema de ventilación de emergencia alcanza el régimen permanente del funcionamiento.



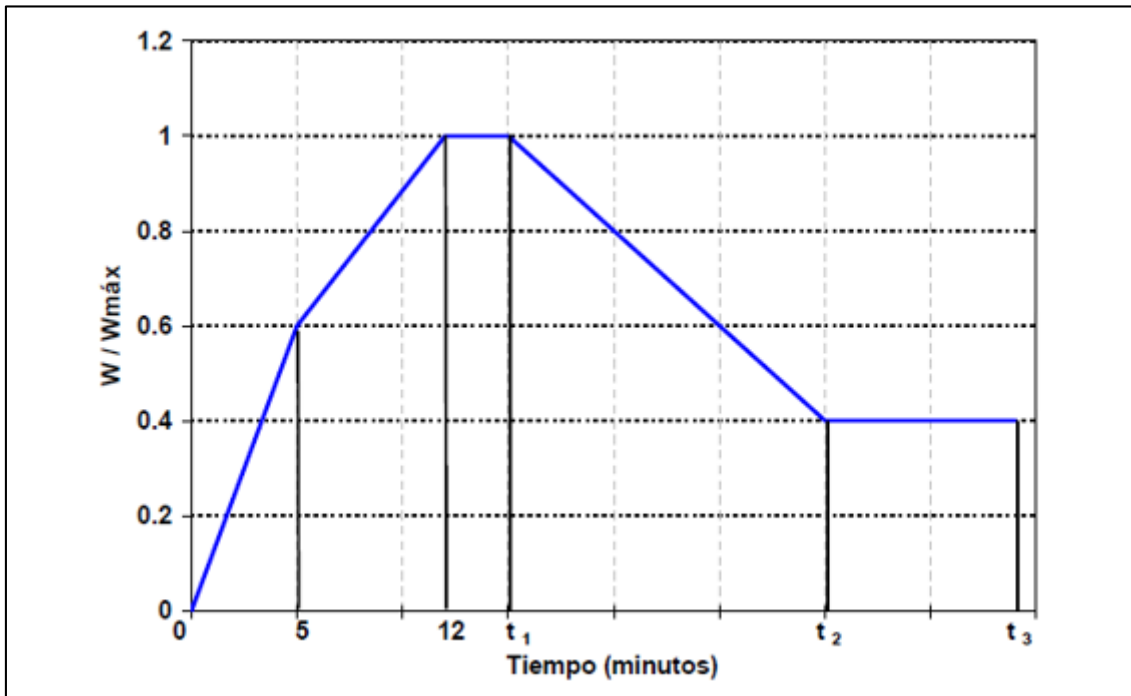
Gráfica 19. Arranque del sistema de ventilación de emergencia.

A continuación se muestran los resultados en función del tiempo del tiempo presentándose el avance de los humos en función del tiempo. Se medirá si se controla la retropropagación de los humos o backlayering, en que instante se produce.

Se presenta una imagen de la simulación cada 30 segundos hasta el instante en que controla el avance del humo. A partir de este instante se mostrarán los instantes $t=720$ segundos donde el incendio alcanza una potencia de 15 MW y el instante final de la simulación $t=1080$ segundos donde el incendio comienza a decaer.

Los incendios se han modelado de acuerdo a la Instrucción sobre seguridad en túneles de IST2006 [4].

La tasa de liberación de calor adoptada sigue la gráfica siguiente de la IST2006..



Gráfica 20. Tasa de liberación de calor del incendio modelo.

POTENCIA MÁXIMA DEL INCENDIO (MW)	TIEMPOS CARACTERÍSTICOS (minutos)		
	t_1	t_2	t_3
15	18	30	60
30	30	60	120
300	240	--	--

Tabla 32. Evolución de la curva en función de la potencia del incendio.

TIPO DE VEHÍCULO INCENDIADO	POTENCIA MÁX. DEL INCENDIO (MW)	DURACIÓN DEL INCENDIO (horas)	CAUDAL DE HUMOS PRODUCIDOS (m ³ /s)
Locomotora eléctrica o coche de viajeros	15	1	60
Locomotora Diesel o vagón de mercancías	30	2	80
Vagón de mercancías peligrosas	300	4	460

Tabla 33. Caudal de humos producidos.

Además se ha comprobado que el caudal de humos (gases calientes) producidos por el incendio es al menos de $60\text{m}^3/\text{s}$. Para medir la cantidad de humo producida se calcula la velocidad media de los gases calientes producidos por el incendio en la cabeza tractora del tren. Como la superficie que genera humos y gases calientes es fija y se conoce (dos franjas de 15 metros de longitud por 1 metro de altura a cada costado de la cabeza tractora del tren) multiplicando la velocidad de los humos por la superficie de la zona que genera los humos se determina el caudal de humos y gases calientes.

En la imagen se muestra el incendio para $t=150$ segundos. El tamaño del incendio varía en función del tiempo alcanzando 30 metros cuadrados a los 720 segundos.

El hecho de que el incendio crezca con el tiempo no impide que se haya modelado la curva de la tasa de liberación de calor con exactitud.

En la siguiente gráfica se muestra el análisis de la velocidad media de los humos y gases calientes. Puede observarse que la velocidad se estabiliza en torno a un valor de 2,21 m/s.

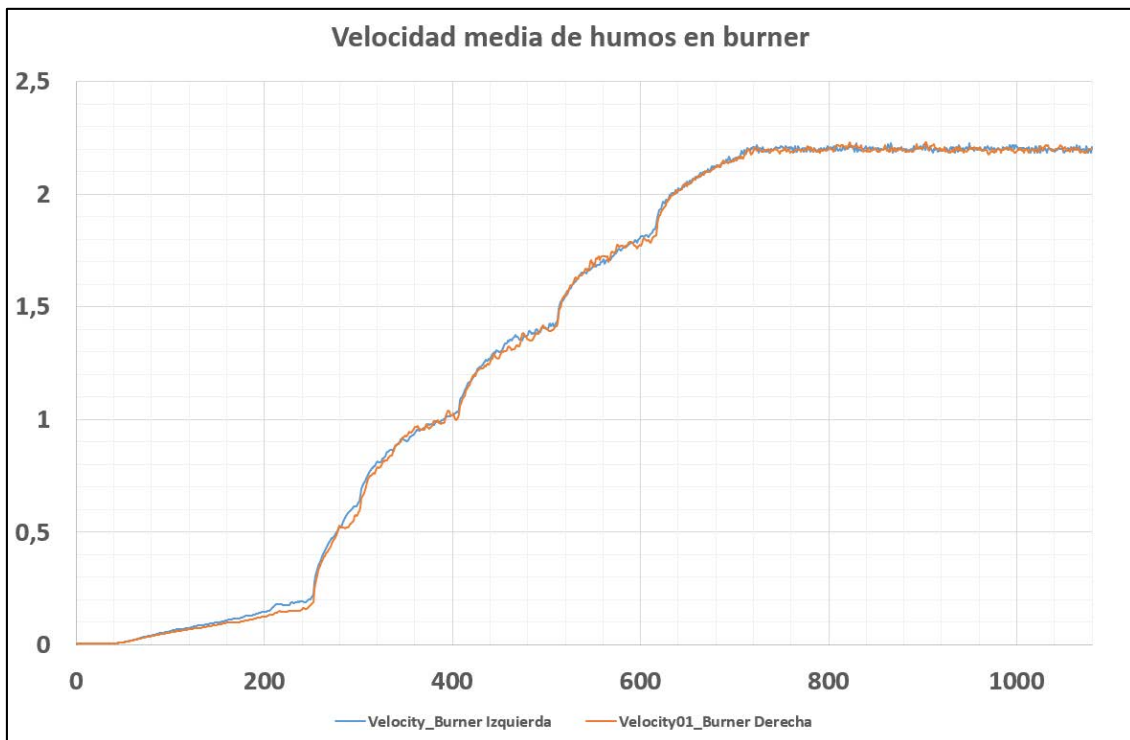
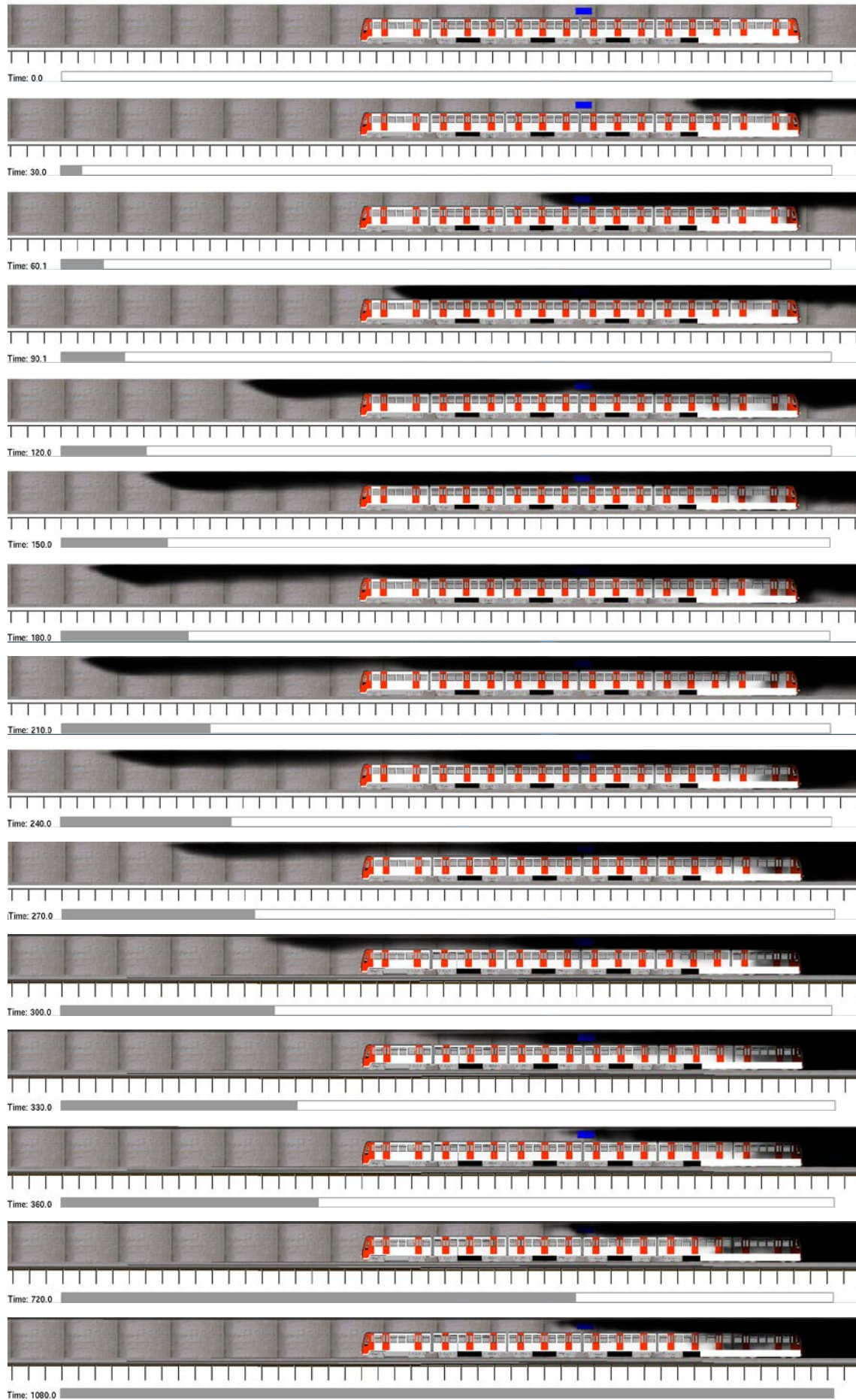


Figura 137. Velocidad de los humos.

Así pues se obtiene un caudal de:

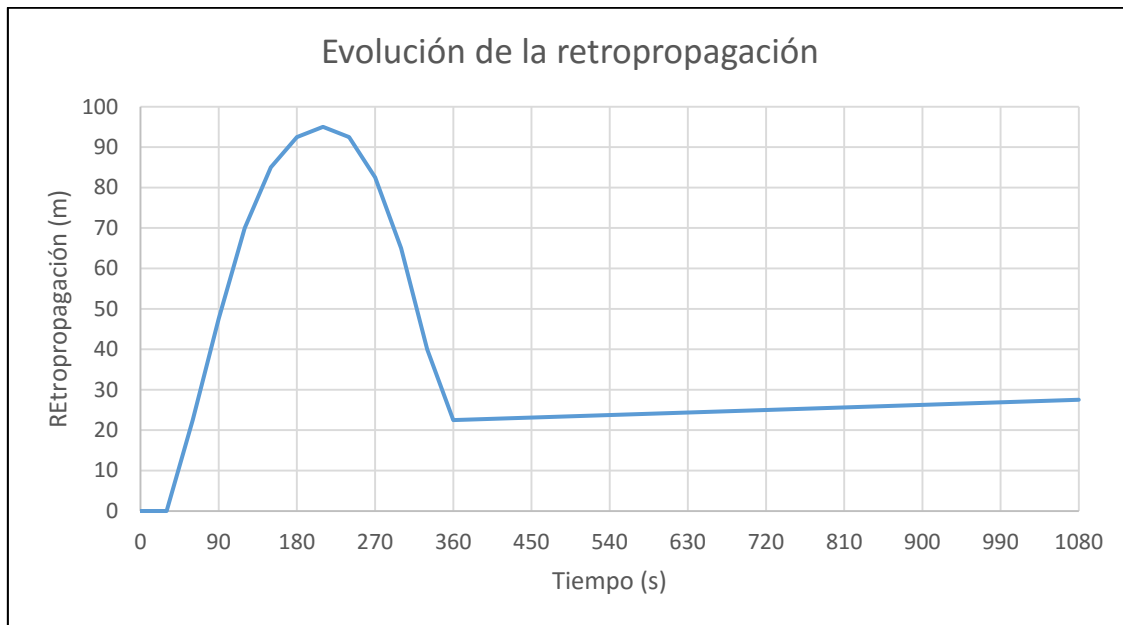
$$Q = 2 \cdot (V \cdot S) = 2 \cdot (2,21 \cdot 15) = 66,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como puede observarse el caudal de humos y gases calientes producidos es mayor de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ estando del lado de la seguridad.



En las imágenes anteriores extraídas de la simulación realizada en FDS se muestra el avance del humo en función del tiempo. Todas las imágenes cuentan en su inferior una graduación espacial con una distancia entre marcas de 2,5 metros empleadas para medir el avance del humo.

En la siguiente gráfica se presenta la longitud de retropropagación en función del tiempo.



Gráfica 21. Evolución de la longitud de retropropagación en función del tiempo.

Como puede observarse en el momento en que el sistema de ventilación comienza a funcionar a pleno rendimiento ($t=90$ segundos) el humo ha avanzado 47.5 metros con respecto a su origen en dirección al portal de entrada del túnel.

Un vez que el sistema de ventilación comienza a funcionar tarde 120 segundos ($t=210$ segundos) en revertir el avance del humo quedando la situación controlada 270 segundos después del arranque del sistema de ventilación ($t=360$ segundos).

A partir de este instante hasta el final de la simulación en $t=1080$ segundos, momento en el cual comienza a decaer el incendio se observa un ligero avance del humo en dirección al portal de entrada de 5 metros.

Se puede concluir que hay un control parcial del backlayering impidiendo su avance hacia el portal de entrada del túnel lo cual puede permitir que se produzca una evacuación de los ocupantes del tren en condiciones de seguridad.

Sin embargo se decide plantear un diseño de prueba con un mayor número de jet fans con el objeto de comprobar si al incrementar el empuje ofrecido por los jet fans produce un control total del backlayering.

5.7.3. Resultado del diseño de prueba 2

Con el objeto de tener un control total sobre el backlayering se plantea un nuevo diseño de prueba incrementando de 6 a 9 el número de jet fans. Para ello se divide la longitud del túnel en 6 sectores de 250 metros, instalándose dos jet fans en paralelos en los sectores indicados mientras que en el resto de sectores se mantiene la configuración de un único jet fan central, planteándose la siguiente configuración longitudinal:

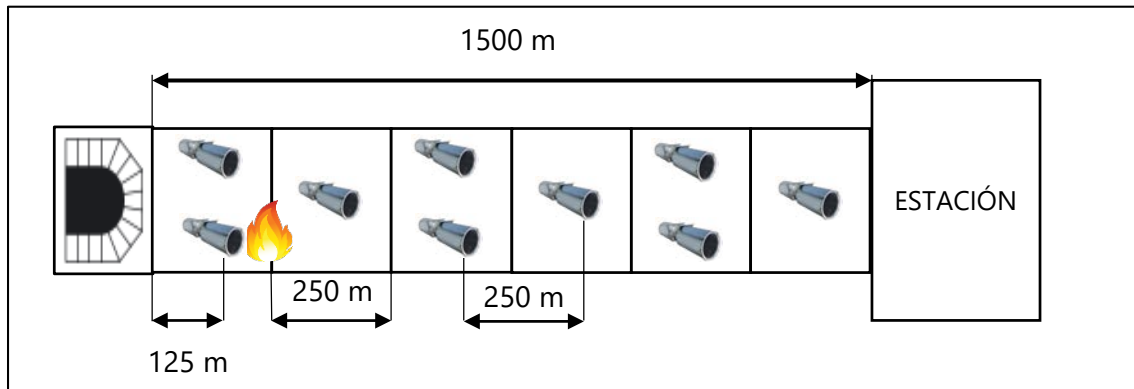


Figura 138. Configuración diseño de prueba.

La separación entre jet fans será de 250 metros entre sí superior a los 103 metros del predimensionado y a una distancia del portal de entrada como de la estación de 125 metros.

El incendio se produce en el primer vagón del convoy de metro que se dirige en dirección a la estación. La distancia del incendio al portal de entrada es de 150 metros.

Los jet fans en paralelo se instalarán con una distancia entre ejes de 7,5 metros tal y como se presenta en la siguiente sección:

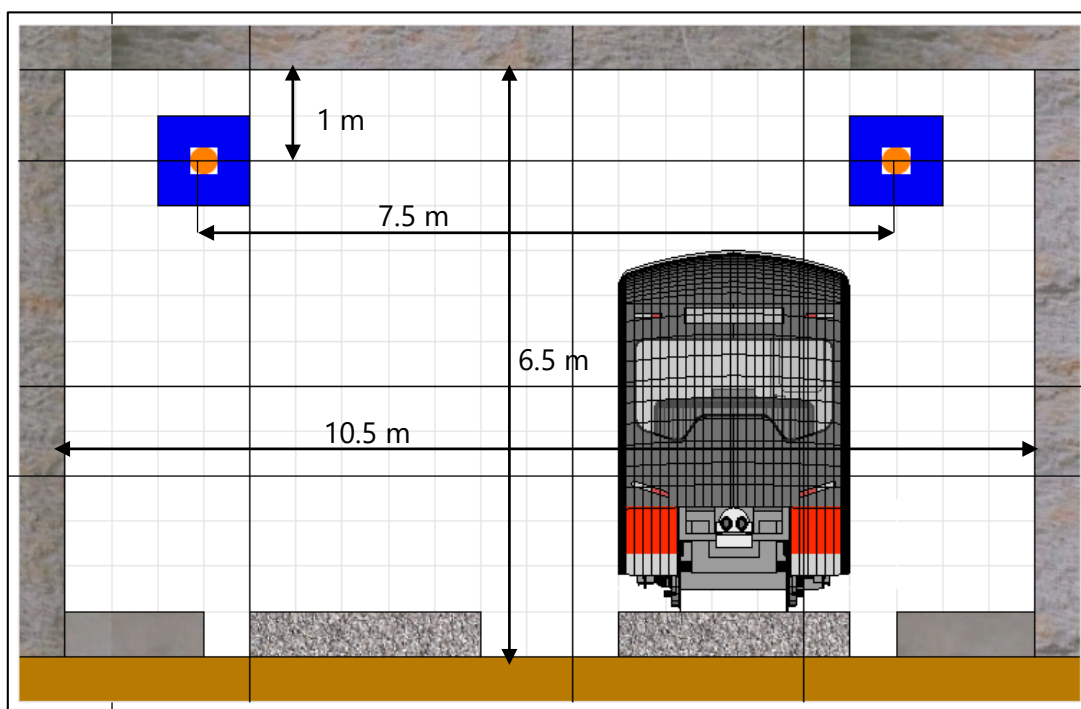


Figura 139. Sección del diseño de prueba con jet fans en paralelo.

Los tramos de túnel con un único jet fan presenta la siguiente sección:

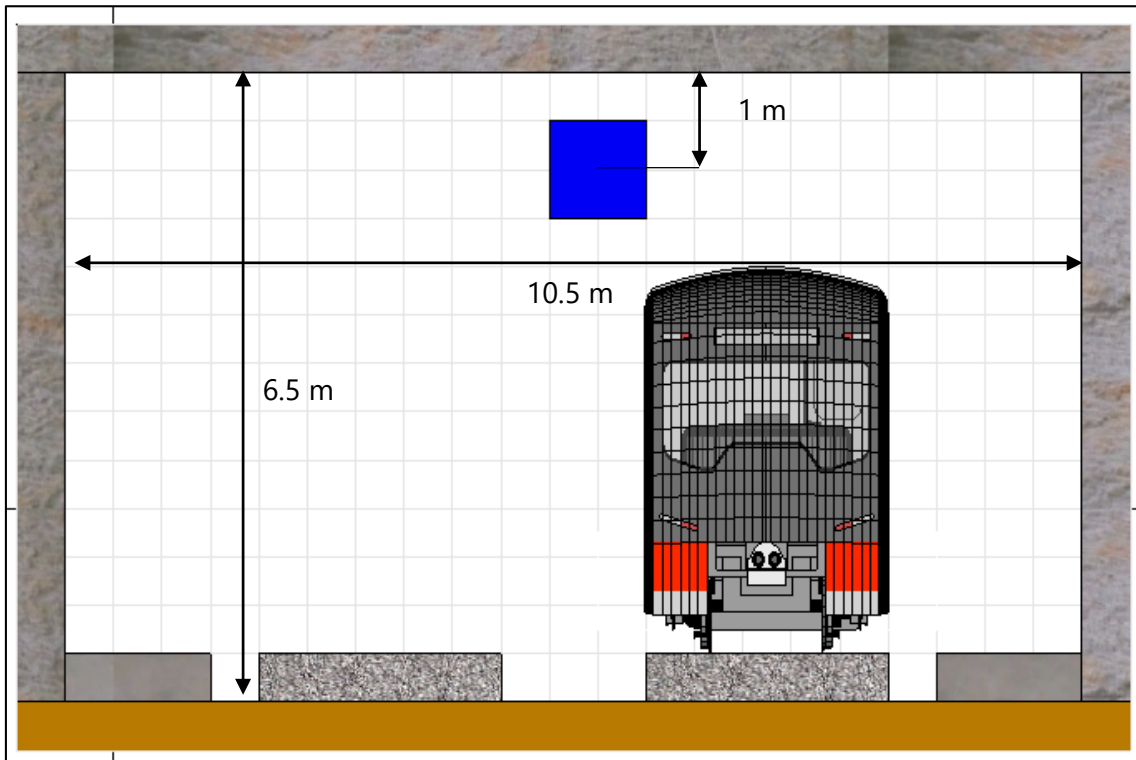


Figura 140. Sección del diseño de prueba.

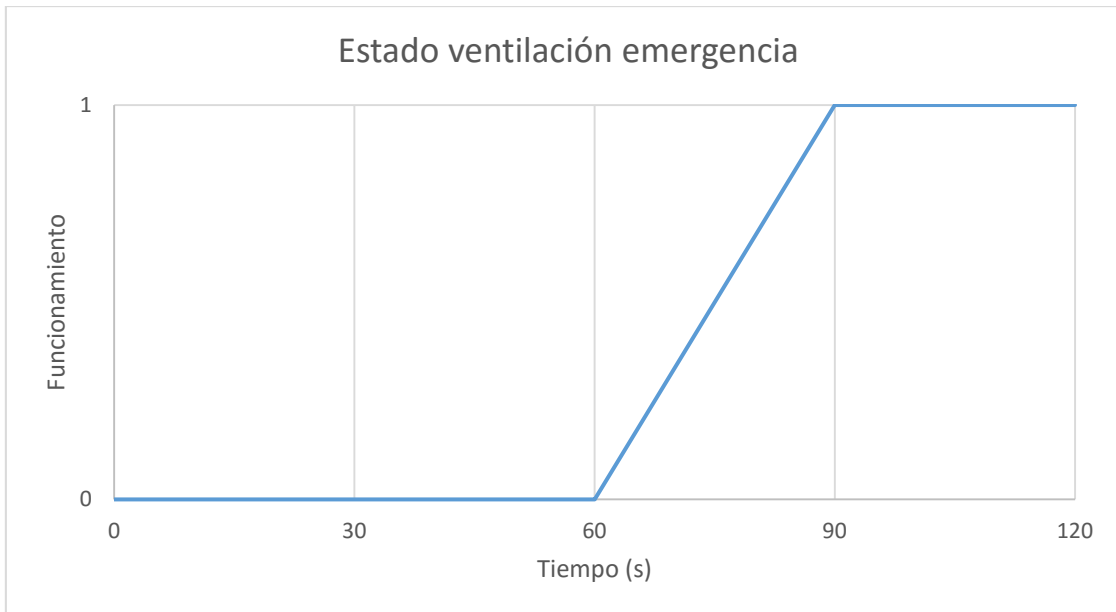
Del centro del jet fan a la superficie más próxima (el techo del túnel) hay un metro de distancia. El jet fan se monta a una altura de 5,5 metros sobre la plataforma de la vía.

La secuencia de funcionamiento de los ventiladores de acuerdo al establecido con la empresa gestora de la línea de metro se modela de la siguiente manera:

T=0 segundos. El tren está detenido y comienza el incendio.

T=60 segundos. Tras la detección del incendio por parte de un miembro de la empresa gestora de la línea de metro, se da la alarma al centro de control y se procede al arranque del sistema de ventilación de emergencia.

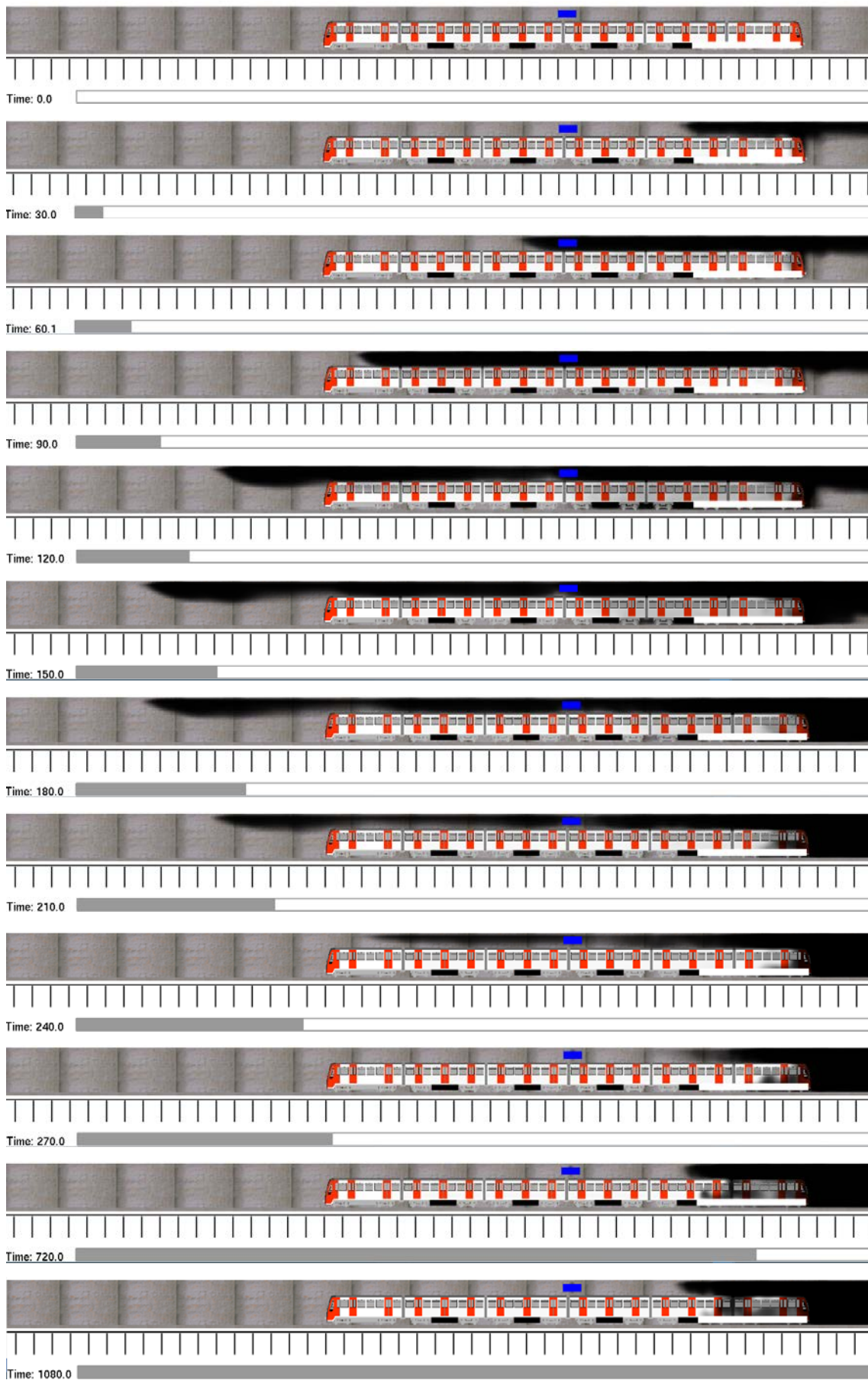
T=90 segundos. El sistema de ventilación de emergencia alcanza el régimen permanente del funcionamiento.



Gráfica 22. Arranque del sistema de ventilación de emergencia.

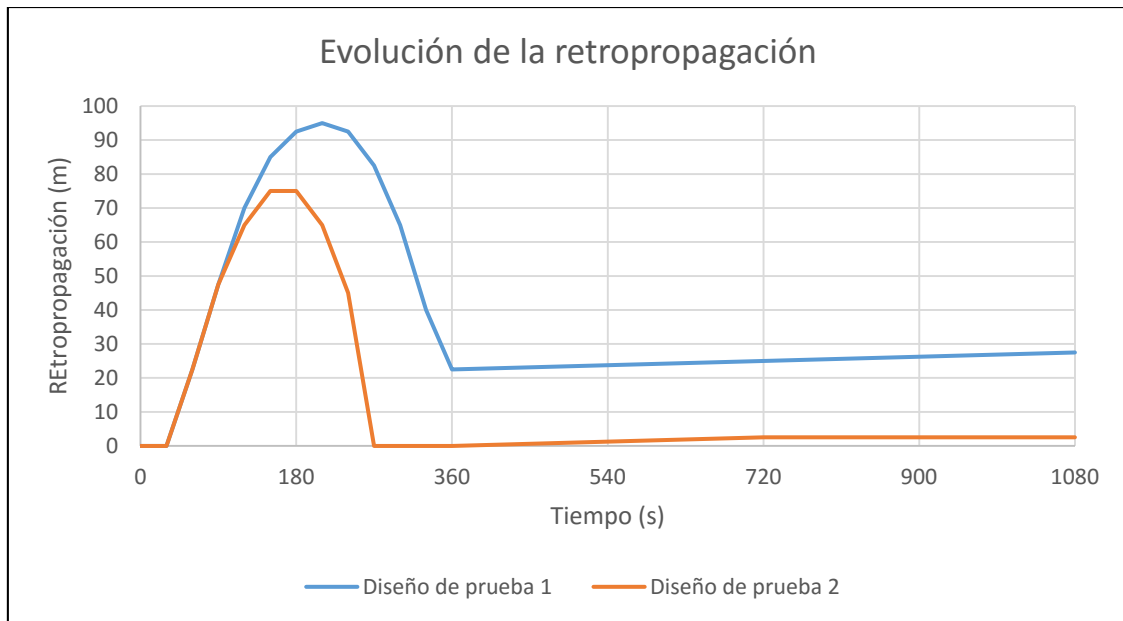
A continuación se muestran los resultados en función del tiempo del tiempo presentándose el avance de los humos en función del tiempo. Se medirá si se controla la retropropagación de los humos o backlayering, en que instante se produce.

Se presenta una imagen de la simulación cada 30 segundos hasta el instante en que controla el avance del humo. A partir de este instante se mostrarán los instantes $t=720$ segundos donde el incendio alcanza una potencia de 15 MW y el instante final de la simulación $t=1080$ segundos donde el incendio comienza a decaer.



En las imágenes anteriores extraídas de la simulación realizada en FDS se muestra el avance del humo en función del tiempo. Todas las imágenes cuentan en su inferior una graduación espacial con una distancia entre marcas de 2,5 metros empleadas para medir el avance del humo.

En la siguiente gráfica se presenta la longitud de retropropagación en función del tiempo comparando el resultado con el del diseño de prueba 1.



Gráfica 23. Evolución de la longitud de retropropagación en función del tiempo.

Como puede observarse en el momento en que el sistema de ventilación comienza a funcionar a pleno rendimiento ($t=90$ segundos) el humo ha avanzado 47.5 metros con respecto a su origen en dirección al portal de entrada del túnel.

Un vez que el sistema de ventilación comienza a funcionar tarda 60 segundos ($t=150$ segundos) en revertir el avance del humo quedando la situación controlada 210 segundos después del arranque del sistema de ventilación ($t=270$ segundos).

A partir de este instante hasta el final de la simulación en $t=1080$ segundos, momento en el cual comienza a decaer el incendio se observa un ligero avance del humo en dirección al portal de entrada de 2.5 metros.

Se puede concluir que hay un control total del backlayering impidiendo su avance hacia el portal de entrada del túnel lo cual puede permitir que se produzca una evacuación de los ocupantes del tren en condiciones de seguridad.

Se acepta este diseño de prueba de premodelado del sistema de ventilación de emergencia para realizar los diferentes escenarios de incendio tipo y validar el diseño de prueba de la instalación.

5.7.4. Resultado del diseño de prueba 3

Finalmente con el fin de observar si el resultado obtenido mejora en el ámbito temporal debido a la instalación de un mayor número de ventiladores se plantea un diseño de prueba con un total de 12 ventiladores, similar al diseño de prueba 1, pero instalando en cada uno de los 6 sectores generados en el túnel una pareja de jet fans en paralelo.

Se divide la longitud del túnel en 6 sectores de 250 metros, instalándose dos jet fans en paralelos en cada sector, planteándose la siguiente configuración longitudinal:

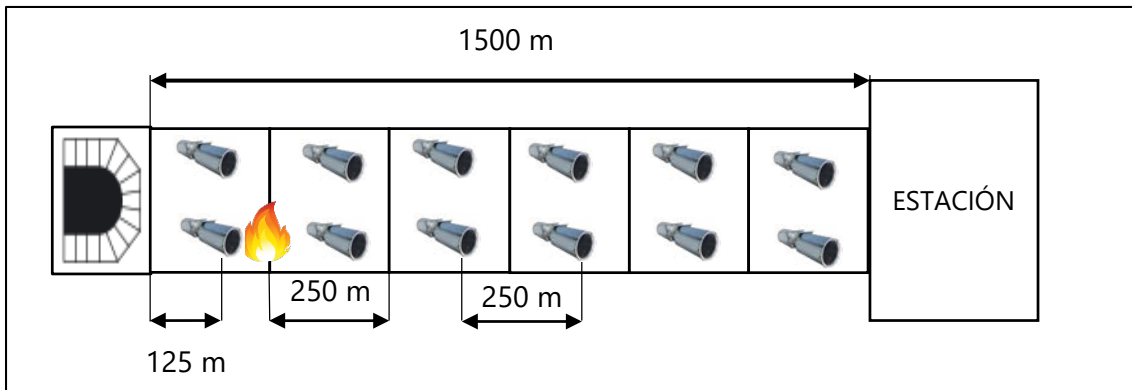


Figura 141. Configuración diseño de prueba.

La separación entre jet fans será de 250 metros entre sí superior a los 103 metros del predimensionado y a una distancia del portal de entrada como de la estación de 125 metros.

El incendio se produce en el primer vagón del convoy de metro que se dirige en dirección a la estación. La distancia del incendio al portal de entrada es de 150 metros.

Los jet fans en paralelo se instalarán con una distancia entre ejes de 7,5 metros tal y como se presenta en la siguiente sección:

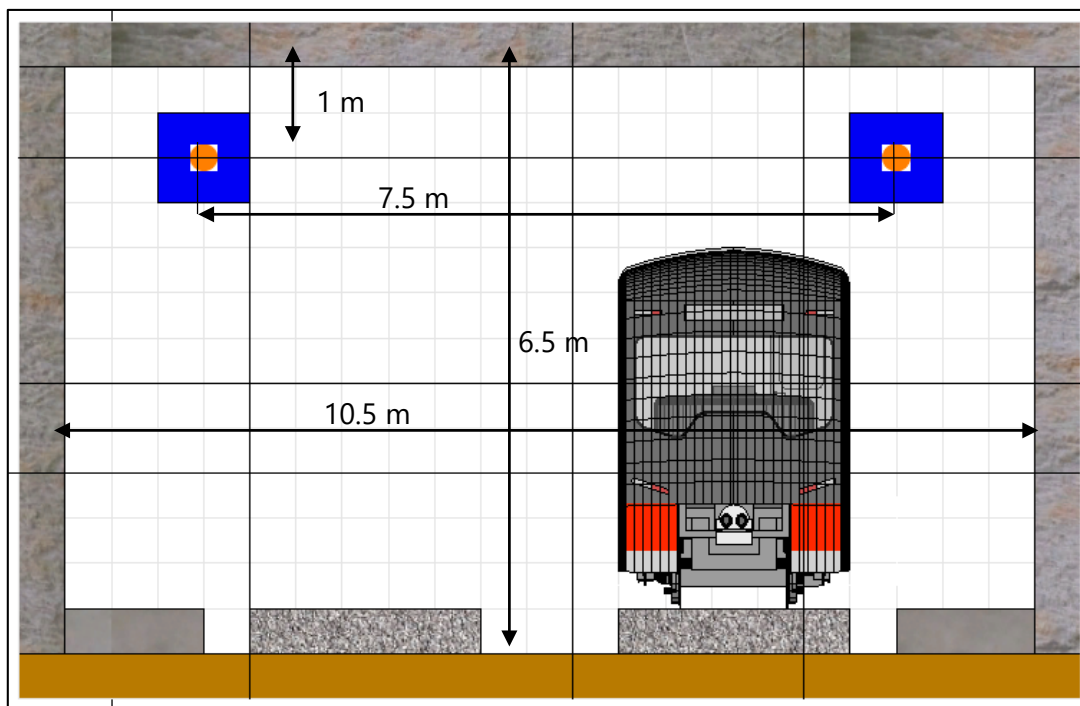


Figura 142. Sección del diseño de prueba con jet fans en paralelo.

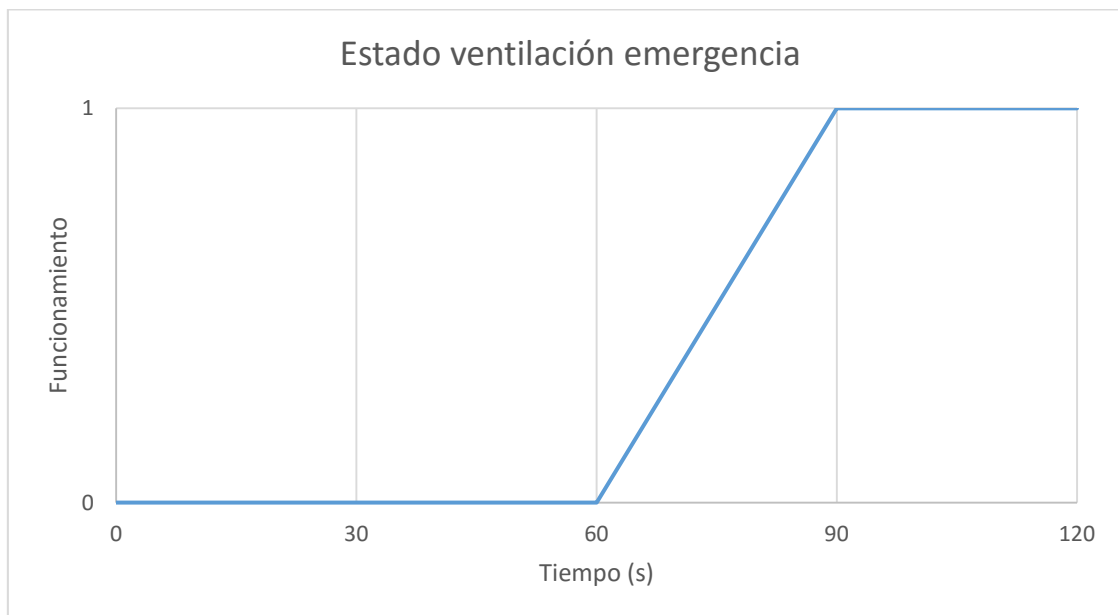
Del centro del jet fan a la superficie más próxima (el techo del túnel) hay un metro de distancia. El jet fan se monta a una altura de 5,5 metros sobre la plataforma de la vía.

La secuencia de funcionamiento de los ventiladores de acuerdo al establecido con la empresa gestora de la línea de metro se modela de la siguiente manera:

T=0 segundos. El tren está detenido y comienza el incendio.

T=60 segundos. Tras la detección del incendio por parte de un miembro de la empresa gestora de la línea de metro, se da la alarma al centro de control y se procede al arranque del sistema de ventilación de emergencia.

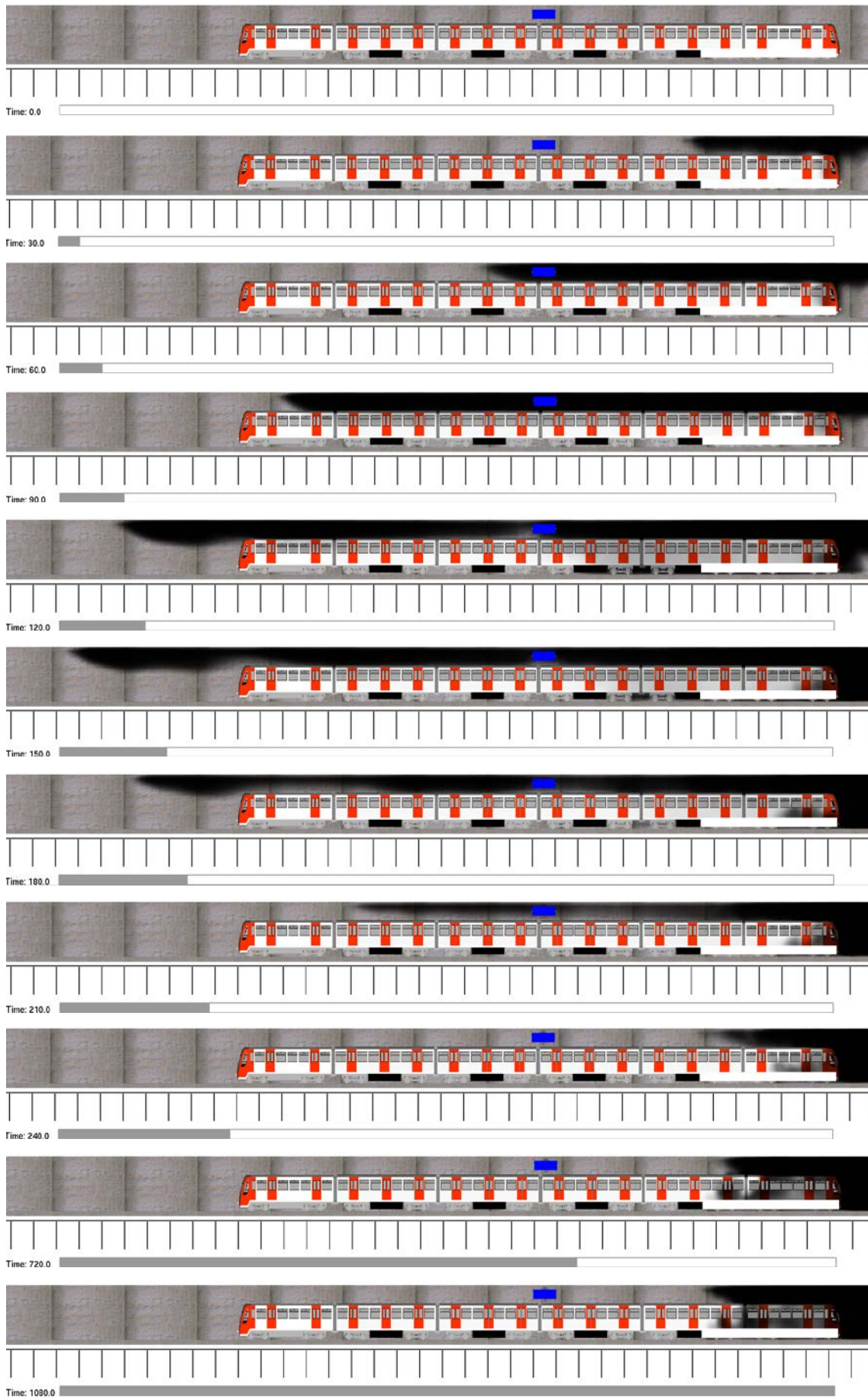
T=90 segundos. El sistema de ventilación de emergencia alcanza el régimen permanente del funcionamiento.



Gráfica 24. Arranque del sistema de ventilación de emergencia.

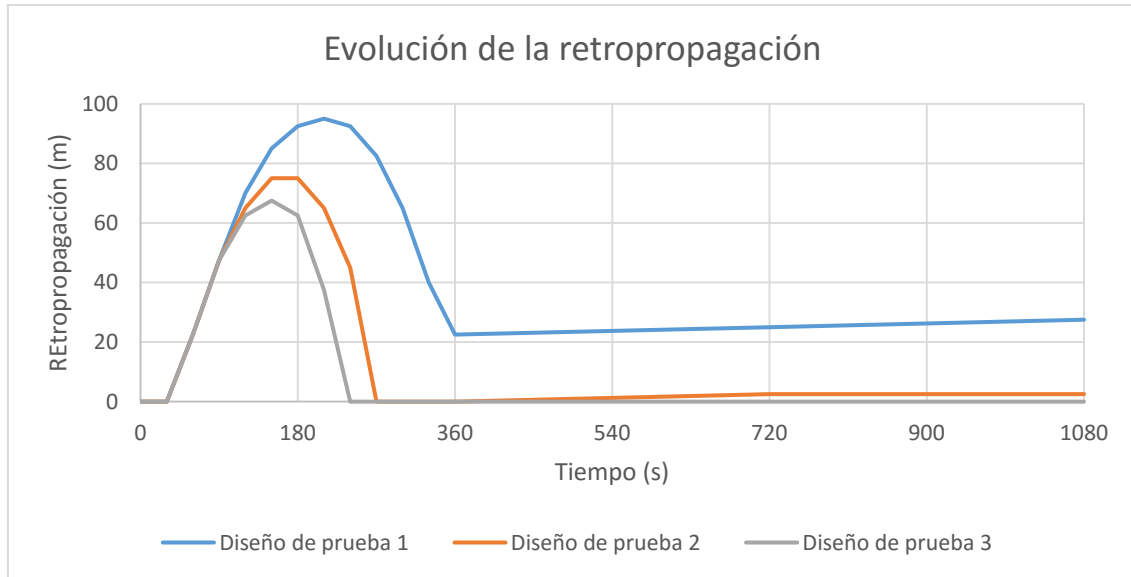
A continuación se muestran los resultados en función del tiempo del tiempo presentándose el avance de los humos en función del tiempo. Se medirá si se controla la retropropagación de los humos o backlayering, en que instante se produce.

Se presenta una imagen de la simulación cada 30 segundos hasta el instante en que controla el avance del humo. A partir de este instante se mostrarán los instantes $t=720$ segundos donde el incendio alcanza una potencia de 15 MW y el instante final de la simulación $t=1080$ segundos donde el incendio comienza a decaer.



En las imágenes anteriores extraídas de la simulación realizada en FDS se muestra el avance del humo en función del tiempo. Todas las imágenes cuentan en su inferior una graduación espacial con una distancia entre marcas de 2,5 metros empleadas para medir el avance del humo.

En la siguiente gráfica se presenta la longitud de retropropagación en función del tiempo comparando el resultado con los diseños de prueba anteriores.



Gráfica 25. Evolución de la longitud de retropropagación en función del tiempo.

Como puede observarse en el momento en que el sistema de ventilación comienza a funcionar a pleno rendimiento ($t=90$ segundos) el humo ha avanzado 47.5 metros con respecto a su origen en dirección al portal de entrada del túnel.

Un vez que el sistema de ventilación comienza a funcionar tarda 60 segundos ($t=150$ segundos) en revertir el avance del humo quedando la situación controlada 150 segundos después del arranque del sistema de ventilación ($t=240$ segundos).

A partir de este instante hasta el final de la simulación en $t=1080$ segundos, momento en el cual comienza a decaer el incendio no se observa avance del humo en dirección al portal de entrada.

Se puede concluir que hay un control total del backlayering impidiendo su avance hacia el portal de entrada del túnel lo cual puede permitir que se produzca una evacuación de los ocupantes del tren en condiciones de seguridad.

En caso de que el predimensionado realizado en el diseño de prueba 2 no sea validado como diseño final, a través de cumplir las metas en los diferentes escenarios de incendio tipo que se plantearan en capítulos posteriores, se repetirá el proceso empleando el diseño de prueba 3.

6. Modelo de evacuación. RSET y ASET

6.1. Introducción

Tal como se introdujo en el capítulo 1 del presente trabajo final de máster las metas del diseño de la instalación de ventilación de emergencia en túneles en caso de incendio son por orden de importancia:

- 32) Seguridad de vida
- 33) Seguridad estructural
- 34) Mantenimiento del servicio
- 35) Limitar impacto ambiental

En particular el cumplimiento de la meta número 1, Seguridad de vida, pasa por la verificación de dos objetivos fundamentales:

Objetivo 1.1

Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para facilitar la evacuación de los viajeros y de la tripulación mediante la comprobación $ASET > RSET$. El objeto de este capítulo consiste en definir los conceptos de ASET y RSET, y cómo calcularlos.

Objetivo 1.2

Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para facilitar la intervención de los equipos de intervención y rescate mediante la comprobación de que el ASRT es mayor de 120 minutos. El ASRT o available secure rescue time es el tiempo durante el cual el túnel dispone de condiciones de salubridad adecuadas para que los equipos de rescate puedan acceder a asistir al lugar del incendio.

6.2. ASET y RSET. Cálculo del RSET

En el ámbito normativo para la consecución de la meta Seguridad de Vida se establecen además de unas condiciones de salubridad que deben cubrirse con la instalación de ventilación de emergencia, unos recorridos máximos desde cualquier punto del túnel hasta la salida segura.

En particular para la IST2006 [4] como ya se especificó en el capítulo 2 Túneles, para los recorridos de evacuación se exige:

Distancia máxima desde cualquier punto del túnel hasta una zona libre de humos fuera del tubo afectado: 750 m (equivalente a un tiempo aproximado de recorrido de 12 minutos), salvo que se justifique que se alcanza un nivel de seguridad equivalente con la implantación de medidas alternativas. Esta distancia es un máximo maximorum de tipo general, aplicable en ausencia de otros valores más limitativos establecidos para determinados tipos de ruta, en función del tráfico.

Puesto que para el diseño del sistema de ventilación de emergencia se está empleando un diseño prestacional y no basado en prescripciones, se deberá demostrar que pese a que el túnel no cumple lo prescrito por la normativa ya que su longitud es de 1.500 metros y no cuenta con salida de evacuación intermedias.

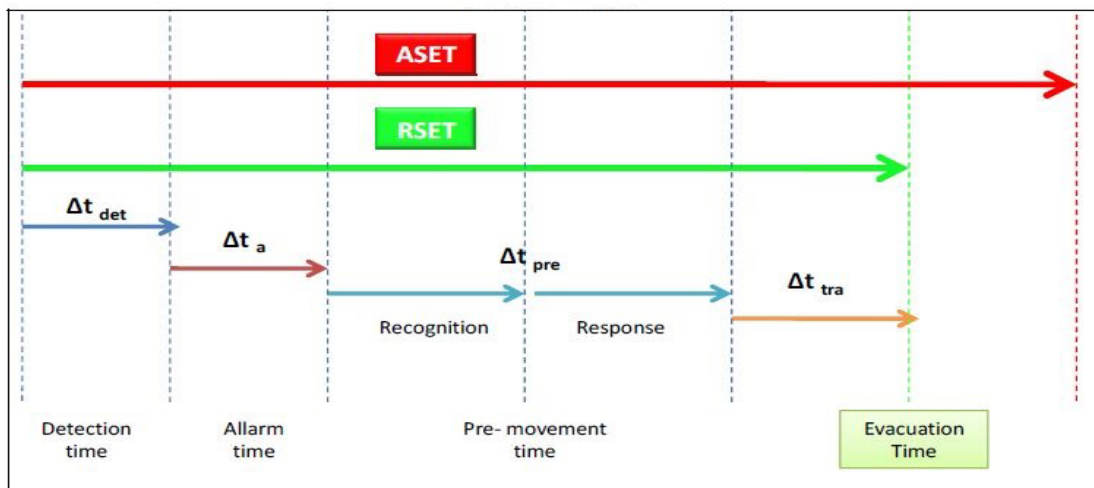


Figura 143. ASET y RSET

ASET es el acrónimo de Available Safety Egress Time y consiste en el periodo de tiempo durante el cual las vías de evacuación de un recinto presentan condiciones de salubridad suficientes para que los eventuales ocupantes puedan escapar a una zona segura a través de ellas.

RSET es el acrónimo de Required Safety Egress Time y consiste en el periodo de tiempo necesario para realizar una evacuación de emergencia a través de las vías de evacuación.

Como es evidente, si el tiempo disponible para evacuar ASET, es mayor que el tiempo requerido para realizar la evacuación RSET, se cumplirá el objetivo 1.1 de la meta 1 Seguridad de Vida. El objeto de este capítulo es definir como se obtiene el RSET a partir de un modelo de evacuación.

En la figura 1 aparece un esquema temporal donde se comparan el ASET y RSET de una evacuación de emergencia la cual se realiza en condiciones de seguridad ya que el RSET es menor que el ASET. Se puede observar que el RSET está compuesto de cuatro periodos o tiempos de acuerdo a la siguiente expresión:

$$t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + (\Delta t_{pre} + \Delta t_{trav}) \quad Ec (6.1)$$

Donde de acuerdo con la CFPA-E No 19:2009 Fire safety engineering concerning evacuation from buildings **[13]** se tiene:

Tiempo de detección Δt_{det} (detection time):

Es el tiempo desde que se produce el incendio hasta que el sistema de detección lo detecta. Es función del tipo de fuego y el sistema de detección empleado. Debe tenerse en cuenta que las diferentes tecnologías de detección (detectores ópticos, iónicos, térmicos...) no son adecuadas para todos los tipos de fuego o todos los usos.

Es fundamental que el sistema de detección sea lo más rápido posible sin que produzca falsas alarmas.

Tiempo de alarma Δt_a (Alarm time):

Es el tiempo desde que un sistema de detección advierte el inicio de un fuego hasta que comienza a sonar el sistema de alarma. Aunque pueda suponerse que este tiempo tiende a ser nulo, la realidad puede ser bien distinta. Muchas veces en función del tipo de detector de emplear, se pueden producir falsas alarmas. Para evitar estas situaciones muchas veces se condiciona al sistema de alarma a no entrar en funcionamiento hasta que se produzcan dos alarmas en la misma zona, o bien un agente se desplace hasta la zona de la alarma y confirme visualmente el incendio o se verifique mediante un sistema de CCTV, activando la alarma de forma manual.

Así pues se buscará que el tiempo de alarma sea lo menor posible, evitando en cualquier caso las falsas alarmas.

Tiempo de pre-movimiento Δt_{pre} (pre-movement time):

Es el tiempo desde que empieza a sonar la alarma hasta que el primer ocupante comienza la evacuación y no hasta el instante en el cual el primer ocupante abandona el edificio como se refleja en la Fig. 1 de la NTP 436 **[62]**.

Este periodo es determinante en una evacuación en caso de incendio. El ejemplo que mejor ilustra este periodo es lo producido tras la activación de una alarma sonora de incendios en un centro comercial. Dado un centro comercial, con gran cantidad de ocupantes, los cuales centran su atención en diferentes puntos (tiendas, bares, locales de ocio), cuando comienza a sonar la alarma de incendios, la ocupación no le da importancia y prosigue con sus actividades. Solo se comienza la evacuación en caso de visión directa del fuego, o bien cuando los ocupantes ven a otros ocupantes comenzar la evacuación. Este tiempo en función del uso de los locales a proteger y el tipo de ocupación oscila entre varios segundos a varios minutos.

Tiempo propio de evacuación Δt_{trav} (travelling time):

Es el tiempo desde que le primer ocupante comienza a evacuar hasta que el ultimo ocupante abandona el edificio. Este periodo depende los dos tipos de usuarios que existan en los edificios. Usuarios conocedores del edificio y no conocedores.

El usuario conocedor del edificio está adiestrado y conoce la ruta de escape óptima en condiciones de seguridad, gracias al plan de emergencia. El tiempo en realizar la evacuación es de pocos minutos.

El usuario no conocedor del edificio presenta la problemática de que en situación de alarma pueda desorientarse y no encontrar el espacio exterior seguro. Para remediar esta situación se ubicarán en posiciones estratégicas los planos con recorridos de evacuación y la señalética reglamentaria para facilitar el escape en condiciones de seguridad del edificio.

Una vez conocido el significado del RSET y los elementos que lo componen es necesario definir un método para su cálculo. A continuación se definen los siguientes métodos de cálculo del RSET con el objeto de seleccionar el más adecuado de acuerdo con el marco del presente trabajo de fin de master.

- 36) Método de cálculo de la NTP 436. Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación
- 37) Método de cálculo de la NFPA 130. Estándar sobre Sistemas Ferroviarios para Transporte de Vehículos y Viajeros sobre guías Fijas
- 38) Método de cálculo de la guía europea CFP No. 19. Fire safety engineering concerning evacuation from buildings

6.2.1. Método de cálculo de la NTP 436. Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación

En la actualidad el único documento español, de no obligado cumplimiento, que trata sobre el RSET o tiempo requerido para la evacuación es la NTP 436 , Nota Técnica de Prevención 436 "Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación" [62] publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo, en la que se enuncia que un evacuación de emergencia es satisfactoria si se realiza en condiciones de seguridad en menos de un tiempo determinado.

Para analizar el tiempo total de evacuación la NTP 436 introduce los mismos términos que los empleados por la guía europea CFPA 19 que se definen a continuación:

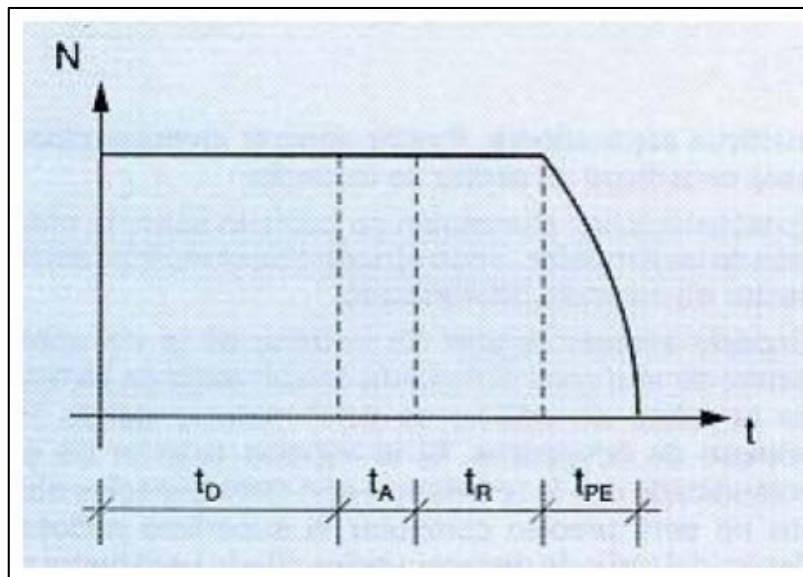


Figura 144. Curva tiempo ocupación de la NTP 436.

Siendo el tiempo total de evacuación (RSET) :

$$t = t_D + t_A + t_R + t_{PE} \quad Ec (6.2)$$

Donde

Tiempo detección t_D :

Tiempo que el sistema de detección tarda en detectar una amenaza. El tiempo de detección podría oscilar entre un máximo de 10 minutos en el caso de detección por el personal presente o de vigilancia y menos de 1 minuto para el caso de haber central de alarma automatizada.

Tiempo de alarma t_A :

El tiempo de alarma es el propio de emisión de (los mensajes correspondientes) por los medios de megafonía, luces o sonidos codificados. Este tiempo depende de la bondad técnica y de comunicación colectiva de los mencionados mensajes.

El tiempo de alarma es el propio de la emisión de los mensajes, luces o sonidos codificados y no debería ser superior a 1 minuto.

Tiempo de retardo t_R :

El tiempo de retardo es el asignado para que el colectivo de personas a evacuar asimilen los mensajes de alarma e inicien el movimiento hacia los itinerarios correspondientes de salida. Influye de una manera importante en la disminución de t_R la eficacia de comunicación de los mensajes y la buena organización del personal de ayuda para la evacuación.

El tiempo de retardo en situaciones con personal adiestrado en el plan de emergencia no debería superar el minuto. En todo caso podría alcanzar hasta 5 minutos o más si no hay un plan de emergencia correctamente implantado. Es equivalente al tiempo de pre movimiento definido por la guía europea CFPA No. 19.

Tiempo propio de evacuación t_{PE} :

El tiempo propio de evacuación se inicia en el momento que las primeras personas usan las vías de evacuación con intención de salir al lugar seguro preindicado. Se puede contar aproximadamente desde la salida del primer evacuado. Se calcula como cociente entre el espacio a recorrer desde el punto más desfavorable (el que se encuentra a mayor distancia de la salida) y la velocidad de un ocupante (1m/s).

Como puede observarse la diferencia principal en la definición de los cuatro periodos que componen el RSET definidos por la NTP 436 y la guía europea CFPA No.19 radica en el umbral entre el tiempo de retardo y el tiempo propio de evacuación. Mientras que en la CFPA el tiempo propio de evacuación comienza con el movimiento hacia la zona segura del primer ocupante, en la NTP 436 comienza una vez que el primer ocupante abandona el recinto. En la siguiente figura se observa la comparación de los cuatro tiempos descritos por ambos textos mostrando en rojo los valores de la CFPA No. 19 y en negro los valores de la NTP 436.

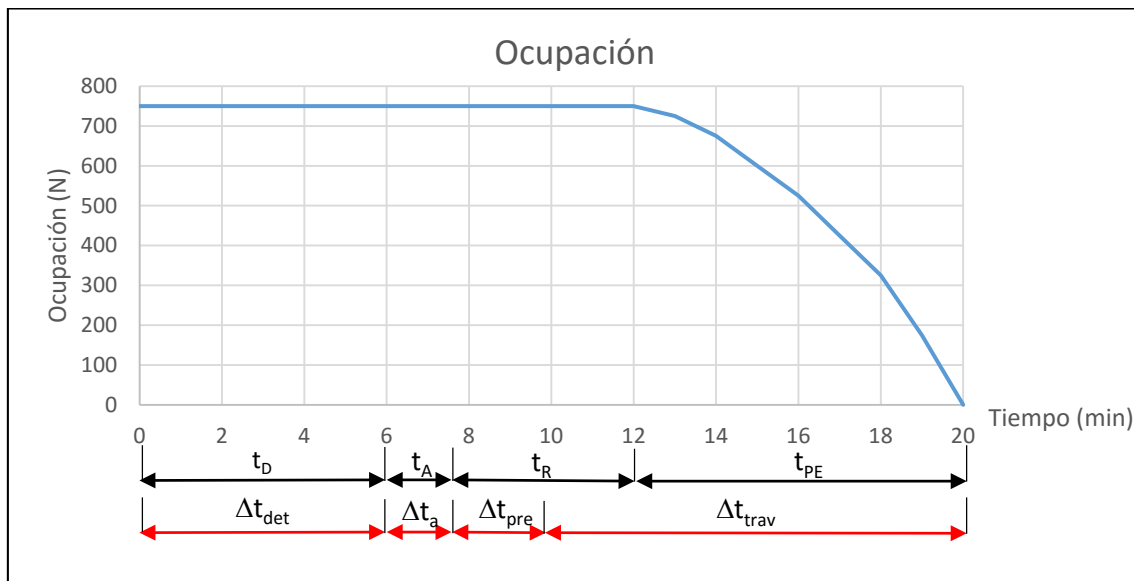


Figura 145. Comparación de los 4 periodos que componen el RSET de acuerdo a CFPA 19 (rojo) y NTP 436 (negro).

La problemática fundamental que presenta la NTP 436 para calcular el RSET se encuentra en el método de cálculo del tiempo propio de evacuación.

Para el cálculo del tiempo propio de evacuación no se tiene en cuenta el efecto de la ocupación sobre las vías de evacuación, las cuales admiten un flujo máximo de ocupantes en función de sus características geométricas.

Así pues no quedaría reflejado en el cálculo del RSET el incremento de tiempo producido por las colas en los cuellos de botella existentes en las vías de evacuación como pueden ser encuentros entre varias rutas, pasos por puerta o cambios de pendiente.

6.2.2. Método de cálculo de la NFPA 130. Estándar sobre Sistemas Ferroviarios para Transporte de Vehículos y Viajeros sobre guías Fijas

En la NFPA 130 [9] en su Anexo C. Evacuación de Emergencia, se presenta un método de cálculo del tiempo propio de evacuación que corrige las deficiencias de la NTP 436 enfocado específicamente para estaciones de metro y túneles.

En primer lugar el método propuesto tiene en cuenta la ocupación de la estación de metro para el cálculo del tiempo de evacuación lo cual se obviaba en la NTP 436, mediante la carga ocupacional de los diferentes elementos que componen las vías de evacuación. La NFPA 130 calcula el tiempo de evacuación de emergencia como la suma del tiempo de desplazamiento por la ruta de salida más larga, más los tiempos de espera en los diversos elementos de circulación presentes. Los tiempos de espera se calculan para las salidas de andén restando el tiempo de desplazamiento por el andén, del tiempo de flujo de salida del andén. Para cada uno de los restantes de elementos de circulación, se calcula restando el máximo de todos los tiempos de flujo de los elementos previos.

Los tiempos de circulación se calculan a través de los valores que se presentan mediante dos ejemplos de cálculo. En la siguiente figura aparecen los tiempos de desplazamiento que se emplean:

Elemento de Evacuación	mm	In.	p/mm-min	pim	p/min
<i>Andén a vestíbulo conexión</i>					
Escaleras (4)	7315	288	0.0555	1.41	406
Escaleras mecánicas (2*)	1219	48	0.0555	1.41	68
Escaleras emergencia (2)	2438	96	0.0555	1.41	135
Ensayo escalera mecánica: 8,67% (menor de 50%)					609
<i>Paso barrera venta billetes</i>					
Puertas recogida billetes (4) (capacidad 50 por puerta)					200
Puertas de servicio (1)	1219	48	0.0189	2.08	100
Puertas salida emergencia (2)	3658	144	0.0189	2.08	300
					600
<i>Barreras venta billetes a lugar seguro (descarga al exterior)</i>					
Escaleras	0	0	0.0555	1.41	0
Escaleras mecánicas	0	0	0.0555	1.41	0
Escaleras emergencia	0	0	0.0555	1.41	0
Ensayo escalera mecánica: 0,00% (menor de 50%)					0
Tiempo de Desplazamiento Ruta Más Larga					
	m	ft	m/min	fpm	minutos
<i>Andén a lugar seguro</i>					
Sobre andén T ₁	41.4	136	37.7	124	1.09
Desde andén a vestíbulo conexión T ₂	9.1	30	14.6	48	0.62
Sobre vestíbulo conexión T ₃	16.4	34	37.7	124	0.43
De vestíbulo conexión a nivel suelo T ₄	0	0	14.6	48	0
De nivel suelo a lugar seguro T ₅	3.05	10	37.8	124	0.08
Tiempo total de desplazamiento = T ₁ + T ₂ + T ₃ + T ₄ + T ₅					2.14

Figura 146. Tiempos de desplazamiento para el cálculo de la evacuación de emergencia de la NFPA 130.

Para la determinación de los tiempos de espera de cada elemento se emplea el cociente entre la carga ocupacional del elemento (personas) y la capacidad de evacuación del elemento (personas/minuto) obteniendo en minutos el tiempo de espera.

Este método se considera más adecuado para el cálculo del tiempo propio de evacuación de emergencia en un túnel de metro.

Sin embargo puesto que la NFPA no tiene en cuenta el resto de componentes del RSET se buscará otro método para su cálculo.

6.2.3. Método de cálculo de la guía europea CFP No. 19. Fire safety engineering concerning evacuation from buildings

Cuando se ha presentado el concepto de RSET se ha realizado a partir de las definiciones de la CFP No.19 la cual además determina una metodología para el cálculo del RSET a través de su Anexo D. Cálculo del RSET, siendo este el método que se empleará para su cálculo en el presente trabajo final de master.

Recordando lo expuesto con anterioridad el RSET consta de cuatro componentes.

$$t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + (\Delta t_{pre} + \Delta t_{trav}) \quad Ec (6.1)$$

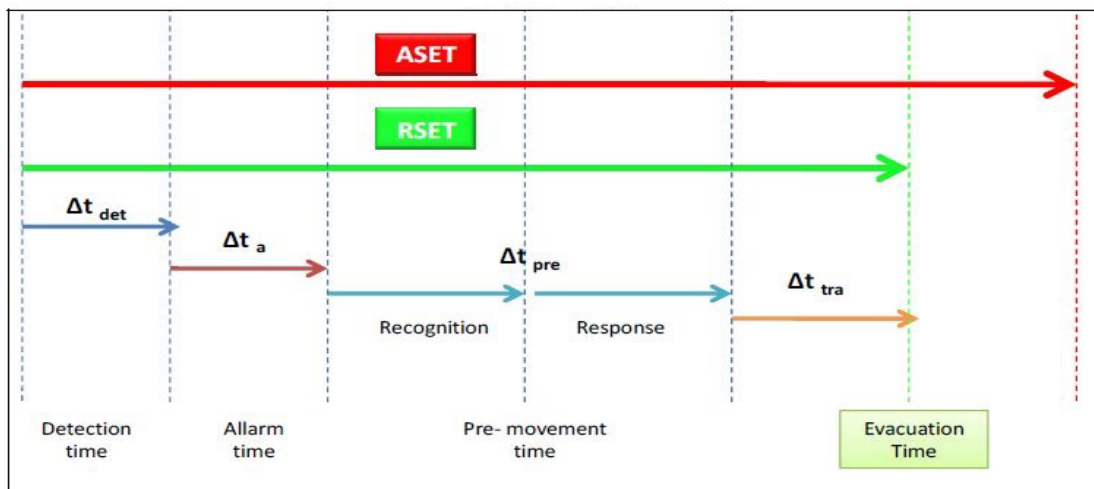


Figura 147. ASET y RSET

6.2.3.1. Tiempo de detección Δt_{det}

Es el tiempo desde que se produce el incendio hasta que el sistema de detección lo detecta. Es función del tipo de fuego y el sistema de detección empleado. Debe tenerse en cuenta que las diferentes tecnologías de detección (detectores ópticos, iónicos, térmicos...) no son adecuadas para todos los tipos de fuego o todos los usos.

Es fundamental que el sistema de detección sea lo más rápido posible sin que produzca falsas alarmas.

En el caso de existir un sistema de detección automático de incendios, el tiempo de detección queda definido por el instante de la detección desde el inicio del incendio. La naturaleza del sistema de detección y su sensibilidad influirá considerablemente en la reducción de este tiempo.

En caso de no existir un sistema de detección automático deberá estimarse a criterio del proyectista el tiempo de detección teniendo en cuenta:

- 39) Las características de los ocupantes
- 40) Las características del recinto del incendio
- 41) Las características del fuego

6.2.3.2. Tiempo de alarma Δt_a

Es el tiempo desde que un sistema de detección advierte el inicio de un fuego hasta que comienza a sonar el sistema de alarma. Aunque el lector de este trabajo final de master puede pensar que este tiempo tiende a ser nulo, la realidad puede ser bien distinta. Muchas veces en función del tipo de detector de emplear, se pueden producir falsas alarmas. Para evitar estas situaciones muchas veces se condiciona al sistema de alarma a no entrar en funcionamiento hasta que se produzcan dos alarmas en la misma zona, o bien un agente se desplace hasta la zona de la alarma y confirme visualmente el incendio, activando la alarma de forma manual.

La guía europea CFP No. 19 se basa para el cálculo del tiempo de alarma en lo expuesto en la PD 7974-6:2004 " Human factors: Life safety strategies. Occupant evacuation, behaviour and condition" [63].

En la PD 7974-6:2004 se definen tres niveles de alarma diferentes en función del sistema de alarma que presente el recinto de incendio.

Nivel A1: El recinto de incendio cuenta con un sistema de alarma automático. En el instante en que se detecta el incendio comienza a sonar la alarma siendo $\Delta t_a = 0$.

Nivel A2: El recinto cuenta con sistema de alarma automático pero cuenta con un sistema de pre alarma en el cual se debe validar por medio del plan de emergencia la actuación a seguir. En algunos casos requiere una validación por parte del personal para descartar una falsa alarma. Para este nivel Δt_a oscila entre 2 y 5 minutos.

Nivel A3: El sistema de alarma se dispara a través de pulsadores de alarma de incendio en las inmediaciones del fuego. La estimación de este valor depende tanto de la naturaleza del recinto como del tipo de ocupación.

6.2.3.3. Tiempo de premovimiento Δt_{pre}

Es el tiempo desde que empieza a sonar la alarma hasta que el primer ocupante comienza la evacuación. El tiempo de premovimiento presenta una distribución log-normal entre los ocupantes del edificio. El número de ocupantes que comienzan a evacuar crecerá rápidamente.

El tiempo de pre movimiento cuenta con dos fases. La primera fase es la fase de reconocimiento siendo el tiempo que tarda los usuarios en reconocer la alarma como la señal de que existe una amenaza en el recinto en forma de incendio y éste debe ser abandonado con la mayor celeridad posible. La segunda fase es la fase de respuesta y el tiempo que tardan los ocupantes del recinto en detener la actividad que están llevando a cabo para comenzar la evacuación.

De acuerdo con la CFP No. 19 es muy difícil evaluar el tiempo de pre-movimiento ya que depende de muchos factores y entre ellos se encuentra el comportamiento humano.

Para el cálculo del tiempo de premovimiento se proponen dos metodologías.

La primera y más sencilla es a través de una tabla publicada por el British Standard Institute en el año 1997 en la cual a través del tipo de ocupación del recinto de incendio, y el sistema de alarma existente en él se estima en minutos el tiempo de premovimiento.

Table 2 pre-movement time

Occupancy type	W1 (min)	W2 (min)	W3 (min)	W1: live directives using a voice communication system from a control room, or live directives in conjunction with well-trained, uniformed staff that can be seen and heard by all occupants in the space W2: nondirective voice messages (prerecorded) and/or informative warning visual display with trained staff W3: warning system using fire alarm signal and staff with no relevant training Note: For occupants in a small room/space of fire origin who can clearly see smoke and flames at a distance, adopt the relevant time given for the W1 For occupants in a large room/space of fire origin who can clearly see smoke and flames at a distance, adopt the relevant time given for the W2, unless W1 For occupants outside room/space of fire origin who cannot clearly see smoke and flames, adopt the relevant time given for the warning system in operation
Office, commercial and industrial buildings, schools, colleges and universities (Occupants awake and familiar with the building, the alarm system, and evacuation)	< 1	3	> 4	
Shops, museums, leisure-sport centers, and other assembly buildings (Occupants awake but may be unfamiliar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	3	> 6	
Dormitories, residential mid-rise and high-rise (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	4	> 5	
Hotels and boarding houses (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	4	> 6	
Hospital, nursing home, and other institutional establishment (A significant number of occupants may require assistance)	< 3	5	> 8	

Figura 148. Adapted from Fire Safety Engineering In Building, Part 1: "Guide to the application of Fire Safety Engineering"

El segundo método recogido por la CFP No.19 es el método publicado en el PD 7974-6:2004 [63] en el cual a través del tipo de ocupante del recinto, el nivel de alarma del recinto, el tipo de recinto y el tipo de plan de emergencia implantado en el recinto, se obtienen el tiempo de premovimiento a través de una tabla.

A continuación se muestra el método propuesto por el PD 7974-6:2004.

Clase de ocupación: En función del estado de alerta de los ocupantes, de si son conocedores del recinto, de la densidad de ocupación de este y de la geometría del recinto existen 8 categorías de ocupante de acuerdo al siguiente cuadro:

Category	Occupant alertness	Occupant familiarity	Occupant density	Enclosures/complexity	Examples
A	Awake	Familiar	Low	One or many	Office or industrial
B1	Awake	Unfamiliar	High	One or few	Shop,restaurant,circulation
B2	Awake	Unfamiliar	High	One with focal point	space Cinema,theatre
Ci	Asleep	Familiar	Low	Few	Dwelling
Cii	Managed occupancy				Serviced flats,halls of residence,etc.
Ciii	Asleep	Unfamiliar	Low	Many	Hotel,hostel
D	Medical care	Unfamiliar	Low	Many	Residential
E	Transportation	Unfamiliar	High	Many	Railway station/Airport

Tabla 34 Categorías de ocupantes.

Nivel de alarma: Son los que se han expuesto con anterioridad siendo los niveles A1, A2 y A3 en función de la rapidez de actuación del sistema de alarma.

Complejidad del edificio: En función de la complejidad del edificio se determina el nivel del edificio existiendo 3 niveles.

Nivel B1: Propios de recintos de geometría simple y una única planta, con un número adecuado de salidas de emergencia. Un ejemplo de este tipo de edificio sería un hipermercado.

Nivel B2: Recinto multiplanta con geometría interior sencilla. Este tipo de recinto queda ejemplarizado por un edificio de oficinas.

Nivel B3: Recinto de geometrías complejas, con gran superficie y múltiples plantas siendo ejemplo de este nivel un centro comercial o un aeropuerto.

Nivel del plan de emergencia del recinto: En función de si existe o no un plan de emergencia en el edificio y las características de este existen tres niveles de plan de emergencia.

Nivel M1: Los ocupantes habituales del edificio son conocedores del plan de emergencia y han sido entrenados sobre los procedimientos de evacuación en caso de incendio. El ratio de ocupantes entrenados sobre los ocupantes no conocedores del edificio debe ser alto.

Nivel M2: Igual al nivel M1 pero con un bajo ratio de ocupantes entrenados y ocupantes no conocedores del edificio.

Nivel M3: En este nivel se agrupan aquellos recintos que no pertenecen a los niveles M1 o M2.

Los cuatro niveles de tipo de ocupación, tipo de alarma, tipo de edificio y plan de emergencia, a través de la siguiente tabla se obtiene el tiempo de premovimiento de la ocupación del recinto.

Scenario category and modifier	First occupants Δt_{pre} (1st percentile)	Occupant distribution Δt_{pre} (99th percentile) ^a
A: awake and familiar M1 B1 – B2 A1 – A2 M2 B1 – B2 A1 – A2 M3 B1 – B2 A1 – A3 For B3, add 0.5 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA if unfamiliar visitors likely to be present	0.5 1 >15	1.0 2 >15
B: awake and unfamiliar M1 B1 A1 – A2 M2 B1 A1 – A2 M3 B1 A1 – A3 For B2 add 0.5 for wayfinding For B3 add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA	0.5 1.0 >15	2 3 >15
Ci: sleeping and familiar (e.g. dwellings – individual occupancy) M2 B1 A1 M3 B1 A3 For other units in a block assume one hour Cii: managed occupancy (e.g. serviced apartments, hall of residence) M1 B2 A1 – A2 M2 B2 A1 – A2 M3 B2 A1 – A3 Ciii sleeping and unfamiliar (e.g. hotel, boarding house) M1 B2 A1 – A2 M2 B2 A1 – A2 M3 B2 A1 – A3 For B3, add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA	5 10 10 15 >20 15 20 >20	5 >20 20 25 >20 15 20 >20
D: medical care Awake and unfamiliar (e.g. day centre, clinic, surgery, dentist) M1 B1 A1 – A2 M2 B1 A1 – A2 M3 B1 A1 – A3 For B2 add 0.5 for wayfinding For B3 add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA Sleeping and unfamiliar (e.g. hospital ward, nursing home, old peoples' home) M1 B2 A1 – A2 M2 B2 A1 – A2 M3 B2 A1 – A3 For B3 add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA	0.5 1.0 >15 5 ^b 10 ^b >10 ^b	2 3 >15 10 ^b 20 ^b >20 ^b
E: transportation (e.g. railway, bus station or airport) Awake and unfamiliar M1 B3 A1 – A2 M2 B3 A1 – A2 M3 B3 A1 – A3 M1 and M2 would normally require voice alarm/PA	1.5 2.0 >15	4 5 >15
<p>NOTE There is a lack of data on evacuation behaviour and the times required for key aspects of evacuation. Therefore the limitations of the database needs to be borne in mind when proposing or assessing designs incorporating engineered solutions in relation to human behaviour.</p> <p>In particular the database needs to be improved by the provision of information such as evacuation time records, video records from real evacuation incidents (including fires) and data from monitored evacuations in a reasonably large set of each occupancy type, including sleeping accommodation. This could then provide a definitive database for design applications and the further development of predictive evacuation and behaviour models.</p>		
<p>^a Total pre-movement time = Δt_{pre} (1st percentile) + Δt_{pre} (99th percentile). Figures with greater levels of uncertainty are italicized. ^b These times depend upon the presence of sufficient staff to assist evacuation of handicapped occupants.</p>		

Tabla 35. Tiempo de premovimiento de acuerdo con la PD 7974-6:2004

6.2.3.4. Tiempo propio de evacuación Δt_{trav}

Es el tiempo desde que le primer ocupante comienza a evacuar hasta que el ultimo ocupante abandona el edificio. Este periodo depende los dos tipos de usuarios que existan en los edificios. Usuarios conocedores del edificio y no conocedores.

El usuario conocedor del edificio está adiestrado y conoce la ruta de escape óptima en condiciones de seguridad, gracias al plan de autoprotección. El tiempo en realizar la evacuación es de pocos minutos.

El usuario no conocedor del edificio presenta la problemática de que en situación de alarma pueda desorientarse y no encontrar el espacio exterior seguro. Para remediar esta situación se ubicarán en posiciones estratégicas los planos con recorridos de evacuación para facilitar el escape en condiciones de seguridad del edificio.

En la guía europea CFP No.19 se muestra un método para el cálculo del tiempo propio de evacuación basado en el SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [5] sin embargo se recomienda en el anexo E, la utilización de softwares para el cálculo de este componente del RSET.

A continuación se expone el uso de un software para el cálculo del tiempo propio de evacuación.

6.3. Software para el modelado de la evacuación (RSET)

Para determinar si la evacuación de emergencia se produce en condiciones de seguridad se realizará una simulación informática para verificar:

- a) Funcionamiento de los sistemas de evacuación.
- b) Calcular los tiempos de evacuación (RSET).
- c) Identificar problemas.
- d) Proponer correcciones y mejoras.

Para ello se utilizará uno de los software propuestas por la CFPA (Confederation of Fire Protection Asociation), en particular la guía CFPA E Guideline No. 19 Fire Safety Engineering concerning Evacuation from Buildings [13].

En este documento se analizan las dificultades del estudio de este tipo de actuación de emergencia y se recomienda que para el cálculo de los tiempos de evacuación vinculados a la conducta de los ocupantes, se realice mediante un modelo informático.

Esta guía nombra diferentes softwares de los cuales se ha seleccionado Pathfinder para realizar la simulación de evacuación.

Models based on movement	Partially behavioural models	Behavioural models
EVACNET ₄	PEDROUTE/PAXPORT	CRISP
Takahashi's Fluid Model	EXIT8 ₉	ASERI
PathFinder	Simulex	BFIRES-2
TIMTEX	GridFlow	buildingEXODUS
WAYOUT	ALLSAFE	EGRESS
Magnetic Model		EXITT
EESCAPE		VEgAS
EgressPro		E-SCAPE
ENTROPY Model		BGRAF
STEP ₅		EvacSim
		Legion
		Myriad

Pathfinder es un software de simulación de evacuaciones de emergencia que incluye un interfaz de usuario integrado y resultados animados en 3D. Permite evaluar modelos de evacuación más rápido que otros softwares del mismo tipo, presentando un resultado grafico tan realista como exija el modelo. Además permite la comparación de los resultados de la simulación de incendios obtenida mediante FDS con el modelo de evacuación generado, pudiendo analizar si la evacuación se realiza en condiciones de salubridad.

Pathfinder utiliza dos modelos de comportamiento de los ocupantes:

Modelo dirigido (Steering)

Este modelo se basa en los comportamientos de conducción inversa, presentados por primera vez por Craif Reynolds ("Steering Behaviors for Autonomus Characters).

El modo dirigido de Pathfinder permite una mayor complejidad del comportamiento de los algoritmos de movimiento, eliminando así la necesidad de cálculos explícitos de colas y densidades formadas.

Modelo SFPE

Este modelo propuesto por la Society of Fire Protection Engineering (SFPE), implementa los conceptos y ecuaciones recogidas en el "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering" y en la "SFPE Engineering Guide: Human Behaviour in Fire" (SFPE, 2003).

Se trata de un modelo de flujo en donde las velocidades de evacuación dependen de la densidad (ocupación) en cada recinto y el flujo a través de puertas queda controlado por el ancho de las mismas, similar al modelo de la NFPA 130 [9].

El modelado de la simulación consta de tres partes fundamentales:

- a) Geometría
- b) Modelo de ocupante
- c) Ocupación

6.3.1. Geometría

Para cada simulación, se realiza una reconstrucción mediante el software de simulación en el cual se representan todas las características geométricas importantes:

Locales:

Se modelan todos los locales así como las zonas de ocupación diferenciadas, si es necesario. Cada local equivale a una habitación cerrada. En este caso un vagón de tren se modela como un local, al igual que las vías de evacuación sobre las aceras. En la siguiente figura aparece la geometría simulada y los locales, formados por los diferentes vagones de metro.

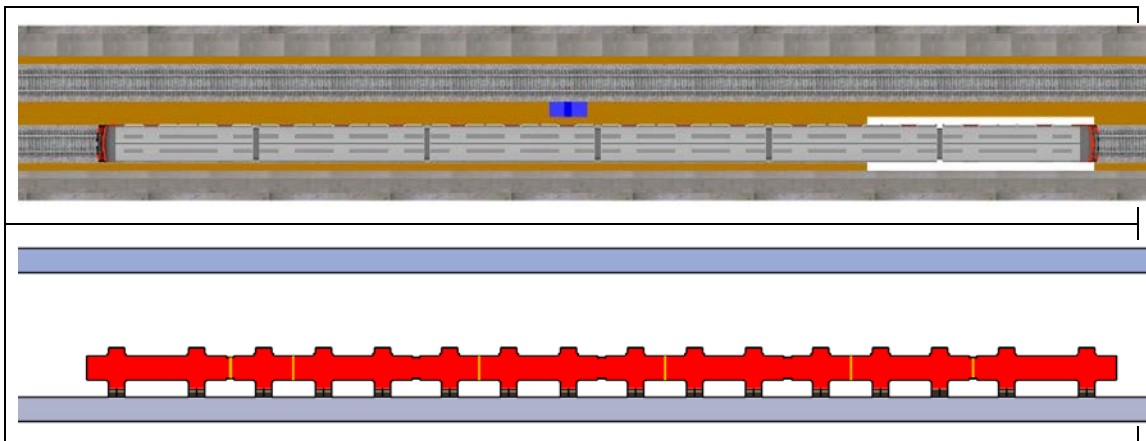


Figura 149. Comparación entre el modelo geométrico del tren y los locales generados.

Interfases:

Las interfases son las condiciones de contorno de los locales. Por defecto se tratan como muros, pero pueden tratarse como puertas cuando la interfase se encuentra entre dos locales (rampas o escaleras si entre los locales existe un desnivel), o bien da al espacio exterior seguro considerándose como salida de emergencia.

Se han modelado interfases entre los diferentes vagones del metro permitiendo el paso de un vagón a otro.

Cuando se modela una puerta entre locales aparece de color marrón claro y cuando se modeliza una salida, el programa la muestra de color verde claro.

En la siguiente figura se muestra el interfaz entre dos vagones de metro mediante una línea marrón claro (resaltado mediante una elipse azul)



Figura 150. Interfaz entre locales

Salidas:

Se tratan como salidas solo a las puertas que cumplen con la condición de salida de emergencia

6.3.2. Modelo de ocupante

En este apartado se presentan las características del modelado de los ocupantes que determinarán el tiempo de evacuación derivado de la reacción del ocupante frente a la situación de evacuación de emergencia. El modelado de los ocupantes consta de tres elementos:

- a) Tiempo de pre-movimiento
- b) Tipo de ocupante
- c) Evolución del comportamiento del ocupante

6.3.2.1. Tiempo de pre-movimiento Δt_{pre}

En este apartado se modela el tiempo de premovimiento de acuerdo a lo definido por la CFPA No. 19 siguiendo una distribución log-normal en la población en función del tipo de recinto en que se encuentre y la naturaleza de la ocupación.

6.3.2.2. Tipo de ocupante

En función de las características del tipo de ocupante, la simulación transcurrirá de una forma u otra. Los parámetros que definen el tipo de ocupante son los siguientes:

- a) Parámetros dimensionales
- b) Parámetros de movilidad
- c) Paramaros de comportamiento

6.3.2.2.1. Parámetros dimensionales

Estos parámetros hacen referencia a las características físicas de los ocupantes como la altura y la anchura de los ocupantes.

Se han modelado los ocupantes con los siguientes parámetros de acuerdo a los una base de datos de US Standards en la cual se tiene los siguientes valores para europeos occidentales. El valor de anchura para los ocupantes niños se obtiene de la publicación Physical Characteristics of Children del Departamento de Biomecánica de la Universidad de Michigan.

Tipo de ocupante	Anchura de hombros (cm)
Varón Adulto	51.5
Mujer Adulta	47
Anciano	44.75
Niño	36.8

Tabla 36. Tamaños de los diferentes ocupantes.

Altura: No se aplica ya que no existen limitaciones de altura en la salida ni pasillos de evacuación.

6.3.2.2.2. Parámetros de movilidad

Los parámetros que definen el movimiento de los ocupantes y por tanto el tiempo propio de evacuación son:

Velocidad: La velocidad de cada tipo de ocupante se ha modelado mediante una distribución normal según a la siguiente tabla :

Tipo de ocupante	Velocidad (m/s)
Varón Adulto	1.35±0.2
Mujer Adulta	1.15±0.2
Anciano	0.9±0.3
Niño	0.8±0.3

Tiempo de aceleración: 1,1 segundos es el tiempo que tarda un ocupante en pasar de estado parado a alcanzar la velocidad máxima de desplazamiento.

Distancia de confort: 0,2 metros es la distancia que los ocupantes guardan frente a otros ocupantes en colas o aglomeraciones.

Tiempo de respuesta a colisión: 1,5 segundos es el tiempo de reacción de los ocupantes frente a una parada por llegar una cola o un borde de recinto.

6.3.3. Ocupación

Se ha considerado una ocupación derivada de un convoy de metro con una composición de 6 coches constituida por dos coches motores con pantógrafo (no idénticos), un coche motor sin pantógrafo y dos coches remolques intermedios, formando una composición M-R-N-N-R-M (motor 1, remolque 1 equipado, 2 motores intermedios, remolque 2 simple, motor 2), con cabinas de conducción en ambos extremos de la unidad.

Dicha composición cuenta con una ocupación de 900 personas a razón de 150 personas por vagón.

En la siguiente figura se muestra la ocupación del convoy de metro.



Figura 151. Convoy de metro con su ocupación.

Es fundamental definir el tipo de ocupación que presenta el convoy estando compuesto por un 40% de varones adultos, un 40% de mujeres adultas, un 10% de ancianos y el 10% restante compuesto por niños.

Tipo de ocupante	Número de ocupantes
Varón Adulto	360
Mujer Adulta	360
Anciano	90
Niño	90

Tabla 37. Distribución de ocupantes.

6.4. Cálculo del RSET para el escenario de incendio de predimensionado del sistema de ventilación de emergencia

6.4.1. Generación del modelo geométrico

En el software Pathfinder es posible generar un modelo geométrico compuesto por locales, interfases y salidas. Sin embargo este sistema no es operativo ya que el usuario no dispone de un método preciso para crear la geometría puesto que la generación de locales se realiza mediante la operación click and drag sobre un plano de dibujo.

Para realizar modelos realista basados en geometrías existentes en otros formatos, bien sean 2D o 3D, Pathfinder cuenta con una herramienta de importación de modelos geométricos, siendo posible importar múltiples formatos de archivos. Entre todos los formatos, es posible importar el modelo geométrico empleado en la simulación en FDS. Puesto que Pathfinder no tiene las restricciones geométricas que le son impuestas al modelo geométrico en FDS derivadas del tamaño de malla, es posible emplear modelos muy detallados.

Así pues se realiza la importación del modelo geométrico empleada en FDS.

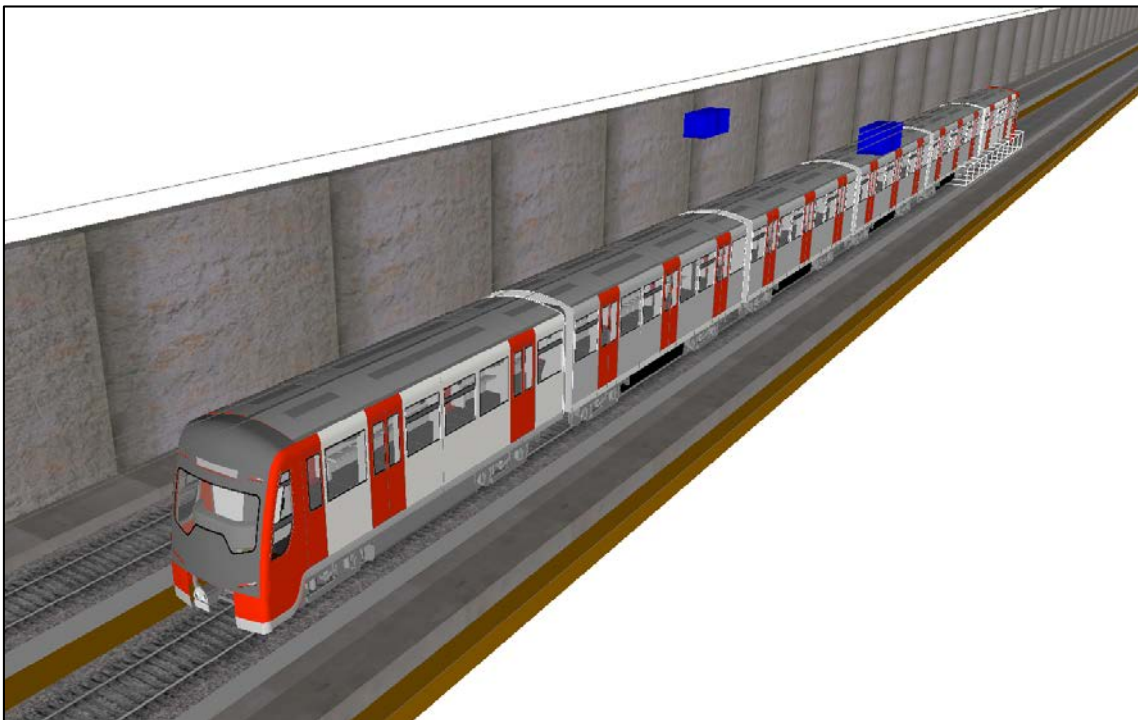


Figura 152. Modelo geométrico importado a Pathfinder.

Una vez se dispone de un modelo geométrico importado, se introduce la geometría de los locales o recintos.

Como puede verse cuando se genera un local debe respetarse aquellas zonas que no pueden ser ocupadas como por ejemplo la zona de asiento.

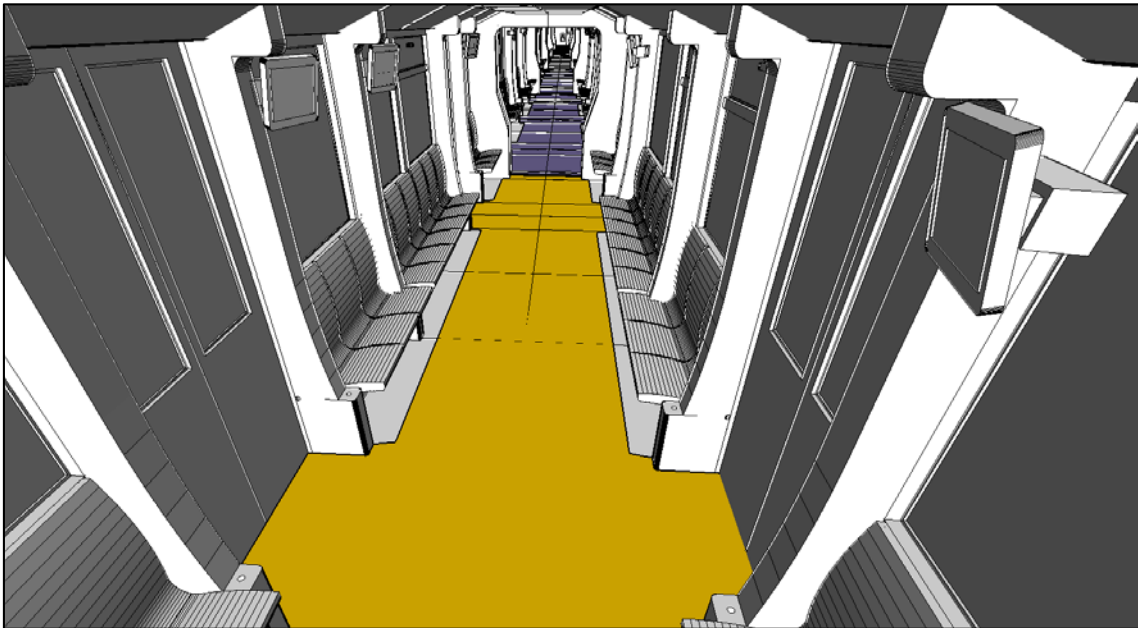


Figura 153. Generación de un local a partir de un modelo geométrico importado.

Una vez que se generan todos los locales, a razón de uno por coche, es necesario unir los locales generados mediante elementos interfaz tipo puerta. En la siguiente imagen se muestra un elemento tipo puerta resaltado en amarillo entre dos locales.

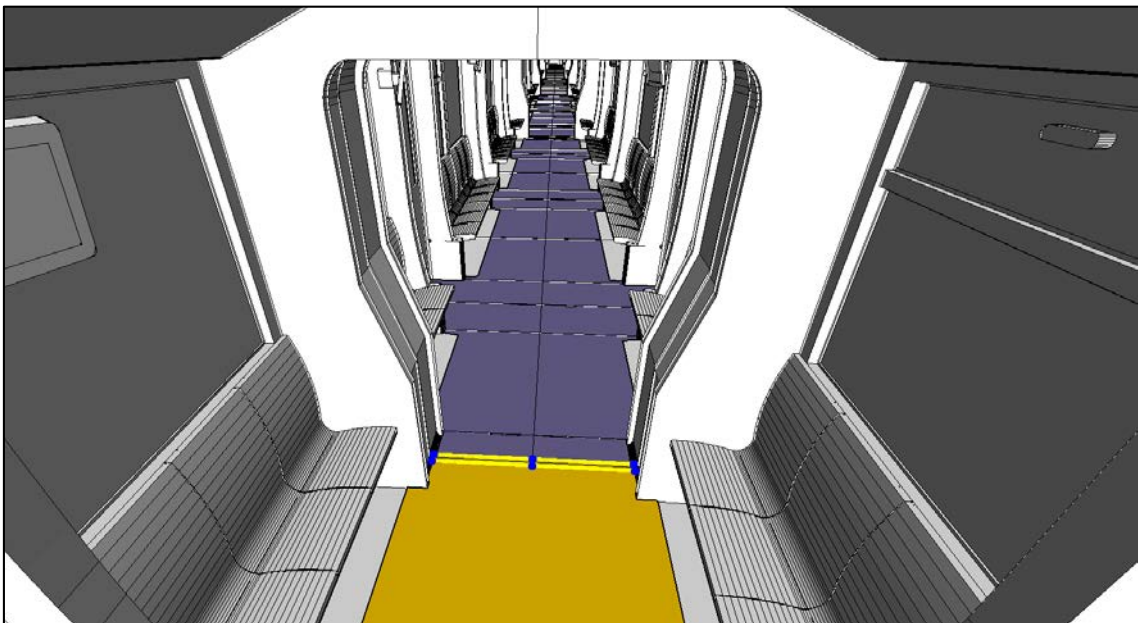


Figura 154. Generación de una puerta entre locales.

A continuación es necesario comunicar los diferentes vagones con la acera por donde discurre la vía de evacuación. Puesto que existe una diferencia de cota respecto los vagones con la acera, para modelar este cambio de altura emplean escalones virtuales. En la siguiente imagen se muestra el convoy de metro comunicado a través de una escalera por puerta con la acera de evacuación resaltada en color verde.

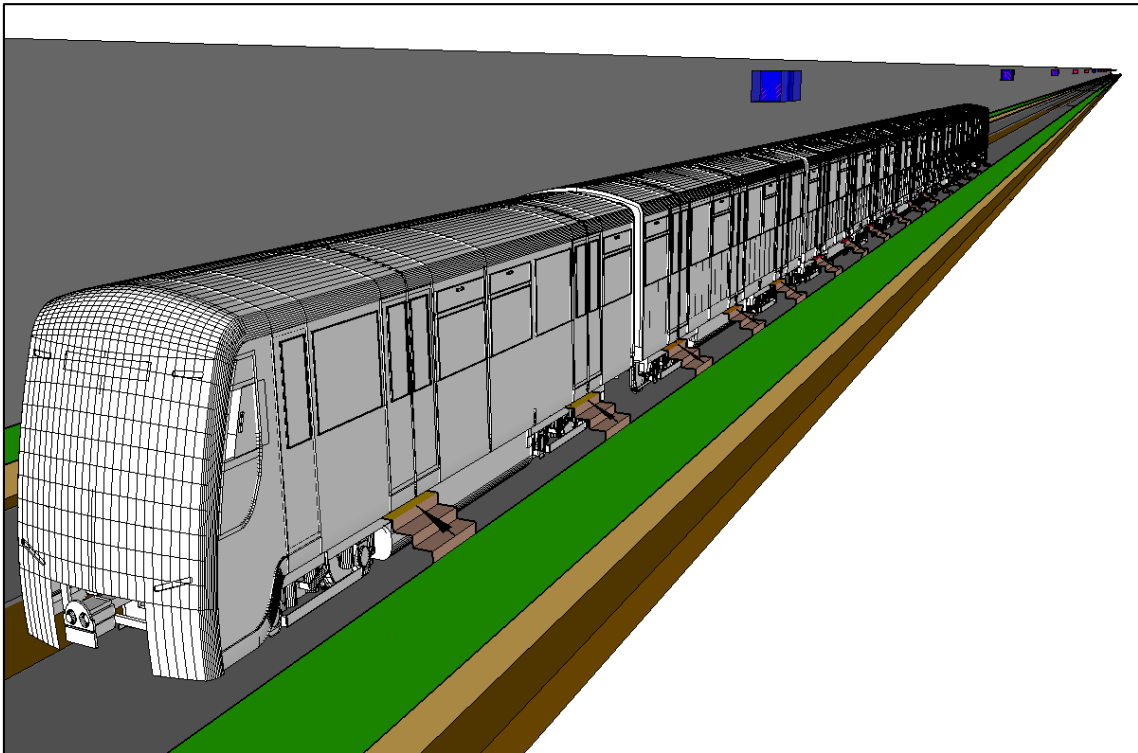


Figura 155. Modelado de escalera de conexión entre vagones y acera de evacuación.

Puesto que en el modelo de evacuación se realiza para el escenario de incendio de predimensionado tal y como se vio en el capítulo 5 Ventilación, la salida de evacuación debe realizarse hacia el portal de entrada del túnel puesto que los humos y gases calientes son evacuados hacia el sistema de extracción presente en la estación.

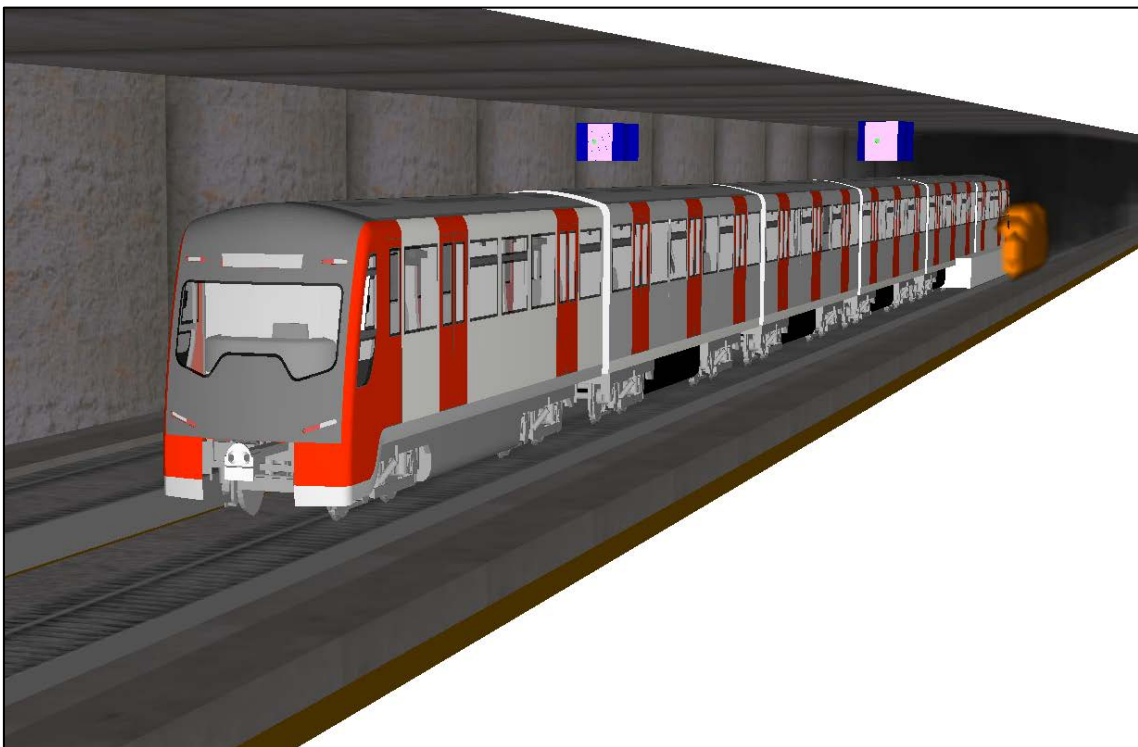


Figura 156. Sistema de ventilación impulsando el humo hacia el sistema de extracción de la estación.

Por tanto se modela una salida a zona segura en el final de la acera de evacuación en el portal de entrada del túnel. Dicha salida tiene la anchura de la acera de evacuación de 1,5 metros. En la imagen aparece resaltada mediante una elipse roja.

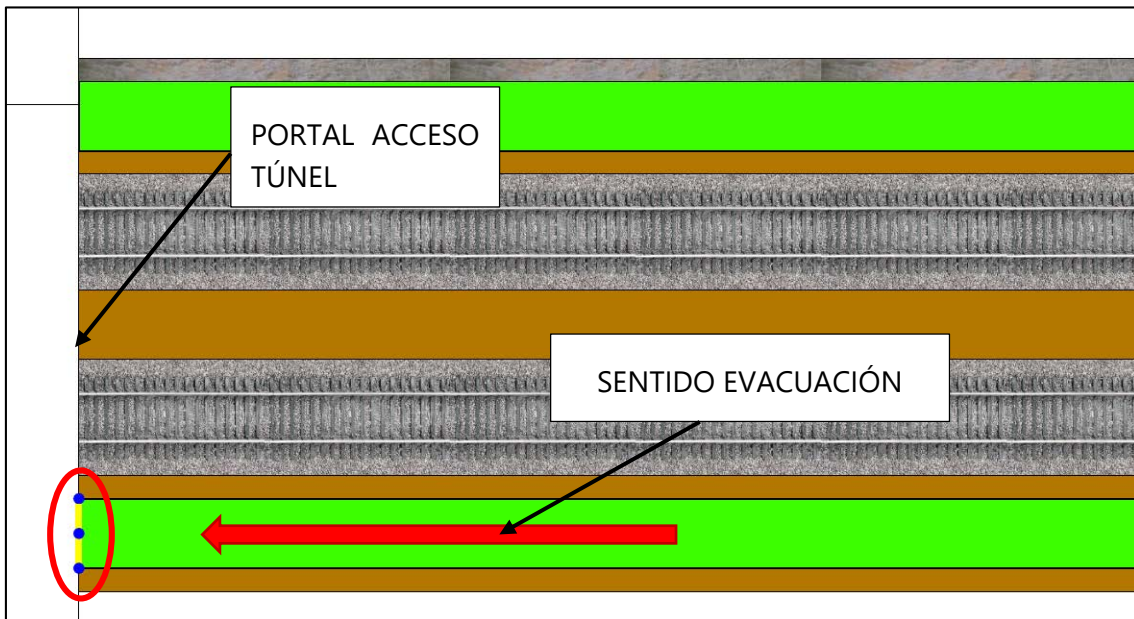


Figura 157. Salida del modelo de evacuación.

6.4.2. Generación de modelo de ocupante

En este apartado se definen los cuatro tipos de poblaciones existentes en el modelo, introduciendo sus características físicas así como el modelo de comportamiento donde se introduce el tiempo de premovimiento de la población.

En la siguiente imagen se presenta el menú de generación de tipos de ocupantes.

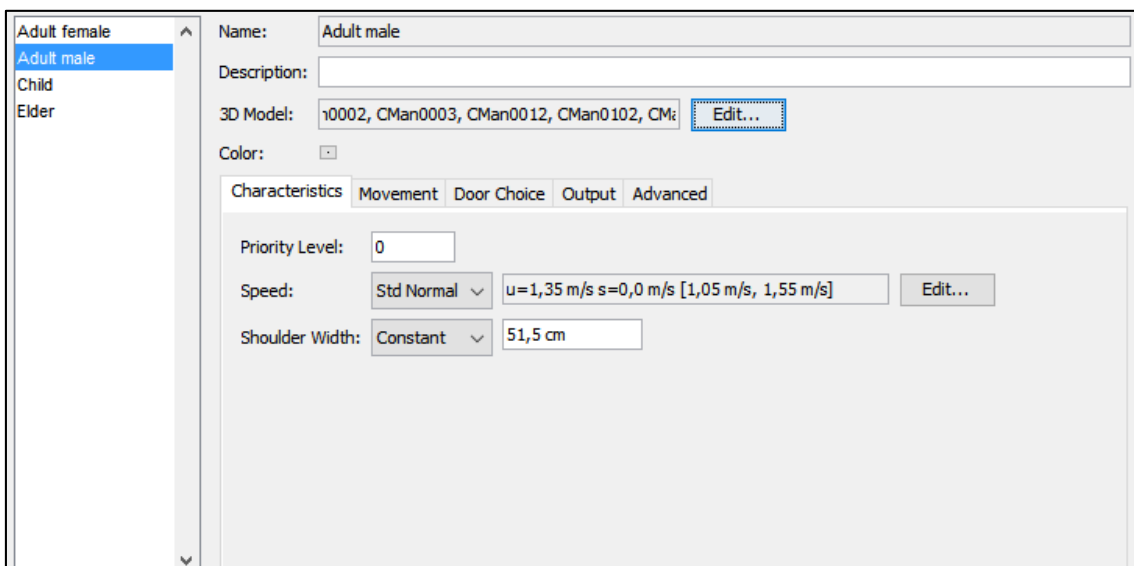


Figura 158. Menú de generación del tipo de ocupante en Pathfinder.

Por otra parte se genera un modelo de comportamiento para la ocupación. En el modelo de comportamiento se introduce cuanto tiempo están parados los ocupantes antes de comenzar la evacuación.

Puesto que la simulación de evacuación como la de incendio comienzan en el instante que se inicia el incendio, habrá que parametrizar no solo el tiempo de premovimiento sino también el tiempo de detección y el tiempo de alarma.

De acuerdo con el protocolo establecido con la empresa gestora de metro, y teniendo en cuenta que durante la fase de detención del tren, se activa el protocolo de megafonía en el interior de los vagones, se considera que el tiempo de premovimiento es nulo ya que los ocupantes se encuentran predispuestos a abandonar el tren en el instante que en que se abran las puertas.

Es instante coincide con el arranque del sistema de ventilación de emergencia, 60 segundos después de que se inicie el incendio.

6.4.1. Generación de la ocupación

Tal y como se ha descrito se generan 4 tipos de ocupantes en el modelo. Varón Adulto, Mujer Adulta, Anciano y Niño con la distribución que se indica en la siguiente tabla.

Tipo de ocupante	Número de ocupantes
Varón Adulto	360
Mujer Adulta	360
Anciano	90
Niño	90

Tabla 38. Distribución de ocupantes.

El procedimiento asignado para distribuir la ocupación es introducir las poblaciones en los vagones del convoy de metro de manera aleatoria. Como puede observarse cada población cuenta con un modelo en 3D que representa de manera realista las características de los ocupantes.

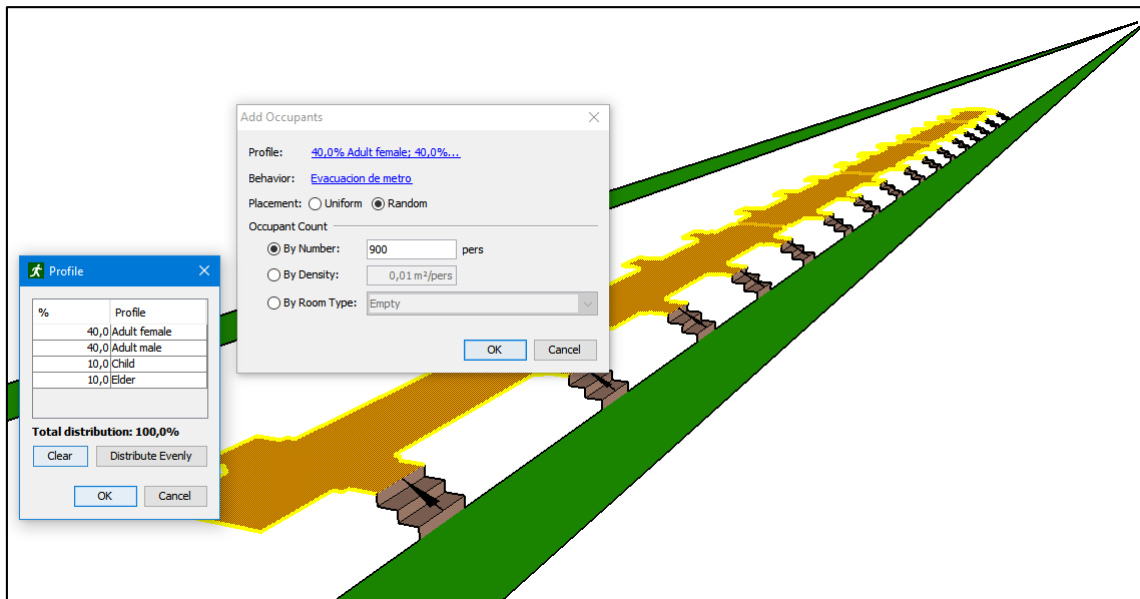


Figura 159. Introducción de las poblaciones de ocupantes en Pathfinder

Como puede observarse en la figura anterior se introduce entre los 6 vagones la población total de ocupantes de manera aleatoria. En la siguiente figura se observa la población introducida.

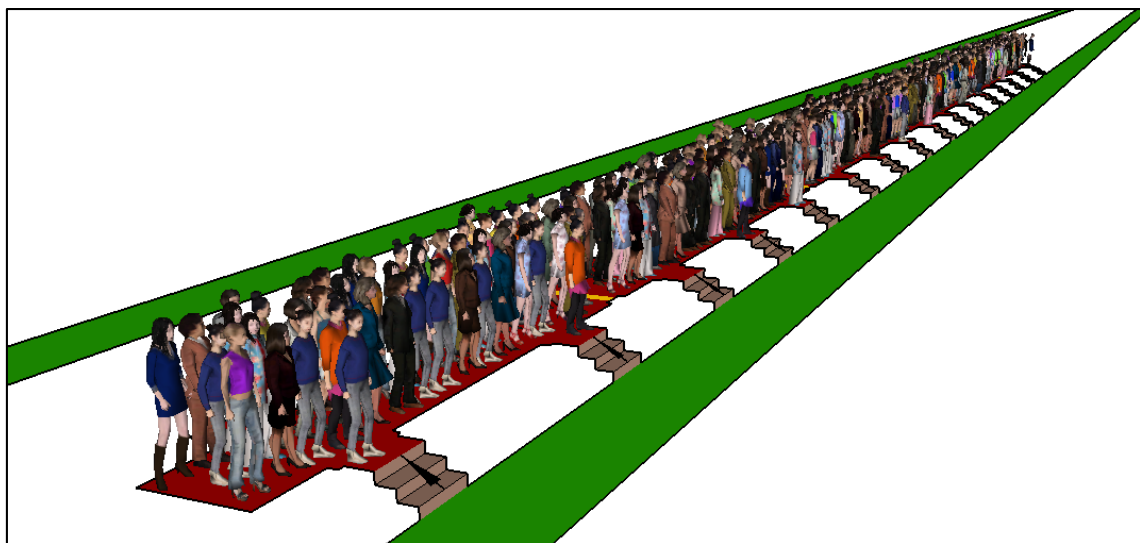


Figura 160. Población de Mujeres Adultas.

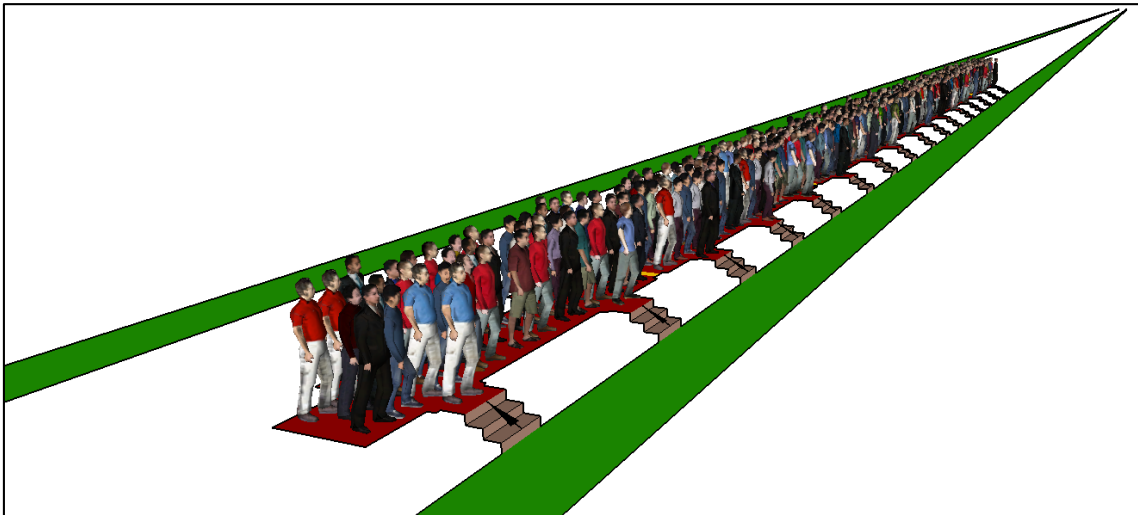


Figura 161. Población de Varones Adultas.

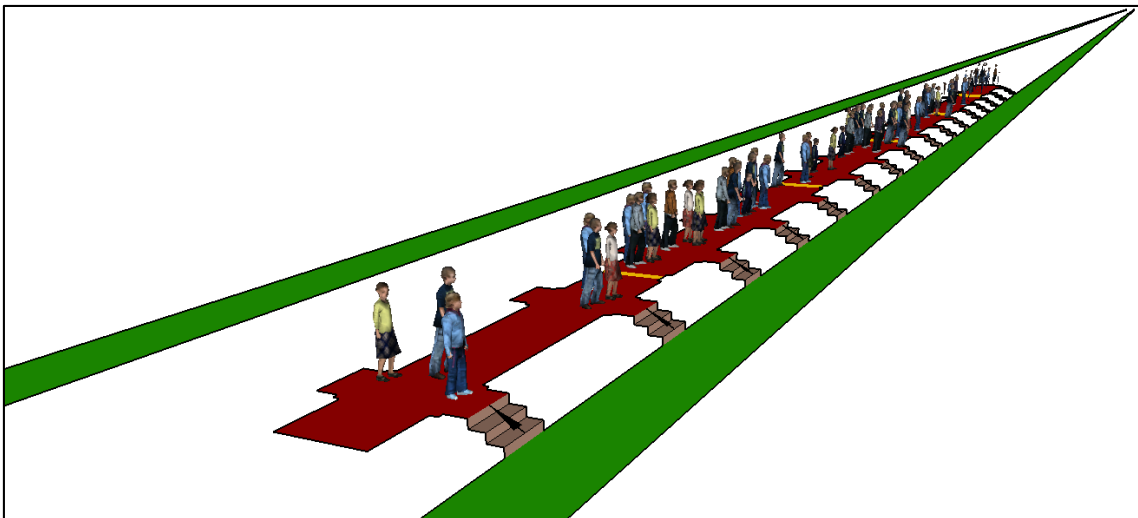


Figura 162. Población de Niños.

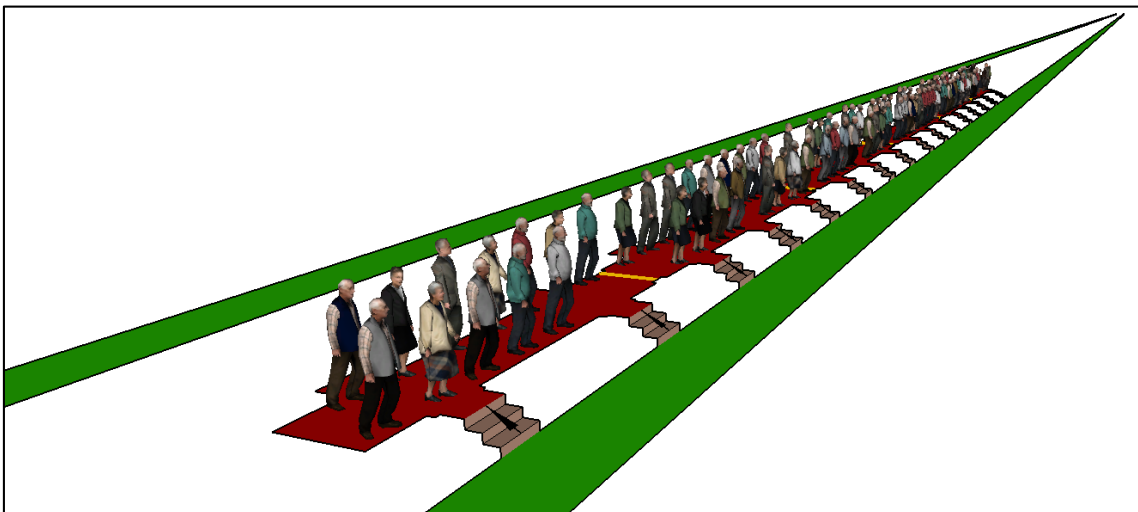


Figura 163. Población de Ancianos

6.4.2. Resultados

Tras haber completado el modelo se procede al cálculo del resultado. El procedimiento de cálculo empleado por Pathfinder es el siguiente:

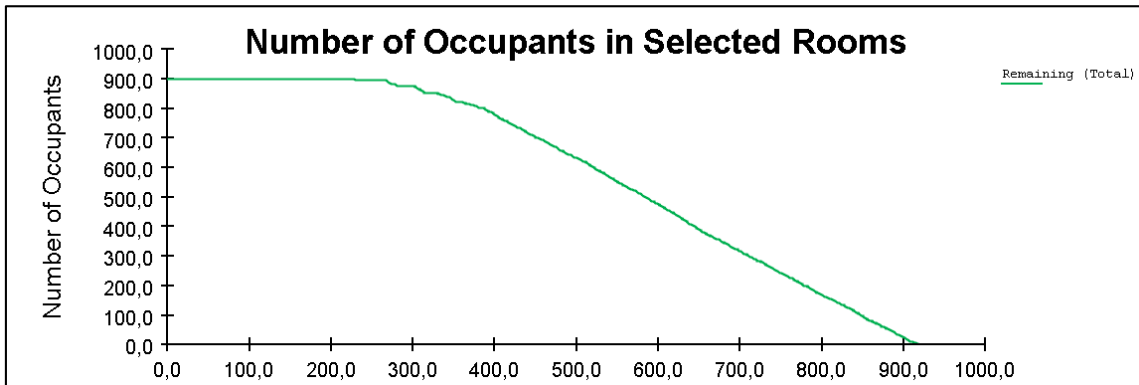
El software realiza para cada instante de cálculo una serie de procesos para obtener el movimiento de todos los ocupantes. Esta serie de procesos se realiza cada 0,025 segundos.

El software para cada ocupante realiza el siguiente proceso para determinar el recorrido de evacuación:

1. **Listado de salidas posibles:** Para cada ocupante se listan todas las salidas accesibles, tanto en el recinto en el que se encuentra el ocupante como en el resto de recintos.
2. **Elección de salida:** En función de una serie de parámetros el software determina que salida es la óptima para cada ocupante. Estos parámetros se listan a continuación y en función del valor asignado, tendrán mayor o menor peso en la selección de la salida.
 - a) **Distancias:** Se trata de la distancia del ocupante a todas las posibles salidas siendo la óptima la menor de todas.
 - b) **Tiempos de colas:** Se trata del tiempo que debería realizar cada ocupante en las eventuales colas existentes para todos los posibles recorridos de evacuación.
 - c) **Cambios de recintos:** Se trata del número de cambios de recinto que está dispuesto a realizar un ocupante hasta llegar a una salida de la zona de simulación.
3. **Generación de ruta de evacuación:** En función de la salida elegida, el software genera un recorrido de evacuación para cada ocupante.
4. **Desplazamiento por ruta de evacuación:** Después de que se genere la ruta de evacuación, los ocupantes se desplazan por ella, partiendo de las condiciones de movimiento del estado anterior de cálculo.

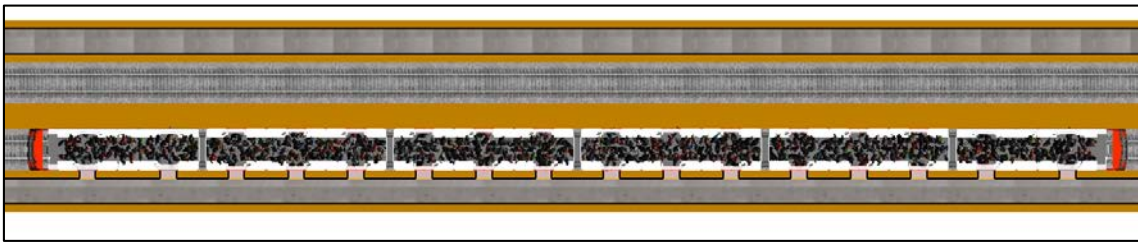
La evacuación completa del tren se lleva a cabo en 918 segundos (15 minutos y 12 segundos).

En la siguiente gráfica se muestra la ocupación en función del tiempo.



Gráfica 26. Evacuación de ocupantes en función del tiempo.

T=0 segundos. El tren se detiene comenzando el incendio. El maquinista se comunica con el centro de control y comienza el protocolo de evacuación indicando a los ocupantes del metro la situación indicando los pasos a seguir para realizar la evacuación en condiciones de seguridad.



T=130 segundos. El primer ocupante comienza a evacuar (resaltado en rojo)

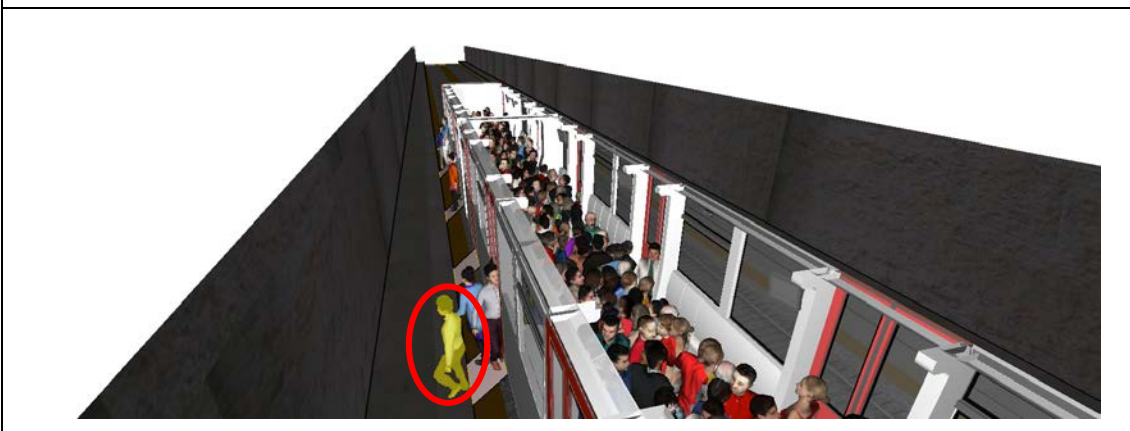
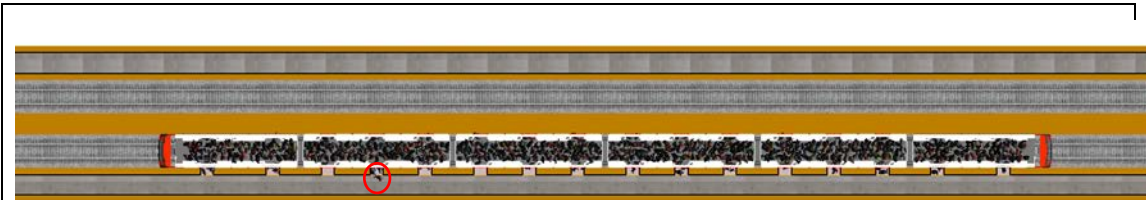


Figura 164. Comienza la evacuación.

Tal como se ve en la siguiente imagen para el instante $t=268$ segundos a través pese que el convoy de metro tiene múltiples salidas por vagón, se forma un cuello de botella entre la acera y el tren.

La acera de 1,5 metros de anchura permite evacuar a la vez un máximo de 4 ocupantes dependiendo de su tipología. Por otra parte los ocupantes que intentan salir de los vagones obstaculizan a aquellos que ya se encuentran en la acera.

Una vez que los ocupantes de la acera se alejan del tren, el tráfico por la vía de evacuación se fluidifica.



Figura 165. Aparición de cuello de botella en la evacuación.

Finalmente la evacuación finaliza a los 918 segundos.



Figura 166. Instantes finales de la simulación. Últimos ocupantes abandonan el túnel.

6.5. Calculo del ASET

A través de la simulación de incendios realizada mediante FDS y de la simulación de evacuación realizada mediante Pathfinder, es posible cruzar los resultados y determinar el ASET estudiando durante qué periodo de tiempo es seguro realizar la evacuación a través de las vías de evacuación.

Los criterios de aceptación que se emplearán para verificar el ASET son los criterios que satisfacen el objetivo 1.1 definido en el Capítulo 1 del presente trabajo:

Objetivo 1.1

Verificar unas adecuadas condiciones ambientales en los recorridos de evacuación para permitir la evacuación segura de los ocupantes del convoy de metro (viajeros y tripulación) **ASET > RSET**.

Los criterios de aceptación que se estudiarán son los siguientes:

Objetivo 1.1.1

Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones de salubridad (tenability) en las vías de evacuación.

Criterio A

Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de oxígeno (O₂) no inferior al 18% a 2,00 metros de altura.

Una concentración de O₂ del 18% supone 0,18 mol/mol, teniendo en cuenta que un mol de O₂ pesa 32 g y que un mol de aire pesa 28,96 g se tiene que $0,18 \text{ mol/mol} \approx 0,2 \text{ g/g} = 20 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/Kg}$.

Criterio B

Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de monóxido de carbono (CO) inferior a 450 ppm a 2,00 metros de altura.

Para la determinación de la concentración de CO se parte de que $1 \text{ ppm} = 10^{-6} \text{ mol/mol}$, teniendo en cuenta que un mol de CO pesa 30 g y que un mol de aire pesa 28,96 g se tiene que $1 \text{ ppm} = 1,0359 \cdot 10^{-6} \text{ g/g}$, de este modo $450 \text{ ppm} = 450 \cdot 1,0359 \cdot 10^{-6} \text{ g/g}$ lo que equivale a $0,466 \cdot 10^{-3} \text{ g/g}$.

Criterio C

Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de dióxido de carbono (CO₂) inferior a 0,03 mol/mol a 2,00 metros de altura. Este criterio queda englobado en los dos criterios anteriores no realizándose la comprobación de concentración de CO₂.

Objetivo 1.1.2

Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones adecuadas de visibilidad en las vías de evacuación

Criterio D

Durante el periodo de evacuación, garantizar un nivel de visibilidad por encima de los 10m. a 2,00 metros sobre el suelo.

Objetivo 1.1.3

Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones térmicas adecuadas en las vías de evacuación.

Criterio E

Durante el periodo de evacuación, garantizar una temperatura inferior a 60°C a 2,00 metros de altura.

Criterio F

Durante el periodo de evacuación, limitar la radiación incidente a 2,5 kW/ a 2,00 metros de altura en las vías de evacuación. Este criterio no se aplicará ya que queda englobado en el criterio E.

Objetivo 1.1.4

Durante el periodo de evacuación, limitar una velocidad del aire de ventilación de modo que no dificulte la evacuación.

Criterio G

Durante de evacuación, limitar la velocidad del viento en contra de la dirección de evacuación a 10m/s.

A través de los diferentes escenarios de incendio modelados mediante FDS se introducirán planos de toma de resultados tipo Slice para poder monitorizar a lo largo de la simulación los diferentes parámetros estudiados a dos metros encima de las vías de evacuación. En el siguiente capítulo se presentarán los resultados.

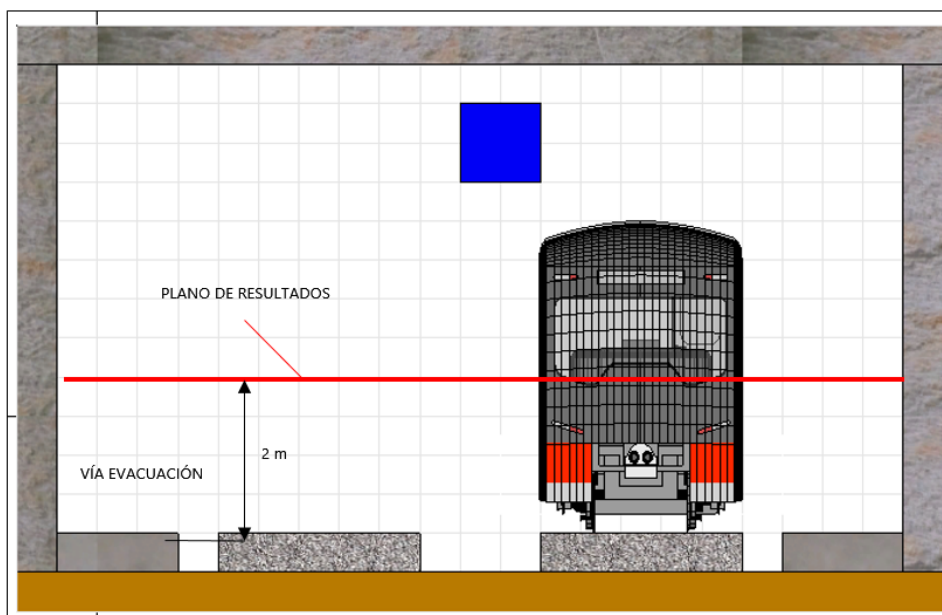


Figura 167. Ubicación de los planos de toma de resultados.

7. Caso de estudio

7.1. Introducción

En el presente capítulo se procederá al diseño de un sistema de ventilación de emergencia de un túnel de metro. En primer lugar se introducirán las características del túnel y la metodología a emplear para el diseño del sistema de ventilación de emergencia.

En segundo lugar, puesto que se va a emplear un diseño prestacional o basado en la eficacia, a partir de un predimensionado del sistema de ventilación se procederá a la definición de los escenarios tipo de incendio con los que se validará si el diseño de prueba se valida como diseño final de la instalación. Estos escenarios de incendio se realizarán mediante dos modelos computacionales. El primer modelo será un modelo CFD realizado mediante el software FDS. El segundo modelo será un modelo de evacuación de emergencia de los ocupantes realizado mediante el software Pathfinder.

En tercer lugar, tras haberse completado las simulaciones, se procederá a realizar un análisis de los resultados donde se comprobará si se cumplen las metas definidas previamente de acuerdo con la metodología prestacional.

Finalmente se presentan las conclusiones extraídas del análisis del problema estudiado.

7.2. Presentación del problema

Se va a diseñar un sistema de ventilación de emergencia con para un túnel de metro de 1.500 metros de longitud. De acuerdo con la Instrucción de Seguridad en Túneles IST2006 [4] el recorrido máximo que puede realizarse en una vía de evacuación en el interior de un túnel de metro es de 750m. Dada la imposibilidad de realizar salidas de evacuación en el trazado del túnel se plantea un diseño prestacional y no basado en prescripciones para diseñar un sistema de ventilación de emergencia del túnel.

A continuación se presentan las características del túnel así como de la estación:

El túnel presenta una longitud de 1.500 metros entre el portal de entrada hasta su conexión con la estación de metro presentando una sección constante en su desarrollo. Además como ya se ha introducido, a lo largo de los 1.500 metros de longitud del túnel no existe ningún tipo de salida de evacuación.

El túnel presenta una sección de 10,5 metros de ancho por 6,5 metros de alto. Cuenta con dos plataformas para vías de 2,5 metros de ancho por 0,5 metros de alto y dos pasillos para evacuar los ocupantes anexos a los hastiales de 1,5 metros de ancho por 0,5 metros de canto. En la siguiente figura se muestra la sección del túnel.

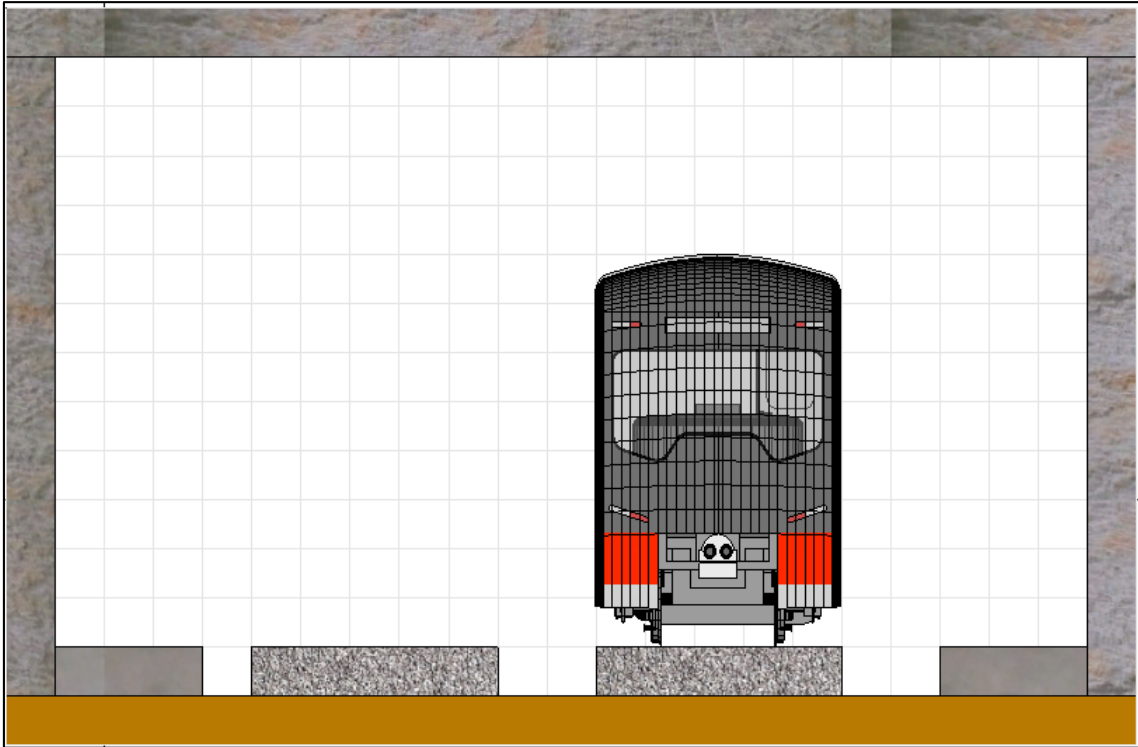


Figura 168. Sección tipo del tunel objeto del trabajo.

El túnel presenta una longitud de 1.500 metros desde la entrada del túnel hasta la estación de metro donde finaliza. A la entrada de la estación se bifurcan las vías del túnel para ubicar en cada uno de los extremos de ésta, un sistema de extracción de humos perteneciente a la estación. Estos sistemas están compuestos por dos ventiladores axiales reversibles con una etapa previa de silenciadores tienen como único fin extraer humo de proveniente de un incendio producido en el túnel con el objeto de sacarlo de éste y que en ningún caso el humo llegue a la estación. También se emplearán como sistema de apoyo al sistema de ventilación de emergencia a plantear en el túnel. Por otra parte presenta un sistema de ventilación de salubridad el cual puede emplearse en caso de emergencia para extraer humo en caso de producirse un incendio en la propia estación.

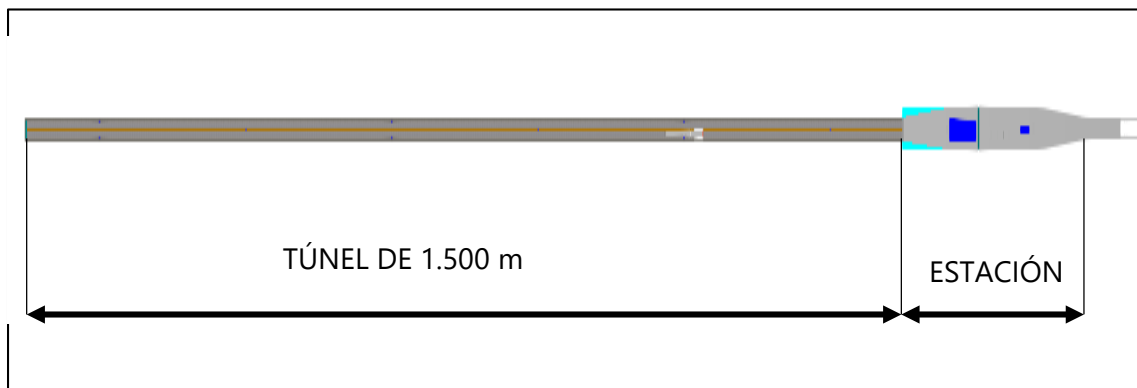


Figura 169. Túnel y estación.

En la siguiente figura se muestra en el modelo computacional la unión entre la el túnel y la estación.



Figura 170. Conexión del túnel con la estación. Ubicación de los ventiladores de extracción con los silenciadores.

En la siguiente figura se muestra el esquema de funcionamiento del sistema de extracción de humos del túnel presente en la conexión entre la estación y el túnel. Como ya se ha dicho el objeto principal de este sistema es no permitir que el humo producido en un incendio en el túnel, entre dentro de la estación, siendo evacuado por el sistema de ventilación hacia la calle.

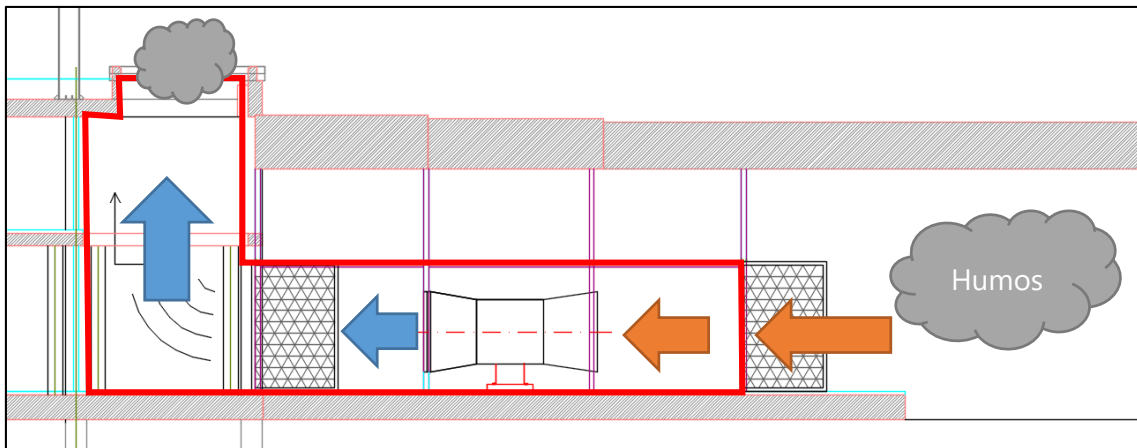
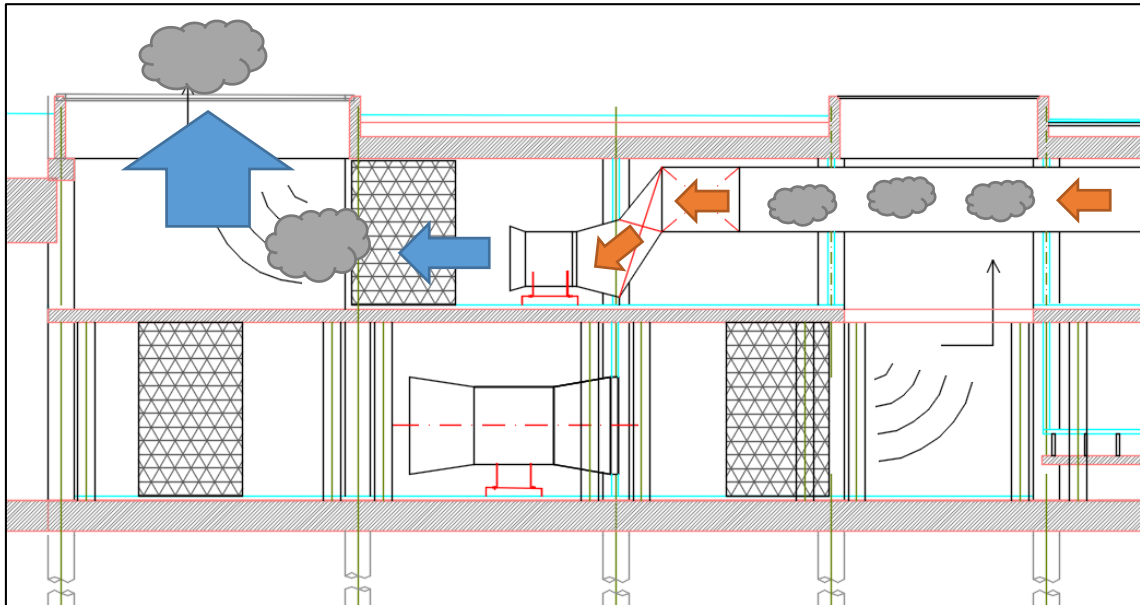


Figura 171. Sección del sistema de extracción de la estación mediante ventiladores axiales reversibles.

En la siguiente imagen se muestra el sistema de evacuación de humos presente en la estación para que en caso de producirse un incendio en el interior de esta, el humo producido sea evacuado a la calle permitiendo a los ocupantes de la estación evacuar de esta en condiciones de seguridad. Este sistema está compuesto por unos ventiladores axiales reversibles que mediante conductos permiten el trasiego mecánico de aire entre la calle y la estación. Estos ventiladores axiales están preparados para actuar en modo de emergencia trasegando los humos y gases calientes de un eventual incendio producido en la estación hacia la calle, tal como se especifica en la Instrucción de Seguridad de Túneles IST2006 [4].



Puesto que el objeto del trabajo es el diseño prestacional de túneles en situación de incendio, no se va a diseñar el sistema de ventilación de emergencia de la estación considerándose este como una condición de contorno del problema.

La estación se encuentra ubicada entre las dos vías y presenta las siguientes secciones. En la primera figura se muestra la estación de metro y la calle. Se observa en esta sección la vía de evacuación principal de la estación compuesta por una escalera central. Cabe notar que la estación cuenta con dos escaleras mecánicas adyacentes a la escalera central las cuales no se emplearán para realizar la evacuación.

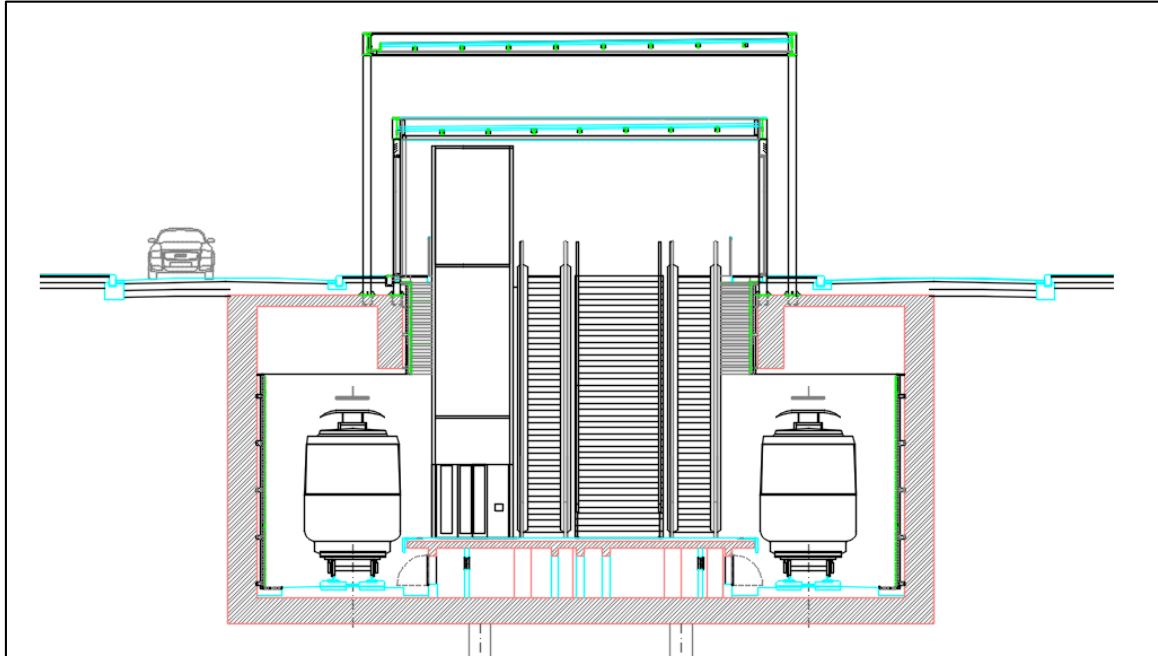


Figura 172. Sección transversal de estación de metro.

En la figura se muestra la sección longitudinal de la estación de metro. Debido a su geometría se presenta con más detalle en las siguientes figuras.

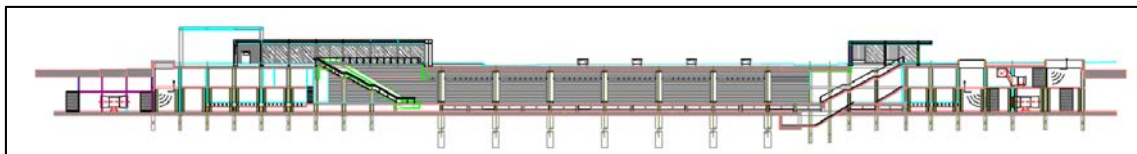


Figura 173. Sección longitudinal de la estación de metro

En la figura se muestra el sistema de ventilación de emergencia encargado de extraer el humo proveniente del túnel para evitar su entrada en la estación. También se muestra la escalera principal de la estación hacia la calle.

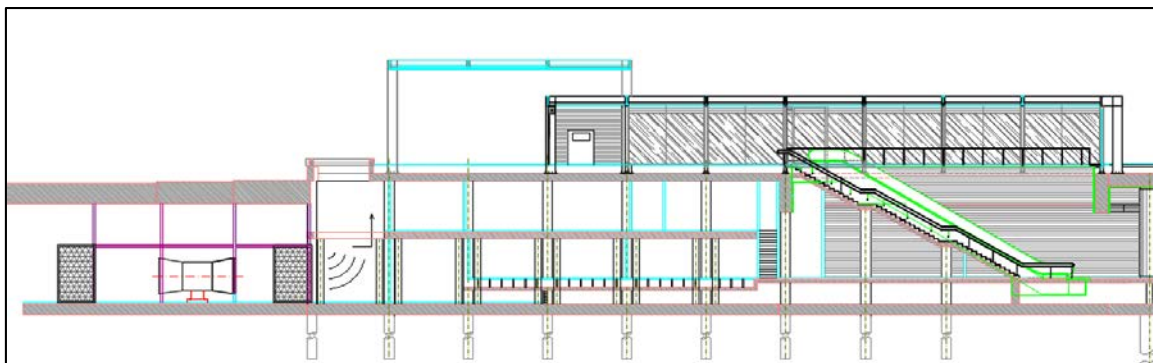


Figura 174. Sección zona conexión túnel (dcha) estación (izq).

En la siguiente figura se muestra el andén de la estación.

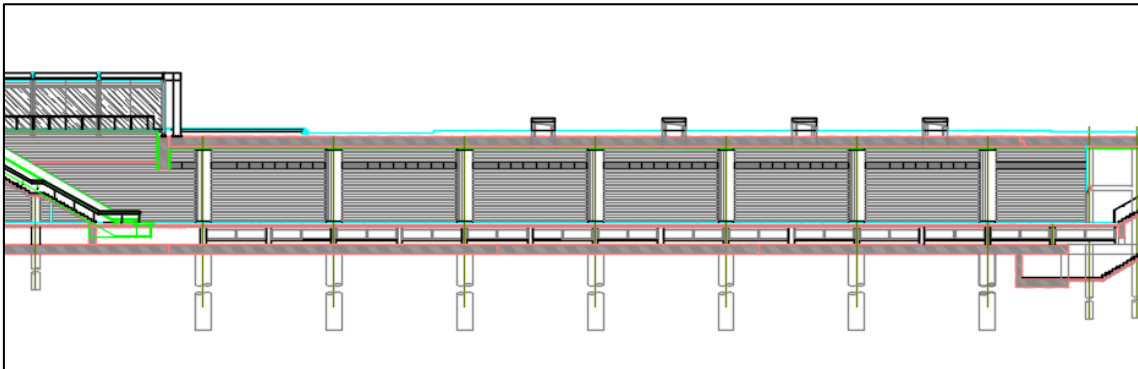


Figura 175. Zona central de la estación donde se encuentra el andén.

En la siguiente figura se muestra la escalera de emergencia de la estación accesible a través de una puerta de emergencia con barra antipánico y la ubicación de los ventiladores axiales reversibles de emergencia encargados de extraer humo y gases calientes de un incendio producido en la estación hacia la calle (resaltado en rojo).

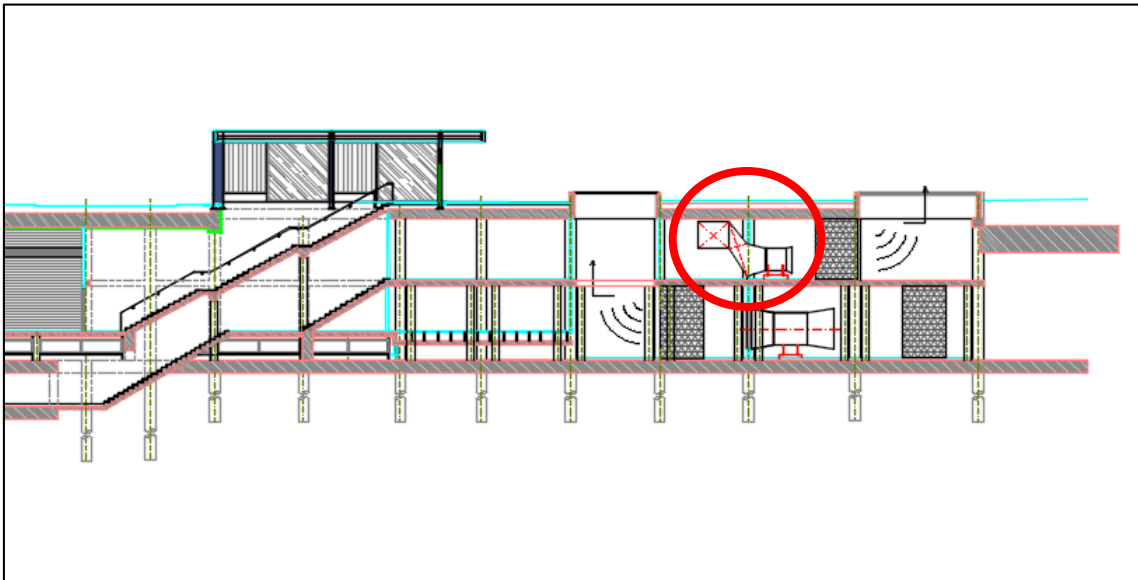
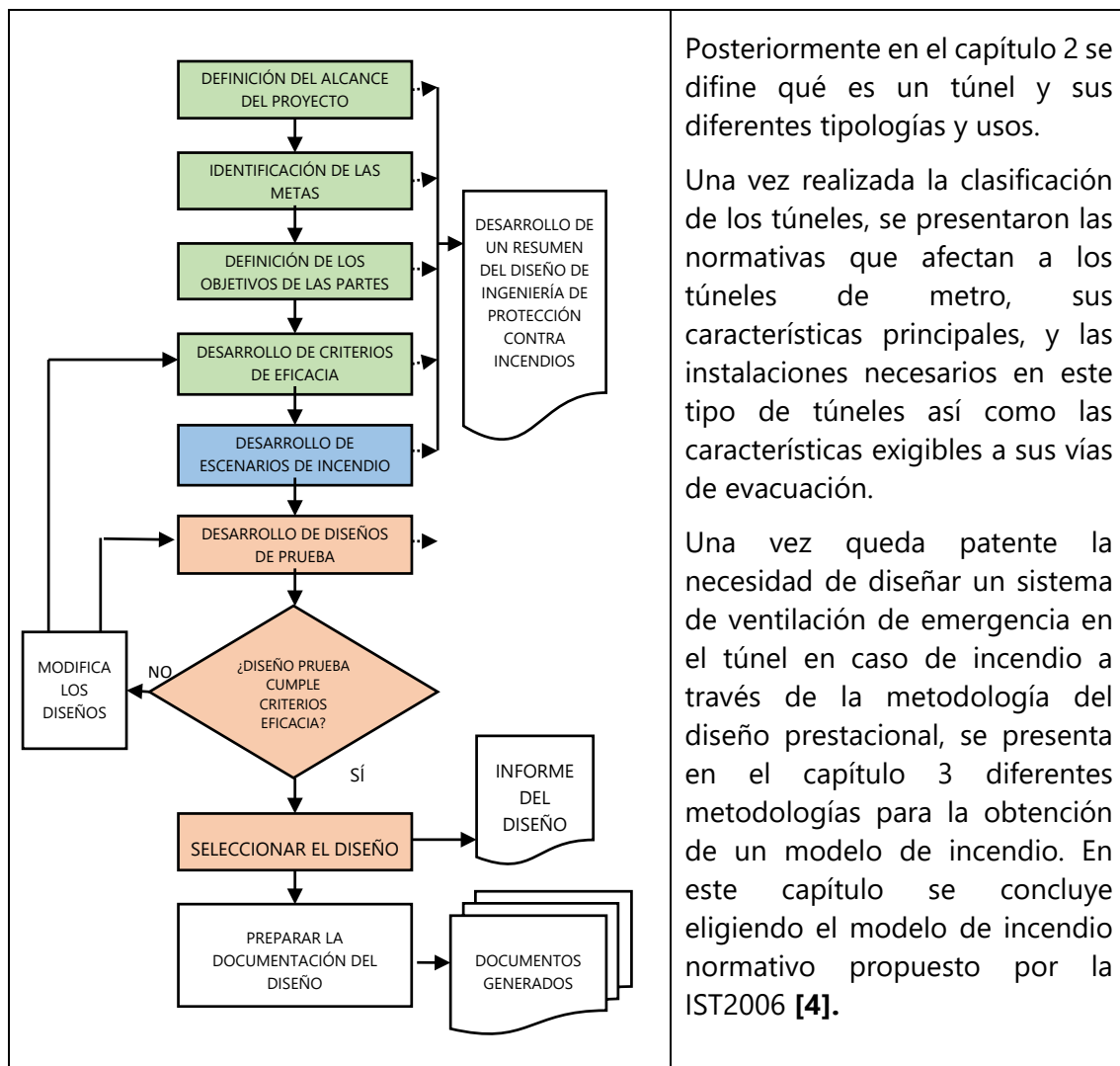


Figura 176. Sección zona final de la estación.

Siguiendo la metodología del diseño prestacional, el alcance del proyecto, la definición de las metas, los objetivos a través de los cuales se verifican las metas y los criterios de aceptación de los objetivos quedaron definidos inicialmente en el capítulo 1 (en verde).



Posteriormente en el capítulo 2 se define qué es un túnel y sus diferentes tipologías y usos.

Una vez realizada la clasificación de los túneles, se presentaron las normativas que afectan a los túneles de metro, sus características principales, y las instalaciones necesarios en este tipo de túneles así como las características exigibles a sus vías de evacuación.

Una vez queda patente la necesidad de diseñar un sistema de ventilación de emergencia en el túnel en caso de incendio a través de la metodología del diseño prestacional, se presenta en el capítulo 3 diferentes metodologías para la obtención de un modelo de incendio. En este capítulo se concluye eligiendo el modelo de incendio normativo propuesto por la IST2006 [4].

En el capítulo 4 se presentan múltiples herramientas informáticas para realizar simulaciones de incendio con el objeto de validar el sistema de ventilación de emergencia en caso de incendio en el interior del túnel. Derivado de las condiciones que se dan en el túnel y las características de los diferentes softwares se opta por un software CFD basado en modelos de campo, llamado FDS. En este capítulo se muestra el software FDS y se realiza un modelo computacional del túnel y la estación.

En el capítulo 5, se presenta inicialmente las diferentes tipologías de sistemas de ventilación en túneles, con especial énfasis en la ventilación de emergencia en caso de incendio. Se propone realizar una instalación de ventilación de emergencia para el túnel objeto del trabajo final de master mediante un sistema de ventilación longitudinal con ventiladores axiales reversibles.

En este mismo capítulo se hace un predimensionado a través del concepto de la velocidad crítica en un túnel con el objeto de evitar el backlayering o retropropagación del humo y gases calientes en el interior del túnel.

Puesto que para la validación del diseño de prueba se desean plantear 7 escenarios de incendio diferentes, teniendo en cuenta el coste computacional derivado de realizar una simulación y puesto que se parte de un predimensionado que puede no cumplir con los objetivos buscados, se decide validar el predimensionado a través de un escenario de incendio el cual se modelará en FDS.

Se tomará el escenario de incendio más crítico tal y como se expone en el capítulo 5. Para realizar la citada simulación es necesario definir en FDS como se modelan los ventiladores axiales reversibles.

Tras dos iteraciones se establece un diseño de prueba que se validará a través de 7 escenarios de incendio tipo en el presente capítulo mostrando los resultados para cada escenario de incendio.

En el capítulo 6 se presentan los conceptos de los tiempos de evacuación (disponible y requerida) y se presentan diferentes métodos para su cálculo. De los tres métodos presentados se elige el método propuesto por la guía europea CFPA No.19 el cual se basa en el cálculo de los tiempos de evacuación a través de un software de evacuación.

Posteriormente se describe el software empleado y se muestra un ejemplo de su utilización.

Todo lo desarrollado desde capítulo 2 al capítulo 6 se emplea para el desarrollo de los escenarios de incendio (en azul).

Finalmente en este capítulo, se presentan los 7 escenarios de incendio que se proponen para la aceptación del diseño de prueba como diseño final (en naranja)

7.3. Definición de los escenarios de incendio tipo

Como se ha introducido al presentar el problema se van a plantear 7 escenarios de incendio a través de los cuales se validará si el diseño de prueba se acepta como diseño final.

La configuración del sistema de ventilación del túnel se obtuvo en el capítulo 5 Ventilación empleándose el Diseño de prueba 2. En este diseño de prueba se divide la longitud del túnel en 6 sectores de 250 metros, instalándose dos jet fans en paralelo en los sectores indicados mientras que en el resto de sectores se mantiene una configuración de un único jet fan central, planteándose la siguiente configuración longitudinal:

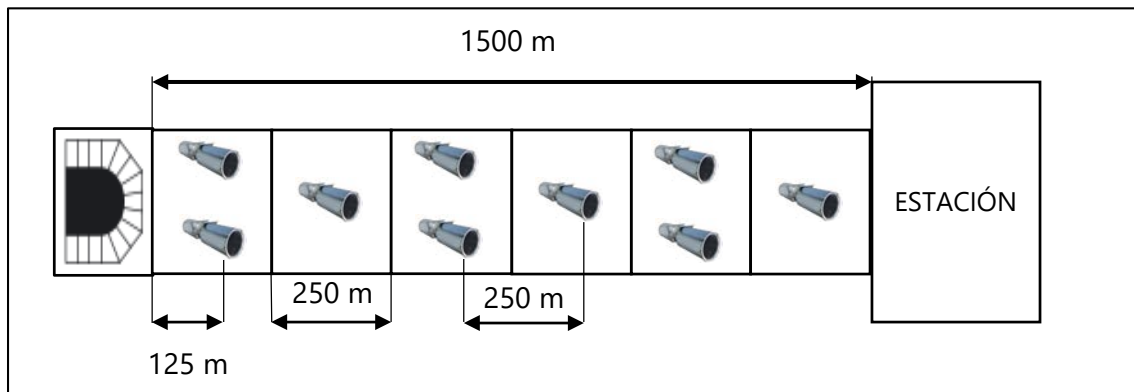


Figura 177. Configuración diseño de prueba.

La separación entre jet fans será de 250 metros entre sí superior a los 103 metros del predimensionado y a una distancia del portal de entrada como de la estación de 125 metros. Los jet fans en paralelo se instalarán con una distancia entre ejes de 7,5 metros tal y como se presenta en la siguiente sección:

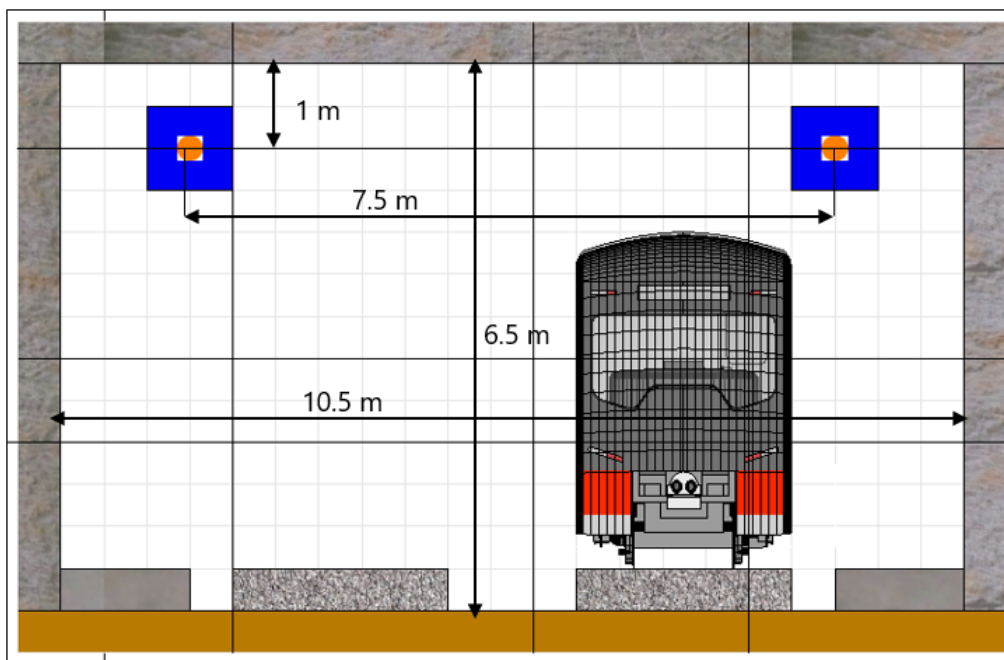


Figura 178. Sección del diseño de prueba con jet fans en paralelo.

Los tramos de túnel con un único jet fan presenta la siguiente sección:

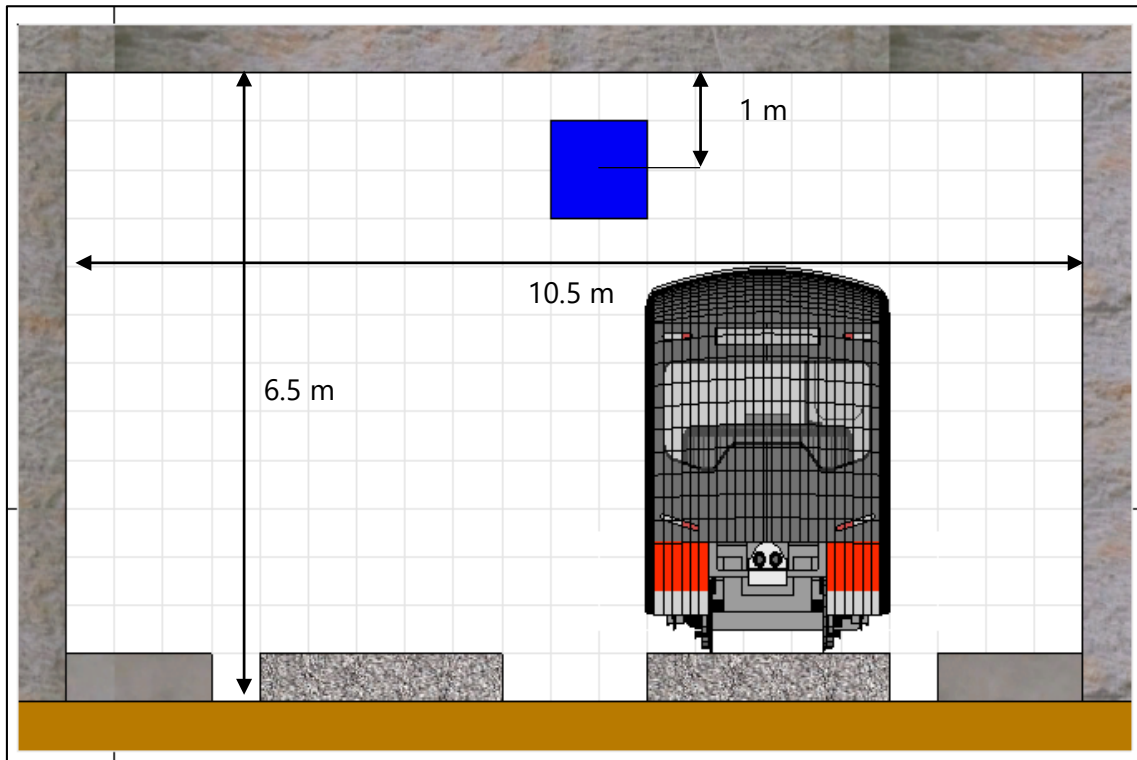


Figura 179. Sección del diseño de prueba.

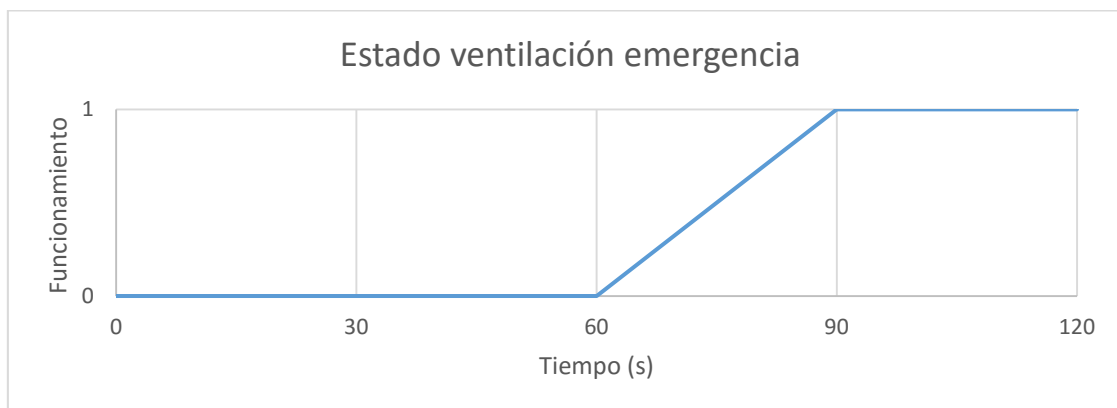
Del centro del jet fan a la superficie más próxima (el techo del túnel) hay un metro de distancia. El jet fan se monta a una altura de 5,5 metros sobre la plataforma de la vía.

La secuencia de funcionamiento de los ventiladores de acuerdo al establecido con la empresa gestora de la línea de metro se modela de la siguiente manera:

T=0 segundos. El tren está detenido y comienza el incendio.

T=60 segundos. Tras la detección del incendio por parte de un miembro de la empresa gestora de la línea de metro, se da la alarma al centro de control y se procede al arranque del sistema de ventilación de emergencia.

T=90 segundos. El sistema de ventilación de emergencia alcanza el régimen permanente del funcionamiento.



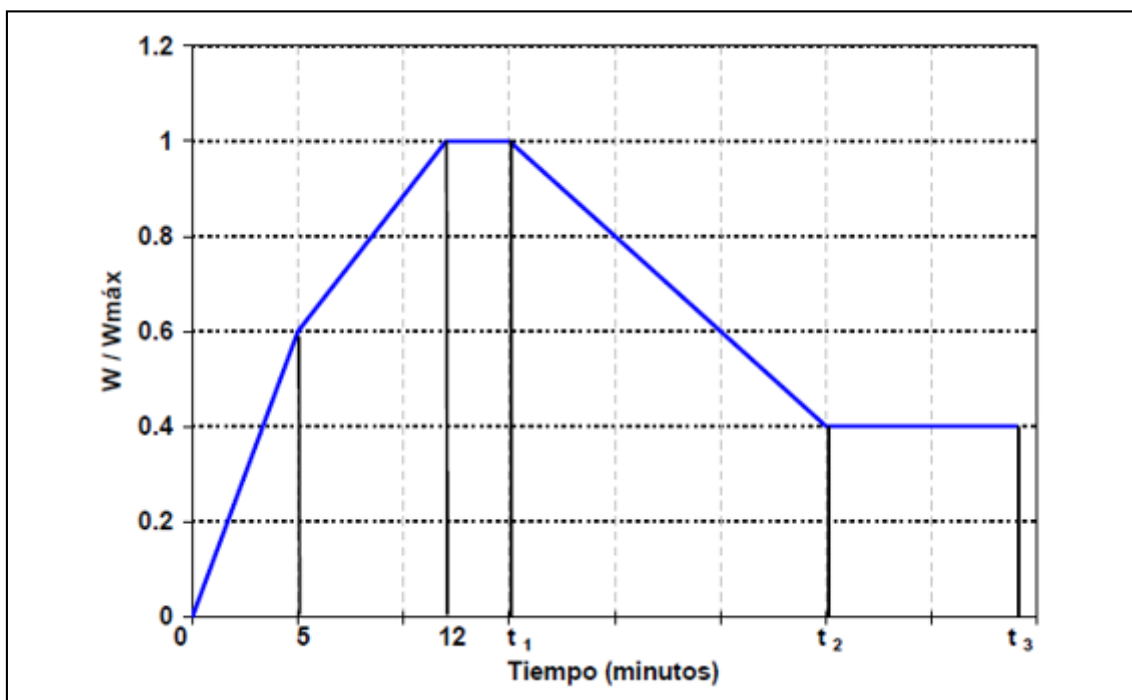
Gráfica 27. Arranque del sistema de ventilación de emergencia.

En cada escenario de incendio se estudiará el funcionamiento del sistema de ventilación de emergencia para diferentes configuraciones de incendio. En particular se planteará que el convoy de metro se incendia en tres posiciones del túnel, considerando para cada posición dos sentidos de marcha del tren.

El incendio siempre se iniciará en la cabeza tractora del tren, por tanto el sistema de ventilación de emergencia, con el objeto limpiar las vías de evacuación de humos y gases calientes impulsará el humo en el sentido de marcha del tren, permitiendo a los ocupantes evacuar en condiciones de seguridad.

Los incendios se han modelado de acuerdo a la Instrucción sobre seguridad en túneles de IST2006 [4].

La tasa de liberación de calor adoptada sigue la gráfica siguiente de la IST2006..



Gráfica 28. Tasa de liberación de calor del incendio modelo.

POTENCIA MÁXIMA DEL INCENDIO (MW)	TIEMPOS CARACTERÍSTICOS (minutos)		
	t ₁	t ₂	t ₃
15	18	30	60
30	30	60	120
300	240	--	--

Tabla 39. Evolución de la curva en función de la potencia del incendio.

TIPO DE VEHÍCULO INCENDIADO	POTENCIA MÁX. DEL INCENDIO (MW)	DURACIÓN DEL INCENDIO (horas)	CAUDAL DE HUMOS PRODUCIDOS (m ³ /s)
Locomotora eléctrica o coche de viajeros	15	1	60
Locomotora Diesel o vagón de mercancías	30	2	80
Vagón de mercancías peligrosas	300	4	460

Tabla 40. Caudal de humos producidos.

Además se ha comprobado que el caudal de humos (gases calientes) producidos por el incendio es al menos de 60m³/s. Para medir la cantidad de humo producida se calcula la velocidad media de los gases calientes producidos por el incendio en la cabeza tractora del tren. Como la superficie que genera humos y gases calientes es fija y se conoce (dos franjas de 15 metros de longitud por 1 metro de altura a cada costado de la cabeza tractora del tren) multiplicando la velocidad de los humos por la superficie de la zona que genera los humos se determina el caudal de humos y gases calientes.

En la imagen se muestra el incendio para t=150 segundos. El tamaño del incendio varía en función del tiempo alcanzando 30 metros cuadrados a los 720 segundos.

El hecho de que el incendio crezca con el tiempo no impide que se haya modelado la curva de la tasa de liberación de calor con exactitud.

En la siguiente gráfica se muestra el análisis de la velocidad media de los humos y gases calientes. Puede observarse que la velocidad se estabiliza en torno a un valor de 2,21 m/s.

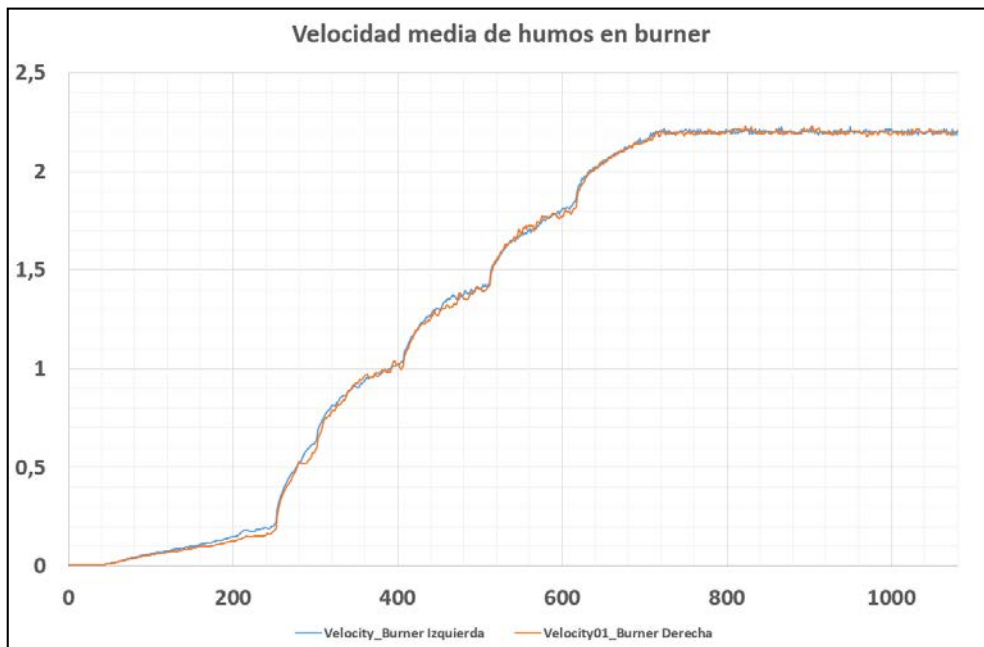


Figura 180. Velocidad de los humos.

Así pues se obtiene un caudal de:

$$Q = 2 \cdot (V \cdot S) = 2 \cdot (2,21 \cdot 15) = 66,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como puede observarse el caudal de humos y gases calientes producidos es mayor de 60 m³/s estando del lado de la seguridad.

Las posiciones elegidas para plantear los escenarios de incendio son en la entrada del túnel (a 150 metros del portal) en la zona central del túnel (a 650 m del portal) y en las proximidades de la conexión del túnel con la estación (a 1150 m del portal).

Se toma como punto de referencia el portal del túnel siendo PK=0+0.

En estos 6 escenarios solo se simula el túnel sin tener en cuenta la estación y el sistema de extracción de humos, estando del lado de la seguridad.

El escenario de incendio numero 7 parte de la configuración del escenario de incendio 5 pero se añade la estación con el sistema de extracción de humos existente en ella. El objeto de esta simulación es verificar que el sistema de extracción instalado en la estación es capaz de extraer el humo del túnel sin que este llegue al andén. Es por ello que se toma el escenario de incendio 5 como base debido a la cercanía a la estación y a que se el sistema de ventilación de emergencia impulsa el humo hacia ella.

A continuación se presenta un listado de los escenarios de incendio:

Escenario tipo	Ubicación del incendio	Sentido avance del tren	Sentido impulsión ventilación	Sentido evacuación
Escenario de incendio 1 (EI1)	PK=0+150	Hacia estación →	Hacia estación →	Hacia portal ←
Escenario de incendio 2 (EI2)	PK=0+150	Hacia portal ←	Hacia portal ←	Hacia estación →
Escenario de incendio 3 (EI3)	PK=0+650	Hacia estación →	Hacia estación →	Hacia portal ←
Escenario de incendio 4 (EI4)	PK=0+650	Hacia portal ←	Hacia portal ←	Hacia estación →
Escenario de incendio 5 (EI5)	PK=1+150	Hacia estación →	Hacia estación →	Hacia portal ←
Escenario de incendio 6 (EI4)	PK=1+150	Hacia portal ←	Hacia portal ←	Hacia estación →
Escenario de incendio 7 (EI5)	PK=1+150	Hacia estación →	Hacia estación →	Hacia portal ←

Tabla 41. Listado de los escenarios de incendio tipo

A continuación se presenta un esquema de cada uno de los escenarios de incendio.

Escenario de incendio 1:

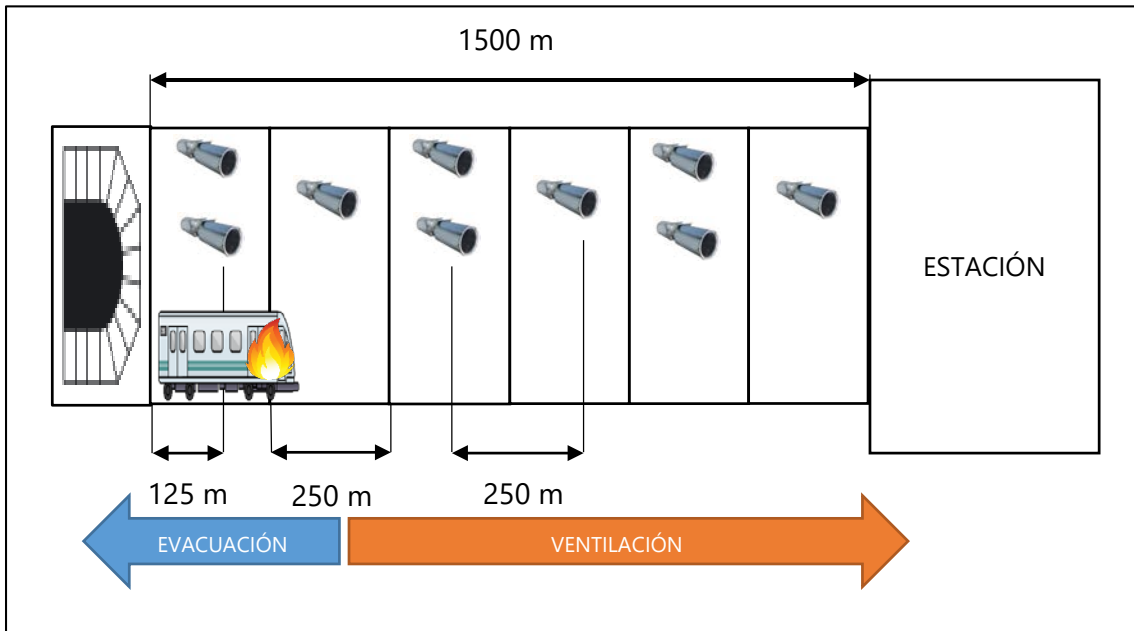


Figura 181. Esquema de escenario de incendio 1

En este escenario de incendio el tren está entrando por el túnel quedando parado a los 150 metros del portal PK= 0+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia la estación y la evacuación se realiza hacia el portal del túnel.

Escenario de incendio 2:

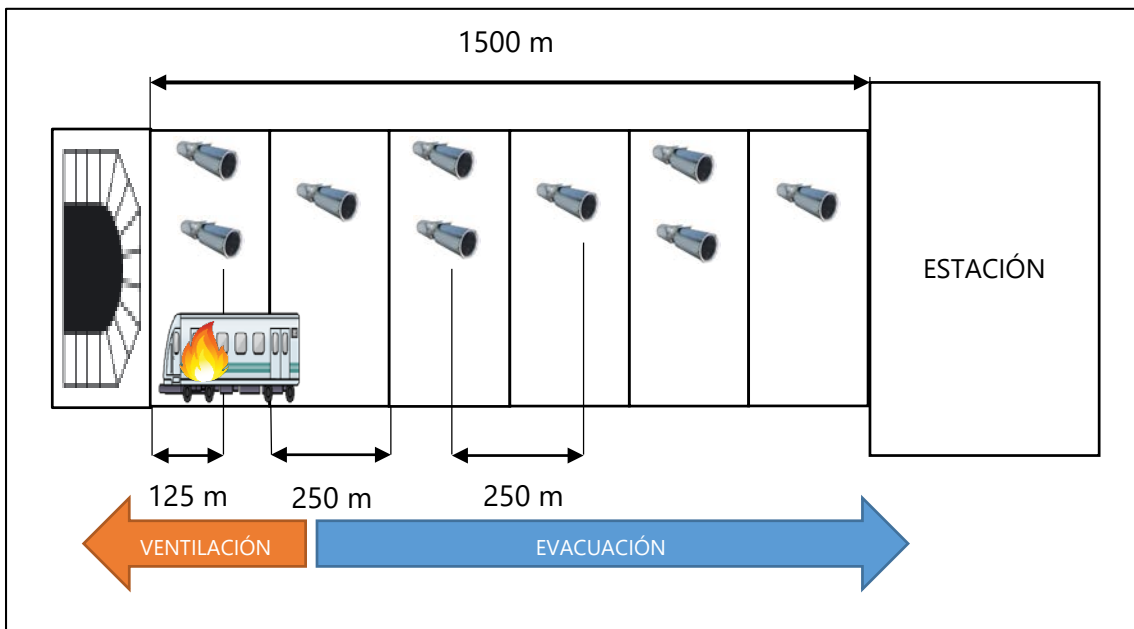


Figura 182. Esquema de escenario de incendio 2

En este escenario de incendio el tren está saliendo del túnel quedando parado a los 150 metros del portal PK= 0+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia el portal y la evacuación se realiza hacia la estación.

Escenario de incendio 3:

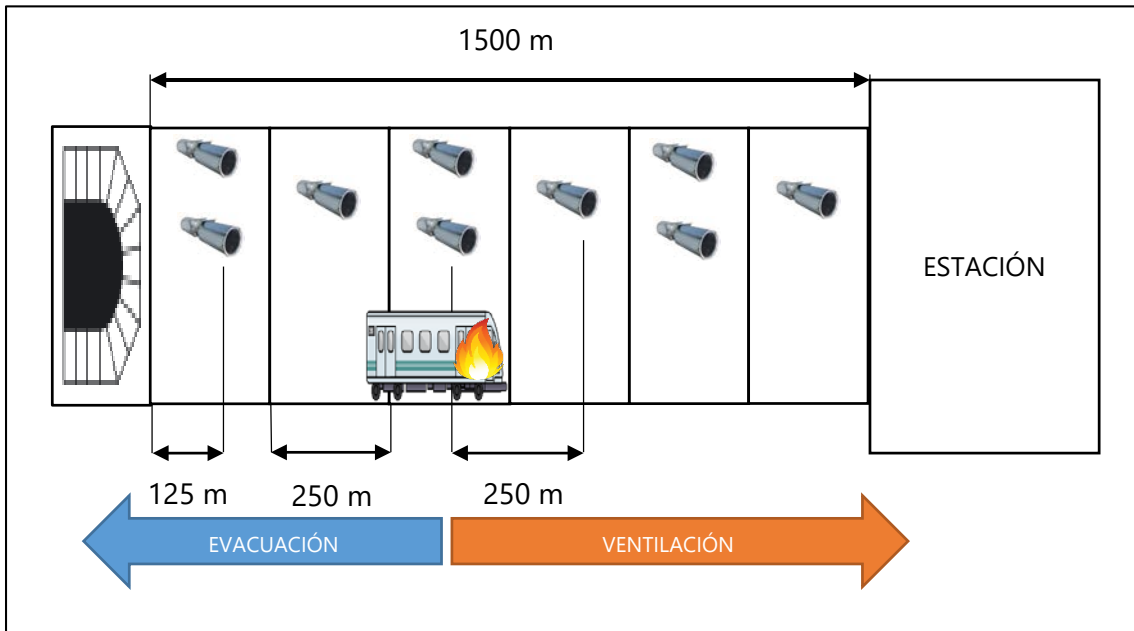


Figura 183. Esquema de escenario de incendio 3

En este escenario de incendio el tren está entrando por el túnel quedando parado a los 650 metros del portal PK= 0+650. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia la estación y la evacuación se realiza hacia el portal del túnel.

Escenario de incendio 4:

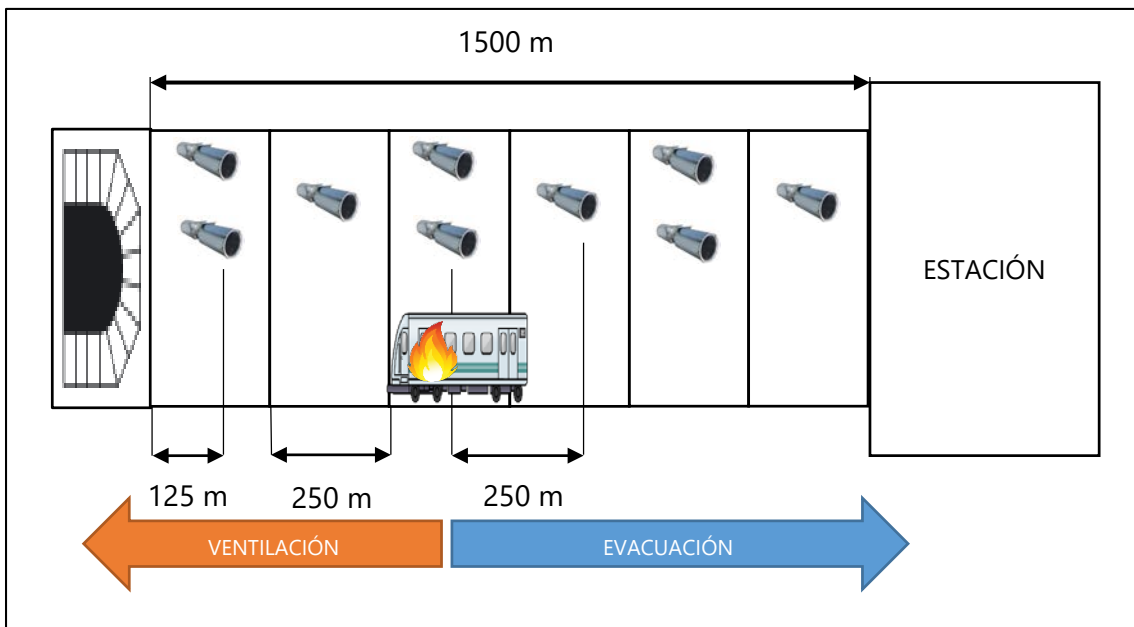


Figura 184. Esquema de escenario de incendio 4

En este escenario de incendio el tren está saliendo del túnel quedando parado a los 650 metros del portal PK= 0+650. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia el portal y la evacuación se realiza hacia la estación.

Escenario de incendio 5:

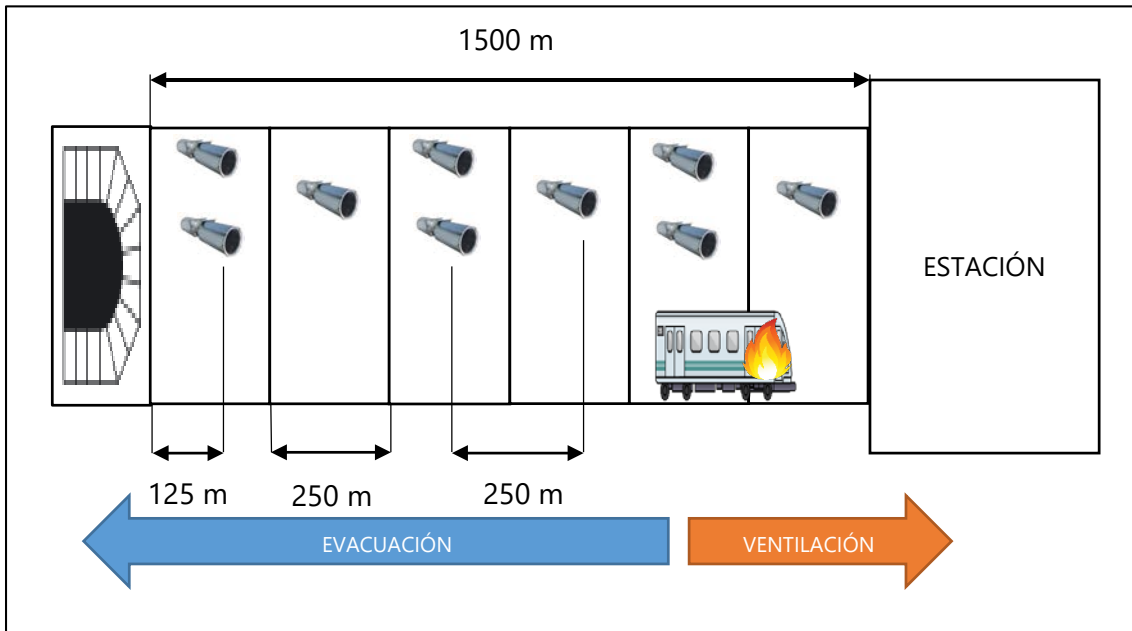


Figura 185. Esquema de escenario de incendio 5

En este escenario de incendio el tren está entrando por el túnel quedando parado a los 1.150 metros del portal PK= 1+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia la estación y la evacuación se realiza hacia el portal del túnel.

Escenario de incendio 6:

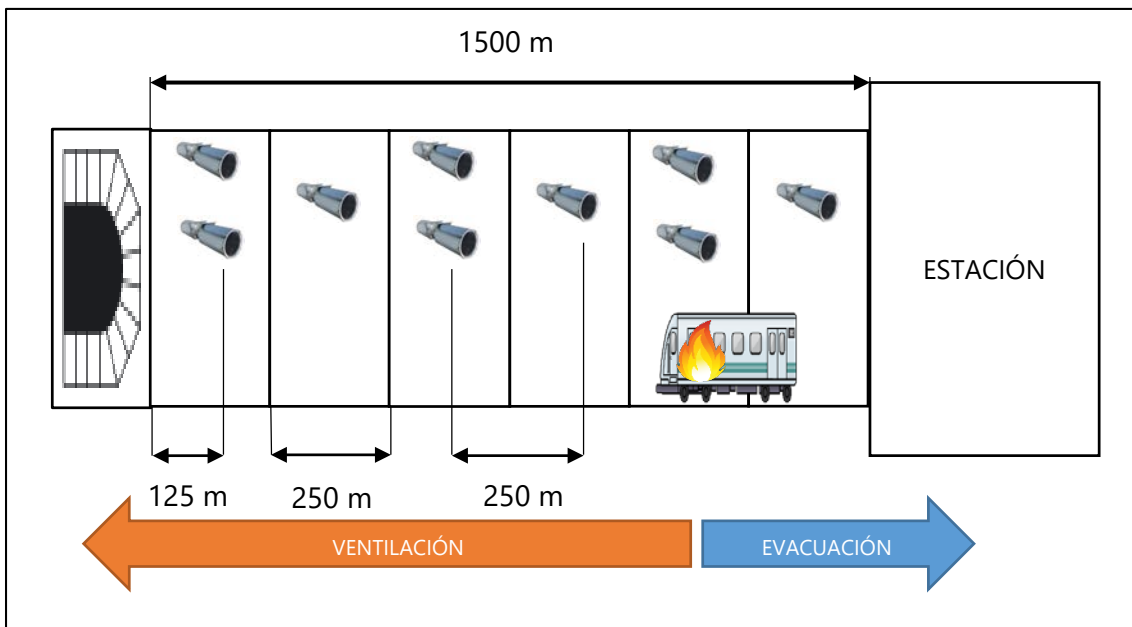


Figura 186. Esquema de escenario de incendio 6

En este escenario de incendio el tren está saliendo del túnel quedando parado a los 1.150 metros del portal PK= 1+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia el portal y la evacuación se realiza hacia la estación.

Escenario de incendio 7:

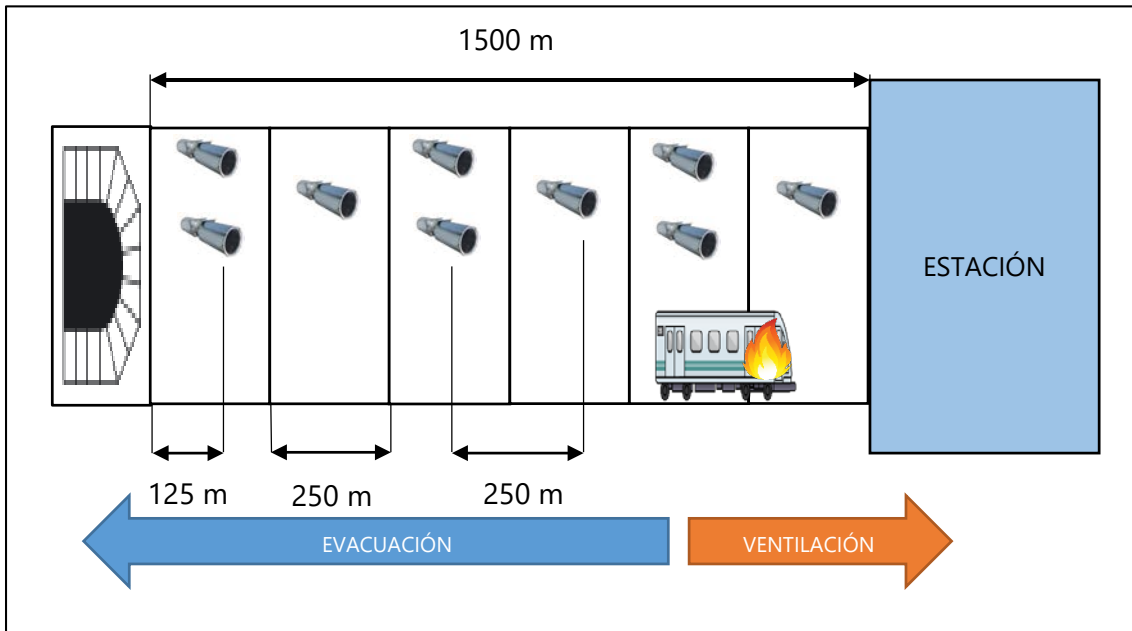


Figura 187. Esquema de escenario de incendio 5

Este escenario de incendio es igual al EI5, añadiendo al modelo la estación y el sistema de extracción de humo presente en la estación. El sistema de extracción de humo de la estación está compuesto por dos ventiladores axiales reversible capaces de trasegar un caudal de $73 \text{ m}^3/\text{s}$.

Su ubicación se encuentra en las inmediaciones de la unión entre el túnel y la estación.

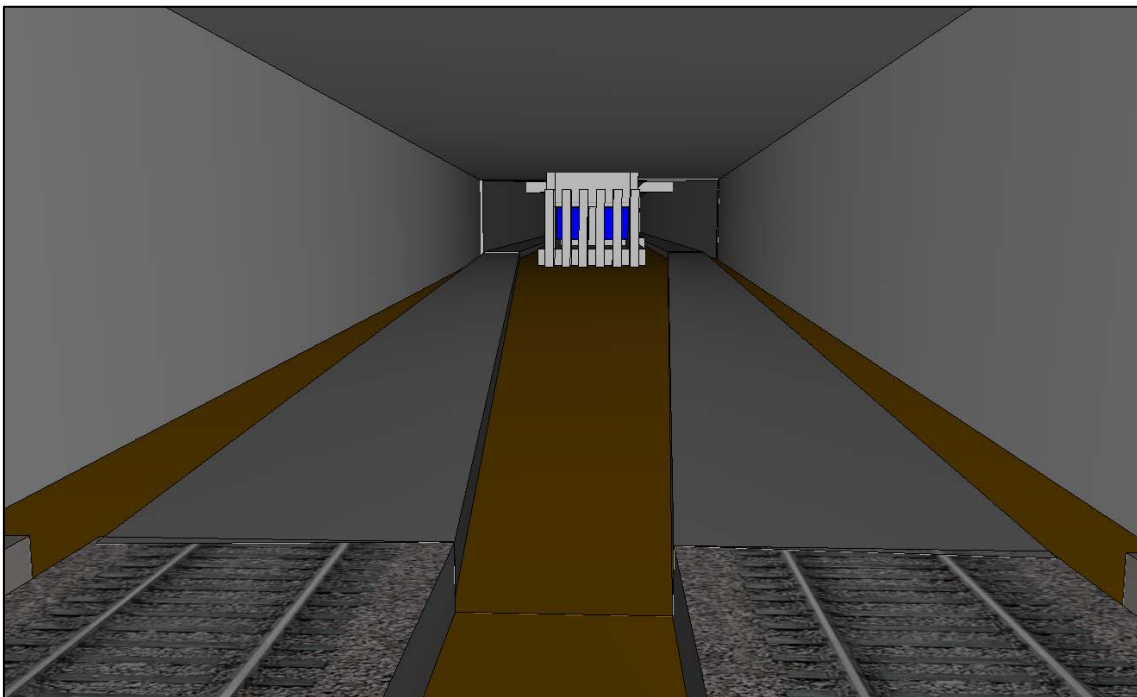


Figura 188. Ubicación del sistema de extracción de humo de la estación.

En la sección se muestra como el sistema de extracción de la estación absorbe el humo para expulsarlos a través de una cámara construida para tal efecto hacia la calle.

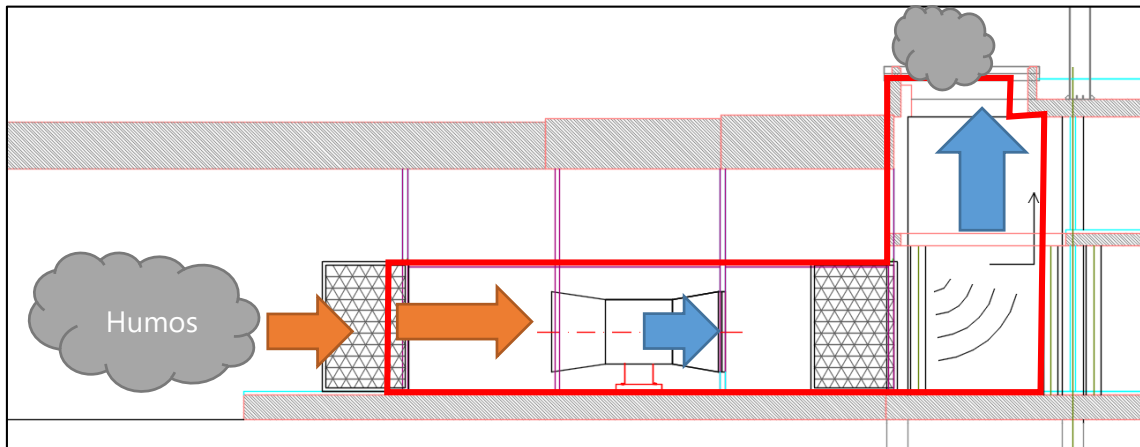


Figura 189. Sección del sistema de extracción de la estación mediante ventiladores axiales reversibles.

A diferencia del resto de escenarios de incendio, en el Escenario de Incendio 7 se activa además del sistema de ventilación de emergencia del túnel, el sistema de extracción.

El objeto de este escenario de incendio es comprobar si el humo y gases calientes impulsados por el sistema de ventilación de emergencia hacia el túnel son extraídos correctamente por el sistema de extracción de la estación mientras se realiza la evacuación de emergencia en la estación.

En la estación existe la ocupación adicional de otro convoy de metro con 900 personas así como la mitad de la ocupación de un tren (450 personas) esperando en el andén para realizar un transbordo. La tipología de la población es idéntica a la existente en el resto de escenarios estando compuesta por un 40% de mujeres adultas, un 40% por varones adultos, un 10% de niños y un 10% de ancianos.

En el resto de escenarios de incendio no se ha tenido en cuenta el efecto producido por la activación de este sistema instalado en la estación, el cual puede actuar tanto en aspiración como en impulsión aportando un empuje considerable.

Por tanto se considera que los seis Escenarios de Incendio anteriores están del lado de la seguridad.

En las siguientes imágenes se presenta varias imágenes de la ocupación de la estación en el momento del inicio del incendio.



Figura 190. Ocupantes en el andén.



Figura 191. Ocupación del tren parado en la estación.

7.4. Análisis de los resultados

Para cada simulación se verificará el cumplimiento de los criterios de aceptación definidos para la meta Seguridad de Vida en el capítulo 1, los cuales quedan resumidos en el cumplimiento de la siguiente expresión.

$$\text{ASET} > \text{RSET} \quad \text{Ec (7.1)}$$

Por otra parte se debe garantizar:

$$\text{ASRT} > 120 \text{ minutos} \quad \text{Ec (7.1)}$$

Para cada escenario de incendio se analizará lo siguiente:

Objetivo 1.1.1

Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones de salubridad (tenability) en las vías de evacuación.

Criterio A

Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de oxígeno (O₂) no inferior al 18% a 2,00 metros de altura.

Una concentración de O₂ del 18% supone 0,18 mol/mol, teniendo en cuenta que un mol de O₂ pesa 32 g y que un mol de aire pesa 28,96 g se tiene que 0,18 mol/mol \approx 0,2 g/g = 20·10⁻²Kg/Kg.

Criterio B

Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de monóxido de carbono (CO) inferior a 450 ppm a 2,00 metros de altura.

Para la determinación de la concentración de CO se parte de que 1 ppm = 10⁻⁶ mol/mol, teniendo en cuenta que un mol de CO pesa 30 g y que un mol de aire pesa 28,96 g se tiene que 1ppm = 1,0359·10⁻⁶ g/g, de este modo 800ppm = 450·1,0359·10⁻⁶g/g lo que equivale a 0,466·10⁻³ g/g.

Criterio C

Durante el periodo de evacuación, garantizar una concentración de dióxido de carbono (CO₂) inferior a 0,03 mol/mol a 2,00 metros de altura. Este criterio queda englobado en los dos criterios anteriores no realizándose la comprobación de concentración de CO₂.

Objetivo 1.1.2

Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones adecuadas de visibilidad en las vías de evacuación

Criterio D

Durante el periodo de evacuación, garantizar un nivel de visibilidad por encima de los 10m. a 2,00 metros sobre el suelo.

Objetivo 1.1.3

Durante el periodo de evacuación, garantizar unas condiciones térmicas adecuadas en las vías de evacuación.

Criterio E

Durante el periodo de evacuación, garantizar una temperatura inferior a 60°C a 2,00 metros de altura.

Criterio F

Durante el periodo de evacuación, limitar la radiación incidente a 2,5 kW/ a 2,00 metros de altura en las vías de evacuación. Este criterio no se aplicará ya que queda englobado en el criterio E.

Objetivo 1.1.4

Durante el periodo de evacuación, limitar una velocidad del aire de ventilación de modo que no dificulte la evacuación.

Criterio G

Durante de evacuación, limitar la velocidad del viento en contra de la dirección de evacuación a 10m/s.

A través de los diferentes escenarios de incendio modelados mediante FDS se introducirán planos de toma de resultados tipo Slice para poder monitorizar a lo largo de la simulación los diferentes parámetros estudiados a dos metros encima de las vías de evacuación.

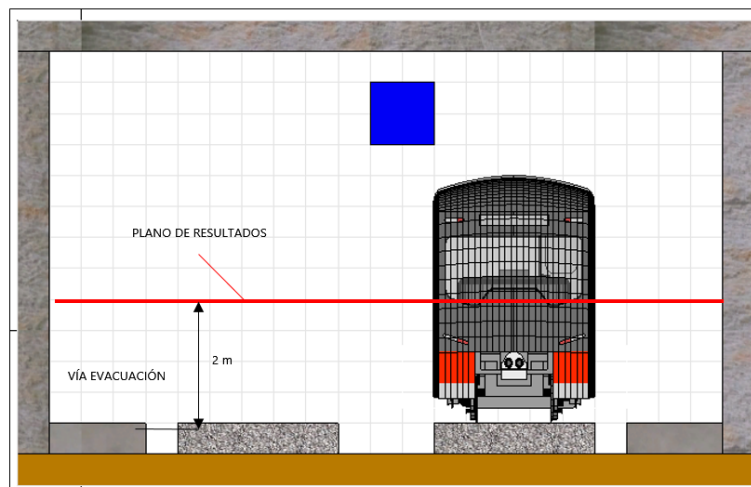


Figura 192. Ubicación de los planos de toma de resultado

7.4.1. Escenario de incendio EI 1

En este escenario de incendio el tren está entrando por el túnel quedando parado a los 150 metros del portal PK= 0+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia la estación y la evacuación se realiza hacia el portal del túnel.

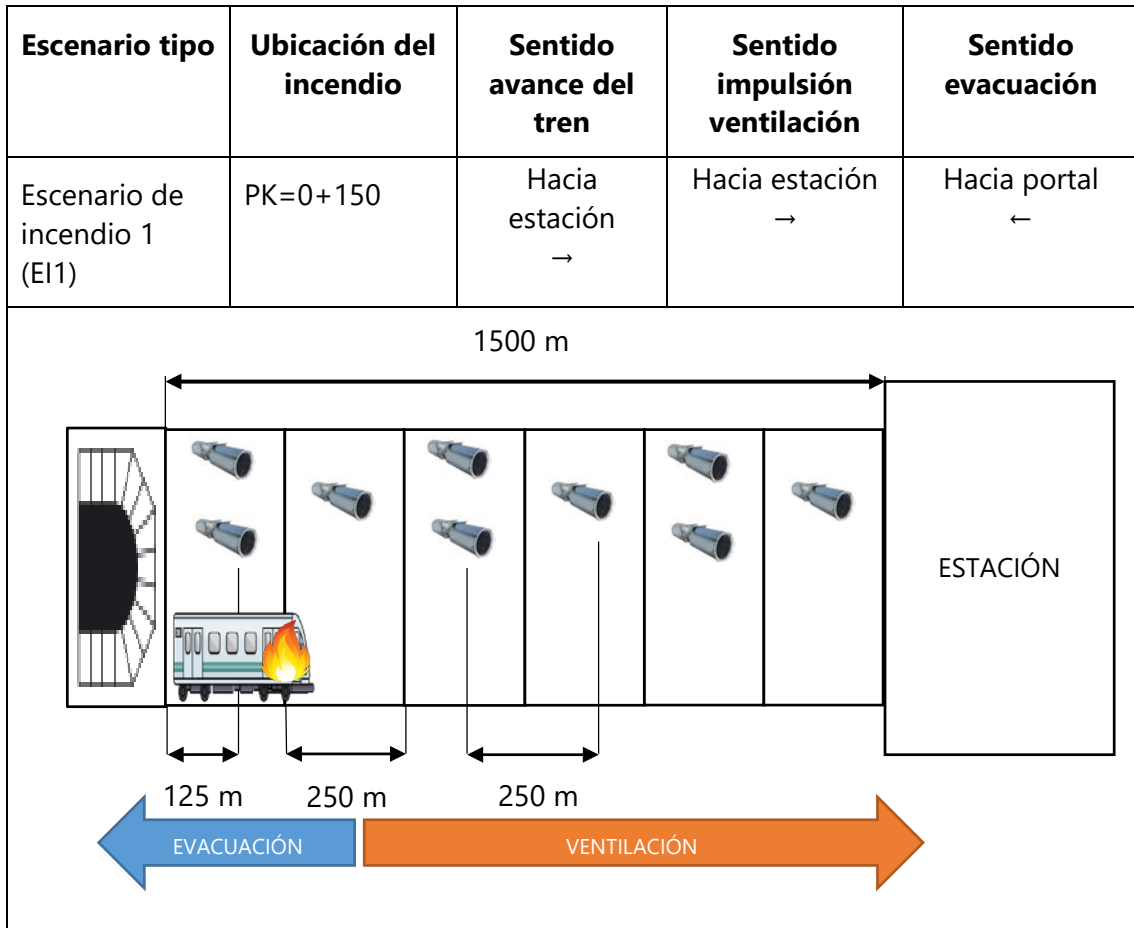
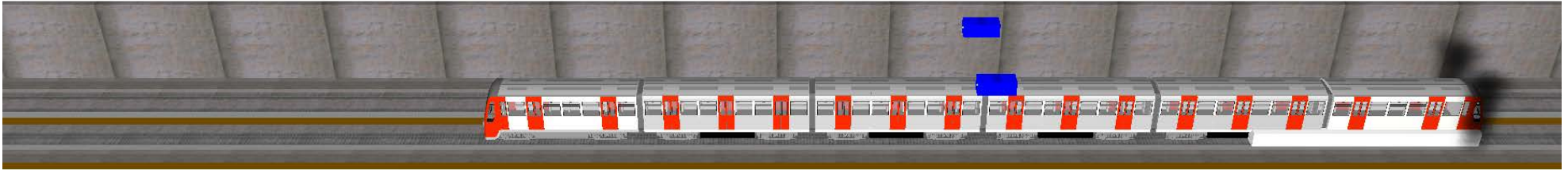


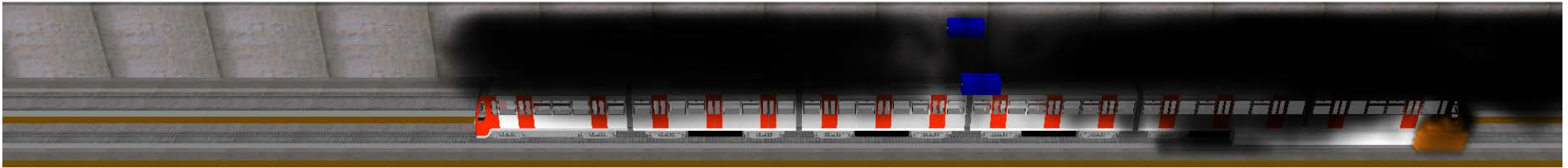
Figura 193. Cuadro resumen del escenario de incendio 1 EI1

7.4.1.1. **Análisis del backlayering**

T=5 segundos. Comienza el incendio



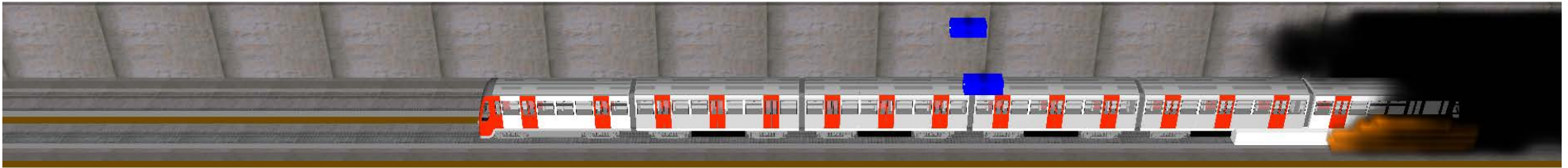
T=100 segundos. Debido al tiempo en que tarda en ponerse en marcha el sistema de ventilación se aprecia un ligero avance del humo.



T=200 segundos. Quedan en las cotas altas del túnel algunas aglomeraciones de humo.



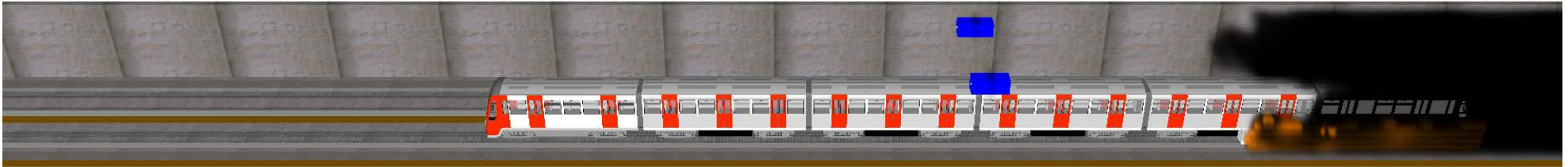
T=300 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



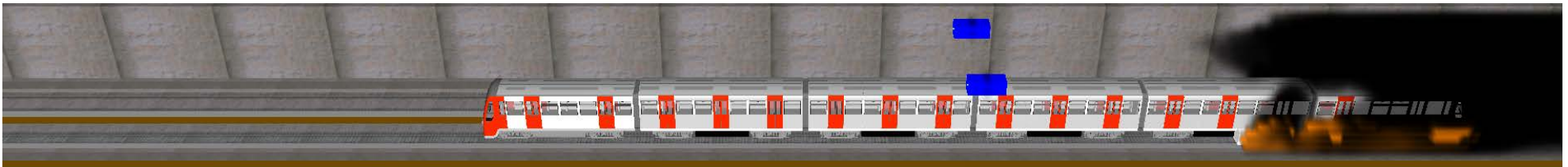
T=500 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



T=720 segundos. Se alcanza la potencia máxima del incendio. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.

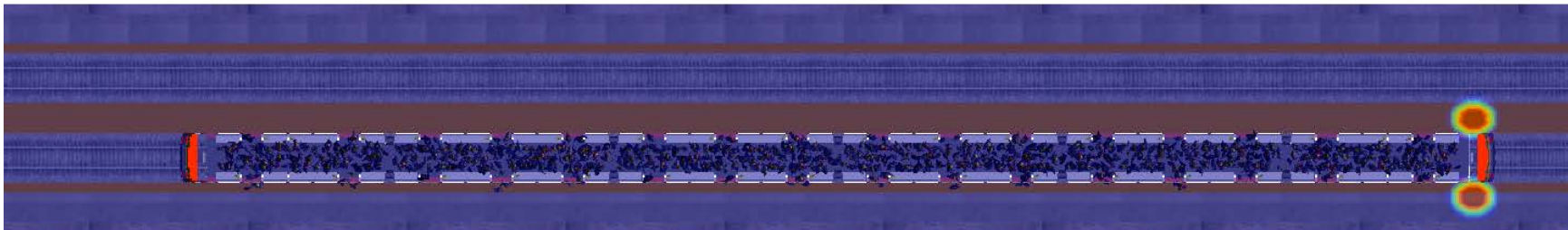


T=1080 segundos. El incendio comienza a decaer.

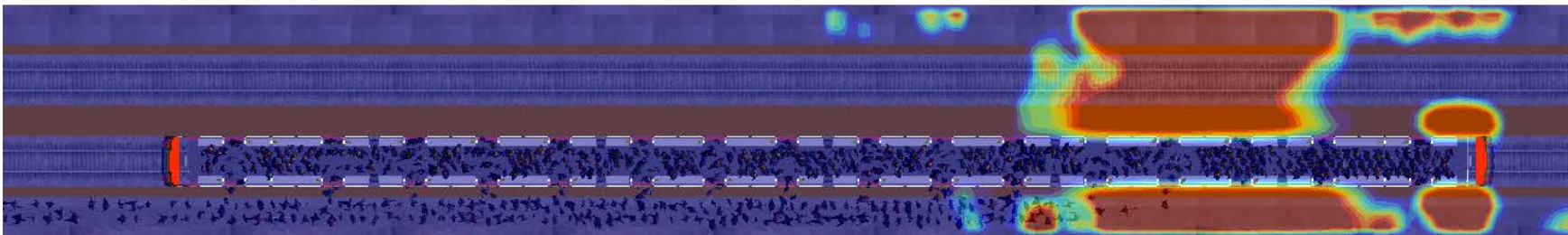


7.4.1.2. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre la vía de evacuación

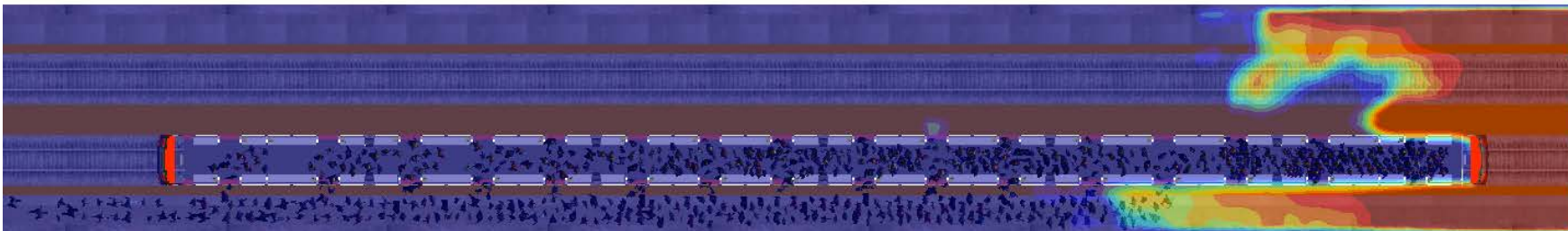
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



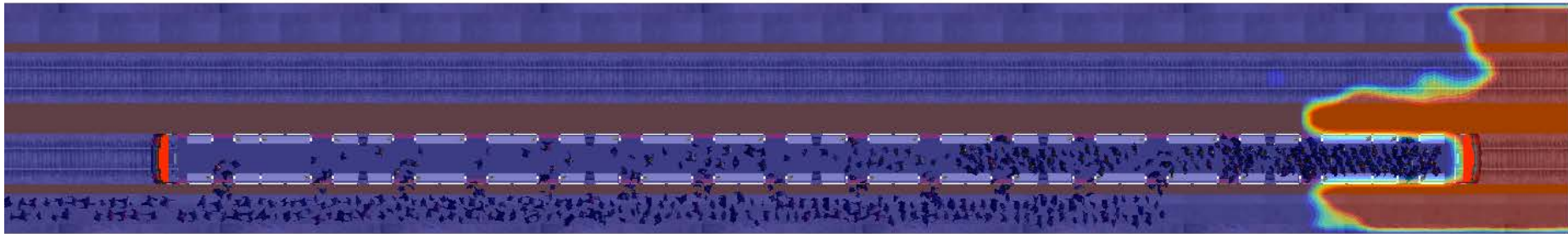
T=100 segundos. El sistema de ventilación funciona en régimen permanente desde el instante t=90 segundos limpiando el humo producido hasta ese instante.



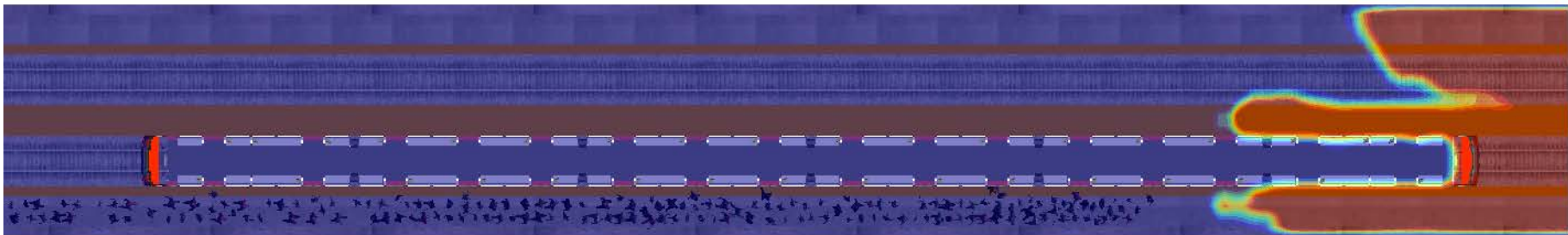
T=200 segundos. El sistema de ventilación ha controlado el backlayeing.



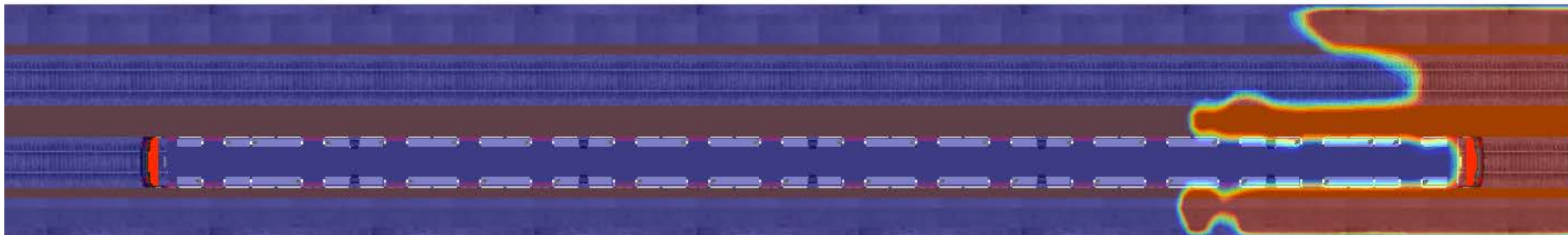
T=300 segundos. El convoy se va vaciando de ocupantes en función de la capacidad de trasiego de la vía de evacuación. El sistema de ventilación controla el backlayering.



T=500 segundos. El convoy esta vacío. El sistema de ventilación controla el backlayering.



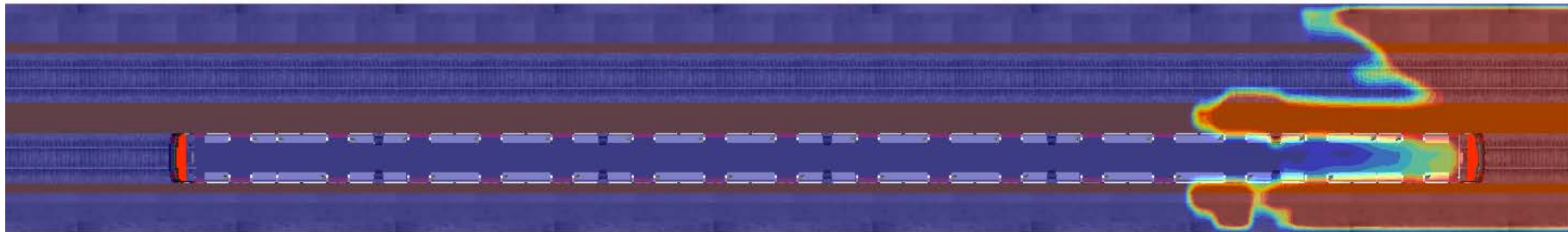
T=720 segundos. Los últimos ocupantes están abandonando el tren mientras que el incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



SOOT
(m)

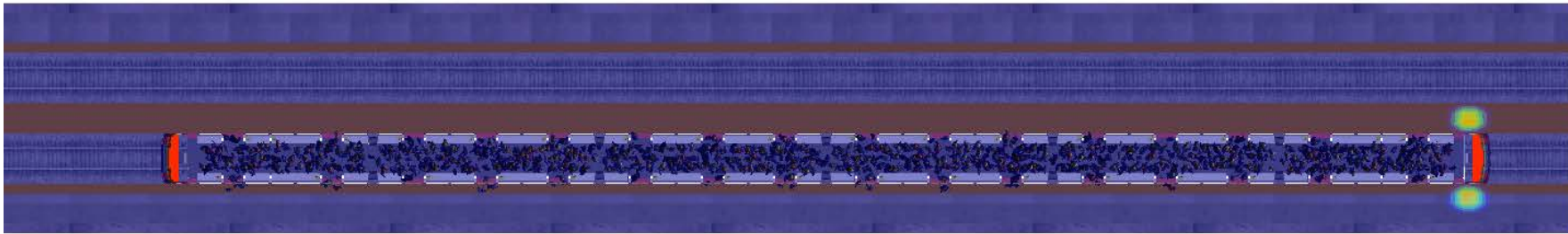


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



7.4.1.3. Análisis de temperatura a 2 metros sobre la vía de evacuación

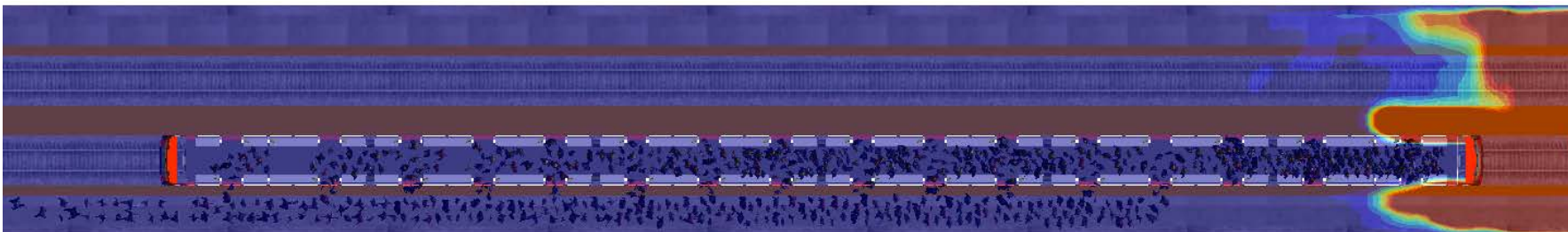
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=100 segundos. El sistema de ventilación funciona en régimen permanente desde el instante t=90 segundos limpiando el humo producido hasta ese instante.



T=200 segundos. El sistema de ventilación ha controlado el backlayeing.

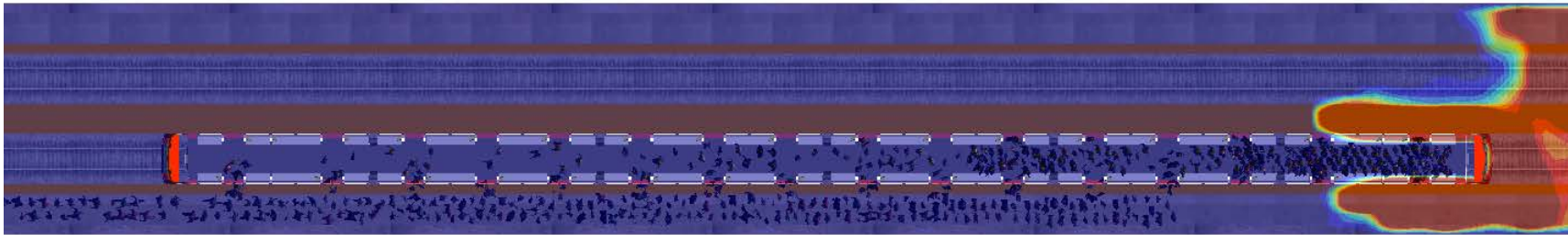


TEMPERATURE
(C)

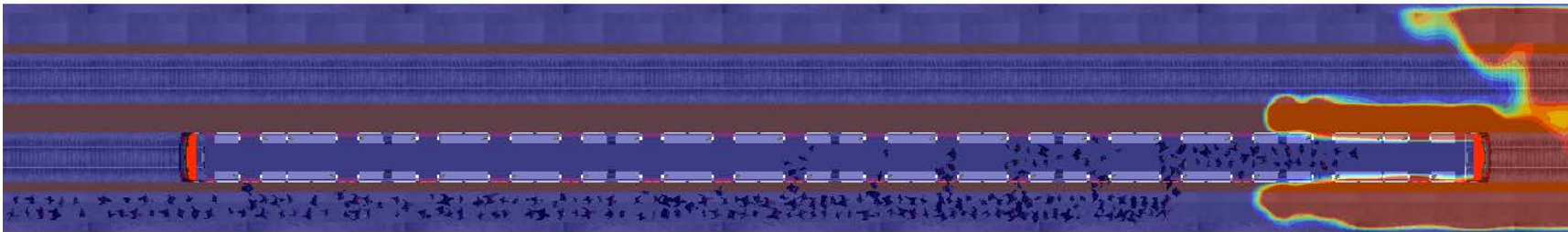


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

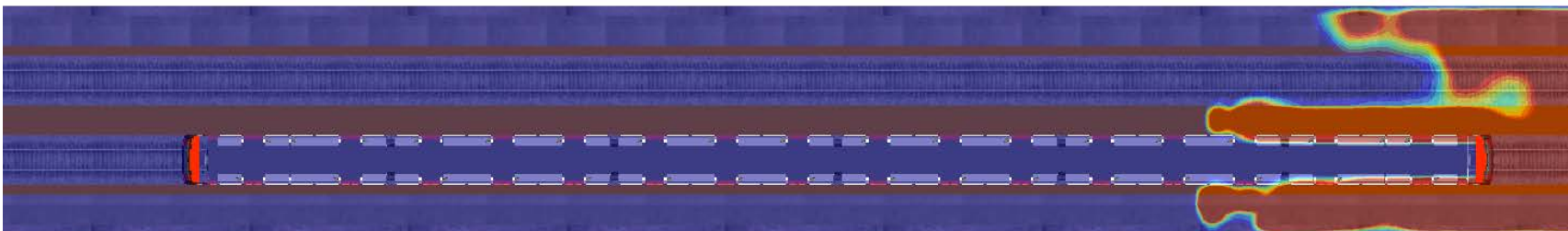
T=300 segundos. El convoy se va vaciando de ocupantes en función de la capacidad de trasiego de la vía de evacuación. El sistema de ventilación controla el backlayering.



T=500 segundos. El convoy esta vacío. El sistema de ventilación controla el backlayering.



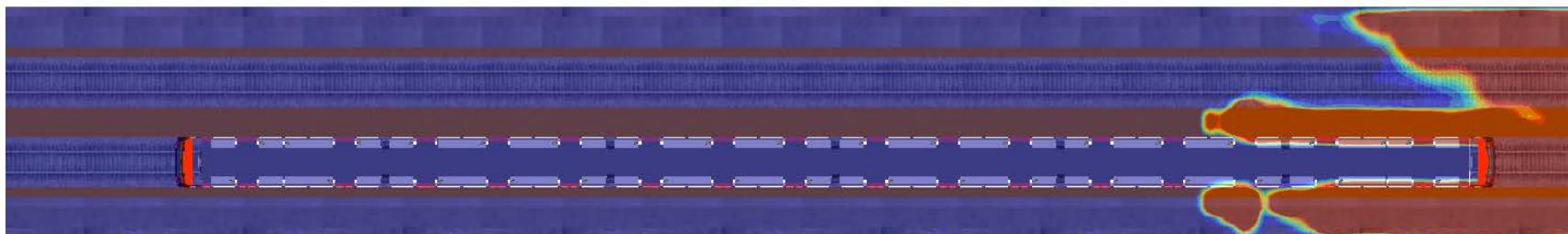
T=720 segundos. Los últimos ocupantes están abandonando el tren mientras que el incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



TEMPERATURE
(C)



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

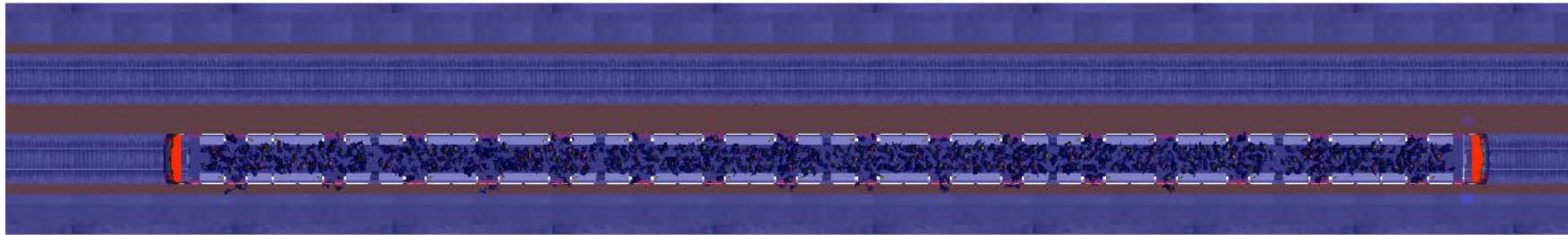


TEMPERATURE
(C)

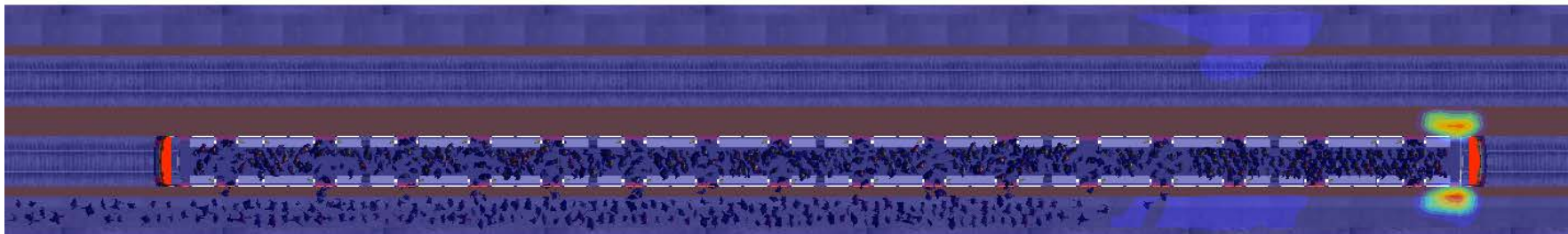


7.4.1.4. Análisis de la concentración de oxígeno a 2 metros sobre la vía de evacuación

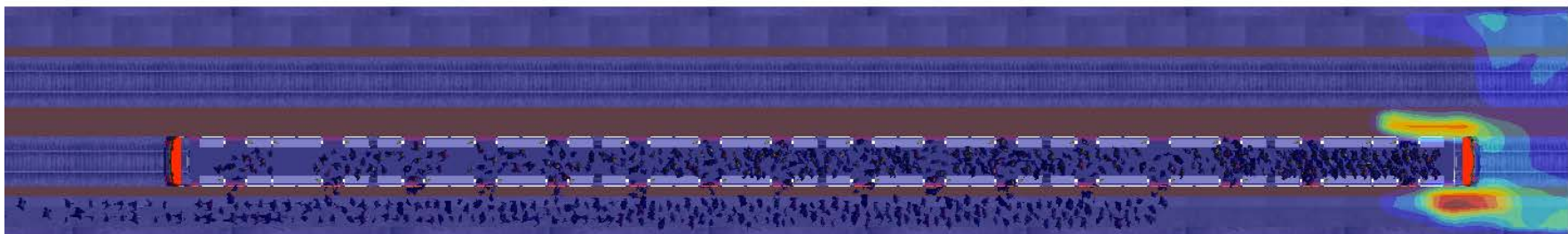
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=100 segundos. El sistema de ventilación funciona en régimen permanente desde el instante t=90 segundos limpiando el humo producido hasta ese instante.



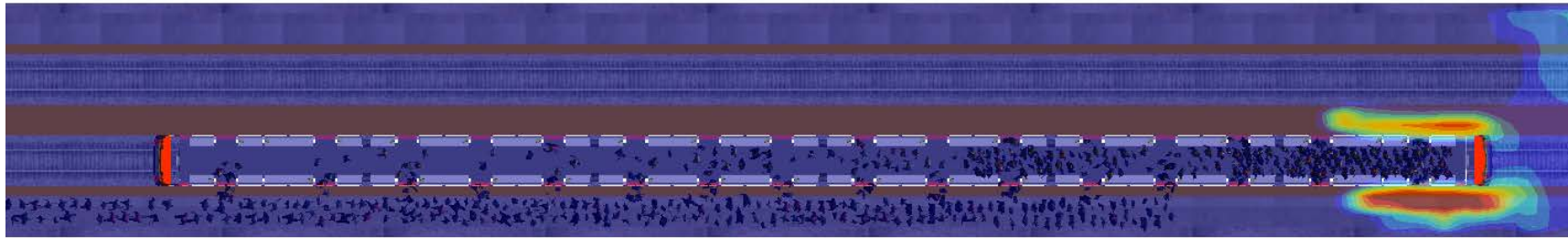
T=200 segundos. El sistema de ventilación ha controlado el backlayeing.



OXYGEN
(kg/kg)



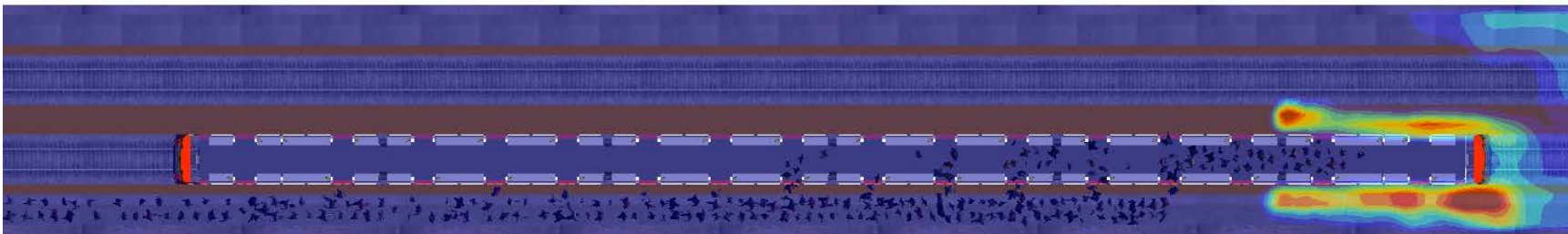
T=300 segundos. El convoy se va vaciando de ocupantes en función de la capacidad de trasiego de la vía de evacuación. El sistema de ventilación controla el backlayering.



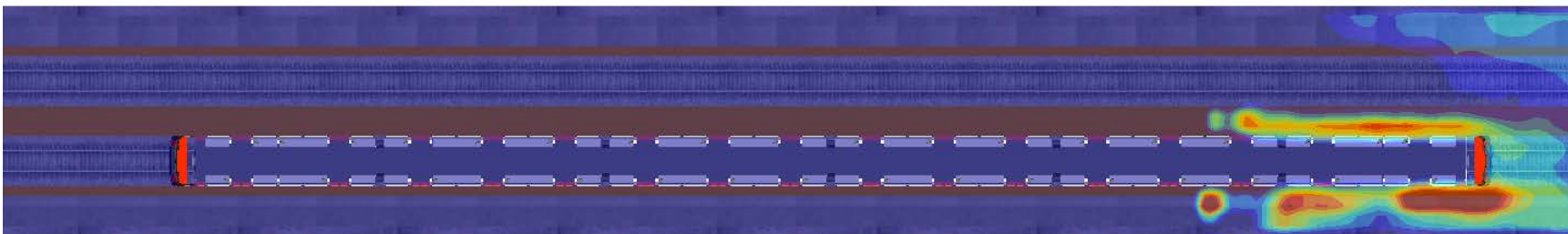
OXYGEN
(kg/kg)



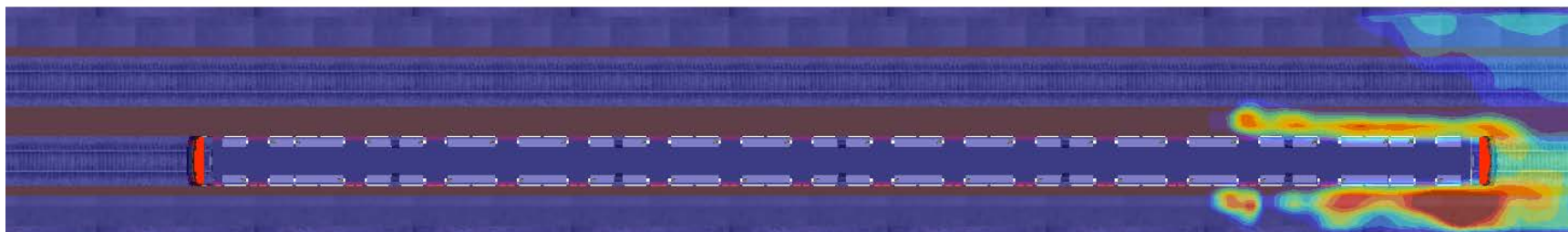
T=500 segundos. El convoy esta vacío. El sistema de ventilación controla el backlayering.



T=720 segundos. Los últimos ocupantes están abandonando el tren mientras que el incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

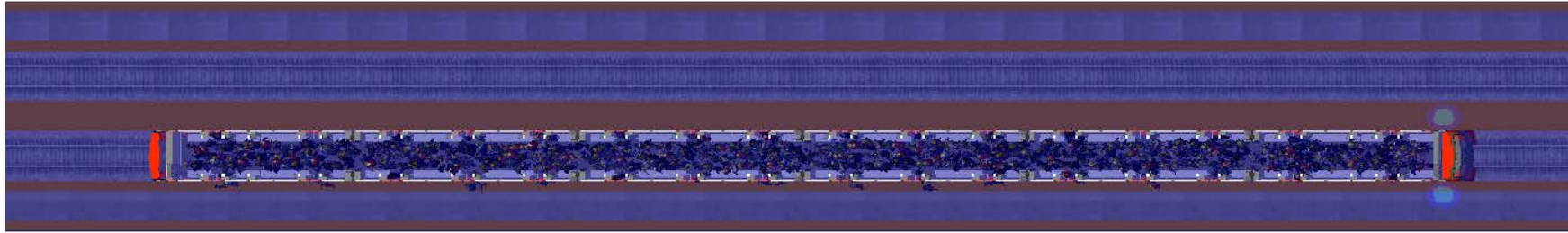


OXYGEN
(kg/kg)

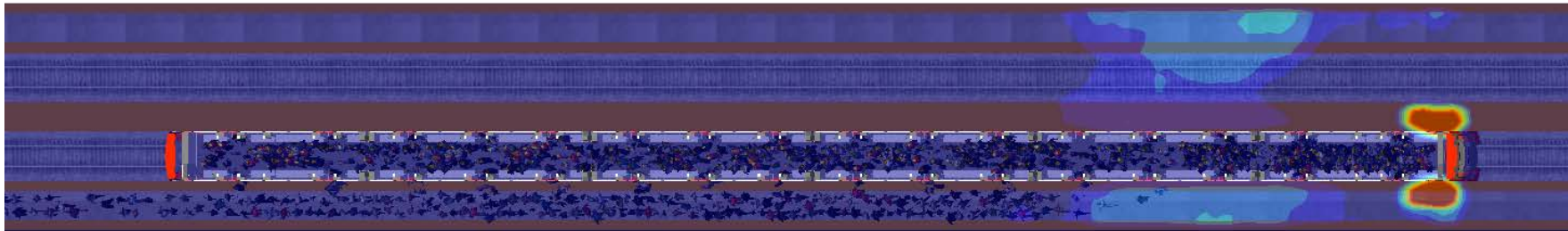


7.4.1.5. Análisis de la concentración de monóxido de carbono a 2 metros sobre la vía de evacuación

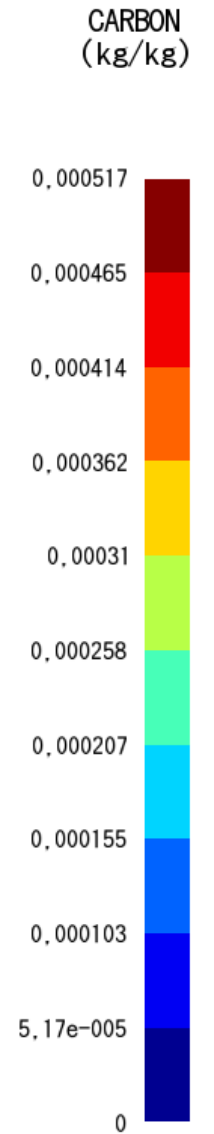
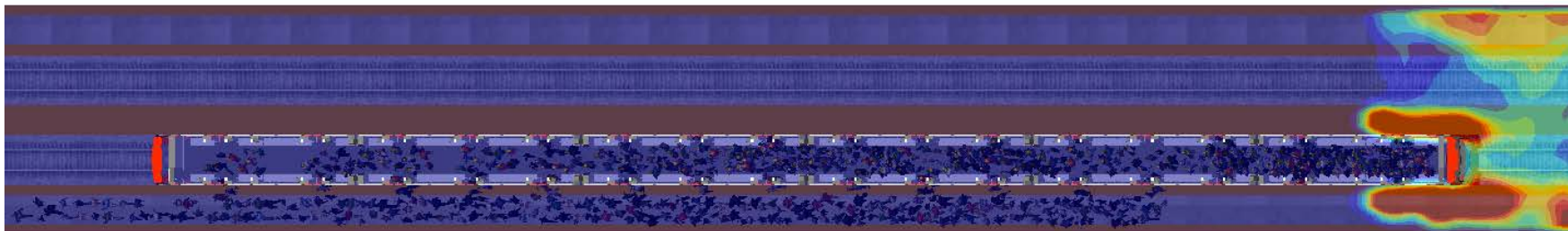
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=100 segundos. El sistema de ventilación funciona en régimen permanente desde el instante t=90 segundos limpiando el humo producido hasta ese instante.

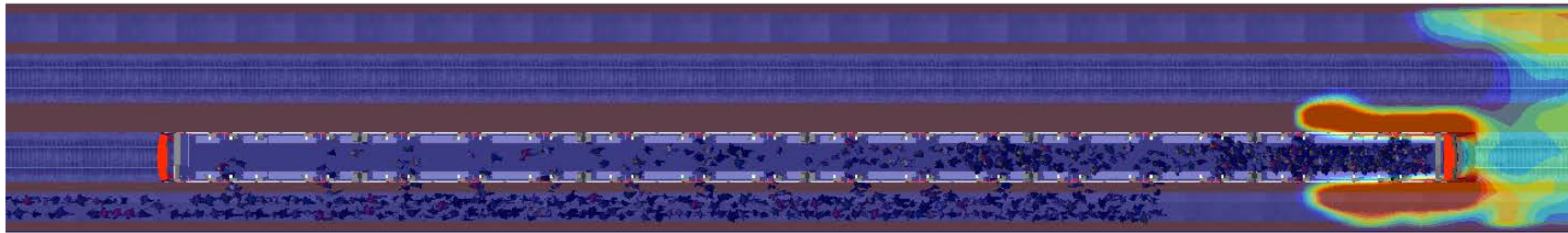


T=200 segundos. El sistema de ventilación ha controlado el backlayeing.

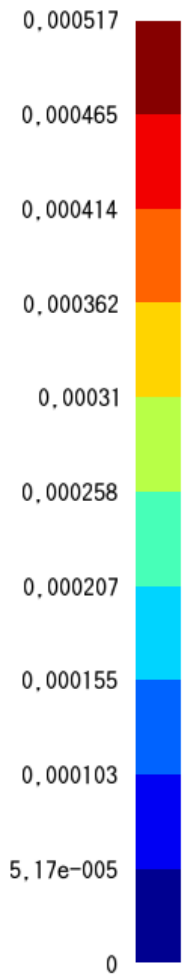


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

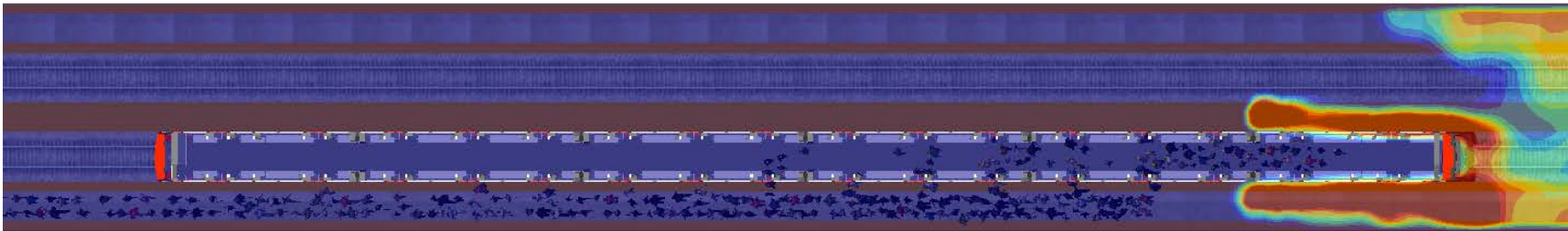
T=300 segundos. El convoy se va vaciando de ocupantes en función de la capacidad de trasiego de la vía de evacuación. El sistema de ventilación controla el backlayering.



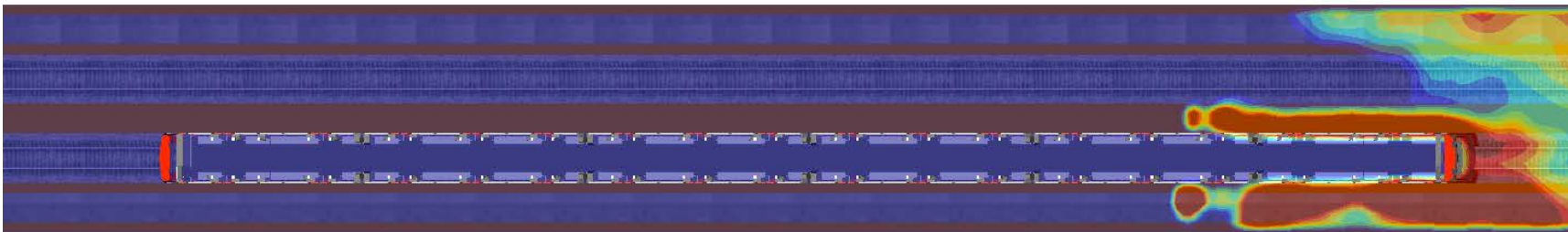
CARBON
(kg/kg)



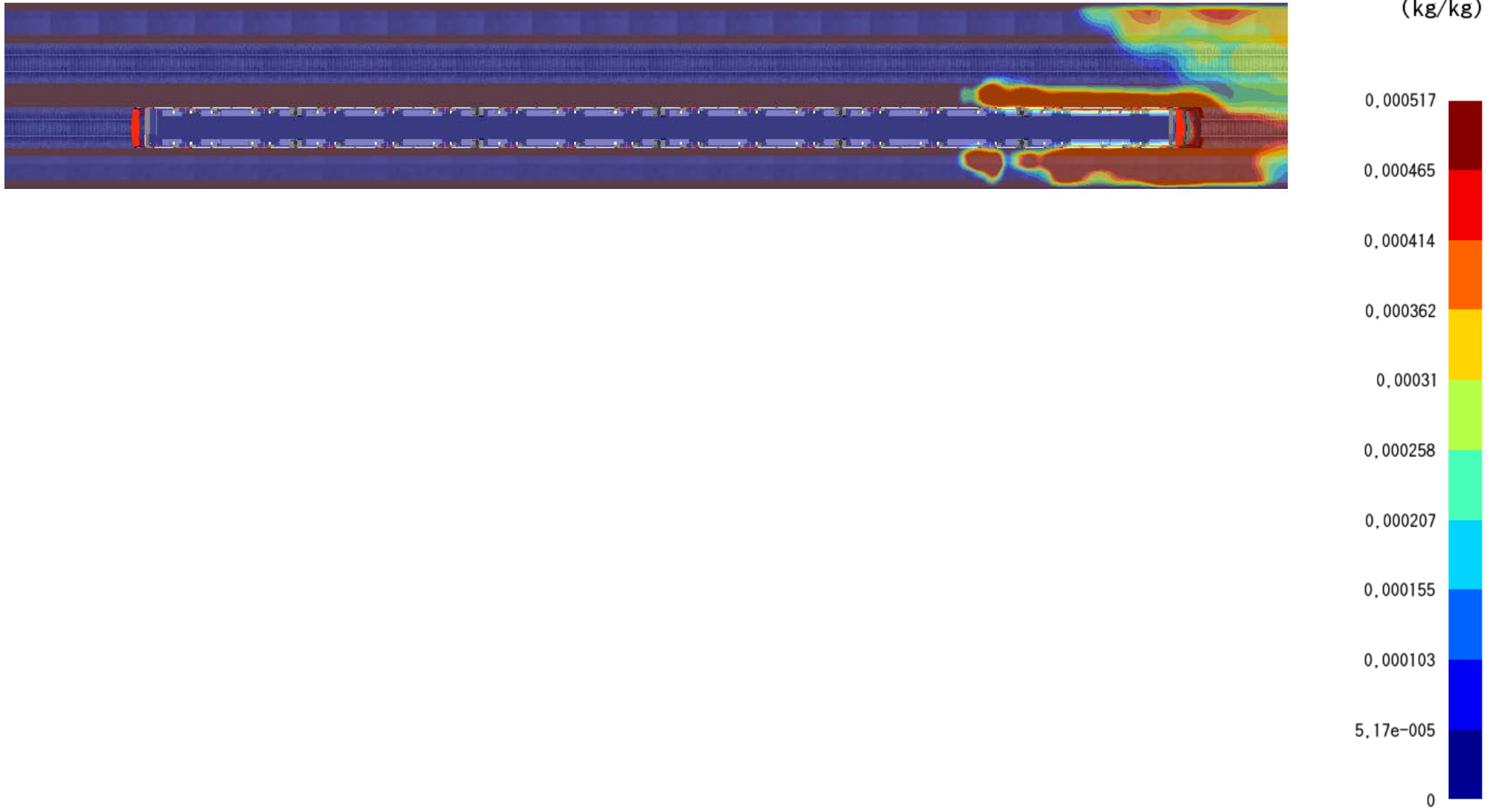
T=500 segundos. El convoy esta vacío. El sistema de ventilación controla el backlayering.



T=720 segundos. Los últimos ocupantes están abandonando el tren mientras que el incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

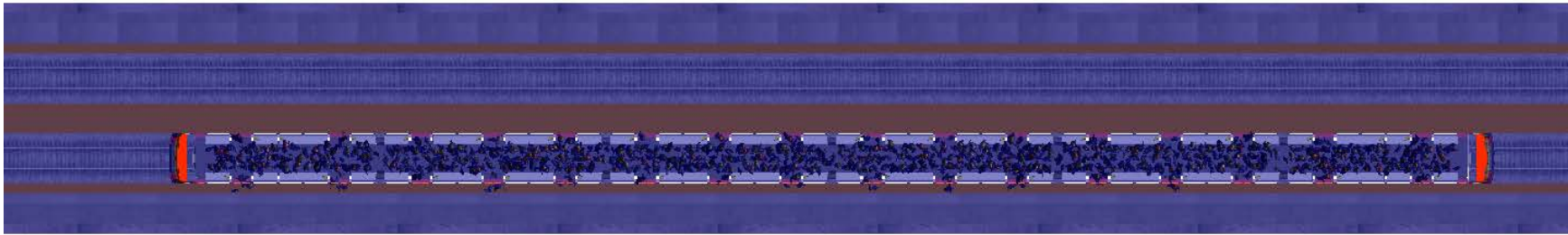


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

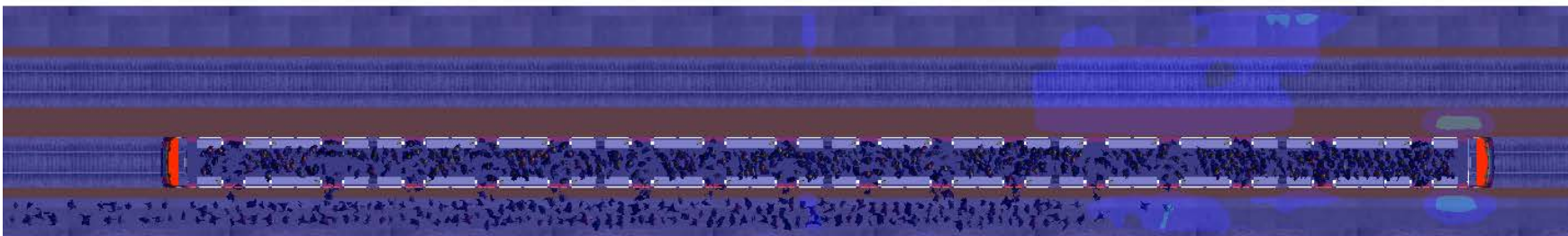


7.4.1.6. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre la vía de evacuación

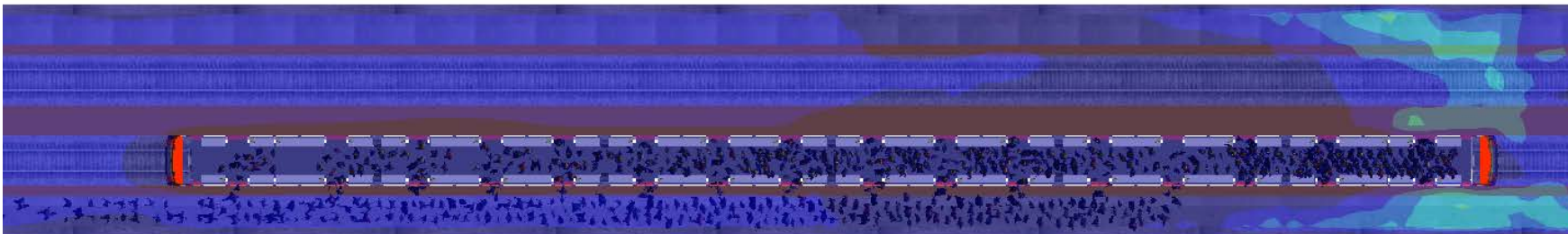
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



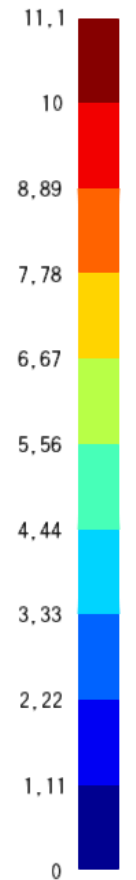
T=100 segundos. El sistema de ventilación funciona en régimen permanente desde el instante t=90 segundos limpiando el humo producido hasta ese instante.



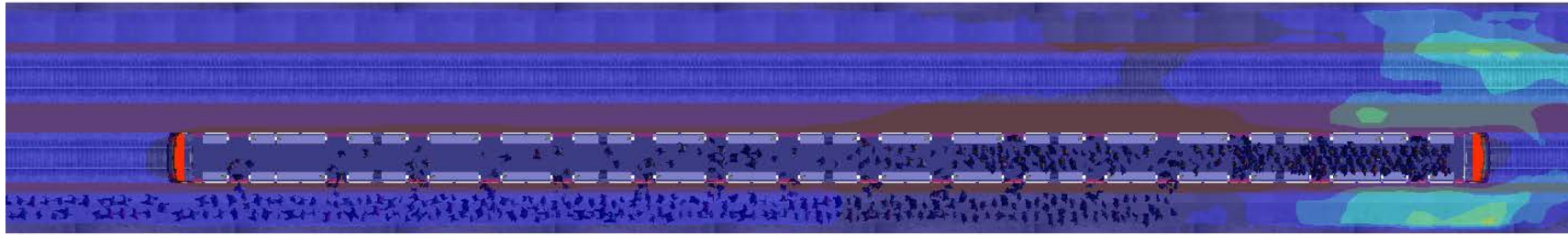
T=200 segundos. El sistema de ventilación ha controlado el backlayeing.



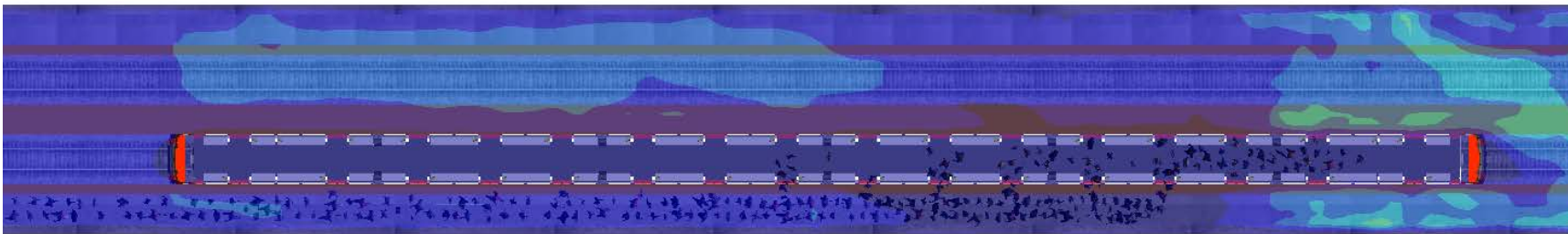
VELOCITY
(m/s)



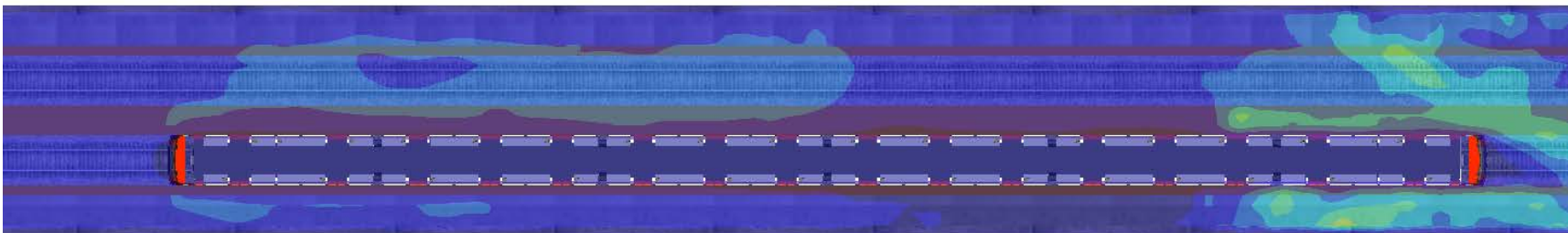
T=300 segundos. El convoy se va vaciando de ocupantes en función de la capacidad de trasiego de la vía de evacuación. El sistema de ventilación controla el backlayering.



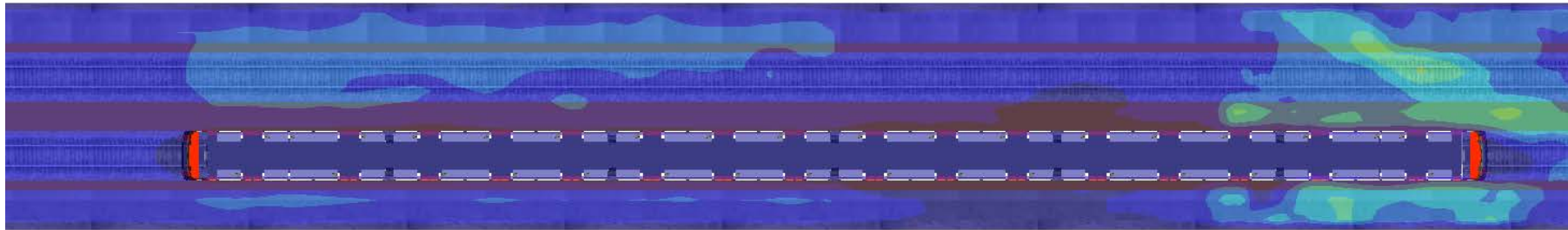
T=500 segundos. El convoy esta vacío. El sistema de ventilación controla el backlayering.



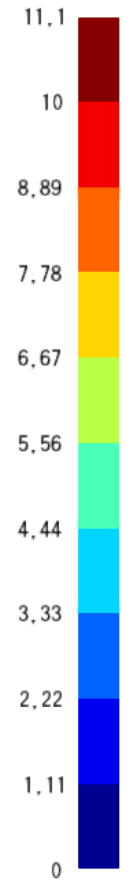
T=720 segundos. Los últimos ocupantes están abandonando el tren mientras que el incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



VELOCITY
(m/s)



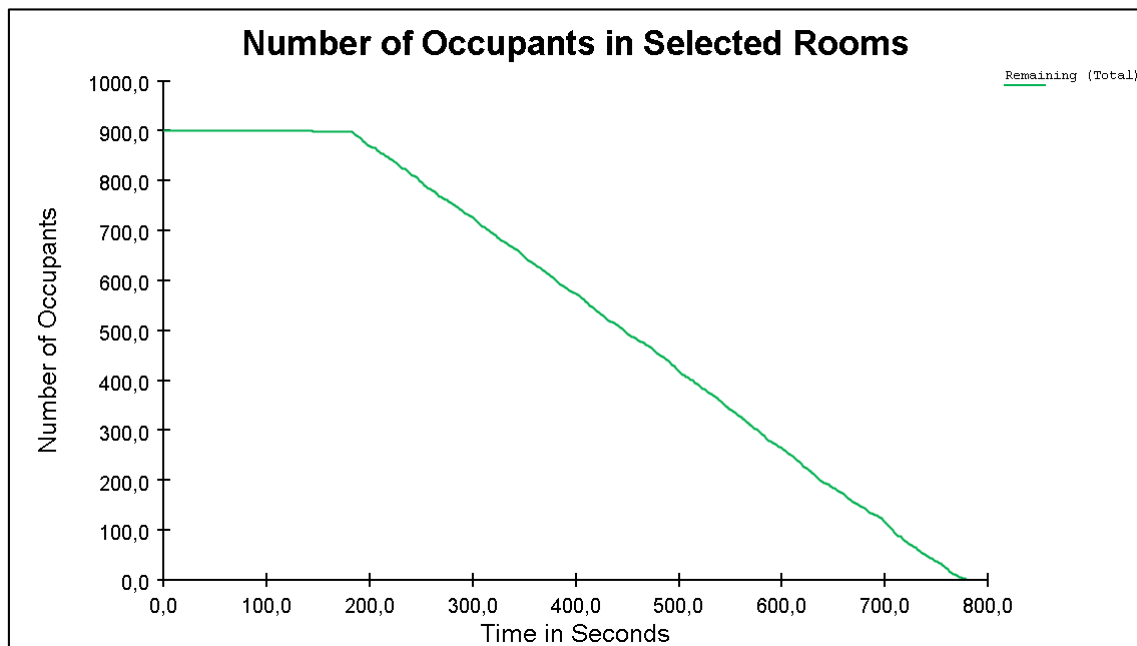
7.4.1.7. Análisis de la evacuación

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar en 779,3 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI1
Ocupantes totales	900
Tiempos de salida	
Mínimo:	144,6 s
Máximo	779,3 s
Media:	478,8 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	97,4
Máximo	174,9
Media:	133,7

Tabla 42. Sumario de simulación de evacuación EI1

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.

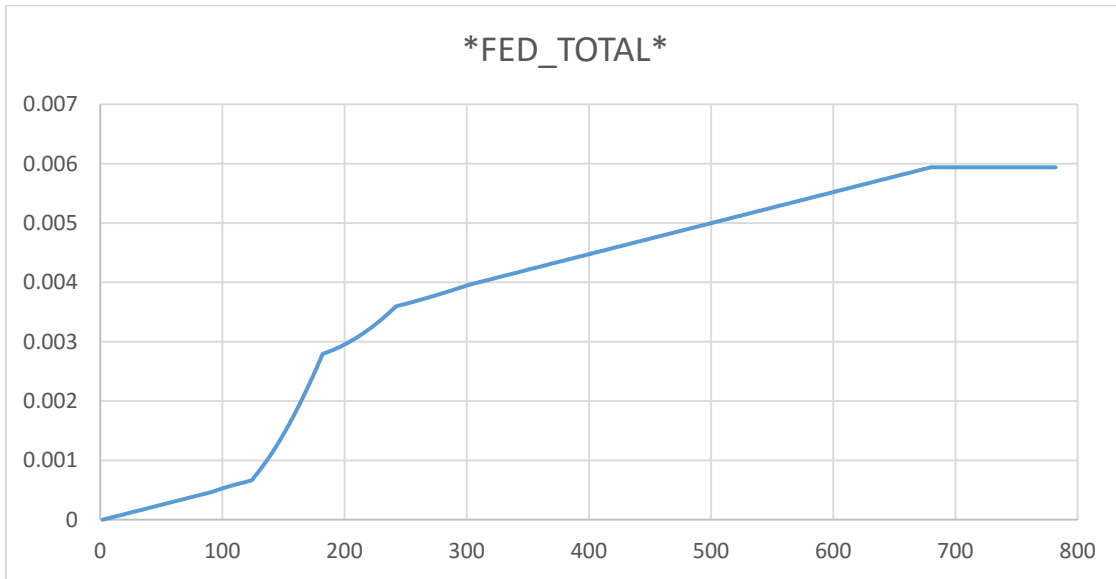


Gráfica 29. Evolución de la ocupación del túnel en EI1.

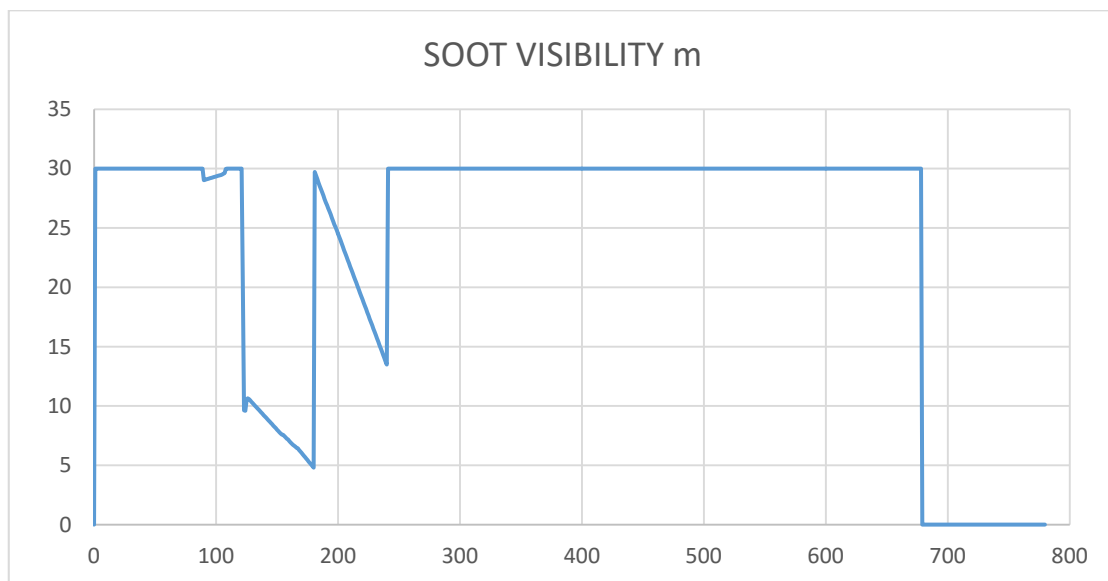
Como se ha podido ver cuándo se ha analizado la visibilidad hasta que debido al tiempo que tarda el sistema de ventilación en ponerse en marcha, alcanzar el régimen permanente y vencer las cargas presentes existe un periodo de tiempo en torno a los 100 segundos durante los cuales existe una zona con visibilidad inferior a 10 metros.

Para comprobar que la evacuación es posible se ha analizado aquellos ocupantes que se han visto expuestos a esta eventual situación para analizar el FED.

En la siguiente gráfica se muestra la visibilidad y el FED en función del tiempo a los cuales se ven sometidos estos ocupantes:



Gráfica 30. Evolución del FED de un ocupante expuesto al humo.



Gráfica 31. Evolución de la visibilidad de un ocupante expuesto al humo.

Como puede verse la exposición al humo genera un rápido incremento del FED, sin embargo globalmente el valor de FED alcanzado debido a la duración de la exposición es mucho menor del valor límite de FED=0.3

7.4.1.8. Conclusión del Escenario de Incendio 1

A través de la simulación se ha comprobado que el tiempo necesario para realizar una evacuación en condiciones de seguridad es de 779,3 segundos (**RSET=779,3 segundos**).

Por otra parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio. Si llegado a este punto el sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering se puede asumir que el **ASET es ilimitado**.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.1 de la meta Seguridad de Vida tal que **ASET>RSET**.

Partiendo de la misma consideración de que parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio , se asume que el ASRT es ilimitado y por tanto mayor de 60 minutos.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.2 de la meta Seguridad de vida tal que **ASRT>60'**.

Puesto que se cumplen todos los objetivos de la meta Seguridad de Vida, queda validado el Escenario de Incendio 1

A continuación a través de una tabla resumen se comprueba si se han verificado los objetivos de la meta Seguridad de Vida a través del estudio de los objetivos ASET>RSET y mediante la comprobación del que ASRT>60 minutos.

Objetivo	Criterio	Verificación del criterio de aceptación
ASET>RSET	[O ₂]>18%	Cumple
	[CO]<450 ppm	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple
	Temperatura < 60°C	Cumple
	Velocidad del aire < 10 m/s	Cumple
ASRT>60'	ASET ilimitado	Cumple

Tabla 43. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

7.4.2. Escenario de incendio EI 2

En este escenario de incendio el tren está saliendo del túnel quedando parado a los 150 metros del portal PK= 0+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia el portal y la evacuación se realiza hacia la estación.

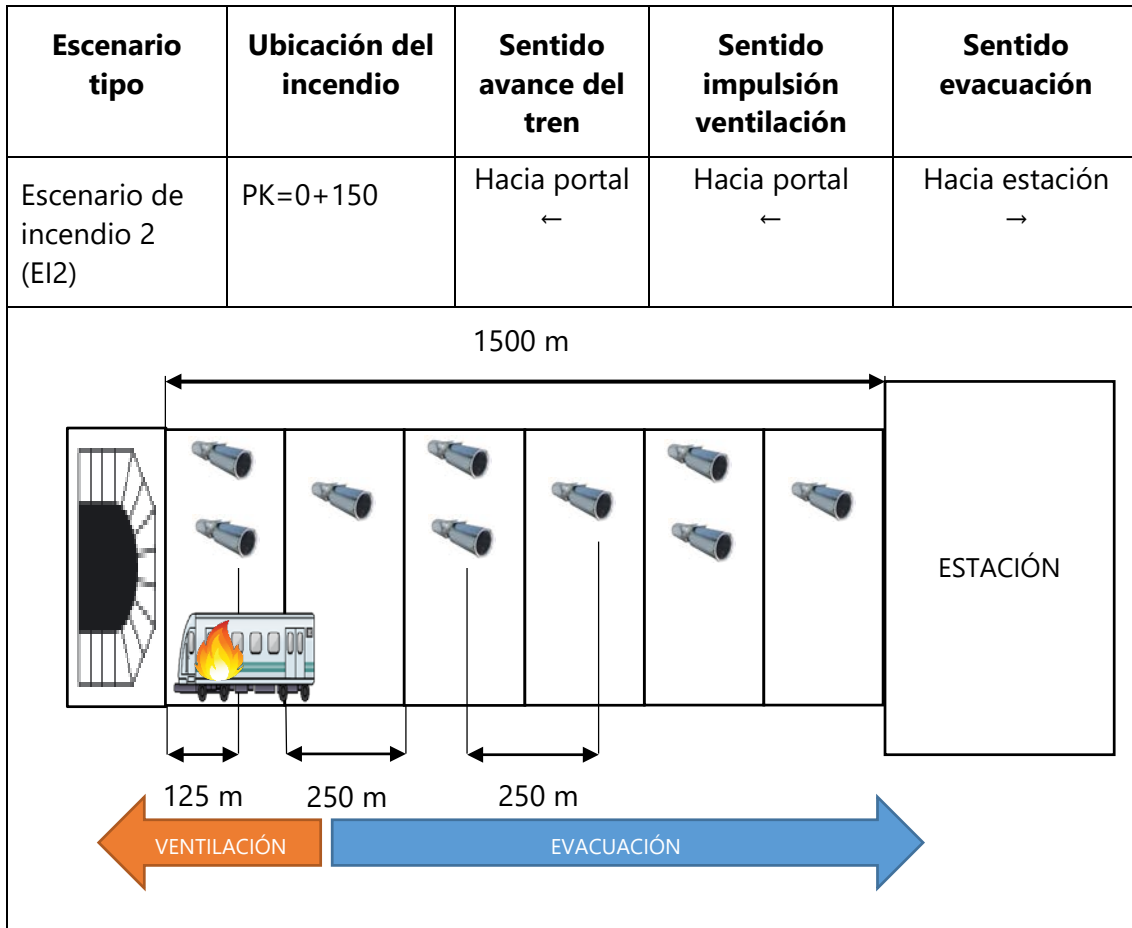
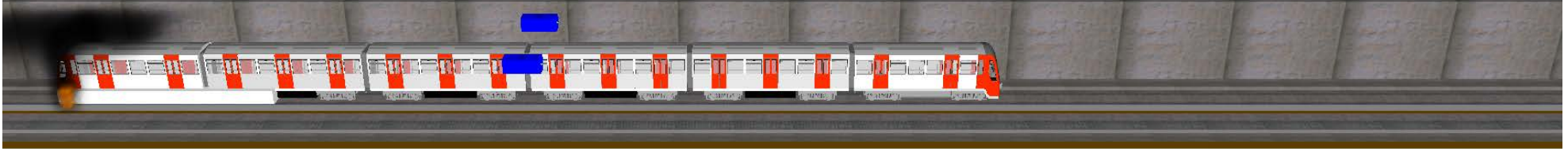


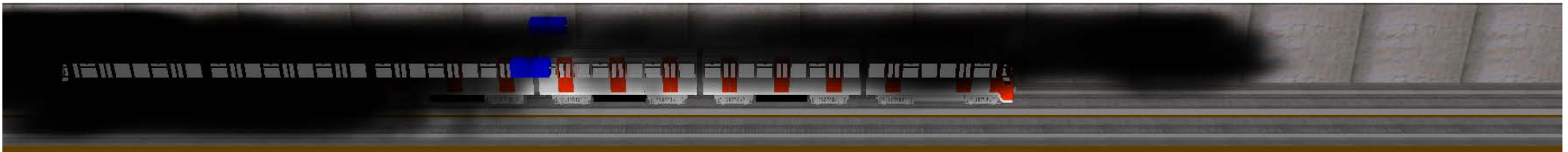
Figura 194. Cuadro resumen del escenario de incendio 2 EI2

7.4.2.1. Análisis del backlayering

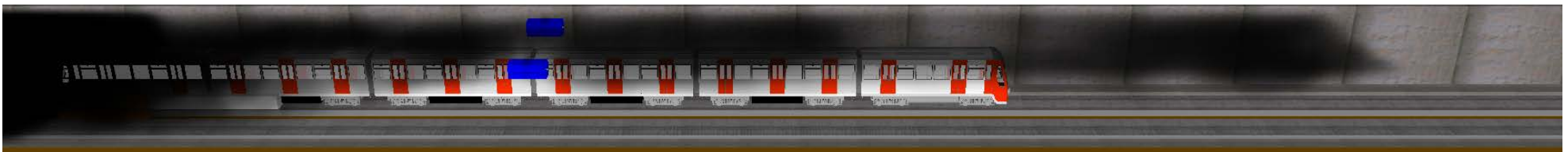
T=5 segundos. Comienza el incendio



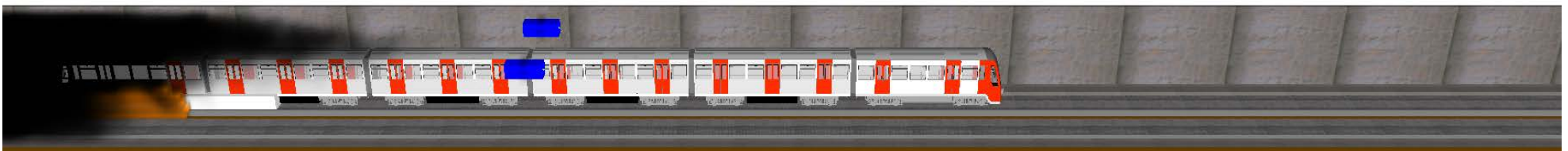
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



T=300 segundos. El backlayering es controlado.

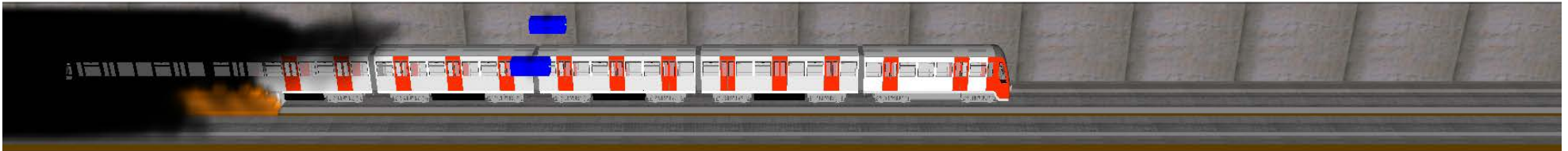


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

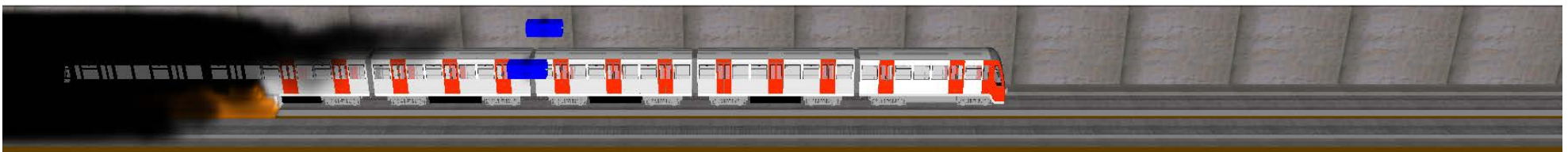
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

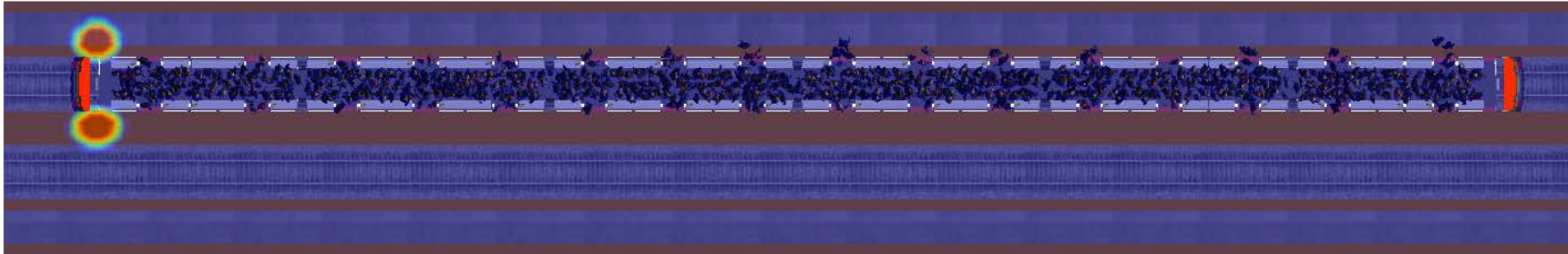


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

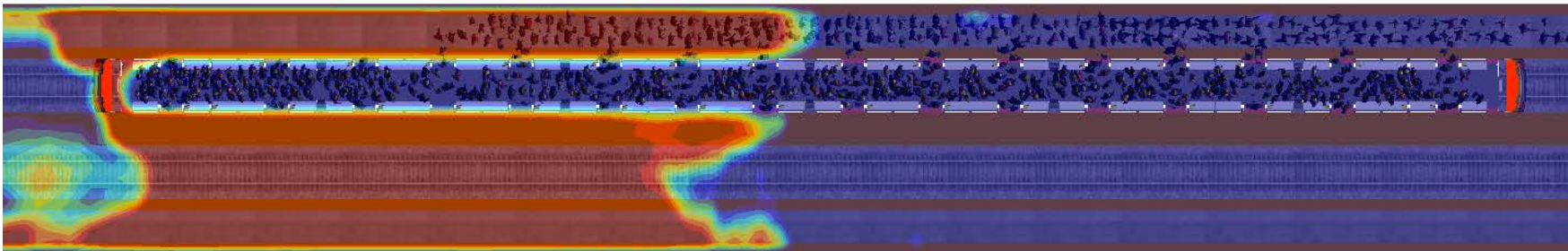


7.4.2.2. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre la vía de evacuación

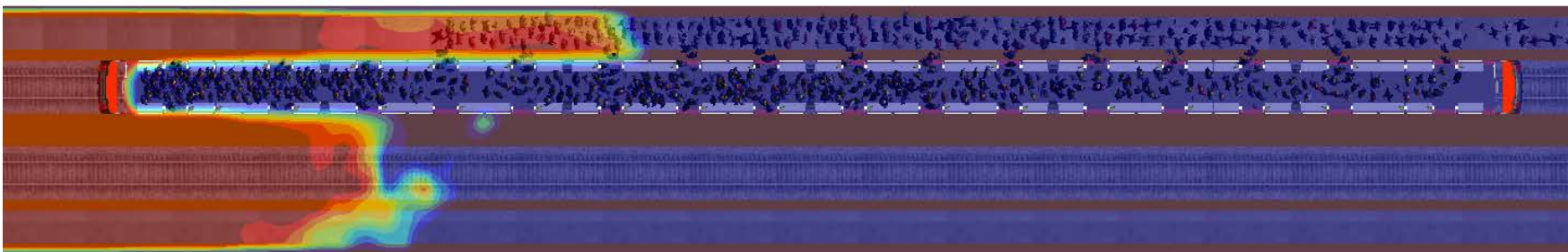
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.

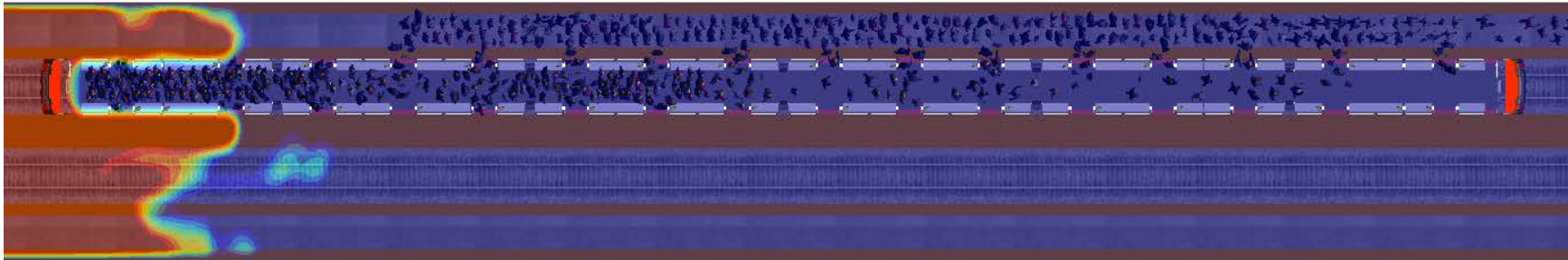


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.

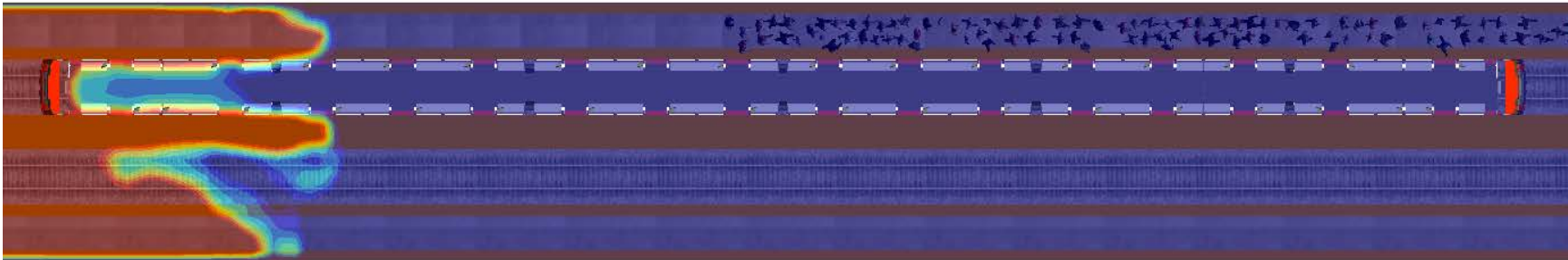


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

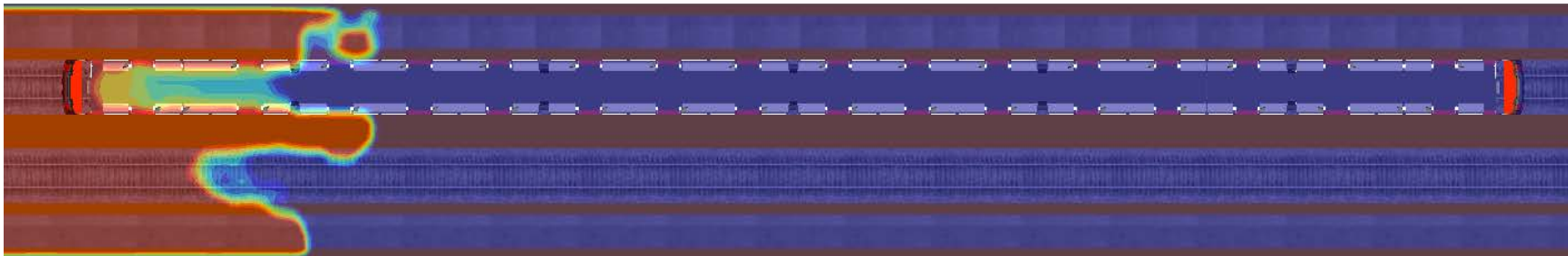
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



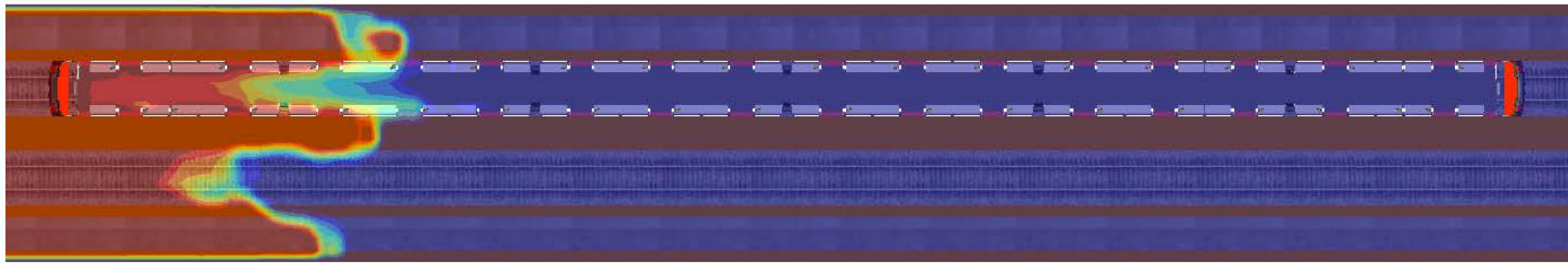
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

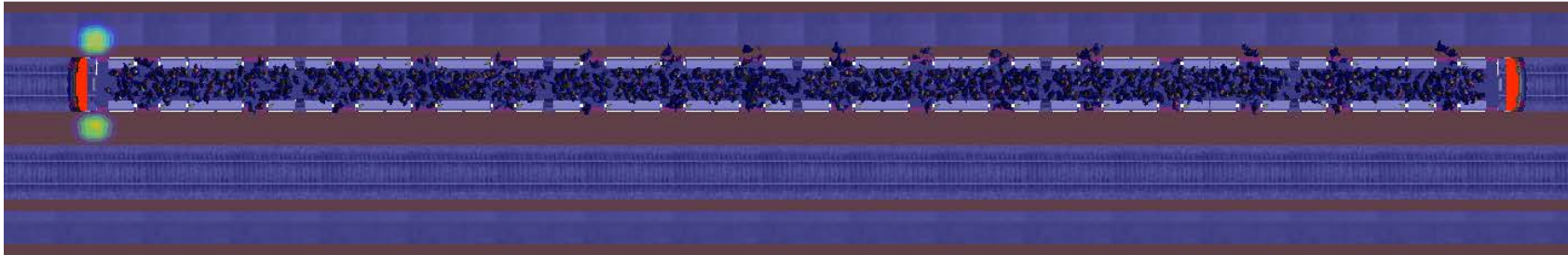


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

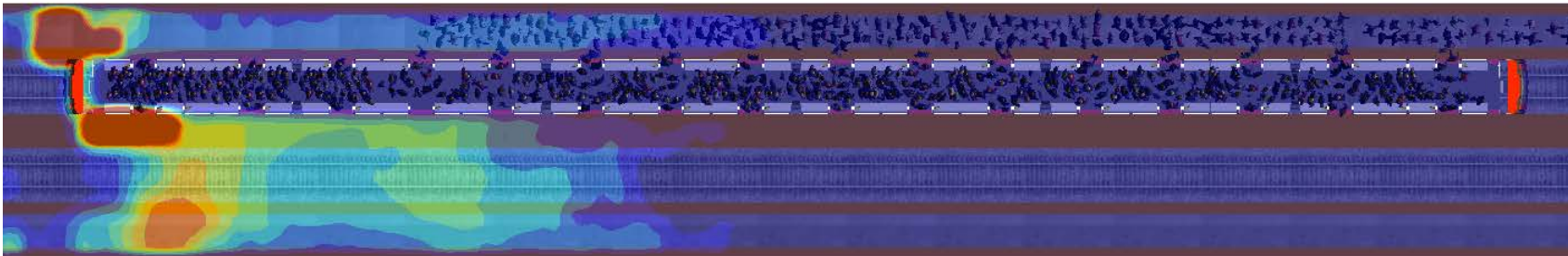


7.4.2.3. Análisis de temperatura a 2 metros sobre la vía de evacuación

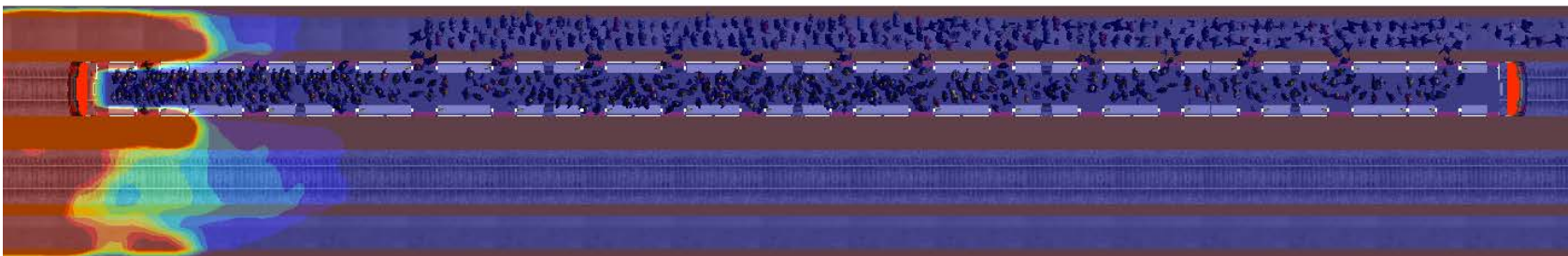
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Por ende se aprecia un ligero incremento de temperatura en la zona con humo.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering enfriando la zona previamente afectada.



TEMPERATURE
(C)

64,4

60

55,6

51,1

46,7

42,2

37,8

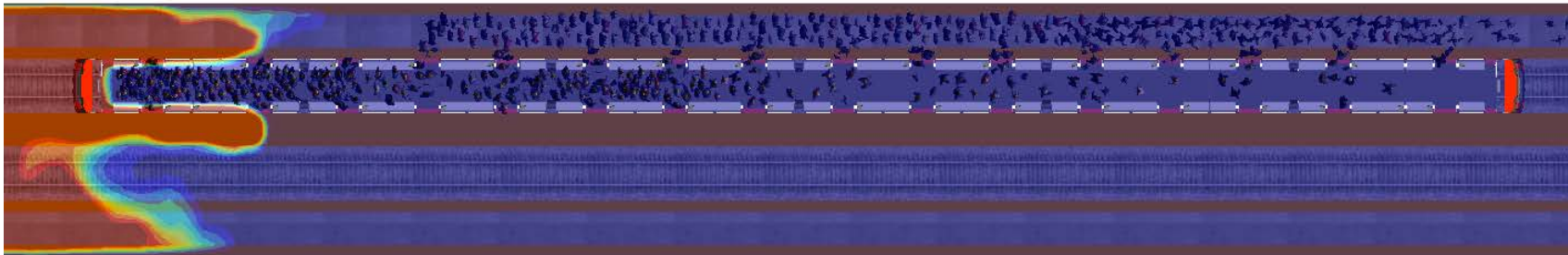
33,3

28,9

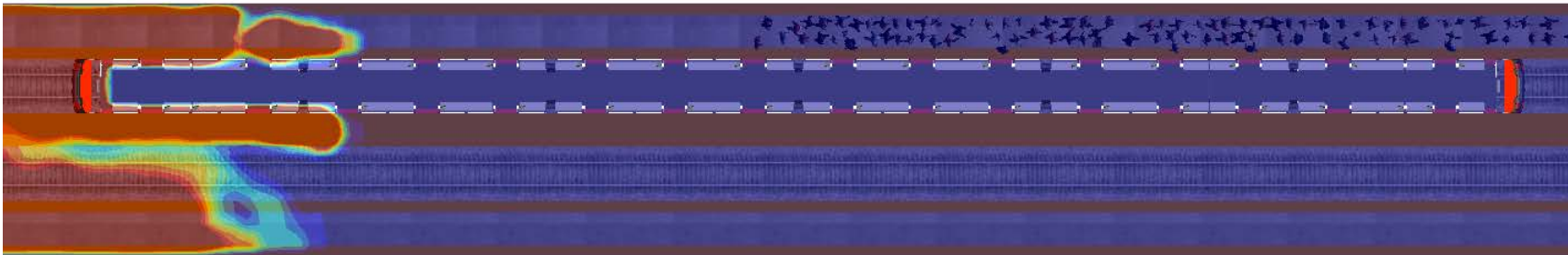
24,4

20

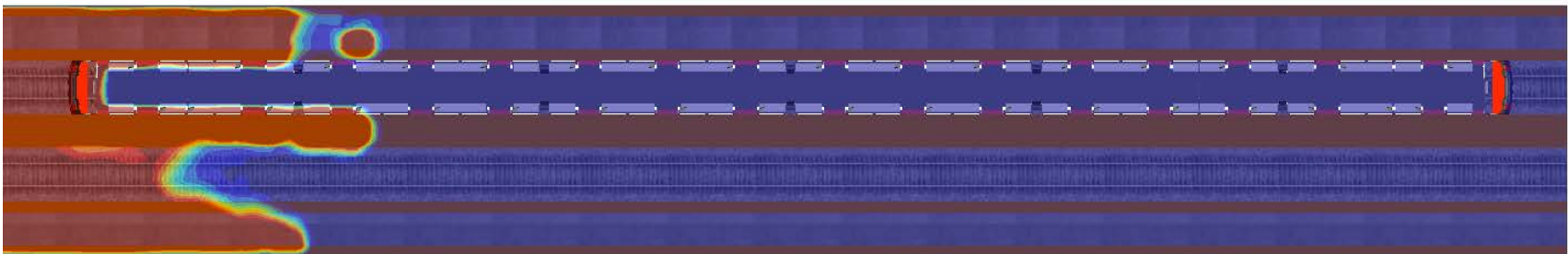
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



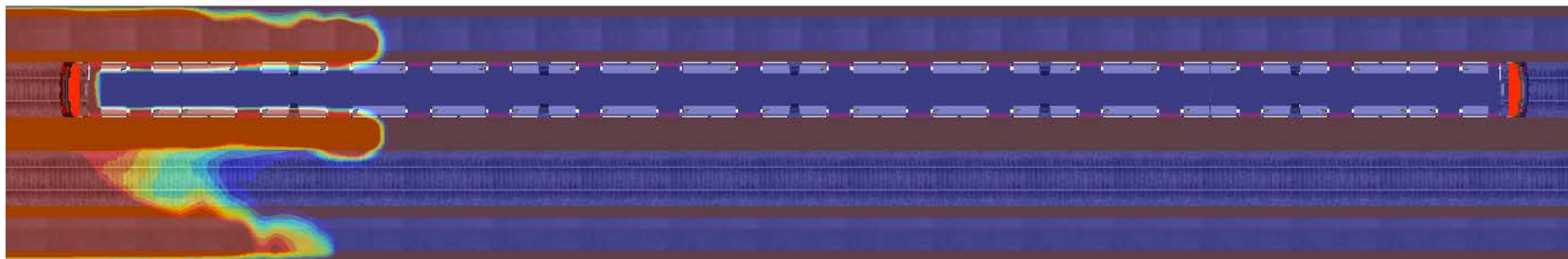
T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



TEMPERATURE
(C)



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

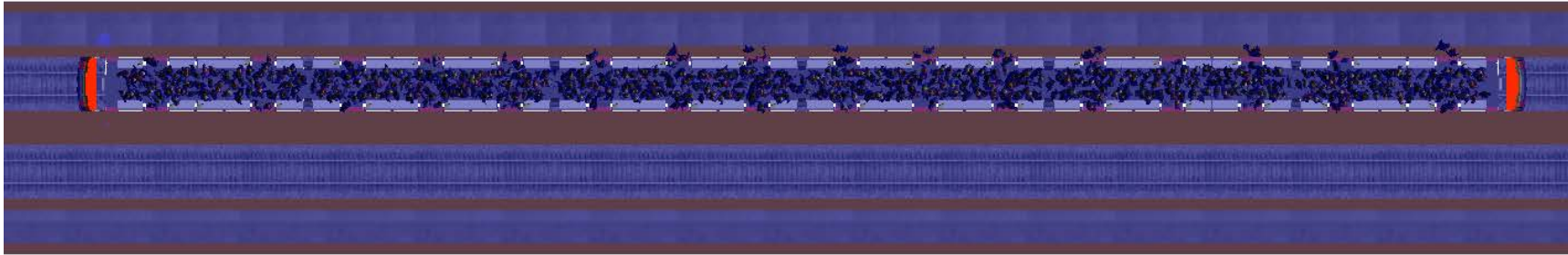


TEMPERATURE (C)



7.4.2.4. Análisis de la concentración de oxígeno a 2 metros sobre la vía de evacuación

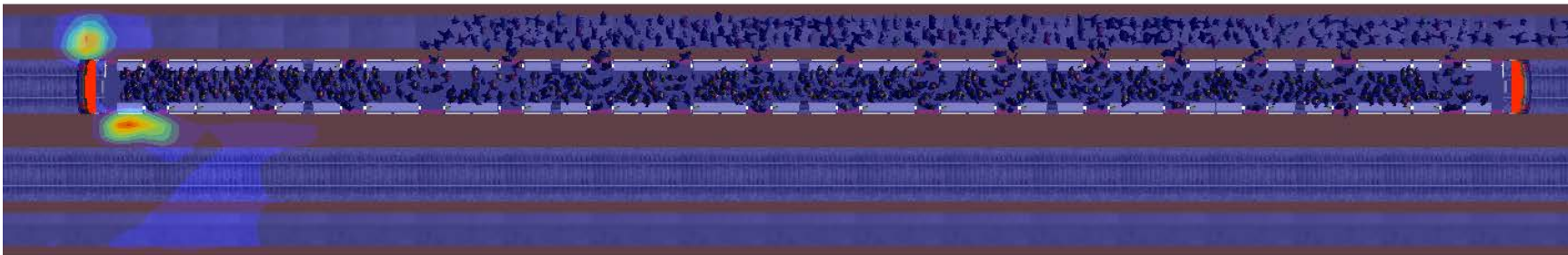
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



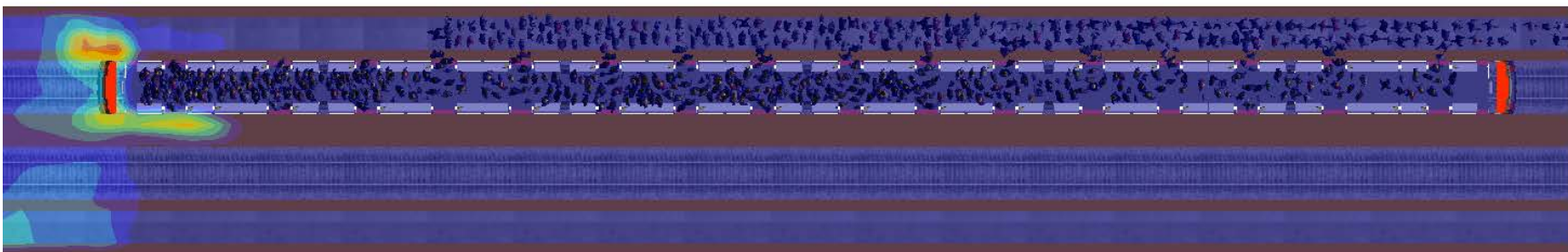
OXYGEN
(kg/kg)



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Sin embargo no se ve disminuida la concentración de oxígeno.

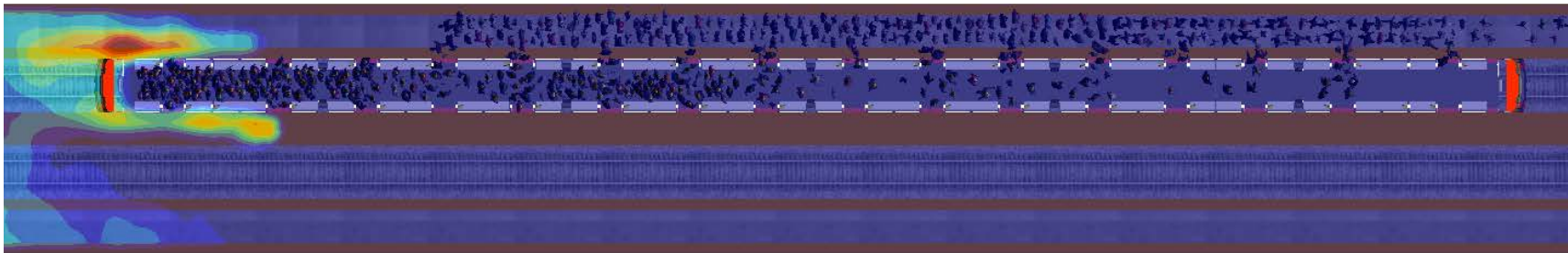


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.

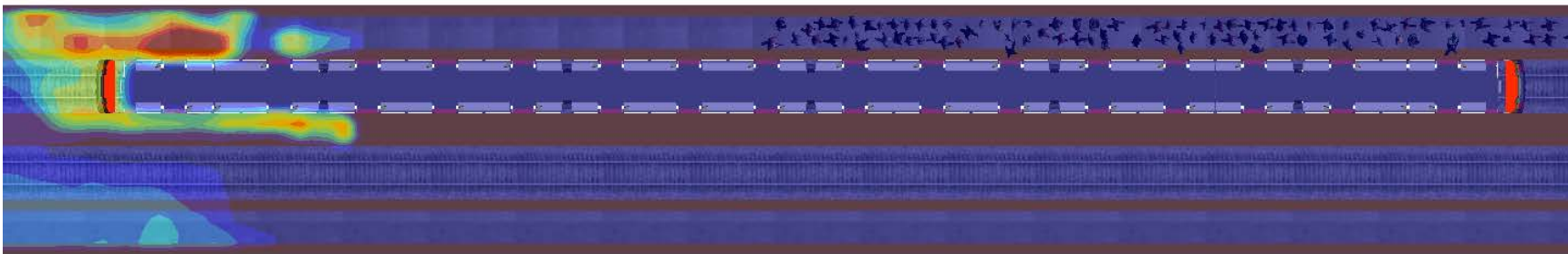


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

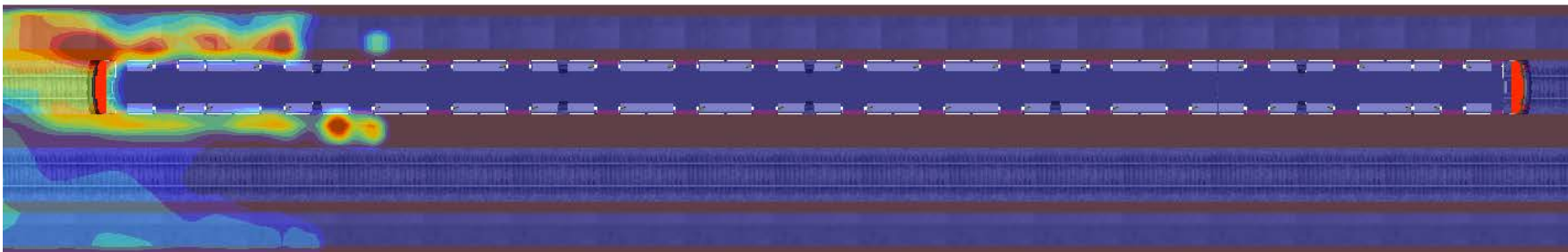
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



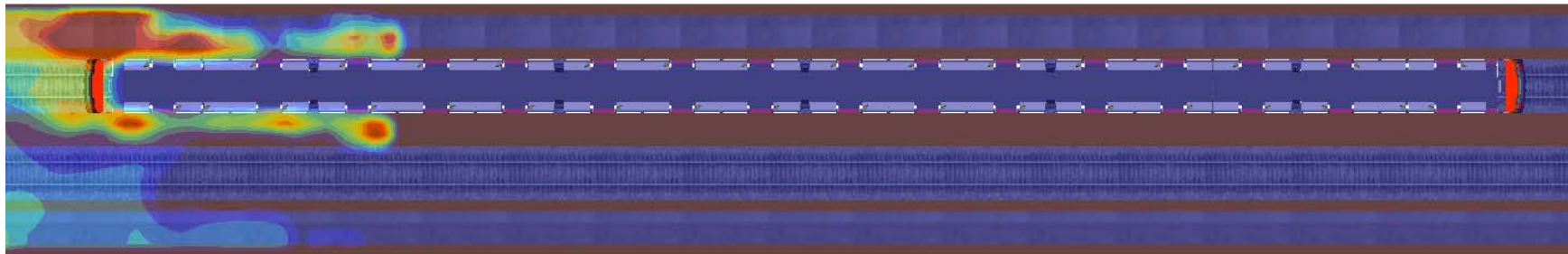
T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



OXYGEN
(kg/kg)



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

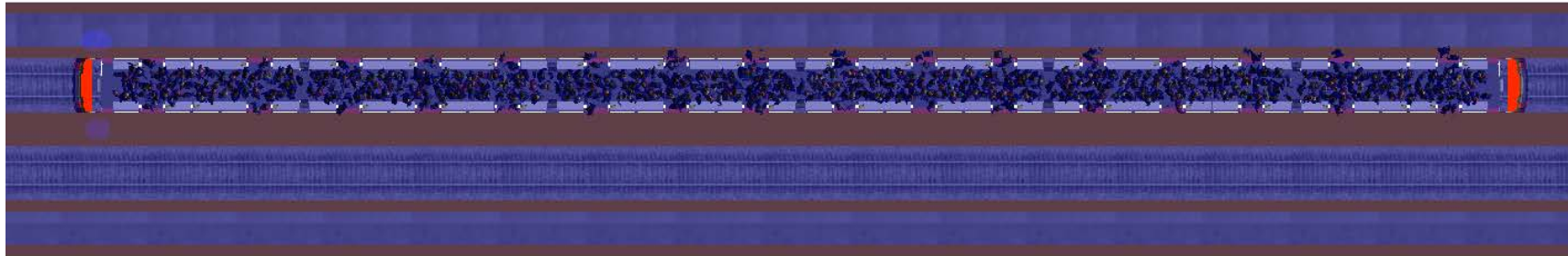


OXYGEN
(kg/kg)

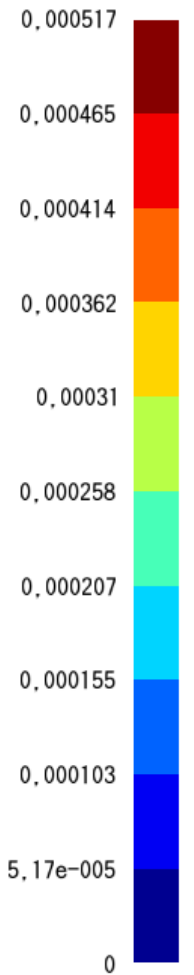


7.4.2.5. Análisis de la concentración de monóxido de carbono a 2 metros sobre la vía de evacuación

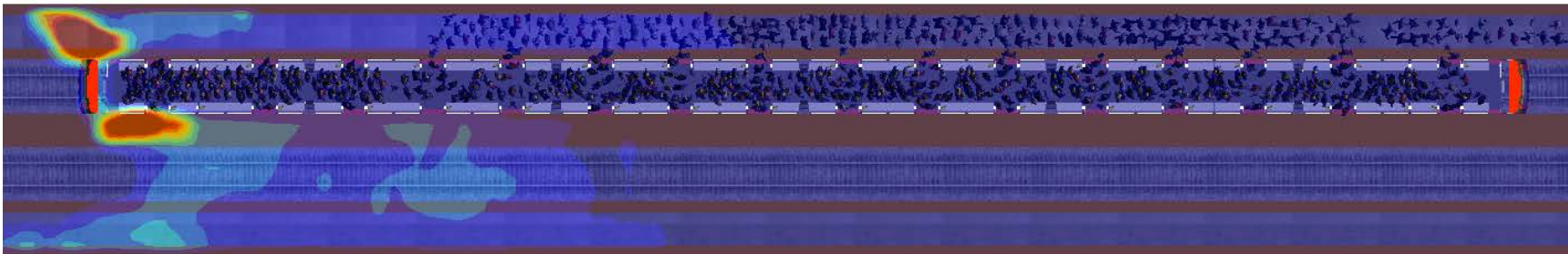
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



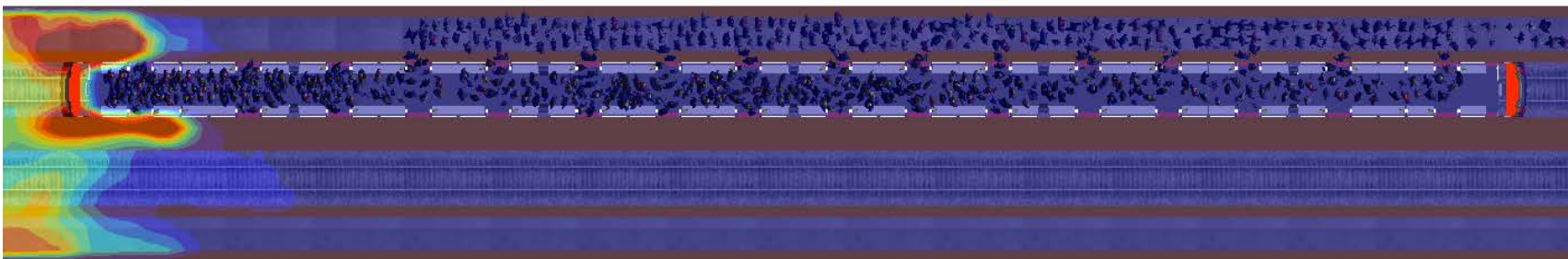
CARBON
(kg/kg)



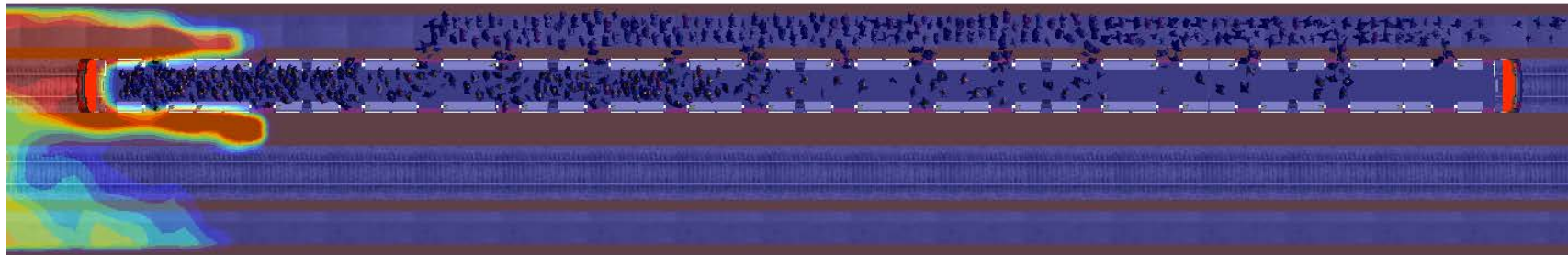
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Se aprecia una aumento de la concentración de CO, sin llegar a ser peligrosa.



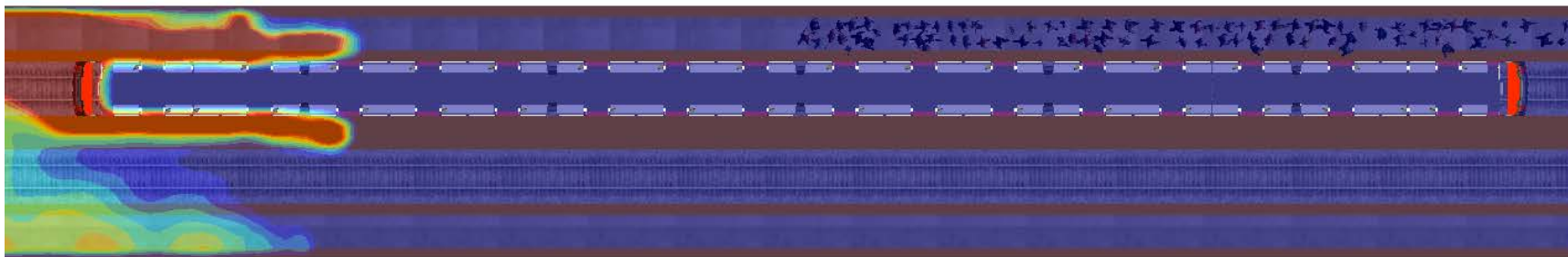
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia como desaparece la concentración de CO.



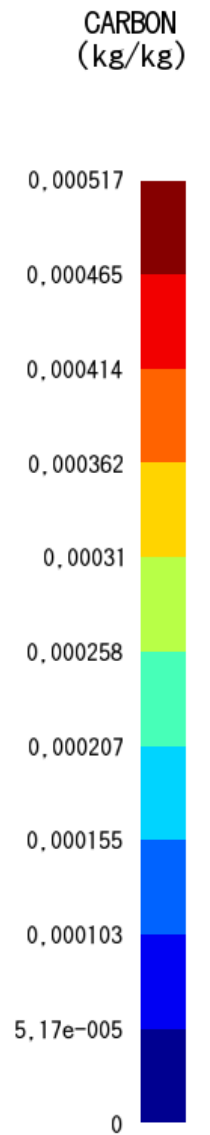
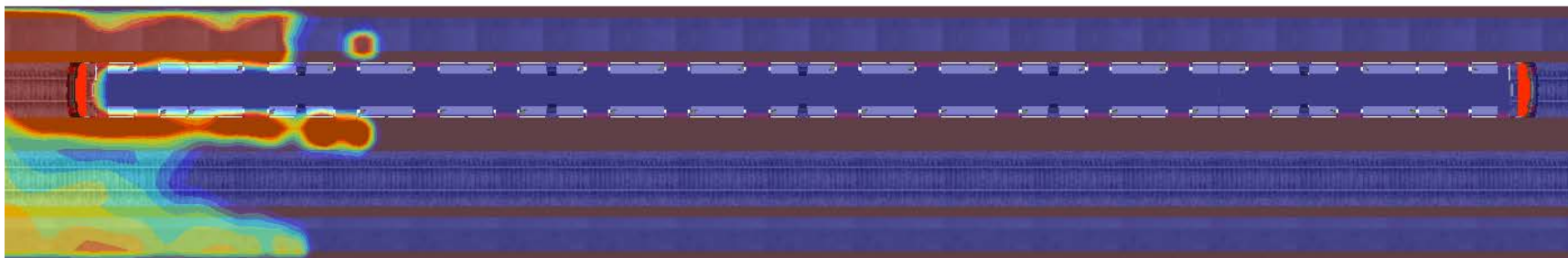
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



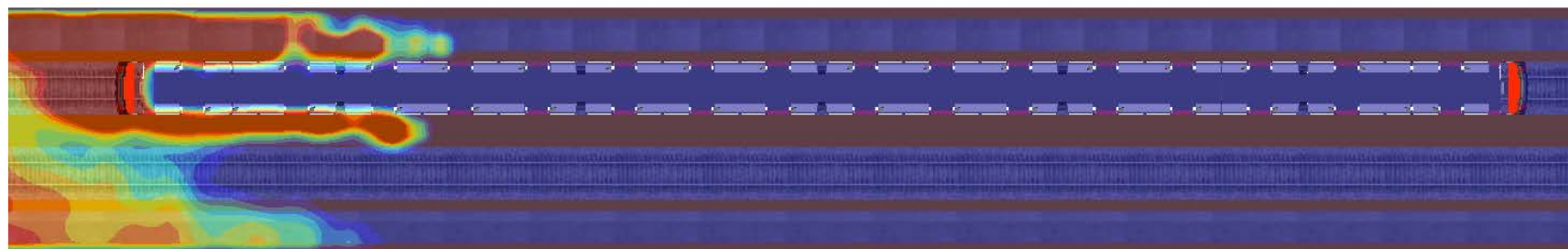
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

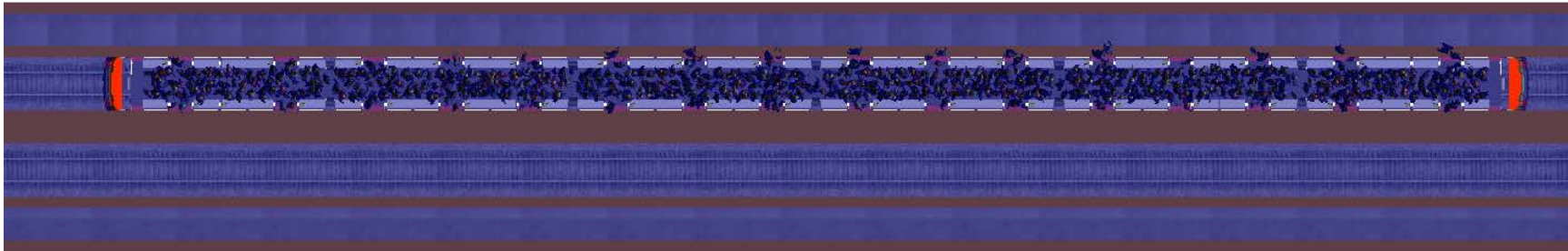


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

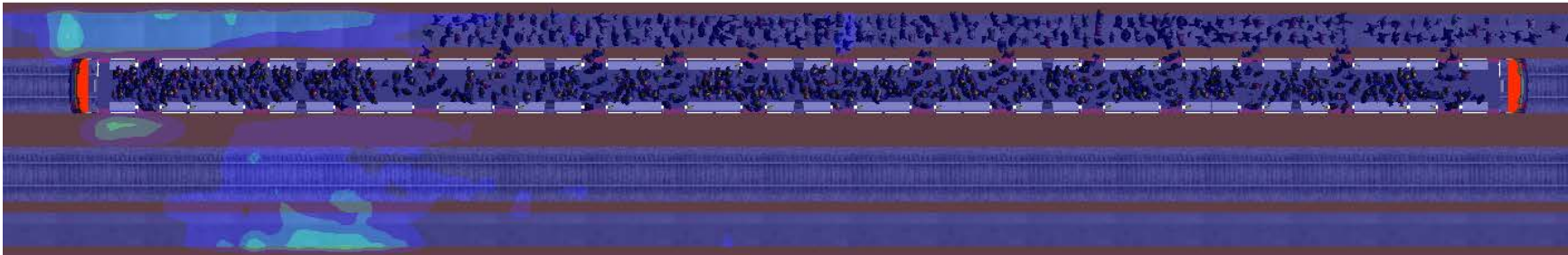


7.4.2.6. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre la vía de evacuación

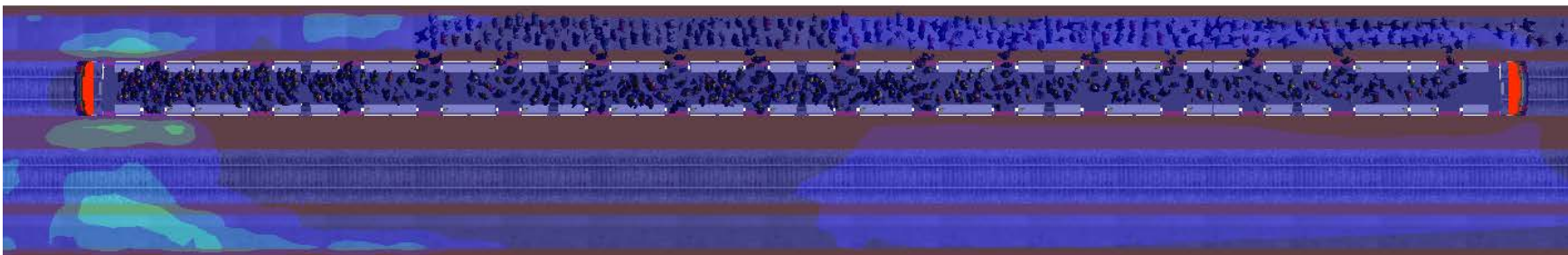
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia un incremento en la velocidad del aire del túnel.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

3,33

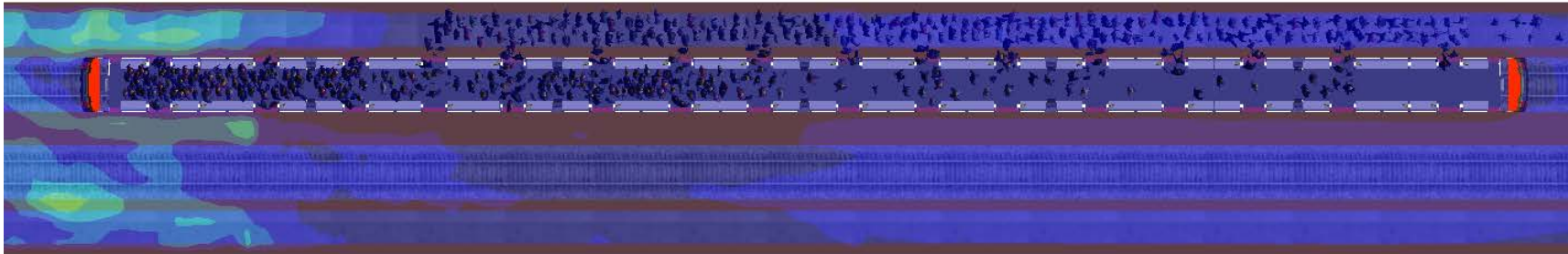
2,22

1,11

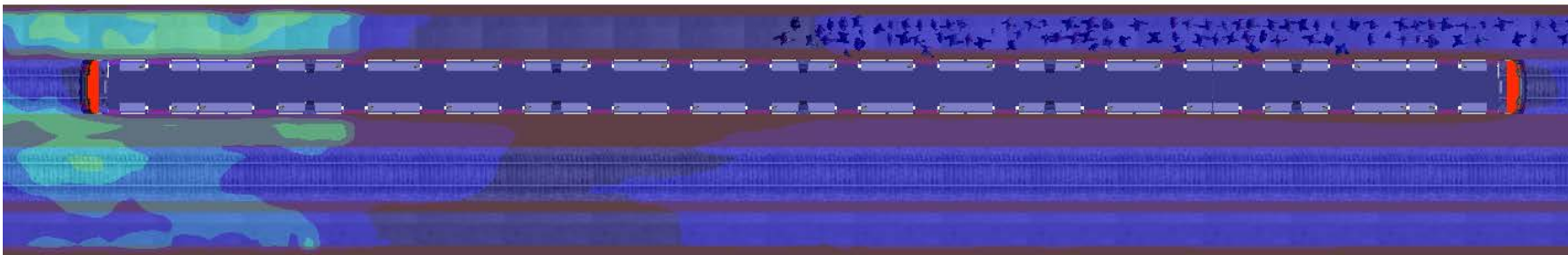
0

Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

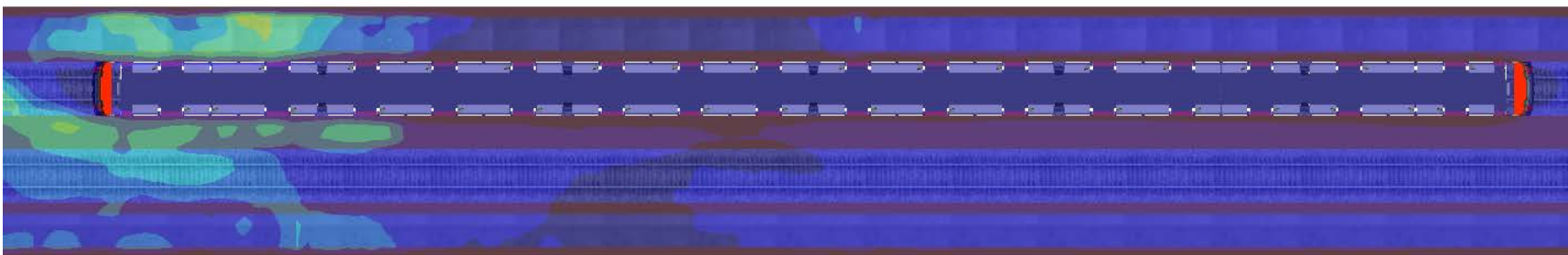
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

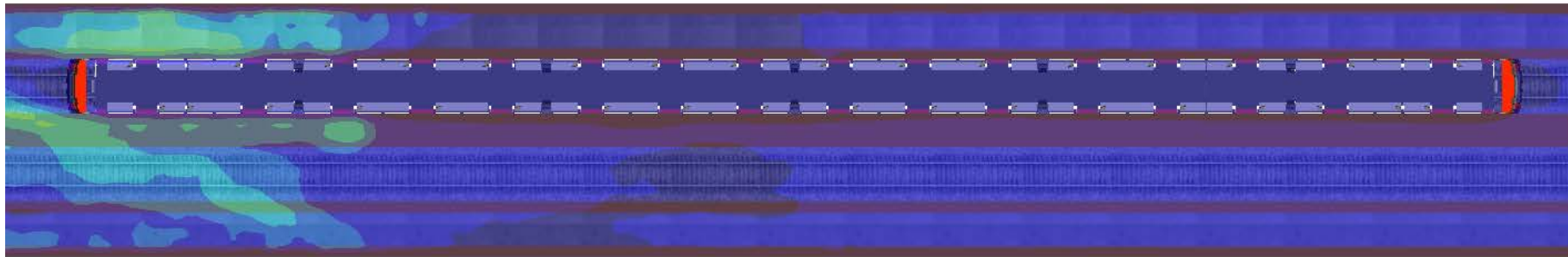
3,33

2,22

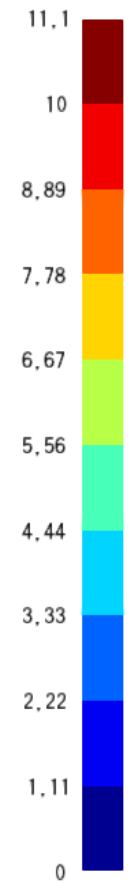
1,11

0

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



VELOCITY
(m/s)



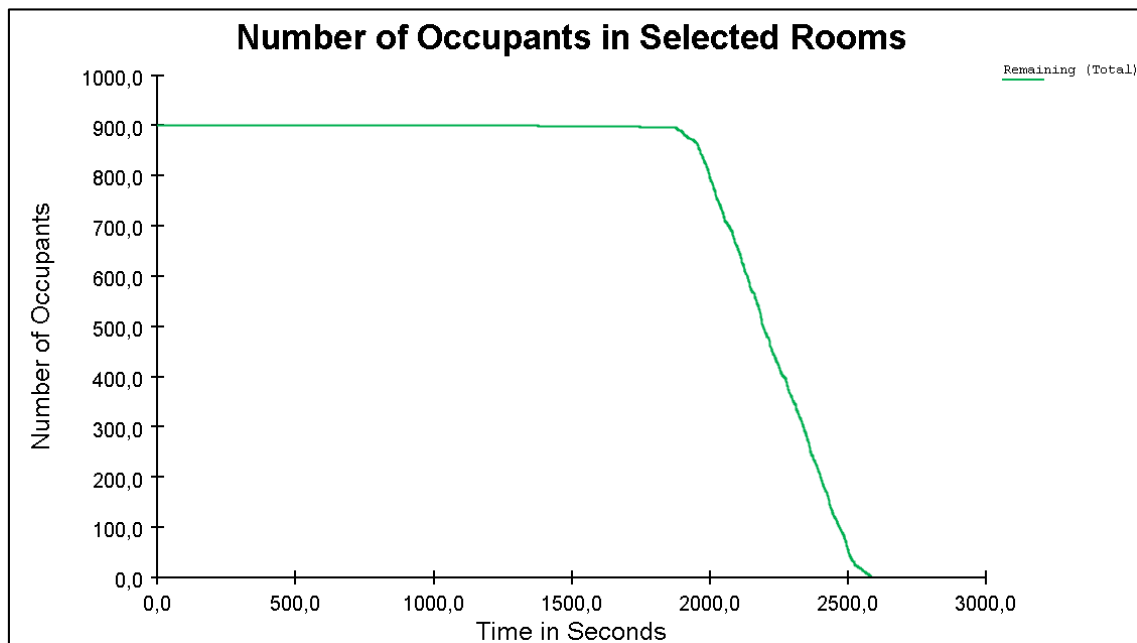
7.4.2.7. Análisis de la evacuación

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar en 2586,3 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI 2
Ocupantes totales	900
Tiempos de salida	
Mínimo:	1378,3 s
Máximo	2586,3 s
Media:	2231,7 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	1513,2 m
Máximo	1596,9 m
Media:	1555,8 m

Tabla 44. Sumario de simulación de evacuación EI1

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.

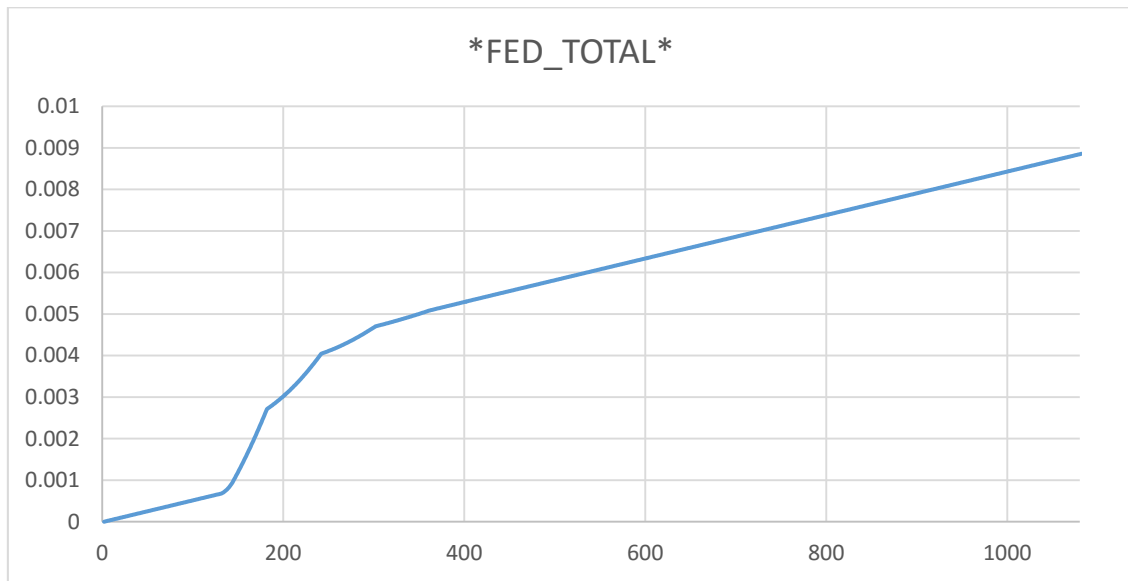


Gráfica 32. Evolución de la ocupación del túnel en EI1.

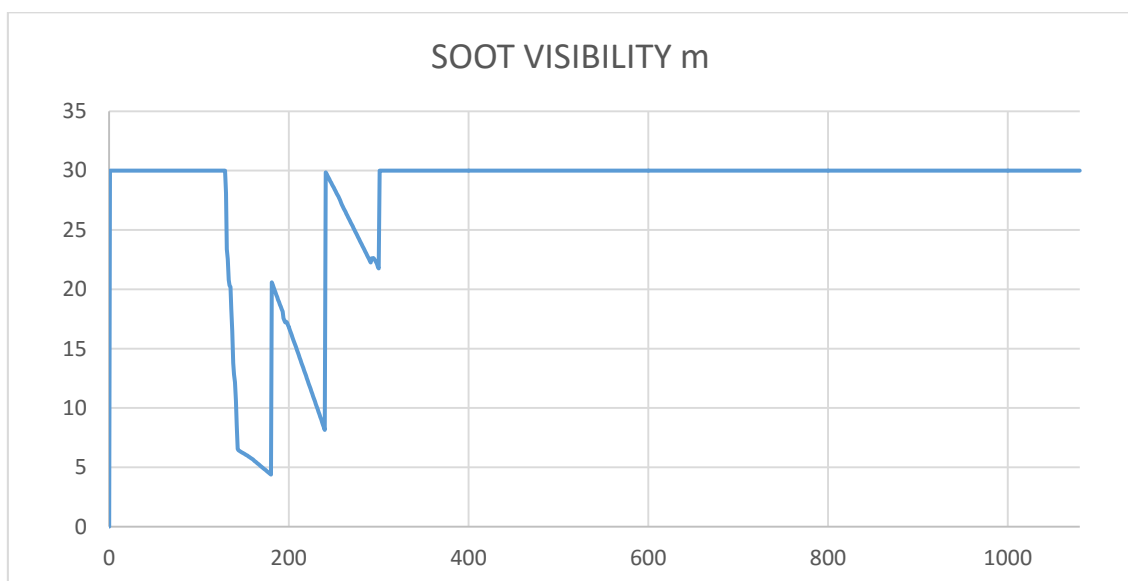
Como se ha podido ver cuándo se ha analizado la visibilidad hasta que debido al tiempo que tarda el sistema de ventilación en ponerse en marcha, alcanzar el régimen permanente y vencer las cargas presentes existe un periodo de tiempo en torno al instante $T=125$ segundos durante los cuales existe una zona con visibilidad inferior a 10 metros.

Para comprobar que la evacuación es posible se ha analizado aquellos ocupantes que se han visto expuestos a esta eventual situación para analizar el FED.

En la siguiente gráfica se muestra la visibilidad y el FED en función del tiempo a los cuales se ven sometidos estos ocupantes:



Gráfica 33. Evolución del FED de un ocupante expuesto al humo.



Gráfica 34. Evolución de la visibilidad de un ocupante expuesto al humo.

Como puede verse la exposición al humo genera un rápido incremento del FED, sin embargo globalmente el valor de FED alcanzado debido a la duración de la exposición es mucho menor del valor límite de FED=0.3

Por otra parte se adjuntan imágenes del proceso de evacuación de los ocupantes que se dirigen hacia la estación. Para ello emplean la acera de evacuación desde la ubicación del hasta el punto de conexión entre el túnel y la estación.



Figura 195. Ocupantes dirigiéndose a la estación a través de la acera por donde discurre la vía de evacuación.



Figura 196. Encuentro entre túnel y estación. Los ocupantes bajan de la acera a la plataforma del de la vía.

Para subir al andén, a cada lado de este existen un par de escaleras. En la imagen se aprecia los ocupantes subiendo al andén a través de la escalera izquierda.



Figura 197. Ocupantes subiendo al andén de la estación.



Figura 198. Ocupantes subiendo por la escalera derecha de acceso al andén.

El acceso a la calle se realiza a través de una escalera central y dos escaleras mecánicas que en situación de emergencia se desactivan funcionando como escaleras normales.



Figura 199. Ocupantes subiendo al hall de la estación de metro.

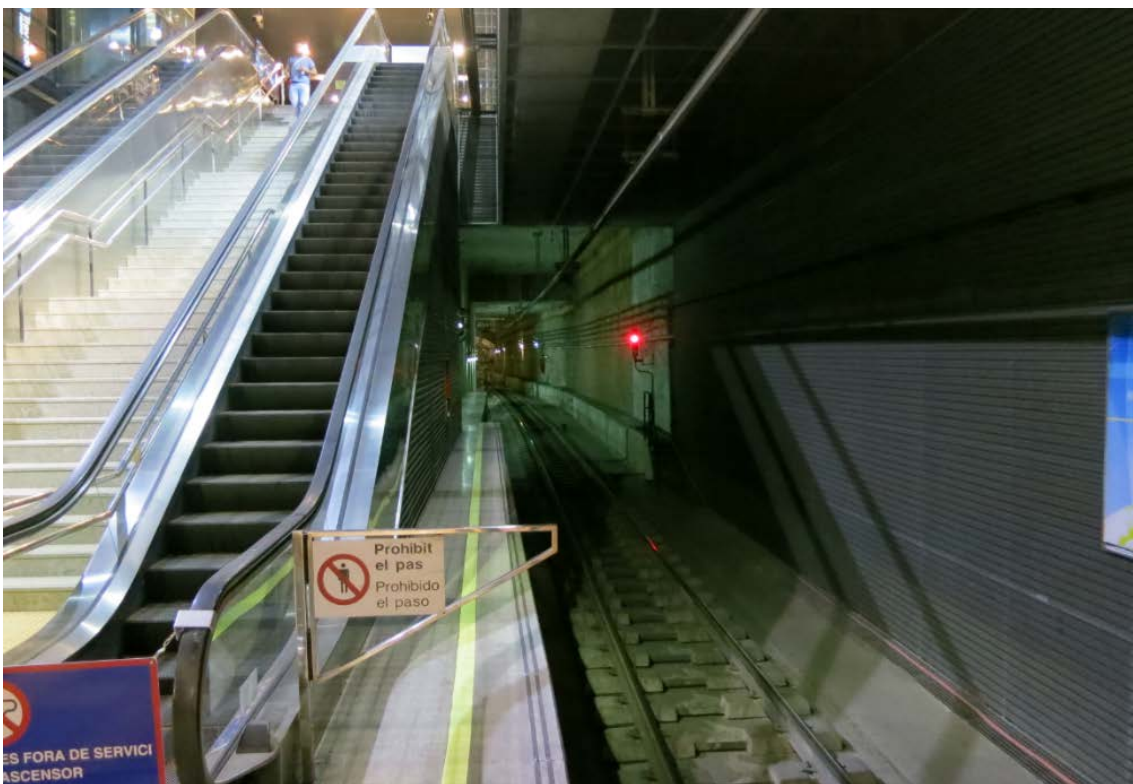


Figura 200. Fotografía real de la estación de metro.

Una vez llegado a la calle se considera que los ocupantes han llegado a zona segura.

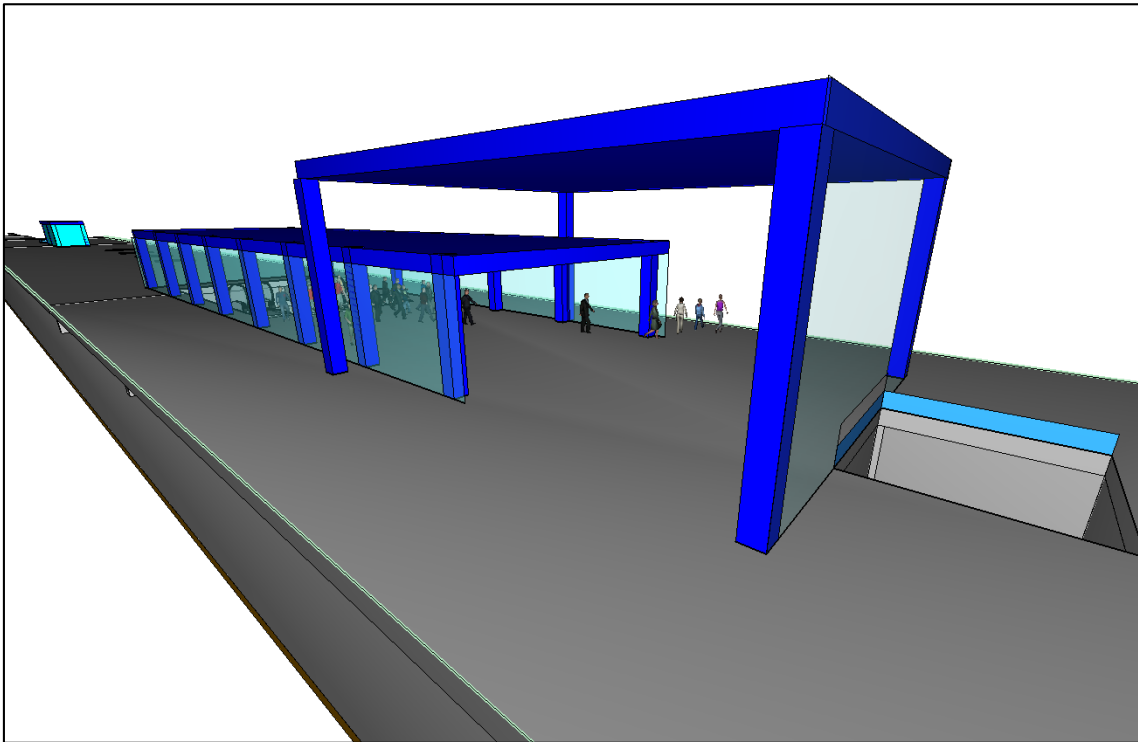


Figura 201. Ocupantes llegando al espacio exterior seguro.

7.4.2.8. Conclusión del Escenario de Incendio 2

A través de la simulación se ha comprobado que el tiempo necesario para realizar una evacuación en condiciones de seguridad es de 2586,3 segundos (**RSET=2586,3 segundos**).

Por otra parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio. Si llegado a este punto el sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering se puede asumir que el **ASET es ilimitado**.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.1 de la meta Seguridad de Vida tal que **ASET>RSET**.

Partiendo de la misma consideración de que parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio, se asume que el ASRT es ilimitado y por tanto mayor de 60 minutos.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.2 de la meta Seguridad de vida tal que **ASRT>60'**.

Puesto que se cumplen todos los objetivos de la meta Seguridad de Vida, queda validado el Escenario de Incendio 1

A continuación a través de una tabla resumen se comprueba si se han verificado los objetivos de la meta Seguridad de Vida a través del estudio de los objetivos ASET>RSET y mediante la comprobación del que ASRT>60 minutos.

Objetivo	Criterio	Verificación del criterio de aceptación
ASET>RSET	[O ₂] > 18%	Cumple
	[CO] < 450 ppm	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple
	Temperatura < 60°C	Cumple
	Velocidad del aire < 10 m/s	Cumple
ASRT > 60'	ASET ilimitado	Cumple

Tabla 45. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

7.4.3. Escenario de incendio EI 3

En este escenario de incendio el tren está entrando por el túnel quedando parado a los 650 metros del portal PK= 0+650. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia la estación y la evacuación se realiza hacia el portal del túnel.

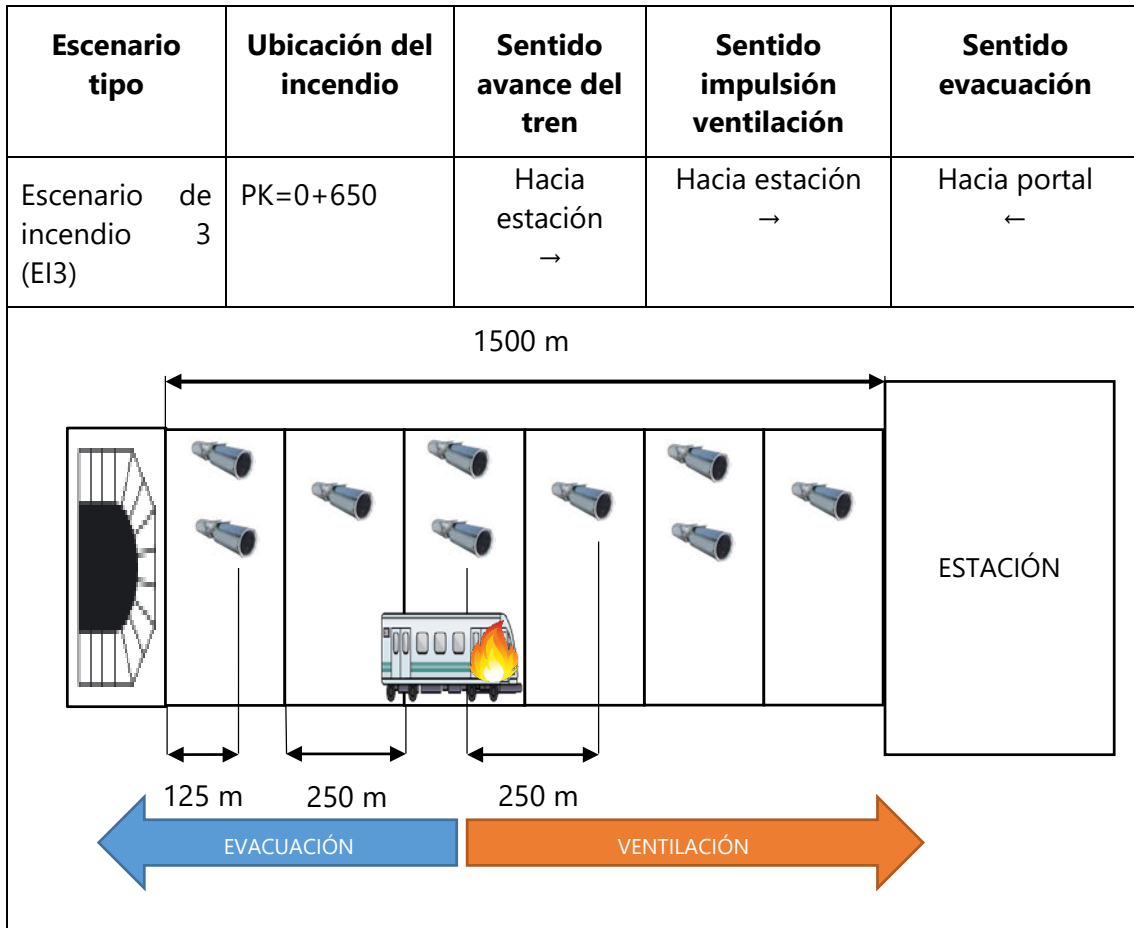
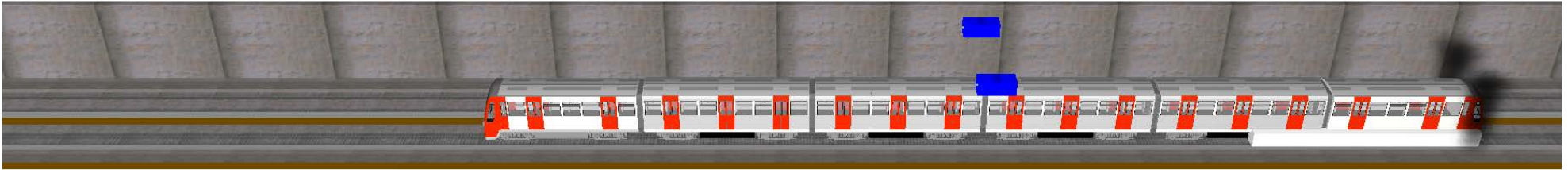


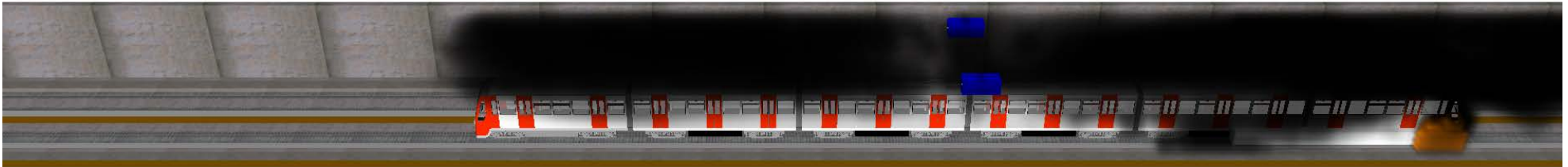
Figura 202. Cuadro resumen del escenario de incendio 3 EI3

7.4.3.1. Análisis del backlayering

T=5 segundos. Comienza el incendio



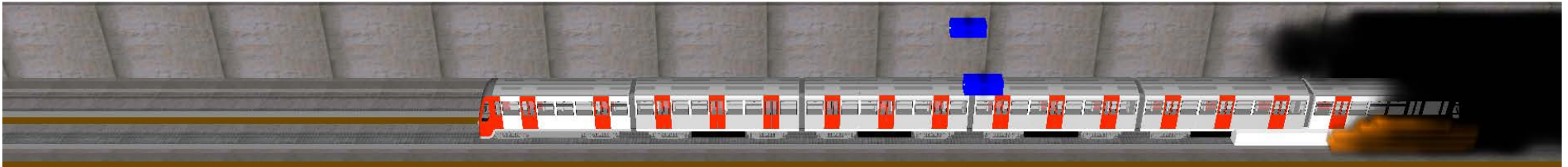
T=100 segundos. Debido al tiempo en que tarda en ponerse en marcha el sistema de ventilación se aprecia un ligero avance del humo.



T=200 segundos. Quedan en las cotas altas del túnel algunas aglomeraciones de humo.



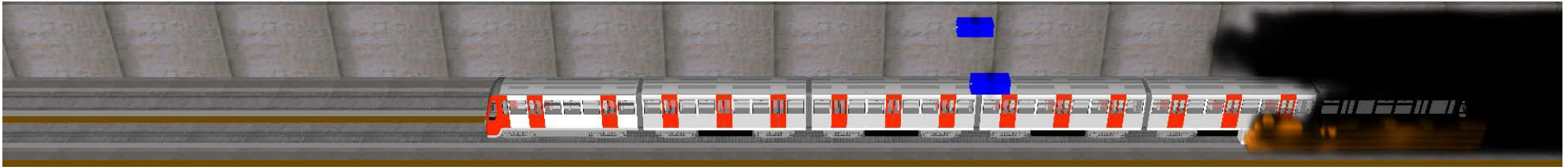
T=300 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



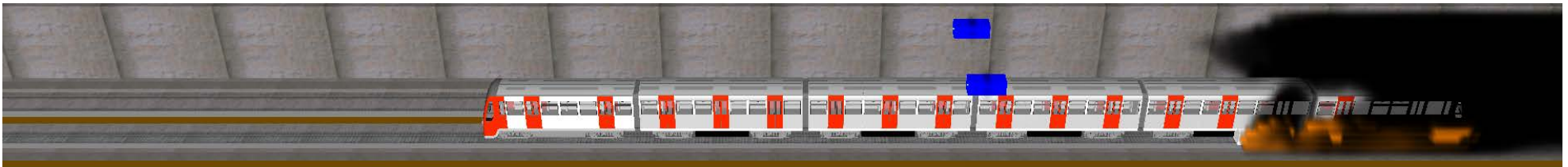
T=500 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



T=720 segundos. Se alcanza la potencia máxima del incendio. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.

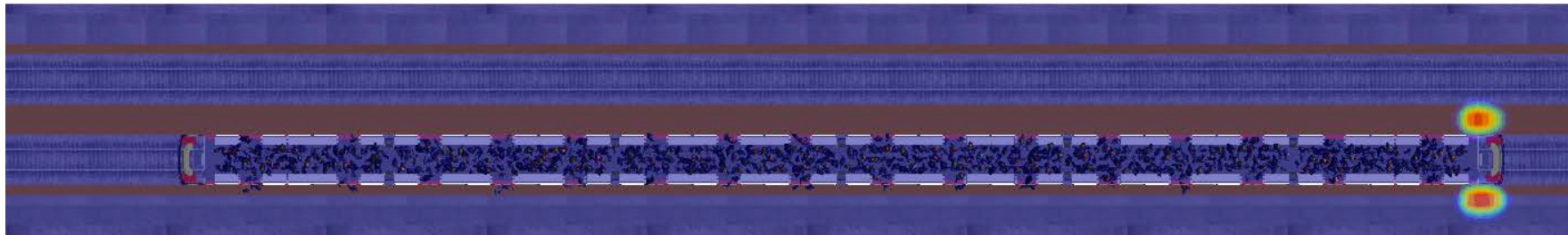


T=1080 segundos. El incendio comienza a decaer.

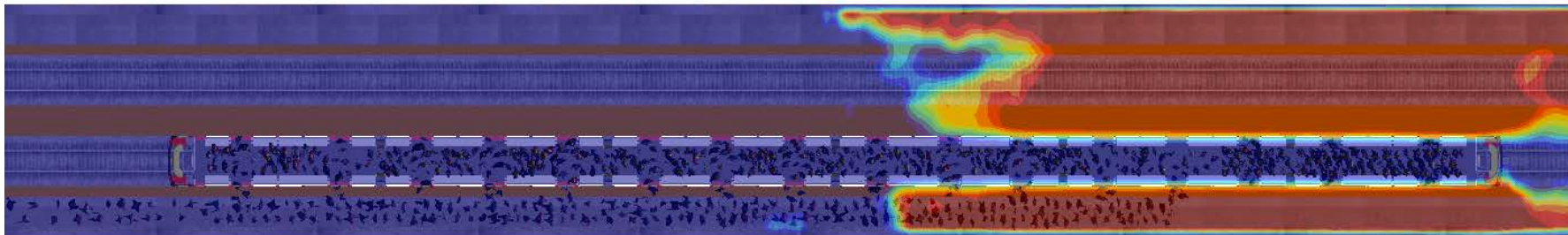


7.4.3.2. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre la vía de evacuación

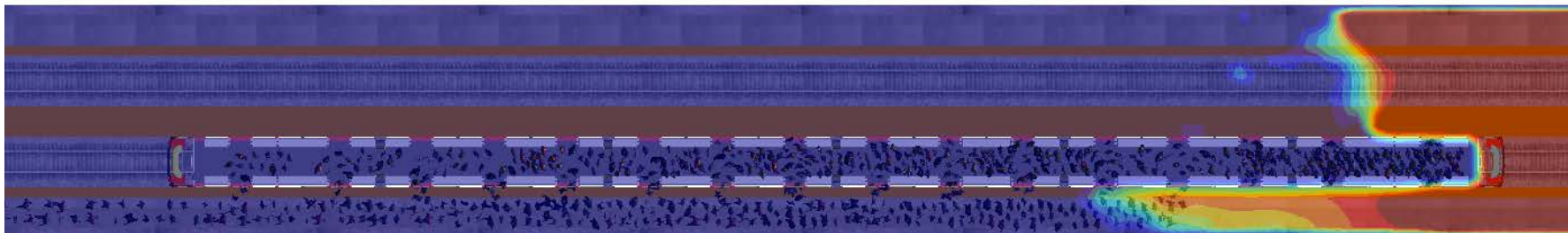
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



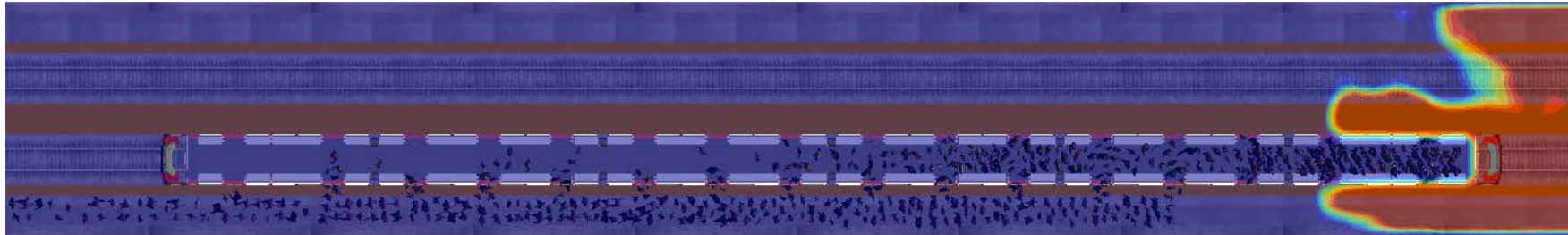
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



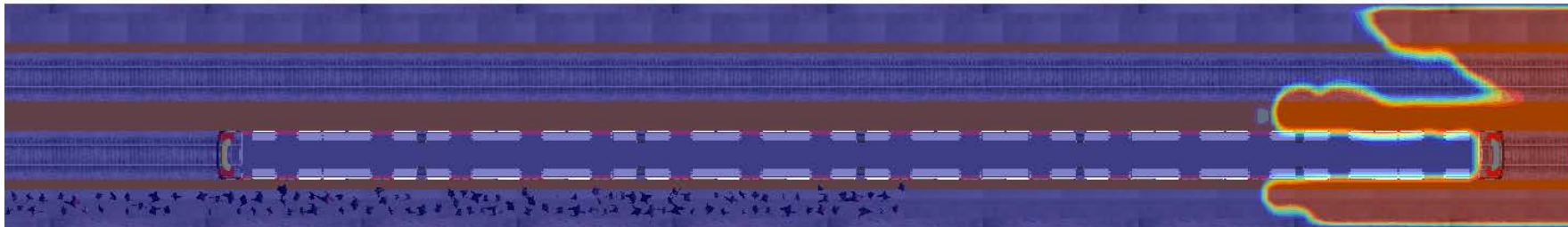
SOOT
(m)



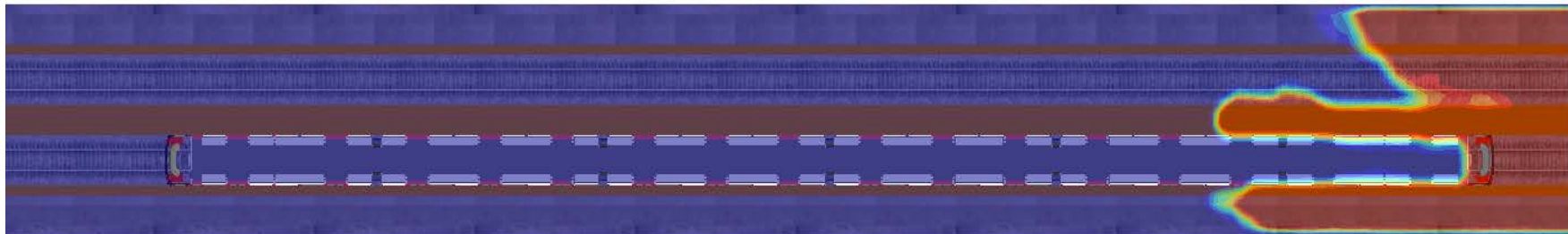
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.

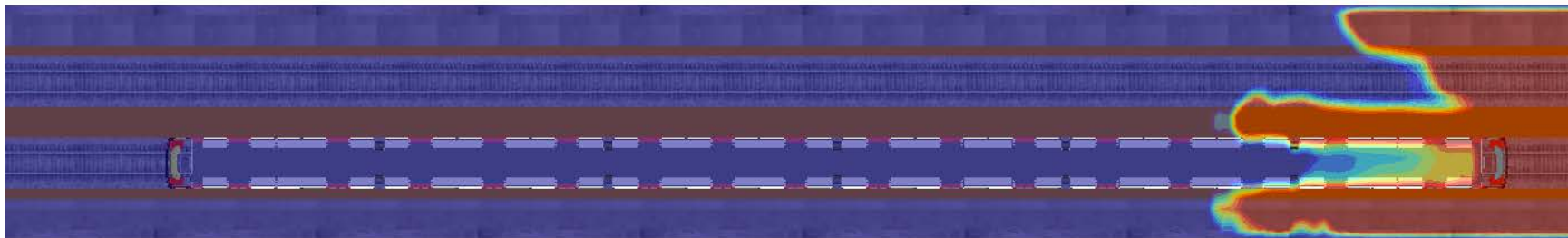


T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



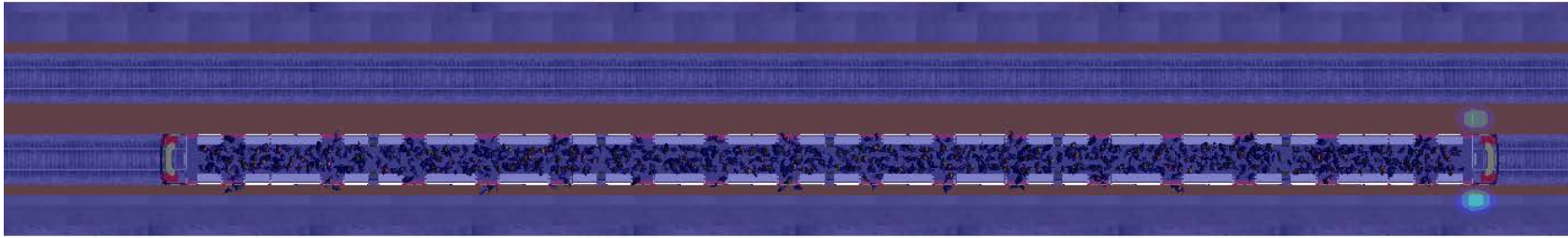
Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

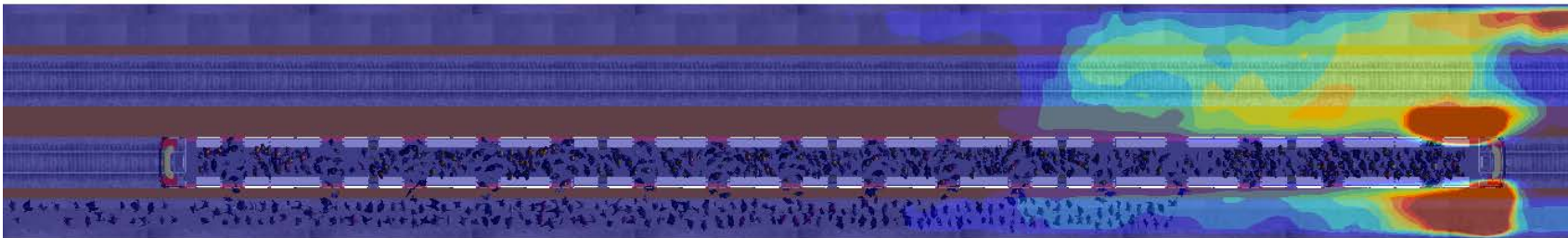


7.4.3.3. Análisis de temperatura a 2 metros sobre la vía de evacuación

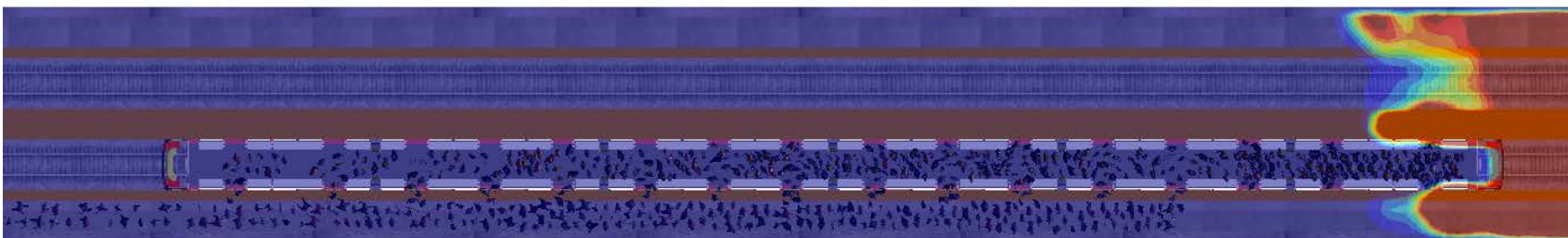
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Por ende se aprecia un ligero incremento de temperatura en la zona con humo.



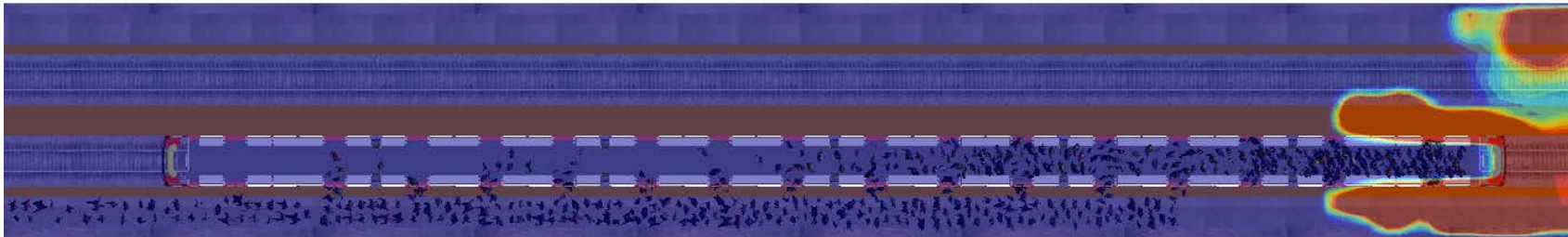
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering enfriando la zona previamente afectada.



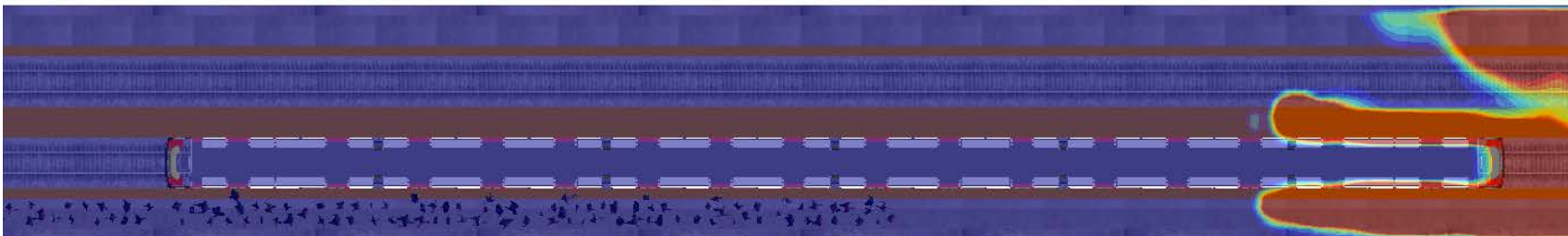
TEMPERATURE
(C)



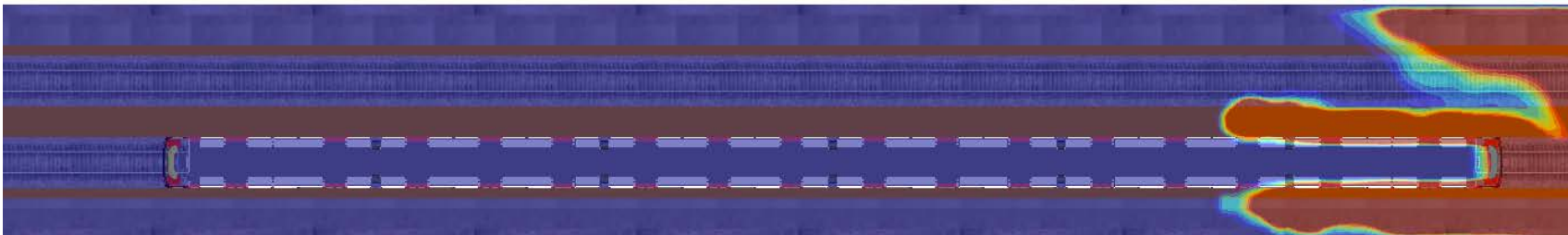
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



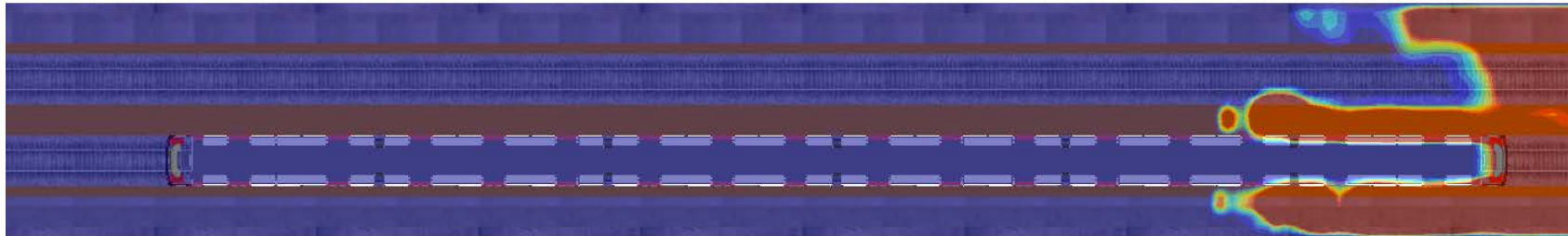
T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



TEMPERATURE
(C)



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

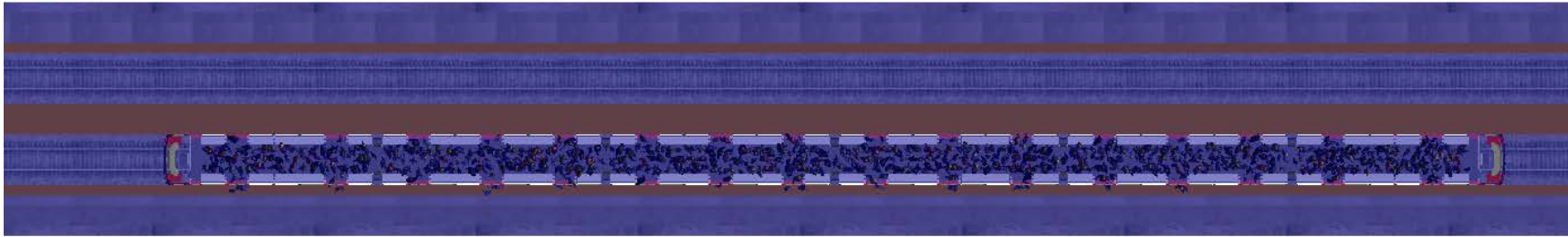


TEMPERATURE
(C)



7.4.3.4. Análisis de la concentración de oxígeno a 2 metros sobre la vía de evacuación

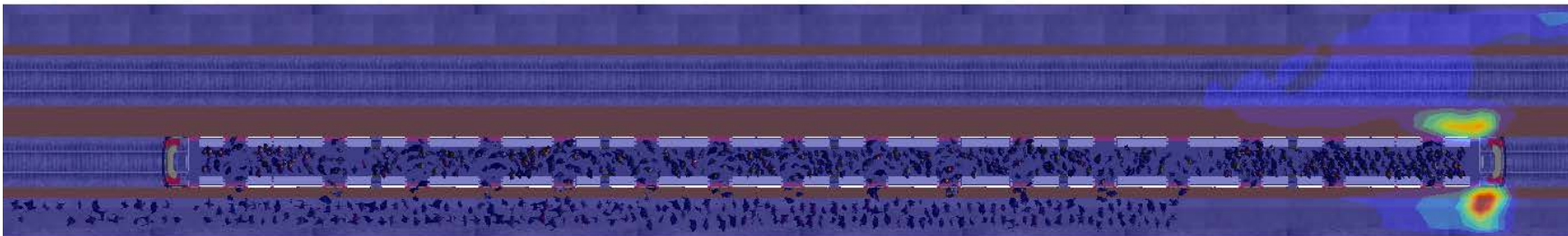
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



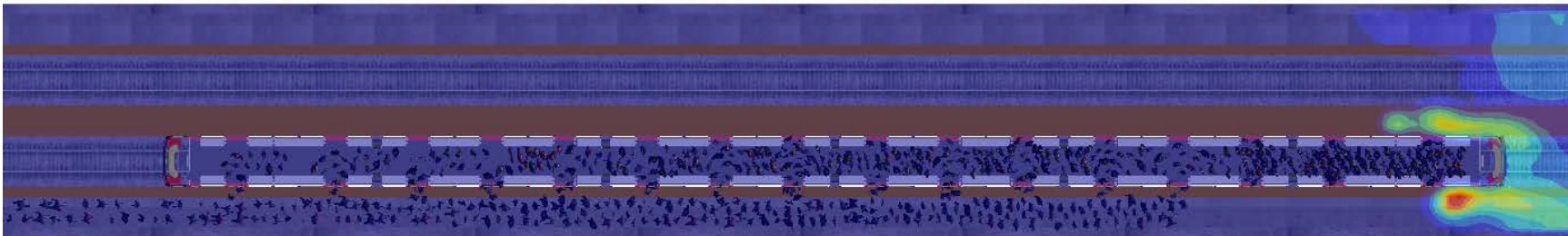
OXYGEN
(kg/kg)



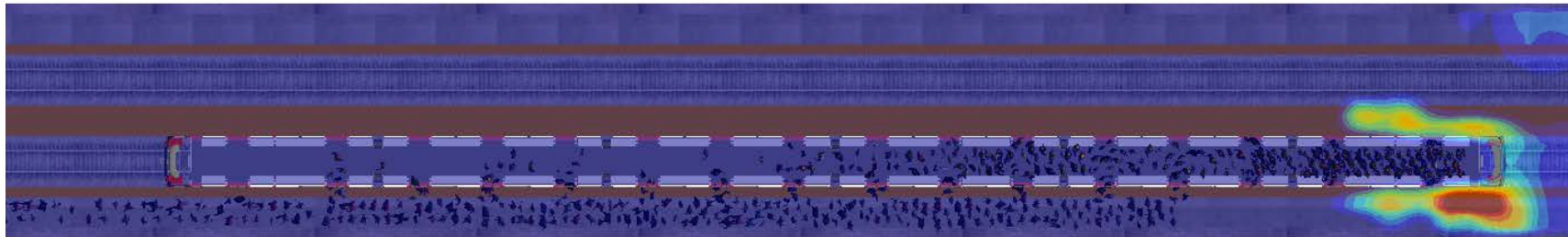
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Sin embargo no se ve disminuida la concentración de oxígeno.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



T=300 segundos. El backlayering es controlado.



OXYGEN
(kg/kg)

0,231

0,228

0,224

0,221

0,217

0,214

0,21

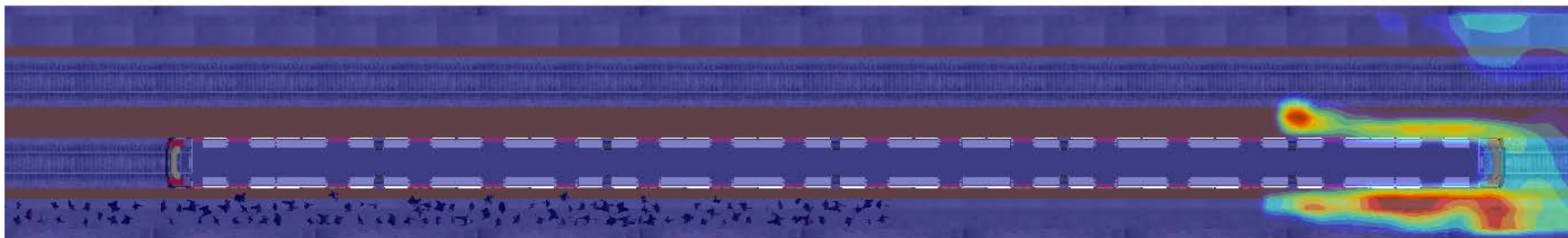
0,207

0,203

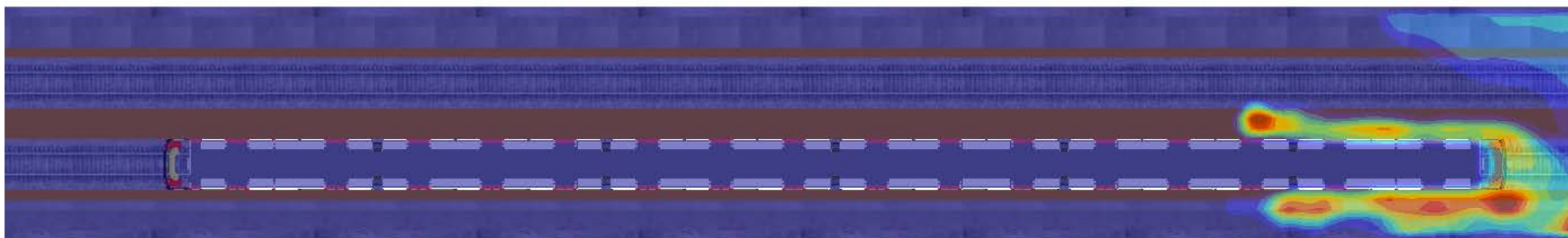
0,2

0,197

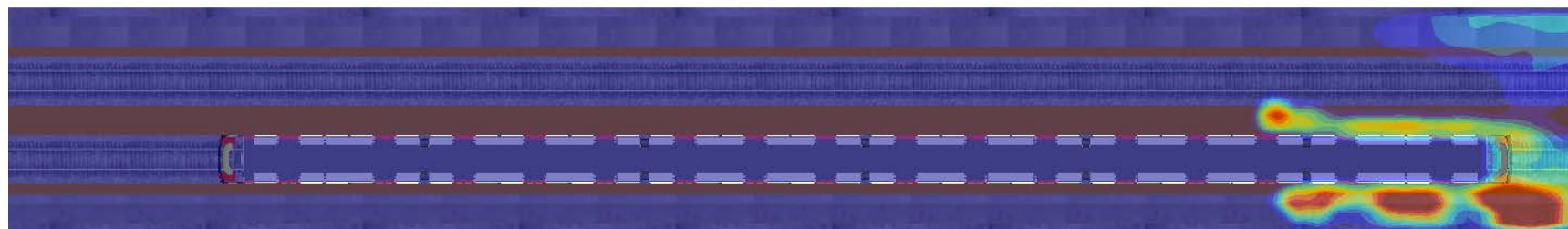
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

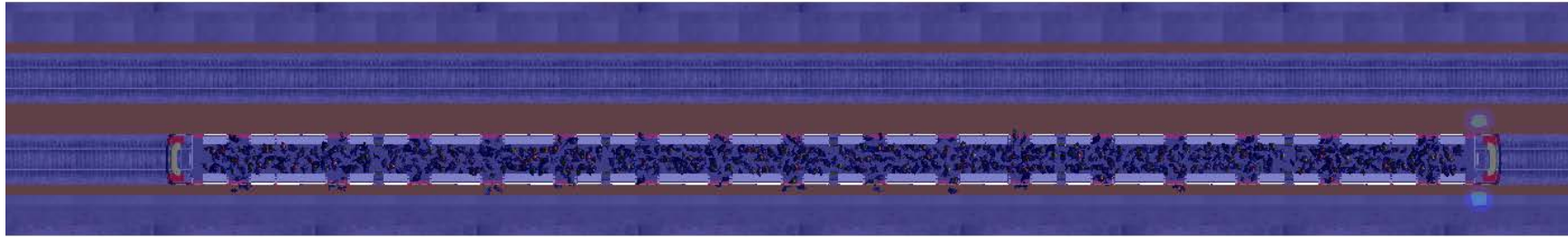


OXYGEN
(kg/kg)

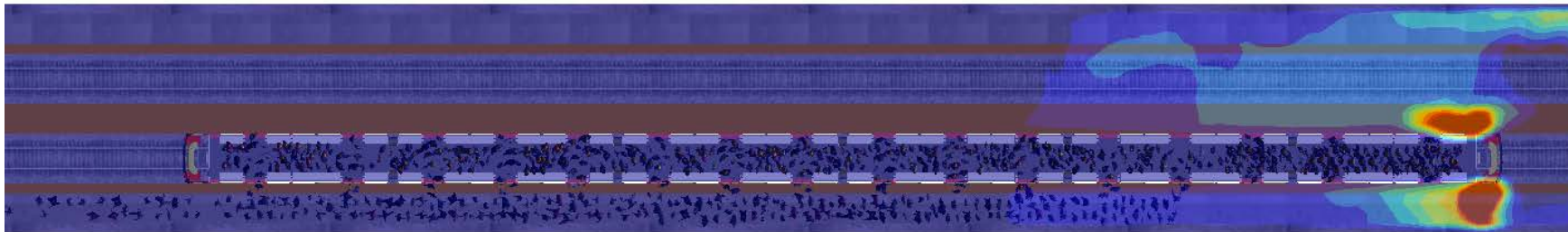


7.4.3.5. Análisis de la concentración de monóxido de carbono a 2 metros sobre la vía de evacuación

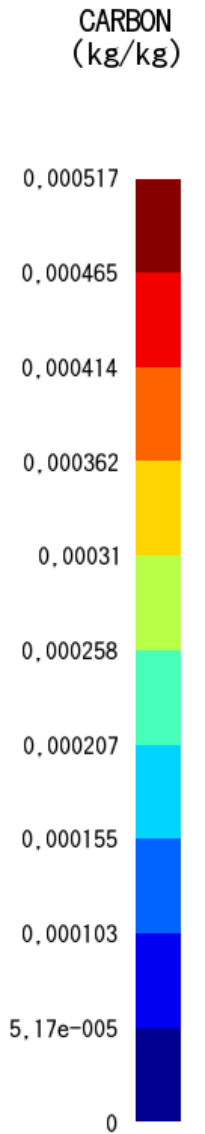
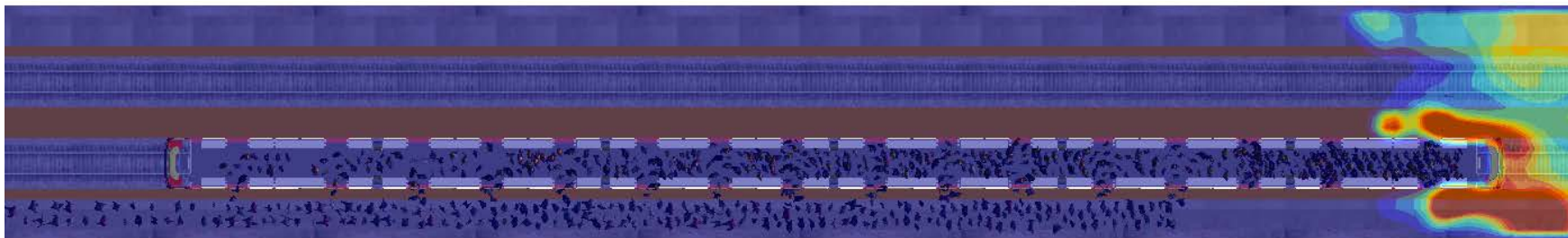
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Se aprecia una aumento de la concentración de CO, sin llegar a ser peligrosa.

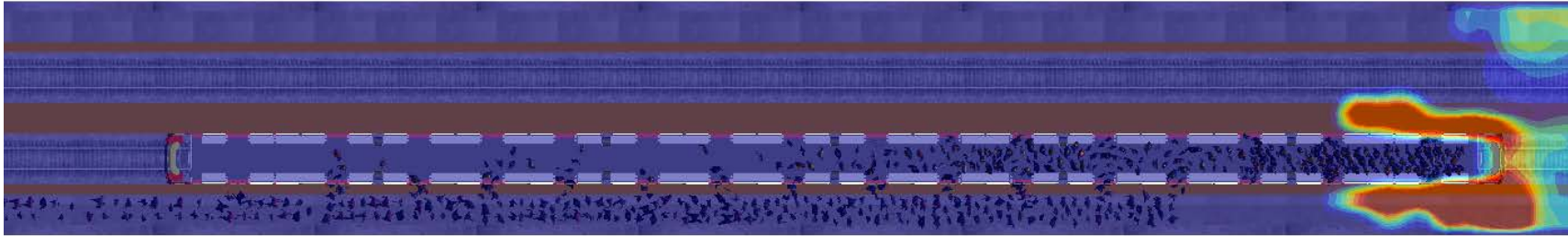


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia como desaparece la concentración de CO.

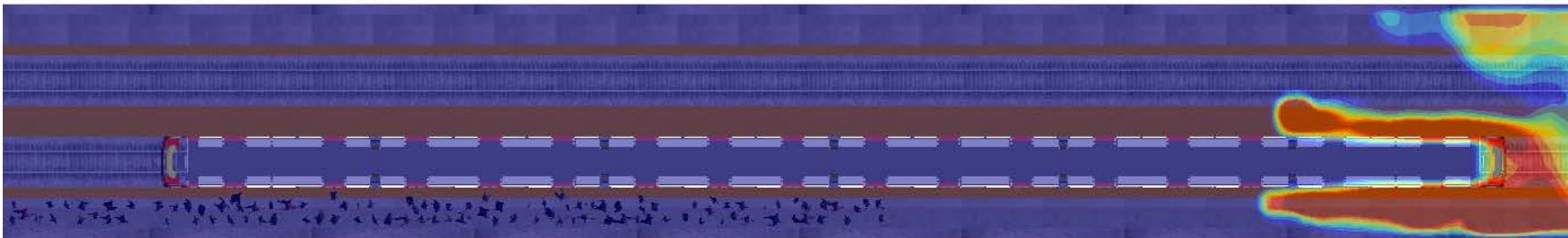


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

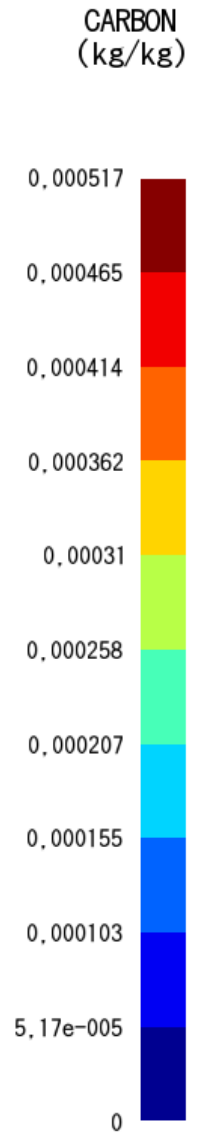
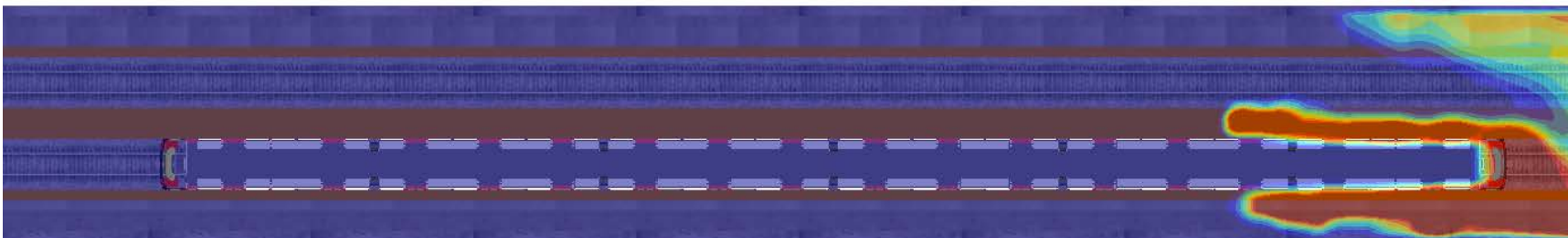
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



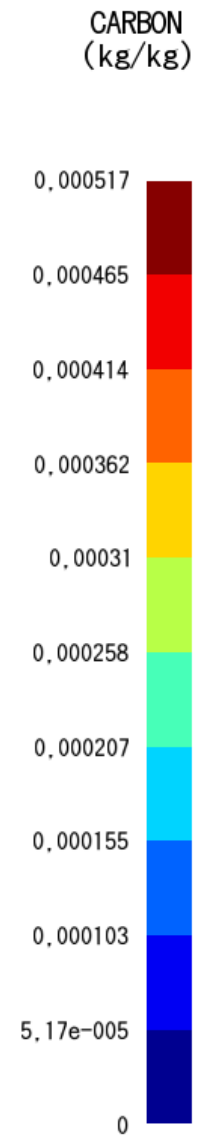
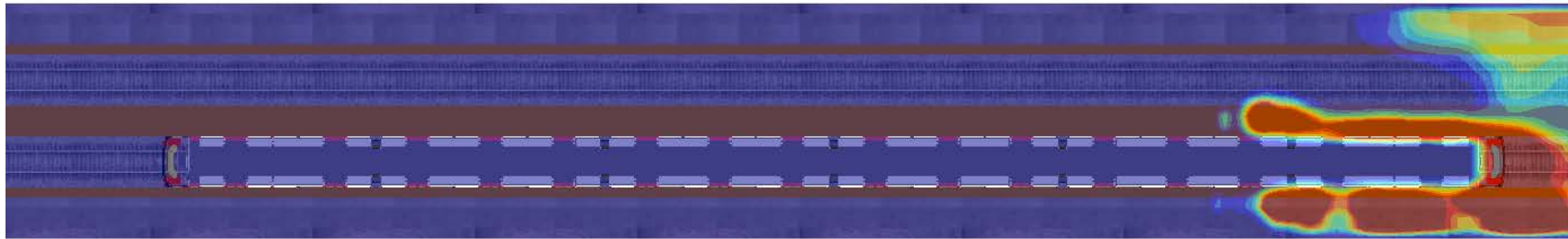
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

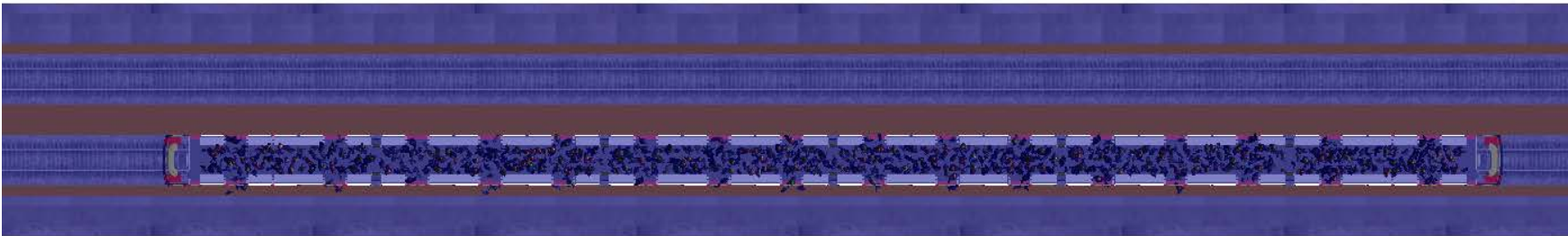


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

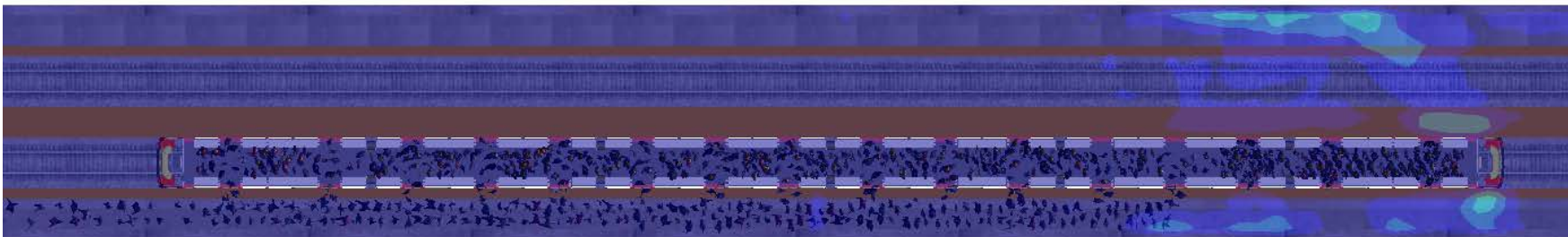


7.4.3.6. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre la vía de evacuación

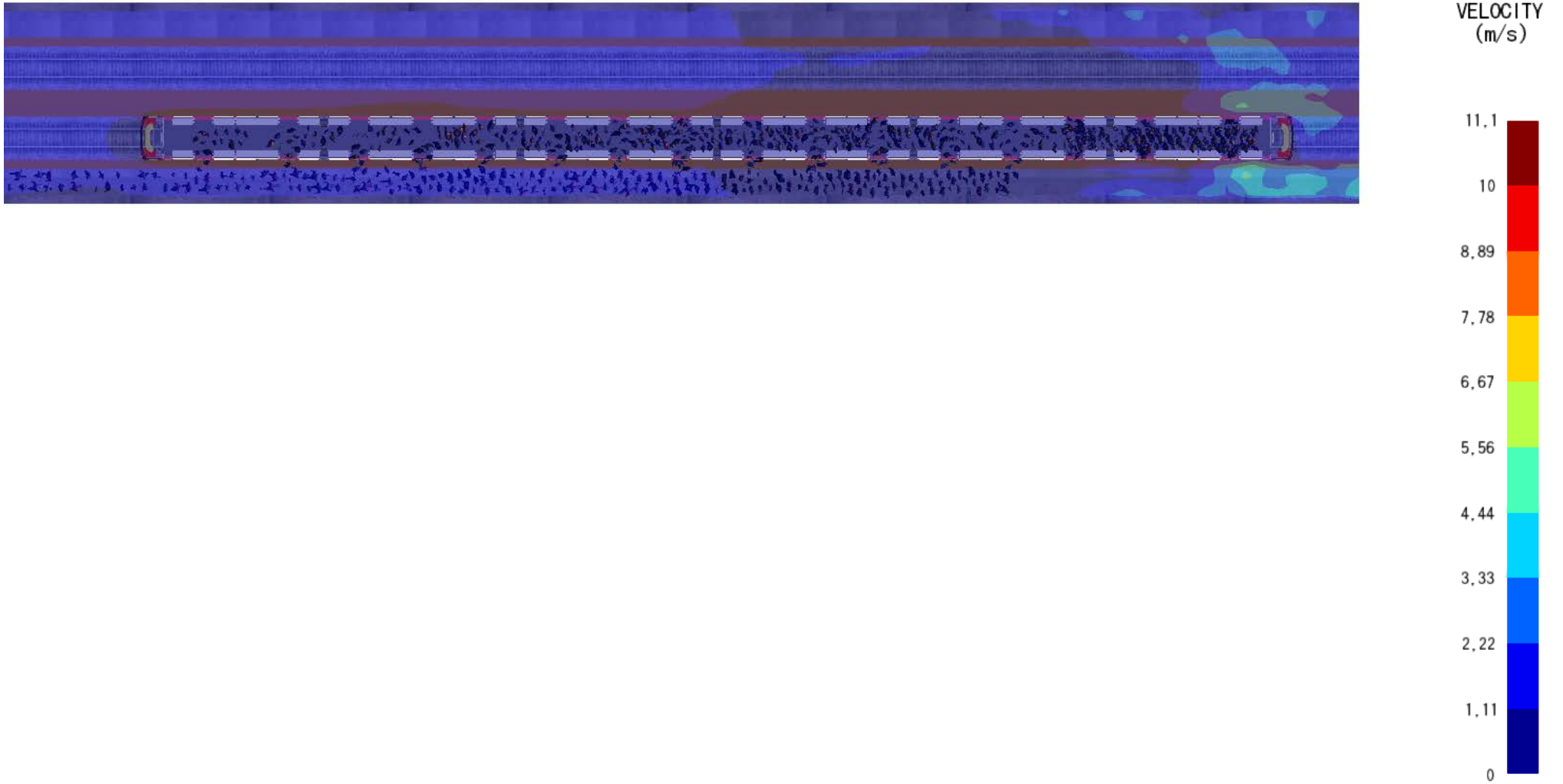
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.

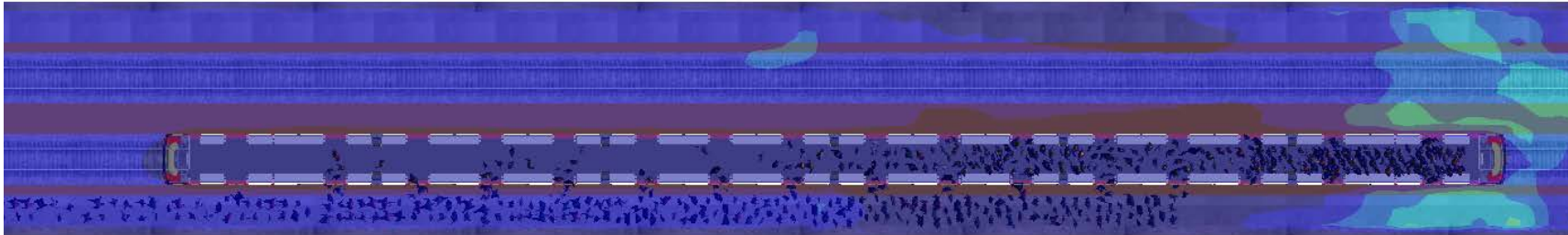


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia un incremento en la velocidad del aire del túnel.

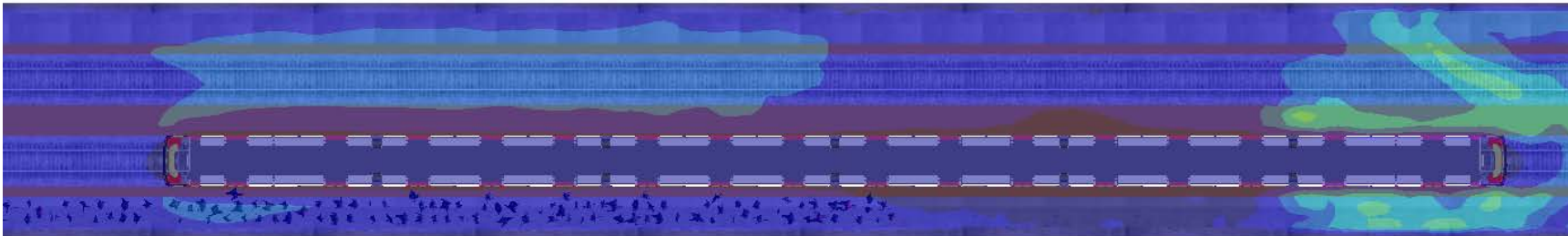


T=300 segundos. El backlayering es controlado.

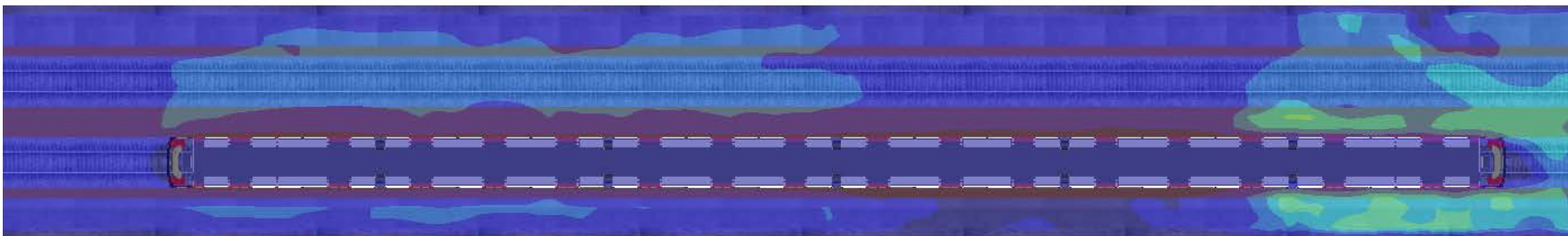
Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

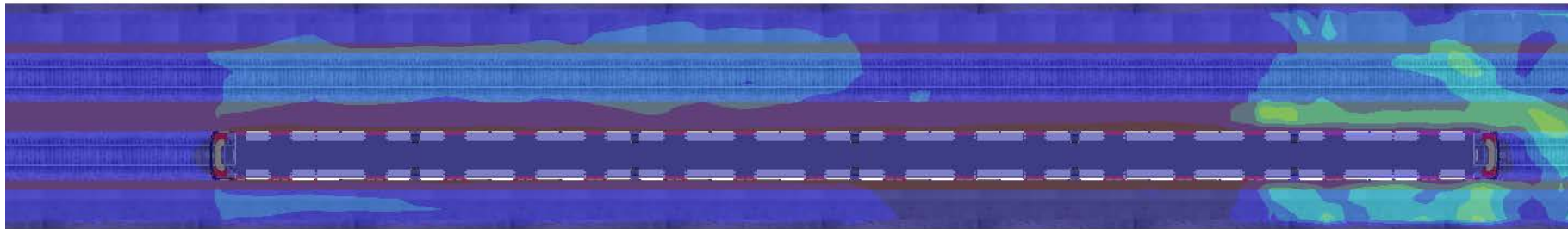
3,33

2,22

1,11

0

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

3,33

2,22

1,11

0

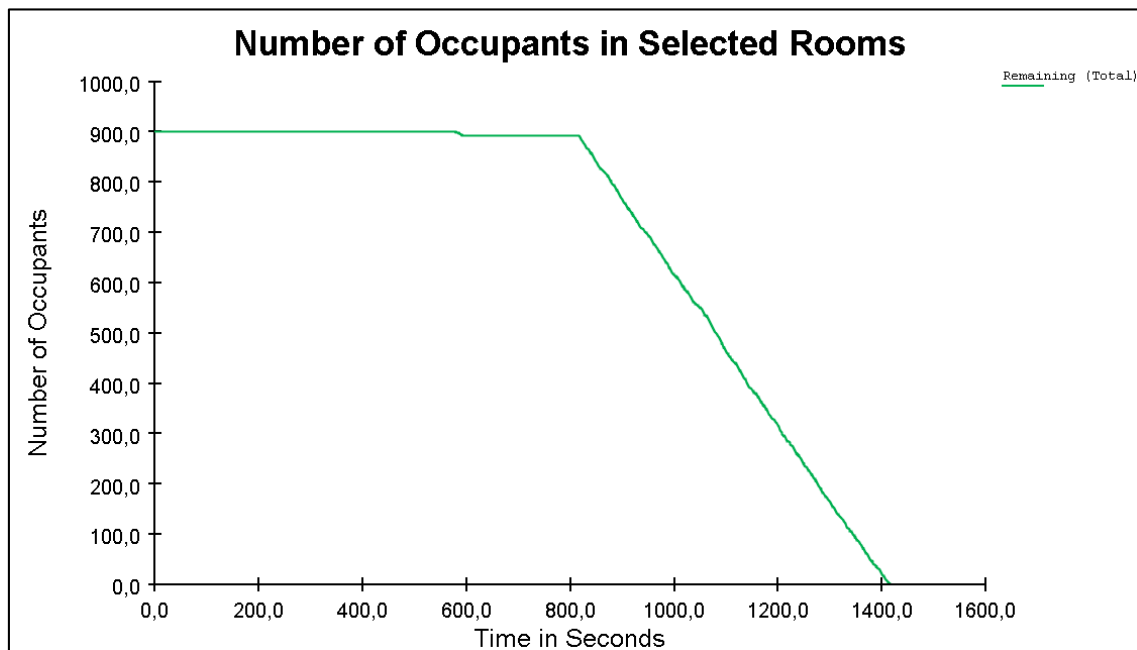
7.4.3.7. Análisis de la evacuación

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar en 1416,2 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI 3
Ocupantes totales	900
Tiempos de salida	
Mínimo:	579,5 s
Máximo	1416,2 s
Media:	1109 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	597,5 m
Máximo	669,7 m
Media:	633,8 m

Tabla 46. Sumario de simulación de evacuación EI3

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.

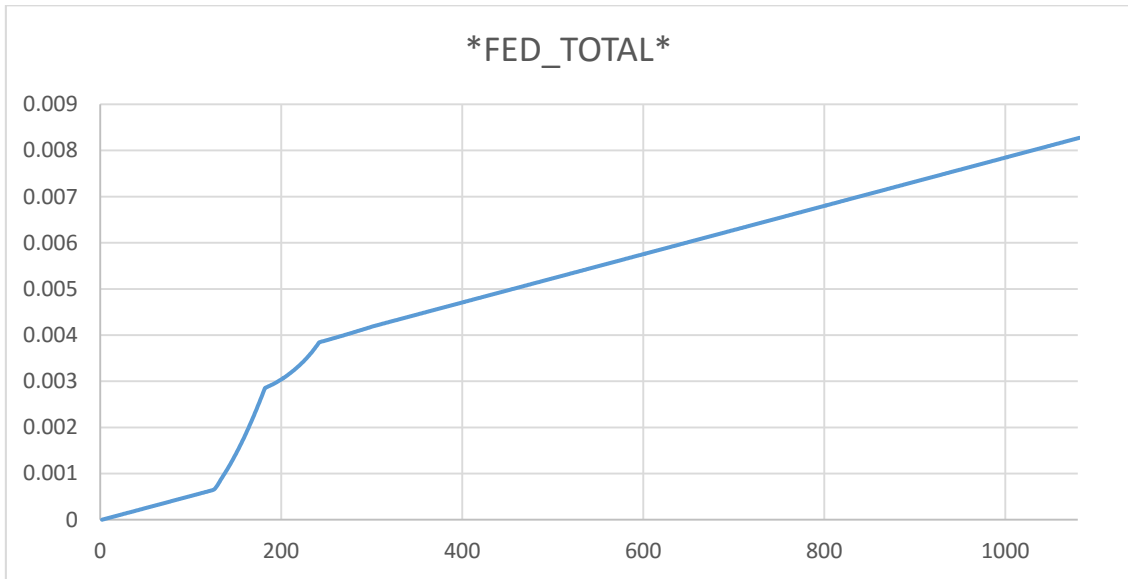


Gráfica 35. Evolución de la ocupación del túnel en EI1.

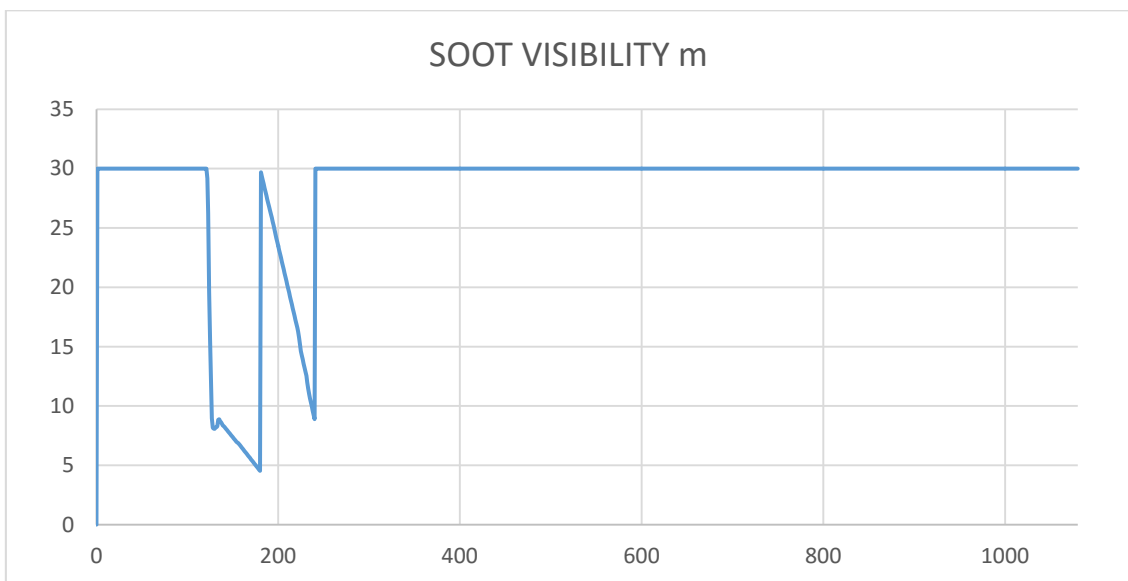
Como se ha podido ver cuándo se ha analizado la visibilidad hasta que debido al tiempo que tarda el sistema de ventilación en ponerse en marcha, alcanzar el régimen permanente y vencer las cargas presentes existe un periodo de tiempo en torno al instante $T=125$ segundos durante los cuales existe una zona con visibilidad inferior a 10 metros.

Para comprobar que la evacuación es posible se ha analizado aquellos ocupantes que se han visto expuestos a esta eventual situación para analizar el FED.

En la siguiente gráfica se muestra la visibilidad y el FED en función del tiempo a los cuales se ven sometidos estos ocupantes:



Gráfica 36. Evolución del FED de un ocupante expuesto al humo.



Gráfica 37. Evolución de la visibilidad de un ocupante expuesto al humo.

Como puede verse la exposición al humo genera un rápido incremento del FED, sin embargo globalmente el valor de FED alcanzado debido a la duración de la exposición es mucho menor del valor límite de FED=0.3

7.4.3.8. Conclusión del Escenario de Incendio 3

A través de la simulación se ha comprobado que el tiempo necesario para realizar una evacuación en condiciones de seguridad es de 2586,3 segundos (**RSET=1416,2 segundos**).

Por otra parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio. Si llegado a este punto el sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering se puede asumir que el **ASET es ilimitado**.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.1 de la meta Seguridad de Vida tal que **ASET>RSET**.

Partiendo de la misma consideración de que parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio, se asume que el ASRT es ilimitado y por tanto mayor de 60 minutos.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.2 de la meta Seguridad de vida tal que **ASRT>60'**.

Puesto que se cumplen todos los objetivos de la meta Seguridad de Vida, queda validado el Escenario de Incendio 1

A continuación a través de una tabla resumen se comprueba si se han verificado los objetivos de la meta Seguridad de Vida a través del estudio de los objetivos ASET>RSET y mediante la comprobación del que ASRT>60 minutos.

Objetivo	Criterio	Verificación del criterio de aceptación
ASET>RSET	[O ₂]>18%	Cumple
	[CO]<450 ppm	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple
	Temperatura < 60°C	Cumple
	Velocidad del aire < 10 m/s	Cumple
ASRT>60'	ASET ilimitado	Cumple

Tabla 47. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

7.4.4. Escenario de incendio EI 4

En este escenario de incendio el tren está saliendo del túnel quedando parado a los 650 metros del portal PK= 0+650. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia el portal y la evacuación se realiza hacia la estación.

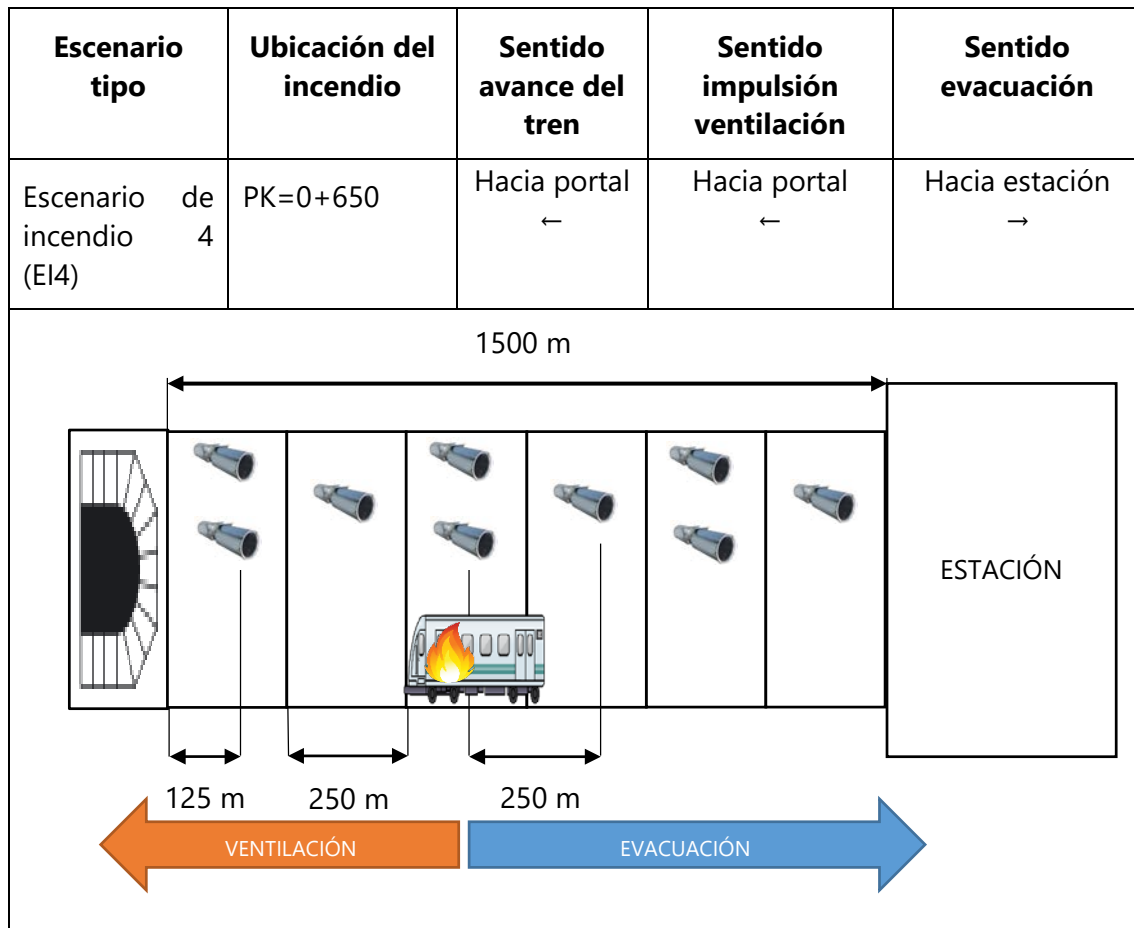
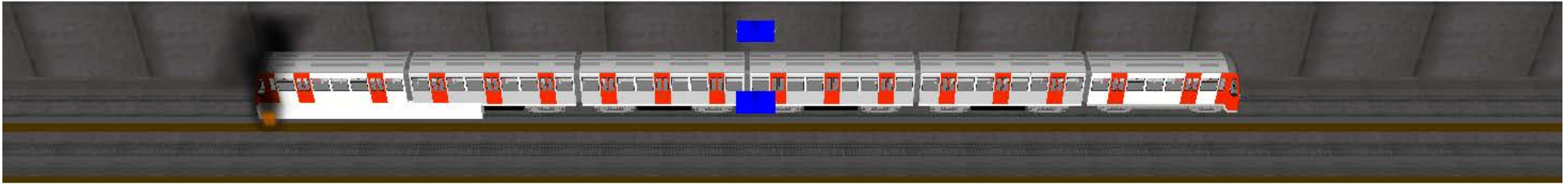


Figura 203. Cuadro resumen del escenario de incendio 4 EI4

7.4.4.1. Análisis del backlayering

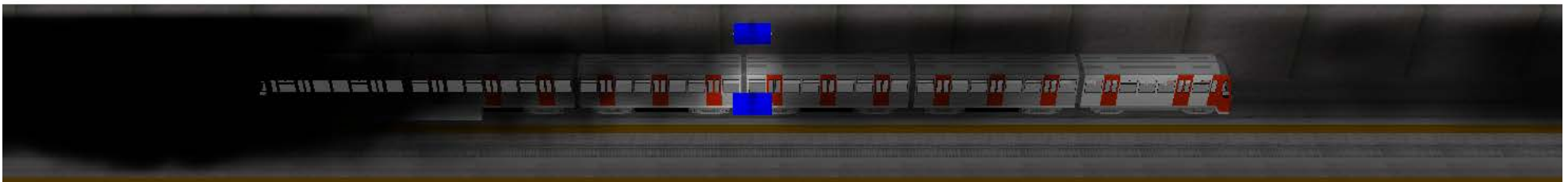
T=5 segundos. Comienza el incendio



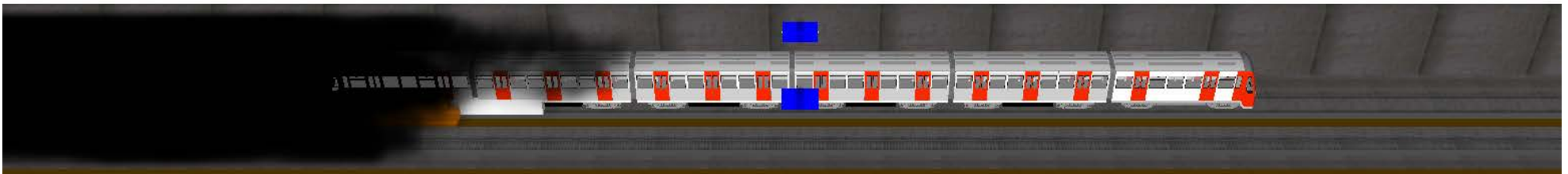
T=125 segundos. Debido al tiempo en que tarda en ponerse en marcha el sistema de ventilación se aprecia un avance del humo.



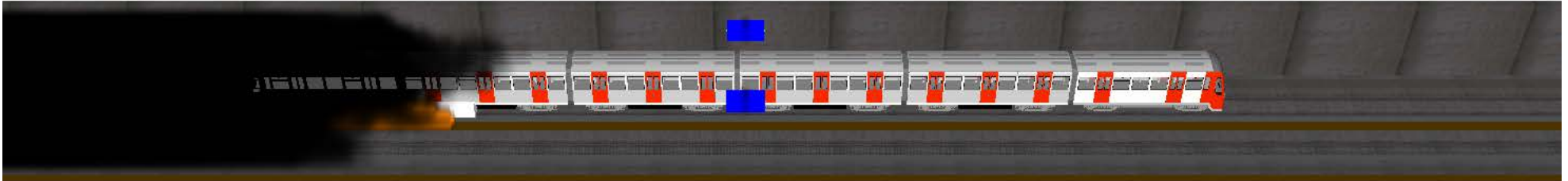
T=200 segundos. Gracias al sistema de ventilación se aprecia como desciende la densidad del humo en la zona de evacuación.



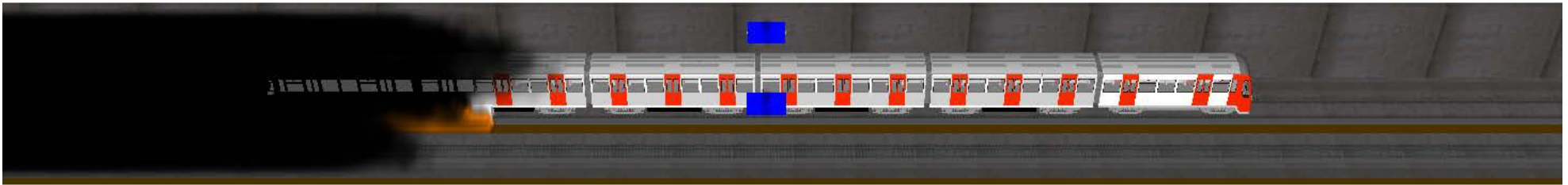
T=300 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



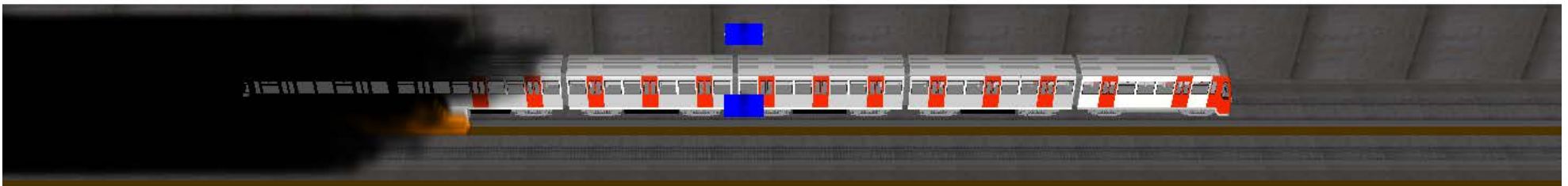
T=600 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



T=720 segundos. Se alcanza la potencia máxima del incendio. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.

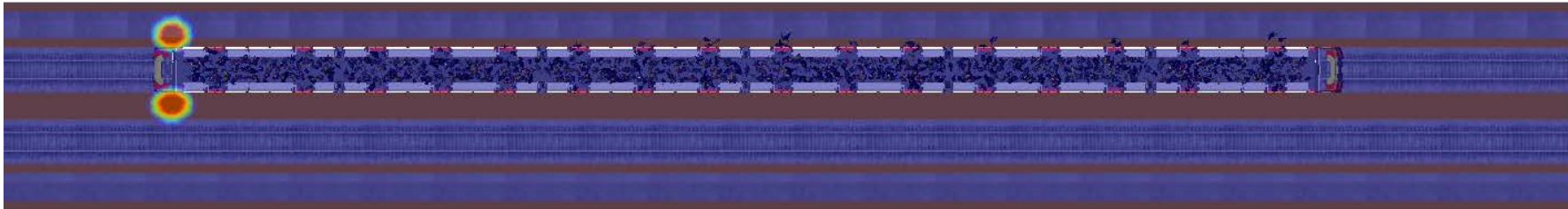


T=1080 segundos. El incendio comienza a decaer.

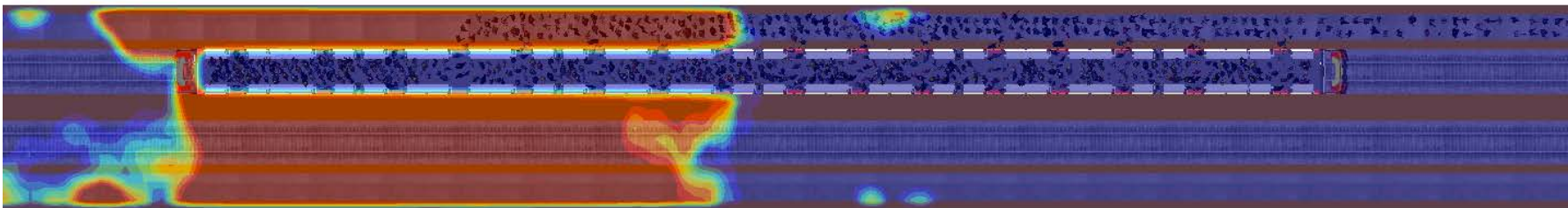


7.4.4.2. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre la vía de evacuación

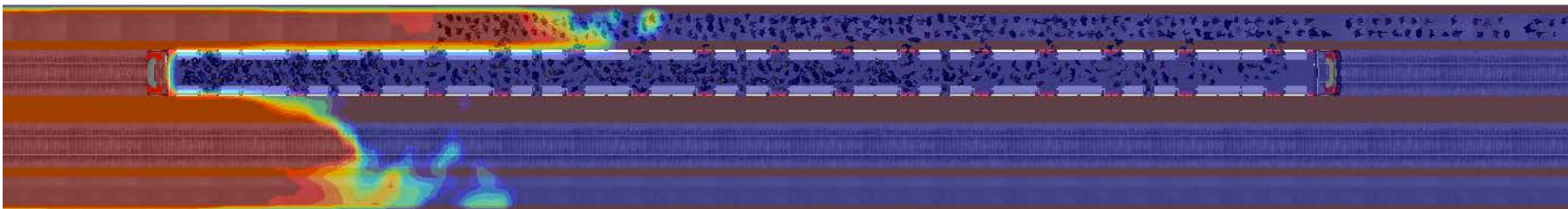
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



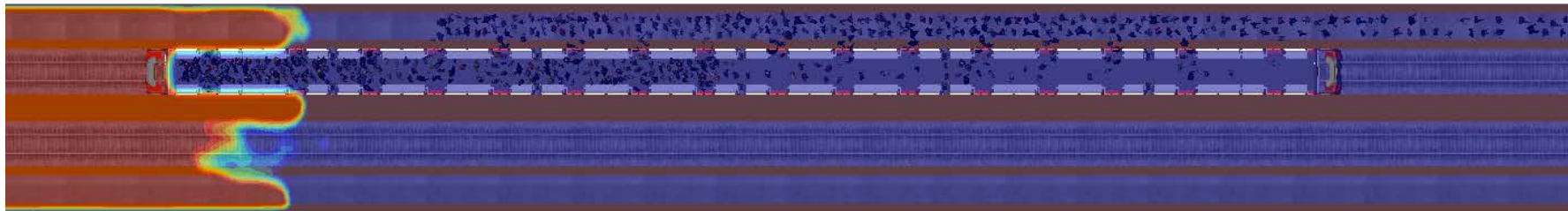
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



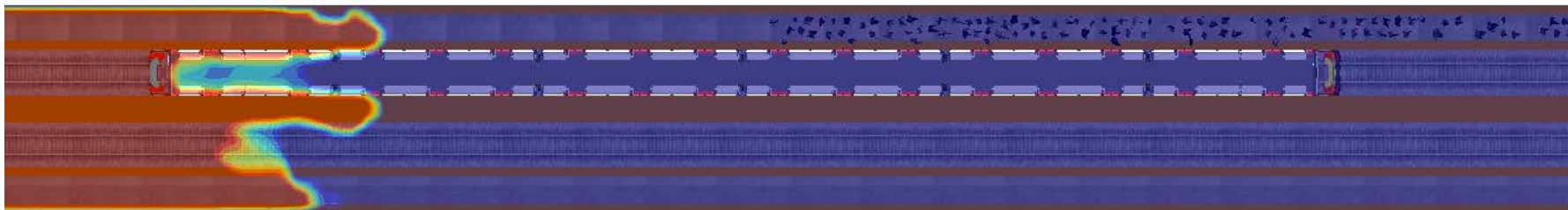
SOOT
(m)



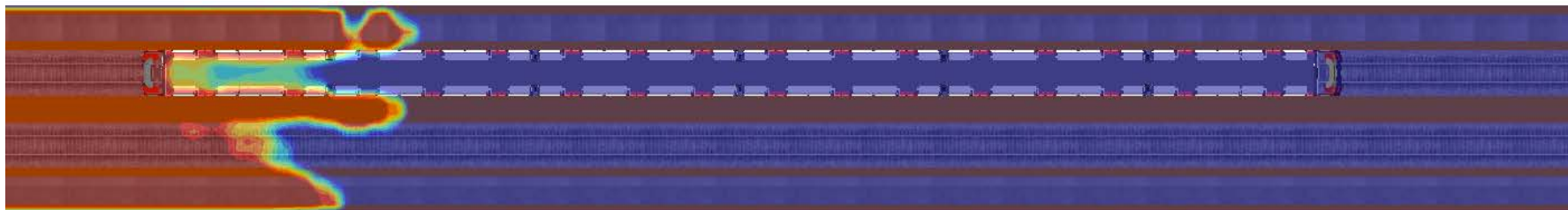
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



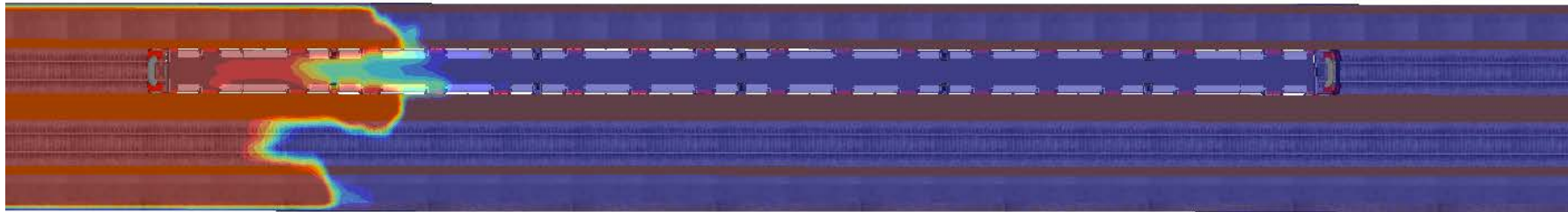
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

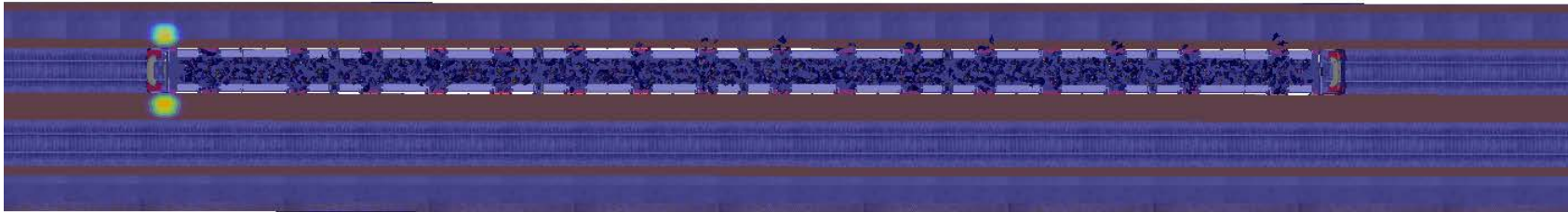


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

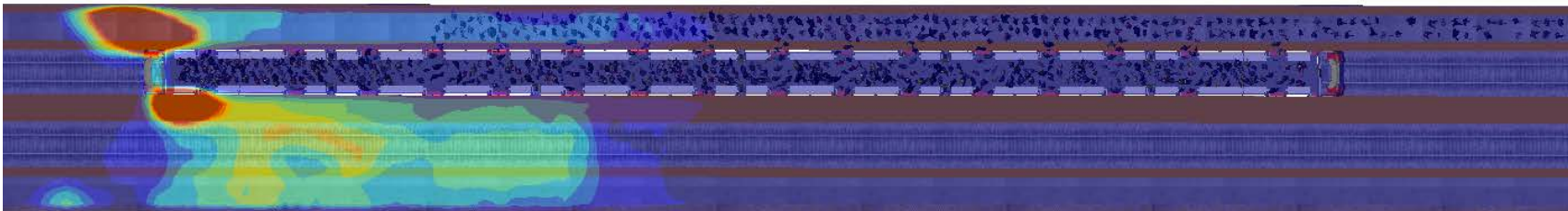


7.4.4.3. Análisis de temperatura a 2 metros sobre la vía de evacuación

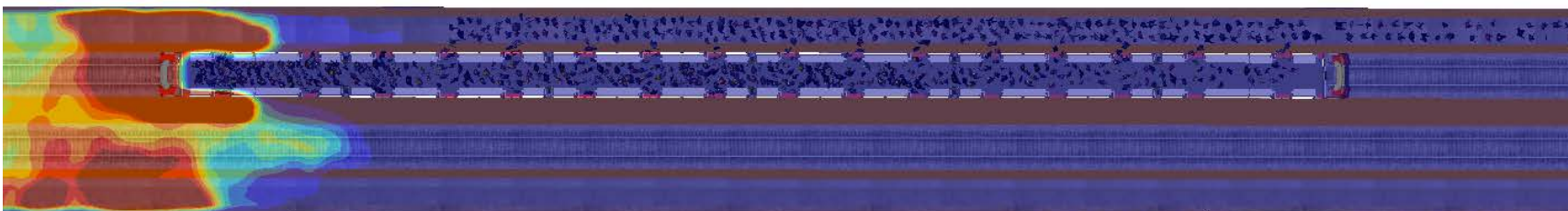
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Por ende se aprecia un ligero incremento de temperatura en la zona con humo.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering enfriando la zona previamente afectada.

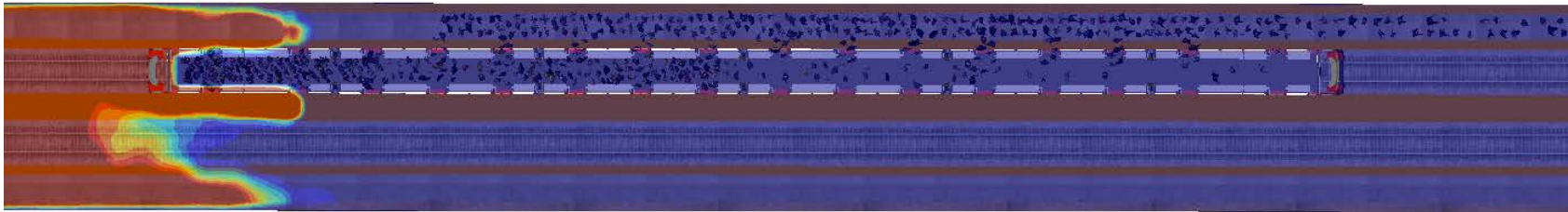


TEMPERATURE
(C)

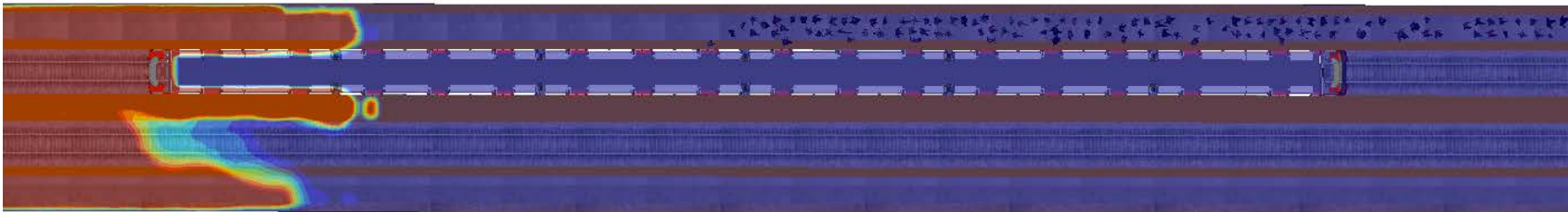


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

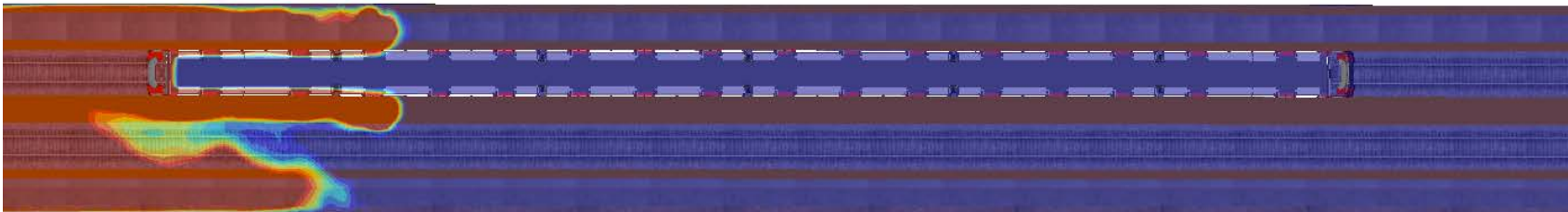
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



TEMPERATURE
(C)

64,4

60

55,6

51,1

46,7

42,2

37,8

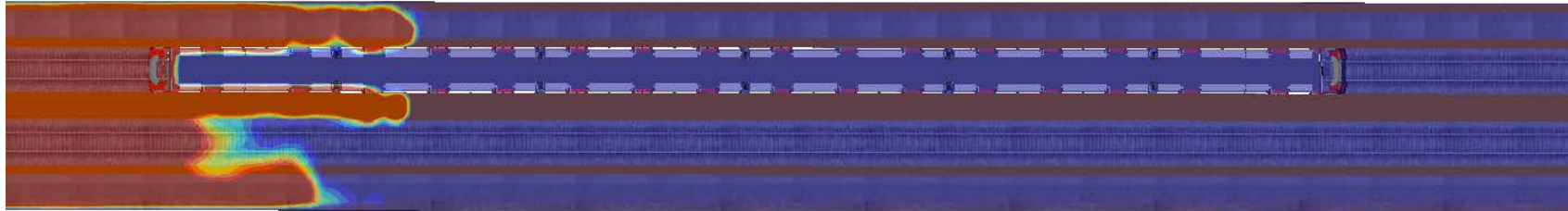
33,3

28,9

24,4

20

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

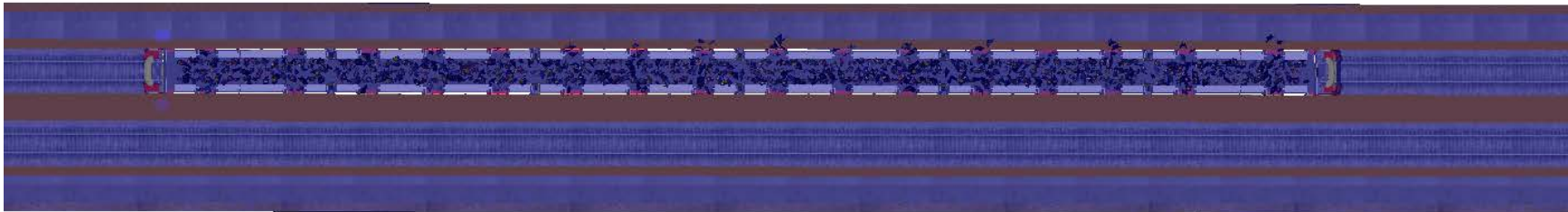


TEMPERATURE
(C)

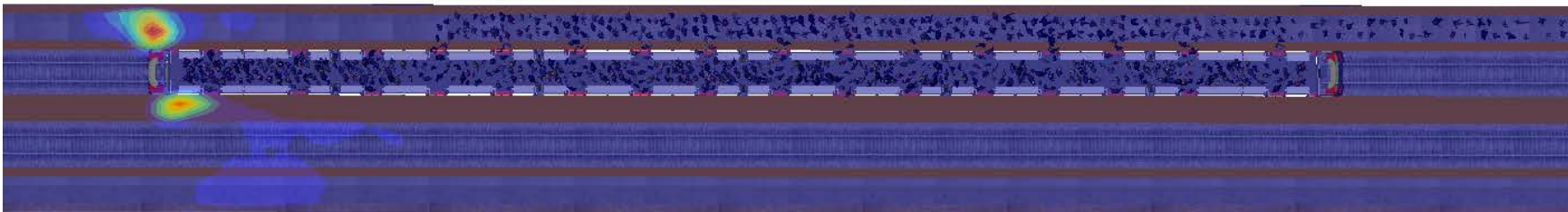


7.4.4.4. Análisis de la concentración de oxígeno a 2 metros sobre la vía de evacuación

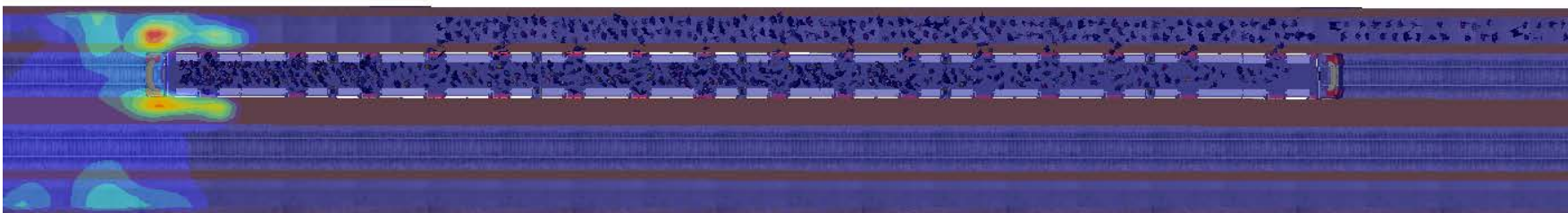
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



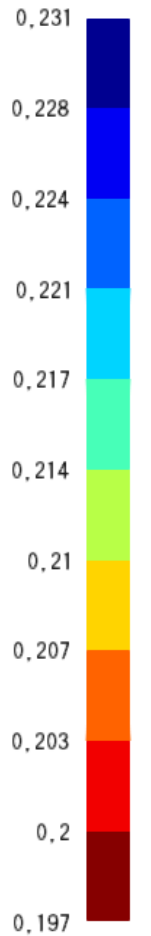
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Sin embargo no se ve disminuida la concentración de oxígeno.



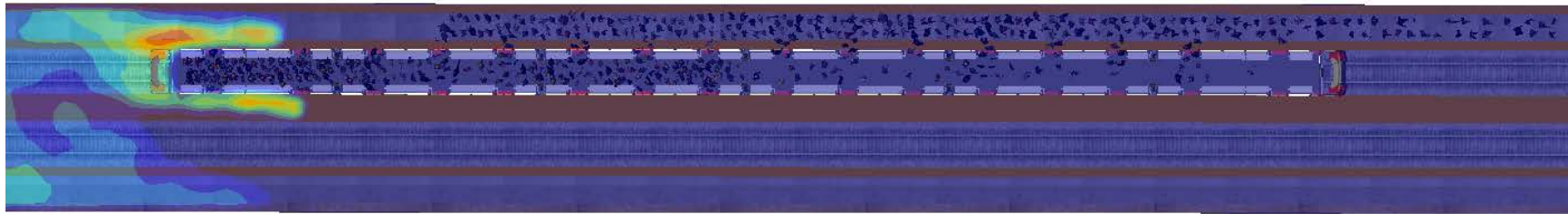
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



OXYGEN
(kg/kg)



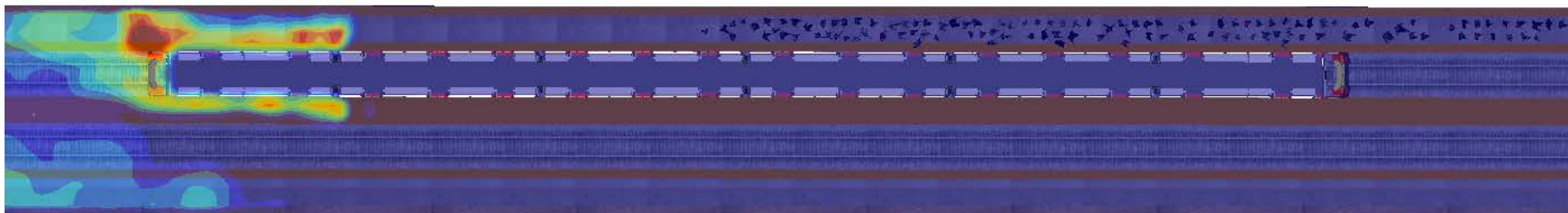
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



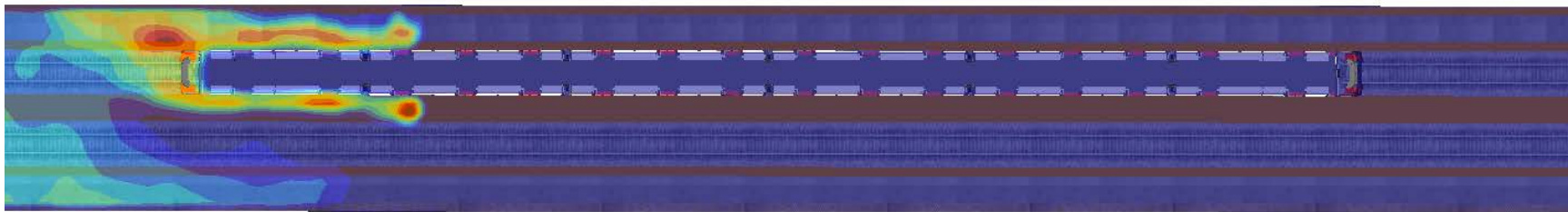
OXYGEN
(kg/kg)



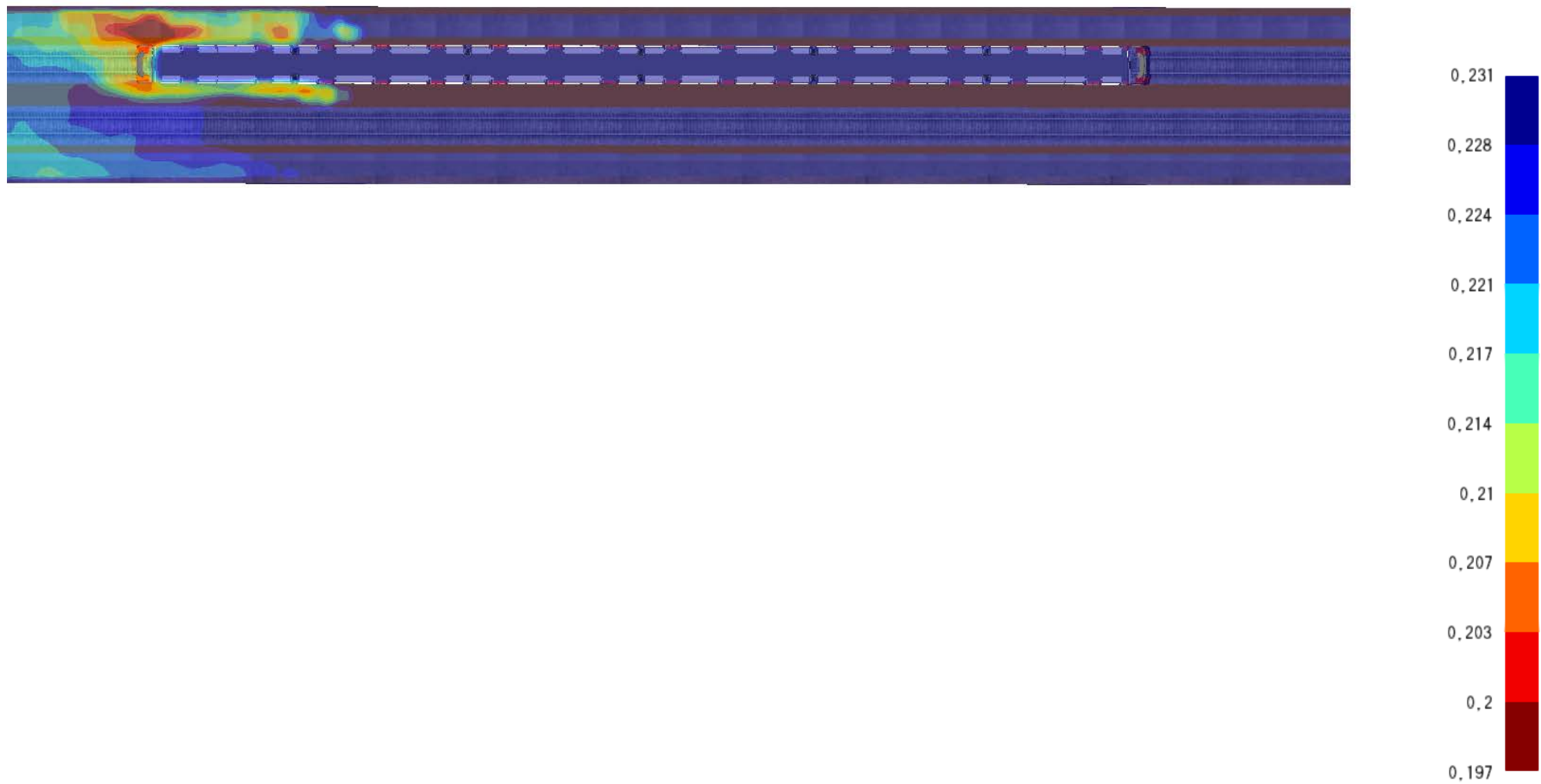
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

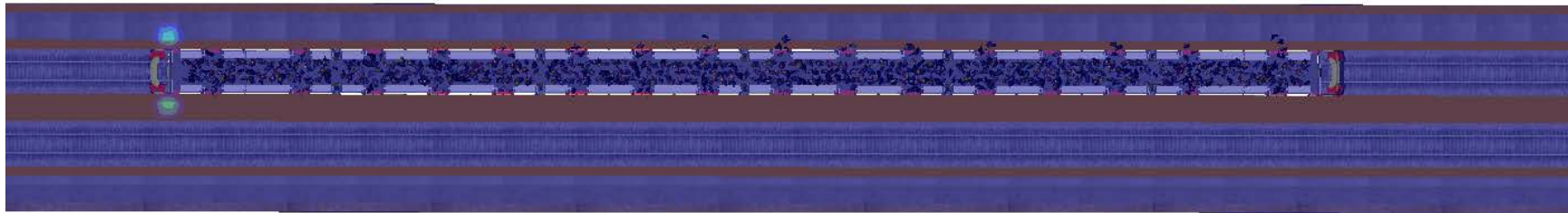


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

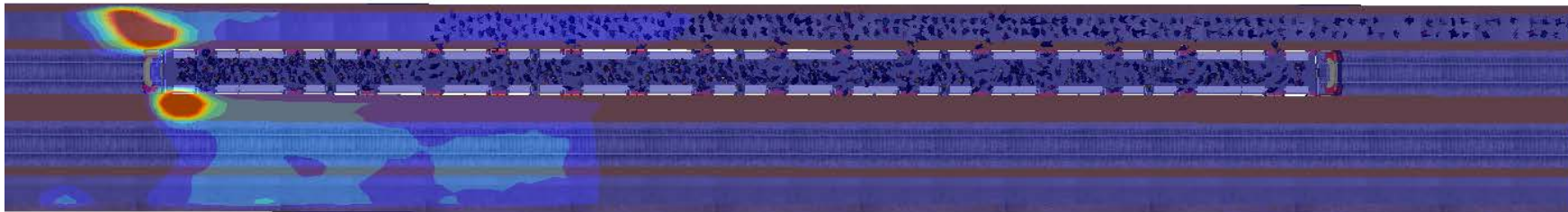


7.4.4.5. Análisis de la concentración de monóxido de carbono a 2 metros sobre la vía de evacuación

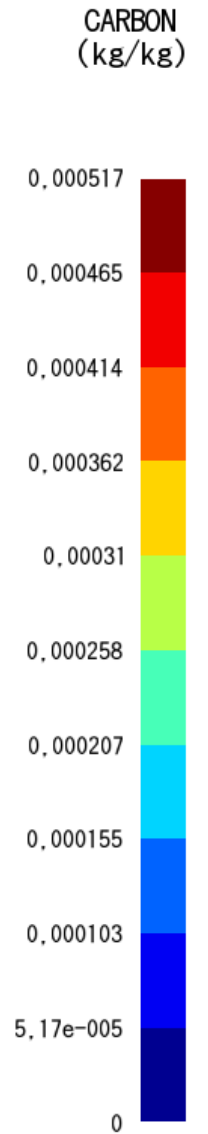
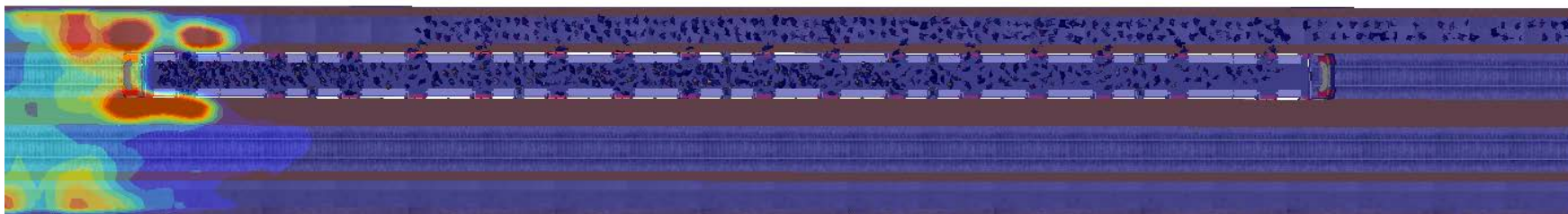
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Se aprecia una aumento de la concentración de CO, sin llegar a ser peligrosa.

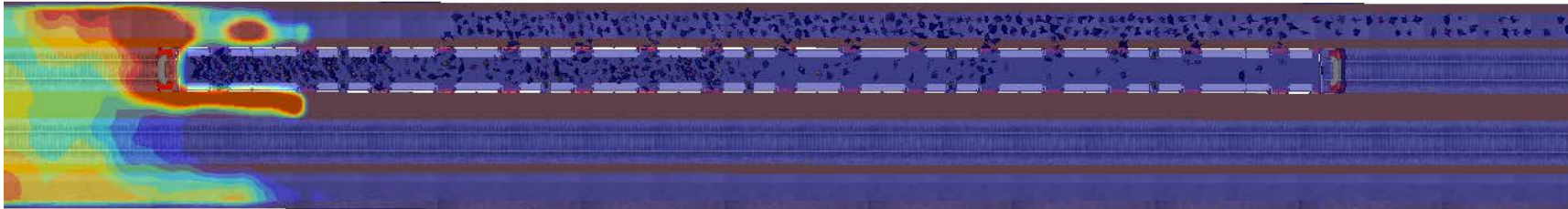


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia como desaparece la concentración de CO.



Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

T=300 segundos. El backlayering es controlado.



CARBON
(kg/kg)

0,000517

0,000465

0,000414

0,000362

0,00031

0,000258

0,000207

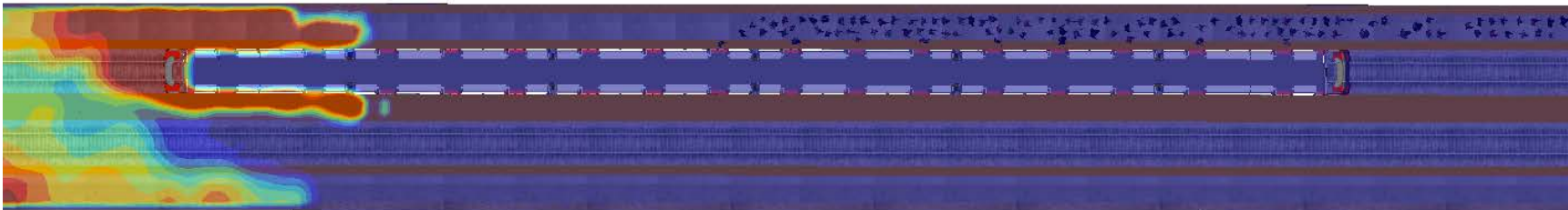
0,000155

0,000103

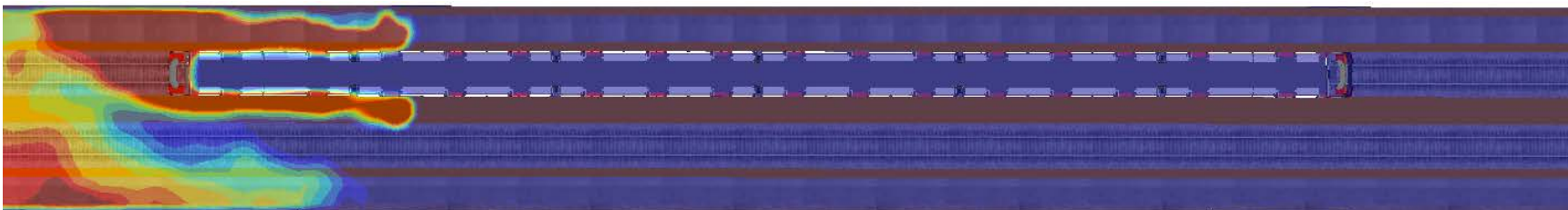
5,17e-005

0

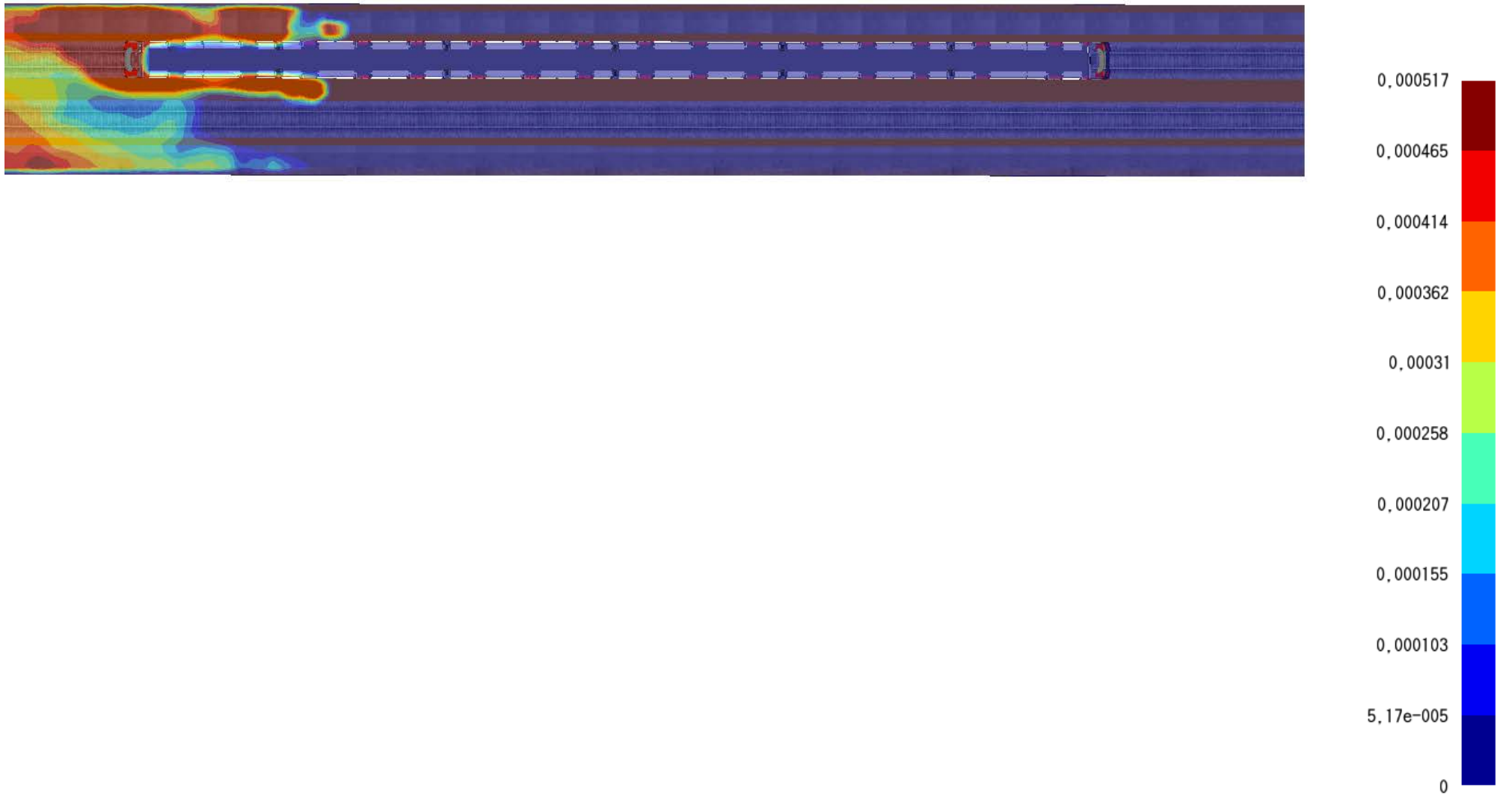
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

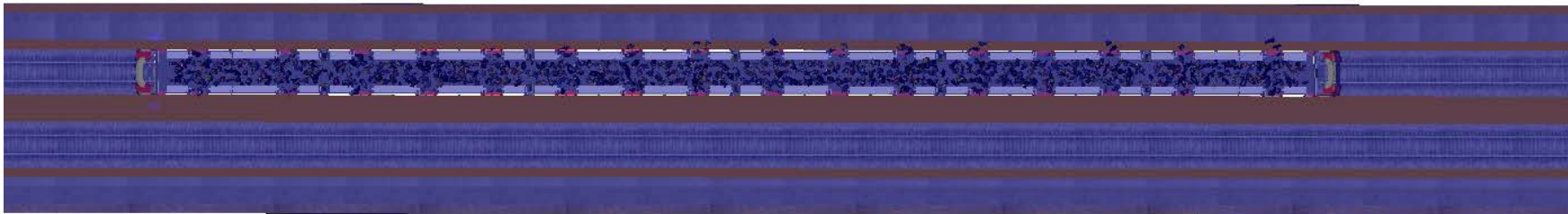


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

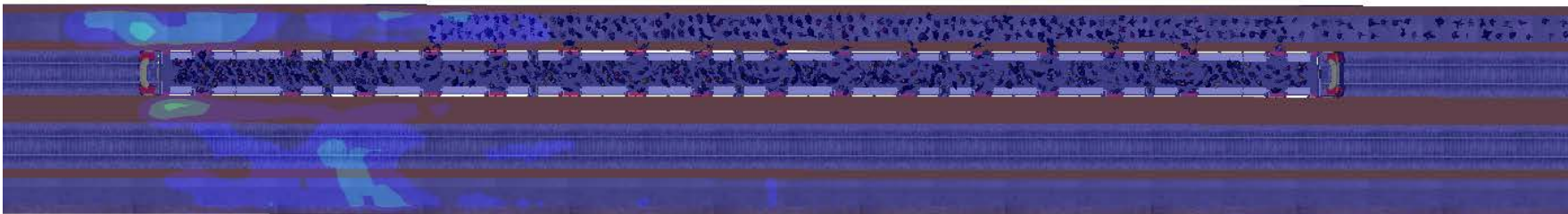


7.4.4.6. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre la vía de evacuación

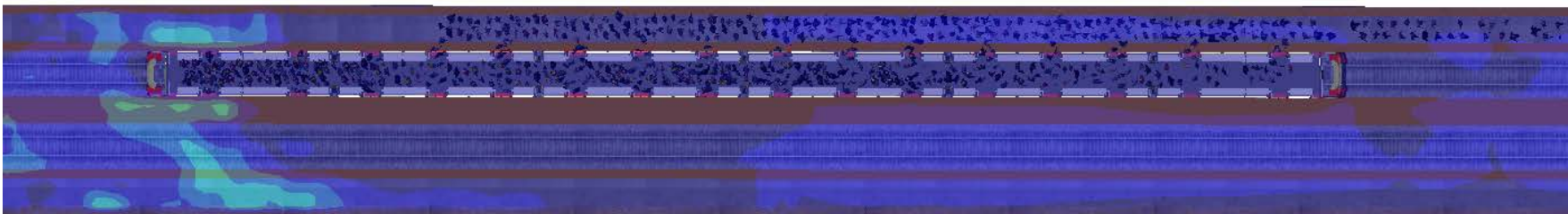
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



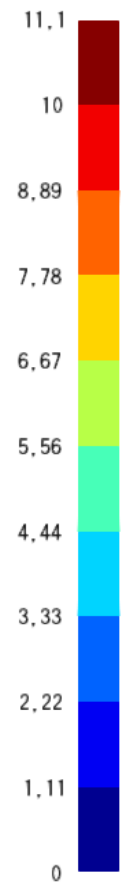
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



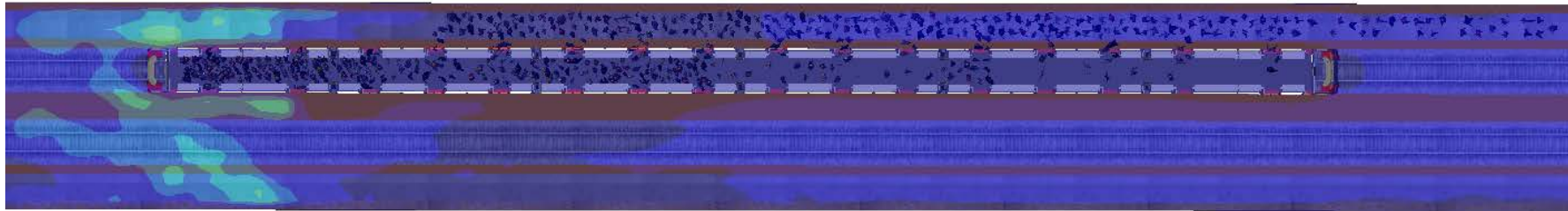
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia un incremento en la velocidad del aire del túnel.



VELOCITY
(m/s)



T=300 segundos. El backlayering es controlado.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

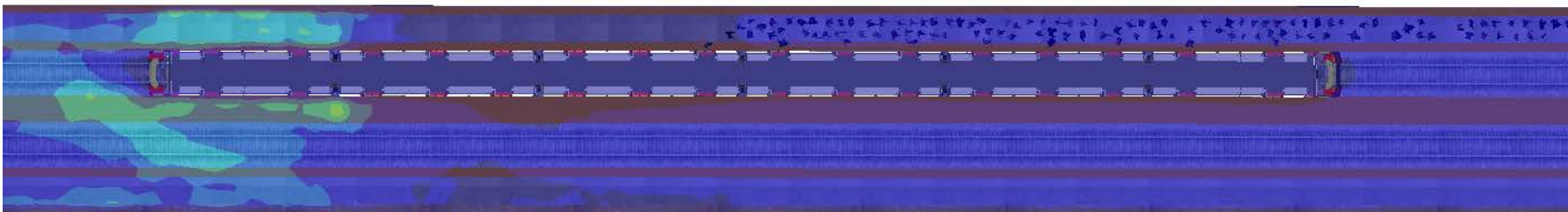
3,33

2,22

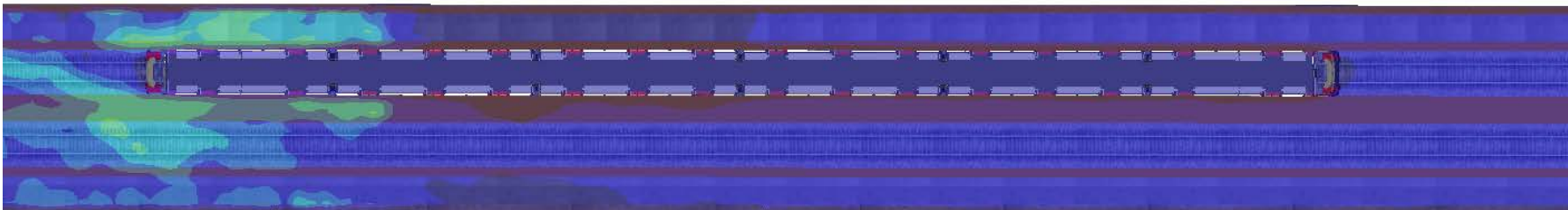
1,11

0

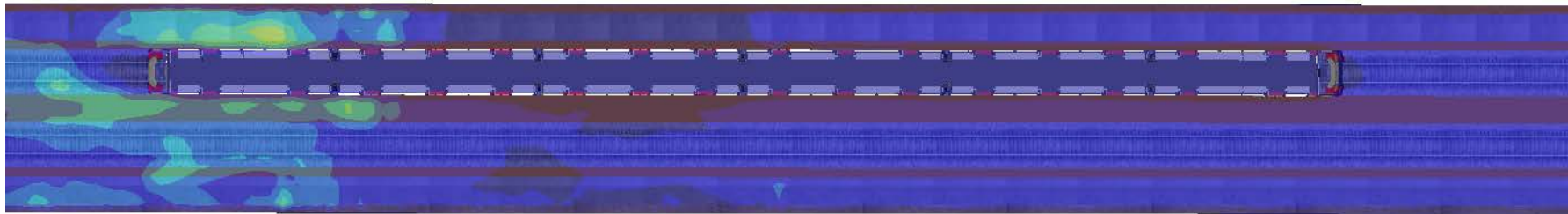
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



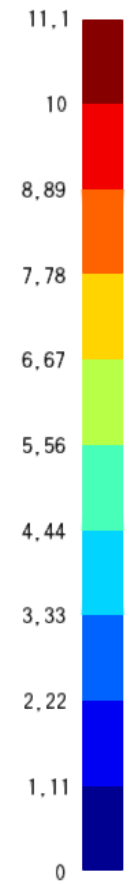
T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



VELOCITY
(m/s)



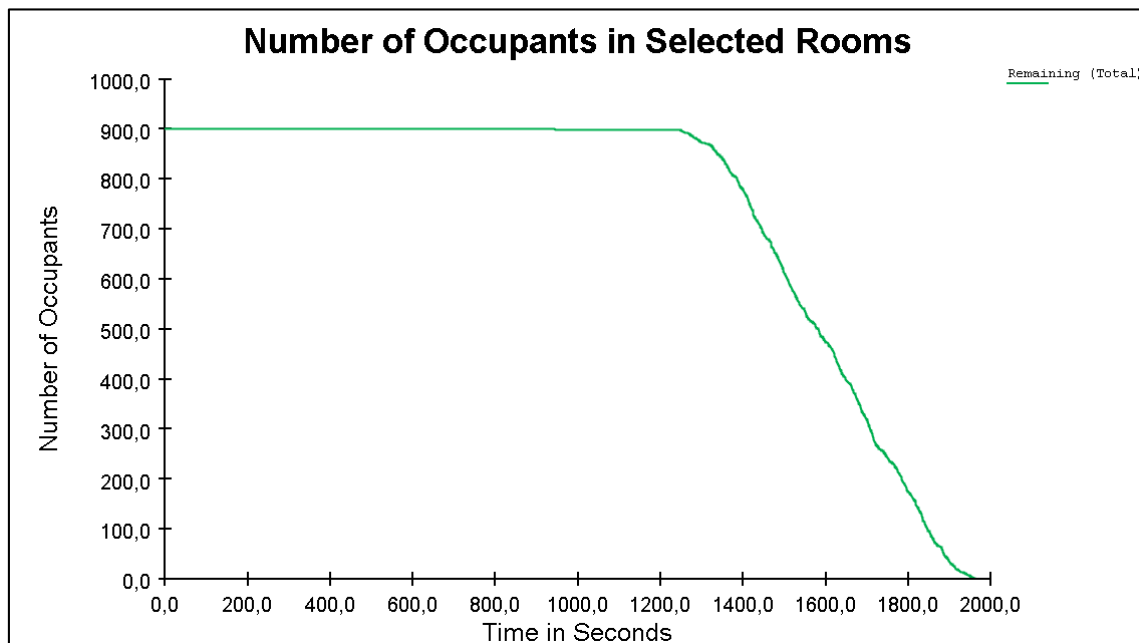
7.4.4.7. Análisis de la evacuación

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar en 1961,9 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI 4
Ocupantes totales	900
Tiempos de salida	
Mínimo:	944,4 s
Máximo	1961,9 s
Media:	1611,8 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	1012,6 m
Máximo	1101,5 m
Media:	1056,0 m

Tabla 48. Sumario de simulación de evacuación EI4

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.

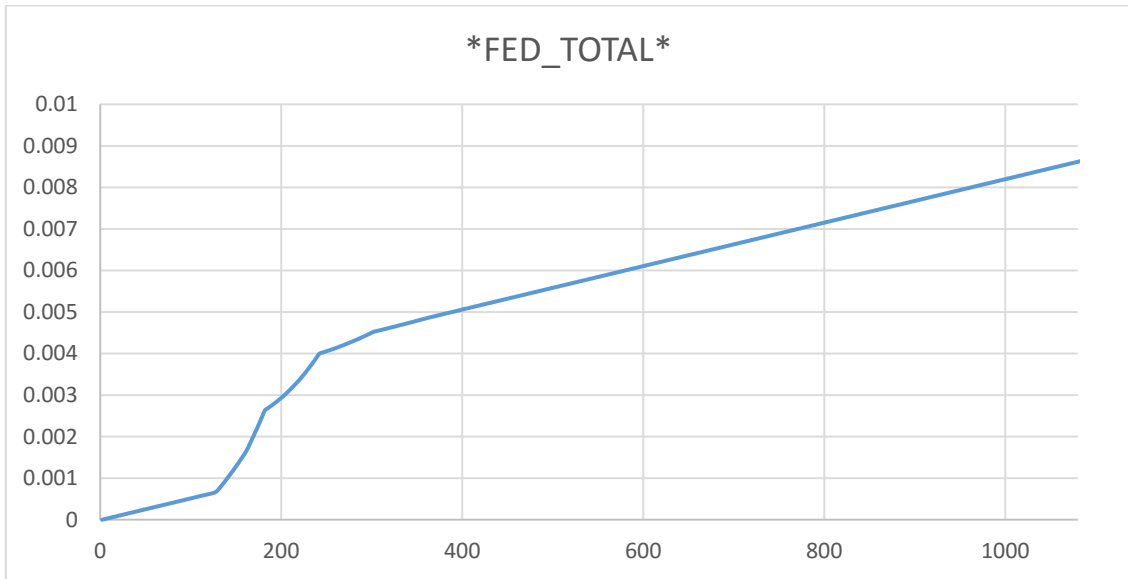


Gráfica 38. Evolución de la ocupación del túnel en EI4.

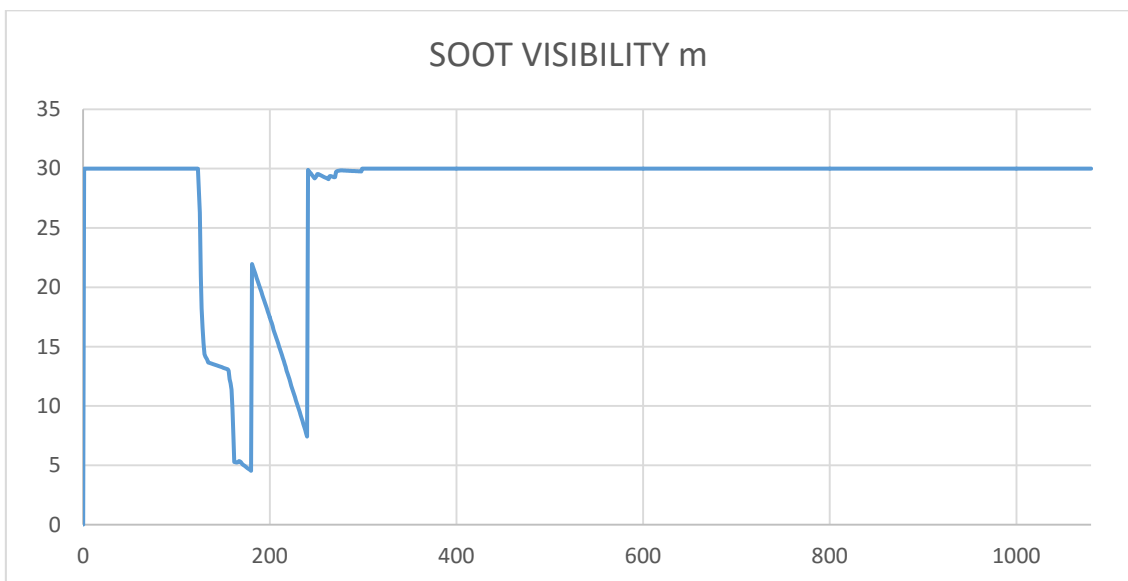
Como se ha podido ver cuándo se ha analizado la visibilidad hasta que debido al tiempo que tarda el sistema de ventilación en ponerse en marcha, alcanzar el régimen permanente y vencer las cargas presentes existe un periodo de tiempo en torno al instante $T=125$ segundos durante los cuales existe una zona con visibilidad inferior a 10 metros.

Para comprobar que la evacuación es posible se ha analizado aquellos ocupantes que se han visto expuestos a esta eventual situación para analizar el FED.

En la siguiente gráfica se muestra la visibilidad y el FED en función del tiempo a los cuales se ven sometidos estos ocupantes:



Gráfica 39. Evolución del FED de un ocupante expuesto al humo.



Gráfica 40. Evolución de la visibilidad de un ocupante expuesto al humo.

Como puede verse la exposición al humo genera un rápido incremento del FED, sin embargo globalmente el valor de FED alcanzado debido a la duración de la exposición es mucho menor del valor límite de FED=0.3

Por otra parte se adjuntan imágenes del proceso de evacuación de los ocupantes que se dirigen hacia la estación. Para ello emplean la acera de evacuación desde la ubicación del hasta el punto de conexión entre el túnel y la estación.



Figura 204. Ocupantes dirigiéndose a la estación a través de la acera por donde discurre la vía de evacuación.



Figura 205. Encuentro entre túnel y estación. Los ocupantes bajan de la acera a la plataforma del de la vía.

Para subir al andén, a cada lado de este existen un par de escaleras. En la imagen se aprecia los ocupantes subiendo al andén a través de la escalera izquierda.



Figura 206. Ocupantes subiendo al andén de la estación.



Figura 207. Ocupantes subiendo por la escalera derecha de acceso al andén.

El acceso a la calle se realiza a través de una escalera central y dos escaleras mecánicas que en situación de emergencia se desactivan funcionando como escaleras normales.



Figura 208. Ocupantes subiendo al hall de la estación de metro.

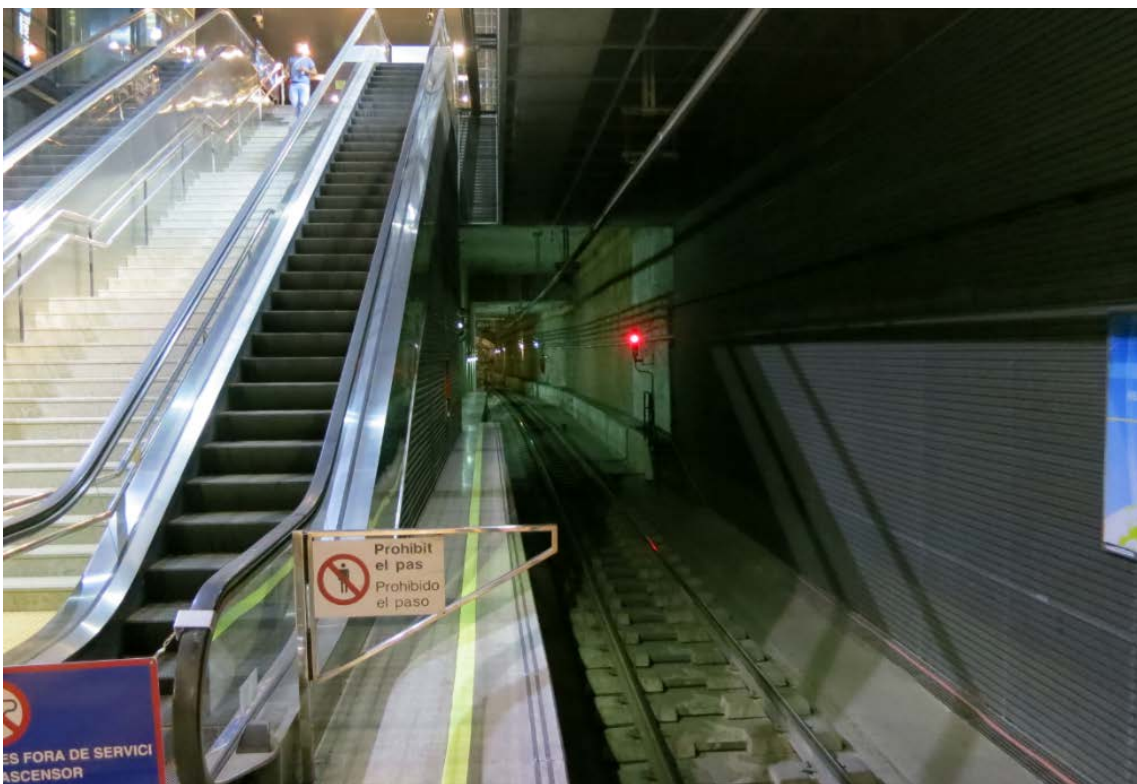


Figura 209. Fotografía real de la estación de metro.

Una vez llegado a la calle se considera que los ocupantes han llegado a zona segura.

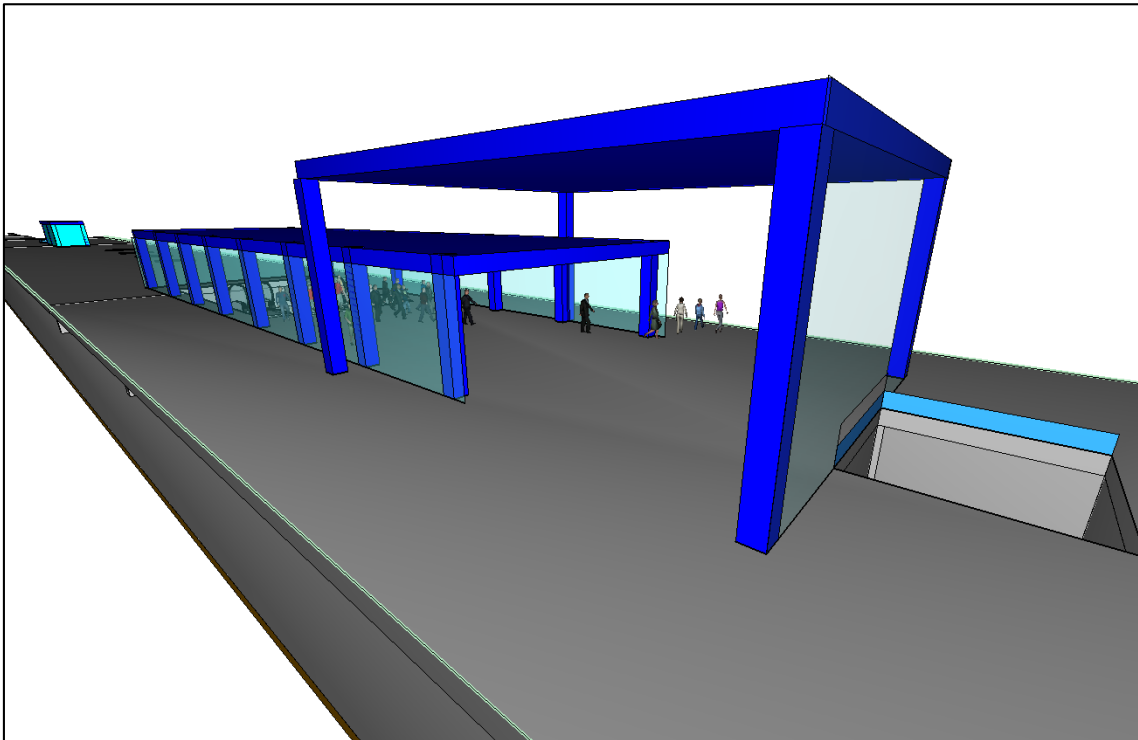


Figura 210. Ocupantes llegando al espacio exterior seguro.

7.4.4.8. Conclusión del Escenario de Incendio 4

A través de la simulación se ha comprobado que el tiempo necesario para realizar una evacuación en condiciones de seguridad es de 1961,9 segundos (**RSET=1961,9 segundos**).

Por otra parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio. Si llegado a este punto el sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering se puede asumir que el **ASET es ilimitado**.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.1 de la meta Seguridad de Vida tal que **ASET>RSET**.

Partiendo de la misma consideración de que parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio, se asume que el ASRT es ilimitado y por tanto mayor de 60 minutos.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.2 de la meta Seguridad de vida tal que **ASRT>60'**.

Puesto que se cumplen todos los objetivos de la meta Seguridad de Vida, queda validado el Escenario de Incendio 1

A continuación a través de una tabla resumen se comprueba si se han verificado los objetivos de la meta Seguridad de Vida a través del estudio de los objetivos ASET>RSET y mediante la comprobación del que ASRT>60 minutos.

Objetivo	Criterio	Verificación del criterio de aceptación
ASET>RSET	[O ₂]>18%	Cumple
	[CO]<450 ppm	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple
	Temperatura < 60°C	Cumple
	Velocidad del aire < 10 m/s	Cumple
ASRT>60'	ASET ilimitado	Cumple

Tabla 49. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

7.4.5. Escenario de incendio EI 5

En este escenario de incendio el tren está entrando por el túnel quedando parado a los 1.150 metros del portal PK= 1+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia la estación y la evacuación se realiza hacia el portal del túnel.

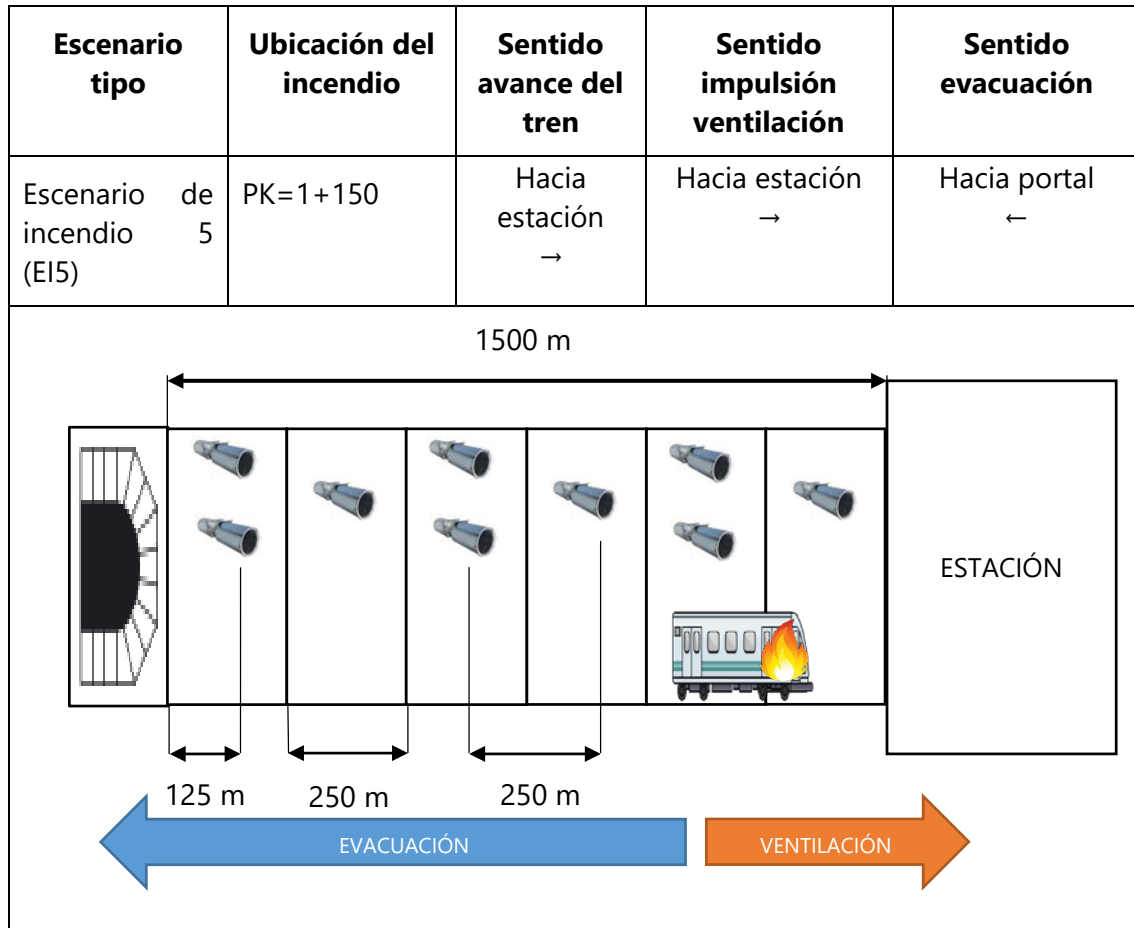
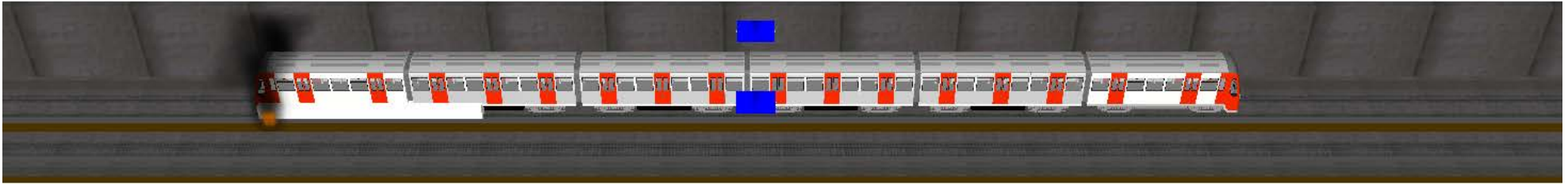


Figura 211. Cuadro resumen del escenario de incendio 5 EI5

7.4.5.1. Análisis del backlayering

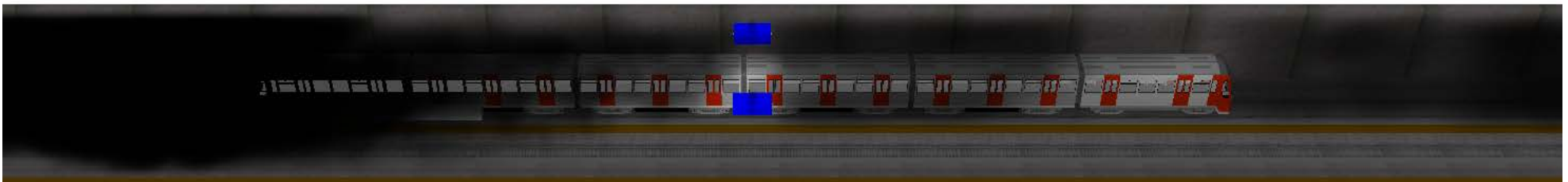
T=5 segundos. Comienza el incendio



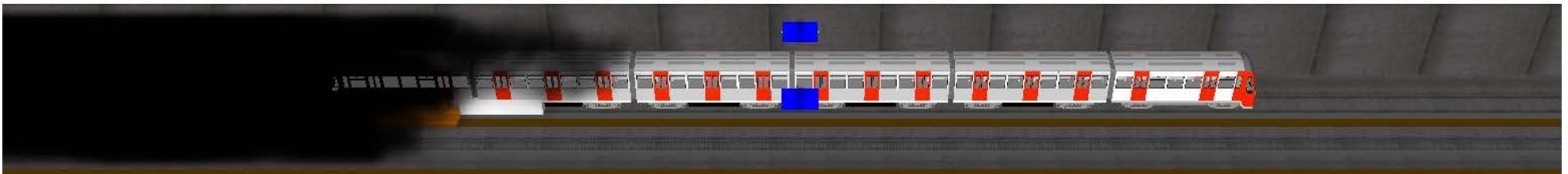
T=125 segundos. Debido al tiempo en que tarda en ponerse en marcha el sistema de ventilación se aprecia un avance del humo.



T=200 segundos. Gracias al sistema de ventilación se aprecia como desciende la densidad del humo en la zona de evacuación.

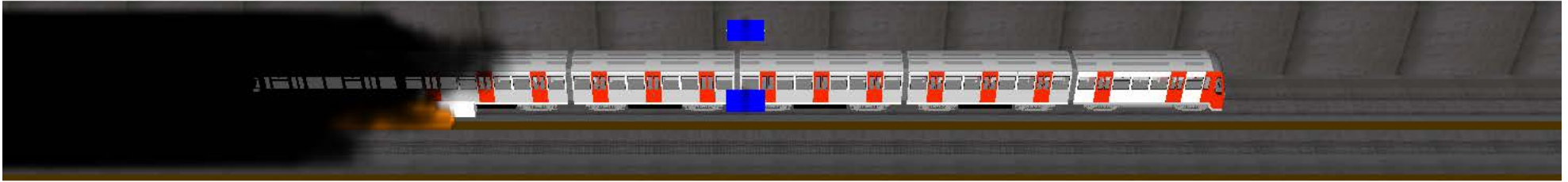


T=300 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.

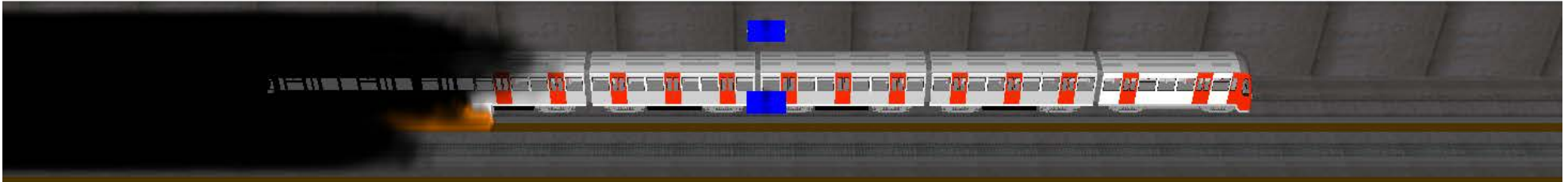


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

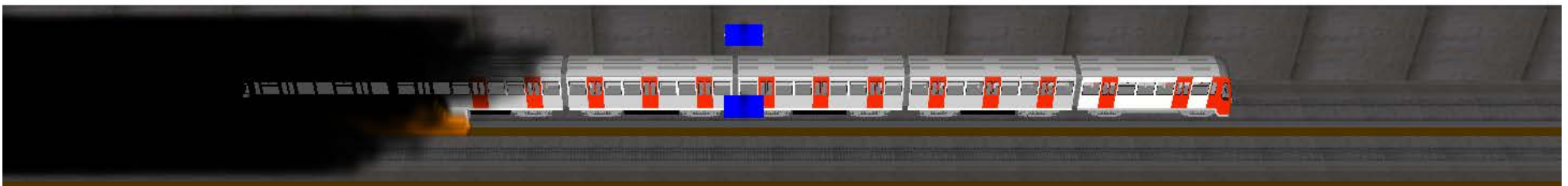
T=600 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



T=720 segundos. Se alcanza la potencia máxima del incendio. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.

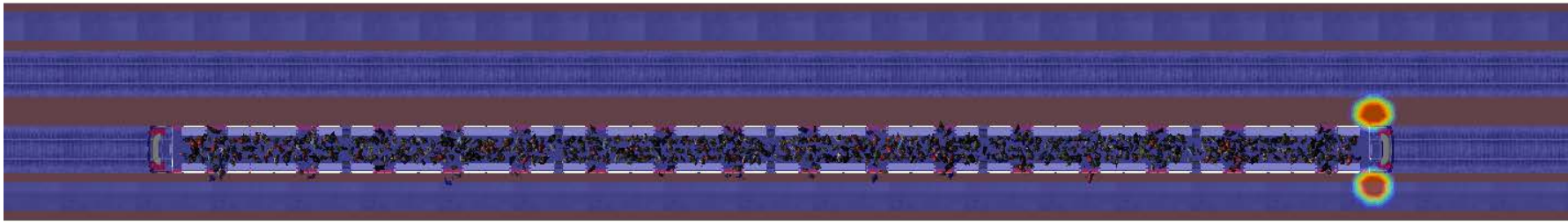


T=1080 segundos. El incendio comienza a decaer.

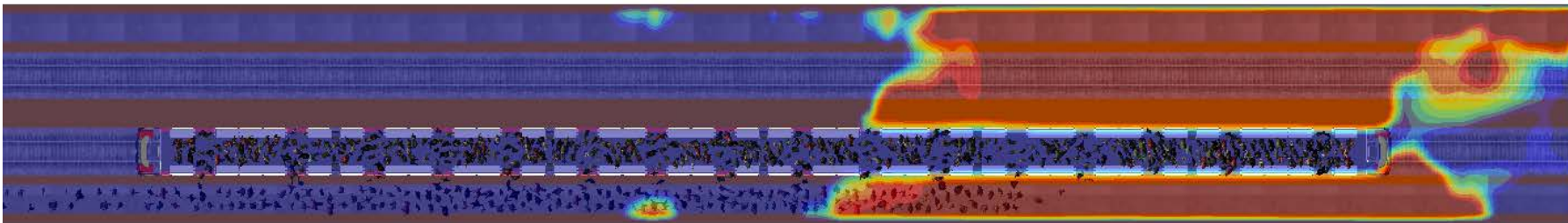


7.4.5.2. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre la vía de evacuación

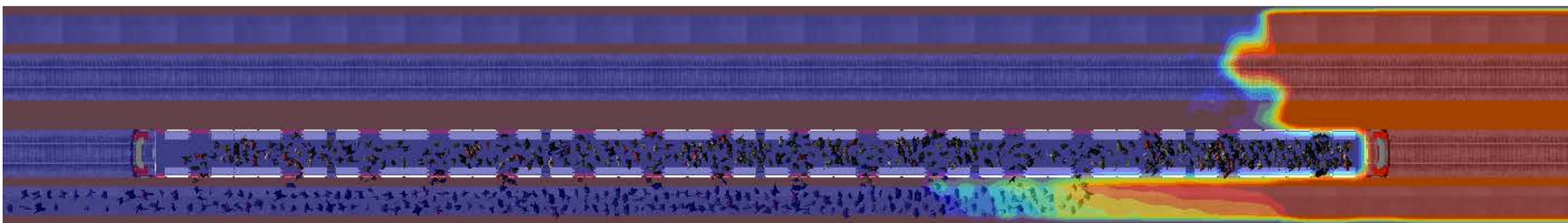
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



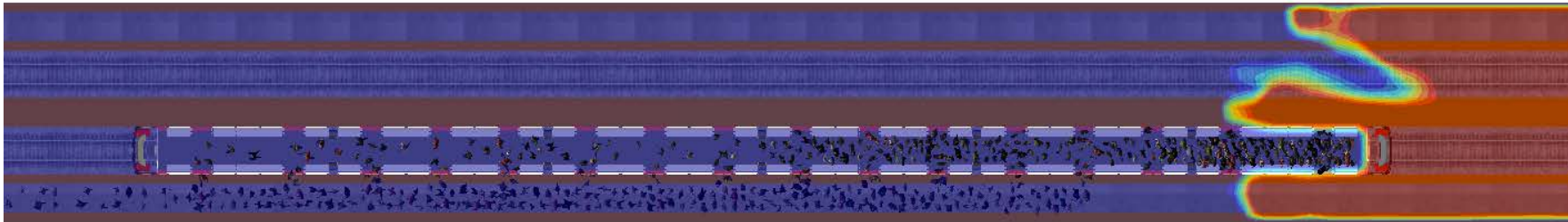
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



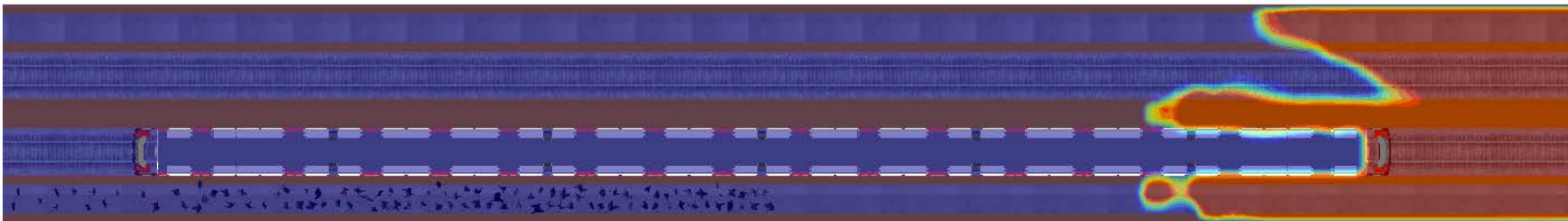
SOOT
(m)



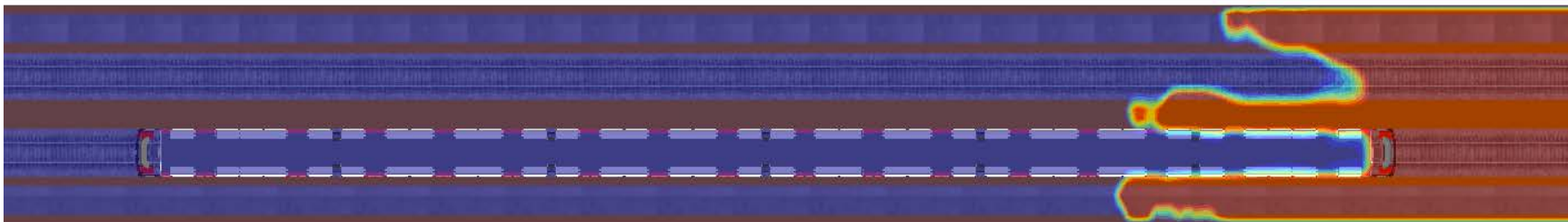
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



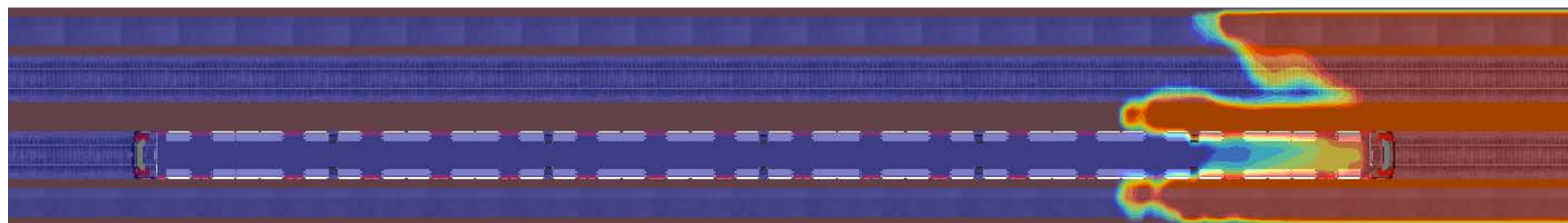
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

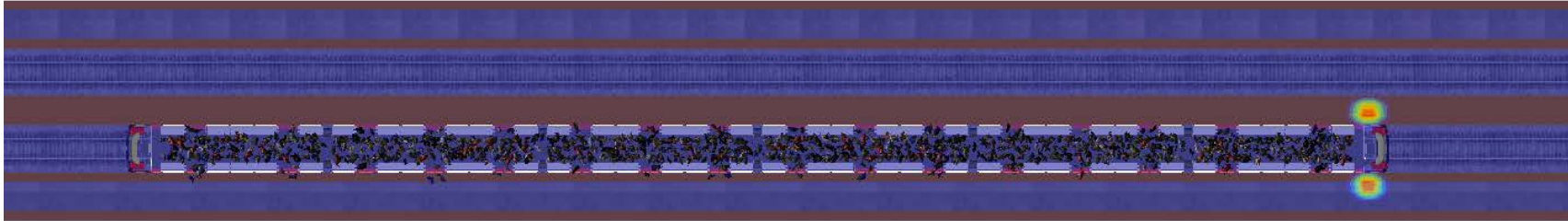


SOOT
(m)

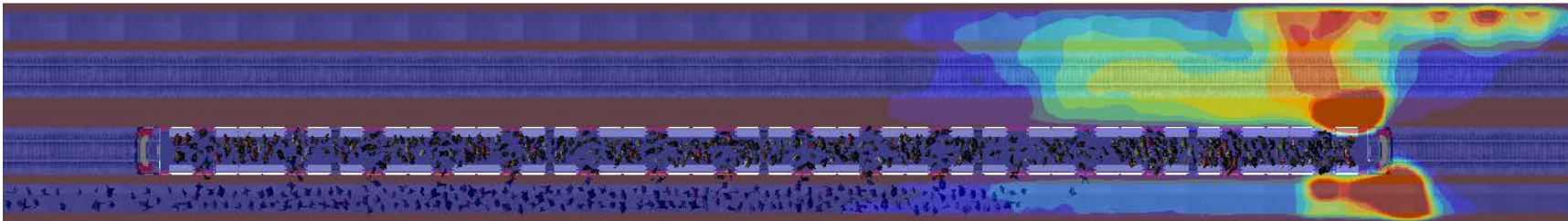


7.4.5.3. Análisis de temperatura a 2 metros sobre la vía de evacuación

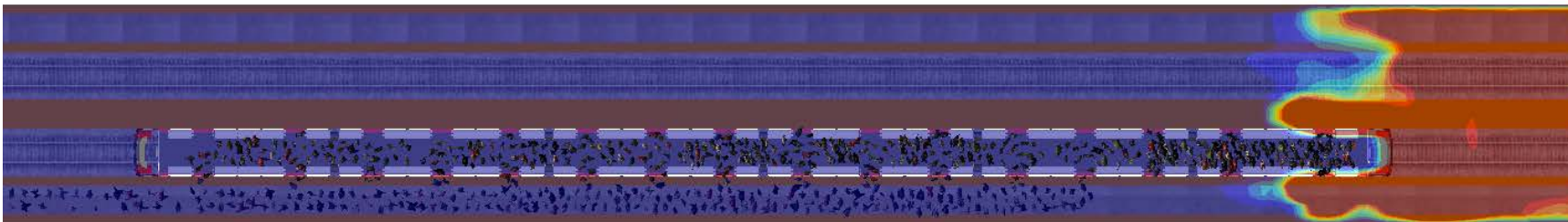
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Por ende se aprecia un ligero incremento de temperatura en la zona con humo.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering enfriando la zona previamente afectada.



TEMPERATURE
(C)

64,4

60

55,6

51,1

46,7

42,2

37,8

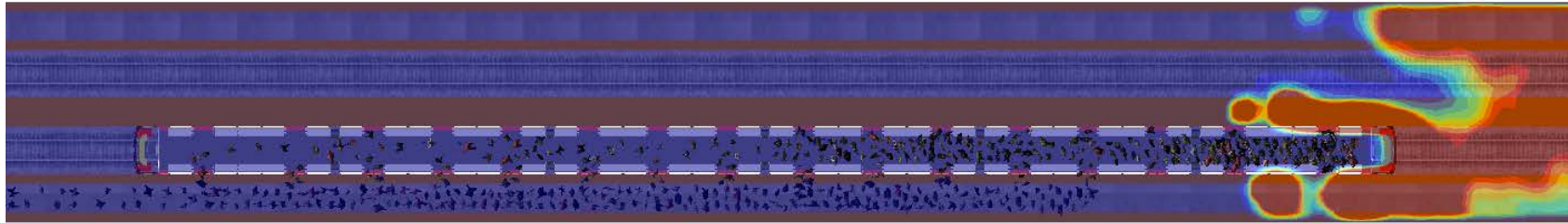
33,3

28,9

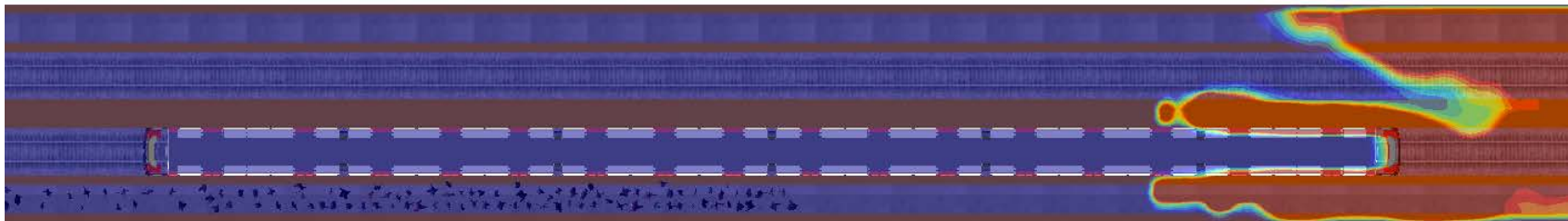
24,4

20

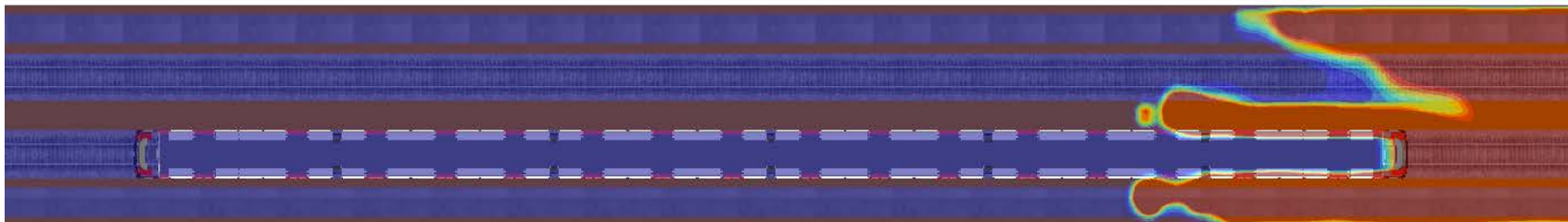
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



TEMPERATURE
(C)

64,4

60

55,6

51,1

46,7

42,2

37,8

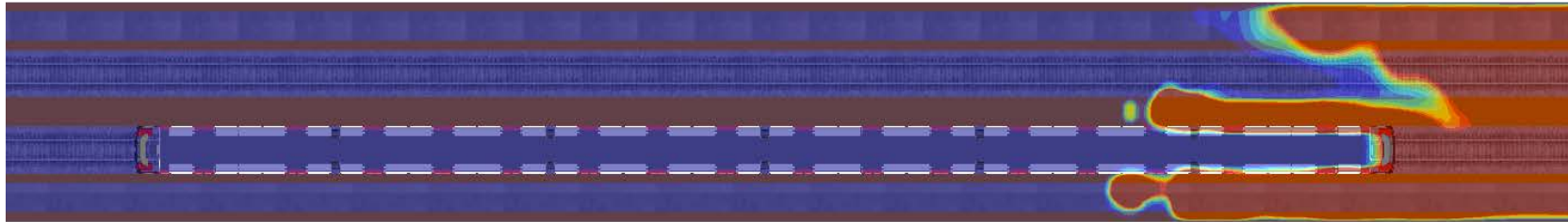
33,3

28,9

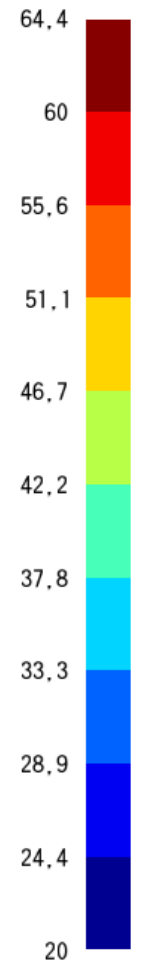
24,4

20

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

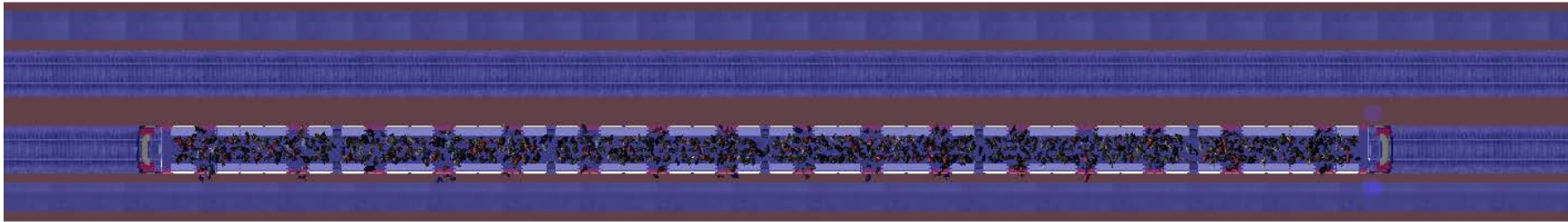


TEMPERATURE
(C)

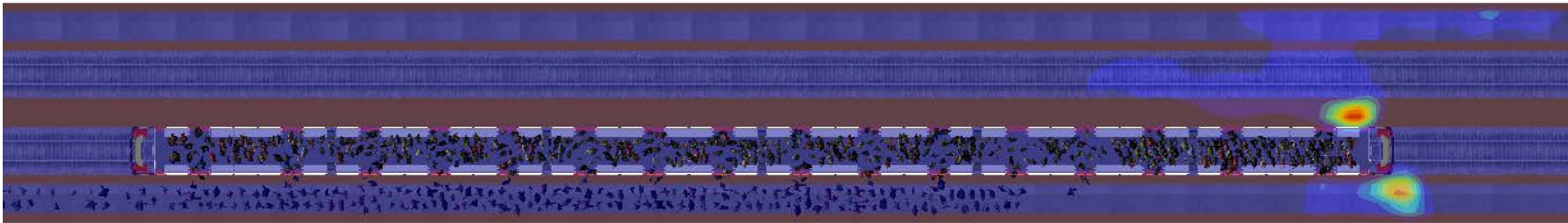


7.4.5.4. Análisis de la concentración de oxígeno a 2 metros sobre la vía de evacuación

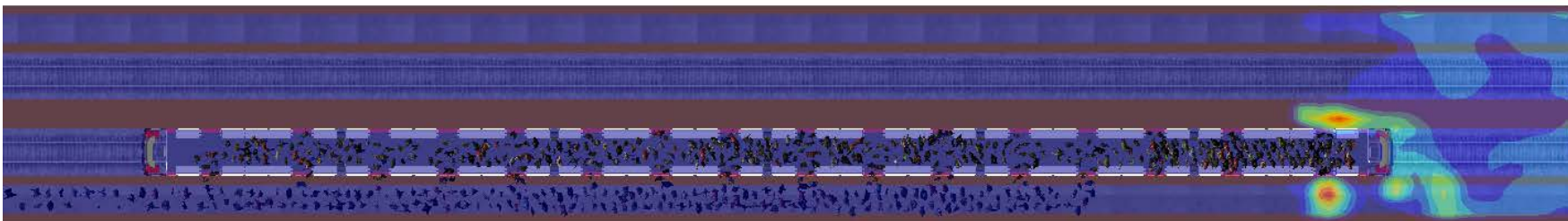
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Sin embargo no se ve disminuida la concentración de oxígeno.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.

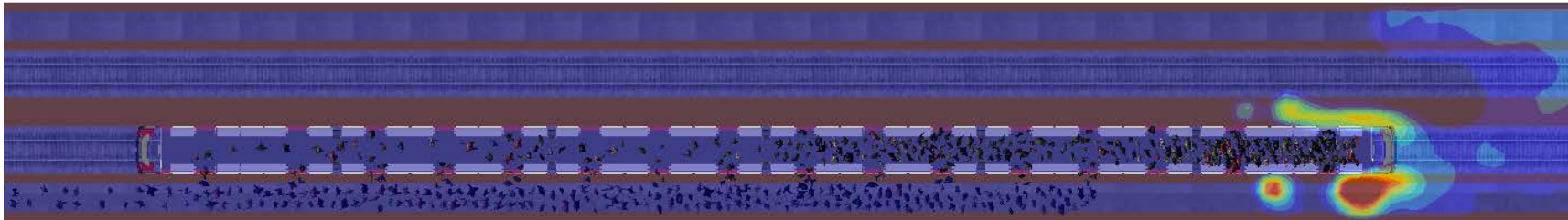


OXYGEN
(kg/kg)

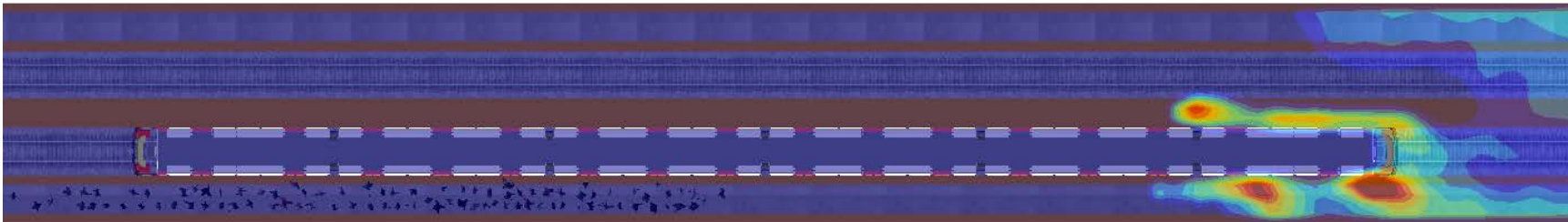


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

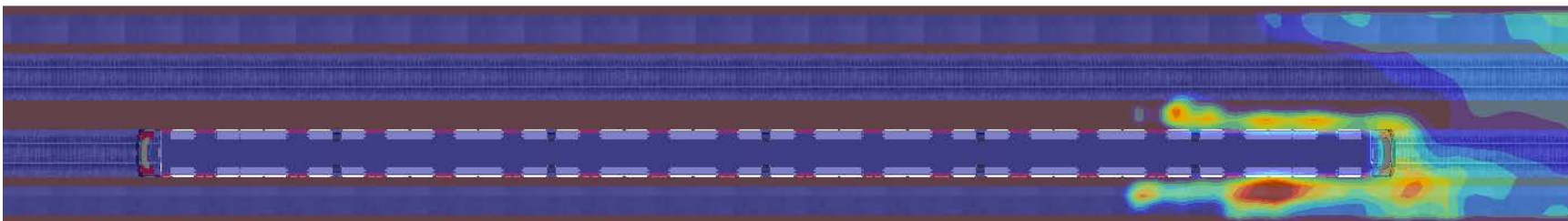
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



OXYGEN
(kg/kg)

0,231

0,228

0,224

0,221

0,217

0,214

0,21

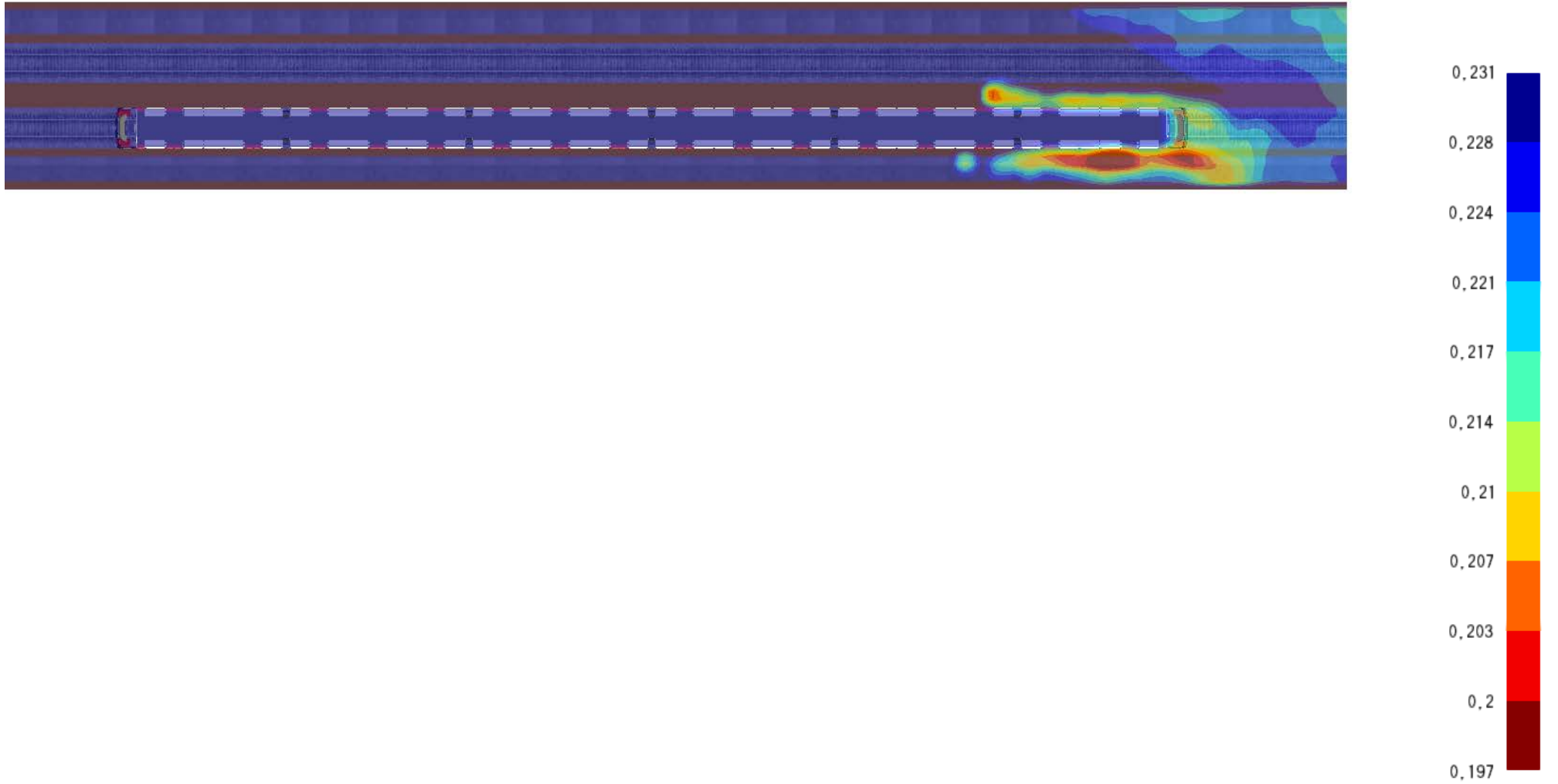
0,207

0,203

0,2

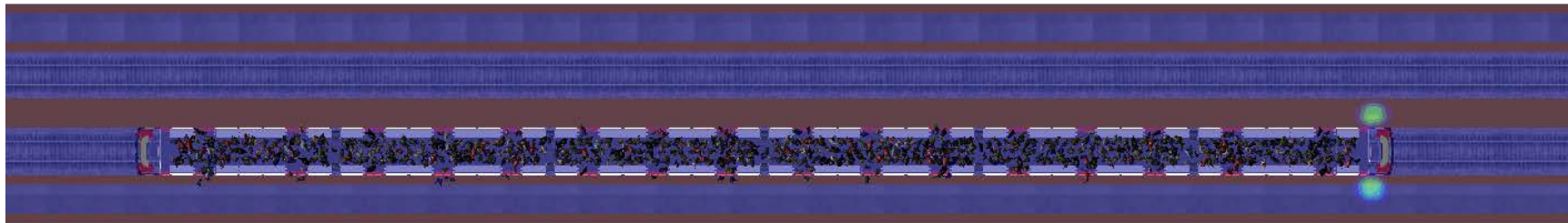
0,197

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

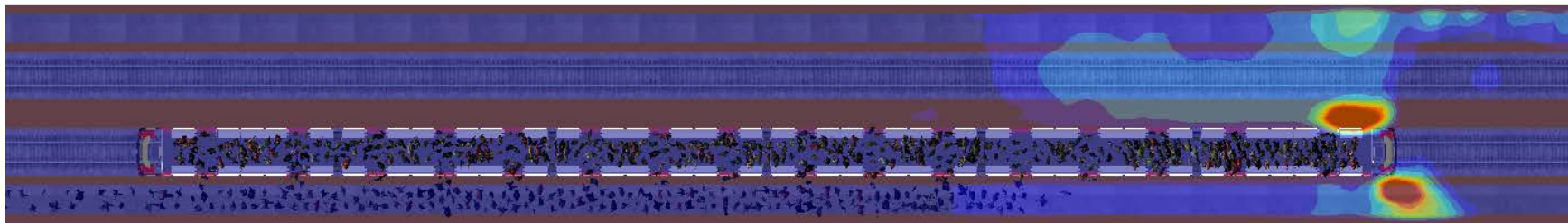


7.4.5.5. Análisis de la concentración de monóxido de carbono a 2 metros sobre la vía de evacuación

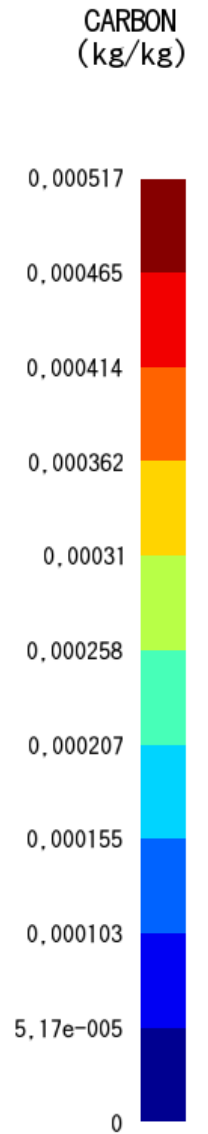
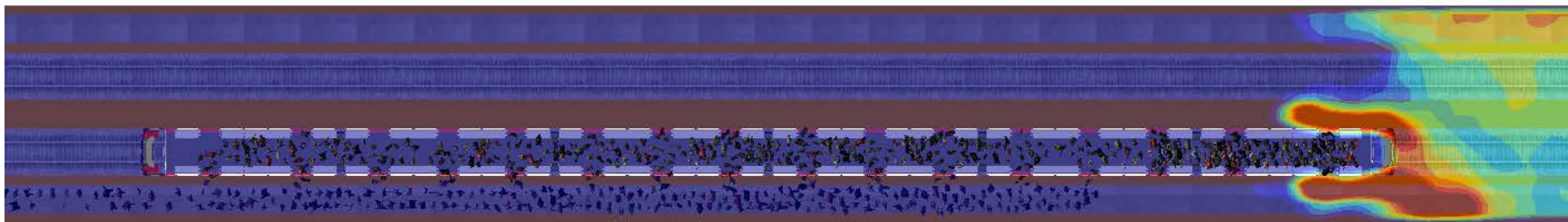
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



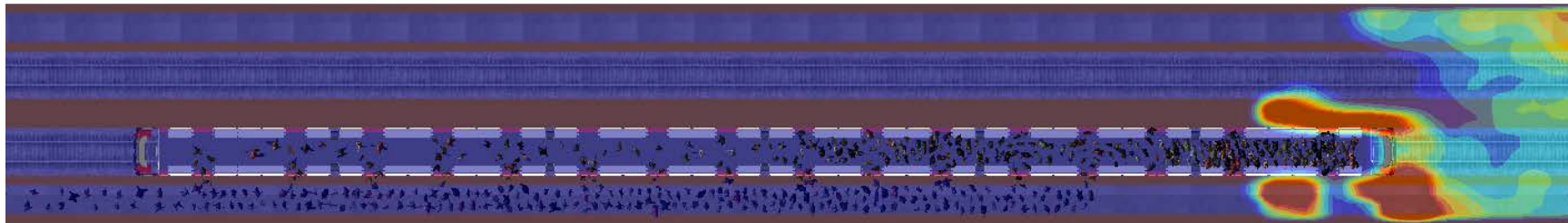
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Se aprecia un aumento de la concentración de CO, sin llegar a ser peligrosa.



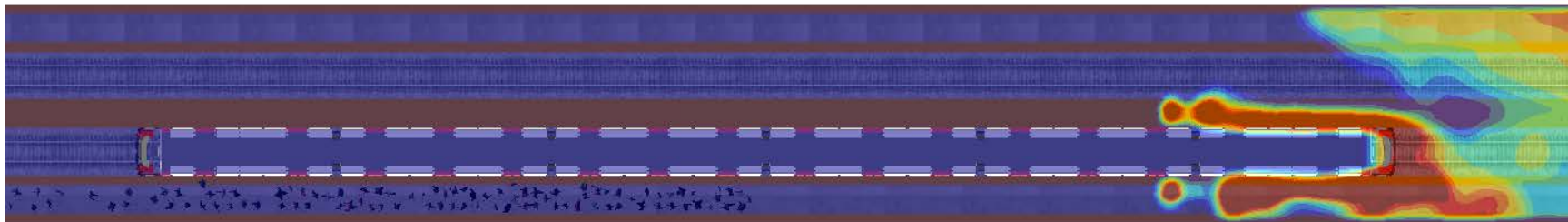
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia como desaparece la concentración de CO.



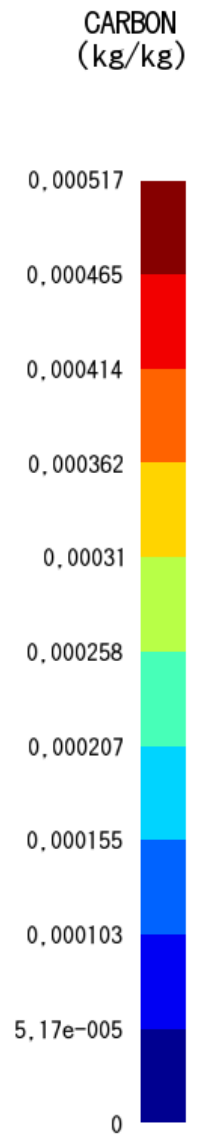
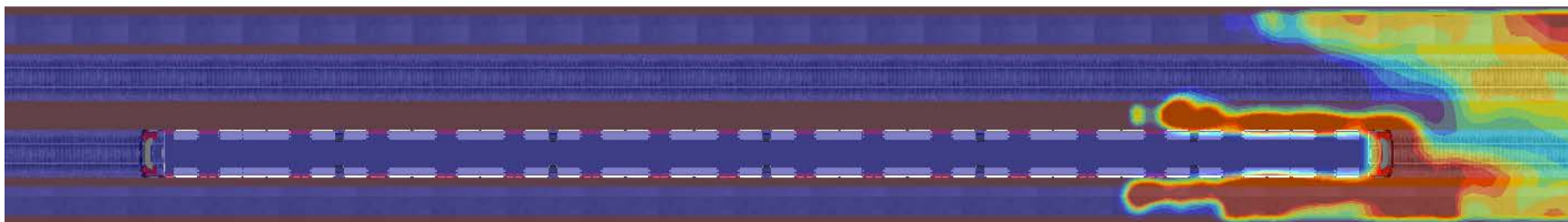
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



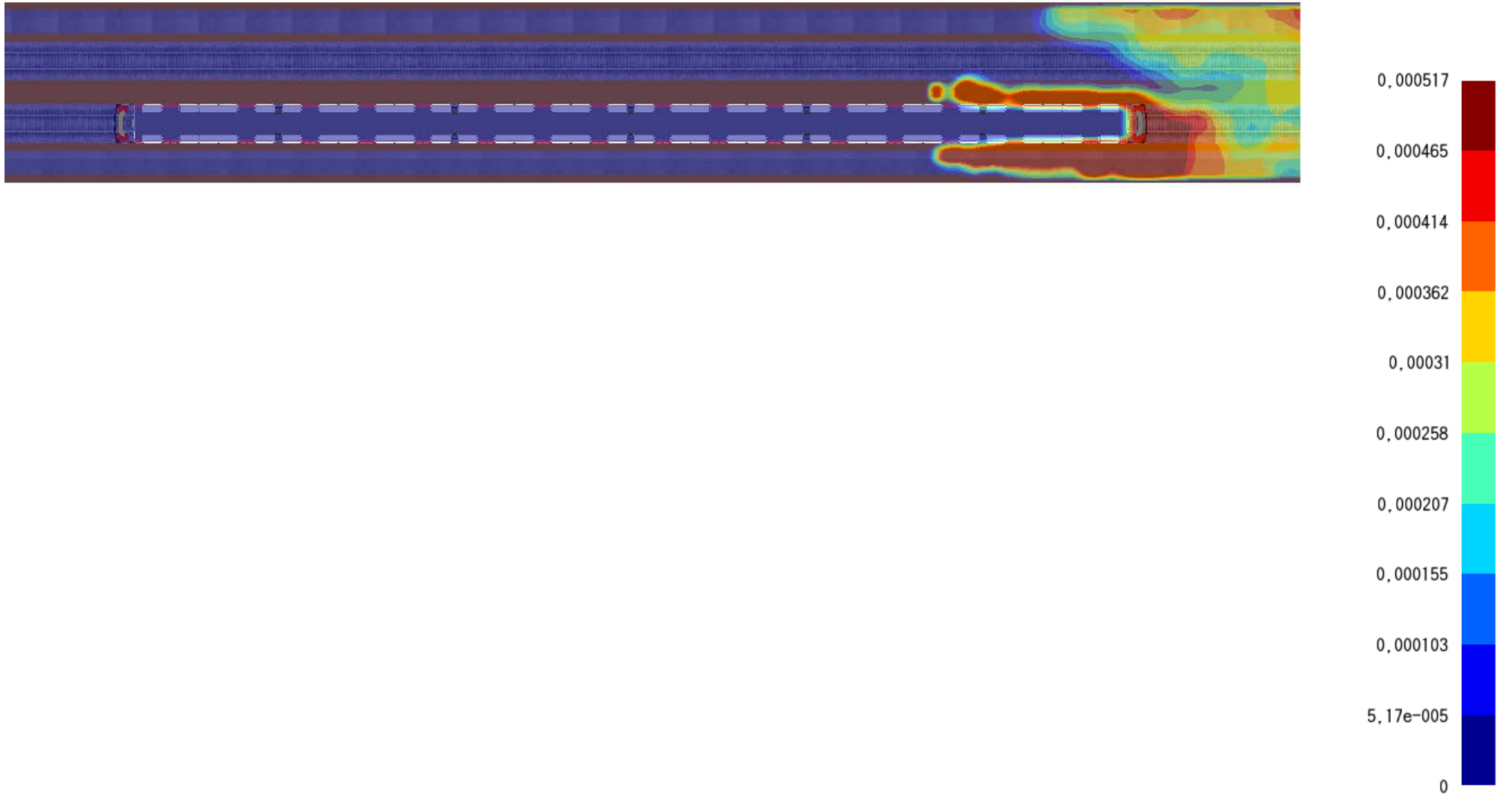
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

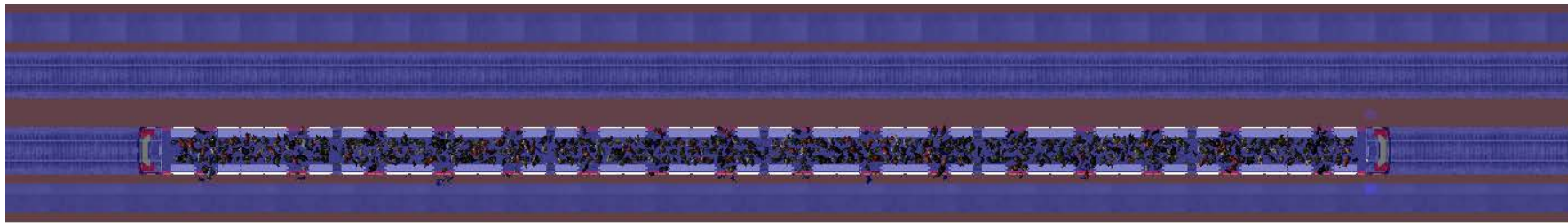


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

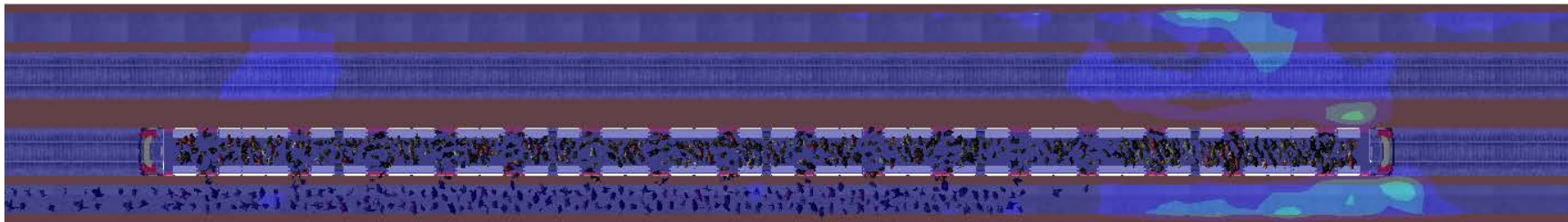


7.4.5.6. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre la vía de evacuación

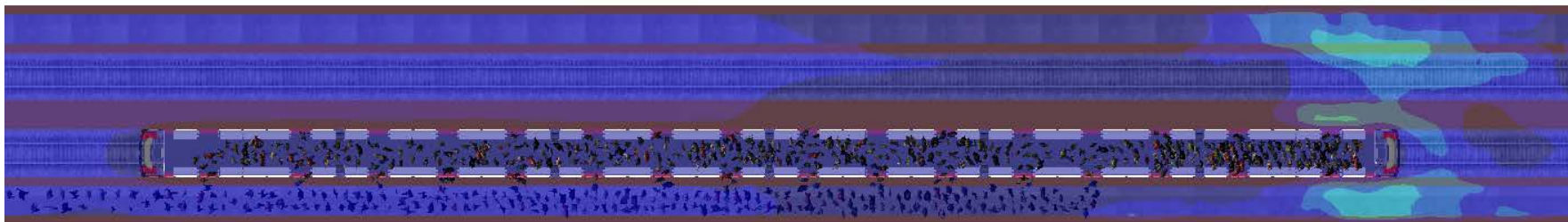
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



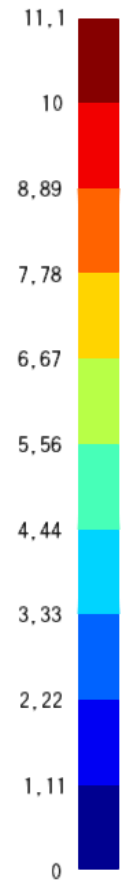
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia un incremento en la velocidad del aire del túnel.

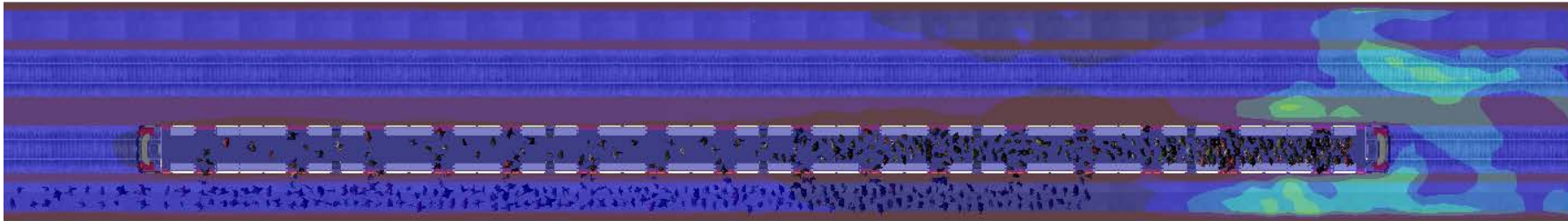


VELOCITY
(m/s)

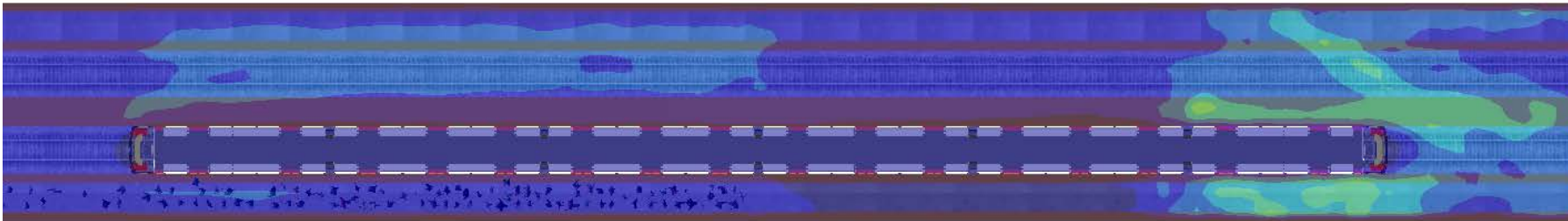


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

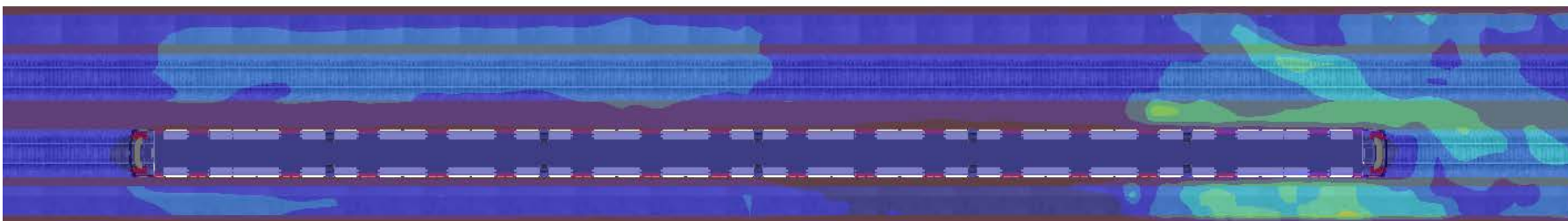
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

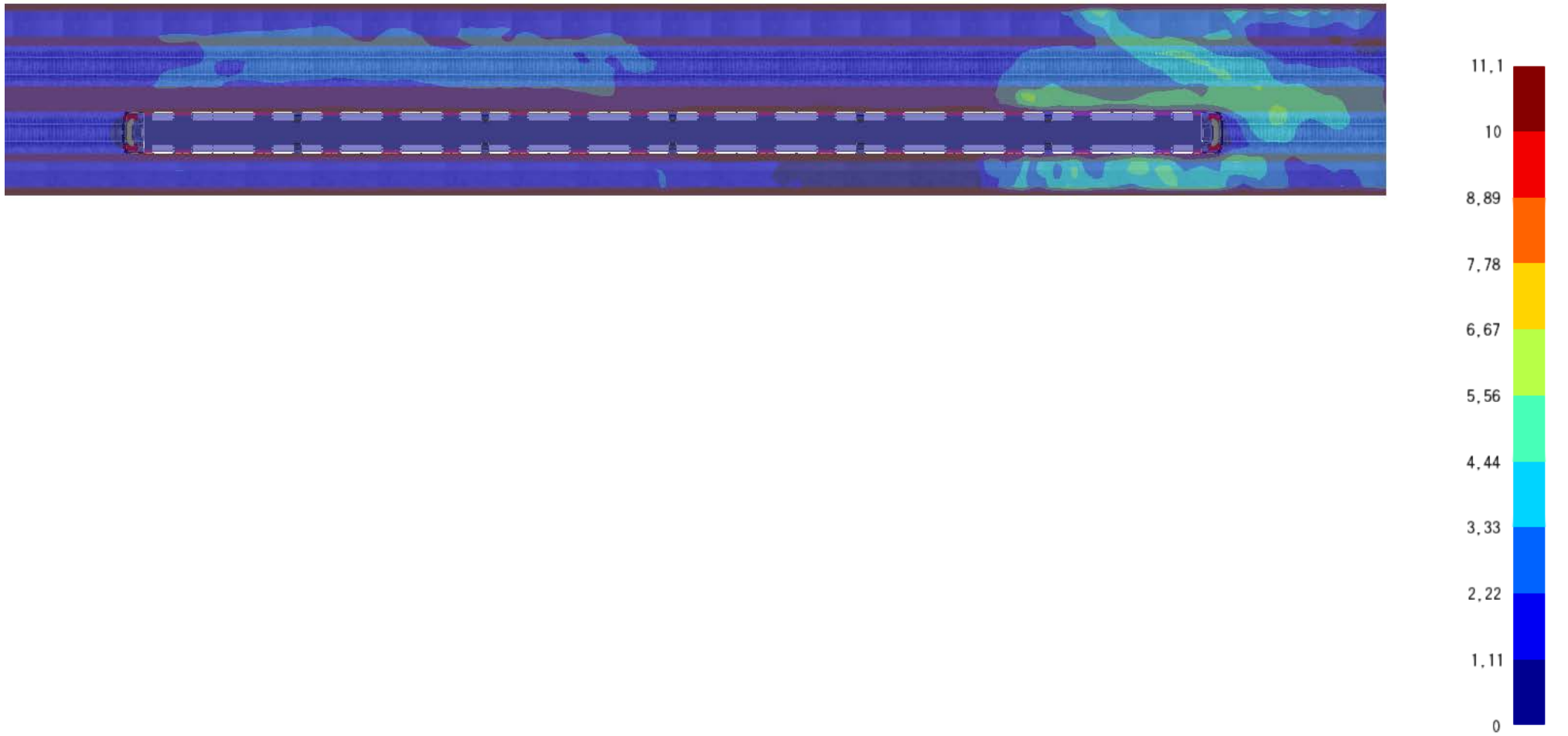
3,33

2,22

1,11

0

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



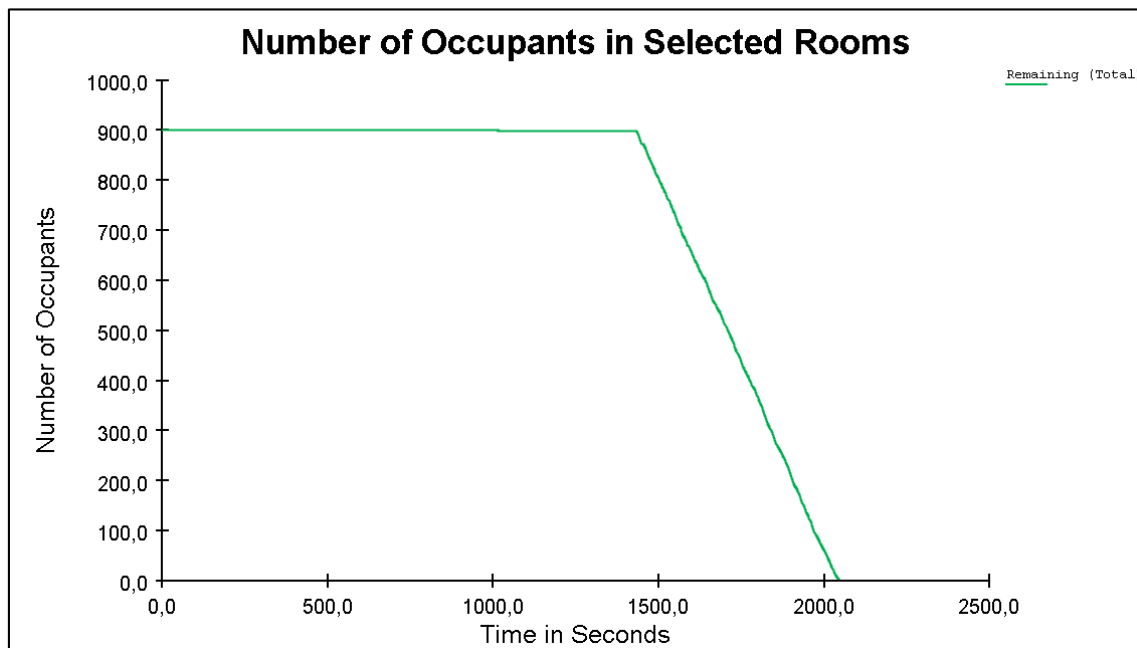
7.4.5.7. Análisis de la evacuación

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar en 2046,1 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI 5
Ocupantes totales	900
Tiempos de salida	
Mínimo:	1014,9 s
Máximo	2046,1 s
Media:	1738,3 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	1098,3 m
Máximo	1178,2 m
Media:	1135,0 m

Tabla 50. Sumario de simulación de evacuación EI5

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.

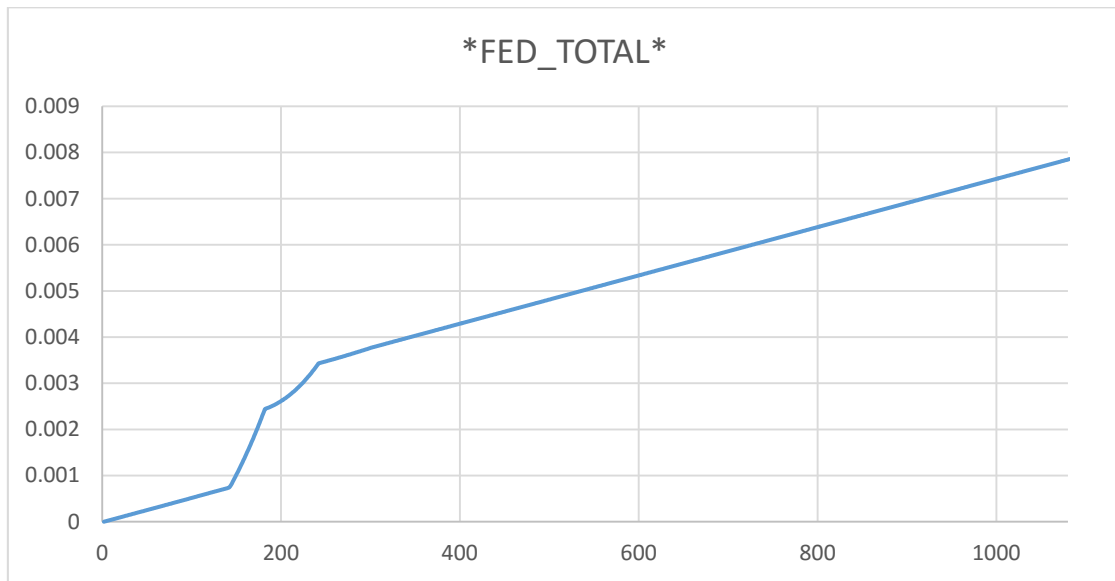


Gráfica 41. Evolución de la ocupación del túnel en EI5.

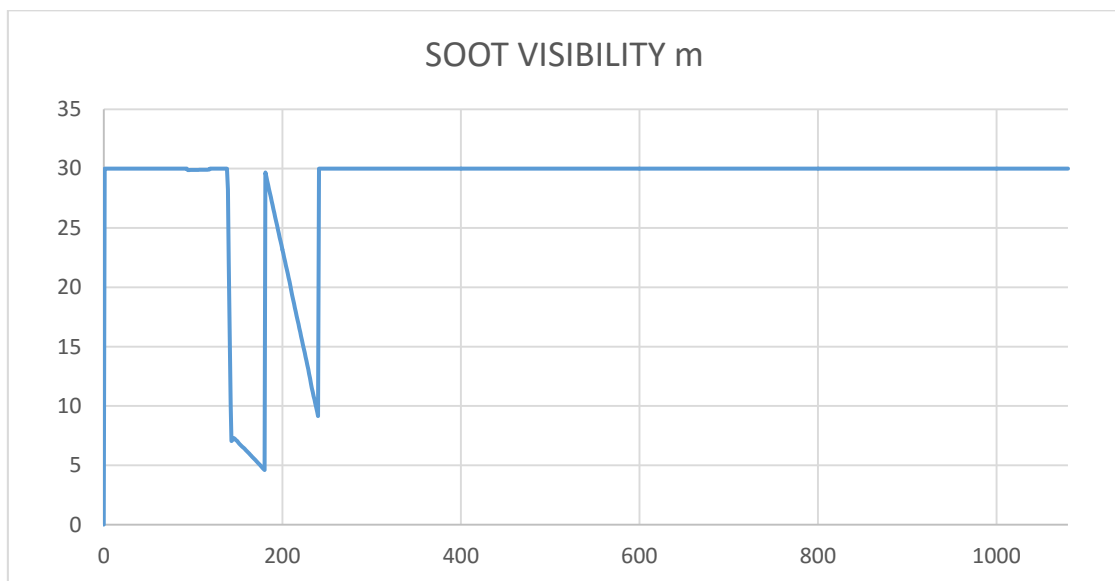
Como se ha podido ver cuándo se ha analizado la visibilidad hasta que debido al tiempo que tarda el sistema de ventilación en ponerse en marcha, alcanzar el régimen permanente y vencer las cargas presentes existe un periodo de tiempo en torno al instante $T=125$ segundos durante los cuales existe una zona con visibilidad inferior a 10 metros.

Para comprobar que la evacuación es posible se ha analizado aquellos ocupantes que se han visto expuestos a esta eventual situación para analizar el FED.

En la siguiente gráfica se muestra la visibilidad y el FED en función del tiempo a los cuales se ven sometidos estos ocupantes:



Gráfica 42. Evolución del FED de un ocupante expuesto al humo.



Gráfica 43. Evolución de la visibilidad de un ocupante expuesto al humo.

Como puede verse la exposición al humo genera un rápido incremento del FED, sin embargo globalmente el valor de FED alcanzado debido a la duración de la exposición es mucho menor del valor límite de FED=0.3

7.4.5.8. Conclusión del Escenario de Incendio 5

A través de la simulación se ha comprobado que el tiempo necesario para realizar una evacuación en condiciones de seguridad es de 2046,1 segundos (**RSET=2046,1 segundos**).

Por otra parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio. Si llegado a este punto el sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering se puede asumir que el **ASET es ilimitado**.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.1 de la meta Seguridad de Vida tal que **ASET>RSET**.

Partiendo de la misma consideración de que parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio, se asume que el ASRT es ilimitado y por tanto mayor de 60 minutos.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.2 de la meta Seguridad de vida tal que **ASRT>60'**.

Puesto que se cumplen todos los objetivos de la meta Seguridad de Vida, queda validado el Escenario de Incendio 1

A continuación a través de una tabla resumen se comprueba si se han verificado los objetivos de la meta Seguridad de Vida a través del estudio de los objetivos ASET>RSET y mediante la comprobación del que ASRT>60 minutos.

Objetivo	Criterio	Verificación del criterio de aceptación
ASET>RSET	[O ₂] > 18%	Cumple
	[CO] < 450 ppm	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple
	Temperatura < 60°C	Cumple
	Velocidad del aire < 10 m/s	Cumple
ASRT > 60'	ASET ilimitado	Cumple

Tabla 51. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

7.4.6. Escenario de incendio EI 6

En este escenario de incendio el tren está saliendo del túnel quedando parado a los 1.150 metros del portal PK= 1+150. El sistema de ventilación impulsa el humo y gases calientes hacia el portal y la evacuación se realiza hacia la estación.

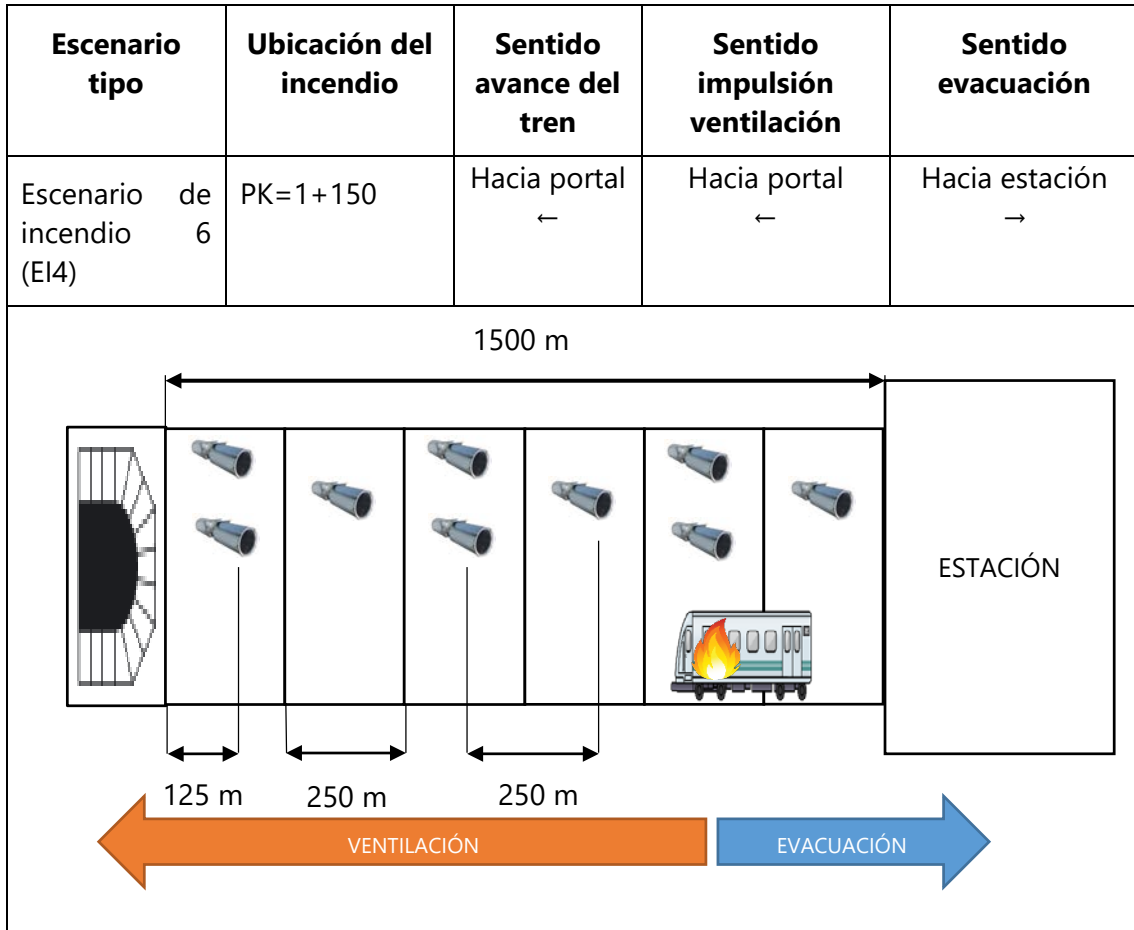
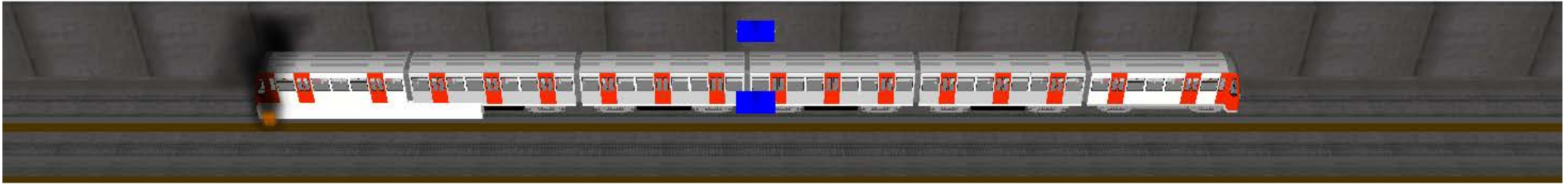


Figura 212. Cuadro resumen del escenario de incendio 6 EI6

7.4.6.1. Análisis del backlayering

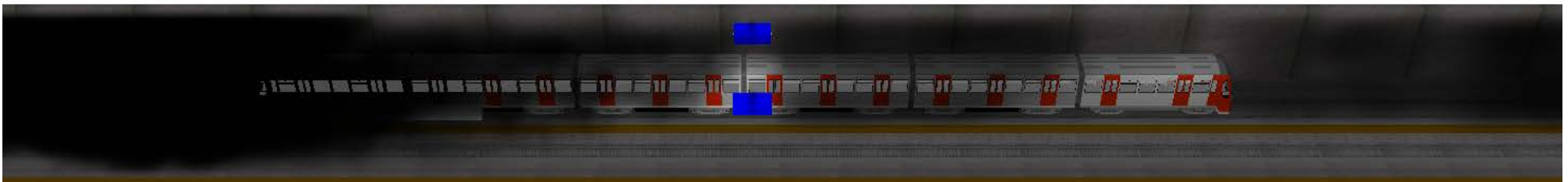
T=5 segundos. Comienza el incendio



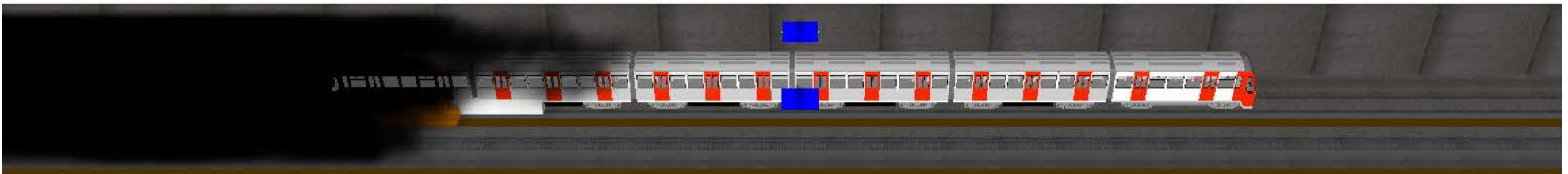
T=125 segundos. Debido al tiempo en que tarda en ponerse en marcha el sistema de ventilación se aprecia un avance del humo.



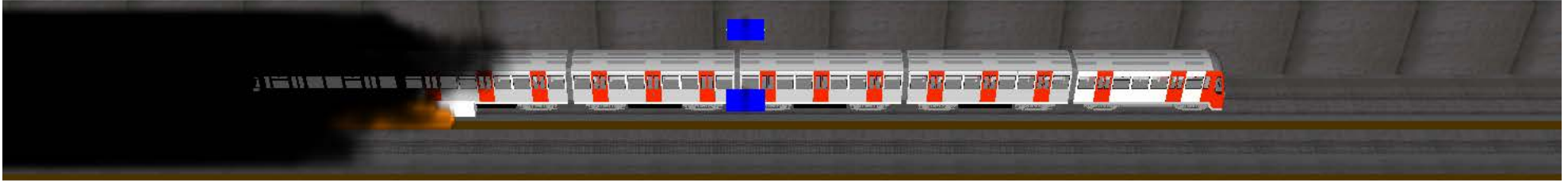
T=200 segundos. Gracias al sistema de ventilación se aprecia como desciende la densidad del humo en la zona de evacuación.



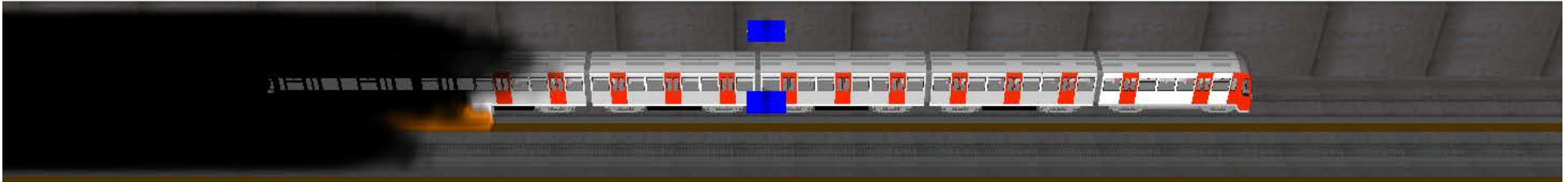
T=300 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



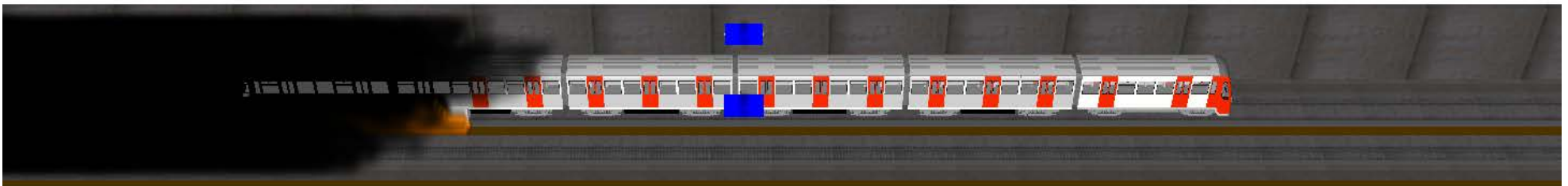
T=600 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



T=720 segundos. Se alcanza la potencia máxima del incendio. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.

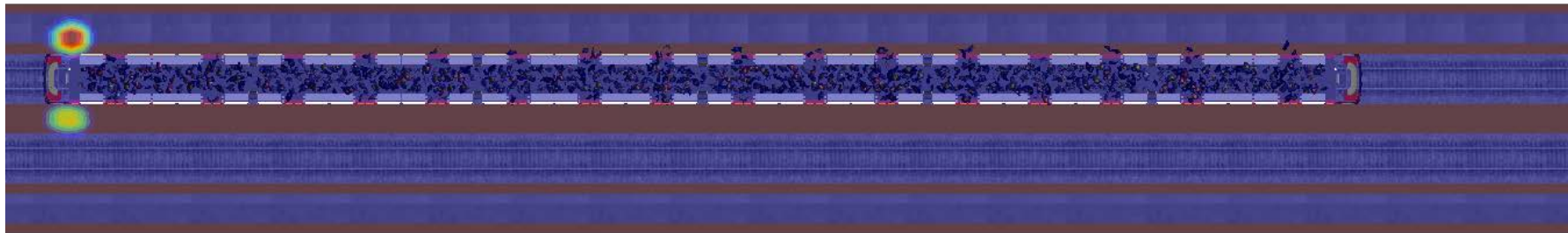


T=1080 segundos. El incendio comienza a decaer.

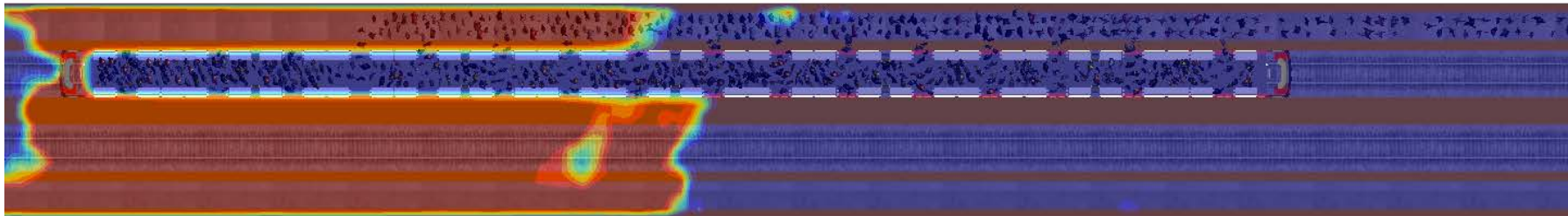


7.4.6.2. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre la vía de evacuación

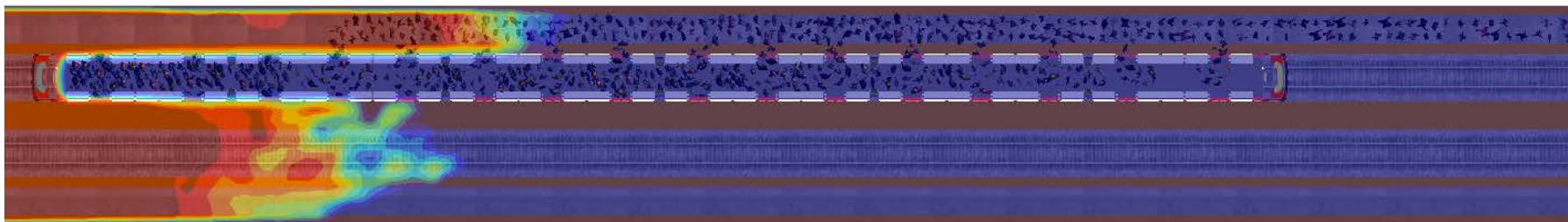
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner en funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



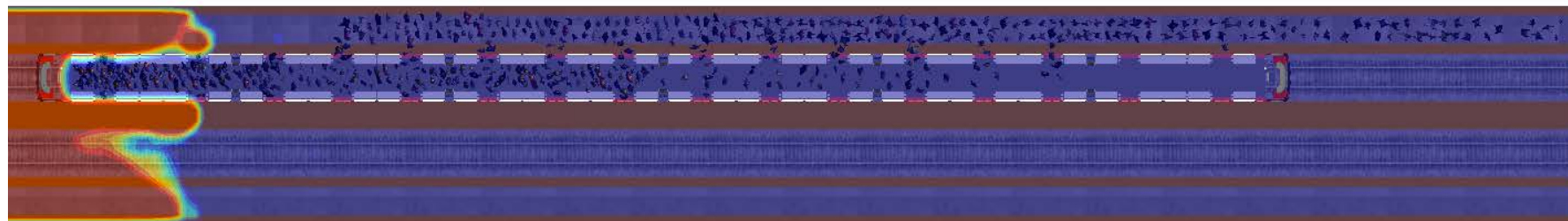
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



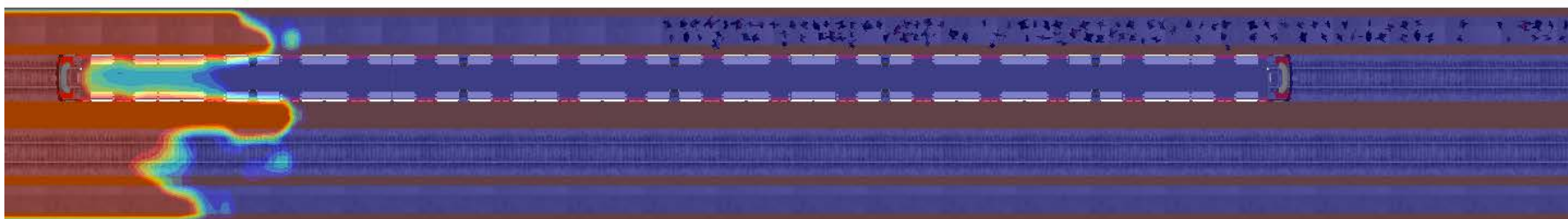
SOOT
(m)



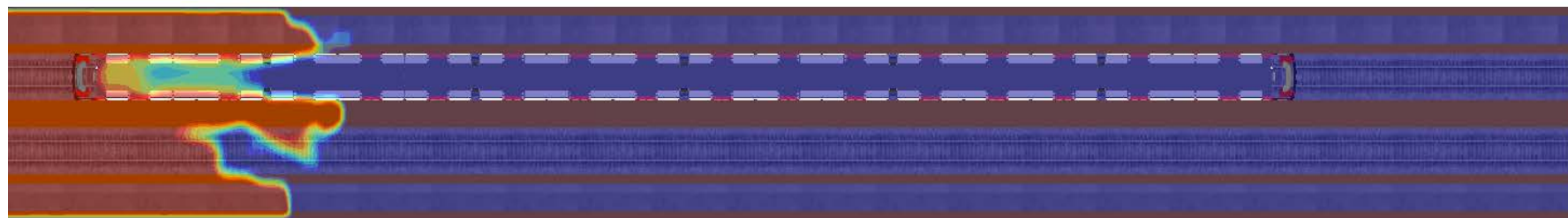
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



SOOT
(m)

30

27,8

25,6

23,3

21,1

18,9

16,7

14,4

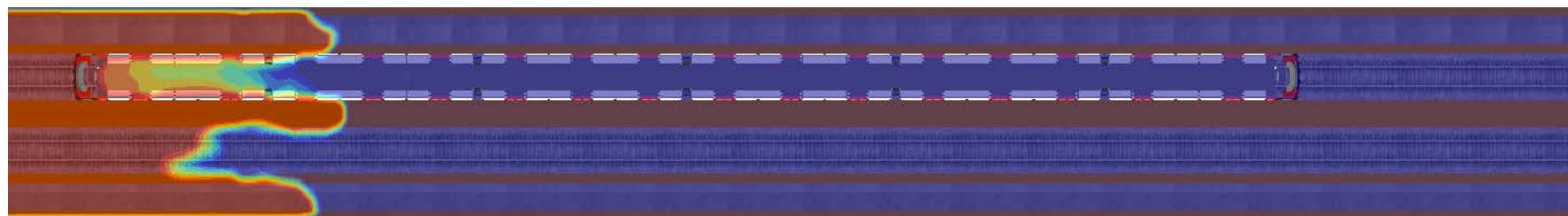
12,2

10

7,78

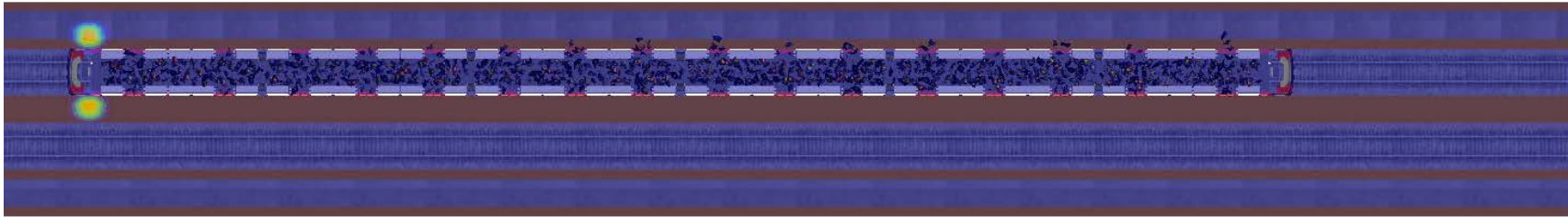
Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

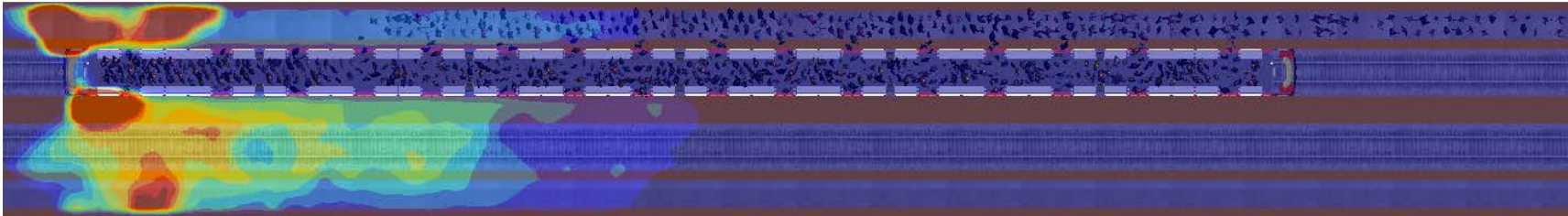


7.4.6.3. Análisis de temperatura a 2 metros sobre la vía de evacuación

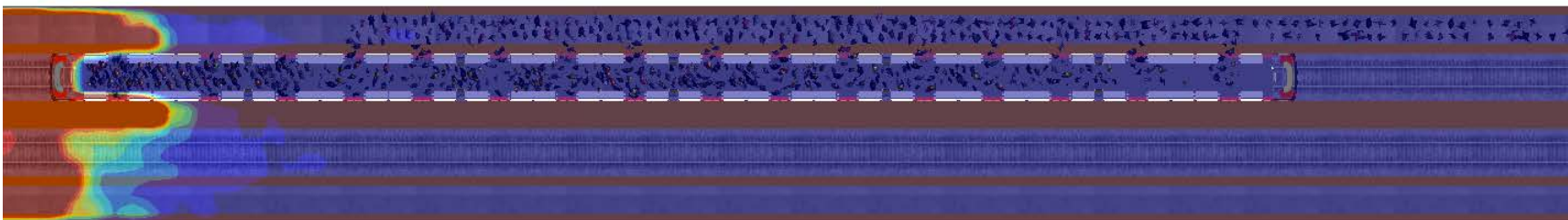
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Por ende se aprecia un ligero incremento de temperatura en la zona con humo.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering enfriando la zona previamente afectada.



TEMPERATURE
(C)

64,4

60

55,6

51,1

46,7

42,2

37,8

33,3

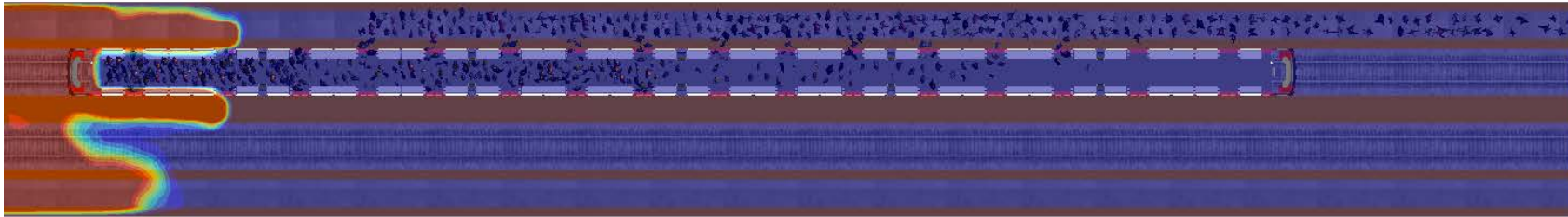
28,9

24,4

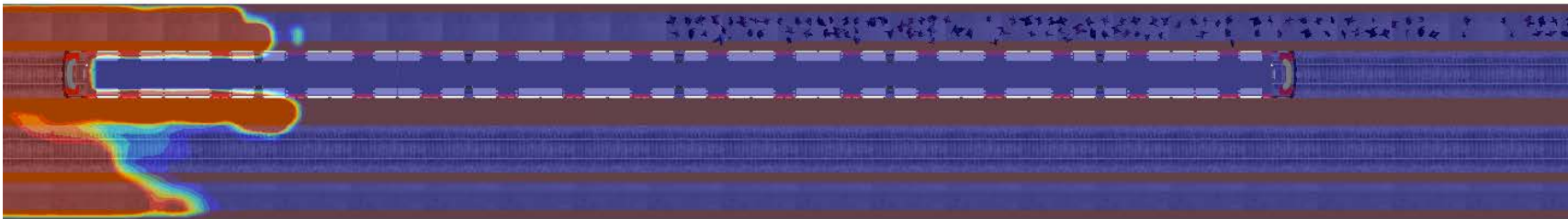
20

Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

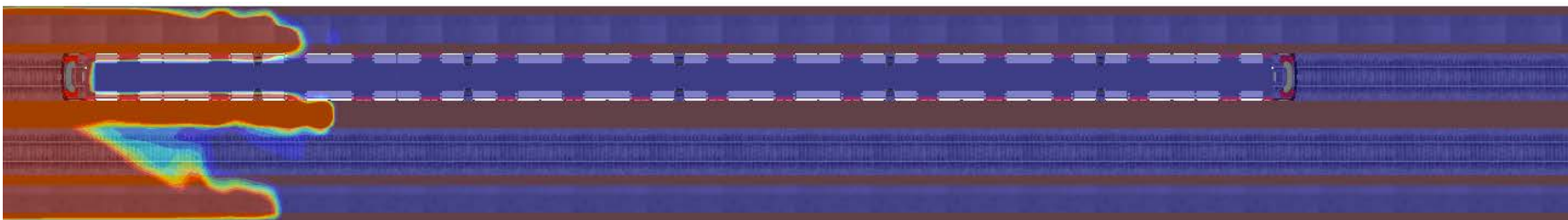
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



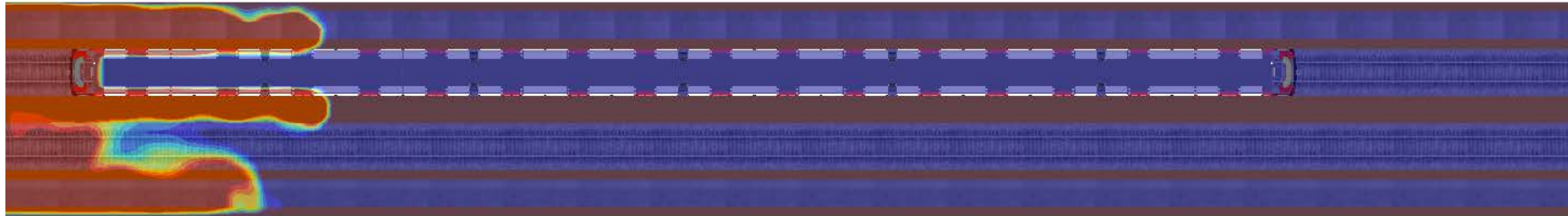
T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



TEMPERATURE
(C)



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

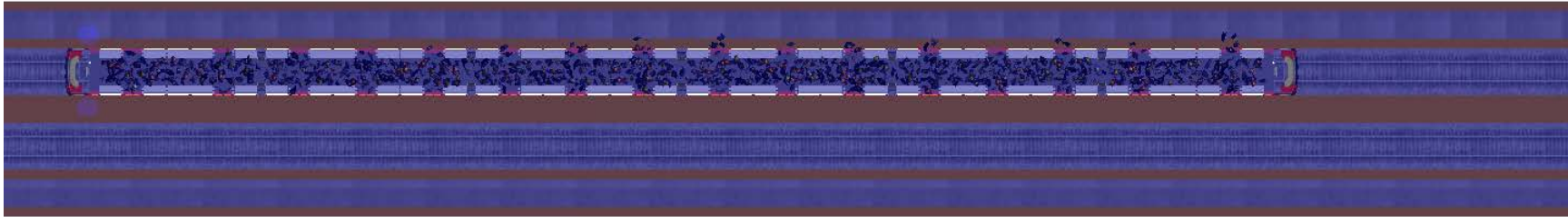


TEMPERATURE
(C)

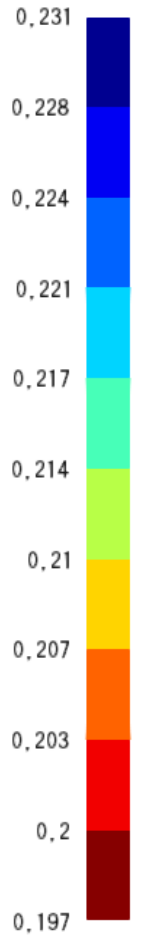


7.4.6.4. Análisis de la concentración de oxígeno a 2 metros sobre la vía de evacuación

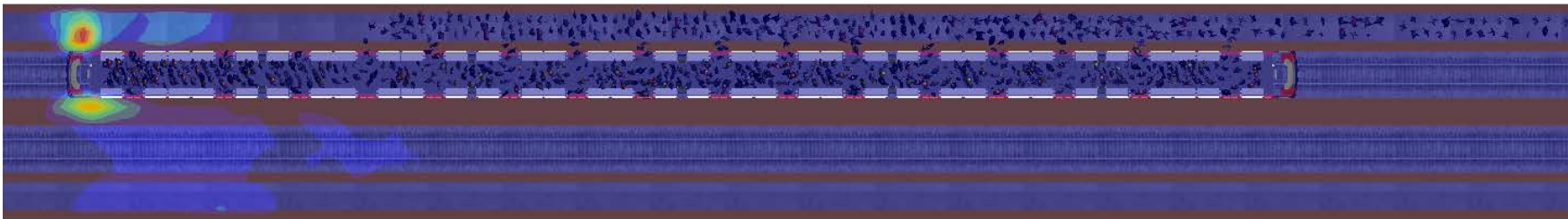
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



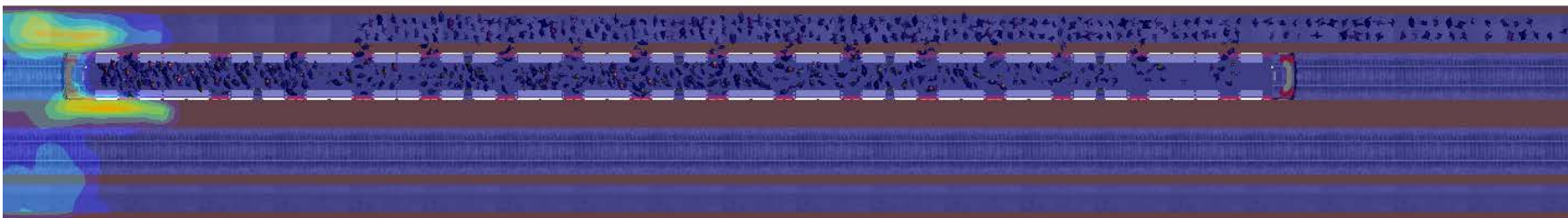
OXYGEN
(kg/kg)



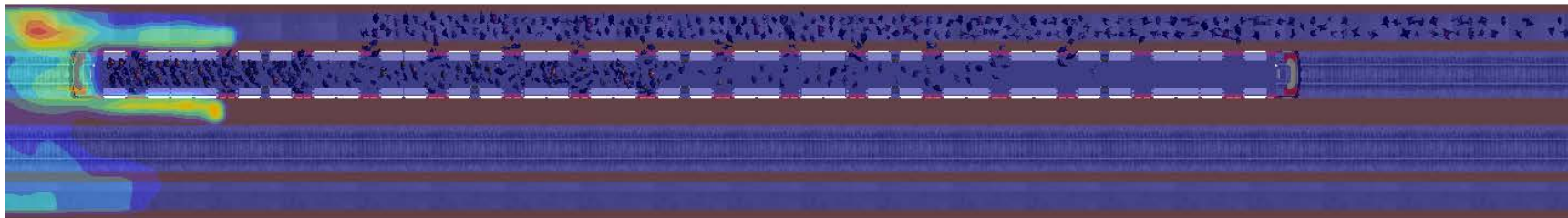
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Sin embargo no se ve disminuida la concentración de oxígeno.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



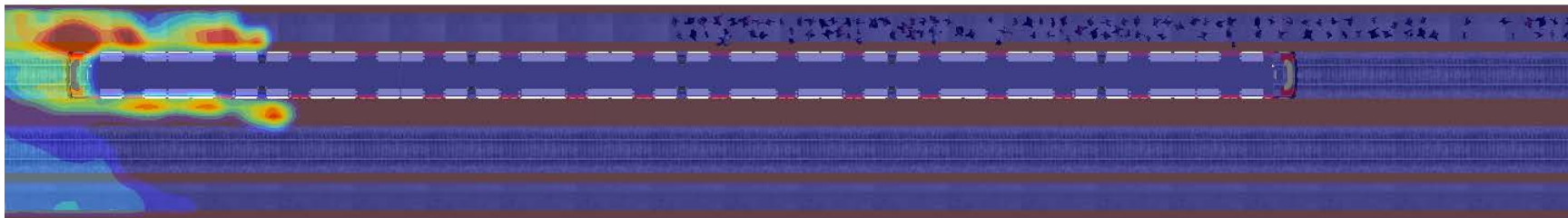
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



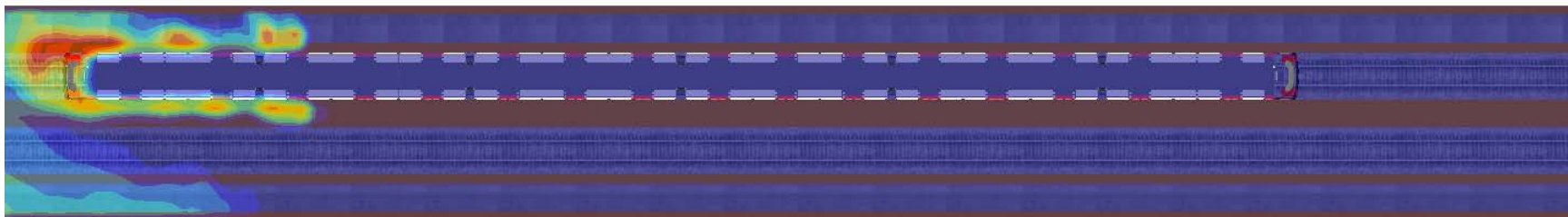
OXYGEN
(kg/kg)



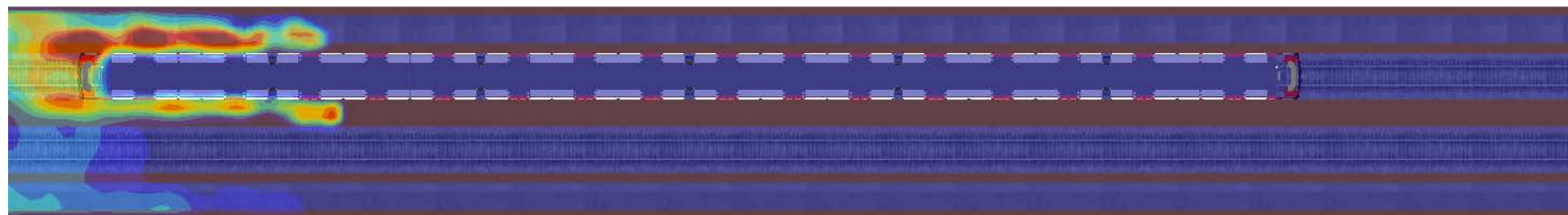
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

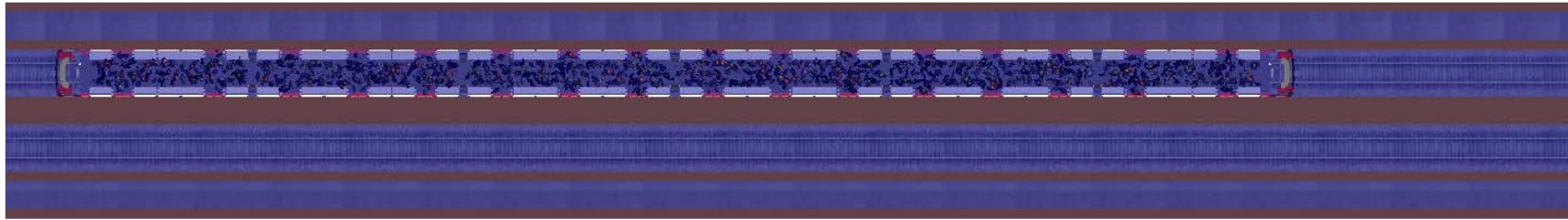


OXYGEN
(kg/kg)



7.4.6.5. Análisis de la concentración de monóxido de carbono a 2 metros sobre la vía de evacuación

T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



CARBON
(kg/kg)

0,000517

0,000465

0,000414

0,000362

0,00031

0,000258

0,000207

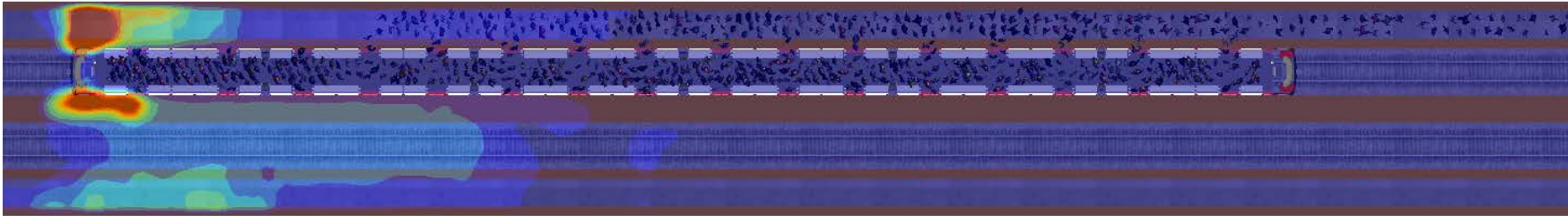
0,000155

0,000103

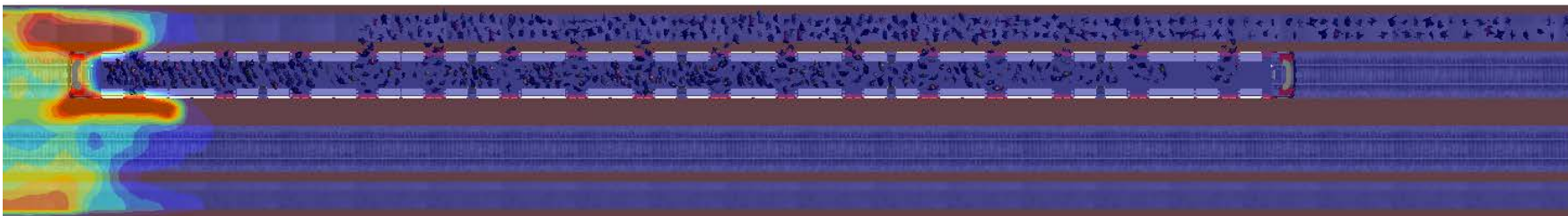
5,17e-005

0

T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Se aprecia un aumento de la concentración de CO, sin llegar a ser peligrosa.

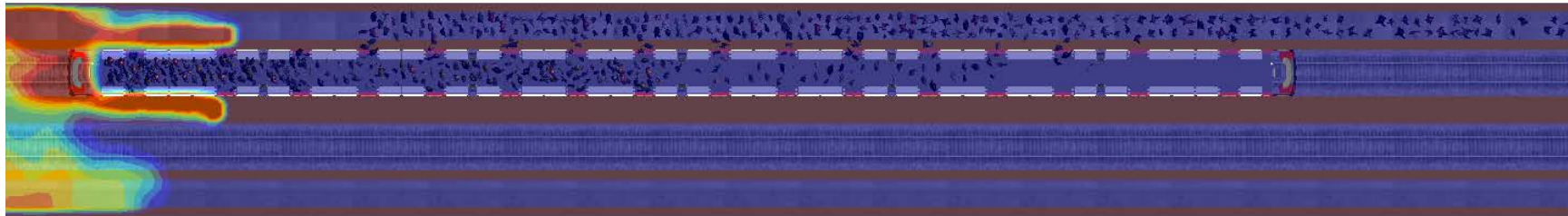


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia como desaparece la concentración de CO.

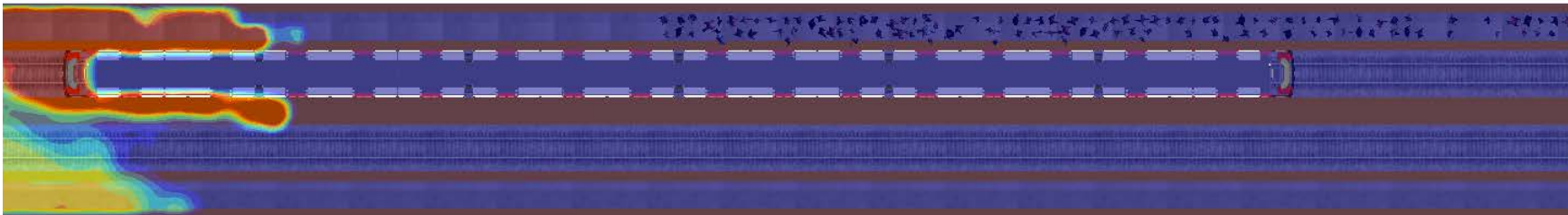


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

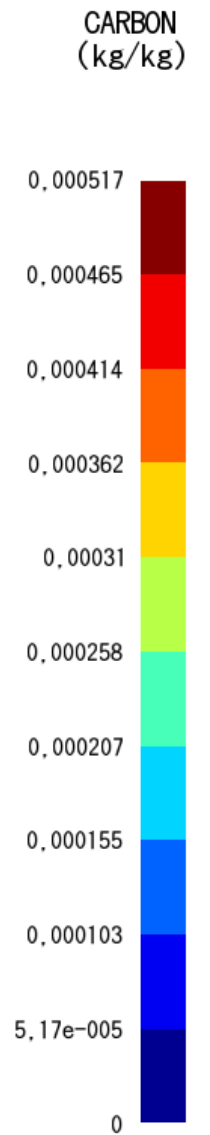
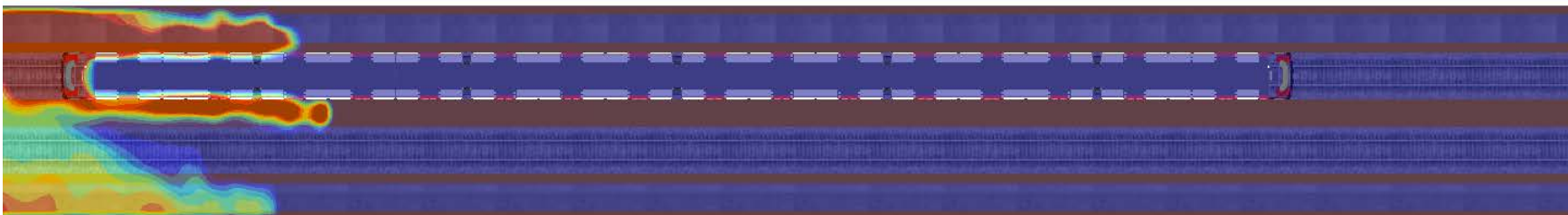
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



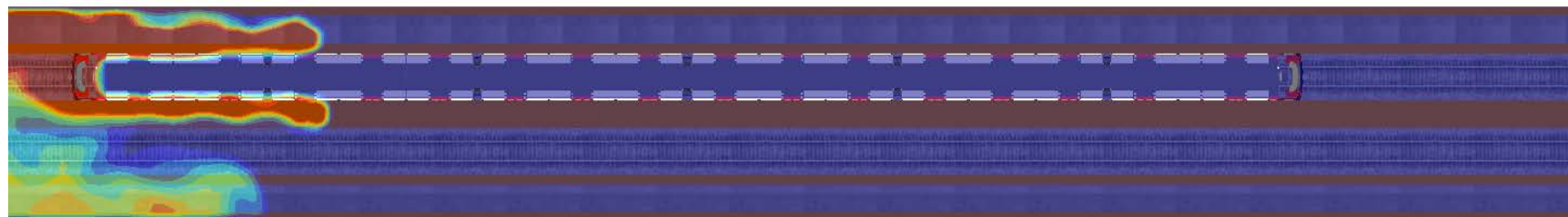
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



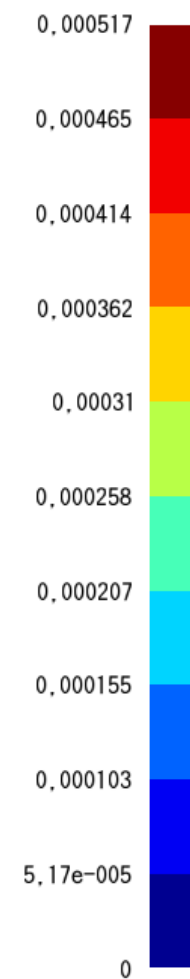
T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

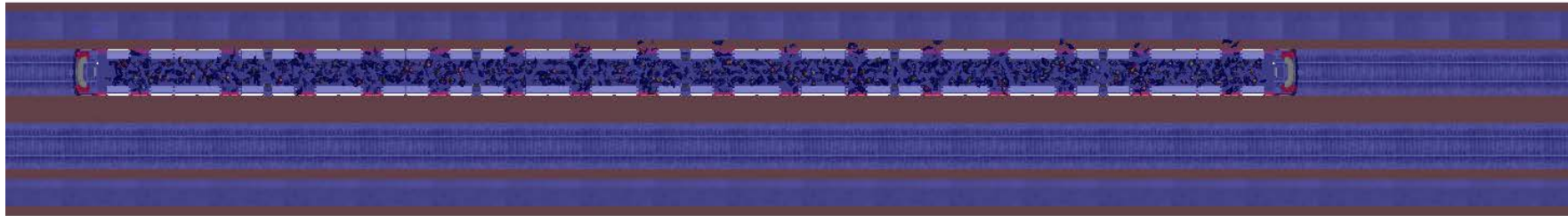


CARBON
(kg/kg)

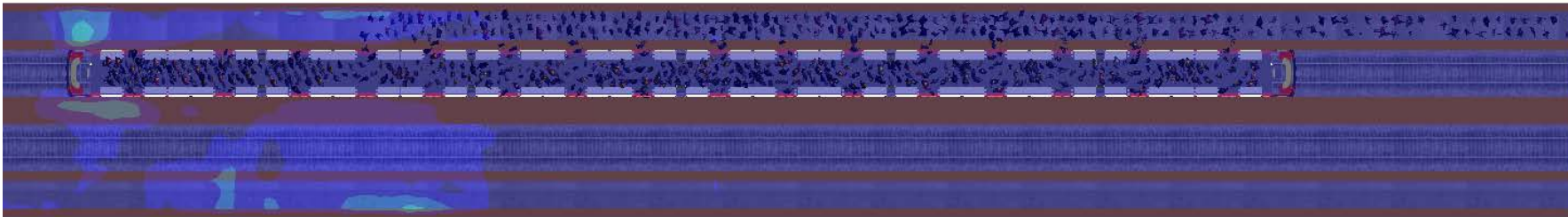


7.4.6.6. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre la vía de evacuación

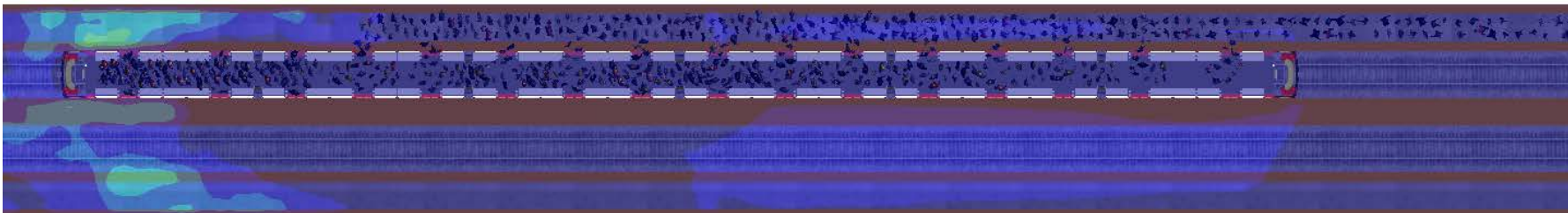
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia un incremento en la velocidad del aire del túnel.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

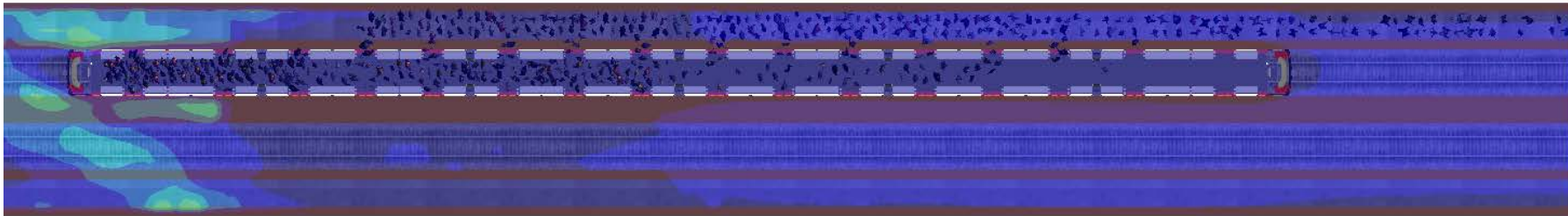
3,33

2,22

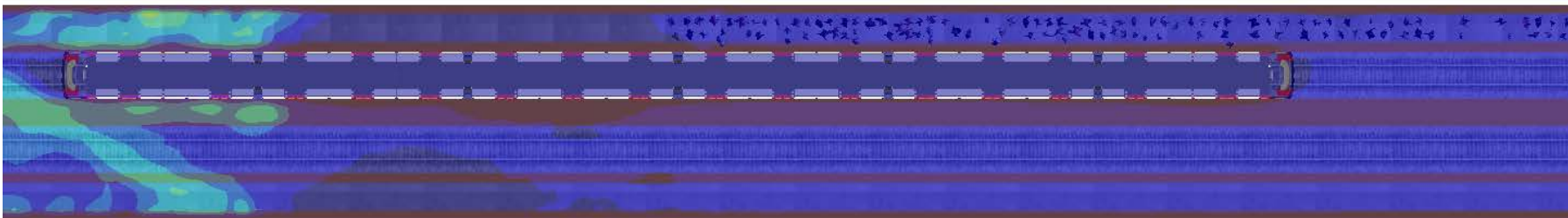
1,11

0

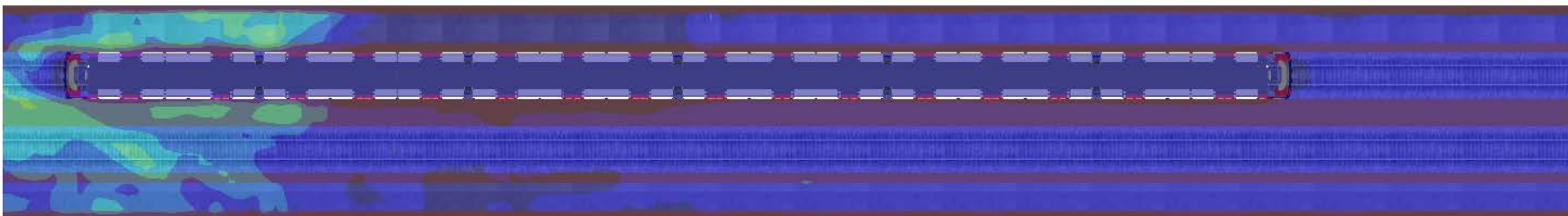
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

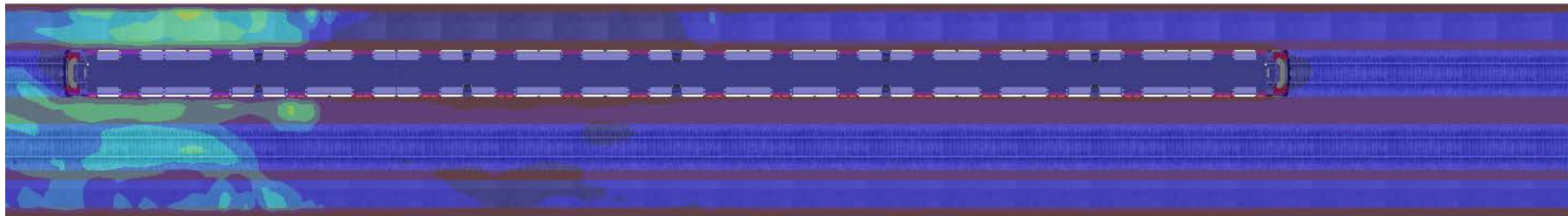
3,33

2,22

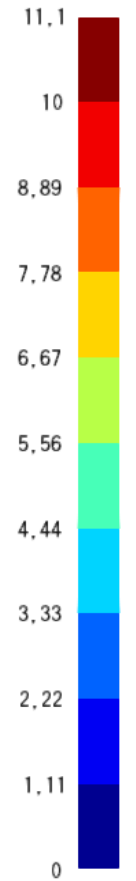
1,11

0

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



VELOCITY
(m/s)



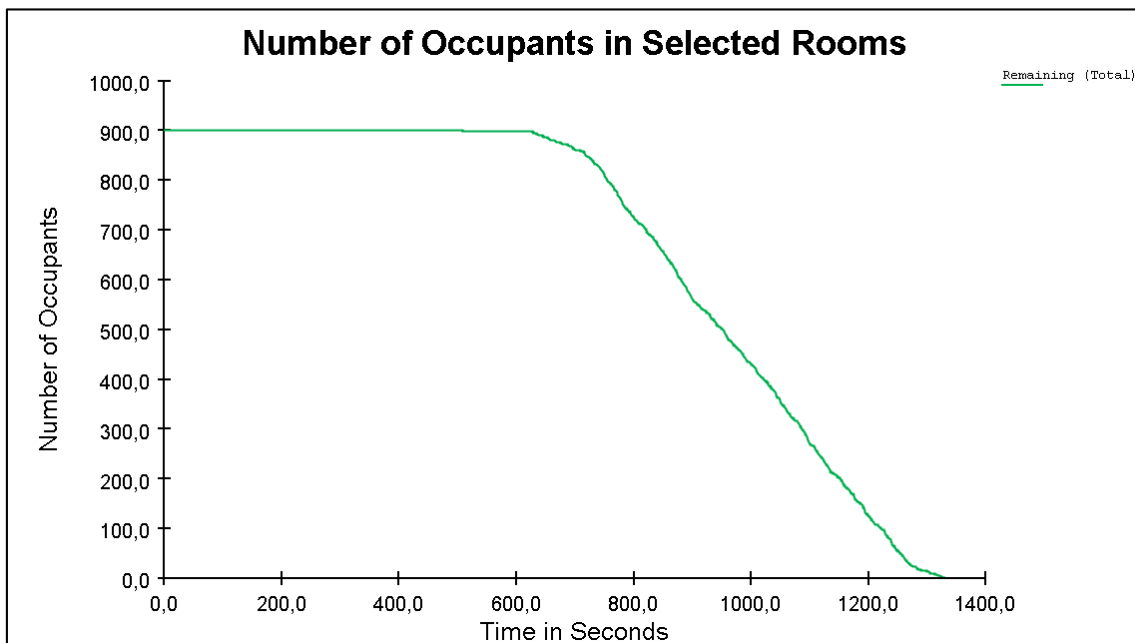
7.4.6.7. Análisis de la evacuación

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar en 1331,5 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI 6
Ocupantes totales	900
Tiempos de salida	
Mínimo:	508,7 s
Máximo	1331,5 s
Media:	984,1 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	513,3 m
Máximo	597,7 m
Media:	555,8 m

Tabla 52. Sumario de simulación de evacuación EI6

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.

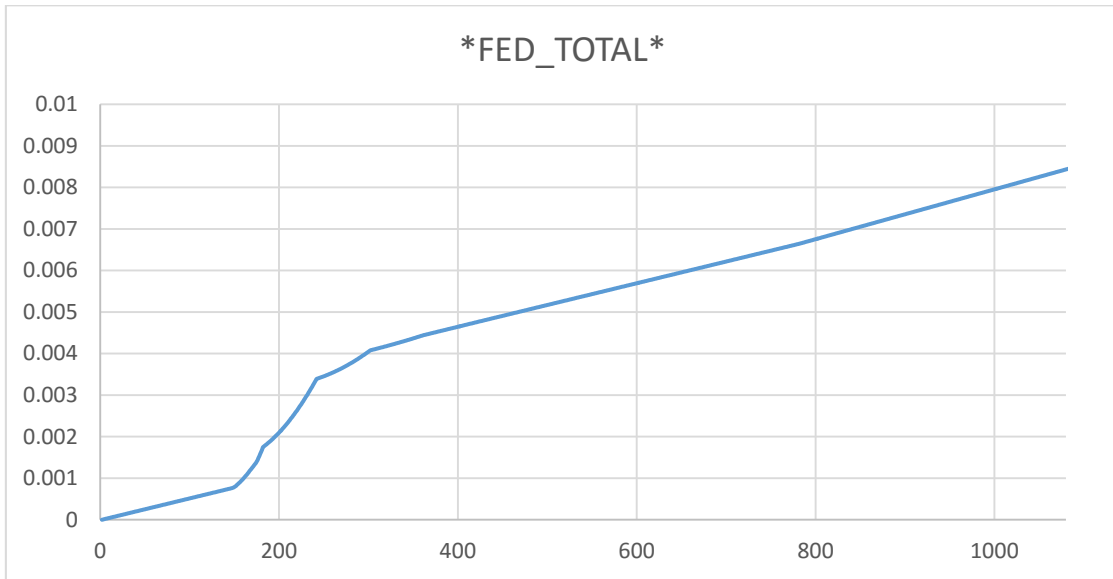


Gráfica 44. Evolución de la ocupación del túnel en EI6.

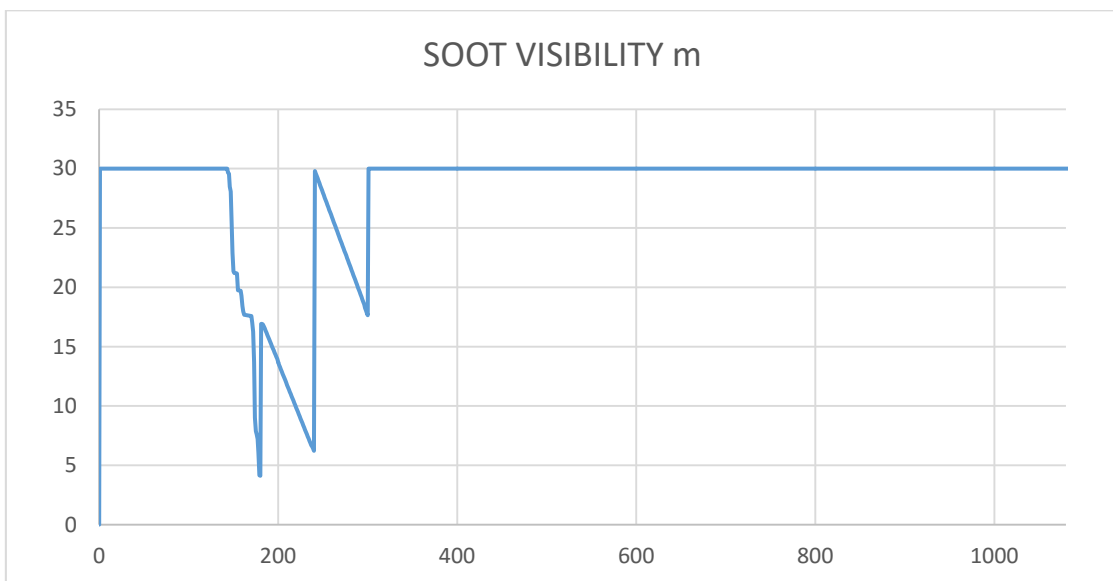
Como se ha podido ver cuándo se ha analizado la visibilidad hasta que debido al tiempo que tarda el sistema de ventilación en ponerse en marcha, alcanzar el régimen permanente y vencer las cargas presentes existe un periodo de tiempo en torno al instante $T=125$ segundos durante los cuales existe una zona con visibilidad inferior a 10 metros.

Para comprobar que la evacuación es posible se ha analizado aquellos ocupantes que se han visto expuestos a esta eventual situación para analizar el FED.

En la siguiente gráfica se muestra la visibilidad y el FED en función del tiempo a los cuales se ven sometidos estos ocupantes:



Gráfica 45. Evolución del FED de un ocupante expuesto al humo.



Gráfica 46. Evolución de la visibilidad de un ocupante expuesto al humo.

Como puede verse la exposición al humo genera un rápido incremento del FED, sin embargo globalmente el valor de FED alcanzado debido a la duración de la exposición es mucho menor del valor límite de FED=0.3

Por otra parte se adjuntan imágenes del proceso de evacuación de los ocupantes que se dirigen hacia la estación. Para ello emplean la acera de evacuación desde la ubicación del hasta el punto de conexión entre el túnel y la estación.



Figura 213. Ocupantes dirigiéndose a la estación a través de la acera por donde discurre la vía de evacuación.



Figura 214. Encuentro entre túnel y estación. Los ocupantes bajan de la acera a la plataforma del de la vía.

Para subir al andén, a cada lado de este existen un par de escaleras. En la imagen se aprecia los ocupantes subiendo al andén a través de la escalera izquierda.



Figura 215. Ocupantes subiendo al andén de la estación.



Figura 216. Ocupantes subiendo por la escalera derecha de acceso al andén.

El acceso a la calle se realiza a través de una escalera central y dos escaleras mecánicas que en situación de emergencia se desactivan funcionando como escaleras normales.



Figura 217. Ocupantes subiendo al hall de la estación de metro.

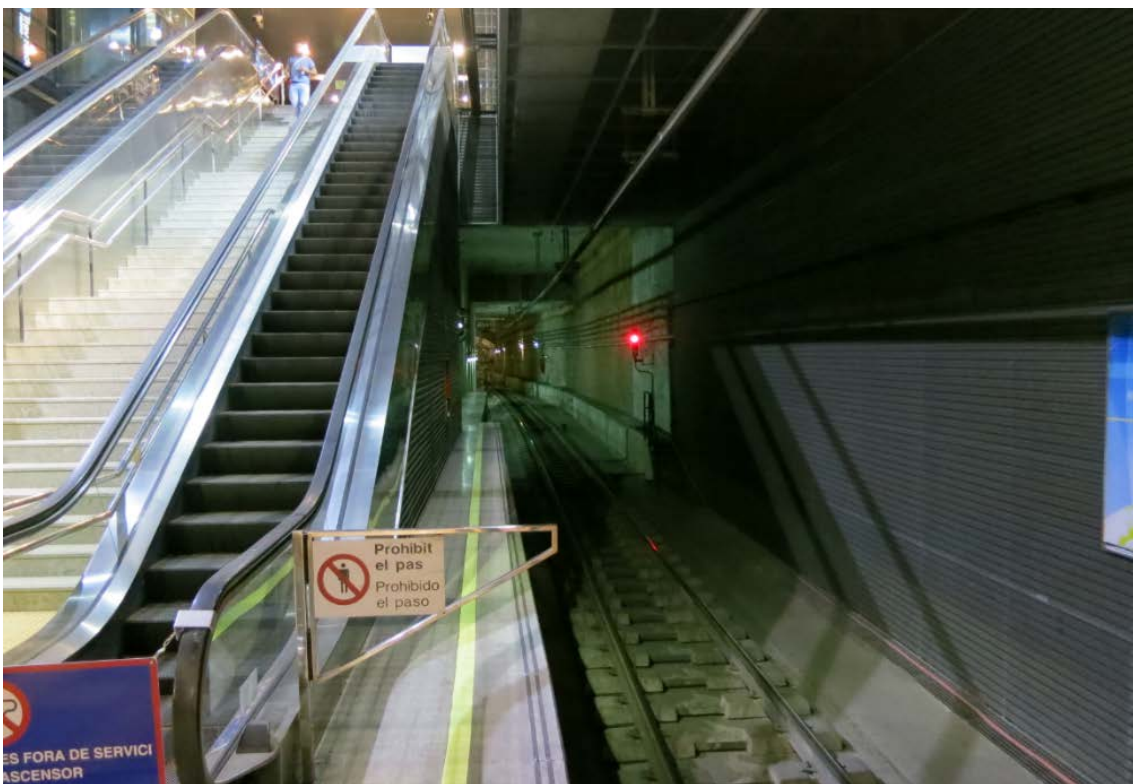


Figura 218. Fotografía real de la estación de metro.

Una vez llegado a la calle se considera que los ocupantes han llegado a zona segura.

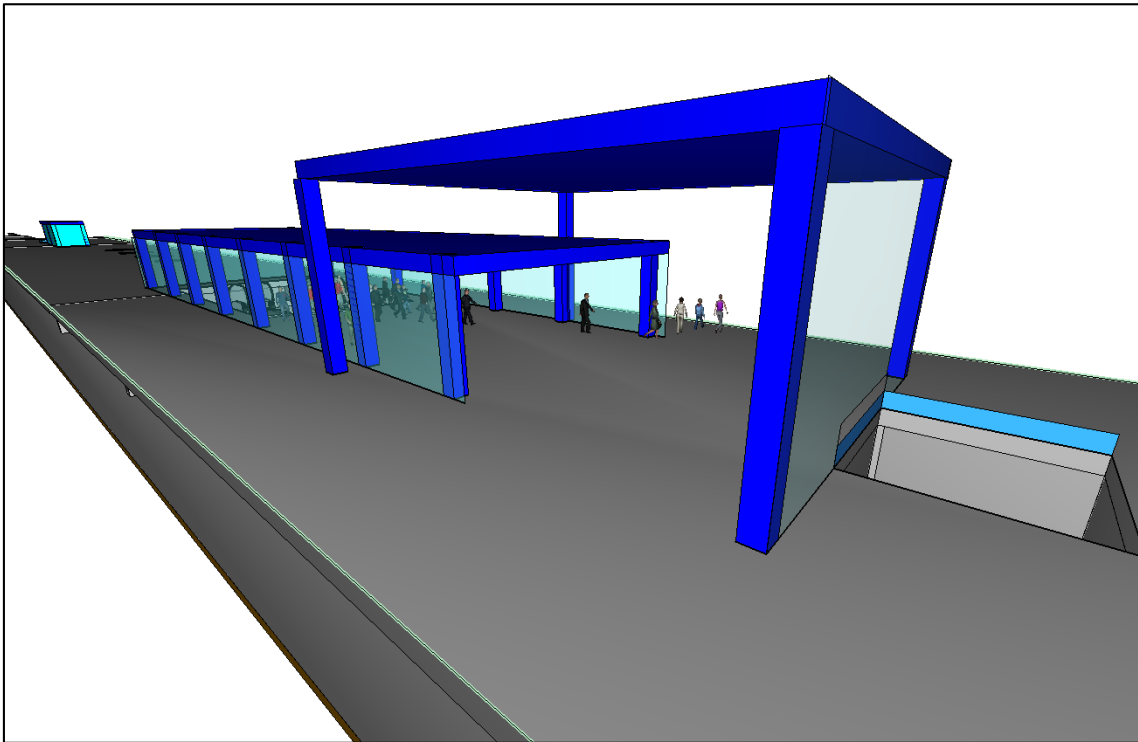


Figura 219. Ocupantes llegando al espacio exterior seguro.

7.4.6.8. Conclusión del Escenario de Incendio 6

A través de la simulación se ha comprobado que el tiempo necesario para realizar una evacuación en condiciones de seguridad es de 1331,5 segundos (**RSET=1331,5 segundos**).

Por otra parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio. Si llegado a este punto el sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering se puede asumir que el **ASET es ilimitado**.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.1 de la meta Seguridad de Vida tal que **ASET>RSET**.

Partiendo de la misma consideración de que parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio, se asume que el ASRT es ilimitado y por tanto mayor de 60 minutos.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.2 de la meta Seguridad de vida tal que **ASRT>60'**.

Puesto que se cumplen todos los objetivos de la meta Seguridad de Vida, queda validado el Escenario de Incendio 1

A continuación a través de una tabla resumen se comprueba si se han verificado los objetivos de la meta Seguridad de Vida a través del estudio de los objetivos ASET>RSET y mediante la comprobación del que ASRT>60 minutos.

Objetivo	Criterio	Verificación del criterio de aceptación
ASET>RSET	[O ₂]>18%	Cumple
	[CO]<450 ppm	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple
	Temperatura < 60°C	Cumple
	Velocidad del aire < 10 m/s	Cumple
ASRT>60'	ASET ilimitado	Cumple

Tabla 53. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

7.4.1. Escenario de incendio EI 7

Este escenario de incendio es igual al EI5, añadiendo al modelo la estación y el sistema de extracción de humo presente en la estación. El sistema de extracción de humo de la estación está compuesto por dos ventiladores axiales reversible capaces de trasegar un caudal de 73 m³/s.

Su ubicación se encuentra en las inmediaciones de la unión entre el túnel y la estación.

En la sección se muestra como el sistema de extracción de la estación absorbe el humo para expulsarlos a través de una cámara construida para tal efecto hacia la calle.

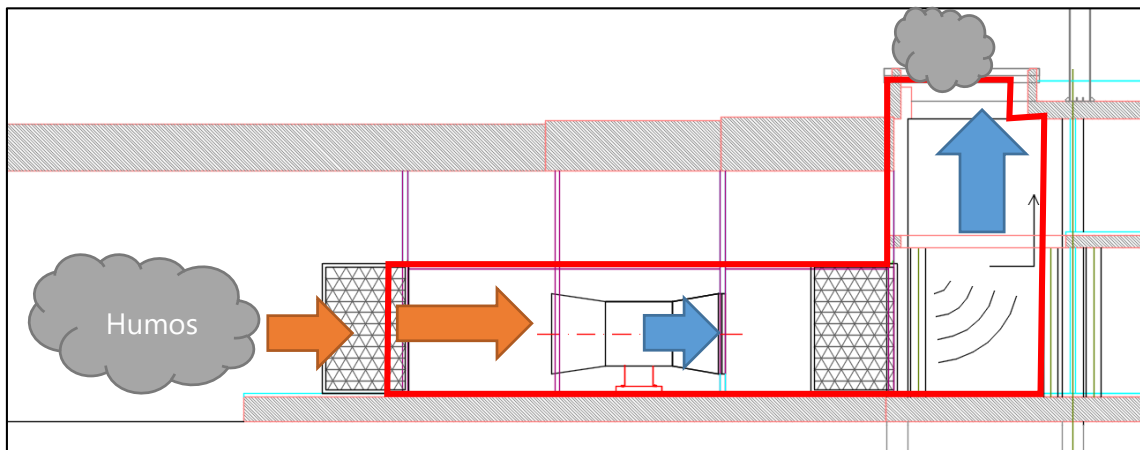


Figura 220. Sección del sistema de extracción de la estación mediante ventiladores axiales reversibles.

A diferencia del resto de escenarios de incendio, en el Escenario de Incendio 7 se activa además del sistema de ventilación de emergencia del túnel, el sistema de extracción.

El objeto de este escenario de incendio es comprobar si el humo y gases calientes impulsados por el sistema de ventilación de emergencia hacia el túnel son extraídos correctamente por el sistema de extracción de la estación mientras se realiza la evacuación de emergencia en la estación.

En la estación existe la ocupación adicional de otro convoy de metro con 900 personas así como la mitad de la ocupación de un tren (450 personas) esperando en el andén para realizar un transbordo. La tipología de la población es idéntica a la existente en el resto de escenarios estando compuesta por un 40% de mujeres adultas, un 40% por varones adultos, un 10% de niños y un 10% de ancianos.

En el resto de escenarios de incendio no se ha tenido en cuenta el efecto producido por la activación de este sistema instalado en la estación, el cual puede actuar tanto en aspiración como en impulsión aportando un empuje considerable.

Por tanto se considera que los seis Escenarios de Incendio anteriores están del lado de la seguridad.

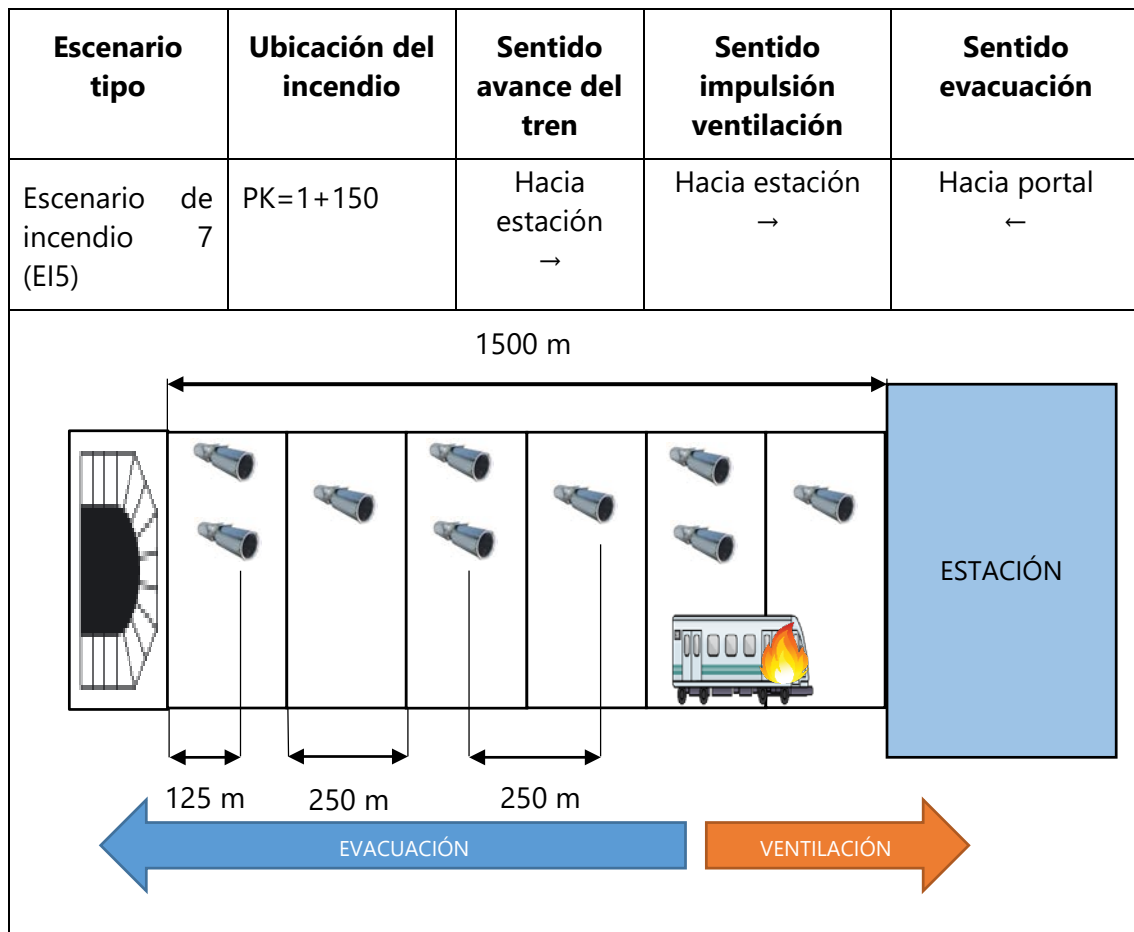
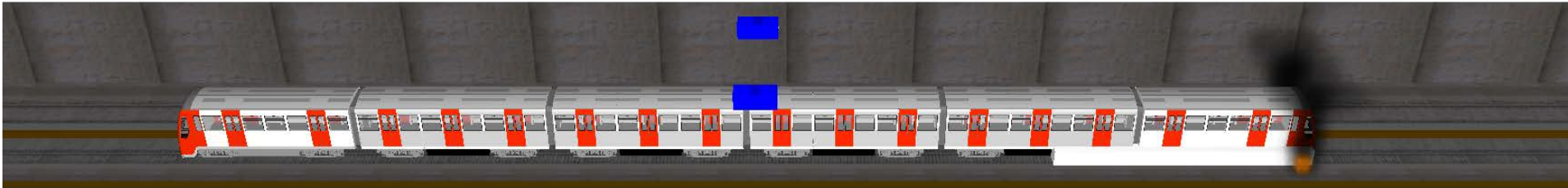


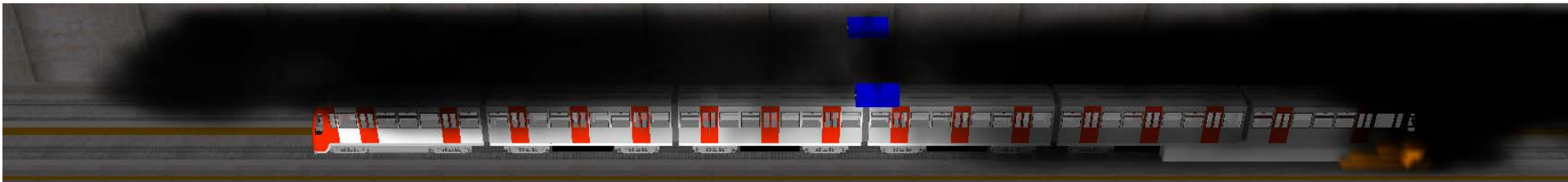
Figura 221. Cuadro resumen del escenario de incendio 7 E17

7.4.1.1. Análisis del backlayering

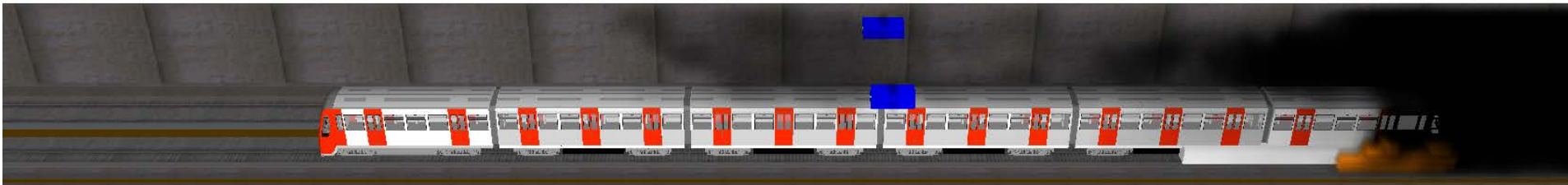
T=5 segundos. Comienza el incendio



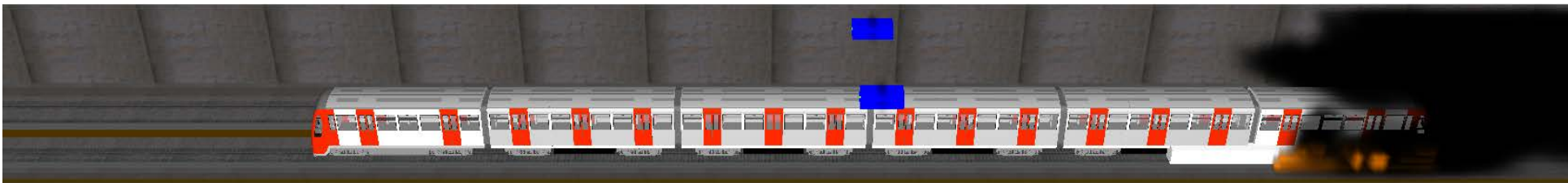
T=125 segundos. Debido al tiempo en que tarda en ponerse en marcha el sistema de ventilación se aprecia un avance del humo.



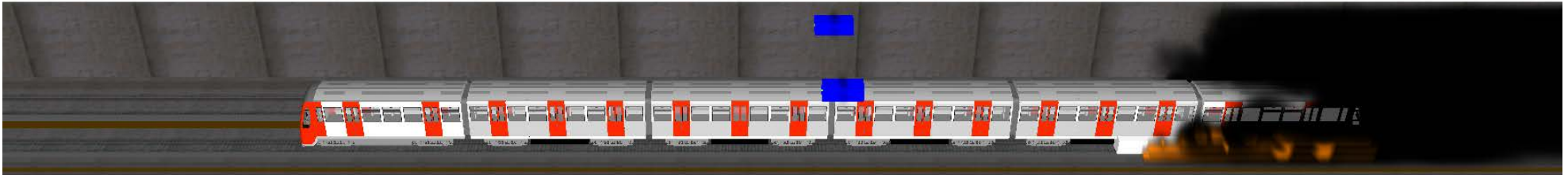
T=200 segundos. Gracias al sistema de ventilación se aprecia como desciende la densidad del humo en la zona de evacuación. En comparación con el E1 5 la densidad de los humos presentes en la vía de evacuación es mínima gracias a la extracción realizada desde la estación.



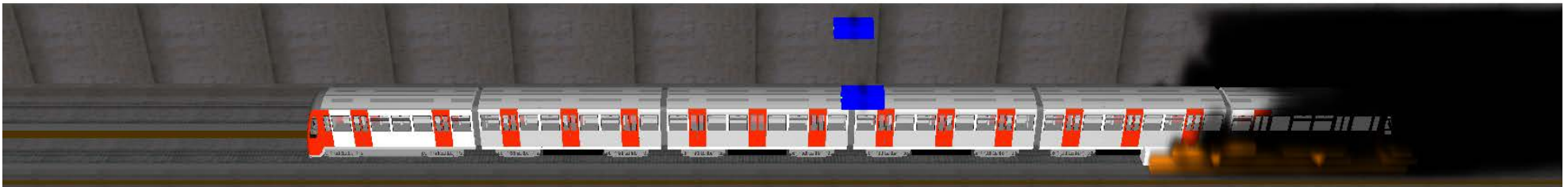
T=300 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



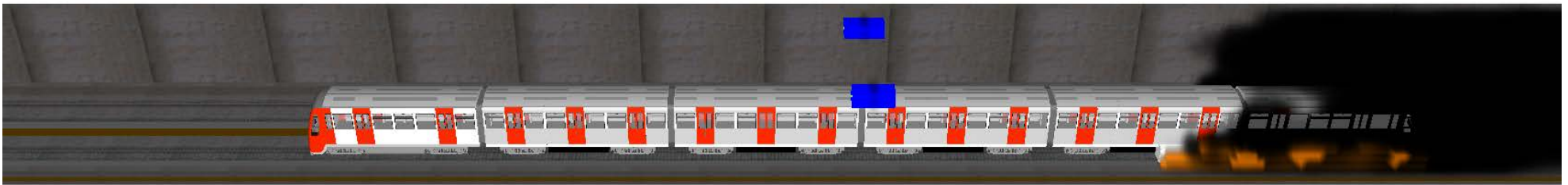
T=600 segundos. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.



T=720 segundos. Se alcanza la potencia máxima del incendio. El sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering.

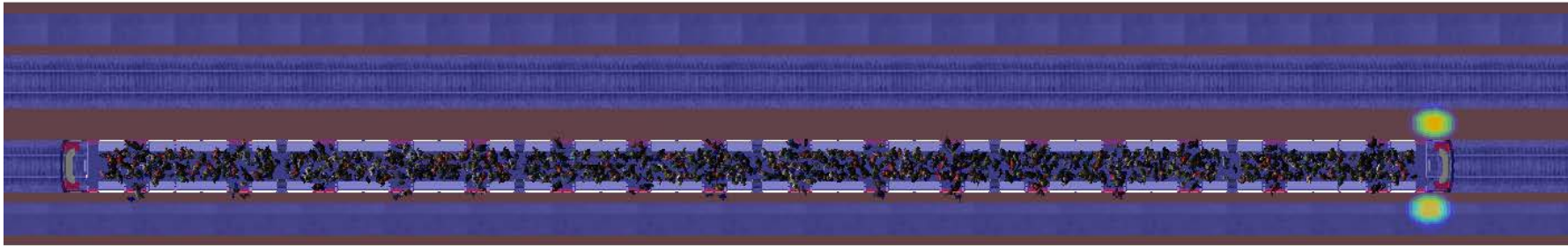


T=1080 segundos. El incendio comienza a decaer.

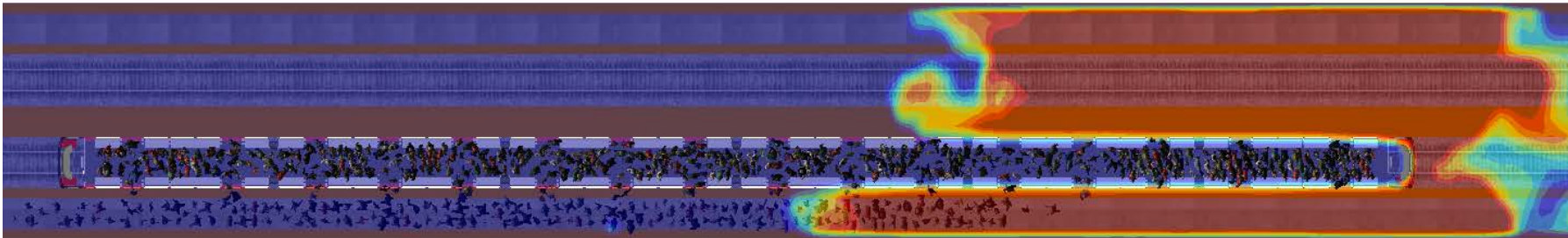


7.4.1.2. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre la vía de evacuación

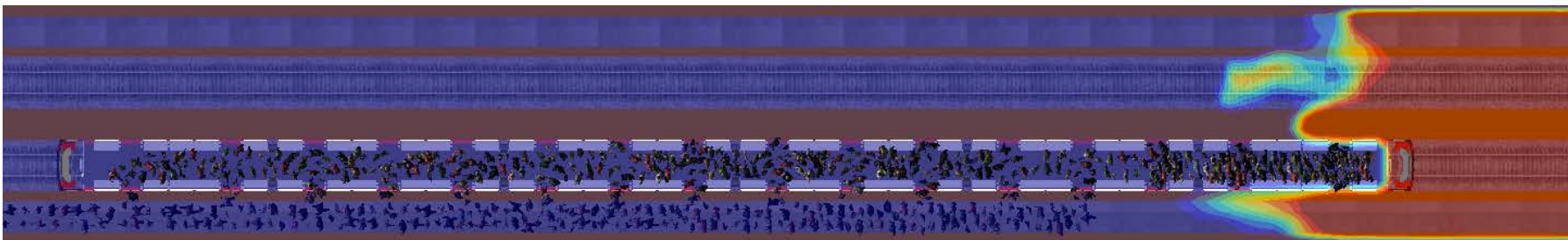
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



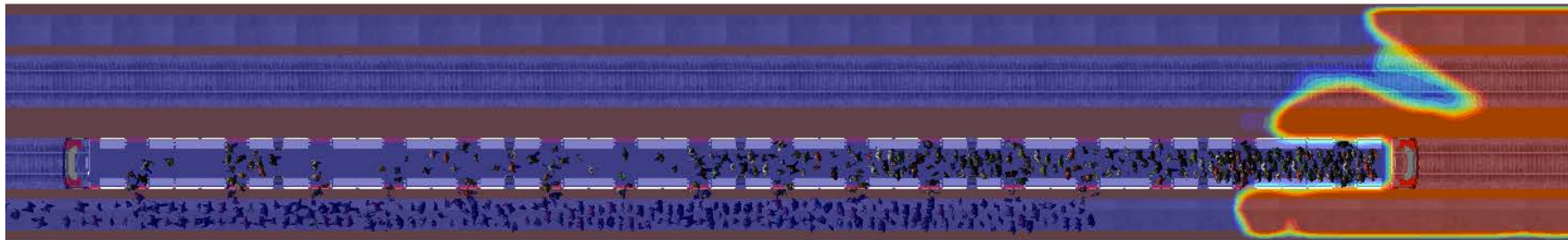
T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



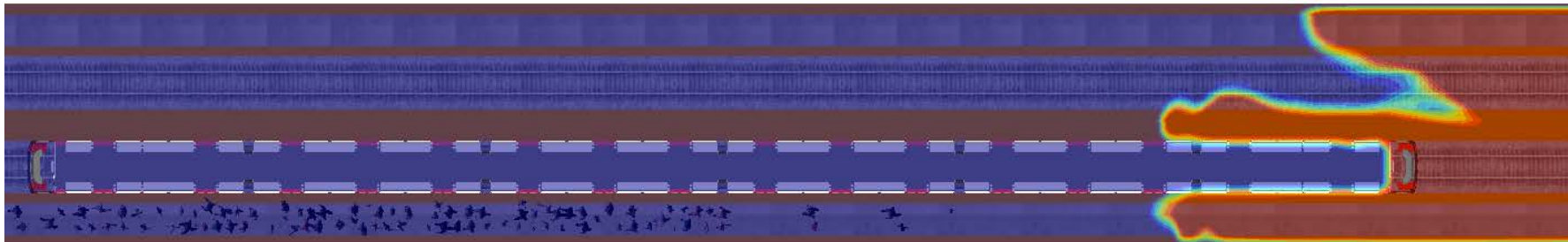
SOOT
(m)



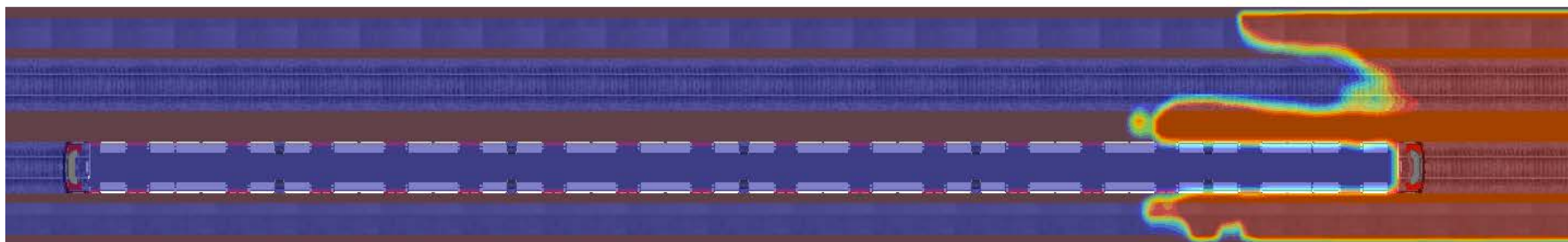
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.

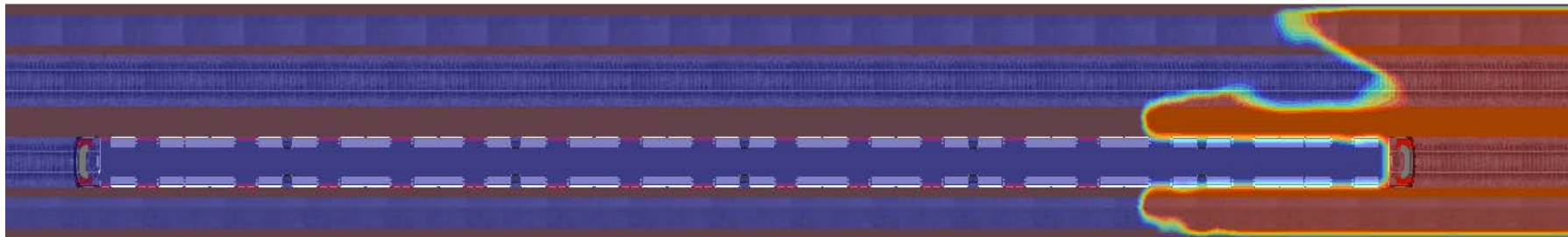


T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



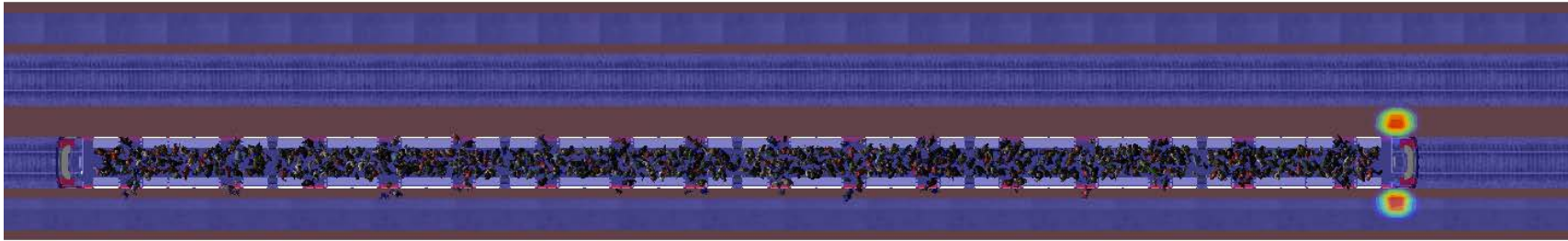
Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.



7.4.1.3. Análisis de temperatura a 2 metros sobre la vía de evacuación

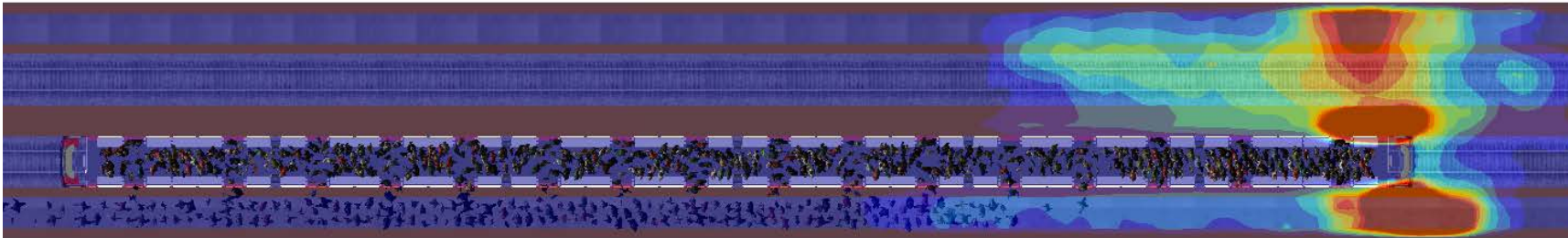
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



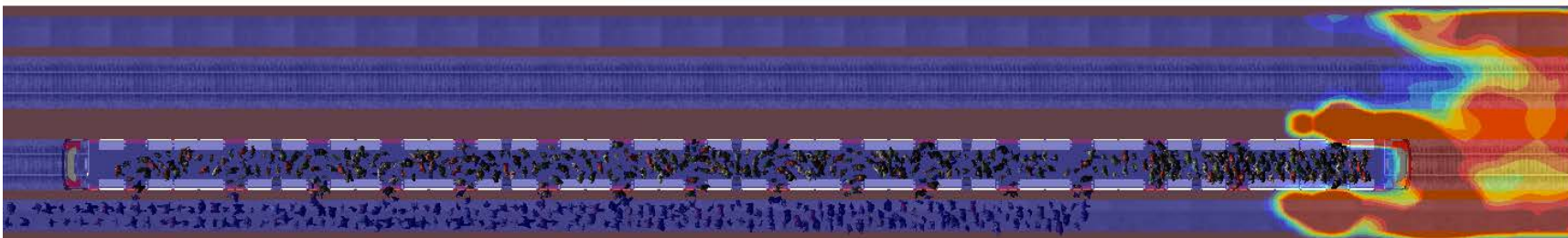
TEMPERATURE
(C)



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Por ende se aprecia un ligero incremento de temperatura en la zona con humo.

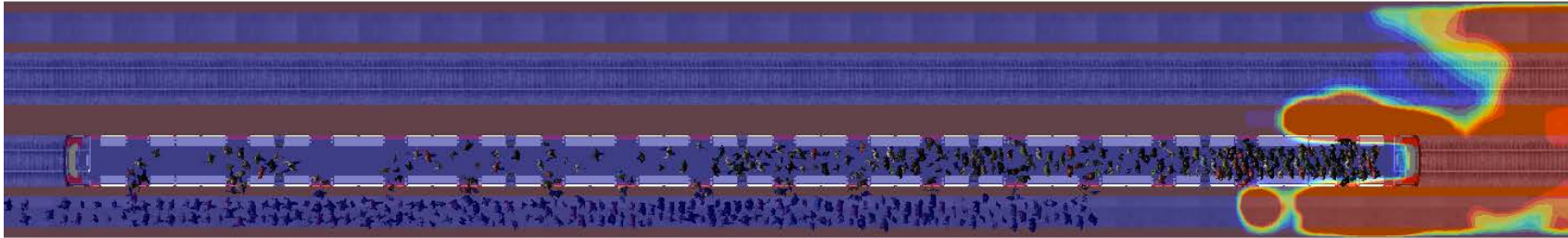


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering enfriando la zona previamente afectada.

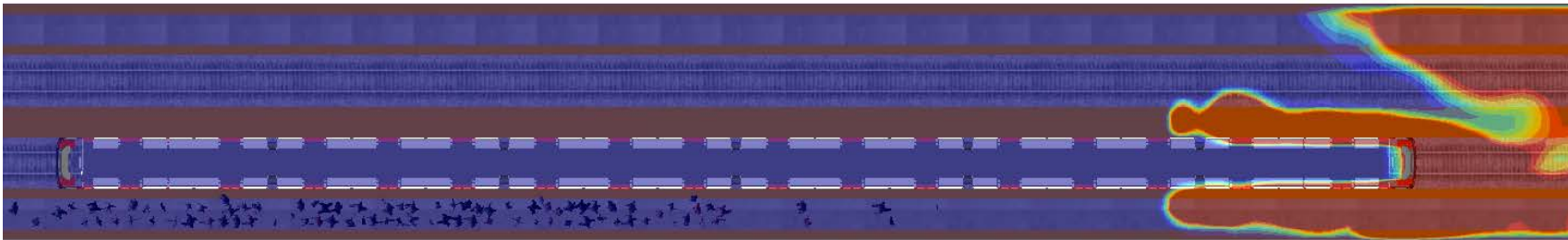


Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

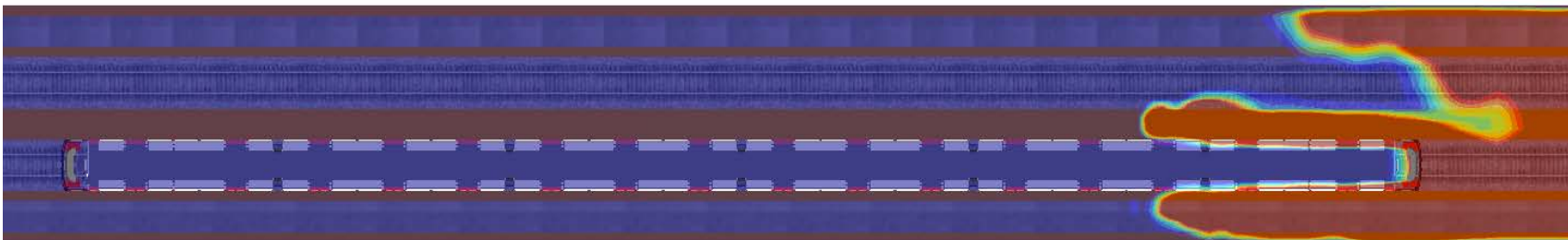
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



TEMPERATURE
(C)

64,4

60

55,6

51,1

46,7

42,2

37,8

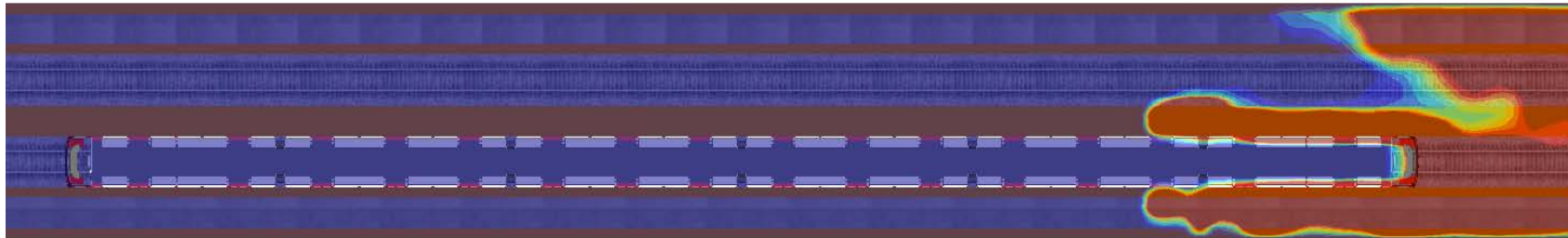
33,3

28,9

24,4

20

T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

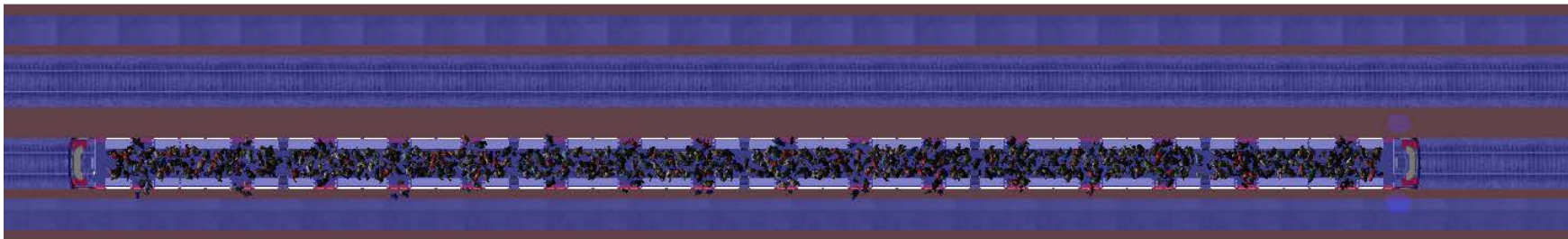


TEMPERATURE
(C)

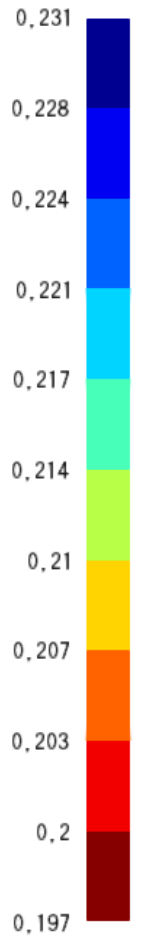


7.4.1.4. Análisis de la concentración de oxígeno a 2 metros sobre la vía de evacuación

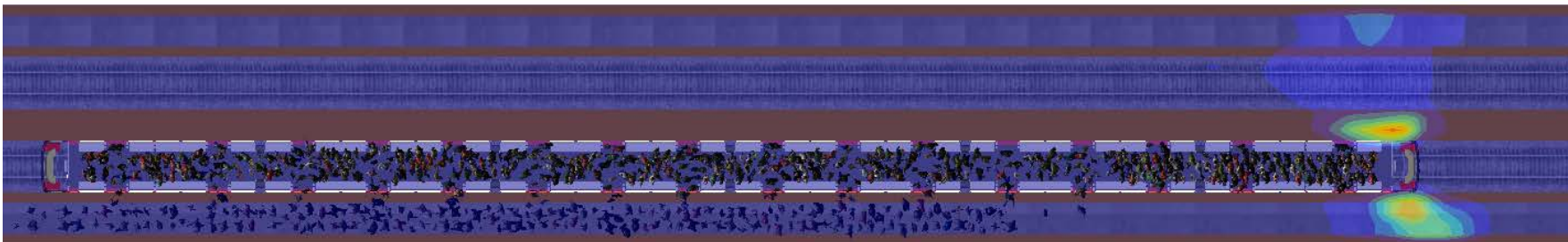
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



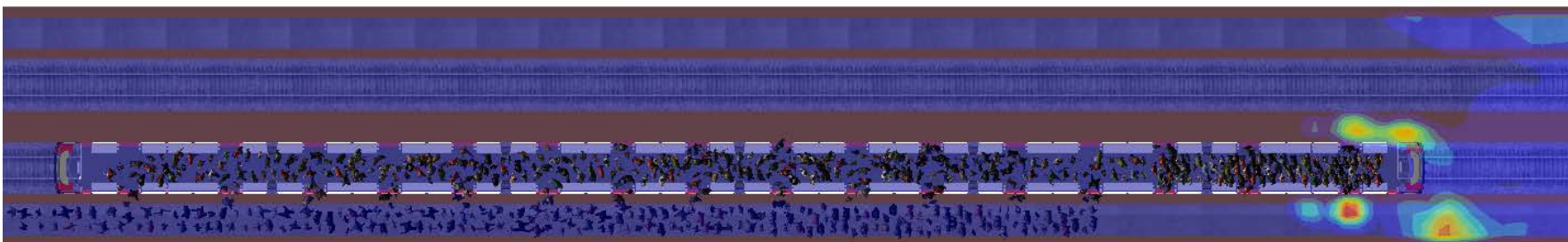
OXYGEN
(kg/kg)



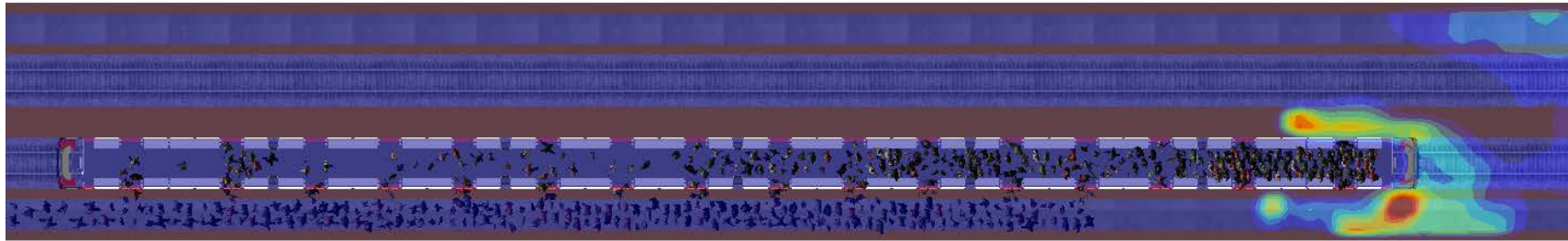
T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Sin embargo no se ve disminuida la concentración de oxígeno.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering.



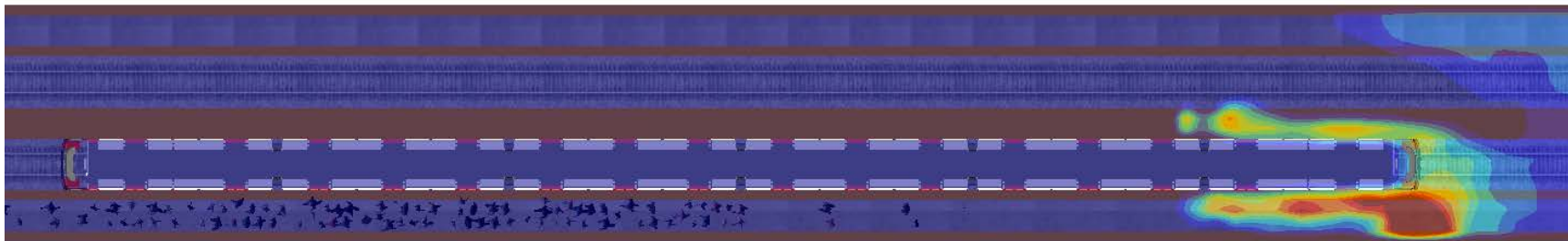
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



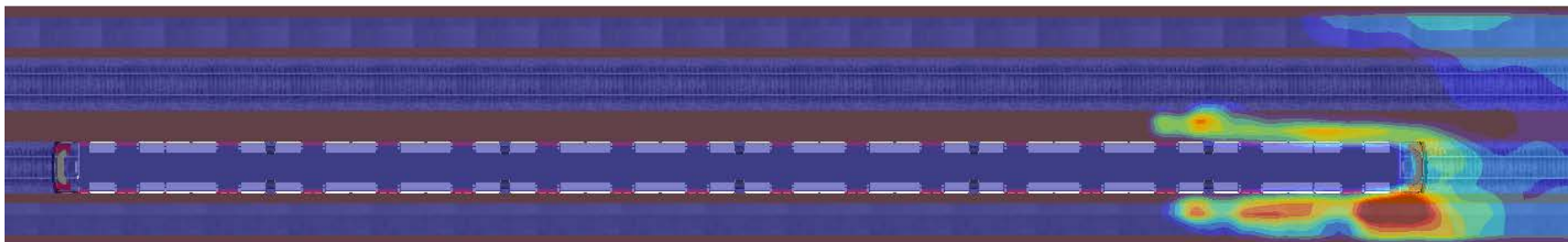
OXYGEN
(kg/kg)



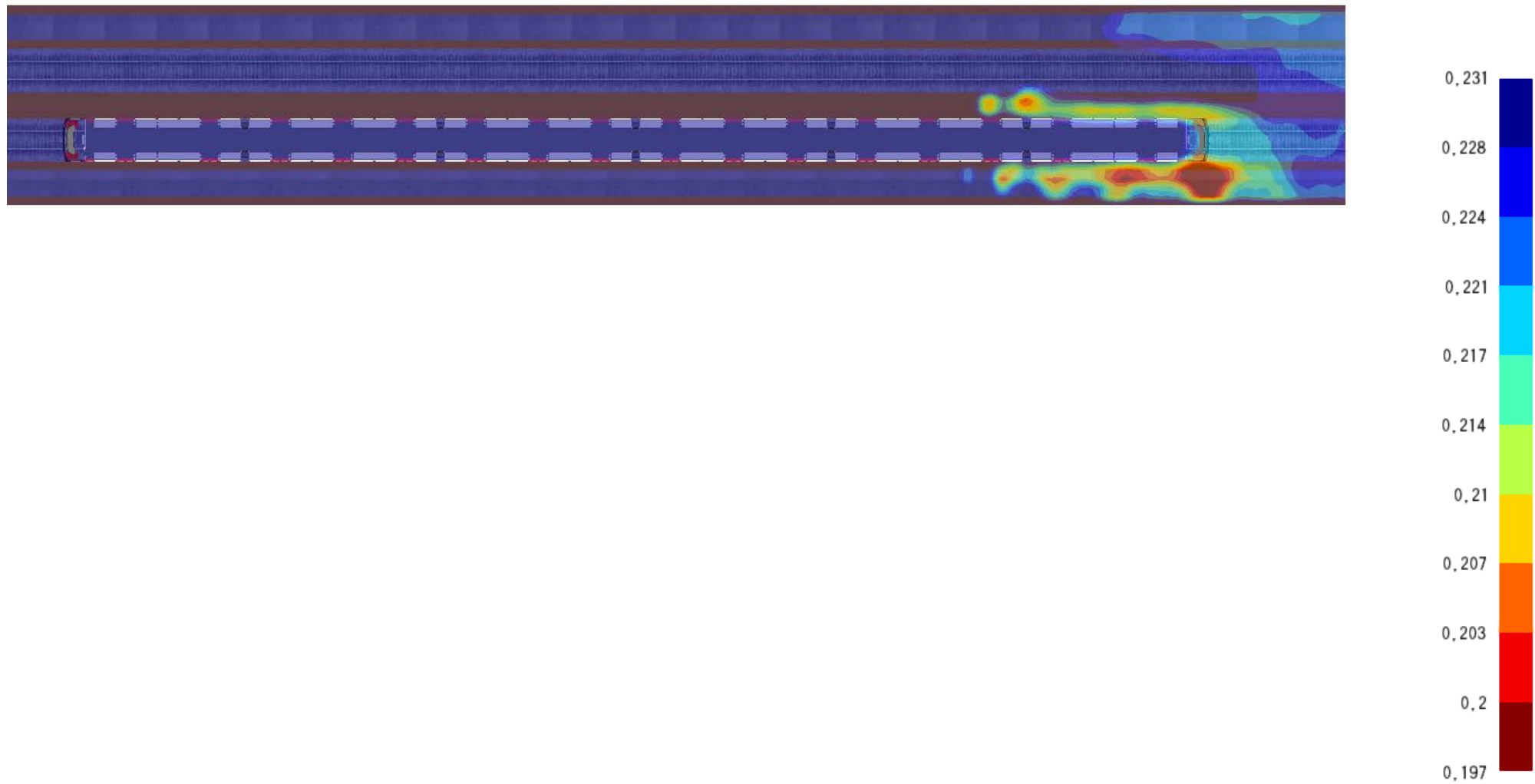
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

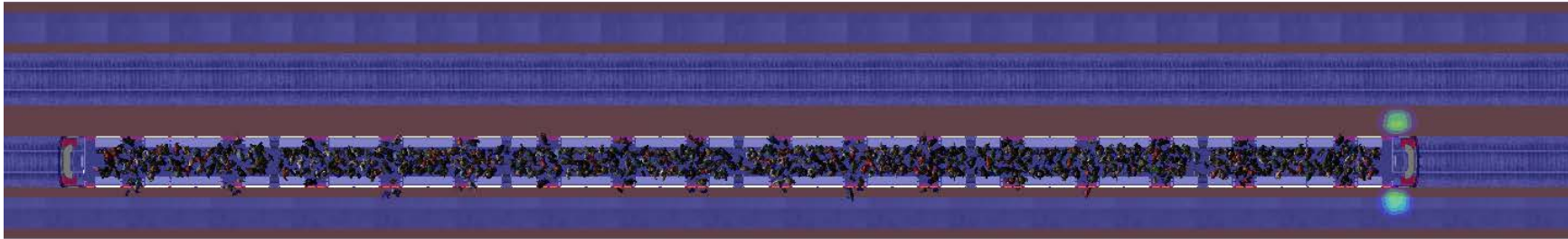


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

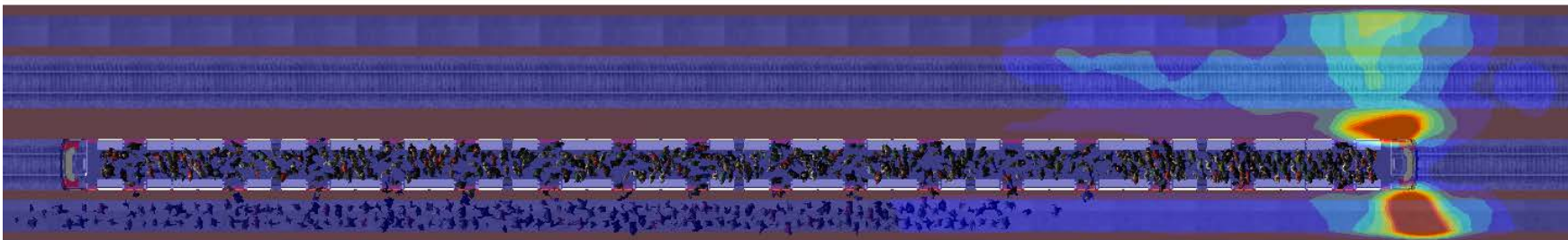


7.4.1.5. Análisis de la concentración de monóxido de carbono a 2 metros sobre la vía de evacuación

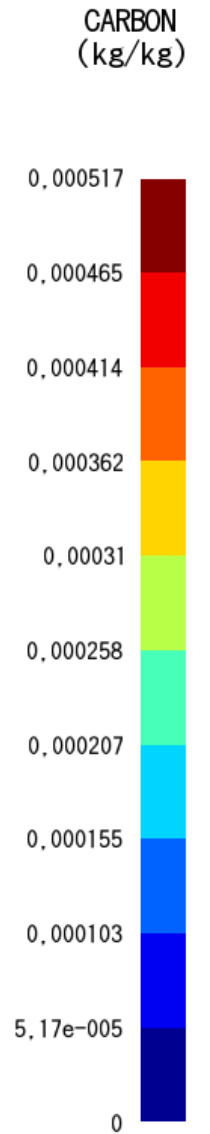
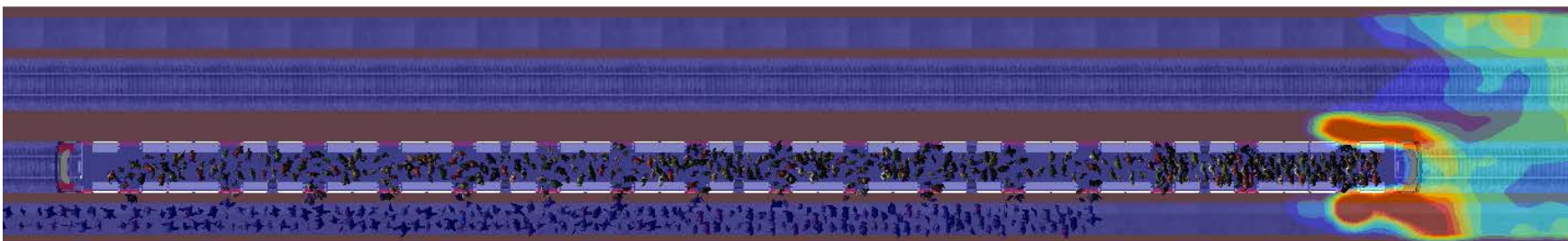
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering. Se aprecia un aumento de la concentración de CO, sin llegar a ser peligrosa.

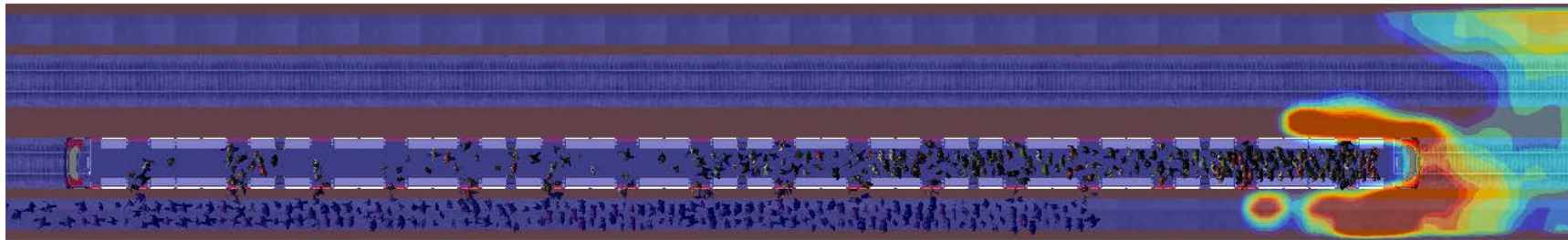


T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia como desaparece la concentración de CO.



Diseño prestacional de túneles en situación de incendio. Modelos FDS. Aplicación a un túnel de metro.

T=300 segundos. El backlayering es controlado.



CARBON
(kg/kg)

0,000517

0,000465

0,000414

0,000362

0,00031

0,000258

0,000207

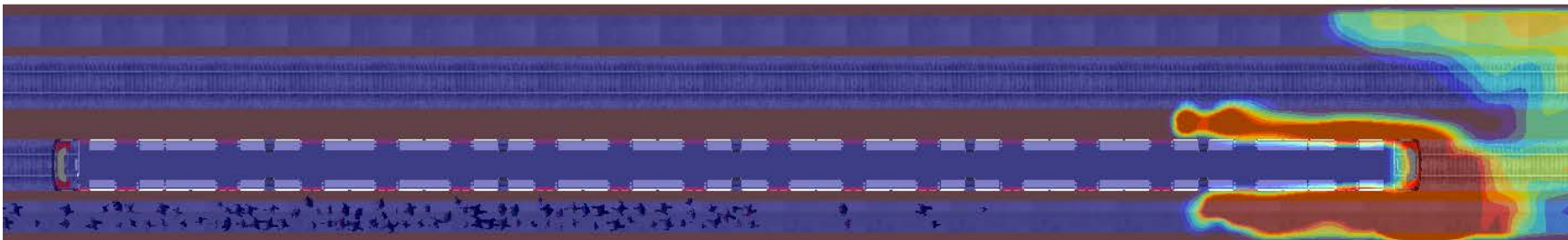
0,000155

0,000103

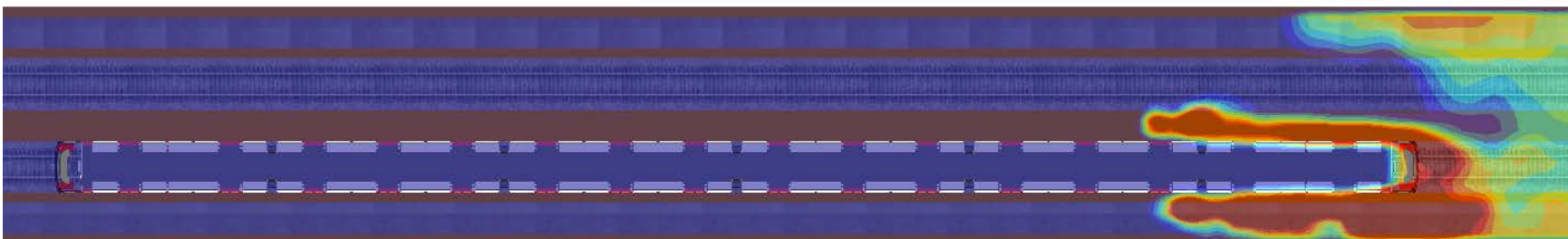
5,17e-005

0

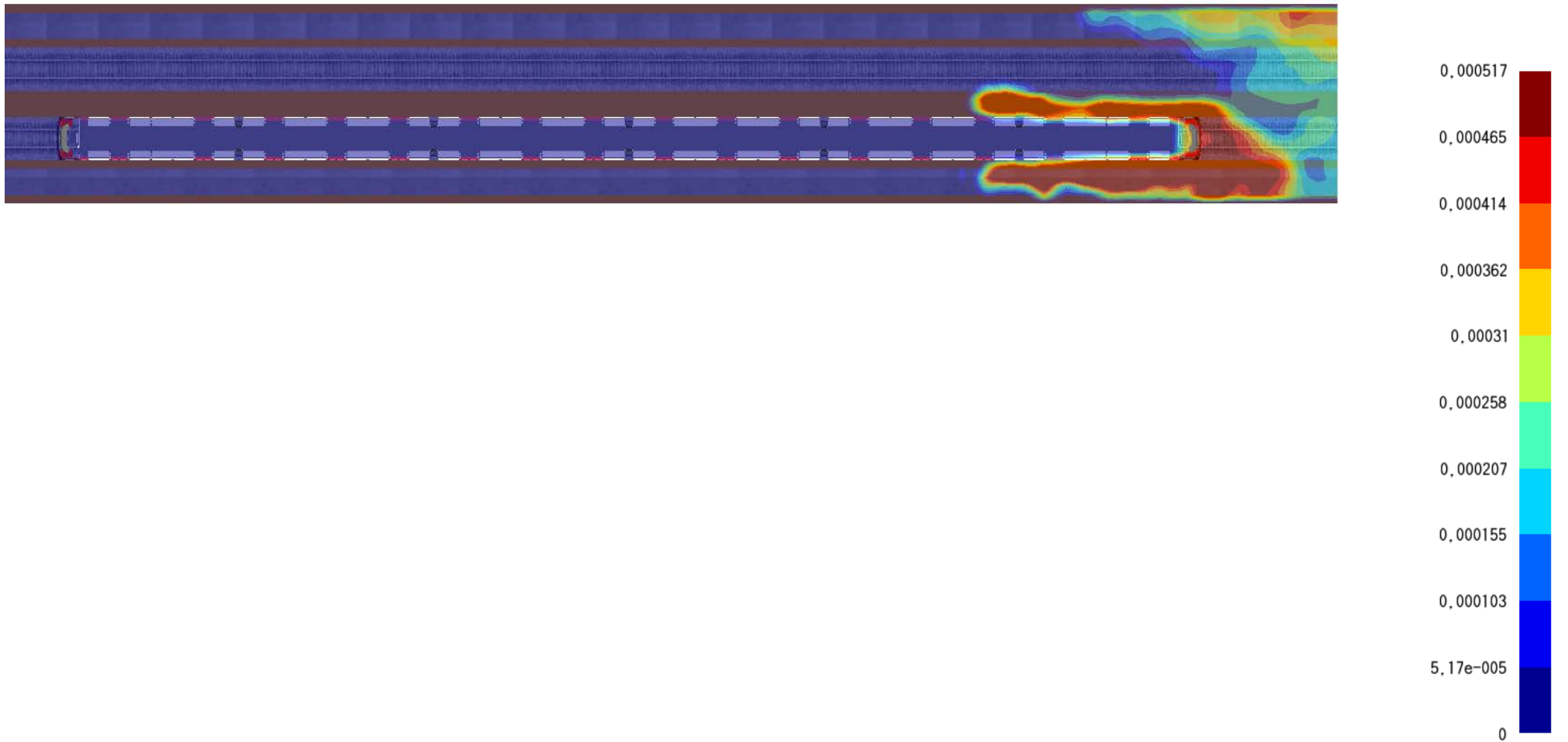
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.

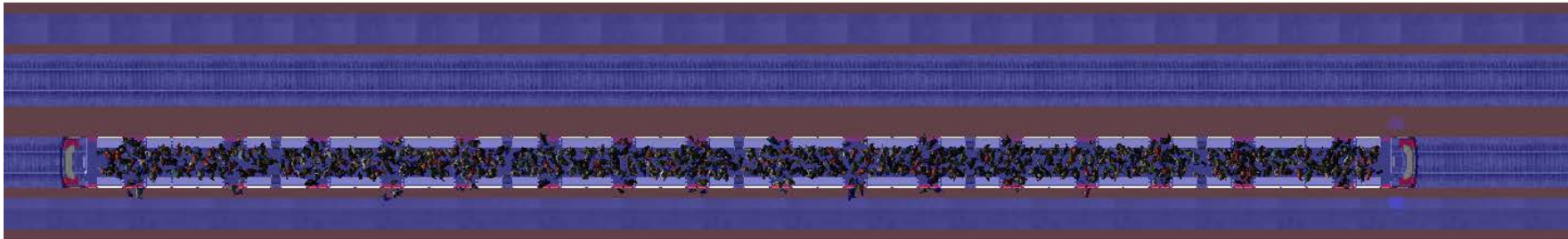


T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

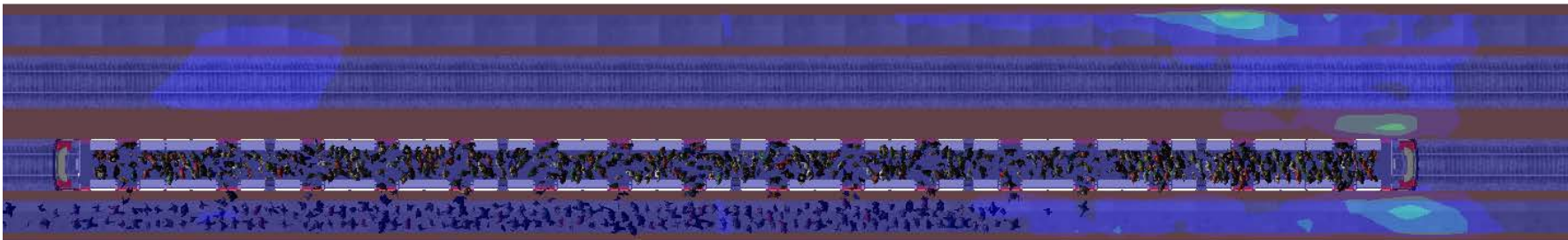


7.4.1.6. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre la vía de evacuación

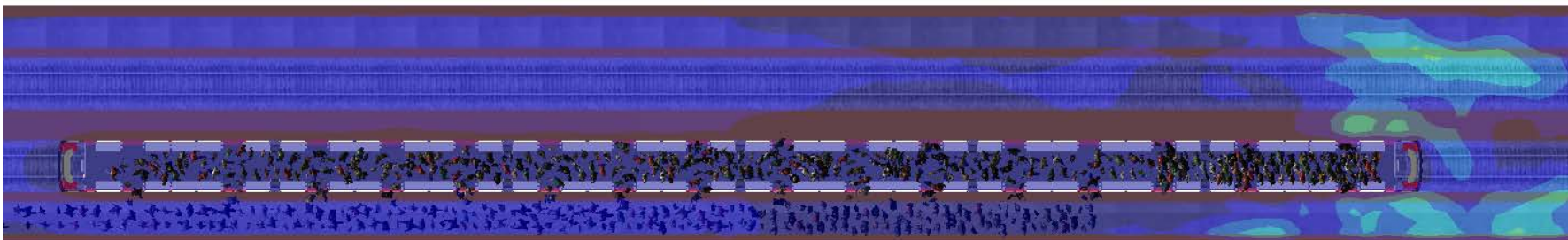
T=5 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones.



T=125 segundos. Debido al tiempo que se emplea para poner el funcionamiento el sistema de ventilación, este aún no ha controlado el backlayering.



T=200 segundos. El sistema de ventilación comienza a controlar el backlayering. Se aprecia un incremento en la velocidad del aire del túnel.



VELOCITY
(m/s)

11,1

10

8,89

7,78

6,67

5,56

4,44

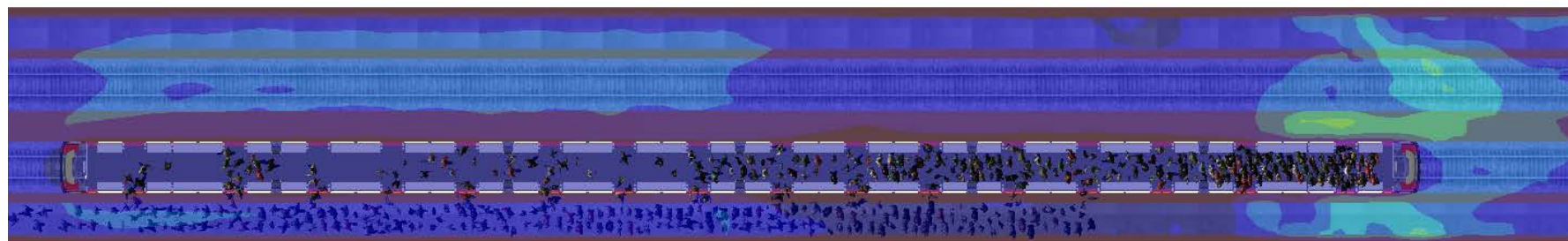
3,33

2,22

1,11

0

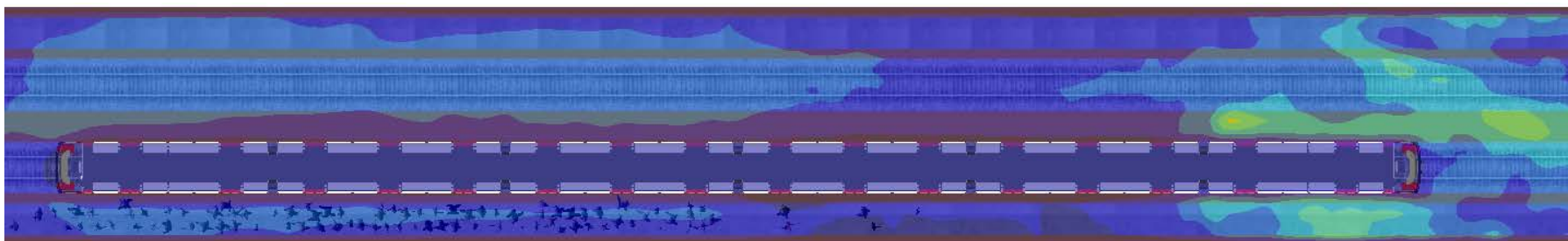
T=300 segundos. El backlayering es controlado.



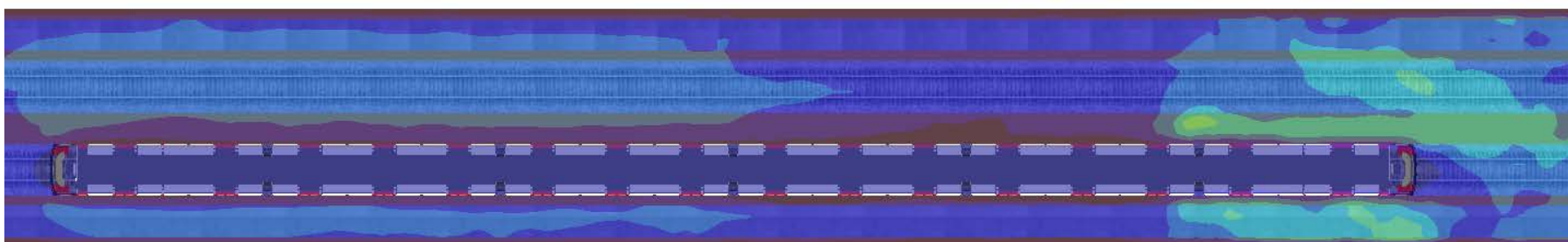
VELOCITY
(m/s)



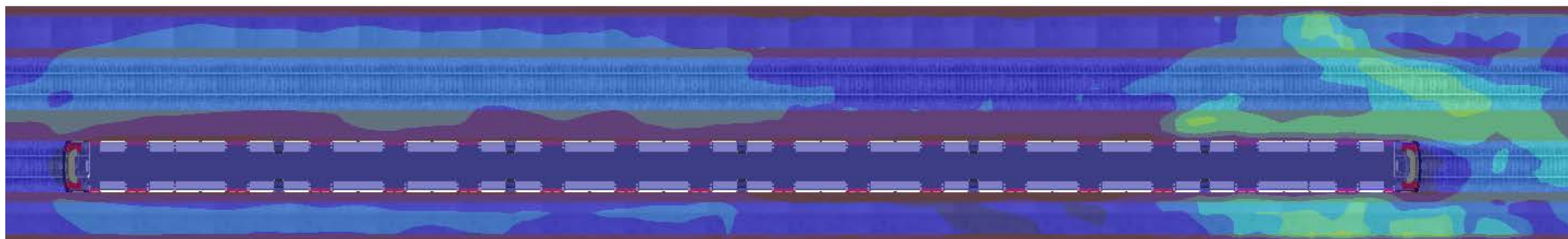
T=600 segundos. El convoy está vacío mientras los últimos ocupantes abandonan sus inmediaciones.



T=720 segundos. El incendio alcanza su potencia máxima. No existe backlayering.



T=1080 segundos. La potencia del incendio comienza a decaer. Durante el desarrollo del incendio se ha controlado el backlayering.

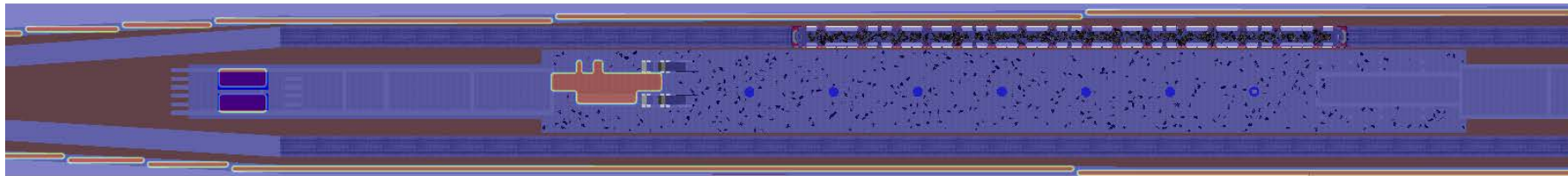


VELOCITY
(m/s)

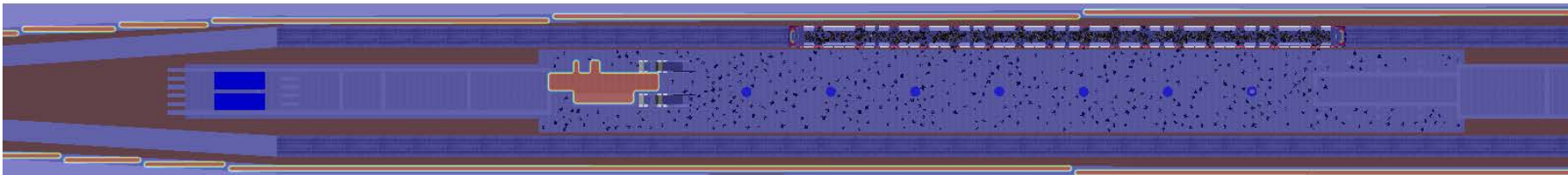


7.4.1.7. Análisis de visibilidad a 2 metros sobre el andén de la estación

T=0 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones y esperando en el andén.



T=60 segundos. Comienza la evacuación.



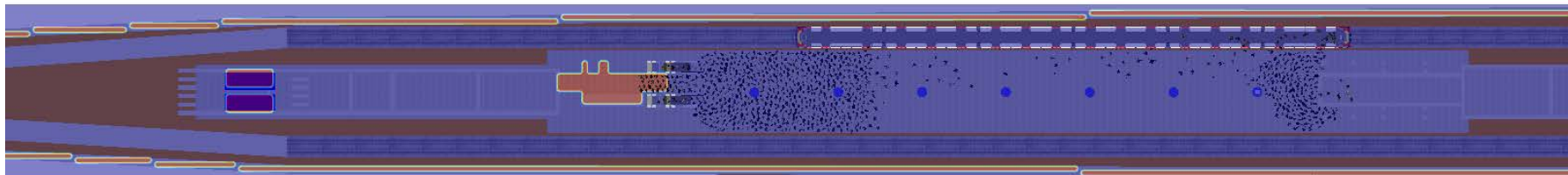
T=120 segundos. Se observa la formación de dos colas en torno a las escaleras de acceso al espacio exterior seguro (resaltado en verde). El tren aún tiene ocupantes.



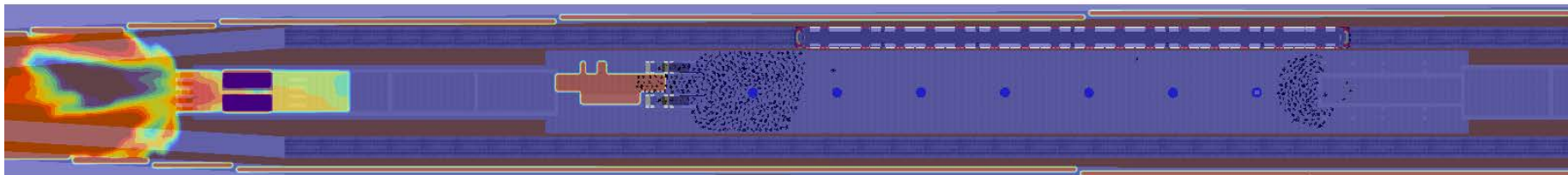
SOOT
(m)



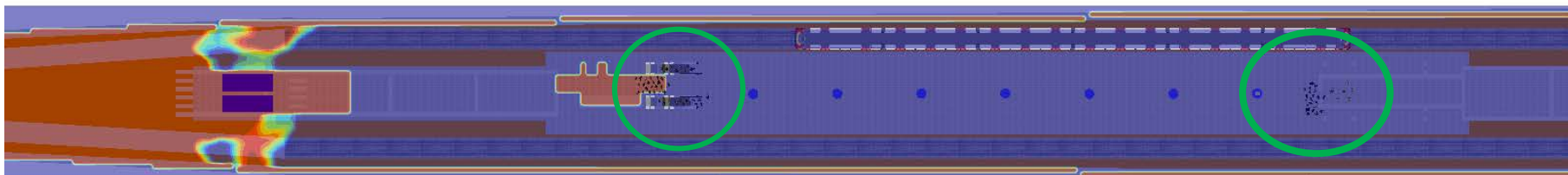
T=180 segundos. El tren se ha vaciado de ocupantes. En el andén los ocupantes hacen cola para subir al espacio exterior seguro.



T=270 segundos. El humo llega a la estación siendo aspirado por el sistema de extracción.

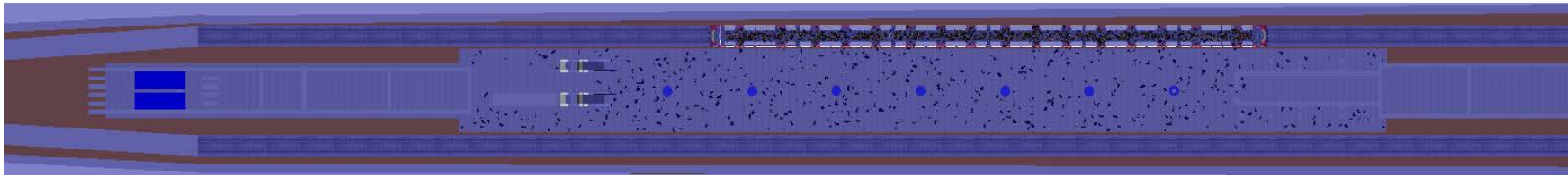


T=390 segundos. Los últimos ocupantes abandonan el andén (resaltado en verde). La evacuación de la estación finaliza a los 453 segundos sin que entre humo o gases calientes a la estación considerándose **RSET = 453 segundos**. Puesto que no ha entrado ni humo ni gases calientes en la estación se realizará únicamente el análisis de la velocidad del aire en la estación.

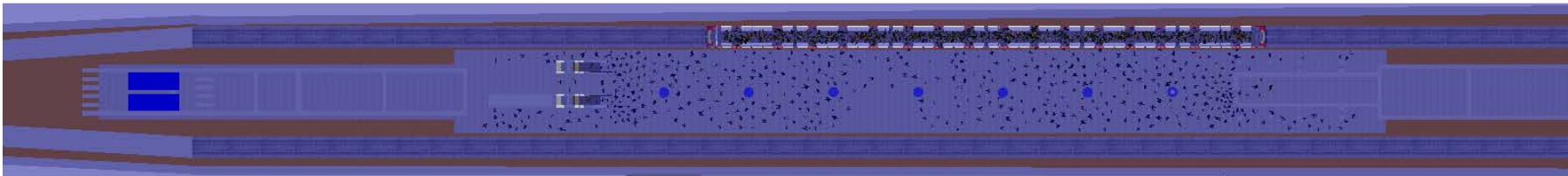


7.4.1.8. Análisis de la velocidad del aire a 2 metros sobre el andén de la estación.

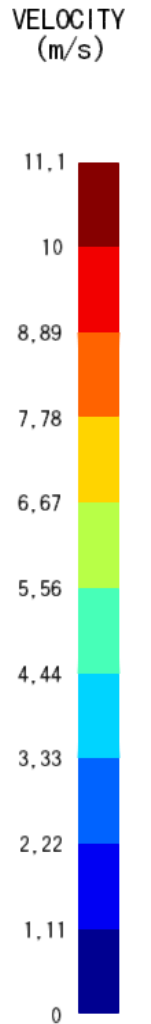
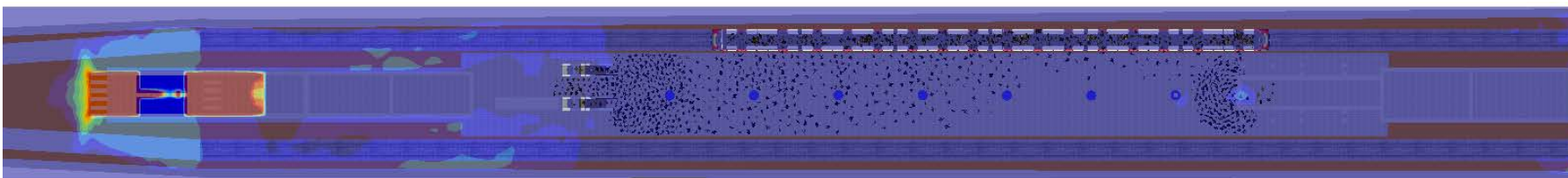
T=0 segundos. Los ocupantes están dentro de los vagones y esperando en el andén.



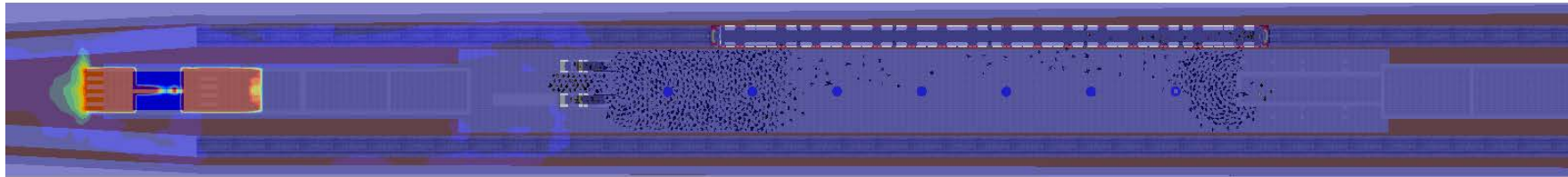
T=60 segundos. Comienza la evacuación. Arranca el sistema de ventilación.



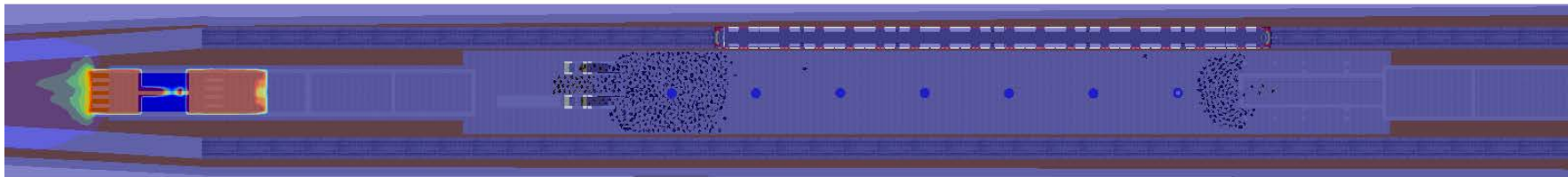
T=120 segundos. Se observan altas velocidades del aire en el entorno del sistema de extracción de la estación en la ubicación de los jet fans. No se alcanza ninguna velocidad excesiva del aire en el andén de la estación.



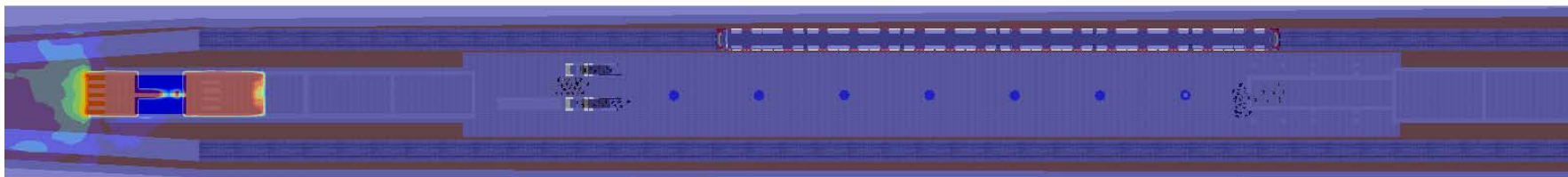
T=180 segundos. El tren se ha vaciado de ocupantes. En el andén los ocupantes hacen cola para subir al espacio exterior seguro.



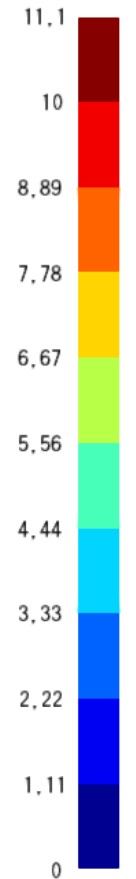
T=270 segundos. El humo llega a la estación siendo aspirado por el sistema de extracción.



T=390 segundos. Los últimos ocupantes abandonan el andén (resaltado en verde). La evacuación de la estación finaliza a los 453 segundos sin que entre humo o gases calientes a la estación considerándose **RSET= 453 segundos**. Puesto que no ha entrado ni humo ni gases calientes en la estación se realizará únicamente el análisis de la velocidad del aire en la estación.



VELOCITY
(m/s)



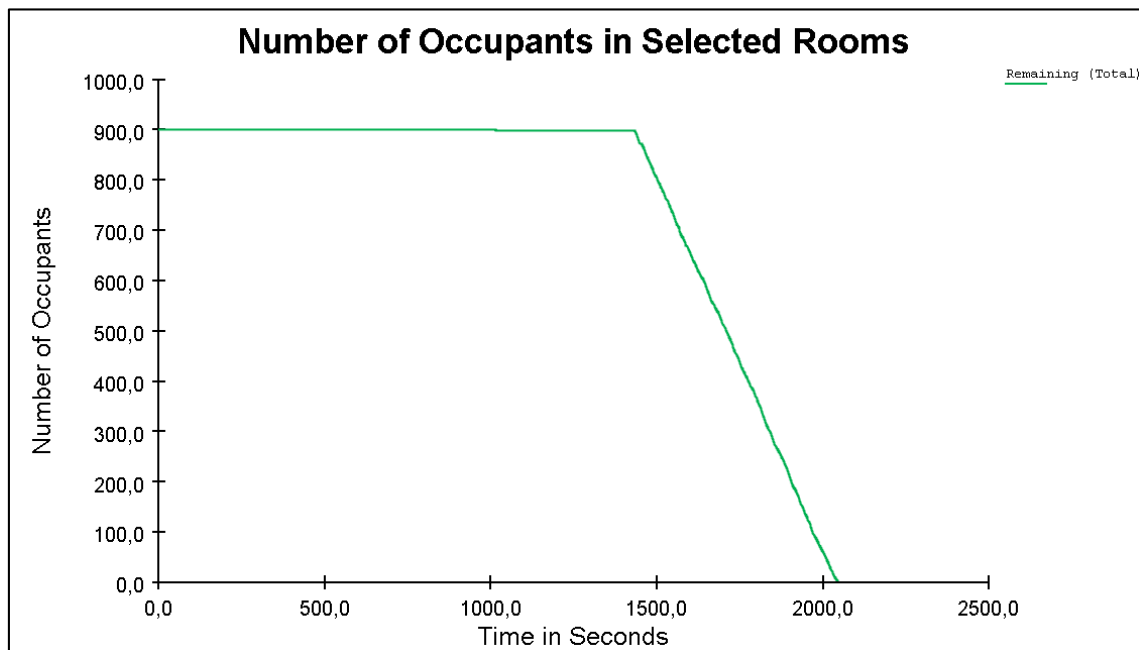
7.4.1.9. Análisis de la evacuación del túnel

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar en 2046,1 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI 7
Ocupantes totales	900
Tiempos de salida	
Mínimo:	1014,9s
Máximo	2046,1 s
Media:	984,1 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	1098,3 m
Máximo	1098,3 m
Media:	1135,0 m

Tabla 54. Sumario de simulación de evacuación en el túnel del EI7

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.

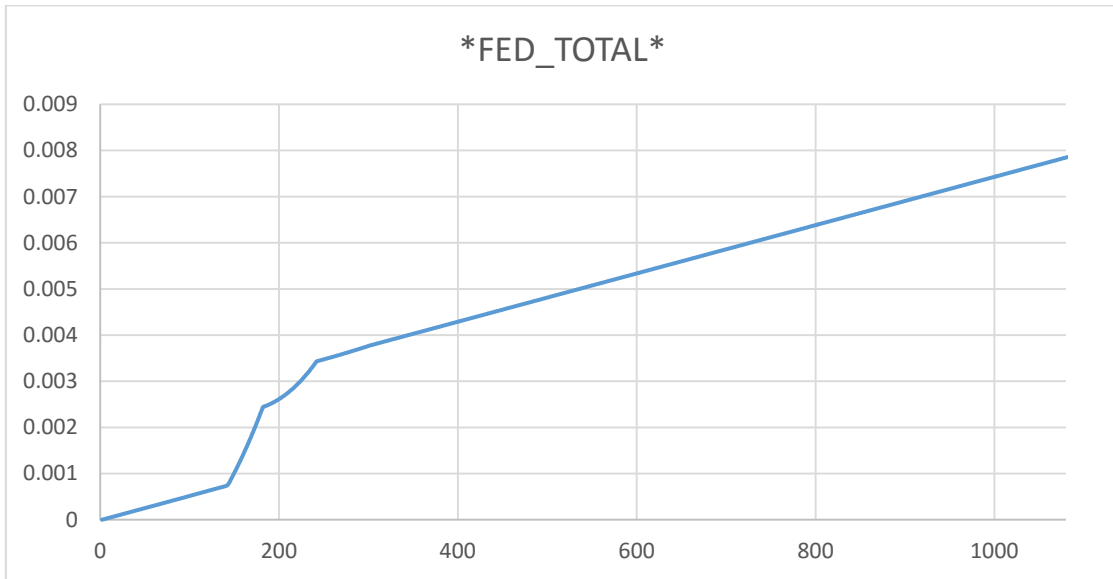


Gráfica 47. Evolución de la ocupación del túnel en EI7.

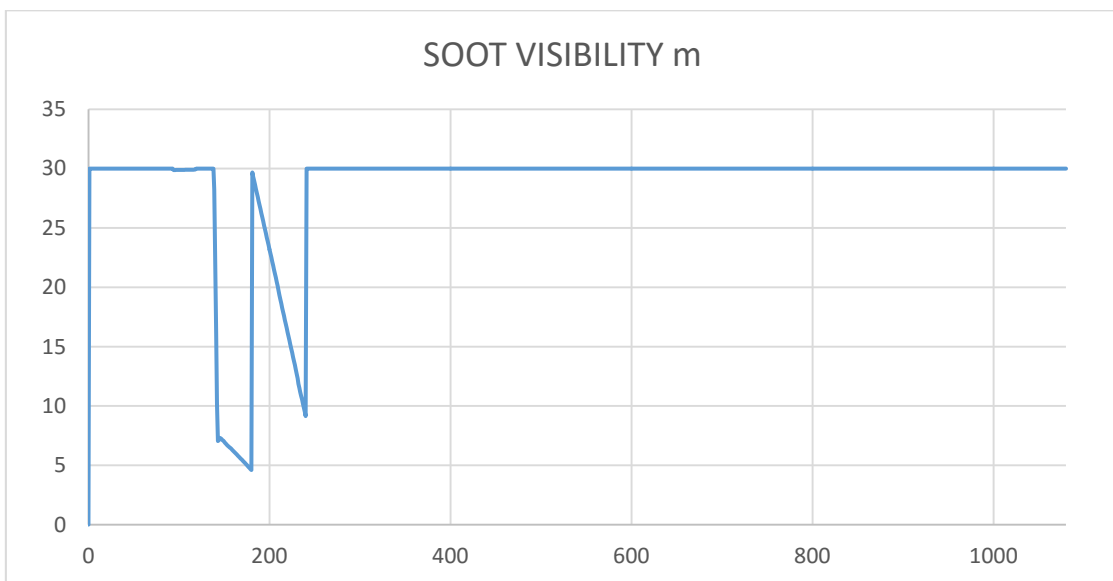
Como se ha podido ver cuándo se ha analizado la visibilidad hasta que debido al tiempo que tarda el sistema de ventilación en ponerse en marcha, alcanzar el régimen permanente y vencer las cargas presentes existe un periodo de tiempo en torno al instante $T=125$ segundos durante los cuales existe una zona con visibilidad inferior a 10 metros.

Para comprobar que la evacuación es posible se ha analizado aquellos ocupantes que se han visto expuestos a esta eventual situación para analizar el FED.

En la siguiente gráfica se muestra la visibilidad y el FED en función del tiempo a los cuales se ven sometidos estos ocupantes:



Gráfica 48. Evolución del FED de un ocupante expuesto al humo.



Gráfica 49. Evolución de la visibilidad de un ocupante expuesto al humo.

Como puede verse la exposición al humo genera un rápido incremento del FED, sin embargo globalmente el valor de FED alcanzado debido a la duración de la exposición es mucho menor del valor límite de FED=0.3

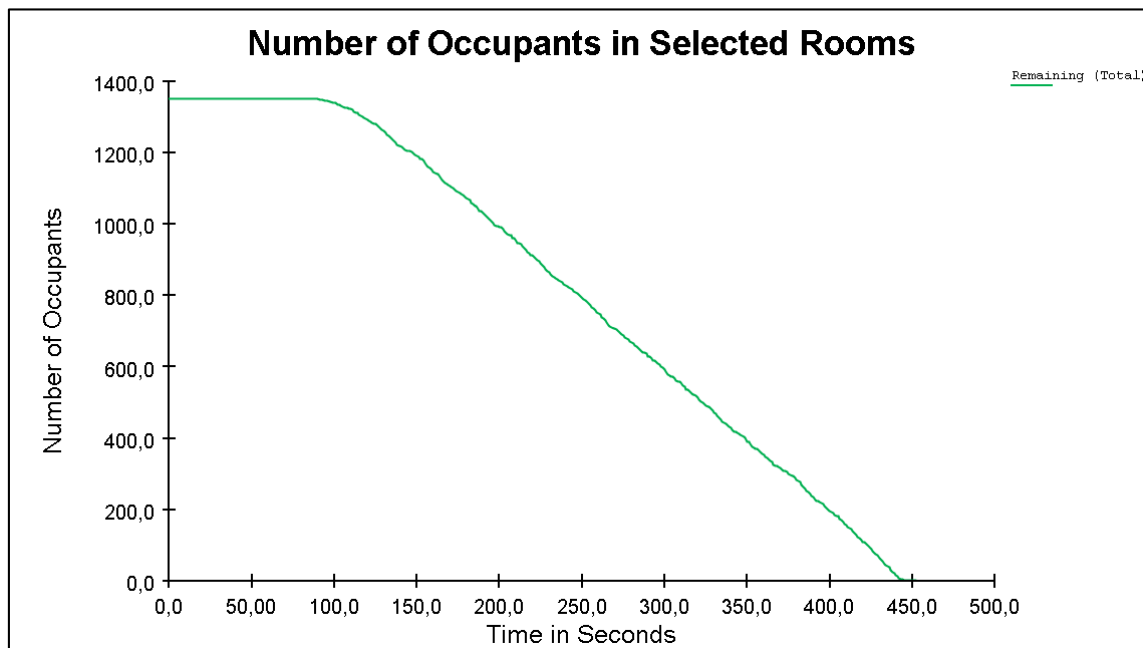
7.4.1.10. Análisis de la evacuación de la estación

Como ha podido comprobarse se han cumplido todos los criterios de aceptación estudiados permitiendo la evacuación de los ocupantes en condiciones de seguridad. En particular la evacuación ha tenido lugar 452,8 segundos. A continuación se presenta el sumario del cálculo de la simulación de evacuación:

Simulación:	EI 7E
Ocupantes totales	1350
Tiempos de salida	
Mínimo:	87,1 s
Máximo	452,8 s
Media:	278,3 s
Distancia recorridas	
Mínimo:	31,6 m
Máximo	153,2 m
Media:	81,9 m

Tabla 55. Sumario de simulación de evacuación en la estación del EI7

A continuación se presenta la evaluación de la ocupación en el túnel.



Gráfica 50. Evolución de la ocupación de la estación en EI7.

7.4.1.11. Conclusión del Escenario de Incendio 7

A través de la simulación se ha comprobado que el tiempo necesario para realizar una evacuación en condiciones de seguridad de la ocupación del túnel es de 2046,1 s segundos (**RSET=2046,1 s segundos**).

Por otra parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio. Si llegado a este punto el sistema de ventilación de emergencia controla el backlayering se puede asumir que el **ASET es ilimitado para el túnel**.

Por otra parte se comprueba que el tiempo requerido para evacuar la ocupación de la estación es de 452,8 segundos en condiciones de salubridad con lo que se concluye que **RSET=452,8 segundos y ASET>RSET para la estación**.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.1 de la meta Seguridad de Vida tal que **ASET>RSET**.

Partiendo de la misma consideración de que parte la simulación finaliza a los 1080 segundos cuando comienza a decaer la potencia del incendio, se asume que el ASRT es ilimitado y por tanto mayor de 60 minutos.

Por lo tanto se cumple el objetivo 1.2 de la meta Seguridad de vida tal que **ASRT>60'**.

Puesto que se cumplen todos los objetivos de la meta Seguridad de Vida, queda validado el Escenario de Incendio 1

A continuación a través de una tabla resumen se comprueba si se han verificado los objetivos de la meta Seguridad de Vida a través del estudio de los objetivos ASET>RSET y mediante la comprobación del que ASRT>60 minutos.

Objetivo	Criterio	Verificación del criterio de aceptación
ASET>RSET	[O ₂]> 18%	Cumple
	[CO]<450 ppm	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple
	Temperatura< 60°C	Cumple
	Velocidad del aire< 10 m/s	Cumple
ASRT>60'	ASET ilimitado	Cumple

Tabla 56. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

7.5. Resultados y conclusiones

A continuación se plantea una tabla resumen donde para cada escenario de incendio se recogen los resultados obtenidos.

Objetivo	Criterio	EI 1	EI 2	EI 3	EI 4	EI 5	EI 6	EI 7
ASET > RSET	[O ₂] > 18%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
	[CO] < 450 ppm	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
	Visibilidad > 10 m	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
	Temperatura < 60°C	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
	Velocidad del aire < 10 m/s	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
ASRT > 60'	ASET ilimitado	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Tabla 57. Resumen de cumplimiento de criterios de aceptación.

Simulación:	EI 1	EI 2	EI 3	EI 4	EI 5	EI 6	EI 7T	EI 7E
Ocupantes totales	1350	900	900	900	900	900	900	1350
Tiempos de salida (s)								
Mínimo:	144,6	1378,3	579,5	944,4	1014,9	508,7	1014,9	87,1
Máximo:	779,3	2586,3	1416,2	1961,9	2046,1	1331,5	2046,1	452,8
Media:	478,8	2231,7	1109	1611,8	1738,3	984,1	984,1	278,3
Distancia recorridas (m)								
Mínimo:	97,4	1513,2	597,5	1012,6	1098,3	513,3	1098,3	31,6
Máximo:	174,9	1596,9	669,7	1101,5	1178,2	597,7	1098,3	153,2
Media:	133,7	1555,8	633,8	1056,0	1135,0	555,8	1135,0	81,9

Tabla 58. Resumen tiempos y distancia de evacuación.

En los escenarios de incendio tipo planteados se han verificado todos los criterios de aceptación de los objetivos de la meta Seguridad de Vida validándose el diseño de prueba como diseño final.

El diseño final del sistema de ventilación del túnel se obtuvo en el capítulo 5 Ventilación empleándose el Diseño de prueba 2. En este diseño de prueba se divide la longitud del túnel en 6 sectores de 250 metros, instalándose dos jet fans en paralelo en los sectores indicados mientras que en el resto de sectores se mantiene una configuración de un único jet fan central, planteándose la siguiente configuración longitudinal:

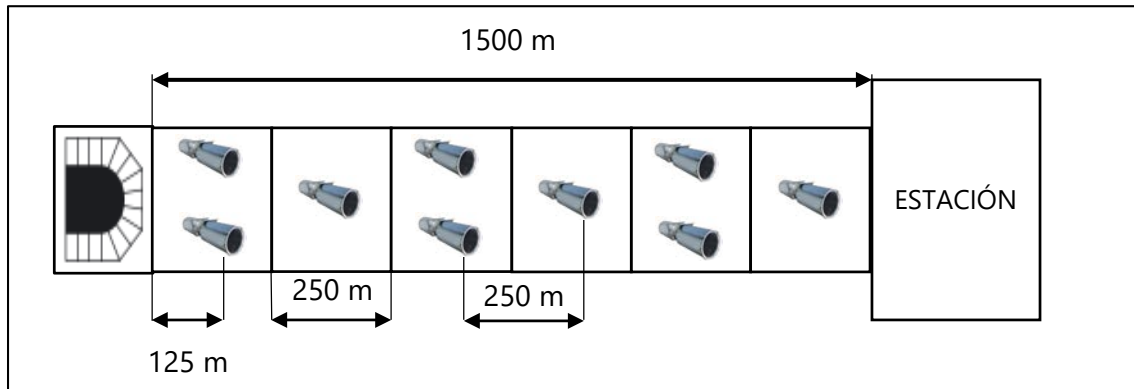


Figura 222. Configuración diseño de prueba.

La separación entre jet fans será de 250 metros entre sí superior a los 103 metros del predimensionado y a una distancia del portal de entrada como de la estación de 125 metros. Los jet fans en paralelo se instalarán con una distancia entre ejes de 7,5 metros tal y como se presenta en la siguiente sección:

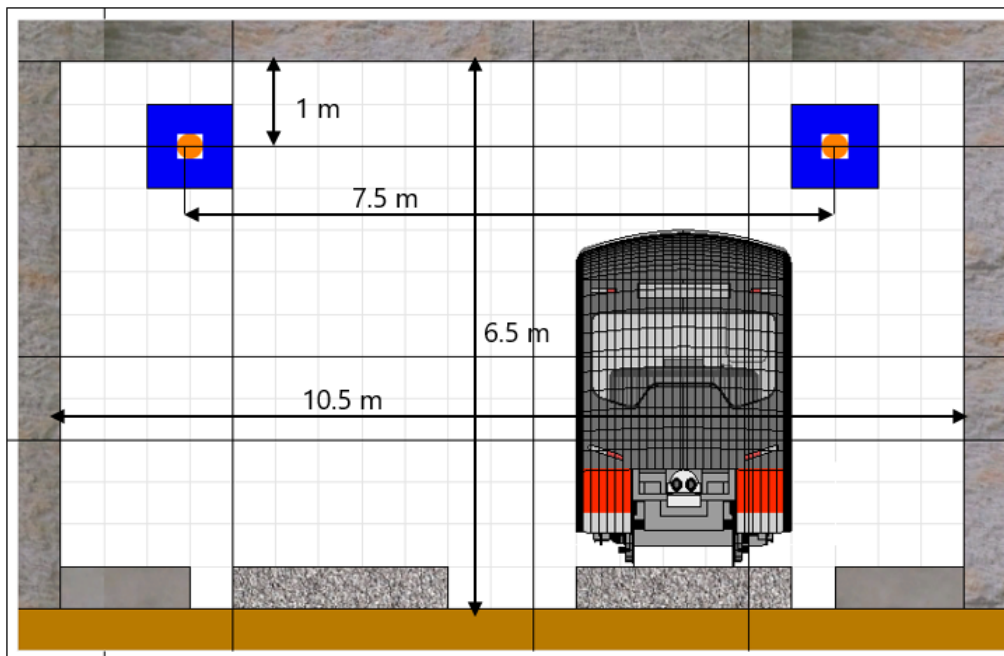


Figura 223. Sección del diseño de prueba con jet fans en paralelo.

Los tramos de túnel con un único jet fan presenta la siguiente sección:

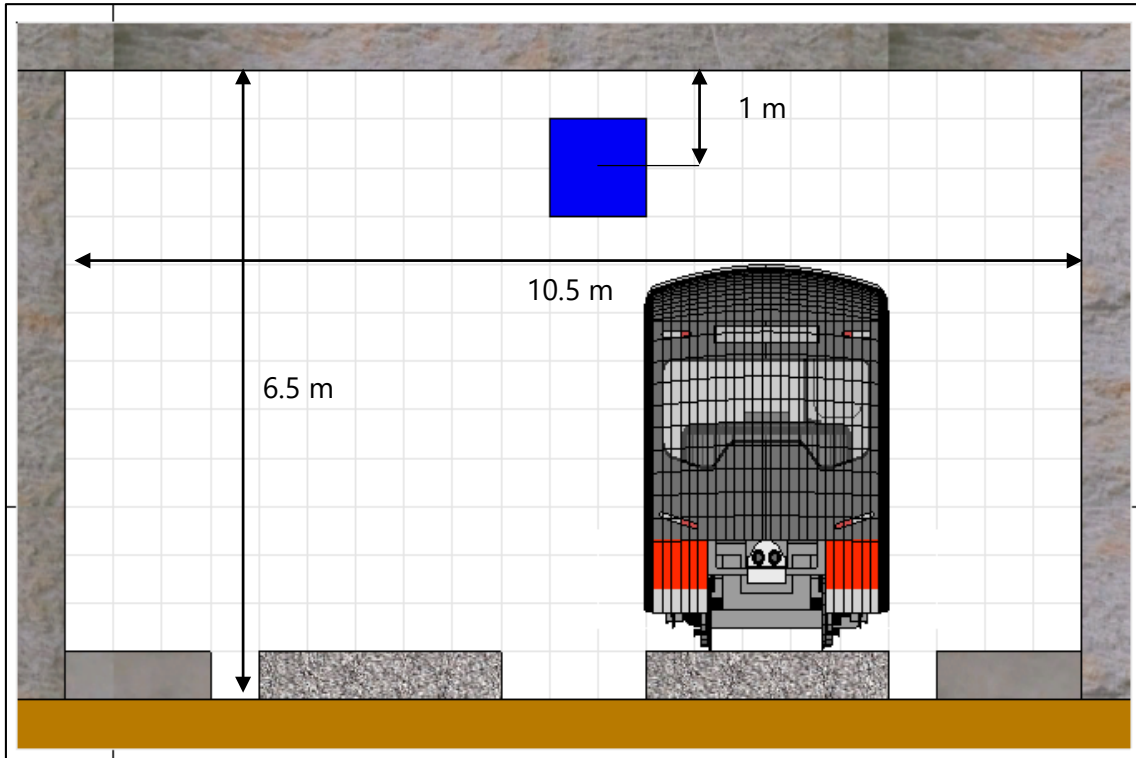


Figura 224. Sección del diseño de prueba.

Del centro del jet fan a la superficie más próxima (el techo del túnel) hay un metro de distancia. El jet fan se monta a una altura de 5,5 metros sobre la plataforma de la vía.

Los ventiladores a instalar son 9 ventiladores axiales reversibles modelo JZR 7-11/2 de la marca Zitron.

Sus características son las siguientes:

MODELO TYPE	Diam. Diam. D mm.	Diam. Diam. d mm.	Longit. Length L mm.	Longit. Length L1 mm.	Longit. Length L2 mm.	Longit. Length L3 mm.	Peso Weight (Kg)*
JZR 5	700	500	1600	600	400	600	275
JZR 6	800	600	2700	1025	650	1025	500
JZR 7	900	700	2700	1025	650	1025	650
JZR 9	1100	900	2700	1025	650	1025	750
JZR 10	1200	1000	2700	1025	650	1025	850

Tabla 59. Características geométricas de la serie de ventiladores JZR

MODELO TYPE	Caudal Air Flow m ³ /s	Velocidad del chorro Jet Velocity m/s	Empuje Teórico Theoretical Thrust N.	Empuje Nominal Nominal Thrust N.	Potencia Absorbida Input Power Kw.	Potencia Instalada Installed Power Kw.	Niv. Sonoro a 10 mts. Noise level at 10 mts. dB(A)
JZR 5-5.5/2	5.5	28.0	185	168	4.9	5.5	67
JZR 5-7.5/2	6.3	32.1	243	221	7.3	7.5	71
JZR 6-7.5/2	8.0	28.3	272	258	6.6	7.5	67
JZR 6-11/2	9.3	32.9	367	349	10.4	11.0	70
JZR 6-15/2	10.3	36.4	450	428	14.1	15.0	72
JZR 7-11/2	11.3	29.4	398	380	9.9	11.0	68
JZR 7-15/2	12.7	33.0	503	481	14.1	15.0	70
JZR 7-18.5/2	13.5	35.1	569	543	16.9	18.5	71
JZR 7-22/2	14.5	37.7	656	626	20.9	22.0	73
JZR 9-15/4	17.6	27.7	585	558	13.7	15.0	71
JZR 9-18.5/4	19.0	29.9	681	647	17.2	18.5	72
JZR 9-22/4	20.4	32.1	785	746	21.3	22.0	74
JZR 10-15/4	20.7	26.4	655	626	14.4	15.0	70
JZR 10-22/4	23.0	29.3	809	768	19.7	22.0	72
JZR 10-30/4	26.3	33.5	1057	1004	29.5	30.0	74
JZR 10-37/4	28.0	35.7	1198	1139	35.6	37.0	75

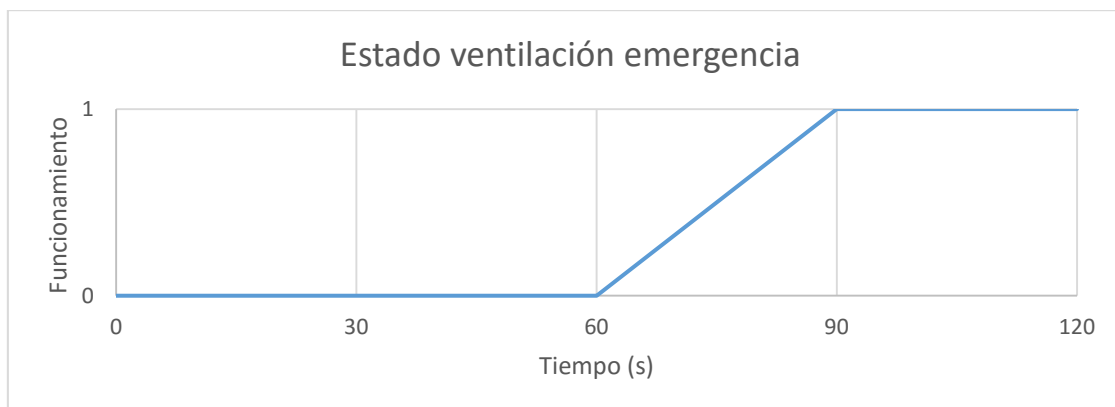
Tabla 60. Propiedades de la serie de ventiladores JZR.

La secuencia de funcionamiento de los ventiladores de acuerdo al establecido con la empresa gestora de la línea de metro se modela de la siguiente manera:

T=0 segundos. El tren está detenido y comienza el incendio.

T=60 segundos. Tras la detección del incendio por parte de un miembro de la empresa gestora de la línea de metro, se da la alarma al centro de control y se procede al arranque del sistema de ventilación de emergencia.

T=90 segundos. El sistema de ventilación de emergencia alcanza el régimen permanente del funcionamiento.



Gráfica 51. Arranque del sistema de ventilación de emergencia.

De los datos expuestos con anterioridad se puede concluir que, a mayor distancia de la salida a la zona segura, el RSET aumenta.

Por otra parte de la observación de los diferentes escenarios de incendio planteados en el túnel se puede concluir que el tiempo necesario para evacuar a los pasajeros del convoy de metro, con una ocupación de 900 personas de las cuales el 40% son varones adultos, el 40% son mujeres adultas, el 10% son niños y el 10% restante son ancianos, es de unos 600 segundos. A partir de los 600 segundos el convoy de metro queda libre de pasajeros los cuales se dirigen hacia zona segura a través de las vías de evacuación libres de gases calientes y humos.

Sin embargo, en el escenario de incendio 7 se puede observar que el tiempo que tarda en vaciarse el convoy de metro parado en la estación con una ocupación de también 900 personas, y además con una ocupación en el andén de 450 personas, con la misma proporción de tipos de población que en los demás escenarios, es de entorno a los 180 segundos.

Esto es debido a que la vía de evacuación mide 1,5 metros de ancho y solo tiene una dirección posible de escape, actuando como cuello de botella, mientras que el andén mide 9,8 metros de ancho contando en sus dos extremos con salidas hacia el exterior.

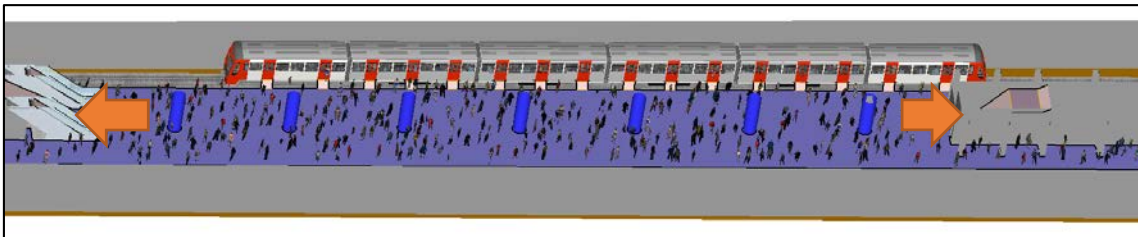


Figura 225. Imagen del andén con sus dos escaleras de acceso al exterior en cada extremo.

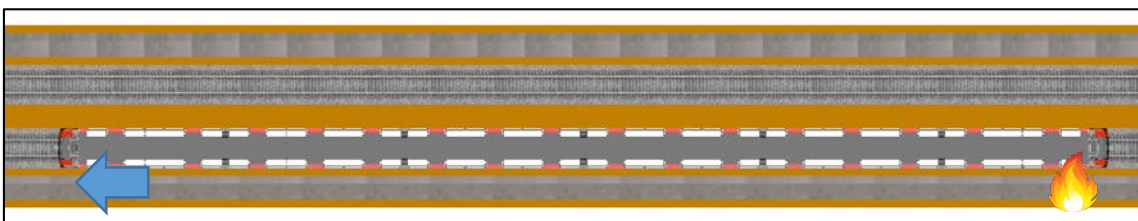


Figura 226. Imagen la vía de evacuación en el túnel.

Se concluye que la aplicación de la metodología del diseño prestacional permite encontrar una solución que verifica las metas de un diseño prescriptivo, sin necesidad de cumplir las prescripciones del diseño prescriptivo.

Valencia 15 de Septiembre de 2016

El autor de trabajo final de master

Fdo. Antonio Hospitaler Pérez

8. Bibliografía

- [1] Poon L, Lau R, "Fire Risk in Metro Tunnels and Stations," 2005.
- [2] Schütz D, "Fire protection in tunnels: Focus on road & train tunnels," 2014.
- [3] Hong Won H, "The progress and controlling Situation of Daegu Subway Fire Disaster," Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- [4] *Instrucción sobre seguridad en túneles de 20/06/2006 IST2006*, M. d. Fomento, 2006.
- [5] *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fifth ed.: Springer, 2016.
- [6] *Guía de Ingeniería SFPE de Protección contra Incendios Basada en el Eficacia. Análisis y diseño de edificios.*: CEPREVEN, 2003.
- [7] Hurley Morgan J., Resenbaum E.R., *Performance-Based Fire Safety Design*: CRC Press, 2015.
- [8] *Código Técnico de la Edificación*, 2013.
- [9] *NFPA 130 Estandar sobre Sistemas Ferroviarios para Transporte de Vehículos y Viajeros sobre guías Fijas*, 2007.
- [10] Purser A.D., "Review of Human Response to Thermal Radiation," 1997.
- [11] McGrattan K, Hostikka, Simo, McDermott, Randall, Floyd, Jason, Weinschenk, Craig, and Overholt, Kristopher, *Fire Dynamics Simulator*, Sixth Edition ed.: NIST, 2016.
- [12] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, Floyd J, Weinschenk C, Overholt K, *Fire Dynamics Simulator User's Guide*: NIST, 2015.
- [13] *CFPA-E No 19:2009 Fire safety engineering concerning evacuation from buildings*: Confederation of Fire Protection Associations in Europe, 2009.
- [14] *Ingeniería Geológica. Excavaciones Subterráneas*.
- [15] White N, "Fire Development in Passenger Trains," Master of Engineering, Centre for Environment Safety and Risk Engineering, Victoria University, Victoria University Australia, 2010.
- [16] Ingason H., Kumm M., Nilsson D., Lönnemark A., Claesson A., Li Y. Z., Fridolf K., Åkerstedt R., Nyman H., Dittmer T., Forsén R., Janzon B., Meyer G., Bryntse A., Carlberg T., Newlove-Eriksson L., Palm A., "THE METRO PROJECT."
- [17] Chiam B. H, "Numerical Simulation of a Metro Train Fire," Master of Engineering in Fire Engineering, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 2005.
- [18] Chow W.K., "Fire Safety of the Railway Systems," *International Journal on Architectural Science* 2004.

- [19] Park H. J., "An Investigation into mysterious questions arising from the Daegu underground railway arson case through fire simulations & small-scale fire tests," Daegu, Korea2004.
- [20] Workpackage, FIT, "Design Fire Scenario's," 2003.
- [21] Dowling V.P., Delichatsios M. A., "Call for More Realistic Rail Fire Assessments," 2001.
- [22] Dowling V.P., White N., "Fire Sizes in Railway Passenger Saloons," Daegu, Korea2004.
- [23] 130, NFPA, *Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*, 1983.
- [24] *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego*, AENOR, 2004.
- [25] Simth E.E., "Transit Vehicle Material Specification Using Release Rate Tests for Flammability and Smoke, Phase 1 Report.," Columbus, Ohio1976-10 1976.
- [26] Peacock R.D., Braun E, "Fire Safety of Passenger Trains; Phase I: Material Evaluation (Cone Calorimeter)," 1999.
- [27] Duggan G. J., "Usage of ISO 5660 Data in UK Railway Standards and Fire Safety Cases ", Rapra Technology Ltd, Shawbury, Shropshire, UK.1997.
- [28] Dowling V. P, Delichatsios M. A., "Material Flammability in Train Saloons," Hong Kong2000.
- [29] Hasemi Y., Moriyama S., Nam D.,Tanaka S.,Okazawa N.,Ding W., "Fire Safety Background for Japanese Underground Railway Systems and Field Experiments on the Smoke Movement in Subway Stations," Edinburgh, Scotland2004.
- [30] Ingason H, Li Y.Z, Lönnemark A, *Tunnel Fire Dynamics*, 2015.
- [31] Brabauskas V, *COMP2--A Program for Calculating Post-Flashover Fire-Temperatures*. Washington, D.C. 20234: National Bureau of Standards, 1979.
- [32] Capote J.A., Alvear D, Abreu O.V., Lázaro M, Espina P, "Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios," *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseño en Ingeniería*2008.
- [33] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, Floyd J, Weinschenk C, Overholt K, *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Sixth Edition* ed. vol. Volume 1: Mathematical Model: NIST, 2015.
- [34] Li Y.Z., "CFD modelling of fire development in metro carriages under different ventilation conditions," 2015.
- [35] *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*: National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers, 2002.
- [36] Staffansson L, "Selecting design fires," Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Sweden2010.
- [37] Ingason H, Li Y. Z., Lönnemark A, *Tunnel Fire Dynamics*.
- [38] Ingason H., "DESIGN FIRES IN TUNNELS," 2006.

- [39] Borchellini R, "HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN PARA EL DISEÑO DE LA VENTILACIÓN DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS," Santiago, Chile 2012.
- [40] *Subway Environmental Design Handbook. SES Version 4.1, Part I Users Manual* vol. II, 2002.
- [41] Tarada F, "New Perspectives on the Critical Velocity for Smoke Control," *4th International Symposium on Tunnel Safety and Security*, 2010.
- [42] Sahlin P, "1D models for thermal and air quality prediction in underground traffic systems," 2006.
- [43] "Smoke and heat control systems - Part 5: Guidelines on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems," EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION 2005.
- [44] Shorab J, "Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 23, pp. 160-170, 2008.
- [45] Suzuki K, Tanaka T, Harada K, "Tunnel Fire Simulation Model with Multi-Layer Zone Concept", University, Katsura Campus, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan 2006.
- [46] Woodburn P.J., Britter R.E., "CFD Simulations of a Tunnel Fire Part I," *Fire Safety Journal*, vol. 26, 1996.
- [47] Woodburn P.J., Britter R.E., "CFD Simulations of a Tunnel Fire Part II," *Fire Safety Journal*, vol. 26, 1996.
- [48] Ang C.D., Rein G, Peiro J, Harrison R, "Simulating longitudinal ventilation flows in long tunnels: Comparison of full CFD and multi-scale modelling approaches in FDS6," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 52, pp. 119-126, 2016.
- [49] McGrattan K, Hammis A, "Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire," *NIST*, 2002.
- [50] Jojo S.M., Chow W.K., "Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 18, pp. 435-452, 2003.
- [51] Van Maele K, Merci B, "FIRE SAFETY CASE STUDY OF A RAILWAY TUNNEL: SMOKE EVACUATION," *THERMAL SCIENCE*, vol. 11, pp. 207-222, 2007.
- [52] WHwang C.C., Edwards J.C., "The critical ventilation velocity in tunnel fires .A computer simulation," Pittsburgh Research Laboratory.
- [53] *NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, 2011.
- [54] Heskestad G, "Physical modeling of fire," *Journal of Fire and Flammability*, vol. 6, 1975.
- [55] Thomas P.H., "Movement of smoke in horizontal corridors against an air flow," *The Institution of Fire Engineers Quarterly*, vol. 30(77), pp. 45-53, 1970.

- [56] Chaiken-RF, Lee-CK; Hwang-CC; Singer-JM;, "Influence of Passageway Fires on Ventilation Flows,," Mine Ventilation Congress Reno Nevada1979.
- [57] Kennedy W.D., "Critical Velocity : Past, Present and Future," One Day Seminar on Smoke and Critical Velocity in Tunnels1996.
- [58] Cory W, *Fans & Ventilation A Practical Guide*: ELSEVIER, 2005.
- [59] "SYSTEMS AND EQUIPMENT FOR FIRE AND SMOKE CONTROL IN ROAD TUNNELS," PIARC2007.
- [60] *Dossier pilote des tunnels. Équipements Ventilation*: CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS, 2003.
- [61] "SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL EN UN TÚNEL. INFLUENCIA DE UN INCENDIO EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN."
- [62] Pérez Guerrero A, "NTP 436: Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación."
- [63] *PD 7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors: Life safety strategies. Occupant evacuation, behaviour and condition*: BSI British Standards, 2004.