



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Simulación de la ventilación de un túnel ferroviario en caso de incendio

Autor:

Adrados Herrero, Diego

Tutores:

Lorenzana Iban, Antolín

Foces Mediavilla, Antonio

**Dpto. C.A.I.T. Mecánica de los
Medios Continuos y Teoría de
Estructuras**

Valladolid, septiembre 2019.







Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a mis padres que me apoyan en las decisiones que he tomado y en especial a mi madre Lourdes que financia mis estudios de buena gana, a compañeros y profesores del grado que me han ayudado y acompañado en estos años y a la ciudad de Valladolid que me ha brindado la oportunidad de cumplir uno de mis deseos más profundos y me ha aportado valores y aptitudes que no creía capaz de obtener.

Gracias a todos por estos años de aprendizaje y crecimiento personal.

Diego Adrados.

Resumen

Este estudio determina la necesidad de ventilación mediante la simulación de CFD para un incendio ferroviario en un túnel con unas características predefinidas y los requisitos mínimos exigidos por la normativa.

Para completar los objetivos de ventilación, en el caso de un incendio en un túnel de nueva construcción, es necesario el conocimiento de los parámetros de interés e interrelación con la normativa, nociones de las variables relevantes para su modelado y experiencia con un simulador computacional de fluidos para la obtención de resultados.

Se completarán los pasos necesarios desde la definición y generación de la geometría adecuada y simplificada, hasta la realización de análisis de resultados obtenidos de la simulación, con su correspondiente conclusión de viabilidad.

Abstract

This report is going to define the ventilation requirements of an emergency fire inside a train tunnel, limited by client characteristics and minimum requirements from the law.

In order to complete all the objectives of the “ventilation and evacuation study”, for a fire in a new construction tunnel, it is necessary to acknowledge relevant parameters and their connection with normative, good notions of the variables involved for modeling and extensive experience with CFD to ensure the good quality results.

The necessary steps from the definition and generation of the required and simplified geometry to the result analysis of the simulation will be completed, along its viability report.



Palabras clave

CFD: *Computational Fluid Dynamics*, término empleado para definir los programas capaces de matematizar y representar digitalmente el comportamiento de fluidos.

Fluent: Apartado del programa de CFD empleado (ANSYS) que permite configurar el contenido de fluidomecánica del experimento de interés.

Incendio: Fenómeno que se simula, de manera muy simplificada será una generación de productos a altas temperaturas.

Ventilación: Objetivo de la simulación, la acumulación de gases en situaciones de emergencia en túneles es un tema muy estudiado y relevante.

Túnel: Un túnel es una obra subterránea de carácter lineal que comunica dos puntos para el transporte de personas o materiales, normalmente artificial.

Keywords

CFD: Computational Fluid Dynamics, Term used to define those computer programs capables of mathematise and represent digitally fluids behaviors.

Fluent: As a part of the CFD program used (ANSYS), allows the user to configure the fluid mechanics for the experiment

Fire: It is the simulated phenomenon, in a very simplified way, It will generate products at a very high temperature.

Ventilation: It is the simulation objective, the gas accumulation, during an emergency; inside a tunnel is a common study field and relevant.

Tunnel: Underground lineal structure that communicates two places for transportation, Tunnels trend to be artificial.

Índice

Agradecimientos	4
Resumen	5
Abstract	5
Palabras clave.....	6
Keywords.....	6
Índice	7
Índice Ilustraciones.....	8
Índice Tablas	9
Capítulo I: Introducción y Objetivos	11
1. Antecedentes	11
2. Motivación.....	12
3. Objetivos.....	13
4. Organización	13
Capítulo II: Desarrollo	15
1. Descripción del entorno	16
2. Condiciones para el modelado	18
2.1 Condiciones I: Geometría.....	18
2.2 Condiciones II: Mallado	21
2.3 Condiciones III: Físicas	22
2.4 Simulación	31
2.5 Resumen de las condiciones del modelado.....	35
3. Modelo.....	37
4. Mallado.....	40
5. Fluent.....	42
5.1 General.....	42
5.2 Soluciones.....	43
Capítulo III: Resultados	45
1. Convergencia	45
2. Gráficos de los planos “SXX”	46
3. Representaciones tridimensionales.....	48
3.1 Contornos de Temperaturas	50
3.2 Contornos de CO.....	57



3.3 Contornos de humos	63
4. Valoración del equipo de ventilación y evacuación	69
Capítulo IV: Conclusiones y Trabajos futuros	71
1. Conclusiones.....	71
2. Trabajos futuros.....	72
3. Otras Referencias	73
Bibliografía	74
Anejos.....	77
Anejo I: Especificación técnica de interoperabilidad relativa a la «seguridad en los túneles ferroviarios».....	77
Anejo II: Plano de conjunto de la sección del túnel empleado	103
Anejo III: Datos graficados de la simulación	107
Introducción.....	107
Datos Obtenidos.....	107
Anejo IV: Especificaciones técnicas sobre la instalación de la ventilación	109
Criterios de Selección	109
Ficha técnica.....	109
Anejo V: Estimación de costes del trabajo	111
Anejo VI: Valores empleados para cálculos	112

Índice Ilustraciones

Ilustración 1: Procedimiento seguido durante el proyecto.....	14
Ilustración 2: procedimiento iterativo para la obtención de resultados y completar el capítulo II.....	16
Ilustración 3: Curva paramétrica de evolución de la potencia (W) de un incendio. .	23
Ilustración 4: Imagen de distribución de temperaturas y de concentración de CO en un mismo punto del túnel.....	32
Ilustración 5: Imagen de distribución de temperaturas de un túnel con pendiente.	32
Ilustración 6: Fenómeno de la mezcla de los gases estratificados dentro del túnel o Backlayering.....	33
Ilustración 7: Representación del túnel.....	37
Ilustración 8: Representación del conjunto tren.....	38
Ilustración 9: Representación del modelo final completo (Fluido e Incendio).....	39
Ilustración 10: Representación de los 19 planos a 1.8m del suelo junto al conjunto tren.	39
Ilustración 11: Mallado de la geometría del Incendio con hexaedros.....	41

Ilustración 12: Imagen del mallado definitivo del fluido como malla de un conjunto.	41
Ilustración 13: Gráfico de Fluent mostrando los valores residuales de cada ecuación resuelta frente al número de iteraciones.	45
Ilustración 14: Evolución de la temperatura a lo largo de la ruta de evacuación a 1,8m de altura sobre la acera.	47
Ilustración 15: Evolución de la concentración de CO a lo largo de la ruta de evacuación a 1,8m de altura sobre la acera.	47
Ilustración 16: Evolución de la visibilidad con humos a lo largo de la ruta de evacuación a 1,8m de altura sobre la acera.	48
Ilustración 17: contorno de temperaturas a 30s	50
Ilustración 18: contorno de temperaturas a 60s	51
Ilustración 19: contorno de temperaturas a 180s	52
Ilustración 20: contorno de temperaturas a 300s	53
Ilustración 21: contorno de temperaturas a 600s	54
Ilustración 22: contorno de temperaturas a 1200s	55
Ilustración 23: contorno de la concentración de CO a 30s	57
Ilustración 24: contorno de la concentración de CO a 60s	58
Ilustración 25: contorno de la concentración de CO a 180s	59
Ilustración 26: contorno de la concentración de CO a 300s	60
Ilustración 27: contorno de la concentración de CO a 600s	61
Ilustración 28: contorno de la concentración de CO a 1200s	62
Ilustración 29: contorno de la visibilidad con los humos a 30s	63
Ilustración 30: contorno de la visibilidad con los humos a 60s	64
Ilustración 31: contorno de la visibilidad con los humos a 180s	65
Ilustración 32: contorno de la visibilidad con los humos a 300s	66
Ilustración 33: contorno de la visibilidad con los humos a 600s	67
Ilustración 34: contorno de la visibilidad con los humos a 1200s	68

Índice Tablas

Tabla 1: Características longitudinales del túnel.	16
Tabla 2: Resultado del apartado Statistics; Mesh	41
Tabla 3: Tabla de configuración general de <i>Fluent</i> .	42
Tabla 4: Tiempos de convergencia	46
Tabla 5: Tabla de temperaturas en los planos de 1,8m de altura sobre la acera.	107
Tabla 6: Tabla de concentraciones de CO en los planos de 1,8m de altura	108
Tabla 7: Tabla de concentraciones de humos en los planos de 1,8m de altura	108
Tabla 8: Especificaciones del fabricante sobre el modelo JZR 10 30/4. Fuente: Zitron	110
Tabla 9: Precio estimado del trabajo ejecutado	111
Tabla 10: estimaciones para los cálculos	111
Tabla 11: Valores empleados para la velocidad crítica	112



Tabla 12: Valores empleados para el diámetro hidráulico..... 112

Capítulo I: Introducción y Objetivos

Las tragedias de Incendios en túneles en los últimos años han conducido a debates de expertos alrededor del mundo. En muchos países europeos han causado una revisión completa de la normativa en las directrices para túneles de carretera y de ferrocarril. La Comisión europea ha desarrollado directivas que afectan al equipamiento de seguridad mínima, complementada con investigaciones locales e internacionales intensivas. Su objetivo es el intercambio de puntos de vista a nivel mundial, junto con las ideas y experiencias en este campo en vista del tráfico en construcciones bajo-tierra, el avance en este campo plantea nuevas fronteras como la estandarización de las curvas de comportamientos de potencias de fuego (Haack, 2011).

Este trabajo pretende arrojar algo de luz sobre la situación actual de una de las vías de desarrollo más aceptada entre los expertos en materia de incendios en túneles, basándose en emplear un programa de CFD, que es capaz de modelar, mallar y representar fielmente muchos de los fenómenos observados dentro del túnel durante una emergencia de esta índole.

Para ello se pretende modelar un ejemplo sencillo en incluir las condiciones habituales vistas en otros casos para un túnel con características similares, de ese modo poder mostrar normativa, criterios habituales, procedimiento y resultados. Como añadido se incluirá una conclusión de la necesidad de ventilación, proponiendo unos criterios del lado de la seguridad, pues habitualmente se emplean programas estadísticos para alcanzar una conclusión más precisa.

1. Antecedentes

Los fuegos en túneles de transporte pueden causar desastres catastróficos, los accidentes Mont Blanc (Marzo de 1999), Austria-Tauern (Mayo de 1999), Suiza-San Gotardo (Octubre de 2001) o metro de Daegu/corea del sur (Febrero de 2003), hicieron evidente esta situación y la necesidad de una mejora de los estudios de ventilación y evacuación del momento, visto en (Haack, 2011). En estos ejemplos, el incremento de temperaturas y acumulación de gases nocivos se produjeron por encima de los valores estimados y los sistemas de ventilación no fueron suficientes para permitir la evacuación segura de todos los usuarios a tiempo, como consecuencia del desconocimiento de fenómenos físicos como el *Backlayering* o el verdadero efecto de la radiación sobre las paredes, (Fuentes-Cantillana, 2011). A partir de estas catástrofes se impuso una normativa (ETI, en el caso ferroviario) que obliga a recoger una previsión de los fenómenos gaseosos en caso de un incendio en una excavación con vistas a su explotación y garantizar la seguridad de los usuarios.

Para la previsión de la circulación de gases, es cada vez más común la solicitud de un estudio CFD, este permite visualizar y asegurar de forma estadística que dicha circulación de gases no genera problemas en un periodo de tiempo razonable para la evacuación de los usuarios de las instalaciones. Estos estudios contienen



información de alto valor económico y requieren de un conocimiento de distintas materias extenso.

Esta propuesta de proyecto tiene por objetivo la previsión de CFD de una renovación de un supuesto túnel ya existente debido al incumplimiento de normativas mínimas actuales, un tramo aparentemente problemático por acumulación de gases nocivos, podría provocar averías en las máquinas circulantes. La estructura básica del túnel estrecha, alargada y en pendiente, de casi dos kilómetros de longitud, tiene la anchura justa para que pase una vía de tren y carece de sistema de ventilación. En este escenario, no es raro que en el interior se produzcan concentraciones de gases generados por los motores de las máquinas diésel, las únicas que se pueden utilizar en una línea sin electrificar. Ese humo puede afectar al funcionamiento de las máquinas que vayan detrás, hasta el punto de averiarlas.

Como punto de partida se plantea un rediseño del mismo que cumpla criterios constructivos actuales. Del nuevo túnel se espera que el anterior quede como galería de evacuación, interconectados por túneles perpendiculares considerados zonas seguras. En relación con el aseguramiento y comprobación de las correctas condiciones de evacuación en el túnel, se plantea la necesidad de llevar a cabo los estudios de incendios para una ventilación natural ($u < 1$ m/s), así como las simulaciones del incendio durante una evacuación. Dichos estudios determinarán la necesidad de modificar el sistema de ventilación sobre el proyecto en construcción del nuevo túnel. Se solicita una verificación por simulación del sistema de ventilación a través de un CFD y estimación de los equipamientos necesarios, para ello se parte de la siguiente información:

- Un informe previo del túnel.
- Planos de sección tipo e indicaciones de pendiente y curvatura.
- Informe de ubicación de puntos de lucha contra incendios en los que se refleja la ubicación y longitud de las salidas de emergencia a tratar (no se incluirán como tal en la geometría, no es objeto de estudio).

Con la documentación inicial se pretende emplear la normativa combinado con conocimientos y experiencia a través de los recursos del equipo disponible, para retornar un informe completo sobre las medidas de protección y seguridad a aplicar. De esta manera, cada uno de los elaboradores de proyectos que afecten a los túneles de este tramo deberá tener en cuenta aquello que les aplique en cada caso (alimentación, iluminación de sistemas de seguridad, sistemas de protección, etc.).

2. Motivación

Actualmente en Ineco (Ineco, 2019) se realizan estudios de ventilación y evacuación para túneles y estaciones subterráneas, dentro de estos informes se trabaja con varios programas, principalmente ANSYS (programa alrededor del cual se están desarrollando mis prácticas del grado). El objetivo principal es validar estas construcciones desde el punto de vista de la seguridad frente a incendios

ferroviarios, mis principales tareas se basan en el modelado de las geometrías y el mallado de las mismas, asegurando una calidad adecuada, también he completado estudios presentados en otras empresas con información extraída de las simulaciones y de los resultados de los estudios de evacuación.

3. Objetivos

- Presentar la normativa que afecta a geometría y a los fenómenos físicos implicados en el estudio.
- Presentar los requerimientos para la creación del modelo.
 - Describir la geometría resultante de la nueva construcción, junto con la simplificación asumida para el modelo.
 - Condiciones físicas para un experimento de esta clase.
- Realizar una descripción muy superficial del método de empleo de las herramientas de simulación.
- Desarrollo del modelo a través de ANSYS.
- Presentación de resultados.
- Concluir la necesidad de equipos de ventilación.

Para cumplir los objetivos se lleva a cabo un procedimiento ordenado en el cual primero se presentarán las normativas y condiciones que se imponen para alcanzar una simulación y sus resultados, después se aplicarán todas las condiciones mediante los diferentes apartados del programa ANSYS y por último se obtendrán del programa los resultados que se validan y evalúan para concluir la necesidad de ventilación.

4. Organización

Partiendo de normativa y objetivos propuestos, se limitan los criterios para la generación de un túnel que cumple las normativas ferroviarias españolas, haciendo especial hincapié en aquellas que afectan a situaciones de emergencia provocadas por un incendio o acumulación de gases en túneles. Después se genera a través de ANSYS las condiciones que afectan de mayoritariamente al comportamiento de los gases dentro de una geometría propuesta. Por último, se obtienen los resultados y se proponen unos criterios para la validación del sistema de ventilación. Recordar que el proceso es iterativo en todas sus fases y que pueden existir referencias que se repiten, pues estas se aplican a distintas fases del modelado. A continuación, se presenta el diagrama del procedimiento seguido durante el Capítulo Desarrollo en la ilustración 1.

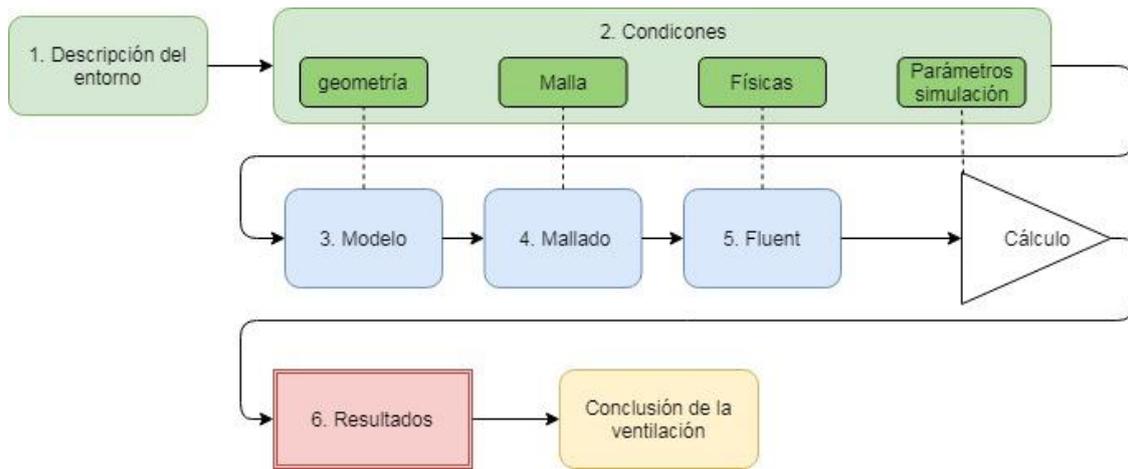


Ilustración 1: Procedimiento seguido durante el proyecto.

Capítulo II: Desarrollo

En este capítulo se presenta el contenido teórico y práctico que envuelve esta simulación. Para ello se divide el contenido con el orden cronológico de uso de los parámetros dentro del conjunto de programas disponibles. Antes de comenzar, una pequeña introducción con todo lo que se desea presentar a lo largo del capítulo.

El apartado primero es una descripción del entorno y la situación en la que se encuentra el proyecto actual, también contiene cual es el planteamiento para la resolución de la situación descrita.

El apartado segundo presenta las condiciones teóricas para traducir de un proyecto planteado a condiciones que comprenda el sistema ANSYS para la simulación del CFD, Cada subapartado determina los factores que definen el procedimiento en los tres pasos principales.

Primero la geometría, resuelta a través de *SpaceClaim* (módulo incluido en el paquete de ANSYS y es *software CAD* de modelado de sólidos que se ejecuta en *Microsoft Windows*) define los parámetros geométricos y necesidades de las representaciones finales.

Segundo la Malla, a través del programa *Meshing* (módulo incluido en el paquete de ANSYS y es *software* para mallado genérico que se ejecuta en *Microsoft Windows*) con una gran intervención para la convergencia de la solución se aplican unos criterios básicos y un resultado muy sencillo para de ese modo alcanzar dichos criterios y una convergencia en tiempos adecuados.

Tercero las Físicas, a través de *Fluent* (módulo incluido en el paquete de ANSYS y es *software* que contiene un amplio abanico de capacidades de modelado de físicas, como por ejemplo transferencia de calor o transporte de especies, que se ejecuta en *Microsoft Windows*), serán la normativa y principios de los fluidos aplicados en la simulación (lo que se menciona anteriormente como principios físicos), tal y como en el subapartado de mallado las simplificaciones adecuadas pueden acortar los tiempos de convergencia.

Cuarto es la Simulación, se configuran los últimos parámetros, relacionados con el método resolutivo que emplea el programa y se ha incluido una estimación de los efectos visuales que se prevén que pueden aparecer en los resultados.

Todos los parámetros y estimaciones descritas anteriormente condicionan los siguientes cuatro apartados, donde se aplican y se muestra el aspecto que deben presentar cada uno de los programas generados en cada apartado del paquete ANSYS disponible.

Los siguientes apartados definen cuáles son esas configuraciones definitivas para el Modelo, el Mallado y el *Fluent* en los programas *SpaceClaim*, *Meshing* y *Fluent* respectivamente. Para hacer más sencillo el seguimiento de los pasos se incluye la ilustración 2 que muestra un diagrama de flujo simplificado con contenidos utilizados en cada subapartado para la resolución de la simulación.

Finalmente, en el capítulo siguiente se presenta el resultado y se comenta.

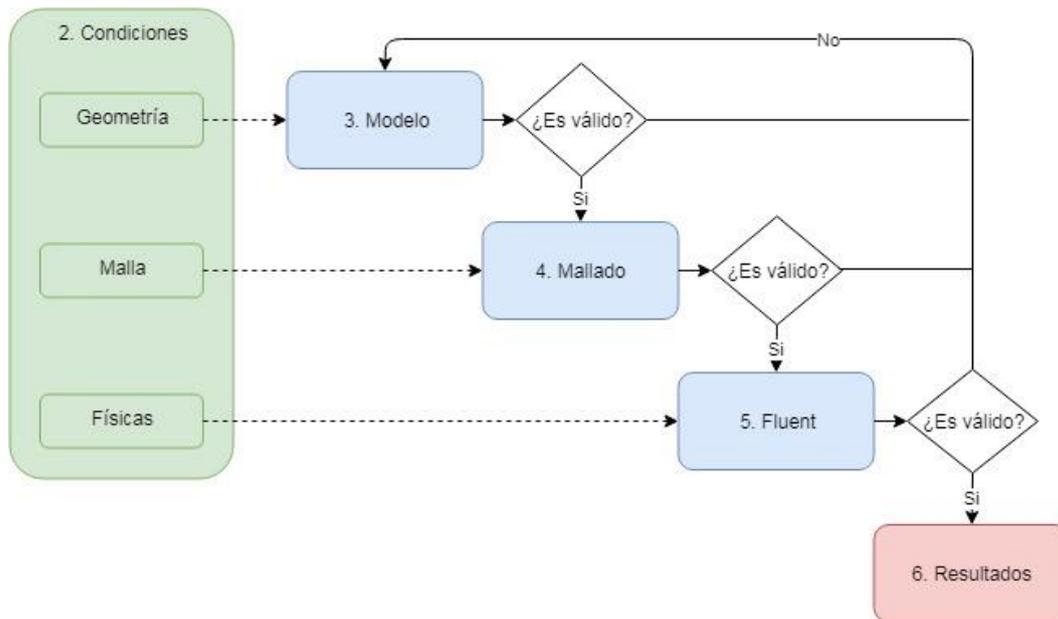


Ilustración 2: procedimiento iterativo para la obtención de resultados y completar el capítulo II

1. Descripción del entorno

En la Introducción se mencionó la situación de la nueva construcción desde un punto de vista muy superficial, en ella se referencian puntos importantes como las nuevas galerías o el cambio de longitud, por ello en esta descripción se detalla algo más de información al respecto.

Con ancho ibérico (1.668 m), se pretende actualizar todo un sistema de explotación formado por una línea, instalando una electrificación de la línea de 25 kV. Esta línea posee una serie de túneles que, por longitud y distancia entre ellos se encuentran concatenados y otros se consideran independientes. Las características del túnel en cuestión de distancias se describen en la tabla 1.

Distancias de bocas y galerías (m)				
Boca entrada	1ª galería	2ª galería	3ª galería	Boca salida
0	377	877	1377	1800

Tabla 1: Características longitudinales del túnel.

Por la información recibida, dos de las galerías serán peatonales y una de ellas permitirá el acceso de vehículos de emergencia, pero no está definida la función de cada una de ellas. También especifican que en este tramo no será necesaria la implantación de puntos de lucha contra incendios pues su longitud es inferior a 2 km.

Las medidas a implantar se encaminan a dotar al túnel anticuado de un túnel paralelo y rectilíneo de pendiente de 1,884% con una sección definida y regular (Anejo II), donde se comenzará la nueva explotación ferroviaria y el antiguo túnel quedará declarado como zona segura, permitiendo la conexión entre túneles por las tres galerías (Tabla 1). La separación entre los tubos paralelos será de unos 20

m. Se considerará un tramo con tráfico mixto (pasajeros y mercancías), afectando al modelo de tren empleado para el incendio, esto afectará a la potencia del incendio.

Lo especificado serán las condiciones relacionadas con la geometría empleada en las simulaciones que completarán el informe del túnel, que se dotará de las instalaciones de protección y seguridad actuales y de la legislación vigente que la dirección de protección y seguridad establece.



2. Condiciones para el modelado

Este apartado tiene como objetivo presentar los condicionantes de la simulación, como cuál es la normativa que envuelve al problema planteado o los parámetros que son habitualmente empleados para simulaciones de carácter similar, que en muchos casos son los mismos, pero, en partes concretas se sigue un proceso simplificativo que proviene de recomendaciones del programador experto o de otras fuentes.

Cada subapartado consta de dos partes diferenciadas, por un lado, la normativa que le aplica (el mallado no consta de ellas) y por otro los parámetros que se deben introducir para poder sacar los resultados deseados. La geometría constará de dos sólidos principales y de superficies estratégicamente colocadas para enriquecer y secundar la información visual obtenida. El mallado se limita a cumplir unos criterios que ANSYS recomienda, se trata de alcanzar un equilibrio entre el tamaño de los elementos y la calidad de los mismos, esto afecta directamente a la convergencia de la resolución. Las físicas, este subapartado es el que más contenido teórico tiene y determina los principios físicos básicos, condiciones de los sólidos y de contorno y los materiales empleados. Por último, la simulación, es el paso final y se incluyen los métodos de resolución que se recomiendan para el programa junto con estimaciones de los fenómenos que son habituales en simulaciones similares.

La normativa en España respecto a esta clase de simulación no está totalmente definida, por ello se han incluido las pautas y criterios encontrados en dos códigos y se ha combinado con procedimientos habituales para llegar a conclusiones que dejan del lado de la seguridad las situaciones de evacuación. De (*Instrucción de seguridad en túneles*, 2005) y la ETI 2014 localizable en el Anejo I (Juncker, 2014) se pretende sintetizar las normas limitantes en los apartados de Requerimientos de protección I y II.

2.1 Condiciones I: Geometría.

Para iniciar el estudio de la simulación de un incendio se necesita conocer los criterios para la geometría de un túnel ferroviario. Esta geometría debe ser una reproducción del escenario de interés, partiendo de los datos y cumplimentando las exigencias que se han presentado referentes al túnel, se realizará un modelo 3D mediante el software *SpaceClaim* de ANSYS, de este modo, quedará definida la geometría completa.

Primero se ha incluido un listado de los requerimientos de túneles en la situación descrita a través de los reglamentos mencionados, después se describen las geometrías que se deben incluir para obtener el modelado, teniendo en cuenta que el resultado debe ser el incendio, el fluido y las superficies de seguridad.

Requerimientos de protección I: Geometría

Acceso a zona segura para túneles de más de 1 km de longitud con tubo contiguo como zona segura: Las galerías transversales entre los tubos contiguos que

permitan utilizar uno de ellos como zona segura, deben disponer de galerías transversales al menos cada 500 m, quedando la primera salida de emergencia a 377 m de la salida al exterior, la segunda salida a 500 m de la primera y la última a 500 m de la segunda, quedando esta a 423 m de la salida, dejando en el caso más desfavorable una salida de emergencia a al menos 500 m.

Dada la longitud del túnel destinado a explotación de la circulación ferroviaria (1800 m), no se considera imprescindible adecuar el túnel destinado a la evacuación al paso de vehículos carreteros, así como la construcción galerías de interconexión adaptadas a tal fin, aun así, tanto el túnel destinado a la evacuación, como la galería adaptada para ello, están adaptados a paso de vehículos carreteros.

Se debe tener en cuenta que las zonas seguras serán accesibles para las personas que inicien la auto-evacuación desde el tren. Se describirá el plan de emergencia el modo en que los servicios de intervención en emergencias accederán a la zona segura.

La integridad del revestimiento del túnel se mantiene durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para permitir el auto-rescate, la evacuación de los pasajeros y del personal del tren y la actuación de los servicios de intervención en emergencias. Se emplea hormigón para el revestimiento.

Aceras:

- 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.

Zonas seguras, comunicación, alumbrado y señalización: Estos apartados no son de nuestro interés, si se definen e implantan adecuadamente la evacuación se llevará a cabo según las previsiones de nuestro estudio. El único condicionante será el de la altura a la que sitúa la señalización (1.8 m) que además es la altura estimada de seguridad para la supervivencia de los evacuados y que por lo tanto será un requisito a la hora de modelar.

Con esta clase de experimentación el verdadero interés está en cuál será la situación que requiera más tiempo de evacuación para un pasajero. Para ello se propone la siguiente situación:

- El tren bloquea la salida intermedia, a 877 m de la salida sur impidiendo la evacuación por dicha salida y obligando a los evacuados a recorrer los 500 m cuesta arriba hasta la siguiente salida de emergencia.
- los usuarios (entre los que habrá evacuados con movilidad reducida) seguirán una distribución estadística de tiempos que no es objeto de estudio.

Esta construcción seguirá estas pautas mencionadas acorde con la normativa (Juncker, 2014).



Geometría del túnel

Sección: la presentada en este caso a 900 m de la boca Sur, con forma de caverna en la parte superior y la acera de evacuación. Una sección tipo representada en los planos del Anejo II y en el informe (Administration, 1995), estos han sido representados por el autor del estudio, pero únicamente con finalidad ilustrativa. Se emplea la sección del túnel memorial con una geometría válida y acorde a la normativa de túneles ferroviarios, son indicativos del aspecto que debe presentar la sección y de sus proporciones. Nuestro interés principal será la obtención de la geometría más simplificada y representativa y de ese modo mostrar un procedimiento simplificado.

Pendiente: Como indicación se calcula la diferencia de alturas entre la boca sur y la boca norte, con una pendiente de 1,884% de media proporciona una idea del aspecto general longitudinal.

Curvatura: No se contemplan las curvaturas para el modelado.

Geometría del tren

Se prevé que por el túnel circule tráfico mixto (eléctrico y diésel) y por lo tanto se escoge un tren de alta ocupación y de gran potencia, exponiendo la peor situación posible. En todos los proyectos la geometría es la misma con distintas dimensiones, es estándar y replicable.

Debido a las necesidades de la línea se ha considerado el incendio de un tren híbrido (diésel y eléctrico), con tecnologías de tracción, que puede circular tanto bajo catenaria de 3 kV en corriente continua ó 25 kV en corriente alterna, como mediante motor diésel. Como resultado se obtiene la geometría de un cuboide de medidas predefinidas. La longitud del tren en total será algo menor que la ruta de evacuación, con las mismas dimensiones de sección que el incendio.

Geometría entre sólidos

La posición relativa entre el sólido incendio y el túnel proviene de la idea de proponer el peor escenario posible, este se ha considerado con muy buen criterio que será aquel en el que el incendio bloquea una salida de emergencia y los pasajeros deben recorrer los 500 m hasta la siguiente salida, esto deja como opciones según la Tabla 1 la primera y segunda salida de emergencia. El peor caso de ventilación será aquel que los humos solo tengan un camino posible a recorrer y la ventilación en la otra dirección no sea posible, por ello se decide colocar el incendio tapando la segunda salida de emergencia y quedando a 877 m de la Boca Sur.

Por último, dentro de la geometría del fluido se deben incluir superficies a lo largo de la ruta de evacuación, concretamente a 1,8 m de altura sobre la acera representada. Estas superficies se dividen cada 25 m y se emplean para conocer datos exactos de los lugares geométricos más críticos, a esta altura se sitúan las señales de emergencia y durante la evacuación se debe garantizar su adecuada visibilidad.

2.2 Condiciones II: Mallado

Este apartado de la configuración es relevante para los tiempos de resolución. Aquí se decide el tipo de malla que se desea, como debe comportarse ante diferentes dificultades geométricas, el tamaño de los elementos diferenciales, es básico configurar el mallado de manera conjunta de los sólidos de interés o la interacción entre ambos no será adecuada. A continuación, se incluyen los factores que determinan la validez geométrica de los elementos del mallado. Mediante el software *Meshing* se preparará una configuración sencilla y suficientemente fina, que debe proporcionar una malla que tenga elementos lo más grandes posibles (menos elementos a resolver) con la calidad requerida (resolución de las ecuaciones válida y con resultados fiables) para no deformar la geometría en exceso.

Calidad

Para conocer la calidad del mallado se suelen mirar tres parámetros de medición, estos realizan una medición de la calidad de las celdas en sus apartados y proyectan una distribución de los resultados. Para el programador esto es un requisito impuesto, pues para *Fluent* suelen ser menos restrictivos, pues si no entran en los límites propuestos, las soluciones probablemente no sean válidas. En el caso del mallado obtenido todos los parámetros entran dentro de los valores requeridos.

- *Aspect ratio*: Relación de la circunferencia circunscrita y la inscrita de la cara del elemento correspondiente.
- *Skewness*: Está directamente relacionado con el tamaño de la celda y los ángulos que forman, el objetivo es que la celda sea lo más equilátera posible, cuanto más diferencia longitudinal exista entre los lados, mayor será su *skewness*.
- *Orthogonal quality*: Es una comparación entre la celda estudiada y la situación de las celdas adyacentes, calcula la relación entre producto de la normal del centroide de la cara y el vector que une centroides de celda y cara y su módulo.

Definiciones y configuración sintetizadas a partir de recomendaciones de las guías de (Sharcnet, 2009).

El cumplimiento o no de los criterios depende en gran medida de la geometría, del tamaño al cual se limitan las celdas, límites de las curvaturas o las relaciones de tamaños con celdas próximas y su posición relativa, por ello es necesario evitar ciertas complicaciones con detalles geométricos que no aportan información adicional, es decir, si no es relevante para el movimiento de los gases, será más conveniente que no aparezca en la geometría.

Una vez definida la geometría y el mallado, el siguiente subapartado pretende definir y valorar las condiciones relevantes de la simulación, las ecuaciones de la fluidomecánica de interés que permitan hacer la simulación un problema resoluble junto con condiciones de contorno y materiales, todas ellas serán las que están directamente relacionadas con el apartado *Fluent* de ANSYS.



2.3 Condiciones III: Físicas

Esta clase de requerimientos provienen de normativa, la experiencia del programador y de experimentaciones en CDF de estudios de casos similares, ya sean en túneles ferroviarios o de vehículos, los cuales suelen tener criterios más restrictivos, todos ellos son aplicados sobre una geometría existente o sobre la base de la clase de experimento que se desea llevar a cabo, de ahí que primero hayamos tenido que definir la geometría y su mallado.

Este subapartado intenta seguir el orden con el que se configura el programa empleado, el *Fluent*, de manera que ciertos principios que a priori parecen de otro apartado quedan definidos bajo la configuración a la que le corresponde. Comenzando por la normativa aplicada de (Juncker, 2014) se limitan ciertos fenómenos que pueden llegar a ser muy complejos como resistencia estructural o la potencia de fuego. Seguirá por los principios físicos, condiciones de contorno y los materiales implicados.

Para una mejor visualización se presenta un listado de las opciones vienen condicionadas por el tipo de experimento, caso:

- Generalidades: Transitorio, incompresible y efectos gravitatorios.
- Fluidodinámica: Ecuaciones generales con energía y efectos viscosos.
- Incendio: fenómeno de la combustión.
- Materiales.
- Condiciones de contorno: entrada por velocidad y una salida por presión, efecto de capa límite y flujos de calor.

Requerimientos de protección II: condiciones físicas

En cuanto al comportamiento de los materiales y las simplificaciones asumibles, el hormigón es un elemento que aguanta bastante bien los efectos del fuego. En términos generales su resistencia a compresión simple permanece más o menos constante hasta una temperatura de 300 °C, para disminuir después paulatinamente hasta anularse a unos 800 °C. Análogamente, el acero, a partir de los 400 °C, pierde parte de su resistencia a tracción al volver a la temperatura ambiente.

Respecto a la modelización numérica del proceso de transferencia de calor por convección y radiación, desde el foco del fuego hasta la superficie del elemento estructural, y desde éste, por conducción, hacia su interior. Se parte de la correspondiente acción térmica (curva de calentamiento) y se obtiene la distribución de temperaturas (isotermas) en las secciones críticas del elemento en distintas fases del incendio.

Considerar los elementos estructurales aislados, despreciando las acciones indirectas debidas al fuego (dilataciones y deformaciones térmicas, etc.). Utilizar distribuciones de temperatura (isotermas) preestablecidas, generalmente para secciones rectangulares y curvas de fuego específicas. Utilizar modelos sencillos de variación de las propiedades de los materiales con la temperatura. Pequeñas referencias de cómo aplicar las potencias de fuego y la respuesta de los contornos

modelados que se han presentado por expertos en la materia como (Romana Ruíz, 2011).

Características mínimas del aire en condiciones normales y de emergencia son localizables en el Cuadro 5.1.12.I. de la instrucción de seguridad en túneles. Parámetros para caracterización de incendios son localizables en el Cuadro 5.1.12. II. de la instrucción de seguridad en túneles. 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.

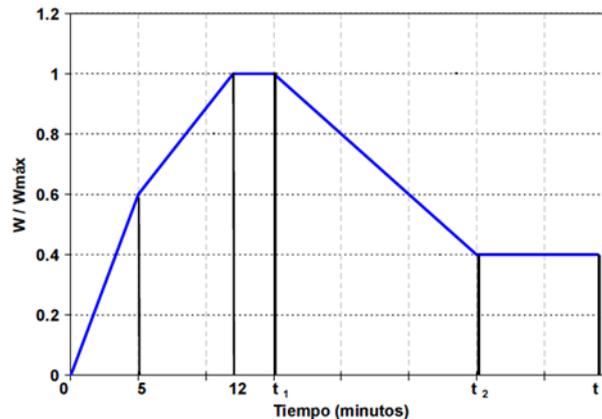


Ilustración 3: Curva paramétrica de evolución de la potencia (W) de un incendio.

Al tratarse de un tren diésel las simulaciones se realizan considerando una potencia de fuego de 30 MW (Tiempos característicos de la curva paramétrica de evolución de un incendio son localizables en Cuadro 5.1.12.III. de la instrucción de seguridad en túneles) observable en la ilustración 3, referencias localizadas en (Juncker, 2014).

Generalidades

Los principales criterios para esta simulación, determina la clase de fenómenos se buscan

- Basado en presión (Incompresible): Debido a las bajas velocidades de estudio (0-3 m/s) la compresibilidad es un fenómeno que se puede despreciar respecto a efectos como las densidades de las especies. Simplemente para descartar este efecto se puede emplear el número de Mach y afirmar que los gases a dichas velocidades se comportan de forma incompresible. El valor en la fórmula 1 debe estar por debajo de 0,3:

$$M = \frac{v_s}{c} \quad (1)$$

- V_s: Velocidad característica del fluido.
- c: Velocidad del sonido en atmosfera terrestre.



- **Transitoriedad:** Para procesos que no convergen de forma estacionaria, la resolución transitoria permite encontrar soluciones en incrementos de tiempo. Es habitual encontrar este tipo de configuración en modelos de transferencia de calor. La validación de la estructura como segura radica en los tiempos de evacuación.

El estudio da especial importancia al desarrollo a través del tiempo de la distribución de los humos, según (Migoya Valor, 2002, b) el fenómeno temporal es mucho más apreciable para el eje longitudinal del túnel (en la fórmula se especifican las variaciones en las tres direcciones principales) y está relacionado directamente con la difusión de especies y su término temporal según la fórmula 2 más representativa encontrada.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial X} = D_T \nabla^2 T \quad (2)$$

- $\frac{\partial T}{\partial t}$: Variación de la temperatura a través del tiempo.
 - U : Velocidad de ventilación.
 - $\frac{\partial T}{\partial X}$: Variación longitudinal de la temperatura en el eje X.
 - D_T : coeficiente de difusividad térmica turbulenta.
 - $\nabla^2 T$: derivada parcial segunda respecto de las direcciones principales X, Y y Z.
- **Gravedad:** fenómeno mediante el cual los objetos con masa son atraídos entre sí. Fenómeno muy relevante en una simulación donde el interés principal es observar el desplazamiento de distintas especies. Este fenómeno se incluye por el dominio de fuerzas gravitacionales en el adimensional de Froude (fórmula 3) y para el diámetro hidráulico (fórmula 7).

$$Fr^2 = \frac{F_{inercia}}{F_{gravitación}} = \frac{v^2}{gl} \quad (3)$$

- v : velocidad del flujo.
- g : gravedad.
- l : Longitud característica.

Ecuaciones Fluidodinámica

Estas ecuaciones presentadas en la fórmula 4, 5 y 6 se van a resolver para cada elemento mallado, en cada dirección normal del elemento, dando valores aproximados (estimados por la simulación) de los diferentes flujos introducidos.

La solución debe contener valores medios de la densidad, vector velocidad (x,y,z), presión y temperatura. Los valores medios servirán para establecer un punto de partida al que se le suma una desviación estimada por el modelo de turbulencia. Como se ha mencionado antes una combustión es un fenómeno turbulento y por lo tanto han de tenerse en cuenta, para esta clase de experimentación, los autores de otras simulaciones y expertos recomiendan el modelo “k-ε”, según explican aporta

una precisión suficiente y tiene tiempos de convergencia menores que el otro modelo de turbulencias empleado ($k-\omega$).

El modelo $k-\varepsilon$ añade dos ecuaciones para cada resolución, aportando a todas las ecuaciones resueltas (se les suma a los resultados medios) un término que representa la desviación estimada por el programa provocada por las turbulencias. La fluidodinámica para cada elemento se resuelve con diez ecuaciones en derivadas parciales: conservación de la masa, conservación de la energía y conservación de cantidad de movimiento en las tres direcciones y conservación de las especies, junto con sus condiciones de contorno, las dos ecuaciones restantes son las añadidas por la elección del modelo viscoso $k-\varepsilon$.

El primer término representa el transporte transitorio de Φ , el segundo término es el transporte por convección, el tercer término representa el transporte de Φ por difusión y el cuarto término representa la fuente (o sumidero) de Φ .

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \Phi dA = \oint_A \Gamma \Delta \Phi dA + \int_V S_\Phi dV \quad (4)$$

- Φ : Variable transportada.
- T: tiempo.
- A: Área superficial.
- V: Volumen.
- Γ : Difusividad de la variable.
- S_Φ : fuente de Φ .
- ρ : densidad del fluido.

Ecuación para la Variable Φ

- Continuidad: 1
- x-cantidad de movimiento: u (velocidad en dirección x)
- y- cantidad de movimiento: v (velocidad en dirección y)
- z- cantidad de movimiento: w (velocidad en dirección z)
- Energía: h (entalpía)
- Especie química i: y_i (fracción másica de i)

Las fórmulas 1 y 3 son números adimensionales y la fórmula 4 es la ecuación general de la mecánica de fluidos, tomados del libro (Crespo, 2014).

Existen aspectos que añaden complejidad al experimento, como la combustión y la radiación. El número de variables a almacenar y operaciones a resolver no permiten obtener soluciones convergentes, por lo tanto, estas se simplifican y no se emplean. Las soluciones, en muchos casos, son muy similares o suficientes para validar resultados y obtener las mismas conclusiones.

Para completar el modelo, la solución más extendida es la de añadir dos ecuaciones, las presentadas como las fórmula 5 y 6 mencionadas en el informe de (Chow, 1959). Para la caracterización de las turbulencias, con ellas y unos coeficientes se puede determinar la viscosidad y otros parámetros turbulentos. La elección más común es la de $k-\varepsilon$, donde k es la energía cinética media de agitación turbulenta y ε es el ritmo de disipación de la energía turbulenta en escalas



pequeñas. Sus problemas son las recirculaciones y anisotropías de la relación de proporcionalidad entre esfuerzos turbulentos y deformaciones, estos, hacen necesario modelar los términos de transporte por separado. Centrado en los mecanismos que afectan a la energía cinética de las turbulencias, se asume viscosidad isotrópica y que la relación entre la tensión de Reynolds y la media de deformaciones en todas las direcciones son las mismas. Minimizando variables desconocidas y comprendiendo que procesos son relevantes, se obtienen dos ecuaciones aplicables a nuestro caso (y a otros muchos).

El primer término representa el transporte transitorio de k o ϵ , el segundo término es el transporte por convección, el tercer término representa el transporte de k o ϵ por difusión y el cuarto término representa la fuente (o sumidero) de k o ϵ .

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (5)$$

- u_i : velocidad lineal en la dirección i .
- E_{ij} : Componente de la deformación en el tiempo en i, j .
- μ_t : Viscosidad eddy

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

Las ecuaciones contienen las constantes C_{μ} , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k , σ_ϵ , que presentan los mismos valores para una gran cantidad de flujos turbulentos diferentes.

Ecuaciones que se resolverán para cada iteración, para cada celda en la dirección del flujo:

- Continuidad. ($\bar{\rho}$)
- Cantidad de movimiento en X, Y y Z. ($\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$)
- Energía. (\bar{p}, \bar{T})
- Para cada especie (Humo, CO y CO₂). ($y_{humo}, y_{CO}, y_{CO_2}$)
- Turbulencia (k y ϵ).

Fenómeno del Incendio

Dentro de la programación ANSYS el programa ofrece métodos pre-programados de los fenómenos que intervienen en un incendio, para reducir la carga computacional es una simplificación adecuada presentar este apartado como una generación y consumo de especies. (Migoya Valor, 2002, a) define un incendio como: La propagación incontrolada de llamas, es un fenómeno altamente complejo, ligado a flujos de reacciones químicas. Las ecuaciones generales de la mecánica de fluidos, combustiones, cinética, radiación se emplean de forma simultánea para generar el fenómeno físico y químico.

Materiales

Para reducir la carga de cálculo sobre la simulación, se han realizado unas simplificaciones importantes en este aspecto, con lo que terminamos teniendo escasa variedad de materiales. La estimación es bastante acertada, la solución converge y comparado con otros experimentos en campos similares, los tiempos de obtención de resultados proyectados mejorarán.

Para la simulación no es necesario emplear todas sus características, se incluyen únicamente las que afecten a la transmisión de calor y al desplazamiento de los fluidos, otras características aparecen simplemente porque vienen incluidas en la propia biblioteca de materiales de *Fluent*.

Se emplea la mezcla llamada “carbón-monoxide-air” para el fluido, “aluminum” para las superficies del tren entero (incendio incluido) y hormigón para la estructura.

- **Sólidos:**

Aluminio: En los ochenta, el aluminio se convirtió en el metal elegido para la fabricación de tranvías y trenes de alta velocidad. Esto mejoró la velocidad, así como se redujeron los costes considerablemente, («La innovación del aluminio en los trenes de alta velocidad», 2016).

Hormigón: En un túnel el hormigón es el componente dominante, no solo recubre la superficie para adecuar la geometría (muy importante para trenes de alta velocidad), también cumple la función estructural.

Definición del empleo de hormigón en túneles encontrados a través de (*Hormigón & amp; mortero en túneles por método convencional: una introducción*, consultado 2019).

- **Fluidos:**

La cantidad de aire contenido en el túnel determina condiciones iniciales, la concentración de CO₂ la respirabilidad, la opacidad (humos) y la concentración de CO son los dos parámetros, de fácil medición, que determinan la calidad del aire en el interior de un túnel.

Aire: según (Gálvez, Llopis, Rubio, consultado 2019) es una mezcla homogénea de gases que constituye la atmósfera terrestre, Es una combinación de gases en proporciones ligeramente variables, compuesto por 78,09% de nitrógeno, 20,95% de oxígeno, 0,93% y pequeñas cantidades de otros gases.

Humo: El humo es una suspensión en el aire de pequeñas partículas sólidas que resultan de la combustión incompleta de un combustible. El tamaño de estas partículas oscila entre 0,005 y 0,01 μm . Es un subproducto no deseado de la combustión. En la simulación estará directamente relacionado con la visibilidad a través de un factor de conversión.

Dióxido de carbono: El dióxido de carbono (fórmula química CO₂) es un gas incoloro, se produce por la combustión. Se encuentra de forma natural en el aire ambiente en concentraciones que varían entre 300



ppm a 550 ppm dependiendo de si medimos en entornos rurales o urbanos. El principal efecto que produce el CO₂ es la asfixia por desplazamiento del oxígeno, pero esto se produce por concentraciones muy altas capaces de desplazar el oxígeno y reducir su concentración por debajo del 20%, no es preocupante al nivel de otros gases como el CO.

Monóxido de carbono: El monóxido de carbono, cuya fórmula química es CO, es un gas incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados. Se produce por una combustión deficiente. Su baja concentración es fundamental para la supervivencia.

Una vez respirada una cantidad bastante grande de monóxido de carbono (teniendo un 75% de la hemoglobina con monóxido de carbono) la única forma de sobrevivir es respirando oxígeno puro.

Su respiración en un entorno como el simulado puede mostrar dos efectos, dependiendo de la concentración: con 165 mg/m³ (120 ppm) en un periodo de tiempo de 30 minutos, un sujeto expuesto puede escapar sin síntomas graves ni efectos irreversibles para la salud.

Información de la fuente (Society of Fire Protection Engineers, 2002)

- Mezcla:

Será el resultado de la composición de los fluidos (gases) intervinientes en la combustión, de modo simplificado, los cálculos se realizan solos a través del simulador. Solo se emplea en la simulación para que la reacción de la combustión sea lo más simplificada posible, no es el comportamiento de la combustión en sí lo que tiene interés, es el comportamiento de los fluidos del túnel y sus concentraciones a lo largo del mismo.

Condiciones de contorno

Completan los aspectos que intervienen entre los sólidos e interactúan con el comportamiento difusivo de los gases durante todo el desarrollo del experimento. Antes de comenzar con las ecuaciones a resolver, se ha expuesto la clase de fenómenos que son apreciables en la simulación.

- Diámetro hidráulico: mostrado en la fórmula 7, se emplea como una medida de una sección circular equivalente para secciones de tubos que no son circulares, por ello, se emplean el área y el perímetro.

$$D_h = \frac{4 * A}{P} = 8.246 \text{ m} \quad (7)$$

- D_h : Diámetro hidráulico.
- A : Área de la sección original.
- P : Perímetro de la sección original.

- Velocidad crítica: En determinadas condiciones, puede producirse un retroceso de los humos en sentido contrario a la ventilación o “backlayer”. Esto ocurre cuando el incremento de presión causado por la elevación de la temperatura supera al empuje de la ventilación. La velocidad de aire mínima necesaria para

evitar este fenómeno se denomina “velocidad crítica”, y es un parámetro fundamental para el diseño de los sistemas de ventilación longitudinal.

La velocidad crítica depende fundamentalmente de la potencia del incendio y de las dimensiones del túnel. Aunque no existe una metodología suficientemente validada para su cálculo, se puede aproximar por la fórmula 8 extraída junto con el diámetro hidráulica directamente de (Hacar Rogríguez, 2012).

$$V_c = K_1 K_2 \left[\frac{gHQ}{\rho C_p A \left(\frac{Q}{\rho C_p A} + T \right)} \right]^{1/3} = 2.778 \frac{m}{s} \quad (8)$$

- V_c : Velocidad crítica.
- K_1 : 0.61 (cte).
- K_2 : $1+0.0374s^{0.8}$ (S=pendiente túnel en %).
- g: gravedad.
- H: altura del túnel (m).
- Q: Potencia del fuego (W).
- Cp: Calor específico.
- A: Sección del túnel.
- T: temperatura ambiente.

La tesis (Migoya Valor, 2002, a) presenta las siguientes condiciones de contorno como válidas y afirma que se deben imponer condiciones de contorno en las paredes y suelo del túnel, en las secciones de entrada y salida y en la fuente del incendio.

- Capa Límite: En las paredes se supone que el campo de velocidades y las características turbulentas del flujo, energía cinética turbulenta, k, y su ritmo de disipación, ϵ , cumplen la ley logarítmica de la pared, de manera representativa se incluye la fórmula 9 que evidencia que la reducción de la velocidad viene determinada por una rugosidad de las paredes ($z_0 \ll z$).

$$u = 2.5u^* \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (9)$$

- u: Velocidad de las especies a través del túnel adimensional.
- u^* : Velocidad turbulenta de fricción adimensional.
- z: Distancia a la pared.
- z_0 : Rugosidad de la pared.

La zona donde el movimiento es perturbado por la presencia de un sólido, la velocidad del fluido se ralentiza cerca de la superficie estática (Rhie y Chow, 1983). Está directamente relacionado con el Reynolds, la velocidad, densidad y viscosidad del flujo, la rugosidad de las paredes etc. Se hace evidente la necesidad de tener un factor tan relevante presente en la simulación, contrarresta la velocidad del flujo de la entrada. El flujo será laminar, siendo según la fórmula de Reynolds (fórmula



10) más relevantes los efectos viscosos, no obstante, en las paredes se debe establecer una rugosidad, por pequeña que sea.

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (10)$$

- V_s : Velocidad característica del fluido.
- D : Longitud característica.
- μ : Viscosidad dinámica del fluido.

Por último, además de las condiciones y fenómenos cuantificados para la simulación habrá apartados donde se debe indicar cómo se desea resolver dichas ecuaciones, para ello será necesario tener en cuenta algunos factores más, que aparecerán no solo en decisiones para la solución, también suelen ser condiciones de contorno.

- Entrada-Velocidad y Salida-Presión: Esta condición afecta directamente al método de resolución que el programa emplea (*SIMPLE*, se verá en más adelante), por nomenclatura este asigna una entrada y una salida y se aporta valores de presión (atmosférica) y velocidad (un valor por debajo de la velocidad crítica calculada) para observar la circulación de gases
- Flujo de calor: existe tres métodos de transferencia de energía por calor entre elementos y estos depende de los estados de la materia que realizan el intercambio. En este experimento se decide solo emplear convección entre el incendio y el fluido que lo rodea y este fluido y las paredes del túnel. Según (Migoya Valor, 2002, c) Se supone que los flujos de calor y de escalar pasivo a través de las paredes son nulos. En general, para paredes no suficientemente aisladas térmicamente, se debe resolver un problema transitorio en el material sólido que recubre el túnel, e imponer condiciones de contorno en las caras exteriores. A través de la condición de contorno para la temperatura en la pared se produciría también un acoplamiento con la transmisión de calor. Sin embargo, se ha considerado que la pared está aislada térmicamente, lo que será conservativo.

Para la experimentación no se ha tenido en cuenta la radiación y para compensar una simplificación de este calibre se asigna una transmisión por convección nula evitando que el calor se disipe hacia las paredes, de este modo el incremento de temperatura será algo mayor que incluyendo la radiación y deja del lado de la seguridad los incrementos de temperatura. Simplificación asumida que verifica (Society of Fire Protection Engineers, 2002).

Para un incendio en un túnel, donde la carga computacional es importante, las condiciones de contorno son factores fundamentales que aportan realismo a los resultados, se emplean datos estimados o predefinidos y en otras geometrías más complejas se indagaría más en poner valores más cercanos a la realidad, debido al desconocimiento exacto de factores como presión atmosférica, velocidad de circulación del aire o la rugosidad media de las paredes del túnel.

2.4 Simulación

Como se comenta anteriormente, para poder resolver el propio programa informa de posibles errores, pero el tiempo de convergencia es un condicionante importante y solo la experiencia puede ahorrar horas o incluso días de espera. El apoyo de un experto en simulaciones de este carácter mejorará los tiempos de resolución, ahorrando pruebas de ciertos métodos que conducen a elevados tiempos de convergencia, de todos modos, la configuración es la predefinida por *Fluent*.

Este último punto conduce al método de acoplamiento Presión-Velocidad que sigue un algoritmo “*SIMPLE*” que resuelve con iteraciones.

SIMPLE: Se emplea en problemas sencillos (flujos laminares) en los cuales la convergencia está limitada por el acoplamiento Presión-Velocidad. Esto determina el modo de empleo de las ecuaciones generales. Este apartado se ha incluido de modo ilustrativo y las referencias para su empleo se han obtenido de (Versteeg y Malalasekera, 2006).

Una vez definidos los procedimientos, el siguiente paso lógico es plantearse dos cuestiones, por un lado, ¿qué tipo de resultados espero encontrar después de realizar la simulación? y por otro, ¿cuáles son los factores reales que determinan si el nivel de ventilación es adecuado? Para ello se muestran los párrafos siguientes:

Resultados previsibles

Fenómenos observables habituales que permiten tener una idea de si el informe de evacuación dará por válido el plan de ventilación o en el caso de ser rechazado por qué sucede, no es objeto de validar el sistema de ventilación en caso de ser necesario. Se ha empleado imágenes en las ilustraciones de la 4 a la 6 para ejemplificar visualmente los fenómenos.

- Estratificación de los gases: Este fenómeno es la disgregación por capas, como en la ilustración 4 de los distintos gases que ocupan el interior del túnel en una representación tridimensional habitual, sus densidades y temperaturas hacen que se ordenen de mayor a menor densidad, desde la base a la parte superior de la sección. Esto sucede siempre, pero la mayor o menor concentración de los gases nocivos de interés (CO y humo) en la parte superior puede alcanzar la altura limitante, la cual puede hacer que el modelado de la ventilación no sea válido.

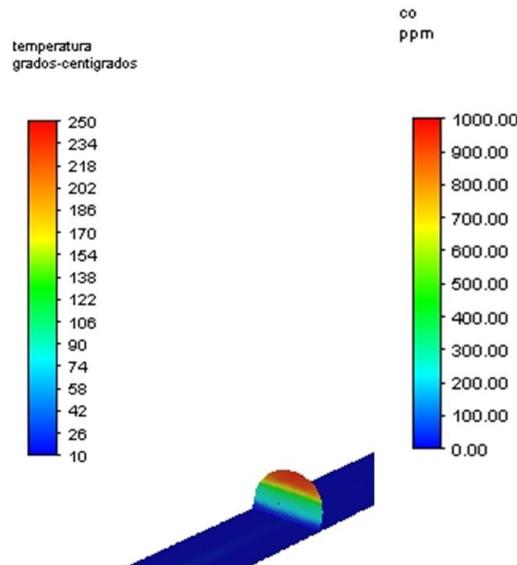


Ilustración 4: Imagen de distribución de temperaturas y de concentración de CO en un mismo punto del túnel.

- Efecto chimenea: El fenómeno sigue los mismos principios que la estratificación, los gases menos densos tienden a ocupar las partes altas de la sección. Este caso sucede lo mismo, pero en un sentido “longitudinal”. Como se observa en la ilustración 5 con una representación longitudinal, estos gases tienden a evacuarse por la salida situada a mayor altura, la presencia de este fenómeno es un indicativo de una adecuada simulación y permitirá observar cual es la ruta más problemática, permitiendo plantear las evacuaciones del peor escenario posible.

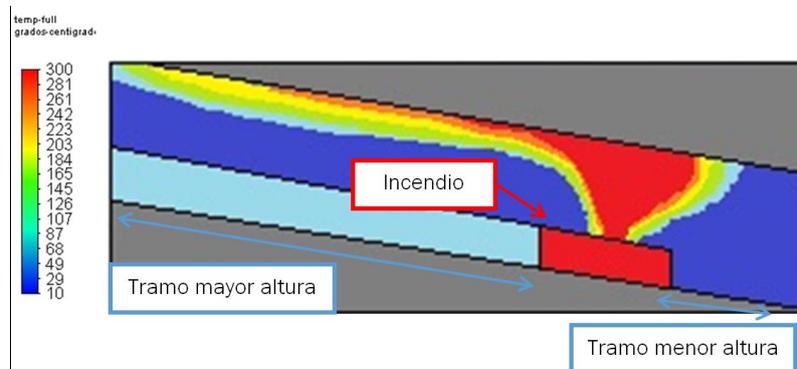


Ilustración 5: Imagen de distribución de temperaturas de un túnel con pendiente.

- Mezclado de los gases “Backlayer”: Un fenómeno producido por el mezclado de los diferentes gases implicados, en ciertas ocasiones la evacuación de los gases por efecto chimenea es un recorrido muy largo y no todos estos son capaces de salir al exterior por la parte superior. A medida que un gas recorre más distancia la turbulencia que se desarrolla en él va incrementando (por la cascada de energía), esta turbulencia facilita el mezclado con otras capas de los gases. Si se comienza a mezclar con el gas frío (aire) que está tomando el

incendio para la combustión, los gases nocivos (gases calientes de la combustión) quedarán atrapados o serán arrastrados hacia el interior, produciendo una concentración alta de los mismos no solo en la parte superior, sino en toda la sección. Información Adicional en (Hacar Rogríguez, 2012)

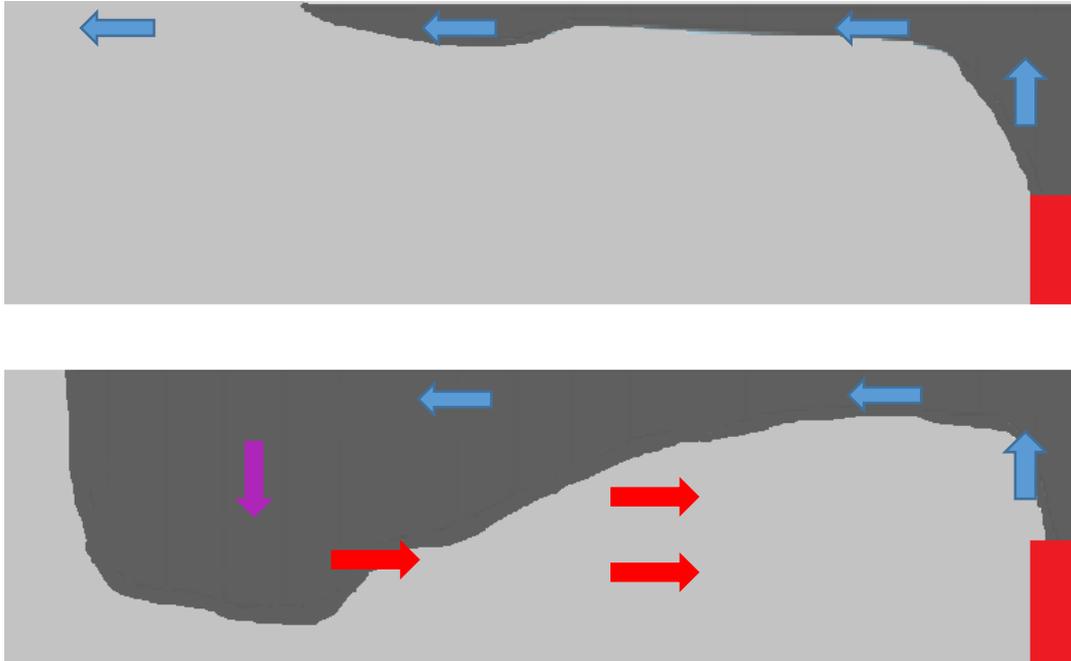


Ilustración 6: Fenómeno de la mezcla de los gases estratificados dentro del túnel o Backlayering.

Factores Limitantes

La investigación ha llevado a concluir que no existe una normativa estricta al respecto en España, por ello se aplicarán valores habituales encontrados en distintos trabajos de índole similar, concretamente valores encontrados en la (Migoya Valor, 2002, c) y en el informe de (Fuentes-Cantillana, 2011)

- Velocidad de los pasajeros (tiempo de simulación): Según estas fuentes, los evacuados, en unas condiciones de evacuación adecuadas, se desplazan a velocidades de entre 0,5 y 2 m/s, tomando como referencia el valor mínimo (0,5 m/s) tardarán 1000 s en evacuar el incidente, aun así, se va a controlar la simulación para 1200 s y se observará si los valores permisibles se rebasan.
- Temperatura: Descripción de la influencia que tiene este factor ambiental sobre los pasajeros. Así, junto a los efectos tóxicos o irritantes de la exposición al humo, el calor puede afectar a la capacidad individual durante la evacuación. Existen tres mecanismos principales que pueden producir la incapacitación y finalmente la muerte: golpe de calor, quemaduras cutáneas y el daño causado al sistema respiratorio por la exposición al calor.
Un golpe de calor puede ocurrir cuando una persona es expuesta a un ambiente con una temperatura creciente que no quema inmediatamente a la exposición. La temperatura crítica depende de la humedad y del tiempo de exposición,



situándose normalmente en un rango de 120 °C (aire seco) a 80 °C (aire saturado). La causa fisiológica del golpe de calor es un incremento de la temperatura corporal.

El daño al tracto respiratorio causado por el calor depende en gran medida de la humedad de los gases calientes inhalados. Sin embargo, las quemaduras térmicas no ocurrirán a menos que la temperatura del aire es suficientemente alta como para causar quemaduras cutáneas fatales. Si el aire excede la temperatura de 200 °C puede tener lugar un shock térmico instantáneo.

Descritos los efectos generales que el calor puede causar sobre el pasaje se puede determinar si los pasajeros corren el riesgo de quedar atrapados o sufrir percances.

Para las unidades se pasa de grados Kelvin a centígrados con la fórmula 11.

$$T[°C] = T[K] - 273,15 \quad (11)$$

- Concentración de CO: El nivel permisible de exposición al monóxido de carbono de acuerdo a la OSHA es de 50 partes por millón (ppm) promediado como el promedio del tiempo de peso de 8 horas (TWA). Un límite del techo (nivel de exposición que nunca debe excederse sin importar las 8 horas de TWA) de 200 ppm ha sido establecido por el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH). Un nivel de 700 ppm ha sido designado por NIOSH como de Inmediato Peligro para la Salud o la Vida (IDLH) se pueden ver unas referencias e información adicional en (Departamento de seguridad de WCF, consultado en 2019). Para establecer el valor de las partes por millón se ha empleado el siguiente cambio de unidades expresado en la fórmula 12 y se decide limitarlo a 100 ppm siendo muy restrictivos.

$$\rho[ppm] = \rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * 1000 \quad (12)$$

- Concentración de humos: El oscurecimiento por el humo se mide localmente usando la densidad óptica por longitud de la trayectoria o el coeficiente de extinción. Una visibilidad reducida tiene efectos adversos sobre la elección de ruta de salida y la velocidad de la marcha. Para determinar la visibilidad se utiliza la relación de Rabash, Se define la visibilidad en metros como en la fórmula 13.

$$Visibilidad [m] = \frac{1}{\left(0,434 * k * \left(\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] + 0,000000001 \right) \right)} \quad (13)$$

- k: constante que se puede obtener partiendo de valores límite de normativa, o mediante valores empíricos. se relaciona el valor de k con las características particulares del incendio y el túnel, basada en la disposición de un sistema de iluminación de emergencia.

Una distancia de al menos 7 m es necesaria para escapar fácilmente en un ambiente con humo. La distancia debe aumentar a 15 m para leer las señales. Por consiguiente, una distancia de visibilidad mínima de entre 7 y 15 m debe existir durante la evacuación y las operaciones de extinción.

Esta hipótesis de visibilidad está basada en la disposición de un sistema de iluminación de emergencia, en la ruta de evacuación, que sirva para guiar a los pasajeros hacia una zona segura. Secundado por los informes mencionados al comienzo del subapartado.

2.5 Resumen de las condiciones del modelado

Geometría

Ha quedado definida en su totalidad la geometría necesaria para llevar a cabo el estudio, debe quedar como resultado el cuboide Incendio a una distancia determinada de la boca Sur, y el fluido delimitado por las paredes del túnel, las bocas y el conjunto tren. Recordar que se establecen superficies paralelas a la acera durante toda la ruta de evacuación.

Mallado

Los requisitos son escasos en este apartado, cumplir los criterios del mallado y mallar como un conjunto para lograr la transmisión de propiedades entre los sólidos.

Físicas

Parámetros de fluidos y demás fenómenos que establecen un experimento con las siguientes características:

- Incompresible.
- Transitorio.
- Efecto gravitacional.
- Ecuaciones de fluidodinámica (con energía).
- Ecuaciones de la turbulencia.
- Fenómeno Incendio.
- Materiales.
- Capa límite
- Entrada por velocidad y salida por presión.
- Flujos de calor nulos.

Simulación

Quedan definidos los efectos previstos como resultados y se establecen los valores límite de concentraciones y temperaturas medidos quedando como rechazados durante el tiempo de evacuación (1200 s):

- Temperatura > 200 °C.
- $Y_{CO} > 100$ ppm.



- Visibilidad < 15 m.

Los siguientes tres aparados muestran cómo se han aplicado estos criterios y finalmente los resultados de la simulación.

3. Modelo

Partiendo de las limitaciones y obligaciones definidas en el apartado 2.1 sobre la geometría, se ha empleado una geometría muy común y válida para túneles ferroviarios en esta clase de simulaciones, adaptada para la normativa aplicada.

Definiendo los sólidos y superficies presentes, debe quedar absolutamente claro que al estar configurando un CDF, no es necesario incluir cada detalle de la geometría, esto empeorará la calidad del mallado y dificulta un buen resultado, por otro lado una buena geometría facilita y agiliza el cálculo.

Vistos los requerimientos, la ilustración 7 ilustra el aspecto final del túnel, la geometría de las paredes del sólido “Fluido”, de longitud total de 1800 m y de sección definida en el Anejo II.

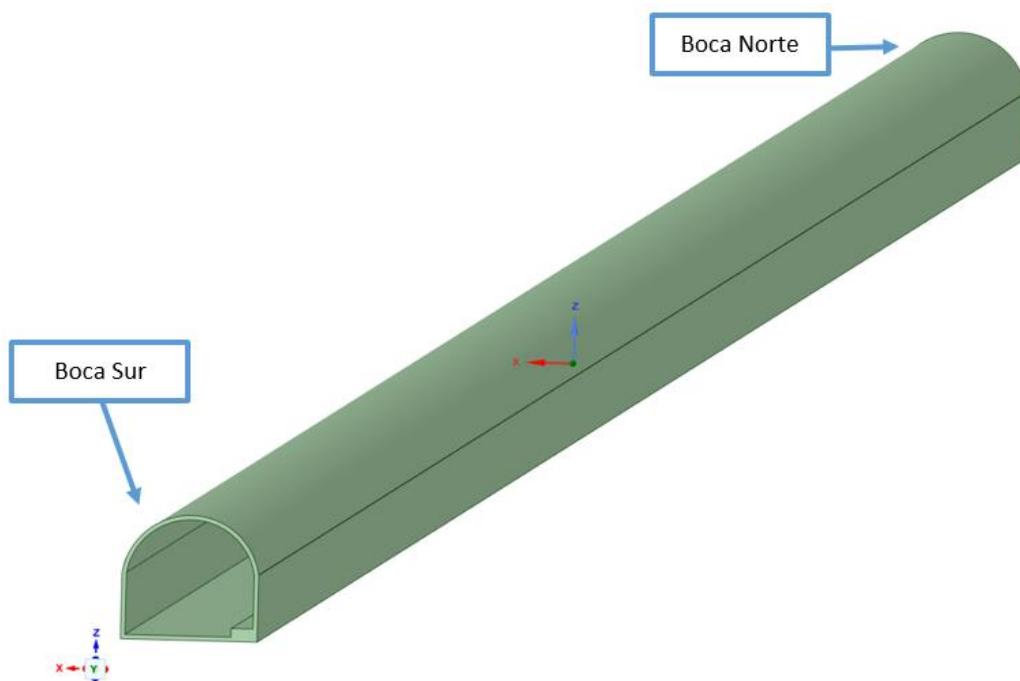


Ilustración 7: Representación del túnel (sin escala).

El tren se simplifica hasta el punto de quedar representado por dos sólidos (ilustración 8) con formas de prismas rectangulares, siguen la forma longitudinal del túnel.

- El incendio: se representa a la distancia de 877 m de la boca sur (tapando la segunda galería) con forma de cuboide. Es importante que quede representado como sólido en el programa, necesitaremos usar sus superficies para definir cómo sucede el incendio.
- El tren: representa los demás coches, los que no se incendian. Con la misma sección y una longitud que se termina antes que la ruta de evacuación. Este sólido quedará representado únicamente como superficies en el fluido, no



intervienen en el movimiento de los gases, ni introduce información relevante para el experimento.

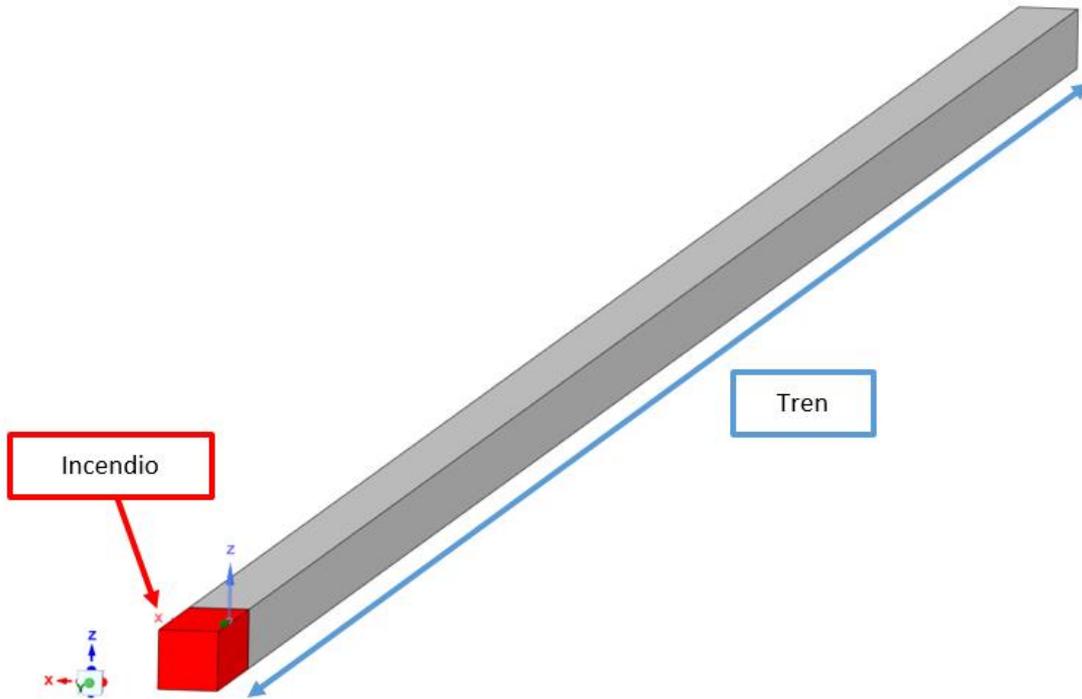


Ilustración 8: Representación del conjunto tren (sin escala).

El fluido es la geometría más importante (junto con el incendio), mostrado en la ilustración 9, es el lugar geométrico donde suceden los fenómenos de interés y es necesaria su correcta definición, sus límites son las paredes del túnel, las bocas Norte y Sur, las paredes del incendio y las paredes del tren. Este debe quedar definido como sólido para poder poner sobre él los límites geométricos exteriores e interiores. En una primera instancia el fluido conservará la sección perpendicular lo más simplificada, esto ahorra cálculos y ajusta mejor los parámetros limitantes del mallado.

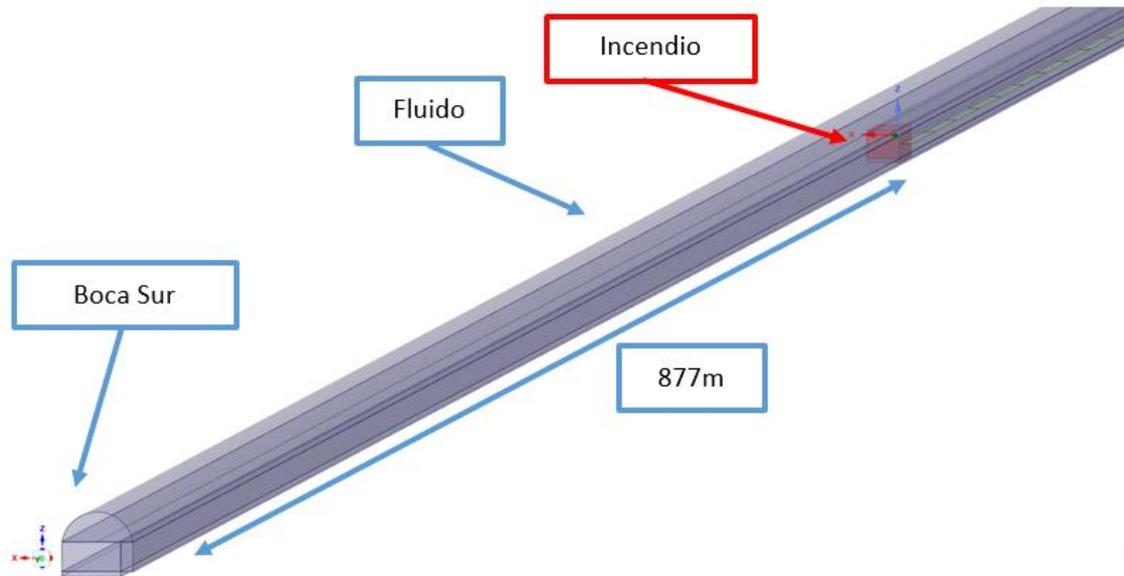


Ilustración 9: Representación del modelo final completo (Fluido e Incendio, sin escala).

Una vez determinado el fluido, se puede extraer más información con otras representaciones. Es habitual en estas simulaciones preguntarse qué es lo que sucede a la altura de 1.8m sobre la ruta de evacuación, por visibilidad de la señalización y respirabilidad del ambiente. Esto se soluciona con una representación de planos a dicha altura, sabiendo que la evacuación es un recorrido de 500 m, en la ilustración 10 se muestran los planos mencionados con una longitud de 25 m empezando en el incendio y terminando en la galería de la evacuación (a 475 m hacia la salida norte desde la galería bloqueada), el resultado son 19 superficies a lo largo de la ruta de evacuación a 1.8m de la acera izquierda con la forma de la misma.



Ilustración 10: Representación de los 19 planos a 1.8m del suelo junto al conjunto tren (sin escala).



4. Mallado

Una vez generada la geometría el siguiente paso será el mallado de la misma, el objetivo principal es discretizar el sólido en sólidos de menor tamaño, de esa forma, lograr formas regulares a través de las cuales el programa sea capaz de calcular el comportamiento del fluido. Para garantizar que la simulación sea convergente, uno de los criterios principales es saber con ciertas garantías que la malla cumple con la calidad mínima de los criterios expuestos en el apartado 2.2. Para cumplir dichos criterios se pueden realizar mallados muy finos (elementos “pequeños”) que lo cumplan, pero incrementa drásticamente el tiempo de convergencia, por ello el equilibrio ideal del mallado será aquel que cumpla los criterios expuestos, pero combinado con unos valores ajustados. Después de saber que el mallado es adecuado comenzamos a preparar nomenclatura de las superficies.

Es importante saber cómo debe comportarse cada elemento y su situación en la geometría para estimar la clase de mallado que se debe obtener, un ojo experimentado en los mallados puede resolver los problemas eficazmente y ser capaz de diferenciar la calidad solo observando la distribución de los elementos, el buen mallado es el principio para una solución convergente en *Fluent*.

Partiendo del resultado de *SpaceClaim* (apartado anterior), pero realizando diferentes configuraciones se opta por presentar una sección muy simplificada, quitando detalles que empeoran la calidad y dificultan la convergencia, tratando de respetar principalmente la parte superior, que como hemos previsto será determinante.

Todas las geometrías que tengan la física activada aparecerán en el árbol del proyecto, por lo tanto, están el fluido y el incendio (ilustración 9). La gran ventaja de un mallado conjunto es que no permite mallar por separado, dejando un resultado adecuado casi automáticamente. Habitualmente un buen mallado debe tener una apariencia coherente, unos elementos bien proporcionados y una orientación de los elementos acorde a la geometría. Esto se logra a través de la experimentación y algunas pautas marcadas por el experto.

Se presentan los resultados obtenidos, estos son los datos que se llevarán al apartado *Fluent* y que permiten que la solución sea convergente. Los resultados mostrados en las ilustraciones 11 y 12 provienen de haber buscado los siguientes objetivos:

Mallados uniformes, con gran nivel de precisión en el incendio y en la bóveda del túnel, eliminación de detalles irrelevantes, tratar ambos sólidos como fluidos, pero con elementos de diferente origen, evitar irregularidades en los detalles y emplear un número bajo de elementos para el ahorro de tiempo en *Fluent*.

Estadística

Aporta dos datos a mayores que sirven para saber si el refinado es acorde a otras simulaciones de la misma índole. Tiene nodos y elementos mostrados en la tabla 2.

Estadísticas		
Nodos	696.887	Número de nodos generados en el mallado
Elementos	626.130	Número de celdas generadas en el mallado

Tabla 2: Resultado del apartado Statistics; Mesh

Malla Incendio

Un mallado uniforme y con detalle suficiente, que con la configuración estándar resultan mezcla de elementos hexaédricos y tetrahédricos observables en la ilustración 11.

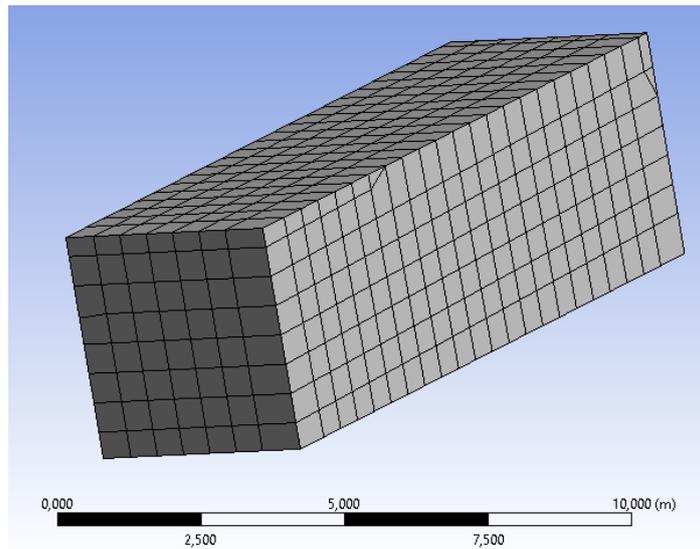


Ilustración 11: Mallado de la geometría del Incendio con hexaedros.

Malla Fluido

Un mallado uniforme y con detalle suficiente, que continua el desarrollo longitudinal de la geometría, ilustración 12.

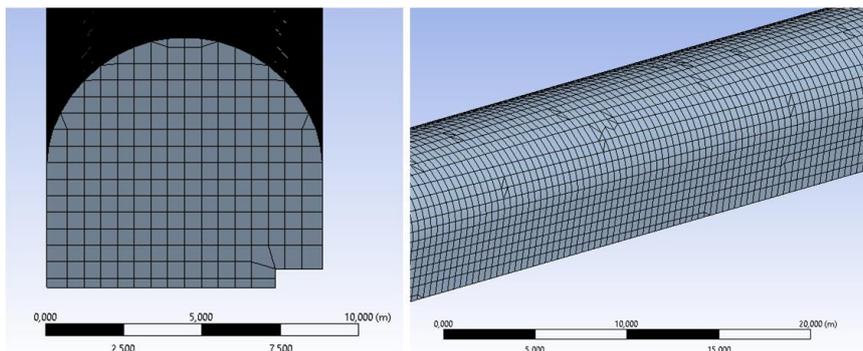


Ilustración 12: Imagen del mallado definitivo del fluido como malla de un conjunto.

Una vez justificada la razón de ser de la forma del mallado entramos en la configuración de *Fluent*, donde con ayuda del programador experto del departamento de ventilación se van a justificar los parámetros más generales.



5. Fluent

La configuración de este apartado de la simulación es la que contiene más materia teórica y la que pone los parámetros que conducen la simulación a resultados similares a la realidad. Se parte de la malla obtenida con su selección por nombres del capítulo anterior y se configuran los apartados de Dominio, Físicas, Soluciones y Resultados.

5.1 General

Debido a que este apartado se realiza con ayuda del programador experto, en vez de realizar una explicación muy detallada se va a concretar con los parámetros a través de la tabla 3, que definen el experimento. Como ya se ha demostrado que la calidad de la malla cumple los criterios impuestos se pasará directamente a los parámetros de influencia, sabiendo que se puede comprobar el mallado en la pestaña de “Dominio” del programa. Por último, el orden de configuración carece mucho de relevancia en la mayoría de los casos, por ello simplemente se sigue el orden que *Fluent* establece para sus pestañas, así se pasa a los modelos que son las ecuaciones que se emplearán para resolver en las iteraciones.

General		Valores de referencia	
Tiempo	Transitorio	Area (m2)	1
Tipo	Basado en Presión	Densidad (kg/m3)	1,225
Gravedad	z=-9,81 m/s	Longitud (m)	1
Modelos		Temperatura (K)	228
Energía	On	Velocidad (m/s)	1
Viscoso	K-ε (Realizable)	Viscosidad (Kg/m-s)	1,79E-05
Especies	On	Ratio de calores específicos	1,4
Materiales		Criterio absoluto de convergencia	
Sólido	Aluminio	Energía	0,000001
	Hormigón	Continuidad	0,001
Fluido	Aire	Velocidad-X	0,001
	Humo	Velocidad-Y	0,001
	Dióxido de carbono	Velocidad-Z	0,001
	Monóxido de carbono	Energía cinética turbulenta	0,001
Mezcla	Mezcla (CO-AIRE)	Tasa de disipación específica	0,001
Métodos de solución			
Esquema	SIMPLE		
Discretización espacial	-		
Presión	Estándar		
Densidad	-		
Momento	Segundo orden Upwind		
Energía cinética	Segundo orden Upwind		
Tasa de disipación específica	Segundo orden Upwind		
Energía	Segundo orden Upwind		

Tabla 3: Tabla de configuración general de *Fluent*.

Condiciones de contorno

En esta parte de la tarea se puede configurar los tipos de contorno y mostrar sus condiciones y parámetros para definirlos en cada superficie del contorno, es habitual que la mayoría de las condiciones ya estén asignadas al proceder del apartado del mallado ya sea por nomenclatura (paredes-Wall, entrada-inlet, etc.) o por su localización en la geometría (interior), por otro lado hay condiciones que requieren de unas modificaciones, para ello se emplean las siguientes configuraciones: Salida por Presión, Entrada por Velocidad, Interior y Paredes. Es necesario matizar que en este apartado el experto programador ayudó en la tarea de interrelación entre condiciones de contorno y el apartado del mallado, definiendo las pautas para una simulación eficaz.

UDF

Término que proviene de “*User Defined Function*” que traducido puede interpretarse como “función definida por el usuario” es el método elegido para incluir todas las entradas y salidas de especies y energía desde el incendio. La combustión es un fenómeno complejo, ANSYS ofrece la posibilidad de introducir funciones programadas en “.c” que controlan las proporciones de consumo y generación de los gases, de ese modo se simplifica una combustión (un fenómeno turbulento e incontrolado). Este apartado de la configuración son programas predefinidos según las dimensiones y potencia del incendio, no han sido objeto de estudio y son confidenciales, por ello no se indaga más en ello.

5.2 Soluciones

Este apartado ha permitido configurar cómo se deben realizar los cálculos, por qué métodos, establecer parámetros comunes, cuales son los informes objetivo, inicializar la simulación y realizar los cálculos con parámetros temporales deseados. Los subapartados siguen el nombre que *Fluent* tiene como pestañas, para facilitar así su localización.

En modelos transitorios, de transferencia de calor, supuesto de flujo laminar, con campos de flujo fase gas se llega a la configuración mostrada en el apartado “Métodos”, después se incluyen parámetros que no existen para *Fluent* o que no están predefinidos como por ejemplo las partes por millón o los grados centígrados, también se expone la frecuencia de la realización de cálculos y cada cuanto se reporta la información.

Realizar los cálculos

Por último, previo a los cálculos, han de establecerse el número de incrementos de tiempo y la definición de espacios de tiempo entre incrementos, en este caso interesa que sea fijado así se podrá seleccionar un instante representativo. Todas las demás opciones se preparan para cuadrar los espacios de tiempo y alcanzar los 1200 s, que según los incrementos de 0.5s de tiempo son 2400 incrementos, pero se emplean iteraciones de más para asegurar que la solución converge.



El programa ha quedado definido, incluir dos tipos de informe seleccionando las superficies de interés permite visualizar datos como los mostrados en el apartado “Representaciones tridimensionales” con la opción de contornos o “gráficos de los planos “SXX”” del capítulo “Resultados”, estos se emplean para secundar las decisiones tomadas mostrando si los fenómenos esperados suceden.

Para la obtención de toda la configuración de *Fluent* además de la colaboración con el programador principal, se ha requerido de distintas referencias, como (Migoya Valor, 2002, a), (Sarcnet, 2009) o (*CFD Ninja web page*, 2018).

Capítulo III: Resultados

En este apartado se va a mostrar todos los resultados que se han generado a partir de ANSYS, que se emplean en la generación del informe y que pasará a manos del departamento encargado de la simulación de la evacuación, quien emplea la información para completar el informe, decidir si es necesaria la ventilación del túnel y como se debe ventilar.

De este apartado sale la información verdaderamente utilizable por el departamento encargado de la evacuación, Son resultados que pueden concretarse más y durante un intervalo de tiempo mayor, pero más allá del tiempo de 1200 s se considera que la simulación es estable y debería pasar a considerar el uso de otra programación estacionaria (no se contempla en los requisitos).

1. Convergencia

La ilustración 13 permite visualizar los datos residuales de cada ecuación implicada en la resolución, el objetivo es lograr que la variación entre las distintas ecuaciones sea igual, eso permite afirmar que los resultados son convergentes. Como se observa, la variación entre las distintas ecuaciones se estabiliza una vez aportados un número elevado de iteraciones, esto ha sido posible gracias a un ordenador potente, numerosas horas de resolución y un procedimiento de prueba y error. Se han seguido pautas encontradas en (*CFD Ninja web page, 2018*) y gracias a referencias del programador.

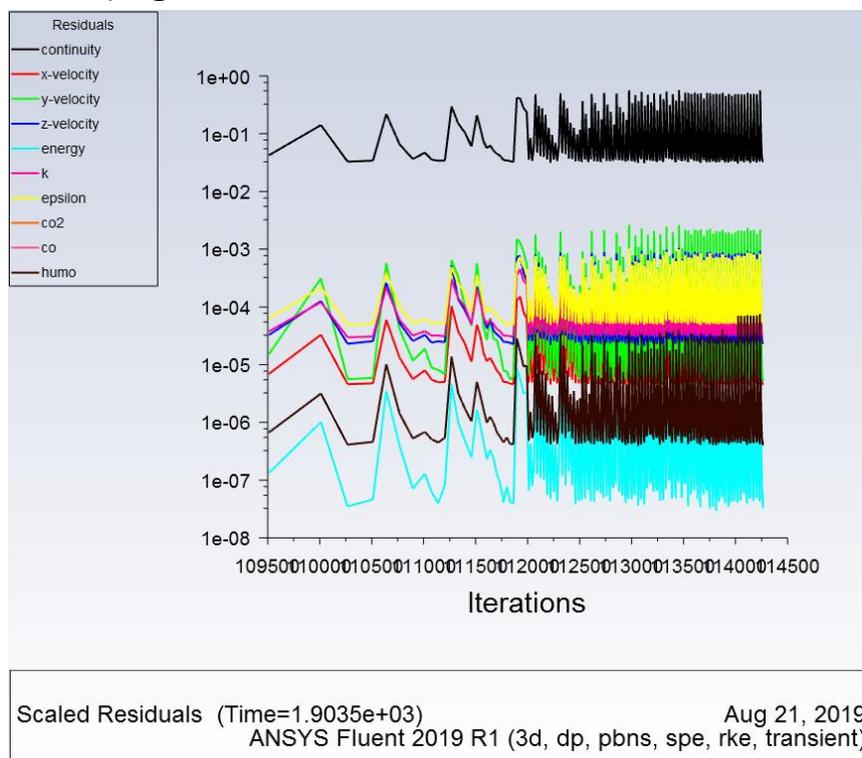


Ilustración 13: Gráfico de Fluent mostrando los valores residuales de cada ecuación resuelta frente al número de iteraciones.



Como curiosidad y para secundar las decisiones tomadas para las configuraciones, se incluyen unos datos de tiempos comparando los tiempos estimados al comienzo y al final en la tabla 4. Se puede concluir que además del método resolutivo, el número de iteraciones y la carga de soluciones hacen variar estos tiempos importantemente.

	Primer intento	último intento	Ahorrado
n° de <i>Time Steps</i>	2400	2400	
Tiempo estimado por <i>Time Step</i>	610	160	450
Tiempo total (s)	1464000	384000	1080000
días	16	3	13
horas	22	12	10
minutos	40	0	40

Tabla 4: Tiempos de convergencia

2. Gráficos de los planos “SXX”

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, se configuran unos informes del estado de los gases (concentraciones) y temperaturas para cada medio segundo y para cada superficie S, tabulados en el Anejo III. Con el objetivo de facilitar su interpretación y contrastarlo de forma más visual con las representaciones tridimensionales, se representan estos datos desde la ilustración 14 hasta la ilustración 16 observar exactamente que está sucediendo en los mismos instantes a lo largo de la ruta de evacuación a 1,8 m de altura. Estos datos suelen reutilizarse.

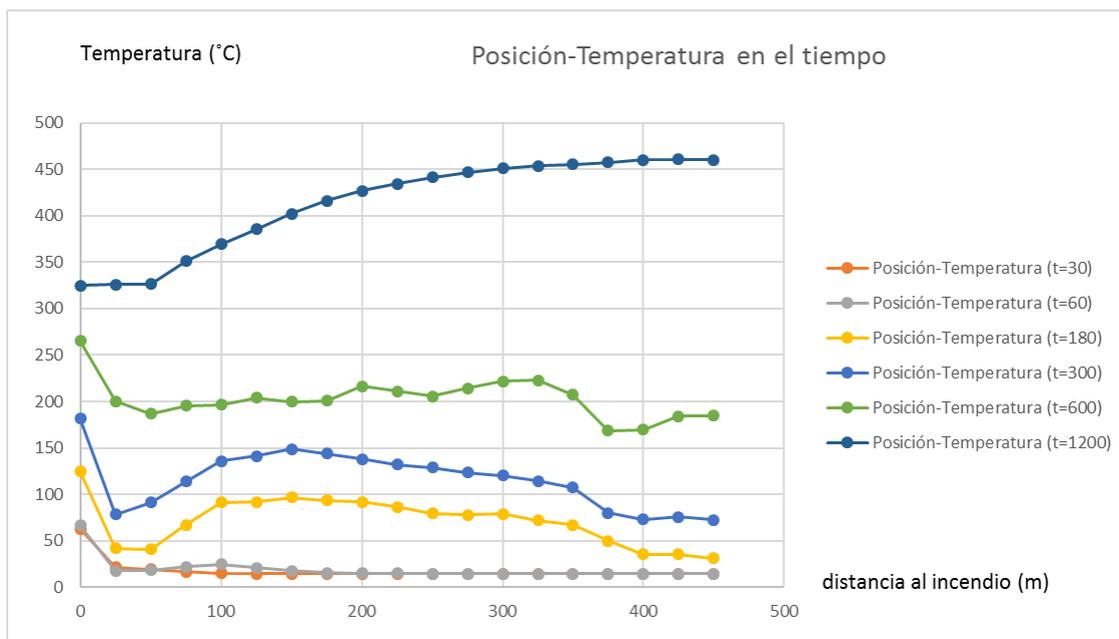


Ilustración 14: Evolución de la temperatura a lo largo de la ruta de evacuación a 1,8m de altura sobre la acera.

Vistos los resultados ya se puede afirmar que la ventilación por convección natural a partir de los 600 s no es un aspecto viable, el *backlayering* hace su efecto debido a la gran longitud del túnel, provocando esta subida de temperaturas desde los 180 m hasta los 330 m aproximadamente (equivalen a 1057 m y 1207 m desde la boca Sur del túnel). A los 1200 s se puede observar la estabilización de los fenómenos, pero a una temperatura elevada.

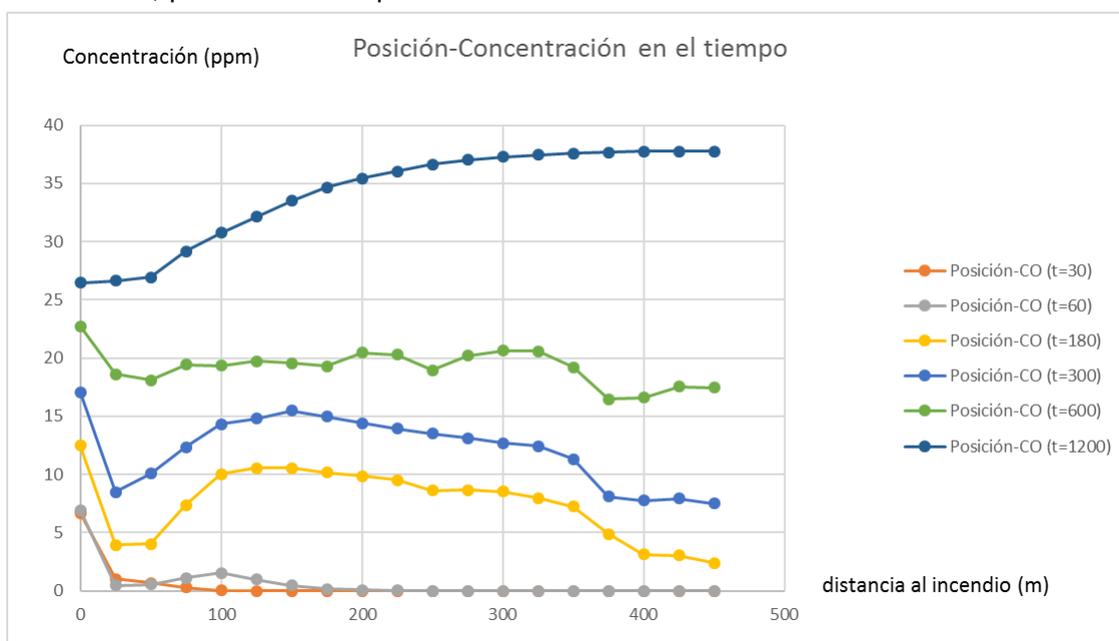


Ilustración 15: Evolución de la concentración de CO a lo largo de la ruta de evacuación a 1,8m de altura sobre la acera.



La concentración de CO se mantiene en valores razonables y estables durante todo el desarrollo de la simulación, no supera el valor de 100 ppm establecido como límite, no se generan grandes variaciones y secunda el comportamiento que presenta la temperatura.

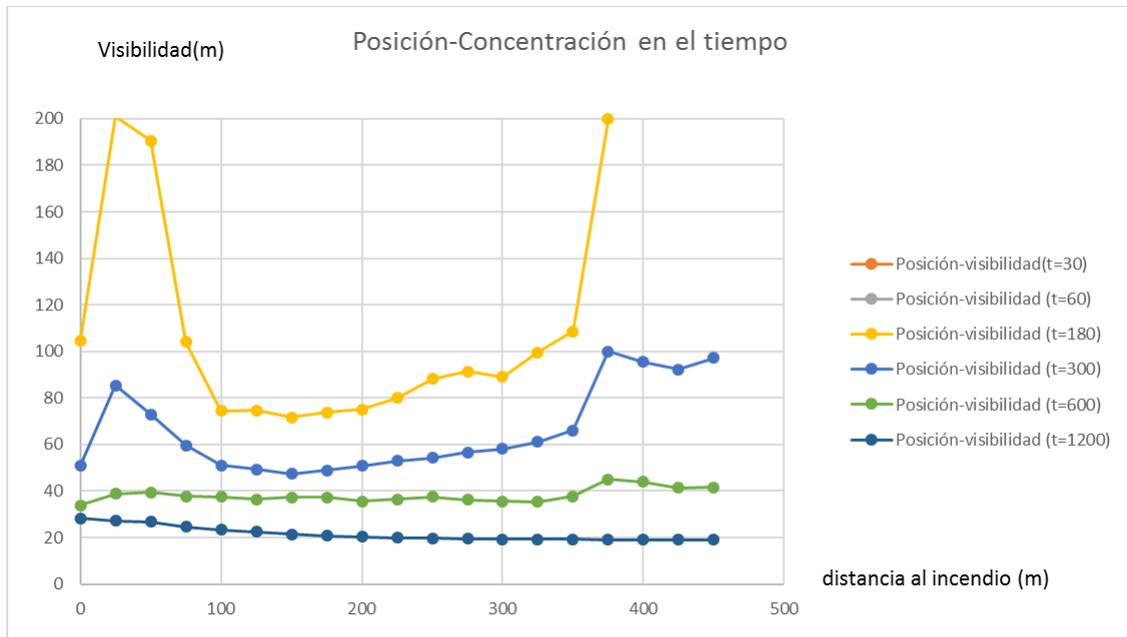


Ilustración 16: Evolución de la visibilidad con humos a lo largo de la ruta de evacuación a 1,8m de altura sobre la acera.

La visibilidad será adecuada incluso al final de la evacuación, con un valor mínimo de 19 m el riesgo de reducir la velocidad de los evacuados por debajo de 0,5 m/s es casi nulo, no supone ningún inconveniente.

Se puede observar como la evolución de los gases a lo largo del túnel no es uniforme, se producen un efecto de retorno de ciertos gases a lo largo de la ruta. Este fenómeno no conserva su tendencia en el tiempo, siendo un factor favorable para una adecuada ventilación. La visibilidad y la concentración de gases nocivos no son un problema, por otro lado, la temperatura alcanza valores alarmantes dentro de la ruta de evacuación a partir de los 600 s, permitiendo afirmar que la ventilación natural es inviable. El resultado es preciso, pero lo corroboraremos con las representaciones tridimensionales, estas darán una perspectiva más tangible de los resultados.

3. Representaciones tridimensionales

Estas representaciones aportan información visual adicional, no solo secundan las gráficas mostradas anteriormente, también ayudan a visualizar la estabilización de los gases a lo largo de la evacuación, observar el estado por debajo de las superficies representadas en las gráficas y mejoran la comprensión de los fenómenos para los menos entendidos. Se toman en los mismos instantes de

tiempo que las gráficas y en el caso de la temperatura se han creado secciones cada 50 m para observar la evolución en secciones transversales. Se va a realizar un análisis gráfico de la experimentación siguiendo este orden: primero la representación tridimensional de las temperaturas en “°C” desde 30 s hasta 1200 s, segundo la representación tridimensional de las concentraciones en partes por millón de la concentración de CO desde 30 s hasta 1200 s y por último la representación tridimensional de la visibilidad en metros desde 30 s hasta 1200 s. Es un intervalo de tiempo suficiente para conocer la evolución transitoria del incendio hasta su estabilización.



3.1 Contornos de Temperaturas

Representación de la evolución de las temperaturas desde la ilustración 17 hasta la 22, con dos puntos de vista, primero las paredes del túnel y después el interior con sus secciones y superficies mencionadas.

30 segundos

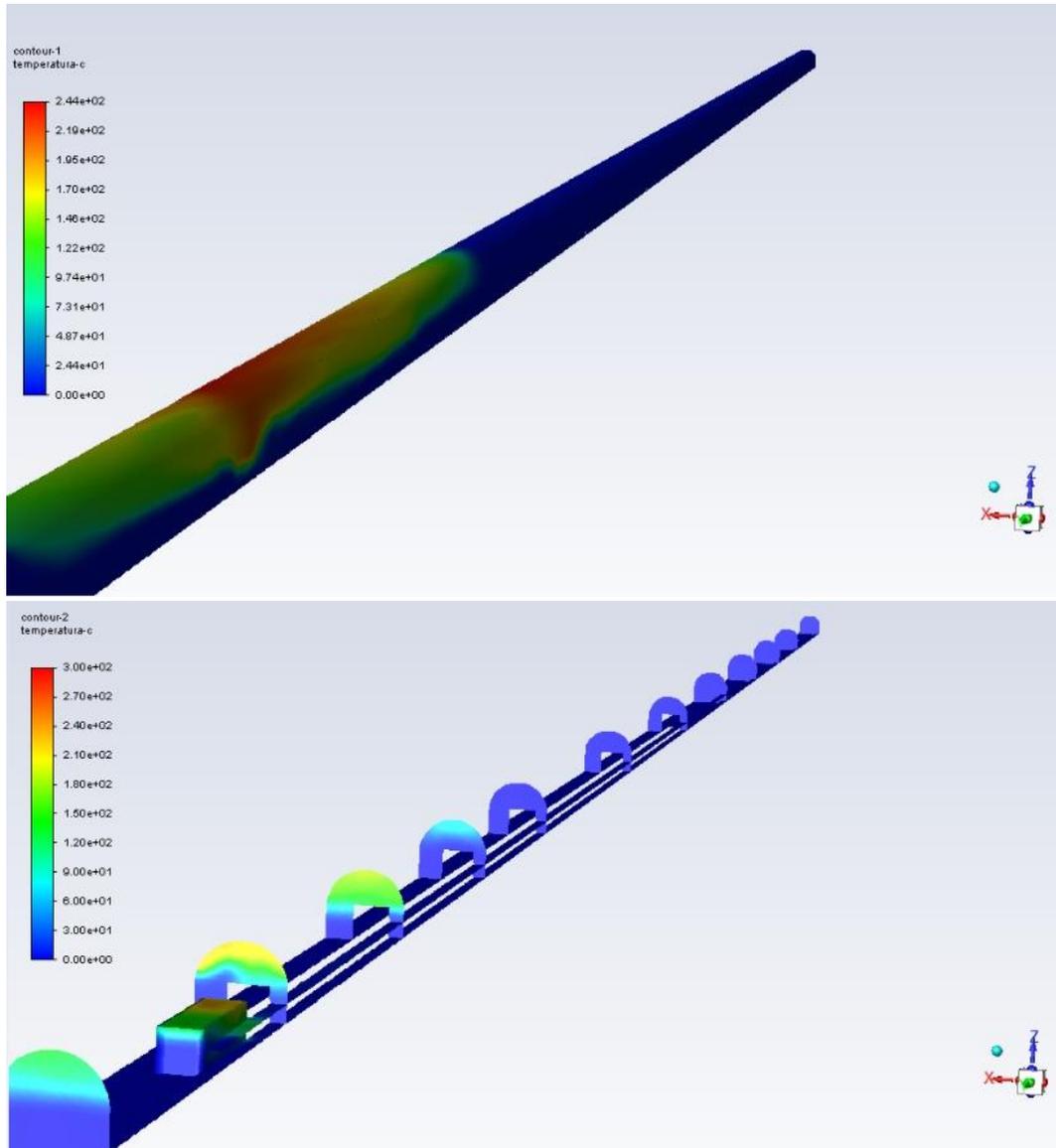


Ilustración 17: contorno de temperaturas a 30s

Se puede observar que la temperatura se mantiene en un rango aproximado de 15 °C en todo el recorrido del túnel, mientras que hay un incremento de la temperatura en la zona muy próxima al incendio hasta los 200 °C.

60 segundos

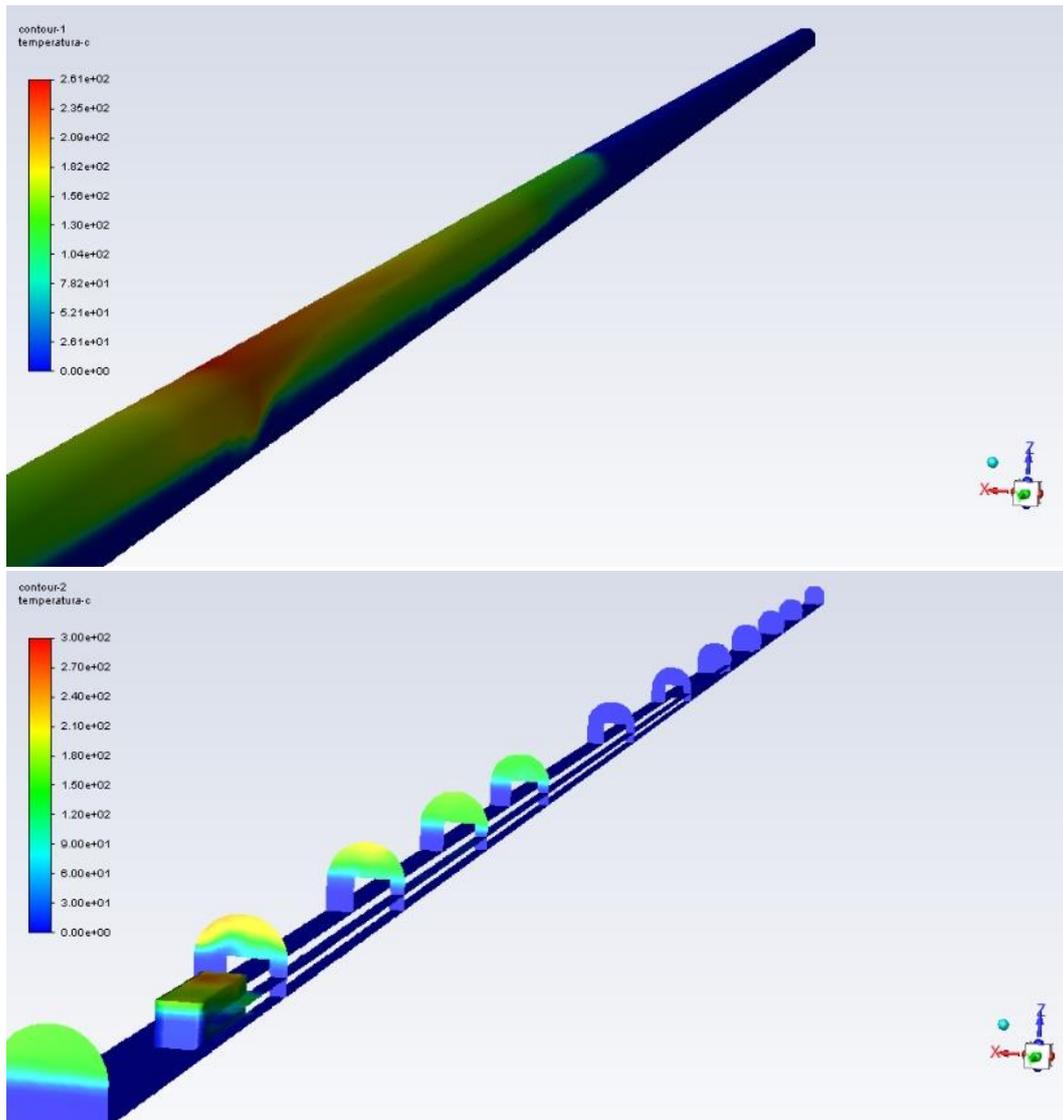


Ilustración 18: contorno de temperaturas a 60s

Se puede observar que la temperatura se mantiene en un rango aproximado de 15 °C en todo el recorrido del túnel, mientras que el incremento de la temperatura a medida que nos acercamos a la zona del incendio va aumentando hasta los 240 °C aproximadamente.



180 segundos

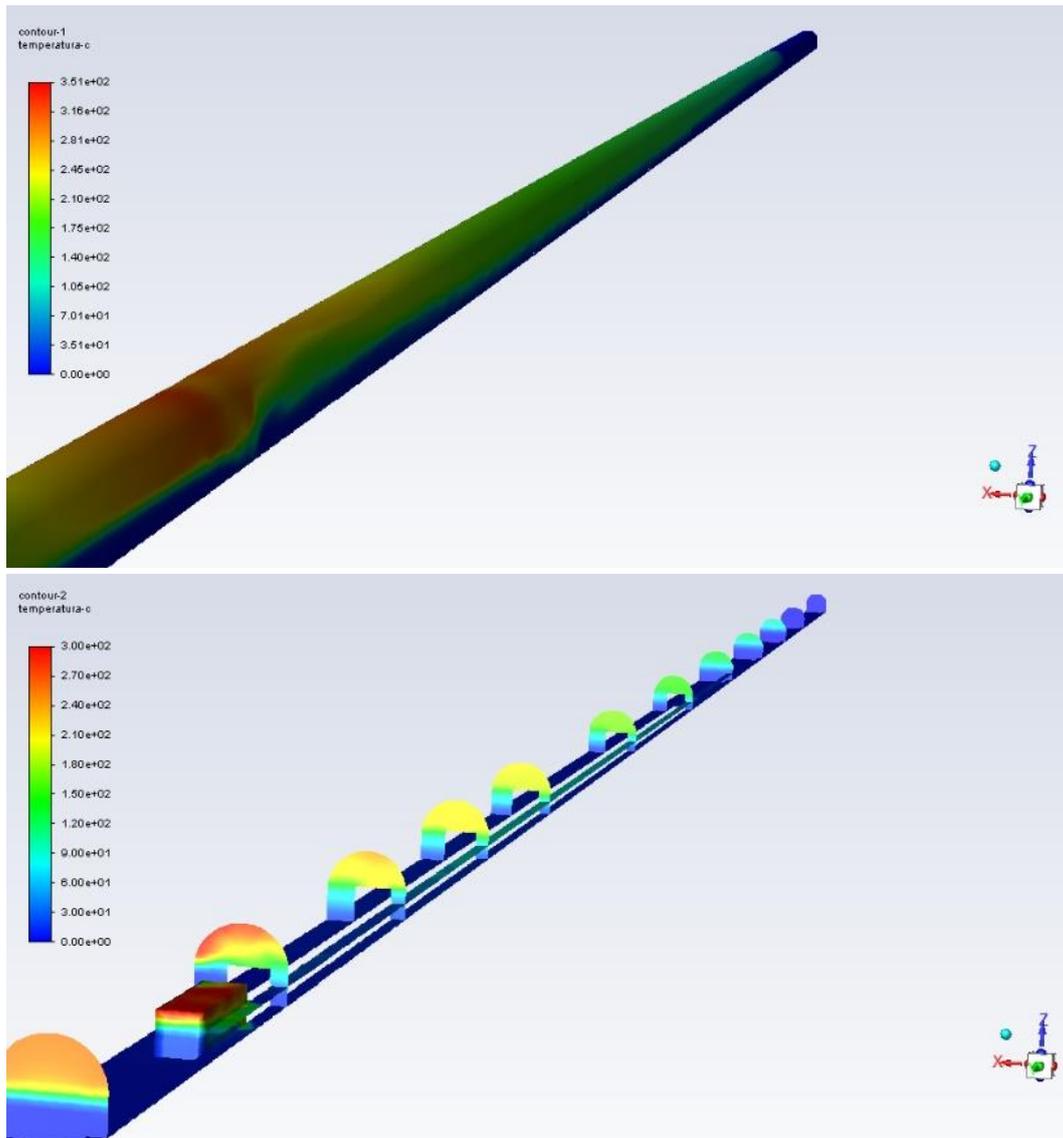


Ilustración 19: contorno de temperaturas a 180s

La temperatura se mantiene en un rango bajo, pero ya se tiñen de verde (150 °C) algunas partes de las superficies por la parte intermedia podemos confirmar que la distribución tiende hacia la salida superior por efecto chimenea y se observa ligeramente el *backlayering* sobre los 1100-1250 m.

300 segundos

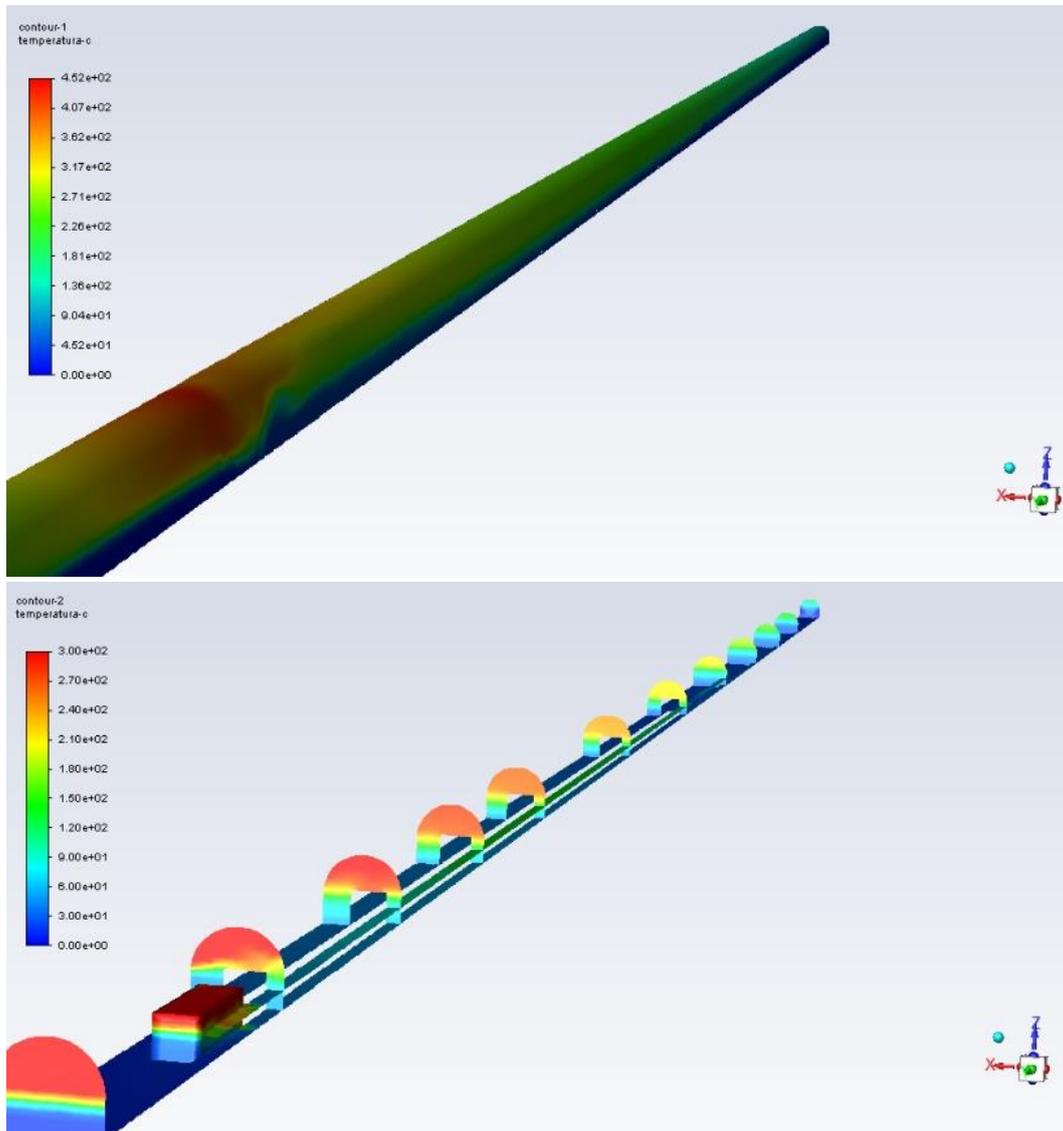


Ilustración 20: contorno de temperaturas a 300s

El desarrollo en la bóveda sigue mostrando el efecto chimenea y por encima de valores razonables, se mantiene estable la temperatura en las superficies “SXX”, los incrementos de temperatura alcanzan la salida Norte.



600 segundos

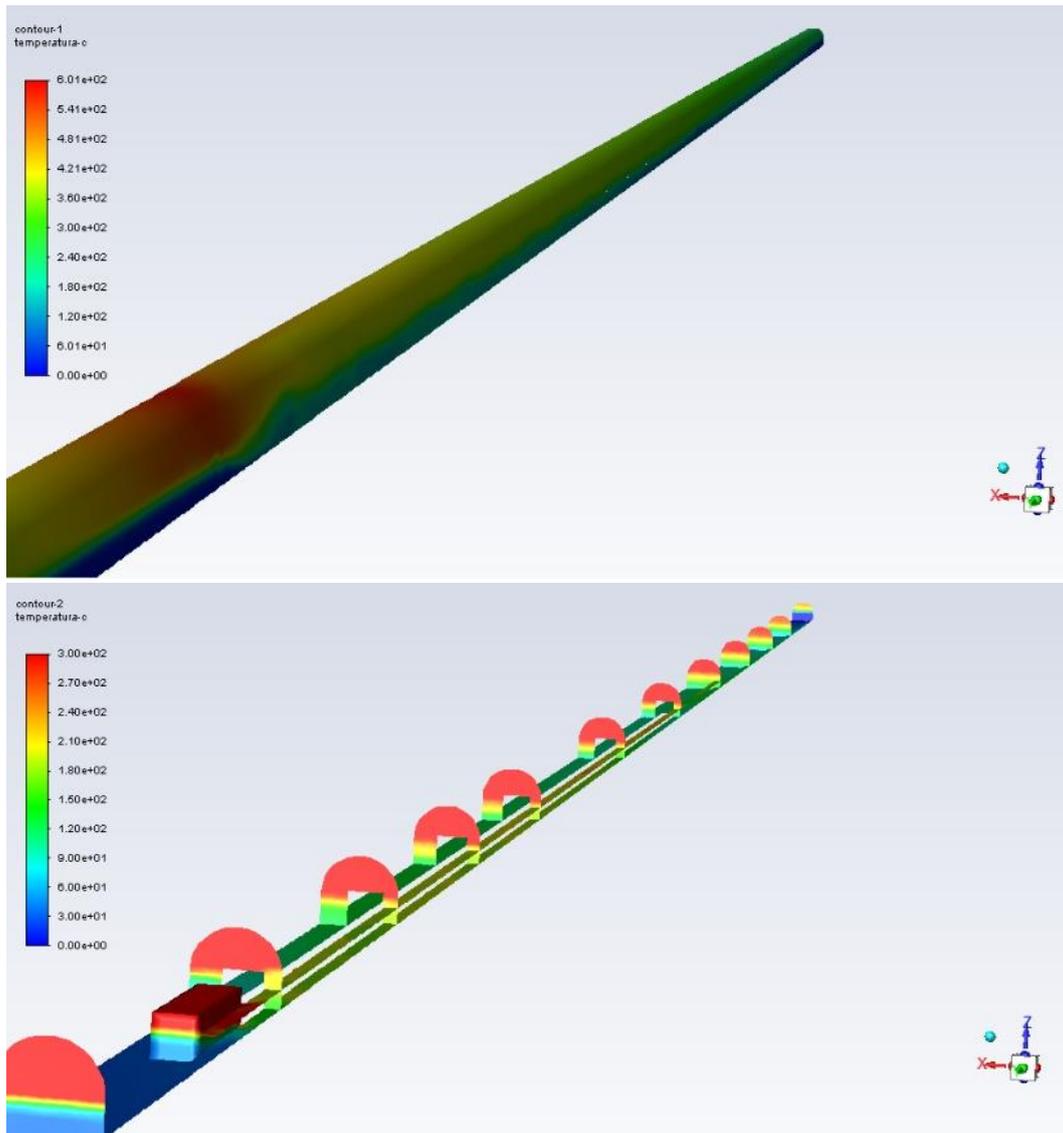


Ilustración 21: contorno de temperaturas a 600s

Las superficies se han teñido de amarillo, eso implica que están a más de 200 °C el límite propuesto. Se puede afirmar que existe una temperatura de cerca de 500 °C en las partes más calientes, como corrobora la gráfica de la ilustración 14.

1200 segundos

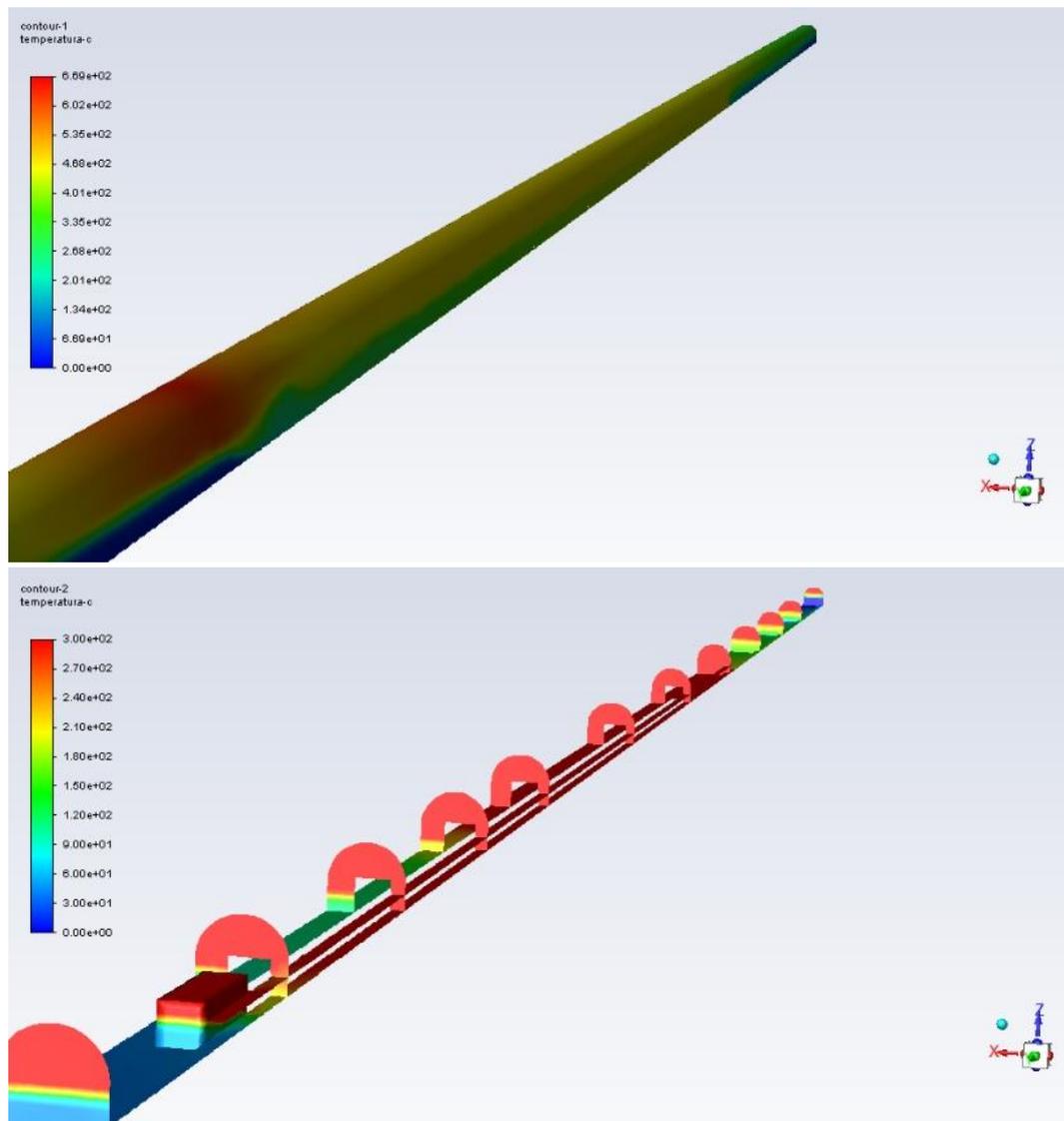


Ilustración 22: contorno de temperaturas a 1200s

Con una temperatura dominante de alrededor de los 470 °C, el ambiente ha superado los valores de supervivencia ampliamente y se observa la acumulación de las altas temperaturas sobre la mitad de la ruta de evacuación, punto crítico.



Valoración de los datos de temperatura

Sobre la mitad de la ruta de evacuación la temperatura a 1,8 m del suelo, llega a valores muy elevados y con el paso del tiempo continúa incrementando, estabilizándose pasados los 600 s. No solo alcanza valores por encima del shock instantáneo de un ser humano, la estructura según las simplificaciones asumidas tendrá afectaciones térmicas aseguradas, sin garantías de una sustentación adecuada durante la evacuación. Esta condición obliga a que el tiempo de evacuación tenga que ser muy reducido, podemos concluir que es necesaria la instalación de un sistema de ventilación forzada.

3.2 Contornos de CO

Representación de la evolución de la concentración de CO desde la ilustración 23 hasta la 28, mostrando el interior con sus secciones y superficies definidas.

30 segundos

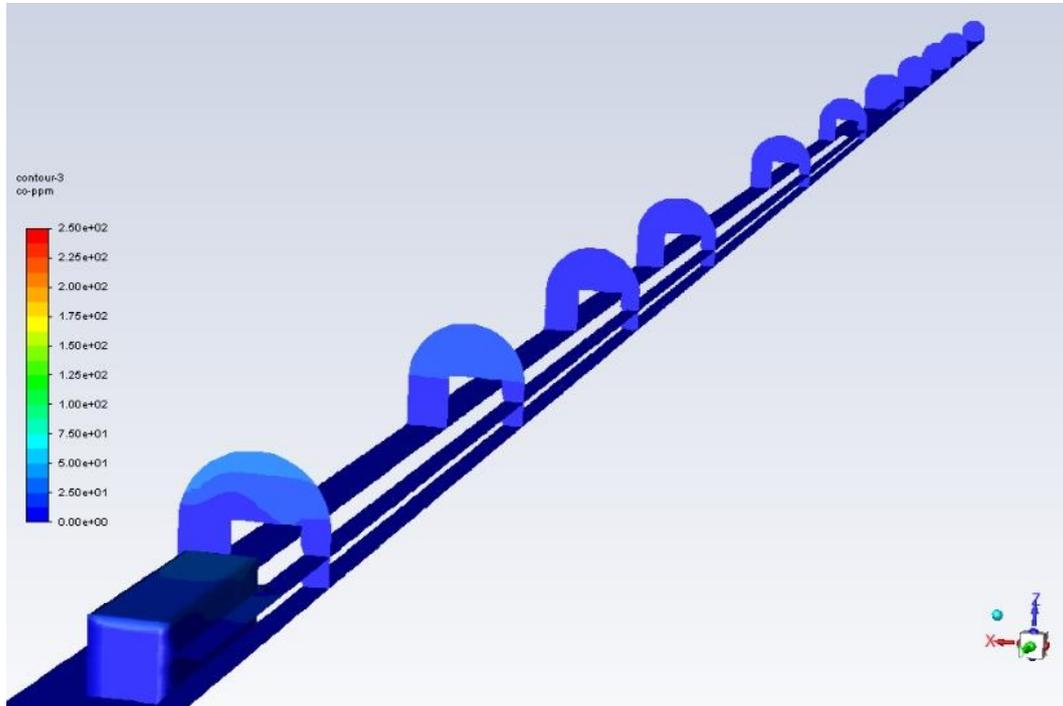


Ilustración 23: contorno de la concentración de CO a 30s

La concentración se mantiene en un valor próximo al nulo en prácticamente toda la zona del túnel.



60 segundos

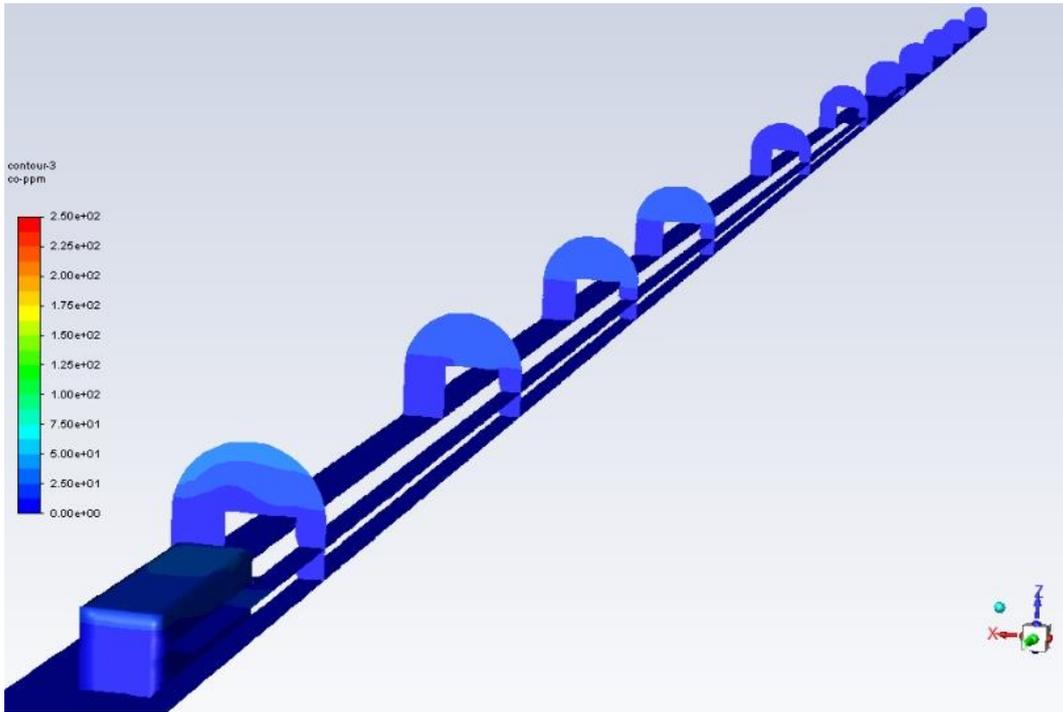


Ilustración 24: contorno de la concentración de CO a 60s

La concentración se mantiene igual que a los 30 s, se observa la progresión del gas.

180 segundos

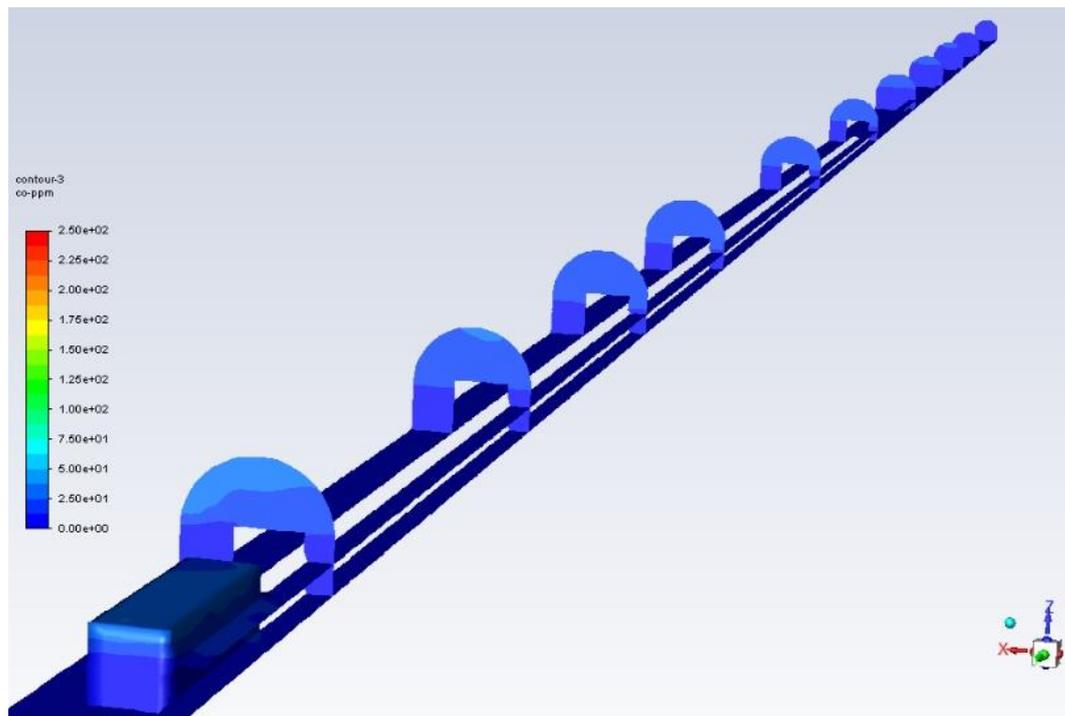


Ilustración 25: contorno de la concentración de CO a 180s

Se observa que la concentración se mantiene en un valor próximo al nulo en gran parte del túnel mientras que hay un incremento de la concentración a medida que nos acercamos al incendio donde se alcanzan valores de casi 50 ppm.



300 segundos

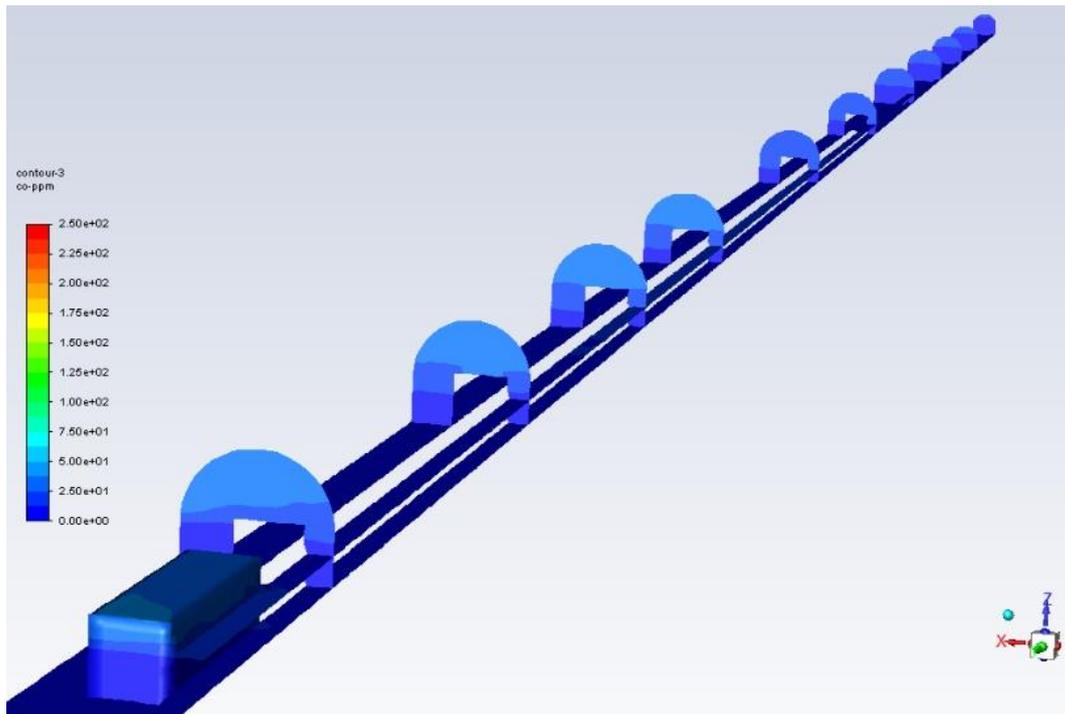


Ilustración 26: contorno de la concentración de CO a 300s

La concentración continúa en valores inferiores a 50 ppm a medida que nos acercamos al incendio y a la altura de la salida de emergencia los valores son prácticamente nulos.

600 segundos

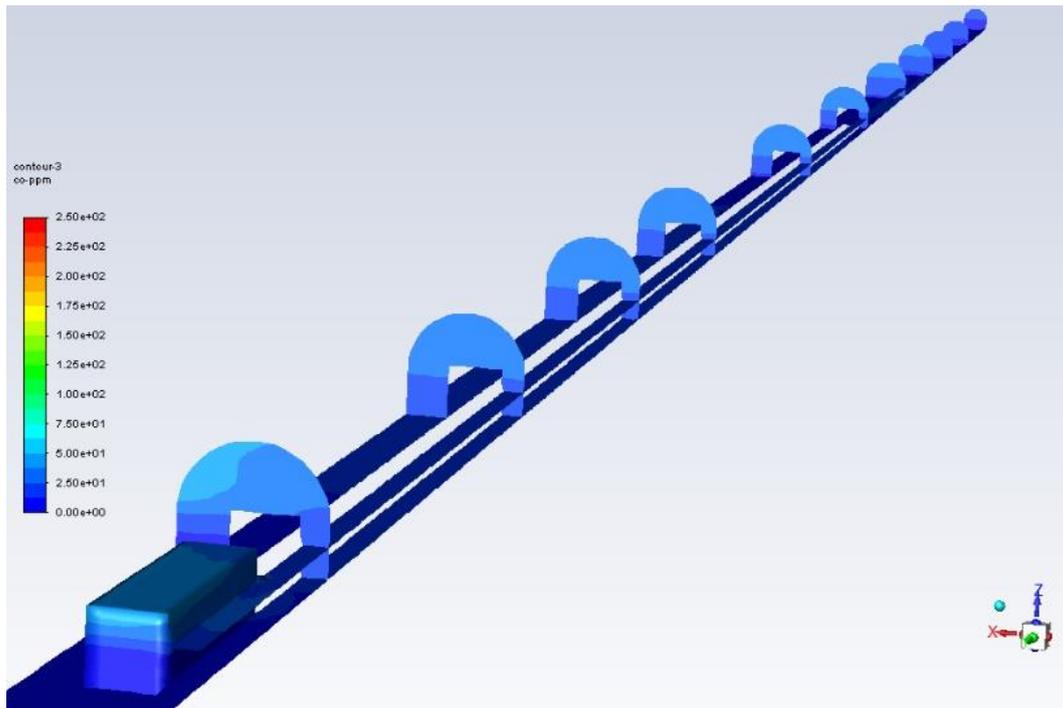


Ilustración 27: contorno de la concentración de CO a 600s

La concentración progresa uniformemente desde el caso anterior, sin superar la concentración límite propuesta y mostrando el efecto chimenea de forma estable.



1200 segundos

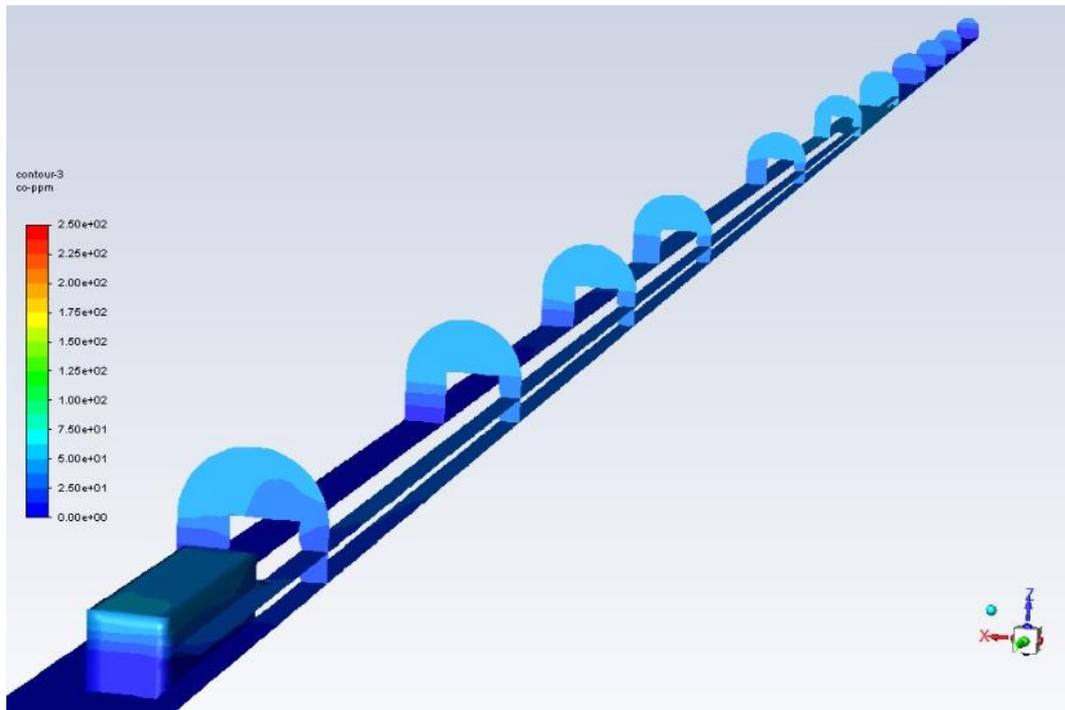


Ilustración 28: contorno de la concentración de CO a 1200s

Donde se observa que la concentración se mantiene en valores estables desde el caso anterior, sin superar la concentración de 100 ppm en ninguna zona.

Valoración de la concentración de CO

Con un desarrollo similar al de las temperaturas, las concentraciones por encima de las 100 ppm se comienzan a considerar peligrosas, esto deja todos los posibles casos dentro de los límites razonables pues no se superan los valores propuestos, ni siquiera entre los 1100-1250 m del efecto del *backlayering*.

3.3 Contornos de humos

Representación de la evolución de la visibilidad desde la ilustración 29 hasta la 34, mostrando como en el apartado anterior el interior con sus secciones y superficies mencionadas.

30 segundos

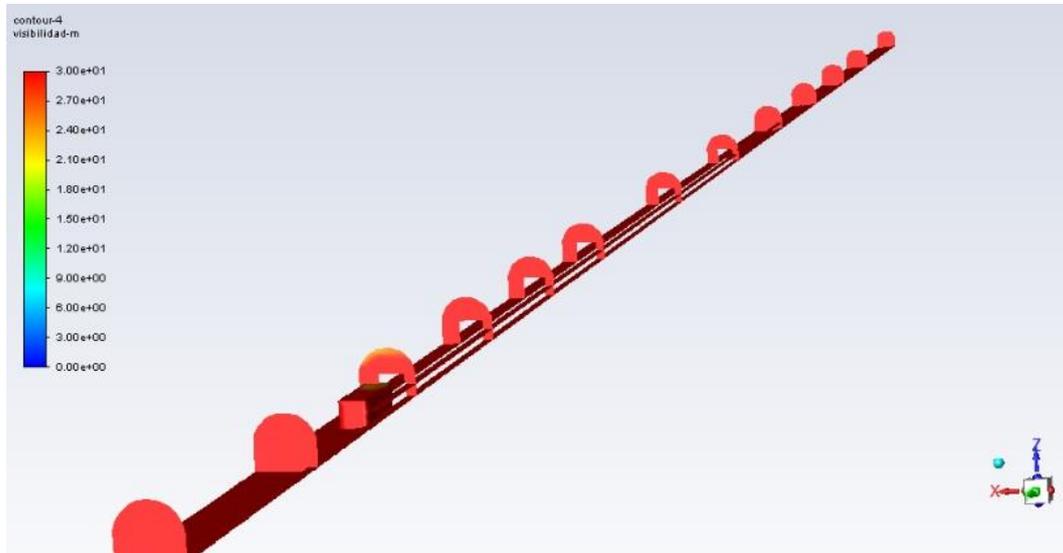


Ilustración 29: contorno de la visibilidad con los humos a 30s

La visibilidad es máxima, se mantiene en un valor superior a los 30 m. Se propone otra perspectiva para verificar que los humos no escapan por la boca Sur.



60 segundos

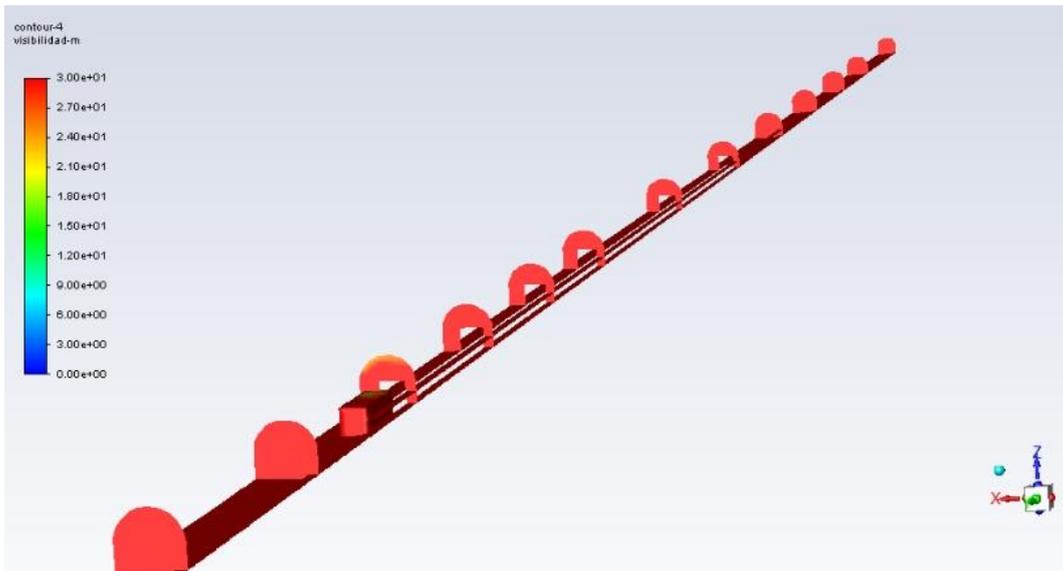


Ilustración 30: contorno de la visibilidad con los humos a 60s

La visibilidad sigue siendo máxima en la mayoría del túnel, primeros indicios de reducción de la visibilidad cerca del incendio.

180 segundos

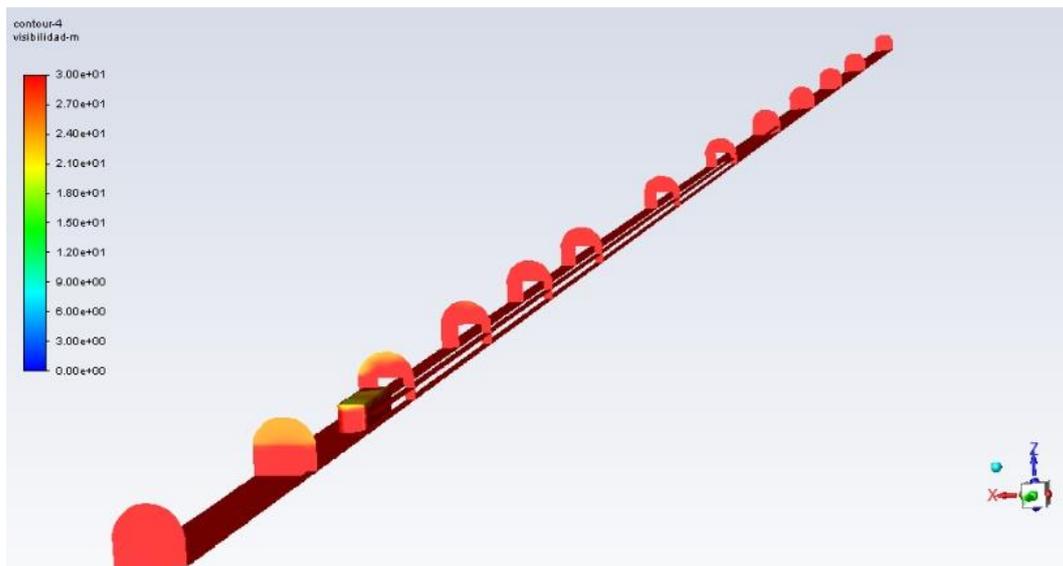


Ilustración 31: contorno de la visibilidad con los humos a 180s

La visibilidad sigue siendo máxima en la mayoría del túnel, como en la ilustración 30. Se contempla cierto retroceso de los humos hacia la puerta sur.



300 segundos

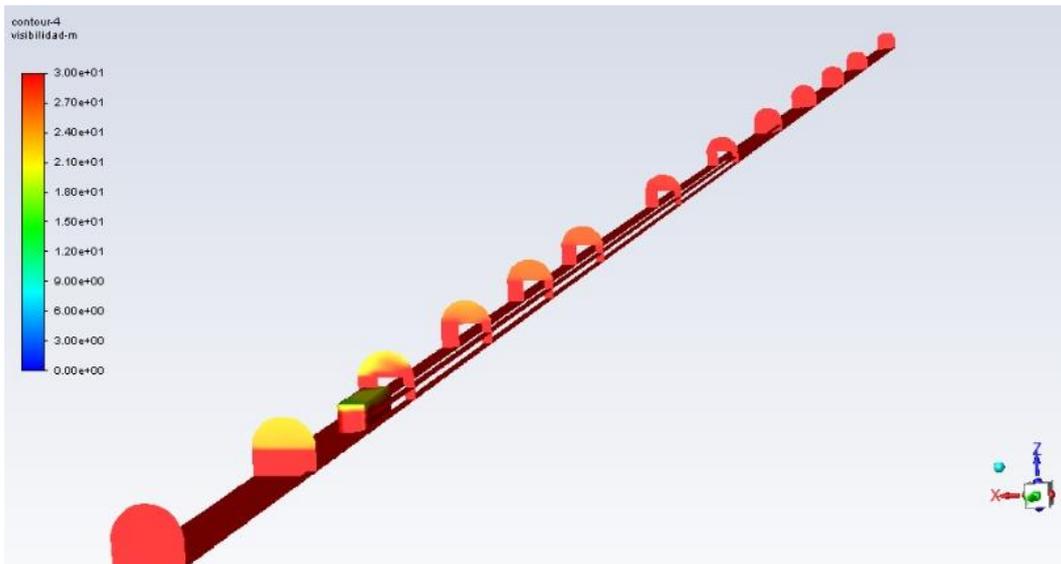


Ilustración 32: contorno de la visibilidad con los humos a 300s

La visibilidad ya no es máxima, pero si adecuada, como en la ilustración 31, se contempla cierto retroceso de los humos hacia la puerta sur que continua y ya se aprecia el efecto chimenea en la otra dirección.

600 segundos

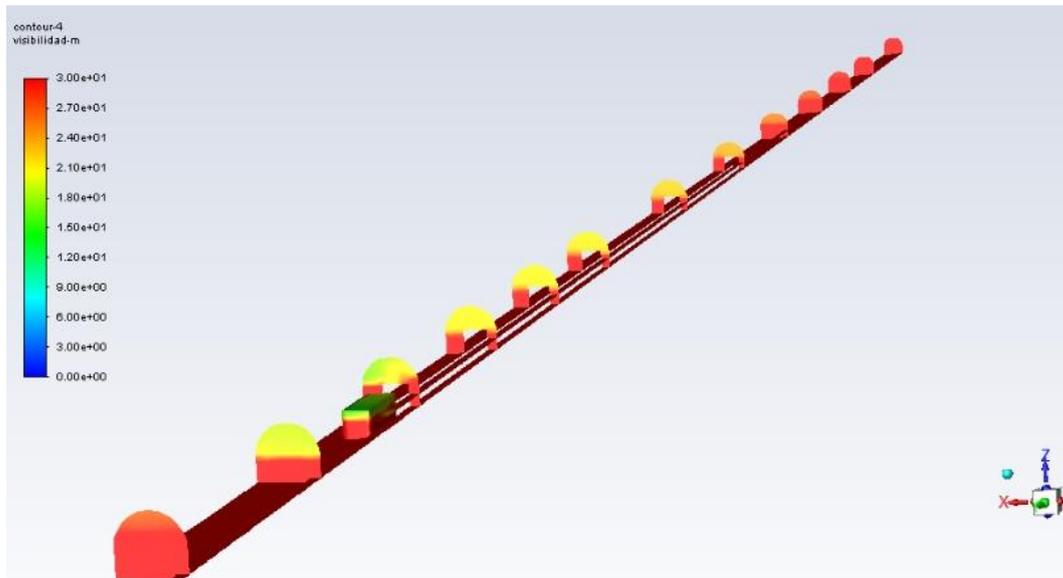


Ilustración 33: contorno de la visibilidad con los humos a 600s

La visibilidad ya no es máxima, pero si adecuada, a 1,8 m sigue habiendo visibilidad perfecta, además del efecto chimenea, se observa el *backlayering*.



1200 segundos

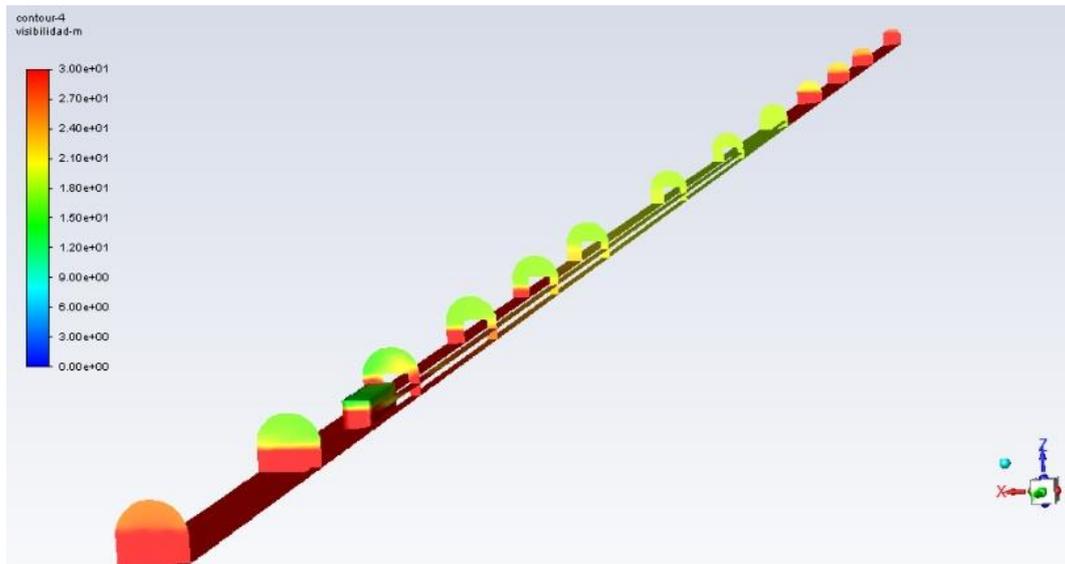


Ilustración 34: contorno de la visibilidad con los humos a 1200s

El backlayering es claro, pero no impide una visibilidad por debajo de los 15 m en la ruta de evacuación. No presenta peligro para la evacuación.

Valoración de la visibilidad

La visibilidad será adecuada durante toda la evacuación, no supone un factor limitante, como se había previsto en el apartado de las gráficas la visibilidad siempre está por encima de los 15 m a la altura de 1,8 m sobre el nivel de la acera.

4. Valoración del equipo de ventilación y evacuación

Partiendo de los resultados obtenidos, de las condiciones valoradas para la simulación y junto con las observaciones del equipo de evacuación se llega a la conclusión de que es necesaria la instalación de ventilación. Para explicar concretamente la razón es necesario indagar en el apartado de la evacuación el cual no ha sido estudiado en este trabajo, esto no implica que no tengamos indicios de la necesidad de la instalación. Una vez aclarado, los límites propuestos son los más extremos y no se han logrado cumplir debido a las altas temperaturas alcanzadas en el interior del túnel, se ha demostrado que el ambiente si será respirable y que habrá suficiente visibilidad.

Al entregar estos resultados al equipo de evacuación y en una conclusión conjunta se acordaría la adquisición de equipos de ventilación, se demostró a través de cálculos con los mismos parámetros, pero con la condición de contorno de la boca de entrada (*Velocity-Inlet*) de una corriente de aire de 2,778 m/s, se evita la aparición del *backlayering*, evitando así los efectos tan dramáticos de acumulaciones en las secciones más críticas. La ficha técnica del ventilador y las necesidades que los rodean se incluyen en el anejo IV a modo de curiosidad.



Capítulo IV: Conclusiones y Trabajos futuros

1. Conclusiones

Este trabajo ha sido todo un desarrollo conjunto de la consultoría Ineco con el alumno que ha realizado la simulación. Se han propuesto objetivos y entregas relacionadas con la simulación durante todo el proceso, haciendo en paralelo otros informes similares que se han incluido como anejo en proyectos de nueva construcción o en revisión por las nuevas normativas.

Se ha cumplido con cada objetivo propuesto y se han alcanzado las fechas indicadas para cada fase del informe, para poder completarlo de forma satisfactoria se ha recurrido a la normativa disponible, informes similares y bibliotecas propias de la consultoría.

- Se ha presentado la normativa que afecta a geometría y a los fenómenos físicos implicados en el estudio.
- Se ha presentado los requerimientos para la creación del modelo:
Se incluye la geometría resultante de la nueva construcción, junto con la simplificación asumida para el modelo y condiciones físicas para un experimento de esta clase.
- Se define la descripción superficial del método de empleo de las herramientas de simulación.
- Se ha completado el desarrollo del modelo a través de ANSYS.
 - El modelo geométrico, es la base de la simulación, con su sencillez y exactitud ha permitido buena calidad de mallado, convergencia de los resultados y aportar la información añadida por las superficies enriqueciendo el informe.
 - El mallado, condición indispensable para proceder al *fluent*, se han buscado los límites de un mallado conjunto entre carga computacional y cumplimiento de los criterios mínimos, también se aprovecha para introducir la nomenclatura de la geometría que modifica las condiciones de contorno.
 - Los fenómenos físicos y la simulación: determina qué clase de simulación se lleva a cabo, ecuaciones y métodos resolutivos. Destacar la importancia del método empleado para resolver el fenómeno incendio para lograr un resultado eficaz y evitando la interacción turbulenta con los problemas que acarrearía si se realiza de otro modo.
- Presentación de resultados.
- Se ha denegado la viabilidad de la ventilación natural para el incendio en el túnel propuesto a través de la simulación por uno de los factores principales de esta clase de modelado, la elevada temperatura.

En cuanto al desarrollo del alumno, ha tenido que adaptar sus distintas aptitudes para completar este desafío profesional. Partiendo desde investigación de



normativa y requerimientos de otras empresas, pasando por autodidactismo para ciertas fases del proceso, ingeniería inversa de otros programas de simulación similares, aplicación de distintas asignaturas del grado como “Ingeniería fluido mecánica”, “Termodinámica” o “Ciencias de los materiales”, interrelación de los distintos tipos de datos con la simulación o la formalización del informe.

ANSYS: el desarrollo de la simulación descrita ha llevado un aprendizaje extenso del programa, para sus tres apartados se ha realizado un curso previo denominado “*Introduction to ANSYS*” donde se muestran los comandos más básicos y su método de empleo. Aun habiendo hecho este curso, el programa es tan extenso que cada caso se vuelve una investigación propia, de hecho, para un programa como este se emplea un programa en “.c” que sustituye la combustión por una generación de gases calientes a través de la potencia de fuego impuesta en la normativa, suceso poco habitual en simulaciones similares. La simplificación ha sido uno de los términos más empleados y la condición principal para la toma de decisiones, desde la geometría hasta condiciones físicas, como las condiciones de contorno.

De los resultados, comentar la gran cantidad de tiempo empleada en conseguir un mallado de calidad para un volumen tan extenso, lograr una convergencia de los datos residuales debido a las dimensiones de la geometría y el alto número de iteraciones necesarias, estos tiempos se han empleado en realizar informes y tomar decisiones para próximas experimentaciones.

En resumen, la realización de un trabajo de estas características es un desafío constante, requiere de paciencia y atención al detalle, ha servido para alcanzar una madurez adecuada para futuros trabajos y produce gran satisfacción la obtención de resultados correctos y útiles para el sector trabajado, se han hecho patentes las obligaciones de poner atención en la seguridad de los pasajeros, dando una sensación de gran responsabilidad.

2. Trabajos futuros

En este apartado se pueden comentar dos aspectos que condicionan el trabajo, por un lado, las limitaciones que suponen las simplificaciones y por otro, el tiempo empleado en la simulación.

El hecho de saber que se han tenido que simplificar geometrías y físicas hace que los modelos sean representaciones “bastas” de la realidad y obligan a experimentar casos muy concretos, un ejemplo claro es el de la velocidad de entrada por la boca sur. Se supone que se establece una velocidad de una boca que en realidad es desconocida, pudiendo incluir una función (similar a la del incendio) que simule el funcionamiento de unos ventiladores, permitiendo regular no solo el caudal impulsado, sino también el instante en el que entra en funcionamiento, esto se podría hacer modelando la geometría de unos ventiladores (existen muchas referencias por internet) o de un modo más sencillo (pero menos preciso), con la función de la velocidad de entrada mencionada. Todo ello limitado

por la capacidad de un ordenador actual y los tempos de cálculo, se ha hecho patente durante todo el proceso la necesidad de cumplir plazos ajustados.

Este factor de mejora, el tiempo, al haber empleado equipamiento profesional, me he visto obligado a reducir los tempos de simulación todo lo posible, para ello se debe elegir muy bien los parámetros de *fluent*, los datos exportados y el número de iteraciones. Por experiencia sé que cuantas más simulaciones realizas mejor conoces los efectos que producen los parámetros sobre las iteraciones, al igual que la frecuencia de registro de datos etc...

Estos procedimientos se emplean en la empresa Ineco en multitud de casos diferentes, entre los cuales se encuentran túneles carreteros o estaciones subterráneas de tren.

3. Otras Referencias

Estas últimas referencias se han empleado para secundar decisiones y criterios escogidos por otros autores aunque no son tenidos tan en cuenta como los mencionados durante el desarrollo.

(Gálvez, Llopis, Rubio, consultado en 2019)

(*Dióxido de carbono CO2*, consultado en 2019)

(Patankar, 1980)

(JIN, Tadahisa y YAMADA, 1985)

(Anderson y Bonhaus, 1994)

(Brinckerhoff y Brinckerhoff, 1995)

(Wilcox, 2006)

(Barrio *et al.*, 2010)

(Smith, 2015)

(*Introduction to ANSYS*, 2016).



Bibliografía

- Administration, M. H. D. y F. H. (1995) *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*.
- Anderson, W. K. y Bonhaus, D. L. (1994) *Computer Fluids*. Hampton, Virginia. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040112057.pdf>.
- Barrio, R. et al. (2010) *Simulación numérica del fenómeno del Backlayering en el túnel Memorial*. Madrid.
- Brinckerhoff, B. y Brinckerhoff, P. (1995) *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*. Virginia.
- CFD Ninja web page (2018) *CFD*. Disponible en: <https://cfd.ninja> (Accedido: 15 de junio de 2019).
- Chow, V. Te (1959) *Open-Channel Hydraulics*. primera. Editado por McGrawhill Book Company. Illinois. Disponible en: <https://heidarpour.iut.ac.ir/sites/heidarpour.iut.ac.ir/files/u32/open-chow.pdf>.
- Crespo, A. (2014) *Mecánica de fluidos*. primera. Editado por M. J. López Raso y C. Lara Carmona. Madrid: Paraninfo.
- Departamento de seguridad de WCF (sin fecha) *Información sobre el monóxido de carbono (CO)*. Utah, USA. Disponible en: <https://www.wcf.com/hoja-de-información-sobre-el-monóxido-de-carbono-co>.
- Desconocido (2009) *ANSYS (Application)*, sharcnet.ca. Disponible en: <https://www.sharcnet.ca/my/software/show/22> (Accedido: 5 de junio de 2019).
- Dióxido de carbono CO2* (sin fecha) *Fundación para la salud geoambiental*. Disponible en: <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2> (Accedido: 16 de abril de 2019).
- Fuentes-Cantillana, J. L. (2011) *Comportamiento del humo. Incendios experimentales (Jornada técnica)*. Barcelona. Disponible en: <http://www.crfproject-eu.org>.
- Gálvez, Llopis, Rubio, L. (sin fecha) *Física: Curso teórico-práctico de fundamentos físicos de la ingeniería*.
- Haack, A. (2011) *Real fires And design fires (Jornada técnica)*. Barcelona. Disponible en: <http://www.crfproject-eu.org>.
- Hacar Rogríguez, F. (2012) *Incendios en túneles de carretera: Velocidad crítica y ensayos de incendios*. Madrid.
- Hormigón & mortero en túneles por método convencional: una introducción* (sin fecha) *Putzmeister*. Disponible en: <http://bestsupportunderground.com/tunel/> (Accedido: 15 de abril de 2019).

Ineco (2019). Disponible en: <https://www.ineco.com/webineco/>.

Instrucción de seguridad en túneles (2005). Ministerio de fomento. Disponible en: https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/instruccionseguridadtuneles.pdf.

Introduction to ANSYS (2016).

JIN, Tadahisa y YAMADA, T. (1985) «Irritating effects of fire smoke on visibility», *Fire Science and technology*, 5(Visibilidad debido al humo), p. 11. Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/fst/5/1/5_1_79/_pdf/-char/en.

Juncker, J.-C. (2014) *Especificación técnica de interoperabilidad relativa a la seguridad en túneles ferroviarios del sistema ferroviario de la Unión Europea, Reglamento (UE)*. Diario oficial de la Unión Europea.

«La innovación del aluminio en los trenes de alta velocidad» (2016) *Lodec Jinshu*, (Aluminio), p. 1. Disponible en: <http://lodecjinshu.com/es/la-innovacion-del-aluminio-en-los-trenes-de-alta-velocidad/>.

Migoya Valor, E. (2002a) *Criterios de peligrosidad (Tesis Migoya)*. UPM.

Migoya Valor, E. (2002b) *Difusión en simulaciones de incendios, (Tesis Migoya)*. UPM.

Migoya Valor, E. (2002c) *Modelo zonal para la simulación de movimiento de humos y gases calientes en incendios: aplicación a túneles de carretera*. UPM. Disponible en: <http://oa.upm.es/117/>.

Patankar, S. V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*. primera. EEUU: Hemisphere Publishing Corporation. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Luisiana_Cundin/post/Can_someone_help_me_prove_the_approximate_coefficient_of_numerical_diffusion/attachment/59d63e6779197b807799b078/AS%3A423813709078528%401478056470430/download/Patankar+Numerical+Heat+Transfer+and+F.

Rhie, C. M. y Chow, W. L. (1983) «Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation», *AIAA*, primera(Turbulencia-Viscosidad).

Romana Ruíz, M. (2011) *Incendios en túneles. Una visión de conjunto (Jornada Técnica)*. Barcelona.

Smith, R. (2015) *Physics and Solver Setup for CFD, Richard Smith's blog*. Disponible en: <https://www.symscape.com/blog/physics-and-solver-setup-for-cfd> (Accedido: 7 de junio de 2019).

Society of Fire Protection Engineers (2002) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. tercera. Editado por I. Omegatype Typography. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association. Disponible en: http://ogneborec.su/files/uploads/files/0460561_8A68C_sfpe_handbook_of_fire_protection_engineering.pdf.

Versteeg, H. y Malalasekera, W. (2006) *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Methods*. segunda. Editado por Education Limited.



Loughborough. Disponible en:
http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM702/Versteeg_Malalasekera_2ed.pdf.

Wilcox, D. C. (2006) *Turbulence Modeling for CFD*. tercera. Editado por DCW Industries. Disponible en: <https://www.twirpx.com/file/1792668/>.

Anejos

Anejo I: Especificación técnica de interoperabilidad relativa a la «seguridad en los túneles ferroviarios»

REGLAMENTO (UE) N° 1303/2014 DE LA COMISIÓN
de 18 de noviembre de 2014
sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa a la «seguridad en los túneles ferroviarios» del sistema ferroviario de la Unión Europea

(Texto pertinente a efectos del EEE)

LA COMISIÓN EUROPEA,

Visto el Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea,

Vista la Directiva 2008/57/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008, sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Comunidad ⁽¹⁾, y, en particular, su artículo 6, apartado 1, párrafo segundo,

Considerando lo siguiente:

- (1) El artículo 12 del Reglamento (CE) n° 881/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo ⁽²⁾ establece que la Agencia Ferroviaria Europea («la Agencia») velará por la adaptación de las especificaciones técnicas de interoperabilidad («ETI») al progreso técnico, a la evolución del mercado y a las exigencias sociales y propondrá a la Comisión las modificaciones de las ETI que considere necesarias.
- (2) Mediante la Decisión C(2010) 2576 de 29 de abril de 2010, la Comisión dio a la Agencia un mandato para la elaboración y la revisión de las ETI con el fin de ampliar su ámbito de aplicación a todo el sistema ferroviario de la Unión. Al amparo de dicho mandato, se solicitó a la Agencia que ampliase de este modo el ámbito de aplicación de la ETI relativa a la «seguridad en los túneles ferroviarios».
- (3) El 21 de diciembre de 2012, la Agencia publicó una recomendación sobre la ETI revisada relativa a la «seguridad en los túneles ferroviarios».
- (4) Con objeto de seguir la evolución tecnológica y fomentar la modernización, es preciso alentar soluciones innovadoras y permitir su aplicación, en determinadas condiciones. Cuando se proponga una solución innovadora, es conveniente que el fabricante o su representante autorizado señale en qué se diferencia de lo prescrito en la sección pertinente de la ETI o en cómo lo complementa y que la solución innovadora sea evaluada por la Comisión. En caso de que dicha evaluación resulte positiva, procede que la Agencia defina las especificaciones funcionales y de interfaz apropiadas de la solución innovadora y desarrolle los métodos de evaluación pertinentes.
- (5) Con arreglo al artículo 17, apartado 3, de la Directiva 2008/57/CE, cada Estado miembro debe notificar a la Comisión y a los demás Estados miembros las normas técnicas y los procedimientos de evaluación de la conformidad y de verificación que hayan de seguirse para los casos específicos, así como los organismos responsables de aplicarlos.
- (6) El material rodante se rige actualmente por acuerdos nacionales, bilaterales, multilaterales o internacionales. Estos acuerdos no deben suponer trabas para los progresos actuales y futuros en materia de interoperabilidad. Por tanto, es preciso que los Estados miembros notifiquen tales acuerdos a la Comisión.
- (7) El presente Reglamento se aplicará a los túneles independientemente de su nivel de tráfico.
- (8) Algunos Estados miembros ya tienen normas de seguridad que imponen un nivel de seguridad más alto que el prescrito en la presente ETI. Este Reglamento debe permitir a los Estados miembros conservar dichas normas únicamente en lo que respecta a los subsistemas de infraestructura, energía y explotación. Estas normas ya en vigor deben considerarse normas nacionales de seguridad en el sentido del artículo 8 de la Directiva 2004/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo ⁽³⁾. Además, con arreglo al artículo 4 de la misma Directiva, los Estados

⁽¹⁾ DO L 191 de 18.7.2008, p. 1.

⁽²⁾ Reglamento (CE) n° 881/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, por el que se crea una Agencia Ferroviaria Europea (Reglamento de la Agencia) (DO L 164 de 30.4.2004, p. 1).

⁽³⁾ Directiva 2004/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre la seguridad de los ferrocarriles comunitarios y por la que se modifican la Directiva 95/18/CE del Consejo sobre concesión de licencias a las empresas ferroviarias y la Directiva 2001/14/CE relativa a la adjudicación de la capacidad de infraestructura ferroviaria, aplicación de cánones por su utilización y certificación de la seguridad (DO L 164 de 30.4.2004, p. 44).

miembros han de garantizar que se mantenga la seguridad ferroviaria y, cuando sea razonable, se mejore continuamente, teniendo en cuenta el desarrollo de la legislación de la Unión y el progreso científico y técnico, y dando prioridad a la prevención de accidentes graves. Sin embargo, no procede establecer medidas adicionales para el material rodante.

- (9) Los Estados miembros tienen competencia para definir las funciones y las responsabilidades de los servicios de rescate. Para los túneles comprendidos en el ámbito de aplicación del presente Reglamento, es conveniente que los Estados miembros planifiquen el acceso de los servicios de rescate en coordinación con los mismos. Es importante que se establezcan medidas de rescate basadas en el supuesto de que los servicios de rescate que intervengan en un accidente en un túnel protegerán las vidas humanas y no los bienes materiales, tales como los vehículos o las estructuras.
- (10) Por consiguiente, procede derogar la Decisión 2008/163/CE de la Comisión ⁽¹⁾, relativa a la especificación técnica de interoperabilidad sobre seguridad en los túneles en los sistemas ferroviarios transeuropeos convencional y de alta velocidad.
- (11) Para evitar costes adicionales innecesarios y burocracia, conviene que la Decisión 2008/163/CE siga aplicándose, tras su derogación, a los subsistemas y proyectos contemplados en el artículo 9, apartado 1, letra a), de la Directiva 2008/57/CE.
- (12) Las medidas previstas en el presente Reglamento se ajustan al dictamen del Comité establecido por el artículo 29, apartado 1, de la Directiva 2008/57/CE.

HA ADOPTADO EL PRESENTE REGLAMENTO:

Artículo 1

Se aprueba la especificación técnica de interoperabilidad (ETI) referente a la «seguridad en los túneles ferroviarios» del sistema ferroviario de la Unión Europea que figura en el anexo.

Artículo 2

La ETI deberá aplicarse a los subsistemas de control-mando y señalización, infraestructuras, energía, explotación y material rodante, según se describe en el anexo II de la Directiva 2008/57/CE.

La ETI se aplicará a dichos subsistemas con arreglo a la sección 7 del anexo.

Artículo 3

El ámbito técnico y geográfico del presente Reglamento se establece en las secciones 1.1 y 1.2 del anexo.

Artículo 4

1. En relación con los casos específicos enumerados en el punto 7.3 del anexo del presente Reglamento, las condiciones que deben cumplirse para la verificación de la interoperabilidad, de conformidad con el artículo 17, apartado 2, de la Directiva 2008/57/CE serán aquellas que establezcan las normas nacionales vigentes en el Estado miembro que autoricen la puesta en servicio de los subsistemas objeto del presente Reglamento.

2. En el plazo de seis meses a partir de la entrada en vigor del presente Reglamento, cada Estado miembro notificará a los demás Estados miembros y a la Comisión:

- a) las normas nacionales a las que se refiere el apartado 1;
- b) los procedimientos de evaluación de la conformidad y verificación que deben seguirse en relación con la aplicación de las normas nacionales a las que se refiere el apartado 1;
- c) los organismos designados con arreglo al artículo 17, apartado 3, de la Directiva 2008/57/CE para llevar a cabo los procedimientos de evaluación de la conformidad y de verificación en los casos específicos que establece la sección 7.3 del anexo.

⁽¹⁾ Decisión 2008/163/CE de la Comisión, de 20 de diciembre de 2007, relativa a la especificación técnica de interoperabilidad sobre seguridad en los túneles en los sistemas ferroviarios transeuropeos convencional y de alta velocidad (DO L 64 de 7.3.2008, p. 1).

Artículo 5

1. En el plazo de seis meses a partir de la entrada en vigor del presente Reglamento, los Estados miembros notificarán a la Comisión los siguientes tipos de acuerdos:
 - a) acuerdos nacionales entre los Estados miembros y las empresas ferroviarias o los administradores de infraestructuras, suscritos con carácter permanente o temporal y requeridos por las características específicas o locales del servicio de transporte correspondiente;
 - b) acuerdos bilaterales o multilaterales entre empresas ferroviarias, administradores de infraestructuras o autoridades de seguridad que ofrezcan niveles significativos de interoperabilidad local o regional;
 - c) acuerdos internacionales entre uno o varios Estados miembros y, como mínimo, un tercer país, o entre empresas ferroviarias o administradores de infraestructuras de Estados miembros y, como mínimo, una empresa ferroviaria o administrador de infraestructuras de un tercer país, que ofrezcan niveles significativos de interoperabilidad local o regional.
2. Los acuerdos que se hayan notificado en el marco de las Decisiones 2006/920/CE ⁽¹⁾, 2008/231/CE ⁽²⁾, 2011/314/UE ⁽³⁾ o 2012/757/UE ⁽⁴⁾ de la Comisión no deberán notificarse nuevamente.
3. Los Estados miembros comunicarán inmediatamente a la Comisión cualquier futuro acuerdo o modificación de un acuerdo existente que ya haya sido notificado.

Artículo 6

Conforme al artículo 9, apartado 3, de la Directiva 2008/57/CE, cada Estado miembro comunicará a la Comisión, en el plazo de un año a partir de la entrada en vigor del presente Reglamento, la lista de los proyectos que se están ejecutando en su territorio y que se encuentren en fase avanzada de desarrollo.

Artículo 7

De conformidad con el capítulo 7 del anexo del presente Reglamento, los Estados miembros actualizarán los planes nacionales de aplicación de la ETI que hayan establecido con arreglo a lo dispuesto en el artículo 4 de la Decisión 2006/920/CE, el artículo 4 de la Decisión 2008/231/CE y el artículo 5 de la Decisión 2011/314/UE.

Cada Estado miembro remitirá el plan de aplicación actualizado a los demás Estados miembros y a la Comisión, a más tardar el 1 de julio de 2015.

Artículo 8

1. A efectos de adecuación al progreso tecnológico, pueden ser necesarias soluciones innovadoras que no cumplan las especificaciones contempladas en el anexo o a las cuales no puedan aplicarse los métodos de evaluación previstos en el mismo. En ese caso, podrán elaborarse nuevas especificaciones o nuevos métodos de evaluación asociados a dichas soluciones innovadoras de conformidad con lo dispuesto en los apartados 2 a 5.
2. Las soluciones innovadoras podrán estar relacionadas con los subsistemas mencionados en el artículo 2, sus partes y sus componentes de interoperabilidad.
3. Si se propone una solución innovadora, el fabricante o su representante autorizado en la Unión indicarán en qué se diferencia de las disposiciones de las ETI pertinentes o cómo las complementa y someterán tales diferencias al análisis de la Comisión. La Comisión podrá solicitar la opinión de la Agencia acerca de la solución innovadora propuesta.

⁽¹⁾ Decisión 2006/920/CE de la Comisión, de 11 de agosto de 2006, sobre la especificación técnica de interoperabilidad referente al subsistema «Explotación y gestión del tráfico» del sistema ferroviario transeuropeo convencional (DO L 359 de 18.12.2006, p. 1).

⁽²⁾ Decisión 2008/231/CE de la Comisión, de 1 de febrero de 2008, sobre la especificación técnica de interoperabilidad del subsistema «explotación» del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad adoptado según lo dispuesto en el artículo 6, apartado 1, de la Directiva 96/48/CE del Consejo, y por la que se deroga la Decisión 2002/734/CE de la Comisión de 30 de mayo de 2002 (DO L 84 de 26.3.2008, p. 1).

⁽³⁾ Decisión 2011/314/UE de la Comisión, de 12 de mayo de 2011, sobre la especificación técnica de interoperabilidad referente al subsistema «explotación y gestión del tráfico» del sistema ferroviario transeuropeo convencional (DO L 144 de 31.5.2011, p. 1).

⁽⁴⁾ Decisión 2012/757/UE de la Comisión, de 14 de noviembre de 2012, sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema «explotación y gestión del tráfico» del sistema ferroviario de la Unión Europea y por la que se modifica la Decisión 2007/756/CE (DO L 345 de 15.12.2012, p. 1).

4. La Comisión emitirá un dictamen acerca de la solución innovadora propuesta. Si dicho dictamen resulta favorable, se elaborarán las especificaciones funcionales y de interfaz necesarias así como el correspondiente método de evaluación para su inclusión en las ETI pertinentes a fin de permitir el uso de esta solución innovadora y, posteriormente, se integrarán en las ETI pertinentes durante el proceso de revisión conforme al artículo 6 de la Directiva 2008/57/CE. Si el dictamen resulta desfavorable, la solución innovadora propuesta no podrá aplicarse.

5. En espera de la revisión de las ETI pertinentes, el dictamen favorable emitido por la Comisión se considerará un medio aceptable de cumplimiento de los requisitos esenciales de la Directiva 2008/57/CE y podrá utilizarse para la evaluación del subsistema.

Artículo 9

Queda derogada la Decisión 2008/163/CE con efecto a partir del 1 de enero de 2015.

No obstante, seguirá siendo de aplicación a:

- a) los subsistemas autorizados conforme a dicha Decisión;
- b) los proyectos para los subsistemas nuevos, renovados o modernizados que, en la fecha de publicación del presente Reglamento, se encuentren en fase avanzada de desarrollo o sean objeto de un contrato que se esté ejecutando.

Artículo 10

El presente Reglamento entrará en vigor el vigésimo día siguiente al de su publicación en el *Diario Oficial de la Unión Europea*.

Será aplicable a partir del 1 de enero de 2015.

El presente Reglamento será obligatorio en todos sus elementos y directamente aplicable en cada Estado miembro.

Hecho en Bruselas, el 18 de noviembre de 2014.

Por la Comisión
El Presidente
Jean-Claude JUNCKER

ANEXO

1.	Introducción	400
1.1.	Ámbito técnico de aplicación	400
1.1.1.	Ámbito de aplicación relativo a los túneles	400
1.1.2.	Ámbito de aplicación relativo al material rodante	400
1.1.3.	Ámbito de aplicación relativo a las actividades de explotación	400
1.1.4.	Riesgo cubiertos y no cubiertos por la presente ETI	400
1.2.	Ámbito geográfico de aplicación	401
2.	Definición de criterios/ámbito	401
2.1.	Disposiciones generales	401
2.2.	Escenarios de riesgo	402
2.2.1.	Incidentes «calientes»: incendio, explosión seguida de incendio, y emisión de humos o gases tóxicos.	402
2.2.2.	Incidentes «fríos»: colisión y descarrilamiento	403
2.2.3.	Parada prolongada	403
2.2.4.	Exclusiones	403
2.3.	La misión de los servicios de intervención en emergencias	403
2.4.	Definiciones	403
3.	Requisitos esenciales	404
4.	Caracterización del subsistema	405
4.1.	Introducción	405
4.2.	Especificaciones funcionales y técnicas de los subsistemas	405
4.2.1.	Subsistema de infraestructura	405
4.2.2.	Subsistema de energía	409
4.2.3.	Subsistema de material rodante	410
4.3.	Especificaciones funcionales y técnicas de las interfaces	411
4.3.1.	Interfaces con el subsistema de control-mando y señalización	411
4.3.2.	Interfaces con el subsistema de explotación y gestión del tráfico	412
4.4.	Normas de explotación	412
4.4.1.	Norma para situaciones de emergencia	412
4.4.2.	Plan de emergencia del túnel	412
4.4.3.	Simulacros	413
4.4.4.	Procedimientos de aislamiento y puesta a tierra	413
4.4.5.	Suministro de información a los pasajeros sobre seguridad y emergencias a bordo del tren	413
4.4.6.	Normas de explotación para trenes que circulan por túneles	413
4.5.	Normas de mantenimiento	414

4.5.1.	Infraestructura	414
4.5.2.	Mantenimiento del material rodante	414
4.6.	Cualificaciones profesionales	414
4.6.1.	Cualificaciones específicas para túneles de la tripulación del tren y del resto del personal	414
4.7.	Condiciones de salud y seguridad	414
4.7.1.	Dispositivo de autorrescate	414
4.8.	Registros de infraestructura y de material rodante	414
4.8.1.	Registro de infraestructura	414
4.8.2.	Registro de material rodante	415
5.	Componentes de interoperabilidad	415
6.	Evaluación de la conformidad y/o de la idoneidad para el uso de los componentes y verificación del subsistema	415
6.1.	Componentes de interoperabilidad	415
6.2.	Subsistemas	415
6.2.1.	Verificación CE (aspectos generales)	415
6.2.2.	Procedimientos para la verificación CE de un subsistema (módulos)	415
6.2.3.	Soluciones existentes	415
6.2.4.	Soluciones innovadoras	416
6.2.5.	Evaluación del mantenimiento	416
6.2.6.	Evaluación de las normas de explotación	416
6.2.7.	Requisitos adicionales para la evaluación de las especificaciones que afectan al administrador de la infraestructura	416
6.2.8.	Requisitos adicionales para la evaluación de las especificaciones que afectan a las empresas ferroviarias ..	417
7.	aplicación	417
7.1.	Aplicación de la presente ETI a nuevos subsistemas	417
7.1.1.	Observaciones generales	417
7.1.2.	Material rodante nuevo	417
7.1.3.	Nuevas infraestructuras	417
7.2.	Aplicación de la presente ETI a los subsistemas ya en servicio	417
7.2.1.	Acondicionamiento o renovación de material rodante	417
7.2.2.	Medidas de acondicionamiento o renovación de túneles	418
7.2.3.	Subsistema de explotación	418
7.2.4.	Circulación de material rodante nuevo en túneles existentes	418
7.3.	Casos específicos	418
7.3.1.	Observaciones generales	418
7.3.2.	Normas de explotación para trenes que circulan en túneles (cláusula 4.4.6)	418
Apéndice A: Normas o documentos normativos a los que se hace referencia en la presente ETI		419
Apéndice B: Evaluación de los subsistemas		420

1. INTRODUCCIÓN

1.1. **Ámbito técnico de aplicación**

- a) Esta ETI hace referencia a los siguientes subsistemas según se define en la Directiva 2008/57/CE: control-mando y señalización («CCS»), infraestructuras («INF»), energía («ENE»), explotación («OPE») y material rodante (locomotoras y coches de pasajeros, «LOC&PAS»).
- b) La finalidad de la presente ETI es definir un conjunto coherente de requisitos específicos para túneles correspondientes a los subsistemas de infraestructuras, energía, material rodante, control-mando y señalización, y explotación que aporten un nivel de seguridad óptimo en los túneles con la mejor relación entre coste y eficacia.
- c) Deberá permitir la libre circulación de los vehículos que cumplan la presente ETI para que puedan transitar en unas condiciones de seguridad armonizadas en los túneles ferroviarios.
- d) En la presente ETI únicamente se fijan medidas diseñadas para reducir los riesgos específicos de túneles. Los riesgos relacionados con la pura explotación del ferrocarril, como el descarrilamiento o el choque con otros trenes, se tratan mediante las medidas generales de seguridad ferroviaria.
- e) El nivel de seguridad existente no podrá reducirse en ningún país según se establece en el artículo 4.1 de la Directiva 2004/49/CE. Los Estados miembros pueden adoptar requisitos más exigentes, siempre y cuando estos no impidan la circulación de trenes que cumplan la ETI.
- f) Con arreglo al artículo 8 de la Directiva 2004/49/CE, los Estados miembros pueden prescribir requisitos nuevos y más exigentes en determinados túneles, los cuales deberán notificarse a la Comisión antes de su introducción. Estos requisitos más exigentes deben basarse en un análisis de riesgos y estar justificados por la existencia de un riesgo concreto. Además, han de ser el resultado de una consulta al administrador de la infraestructura y a las autoridades responsables de los servicios de intervención en emergencias y estar sujetos a una evaluación coste-beneficio.

1.1.1. *Ámbito de aplicación relativo a los túneles*

- a) La presente ETI se aplica a los túneles nuevos, renovados y acondicionados, integrados en la red ferroviaria de la Unión Europea, que sean conformes con la definición de la cláusula 2.4 de esta ETI.
- b) Las estaciones que formen parte del túnel deberán cumplir las normas nacionales en materia de seguridad contra incendios. Cuando estas se utilicen como zonas seguras, deberán cumplir únicamente las especificaciones de las cláusulas 4.2.1.5.1, 4.2.1.5.2 y 4.2.1.5.3 de la presente ETI. Cuando las estaciones se utilicen como puntos de lucha contra incendios, deberán cumplir únicamente las especificaciones de las cláusulas 4.2.1.7, letra c), y 4.2.1.7, letra e), de la presente ETI.

1.1.2. *Ámbito de aplicación relativo al material rodante*

- a) La presente ETI se aplica al material rodante incluido en el ámbito de aplicación de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.
- b) El material rodante de categoría «A» o «B» que sea conforme con la anterior ETI de seguridad en los túneles ferroviarios (ETI STF) (Decisión 2008/163/CE) deberá mantener su categoría en la presente ETI según se define en la cláusula 4.2.3.

1.1.3. *Ámbito de aplicación relativo a las actividades de explotación*

La presente ETI se aplica a la explotación de todas las unidades de material rodante que estén circulando por los túneles descritos en la cláusula 1.1.1.

1.1.3.1. Explotación de trenes de mercancías

Si todos los vehículos de un tren de mercancías o de un tren de mercancías peligrosas, conforme a la definición de la cláusula 2.4 cumplen las ETI estructurales que les son de aplicación (locomotoras y coches de pasajeros, seguridad en los túneles ferroviarios, ruido, control-mando y señalización, y vagones) y si los vagones de mercancías peligrosas cumplen el anexo II de la Directiva 2008/68/CE, entonces el tren de mercancías o el tren de mercancías peligrosas explotado conforme a los requisitos de la ETI de explotación y gestión del tráfico podrá circular en todos los túneles del sistema ferroviario de la Unión Europea.

1.1.4. *Riesgos cubiertos y no cubiertos por la presente ETI*

- a) La presente ETI cubre los riesgos específicos que afectan a la seguridad de los pasajeros y del personal de a bordo en los túneles en lo que se refiere a los subsistemas anteriormente mencionados. Asimismo, cubre los riesgos de las personas que residen en una zona cercana a un túnel en la que un desplome de la estructura podría dar lugar a consecuencias catastróficas.
- b) Si de un análisis de riesgos se concluye que podrían producirse otros incidentes relevantes en los túneles, deberán definirse medidas específicas para abordar dichos escenarios.

- c) Los riesgos no cubiertos por la presente ETI son los siguientes:
- 1) la salud y la seguridad del personal que interviene en el mantenimiento de las instalaciones fijas de los túneles;
 - 2) las pérdidas económicas provocadas por daños en las estructuras y en los trenes y, en consecuencia, las pérdidas producidas por la falta de operatividad del túnel durante las reparaciones;
 - 3) intrusión en el túnel a través de su boca;
 - 4) el terrorismo, como acto premeditado e intencionado destinado a causar daños, lesiones y muertes a gran escala.

1.2. **Ámbito geográfico de aplicación**

El ámbito geográfico de la presente ETI es la totalidad de la red del sistema ferroviario, constituido por:

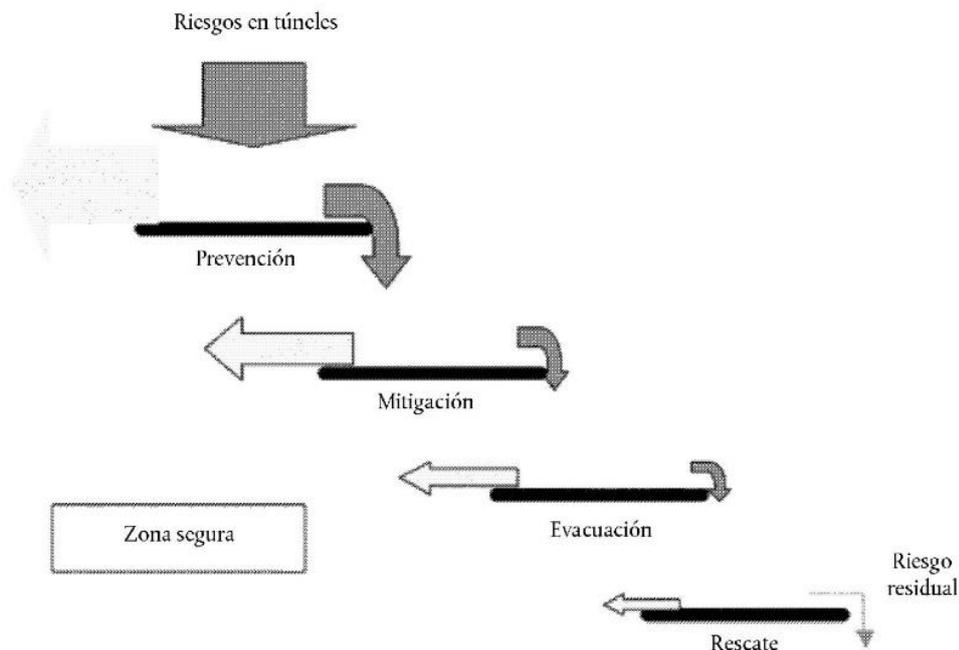
- la red del sistema ferroviario transeuropeo convencional (RTE) descrita en el anexo I, sección 1.1, «Red», de la Directiva 2008/57/CE,
- la red del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad (RTE) descrita en el anexo I, sección 2.1, «Red», de la Directiva 2008/57/CE,
- otras partes de la red del sistema ferroviario en su totalidad, conforme a la ampliación del ámbito de aplicación descrito en el anexo I, sección 4, de la Directiva 2008/57/CE,

y excluye los casos a los que se refiere el artículo 1, apartado 3, de la Directiva 2008/57/CE.

2. DEFINICIÓN DE CRITERIOS/ÁMBITO

2.1. **Disposiciones generales**

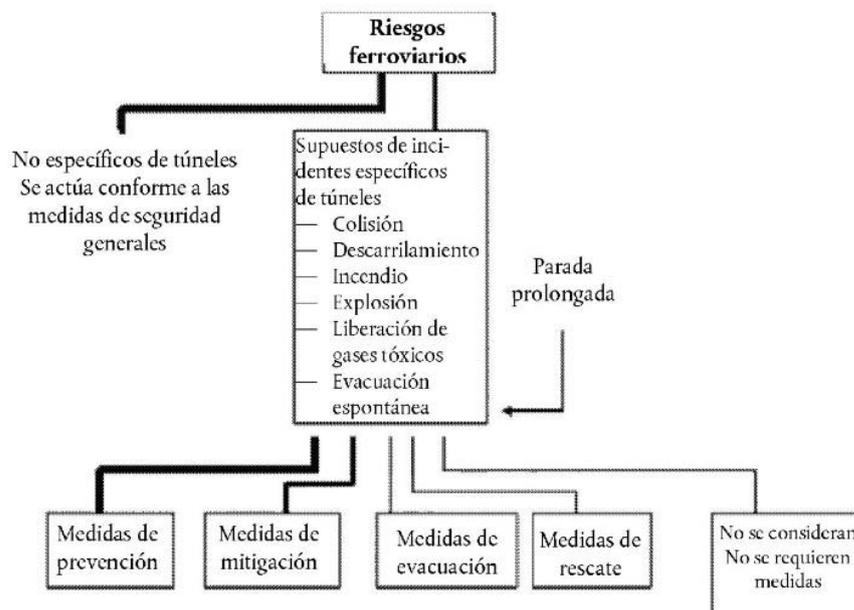
- a) El frente para la salvaguardia de la seguridad en los túneles comprende cuatro líneas de defensa: la prevención, la mitigación, la evacuación y el rescate.
- b) La mayor contribución se hace en el campo de la prevención, seguida de la mitigación y demás.
- c) Las diferentes líneas de defensa de la seguridad se combinan para producir un bajo nivel de riesgo residual.



- d) Una característica importante de los ferrocarriles es su capacidad intrínseca de evitar accidentes al circular el tráfico a través de un sistema guiado y estar controlado y regulado mediante un sistema de señalización.

2.2. Escenarios de riesgo

- a) La presente ETI proporciona medidas que podrían evitar o mitigar las dificultades de las operaciones de evacuación o de rescate tras un incidente ferroviario específico de un túnel.



- b) Se han identificado medidas apropiadas, que podrán controlar o reducir de forma significativa los riesgos derivados de los escenarios de incidentes específicos de túneles mencionados anteriormente.
- c) Estas medidas se inscriben en las categorías de prevención, mitigación, evacuación y rescate, aunque en la presente ETI no aparecen dentro de estos apartados sino bajo los epígrafes de los subsistemas correspondientes.
- d) Las medidas prescritas pueden considerarse una respuesta a los tres tipos de incidentes señalados a continuación.

2.2.1. Incidentes «calientes»: incendio, explosión seguida de incendio, y emisión de humos o gases tóxicos.

- a) El principal peligro es el incendio. Se entiende por incendio una combinación de calor, llamas y humo.
- b) El incendio se origina en un tren.

El incendio es detectado por detectores de incendios embarcados o por personas de a bordo. Al maquinista se le notifica la existencia de un problema, ya sea de un incendio a través de una notificación automática o de un problema genérico mediante la activación de la alarma por los pasajeros.

El maquinista está formado para actuar de manera adecuada en función de las circunstancias locales.

Se apaga la ventilación para evitar la propagación del humo. En el caso del material rodante de categoría B, los pasajeros que se encuentren en la zona afectada se dirigirán a una zona no afectada del tren en la que estén protegidos del fuego y de los gases.

Siempre que sea posible el tren ha de salir del túnel. Se realizará la evacuación de los pasajeros, guiados por la tripulación o de forma autónoma, hacia una zona segura a cielo abierto.

Si es conveniente, el tren se detendrá en un punto de lucha contra incendios dentro del túnel. Se realizará la evacuación de los pasajeros, guiados por la tripulación o de forma autónoma, hacia una zona segura.

Si el sistema de extinción de incendios logra extinguir el incendio, el incidente se convertirá en un incidente «frío».

- c) El incendio se origina en el túnel.

Si el incendio se origina en un túnel o en una sala técnica, el maquinista está formado para actuar de manera adecuada en función de las circunstancias locales de conformidad con los posibles incidentes específicos de los túneles, descritos en el plan de emergencia.

2.2.2. Incidentes «fríos»: colisión y descarrilamiento

- a) Las medidas específicas para túneles se concentran en las instalaciones de entrada/salida en las que se apoya la evacuación y la intervención de los servicios de intervención en emergencias.
- b) La diferencia con los incidentes calientes es que no hay limitaciones de tiempo debido a la creación de un entorno hostil provocado por el fuego.

2.2.3. Parada prolongada

- a) La parada prolongada (una parada no prevista en un túnel, sin que exista un incidente frío ni caliente, durante más de 10 minutos) no es, por sí misma, una amenaza para los pasajeros y el personal del tren.
- b) Sin embargo, puede provocar el pánico y dar lugar a una evacuación espontánea e incontrolada, con la consiguiente exposición a los peligros presentes en un entorno de túnel.

2.2.4. Exclusiones

Los escenarios que no se han tratado se enumeran en la cláusula 1.1.4.

2.3. La misión de los servicios de intervención en emergencias

- a) La definición de la misión de los servicios de intervención en emergencias es competencia de la legislación nacional correspondiente.
- b) Las medidas recogidas en la presente ETI para el rescate se basan en la hipótesis de que los servicios de intervención en emergencias que intervienen en un incidente de un túnel deben proteger las vidas de manera prioritaria.
- c) Se supone que la misión de los servicios de intervención es:
 - 1) En un incidente de tipo «caliente»:
 - rescatar a las personas que no puedan alcanzar una zona segura,
 - aportar asistencia médica inicial a los evacuados,
 - combatir el incendio en la medida necesaria para protegerse a sí mismos y a las personas atrapadas en el incidente,
 - dirigir la evacuación desde las zonas seguras dentro del túnel hasta el lugar seguro final.
 - 2) En un incidente de tipo «frío»:
 - rescatar a las personas.
 - aportar ayuda inicial a las víctimas con lesiones graves,
 - liberar a las víctimas atrapadas,
 - dirigir la evacuación hasta el lugar seguro final.
- d) En la presente ETI no se establecen exigencias de tiempo ni requisitos de rendimiento.
- e) Aunque los incidentes en túneles ferroviarios que ocasionan múltiples víctimas mortales son raros, es indudable que podría haber sucesos, con una probabilidad de ocurrir enormemente baja, en los cuales incluso el acceso de los servicios de intervención en emergencias bien equipados quedaría restringido, como es el caso de un gran incendio en un tren de mercancías.
- f) Si las previsiones de los servicios de intervención en emergencias recogidas en los planes de emergencias van más allá de los supuestos descritos anteriormente, se podrá mejorar el equipamiento del túnel o adoptar medidas complementarias.

2.4. Definiciones

A efectos de la presente ETI, se utilizarán las siguientes definiciones:

- a) Túnel ferroviario: un túnel ferroviario es una excavación o una construcción alrededor de las vías que permite que el ferrocarril pase, por ejemplo, por debajo del terreno, edificios o agua. La longitud de un túnel viene definida por la longitud cuya sección transversal está totalmente confinada, medida al nivel del carril. Un túnel en el ámbito de la presente ETI es el que tiene una longitud igual o superior a 0,1 km. Cuando determinados requisitos sean de aplicación solo en túneles por encima de una longitud, los umbrales se indican en las cláusulas correspondientes.
- b) Zona segura: una zona segura es un espacio de supervivencia temporal, dentro o fuera del túnel, para que los pasajeros y el personal del tren se refugien tras ser evacuados de un tren.

- c) Punto de lucha contra incendios: un punto de lucha contra incendios es un lugar definido, dentro o fuera del túnel, en el que la instalación de lucha contra incendios puede ser utilizada por los servicios de rescate y donde los pasajeros y el personal del tren pueden evacuar un tren.
- d) Salas técnicas: las salas técnicas son espacios cerrados con puertas de entrada/salida dentro o fuera del túnel y con instalaciones de seguridad necesarias para al menos una de las siguientes funciones: autorrescate, evacuación, comunicación de emergencia, rescate y lucha contra incendios, equipos de señalización y comunicación, y alimentación eléctrica de tracción.
- e) Tren de mercancías: un tren de mercancías es un tren compuesto por una o más locomotoras y uno o más vagones. Un tren de mercancías que incluya al menos un vagón que transporte mercancías peligrosas es un tren de mercancías peligrosas.
- f) Todas las definiciones relacionadas con el material rodante se encuentran en la ETI de locomotoras y coches de pasajeros y en la ETI de vagones.

3. REQUISITOS ESENCIALES

El cuadro siguiente indica parámetros básicos de la presente ETI y su correspondencia con los requisitos esenciales, tal como se establece y enumera en el anexo III de la Directiva 2008/57/CE.

Elemento del subsistema de infraestructura	Cláusula de referencia	Seguridad	Fiabilidad Disponibilidad	Salud	Protección del medio ambiente	Compatibilidad técnica
Prevención del acceso no autorizado a las salidas de emergencia y a las salas técnicas	4.2.1.1.	2.1.1.				
Resistencia al fuego de las estructuras de túnel	4.2.1.2.	1.1.4. 2.1.1.				
Reacción al fuego de los materiales de construcción	4.2.1.3.	1.1.4. 2.1.1.		1.3.2.	1.4.2.	
Detección de incendios	4.2.1.4.	1.1.4. 2.1.1.				
Instalaciones de evacuación	4.2.1.5.	1.1.5. 2.1.1.				
Pasillos de evacuación	4.2.1.6.	2.1.1.				
Puntos de lucha contra incendios	4.2.1.7.	2.1.1.				1.5.
Comunicaciones de emergencia	4.2.1.8.	2.1.1.				

Elemento del subsistema de energía	Cláusula de referencia	Seguridad	Fiabilidad Disponibilidad	Salud	Protección del medio ambiente	Compatibilidad técnica
Segmentación de la línea aérea de contacto o de los carriles conductores	4.2.2.1.	2.2.1.				
Puesta a tierra de la línea aérea de contacto o del carril conductor	4.2.2.2.	2.2.1.				
Suministro de energía eléctrica	4.2.2.3.	2.2.1.				
Requisitos para los cables eléctricos en los túneles	4.2.2.4.	2.2.1. 1.1.4.		1.3.2.	1.4.2.	
Fiabilidad de las instalaciones eléctricas	4.2.2.5.	2.2.1.				

Elemento del subsistema de material rodante	Cláusula de referencia	Seguridad	Fiabilidad Disponibilidad	Salud	Protección del medio ambiente	Compatibilidad técnica
Medidas de prevención de incendios	4.2.3.1.	1.1.4. 2.4.1.		1.3.2.	1.4.2.	
Medidas de detección y control de incendios	4.2.3.2.	1.1.4. 2.4.1.				
Requisitos aplicables a situaciones de emergencia	4.2.3.3.	2.4.1.	2.4.2.			1.5. 2.4.3.
Requisitos aplicables a la evacuación	4.2.3.4.	2.4.1.				

4. CARACTERIZACIÓN DEL SUBSISTEMA

4.1. Introducción

- a) El sistema ferroviario de la Unión Europea, al que se aplica la Directiva 2008/57/CE y del cual forman parte los subsistemas, ha sido desarrollado para convertirse en un sistema integrado cuya coherencia debe verificarse.
- b) Dicha coherencia se ha comprobado en relación con el desarrollo de las especificaciones de la presente ETI, sus interfaces con respecto a los sistemas en los que está integrada y a las normas de explotación del ferrocarril.
- c) Teniendo en cuenta todos los requisitos esenciales aplicables, los parámetros básicos relativos a la seguridad en los túneles ferroviarios para los subsistemas de infraestructuras, energía y material rodante, se establecen en la cláusula 4.2 de la presente ETI. Los requisitos de explotación y las responsabilidades se establecen en la ETI de explotación y gestión del tráfico y en la cláusula 4.4 de la presente ETI.

4.2. Especificaciones funcionales y técnicas de los subsistemas

De acuerdo con los requisitos esenciales del capítulo 3, las especificaciones funcionales y técnicas de los aspectos específicos de la seguridad en los túneles en lo que se refiere a los subsistemas mencionados anteriormente son las siguientes:

4.2.1. Subsistema de infraestructura

4.2.1.1. Prevención del acceso no autorizado a las salidas de emergencia y a las salas técnicas

Esta especificación se aplica a todos los túneles.

- a) Se debe impedir el acceso no autorizado a las salas técnicas.
- b) Cuando se bloqueen las salidas de emergencia por motivos de seguridad, debe garantizarse que siempre se puedan abrir desde dentro.

4.2.1.2. Resistencia al fuego de las estructuras de túnel

Esta especificación se aplica a todos los túneles.

- a) En caso de incendio, la integridad del revestimiento del túnel se mantendrá por un período de tiempo lo suficientemente largo como para permitir el autorrescate, la evacuación de los pasajeros y del personal del tren, así como la intervención de los servicios de intervención en emergencias. Dicho período de tiempo se ajustará a lo dispuesto en los escenarios de evacuación recogidos y descritos en el plan de emergencia.
- b) En los casos de túneles sumergidos o que puedan provocar el desplome de estructuras cercanas importantes, la estructura resistente del túnel deberá soportar la temperatura del fuego durante un período de tiempo suficiente para que se realice la evacuación de las zonas de túnel dañadas y de las estructuras cercanas. Dicho período de tiempo se especificará en el plan de emergencia.

4.2.1.3. Reacción al fuego de los materiales de construcción

Esta especificación se aplica a todos los túneles.

- a) Esta especificación se aplica a los productos y materiales de construcción del interior de los túneles.
- b) El material de construcción del túnel cumplirá los requisitos de la clase A2 de la Decisión 2000/147/CE de la Comisión. Los paneles no estructurales y demás equipamiento cumplirán los requisitos de la clase B de la Decisión 2000/147/CE de la Comisión.
- c) Se enumerarán los materiales que no contribuyan significativamente a una carga de fuego. Dichos materiales no están obligados a cumplir con lo anteriormente mencionado.

4.2.1.4. Detección de incendios en las salas técnicas

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

Las salas técnicas estarán equipadas con detectores que alerten al administrador de la infraestructura en caso de incendio.

4.2.1.5. Instalaciones de evacuación

4.2.1.5.1 Zona segura

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Una zona segura permitirá la evacuación de los trenes que utilicen el túnel. Tendrá una capacidad acorde con la capacidad máxima de los trenes que se prevea que circulen en la línea donde se localiza el túnel.
- b) La zona segura garantizará condiciones de supervivencia para pasajeros y personal del tren durante el tiempo necesario para realizar una evacuación completa desde la zona segura hasta el lugar seguro final.
- c) En caso de zonas seguras subterráneas o submarinas, las instalaciones permitirán que las personas se desplacen desde la zona segura hasta la superficie sin tener que volver a entrar en el tubo afectado del túnel.
- d) El diseño de una zona segura y su equipamiento deberá tener en cuenta el control de humos para, en particular, proteger a las personas que utilicen las instalaciones de auto-evacuación.

4.2.1.5.2 Acceso a la zona segura

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Las zonas seguras serán accesibles para las personas que inicien la auto-evacuación desde el tren así como para los servicios de intervención en emergencias.
- b) Se elegirá una de las siguientes soluciones para el acceso desde el tren hasta la zona segura:
 - 1) salidas de emergencia a la superficie laterales y/o verticales. Deberá haber este tipo de salidas, como mínimo, cada 1 000 m;
 - 2) galerías de conexión transversales entre tubos independientes y contiguos del túnel que permitan utilizar el tubo contiguo del túnel como zona segura. Deberán disponerse estas galerías transversales, como mínimo, cada 500 m;
 - 3) se permiten soluciones técnicas alternativas que proporcionen una zona segura con un nivel de seguridad, como mínimo, equivalente. El nivel de seguridad equivalente para pasajeros y personal del tren se verificará mediante el método común de seguridad para la evaluación del riesgo.
- c) Las puertas de acceso desde el pasillo de evacuación a la zona segura tendrán una abertura libre de al menos 1,4 m de ancho por 2 m de alto. De manera alternativa, se permite utilizar múltiples puertas contiguas de menor anchura siempre que se verifique que la capacidad total de paso de personas es equivalente o superior.
- d) Una vez atravesadas las puertas, la abertura libre deberá seguir siendo de al menos 1,5 m de ancho por 2,25 m de alto.
- e) Se describirá en el plan de emergencia el modo en que los servicios de intervención en emergencias accederán a la zona segura.

4.2.1.5.3. Medios de comunicación en zonas seguras

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

La comunicación será posible, bien por teléfono móvil, bien mediante conexión fija, entre las zonas seguras subterráneas y el centro de control del administrador de la infraestructura.

4.2.1.5.4. Alumbrado de emergencia en las rutas de evacuación

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 0,5 km de longitud.

- a) Se instalará alumbrado de emergencia para guiar a los pasajeros y al personal del tren hacia una zona segura en caso de emergencia.
- b) La iluminación deberá cumplir los siguientes requisitos:
 - 1) en tubo de vía única: en el lado del pasillo de evacuación;
 - 2) en tubo de vías múltiples: en ambos lados del tubo;
 - 3) posición de las luces:
 - por encima del pasillo de evacuación, lo más bajo posible, y de forma que no interrumpen el espacio libre para el paso de personas, o bien
 - integradas en los pasamanos;
 - 4) la iluminancia deberá mantenerse en el tiempo en al menos 1 lux en cualquier punto del plano horizontal a nivel del pasillo.
- c) Autonomía y fiabilidad: deberá disponerse de un suministro eléctrico alternativo durante un período de tiempo apropiado tras la interrupción del suministro eléctrico principal. El tiempo requerido deberá adecuarse a los escenarios de evacuación y estar definido en el plan de emergencia.
- d) Si las luces de emergencia se desconectan en condiciones normales de funcionamiento, será posible encenderlas por los dos medios siguientes:
 - 1) manualmente desde el interior del túnel a intervalos de 250 m;
 - 2) por el explotador del túnel mediante control remoto.

4.2.1.5.5. Señalización de evacuación

Esta especificación se aplica a todos los túneles.

- a) La señalización de la evacuación indicará las salidas de emergencia, la distancia a la zona segura y la dirección hacia esta.
- b) Todas las señales se ajustarán a las disposiciones de la Directiva 92/58/CEE, de 24 de junio de 1992, relativa a las disposiciones en materia de señalización de seguridad y de salud en el trabajo y a lo especificado en el apéndice A, índice nº 1.
- c) Las señales de evacuación se instalarán en los hastiales a lo largo de los pasillos de evacuación.
- d) La distancia máxima entre las señales de evacuación será 50 m.
- e) Se instalarán señales en el túnel para indicar la posición del equipamiento de emergencia, en los lugares donde esté situado dicho equipamiento.
- f) Todas las puertas que conduzcan a salidas de emergencia o galerías de conexión transversal estarán señalizadas.

4.2.1.6. Pasillos de evacuación

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 0,5 km de longitud.

- a) Se construirán pasillos de evacuación en los túneles de vía única, como mínimo, a un lado de la vía, y en los túneles de vías múltiples, a ambos lados del túnel. En los túneles con más de dos vías, será posible el acceso a un pasillo de evacuación desde cada vía.
 - 1) La anchura del pasillo de evacuación será de al menos 0,8 m.
 - 2) La altura libre mínima por encima del pasillo de evacuación será de 2,25 m.
 - 3) La altura del pasillo estará al nivel de la parte superior del carril o incluso más alto.
- 4) Se evitarán estrechamientos locales provocados por obstáculos dentro del gálibo de evacuación. La presencia de obstáculos no reducirá la anchura mínima a menos de 0,7 m y la longitud del obstáculo no superará los 2 m.

- b) Se instalarán pasamanos continuos entre 0,8 m y 1,1 m por encima del pasillo que marquen el rumbo hacia una zona segura.
- 1) Los pasamanos se colocarán fuera del gálibo libre mínimo del pasillo de evacuación.
 - 2) Los pasamanos formarán un ángulo entre 30° y 40° respecto al eje longitudinal del túnel a la entrada y a la salida del obstáculo.

4.2.1.7. Puntos de lucha contra incendios

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) A los efectos de la presente cláusula, dos o más túneles consecutivos serán considerados como un túnel único, a menos que se cumplan las dos condiciones siguientes:
- 1) la separación a cielo abierto entre ellos supere en más de 100 m la longitud máxima del tren que vaya a circular en la línea, y
 - 2) el área a cielo abierto alrededor de la vía y su situación respecto de esta, en el tramo de separación entre los dos túneles, permiten a los pasajeros alejarse del tren hacia un espacio seguro. El espacio seguro deberá tener un tamaño suficiente para acoger a todos los pasajeros correspondientes al tren de mayor capacidad que se prevea que va a circular por la línea.
- b) Se crearán puntos de lucha contra incendios:
- 1) fuera de ambas bocas de todos los túneles de menos de 1 km, y
 - 2) dentro del túnel, según la categoría del material rodante previsto para circular, tal y como se resume en el siguiente cuadro:

Longitud del túnel	Categoría del material rodante con arreglo al apartado 4.2.3	Distancia máxima desde las bocas hasta un punto de lucha contra incendios y entre dos de ellos
1 a 5 km	Categoría A o B	No se requiere ningún punto de lucha contra incendios
5 a 20 km	Categoría A	5 km
5 a 20 km	Categoría B	No se requiere ningún punto de lucha contra incendios
más de 20 km	Categoría A	5 km
más de 20 km	Categoría B	20 km

- c) Requisitos para todos los puntos de lucha contra incendios:
- 1) los puntos de lucha contra incendios estarán equipados con suministro de agua (de al menos 800 l/min durante dos horas) cerca de los puntos previstos para la detención del tren. El método de suministro del agua se describirá en el plan de emergencia;
 - 2) se deberá indicar al maquinista del tren el punto previsto para la detención del tren. Esto no requerirá equipamiento específico a bordo (todos los trenes que cumplan la presente ETI podrán usar el túnel);
 - 3) los puntos de lucha contra incendios serán accesibles a los servicios de intervención en emergencias. En el plan de emergencia se describirá la forma en que los servicios de intervención en emergencias accederán al punto de lucha contra incendios y desplegarán el equipo;
 - 4) se podrá interrumpir la alimentación eléctrica de tracción y poner a tierra la instalación eléctrica en los puntos de lucha contra incendios, ya sea de forma presencial o por control remoto.
- d) Requisitos de los puntos de lucha contra incendios situados fuera de las bocas del túnel

Además de los requisitos descritos en la cláusula 4.2.1.7, letra c), los puntos de lucha contra incendios fuera de las bocas del túnel cumplirán las siguientes condiciones:

- 1) La zona a cielo abierto en torno al punto de lucha contra incendios dispondrá de una superficie de al menos 500 m².

e) Requisitos de puntos de lucha contra incendios dentro del túnel

Además de los requisitos descritos en la cláusula 4.2.1.7, letra c), los puntos de lucha contra incendios dentro del túnel cumplirán las siguientes condiciones:

- 1) se podrá acceder a una zona segura desde el punto de detención del tren. En las dimensiones de la ruta de evacuación hacia la zona segura se deberá considerar el tiempo de evacuación (según lo especificado en la cláusula 4.2.3.4.1) y la capacidad prevista de los trenes (mencionada en la cláusula 4.2.1.5.1) que vayan a circular por el túnel. Se deberá demostrar que el tamaño de la ruta de evacuación resulta adecuado;
- 2) la zona segura asociada con el punto de lucha contra incendios tendrá una superficie suficiente para que los pasajeros esperen de pie hasta ser evacuados a una zona segura final;
- 3) existirá un acceso al tren afectado para los servicios de intervención en emergencias sin que tengan que atravesar la zona segura ocupada;
- 4) el diseño del punto de lucha contra incendios y de su equipamiento deberá tener en cuenta el control de humos para, en particular, proteger a las personas que utilicen las instalaciones de auto-evacuación para acceder a la zona segura.

4.2.1.8. Comunicaciones de emergencia

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Deberá haber comunicación por radio entre el tren y el centro de control del administrador de la infraestructura en cada túnel, mediante GSM-R.
- b) Asimismo, tendrá que haber continuidad por radio para que los servicios de intervención en emergencias se comuniquen *in situ* con sus centros de mando. El sistema permitirá que los servicios de intervención en emergencias puedan usar su propio equipo de comunicación.

4.2.2. Subsistema de energía

Esta cláusula se aplica a la parte de infraestructura del subsistema de energía.

4.2.2.1. Segmentación de la línea aérea de contacto o de los carriles conductores

Esta especificación se aplica a los túneles de más de 5 km de longitud.

- a) El sistema de alimentación eléctrica de tracción en los túneles estará dividido en secciones, que no deberán rebasar los 5 km. Este requisito se aplica únicamente si el sistema de señalización permite la presencia en el túnel de más de un tren simultáneamente en cada vía.
- b) Deberá haber un control remoto y la posibilidad de conectar y desconectar cada sección eléctrica independientemente.
- c) Deberá haber algún medio de comunicación e iluminación en la zona de los interruptores para permitir un accionamiento manual con seguridad del equipo de conmutación, así como su mantenimiento.

4.2.2.2. Puesta a tierra de la línea aérea de contacto o del carril conductor

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Se instalarán dispositivos de puesta a tierra en los puntos de acceso al túnel y, si los protocolos permiten la puesta a tierra de una única sección, se instalarán cerca de los puntos de separación entre secciones. Estos serán dispositivos portátiles o instalaciones fijas accionadas manualmente o mediante control remoto.
- b) Se instalarán los medios de comunicación e iluminación necesarios para las operaciones de puesta a tierra.
- c) Los procedimientos y responsabilidades para la puesta a tierra serán definidos entre el administrador de la infraestructura y los servicios de intervención en emergencias, basándose en los escenarios de emergencia considerados en el plan de emergencia.

4.2.2.3. Suministro de energía eléctrica

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

El sistema de distribución de la energía eléctrica en el túnel estará adaptado a las necesidades del equipamiento de los servicios de intervención en emergencias, conforme arreglo al plan de emergencia del túnel. Algunos grupos de los servicios nacionales de intervención en emergencias podrán ser autosuficientes en lo que se refiere al suministro eléctrico. En este caso, no disponer de instalaciones de suministro eléctrico para uso de estos grupos puede considerarse una opción adecuada. Sin embargo, esta decisión debe describirse en el plan de emergencia.

4.2.2.4. Requisitos para los cables eléctricos en los túneles

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

En caso de incendio, los cables expuestos tendrán las siguientes características: baja inflamabilidad, baja capacidad de propagación del fuego, baja toxicidad y baja densidad de humos. Estos requisitos se cumplen si los cables satisfacen como mínimo los requisitos de la clase B2CA, s1a, a1, definidos en la Decisión 2006/751/CE de la Comisión.

4.2.2.5. Fiabilidad de las instalaciones eléctricas

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Las instalaciones eléctricas importantes para la seguridad (detección de incendios, alumbrado de emergencia, comunicaciones de emergencia y cualquier otro sistema definido por el administrador de la infraestructura o por la entidad contratante como vital para la seguridad de los pasajeros en el túnel) estarán protegidas contra los daños derivados de impactos mecánicos, calor o incendio.
- b) El sistema de distribución estará diseñado de forma que pueda tolerar daños inevitables, disponiendo, por ejemplo, de doble acometida.
- c) Autonomía y fiabilidad: un suministro eléctrico alternativo deberá estar disponible durante un período de tiempo apropiado tras la interrupción del suministro eléctrico principal. El tiempo requerido deberá adecuarse a los escenarios de evacuación y estar especificado en el plan de emergencia.

4.2.3. Subsistema de material rodante

- a) En el contexto de la presente ETI, el subsistema de material rodante se subdividirá en las siguientes categorías:
 - 1) material rodante de pasajeros de categoría A (incluidas las locomotoras de trenes de pasajeros) apto para circular por las líneas incluidas en el ámbito de aplicación de la presente ETI, donde la distancia entre los puntos de lucha contra incendios o la longitud de los túneles no supere los 5 km;
 - 2) material rodante de pasajeros de categoría B (incluidas las locomotoras de trenes de pasajeros) apto para circular por todos los túneles de las líneas incluidas en el ámbito de aplicación de la presente ETI, independientemente de la longitud de dichos túneles;
 - 3) locomotoras de mercancías y unidades autopropulsadas diseñadas para transportar una carga útil distinta a pasajeros, por ejemplo, correo o mercancías, aptas para circular por todos los túneles de las líneas incluidas en el ámbito de aplicación de la presente ETI, independientemente de la longitud de dichos túneles. Las locomotoras diseñadas para la tracción de trenes de mercancías así como de trenes de pasajeros viajeros se encuadran en ambas categorías y deberán respetar los requisitos de ambas;
 - 4) maquinaria de vía autopropulsada, cuando se desplace en tránsito, apta para circular por todos los túneles de las líneas incluidas en el ámbito de aplicación de la presente ETI, independientemente de la longitud de dichos túneles.
- b) La categoría de material rodante se registrará en el expediente técnico y permanecerá vigente independientemente de las revisiones futuras de la presente ETI.

4.2.3.1. Medidas de prevención de incendios

Esta cláusula se aplica a todas las categorías de material rodante.

4.2.3.1.1. Requisitos de material

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.2.1 de la ETI de locomotoras y coches de viajeros. Dichos requisitos también se aplicarán al equipo embarcado de control-mando y señalización.

4.2.3.1.2. Medidas específicas para líquidos inflamables

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.2.2 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.1.3. Detección de ejes calientes

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.2.3 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.2. Medidas de detección y control de incendios

4.2.3.2.1. Extintores portátiles de incendios

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.3.1 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.2.2. Sistemas de detección de incendios

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.3.2 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.2.3. Sistema automático de extinción de incendios para las unidades diésel de trenes de mercancías

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.3.3 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.2.4. Sistemas de contención y control de incendios para el material rodante de pasajeros

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.3.4 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.2.5. Sistemas de contención y control de incendios para locomotoras de trenes de mercancías y para unidades autopulsadas de trenes de mercancías

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.3.5 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.3. Requisitos aplicables a situaciones de emergencia

4.2.3.3.1. Sistema de alumbrado de emergencia del tren

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.4.1 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.3.2. Control de humos

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.4.2 de la ETI de locomotoras y vagones de viajeros.

4.2.3.3.3. Alarma de pasajeros y medios de comunicación

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.4.3 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.3.4. Capacidad de circulación

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.4.4 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.4. Requisitos aplicables a la evacuación

4.2.3.4.1. Salidas de emergencia para los pasajeros

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.5.1 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.2.3.4.2. Salidas de emergencia de las cabinas de conducción

Los requisitos se establecen en la cláusula 4.2.10.5.2 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.3. **Especificaciones funcionales y técnicas de las interfaces**4.3.1. *Interfaces con el subsistema de control-mando y señalización*

Interfaz con el subsistema de control-mando y señalización			
ETI SFT		ETI CCS	
Parámetro	Cláusula	Parámetro	Cláusula
Comunicación por radio (*)	4.2.1.8.a)	Funciones de comunicaciones móviles GSM-R para los ferrocarriles	4.2.4.
Características de los materiales	4.2.2.4.a)	Requisitos esenciales	Capítulo 3
Características de los materiales	4.2.3.1.1.	Requisitos esenciales	Capítulo 3

4.3.2. *Interfaces con el subsistema de explotación y gestión del tráfico*

Interfaz con el subsistema de explotación			
ETI STF		ETI EXP	
Parámetro	Cláusula	Parámetro	Cláusula
Norma sobre emergencias	4.4.1.	Comprobación de que el tren está en estado de marcha Salida de los trenes Funcionamiento degradado	4.2.2.7. 4.2.3.3. 4.2.3.6.
Plan de emergencia del túnel	4.4.2.	Gestión de situaciones de emergencia	4.2.3.7.
Simulacros	4.4.3.		
Suministro de información a los pasajeros sobre seguridad y emergencias a bordo del tren	4.4.5.		
Competencia específica en túneles de la tripulación del tren y resto del personal	4.6.1.	Competencia profesional Elementos específicos para la tripulación y el personal auxiliar	4.6.1. 4.6.3.2.3.

4.4. **Normas de explotación**

- a) Las normas de explotación se desarrollan en los procedimientos descritos en el sistema de gestión de la seguridad del administrador de la infraestructura. Dichas normas deben tener en cuenta la documentación de explotación que forma parte del expediente técnico exigido por el artículo 18, apartado 3, y descrito en el anexo VI de la Directiva 2008/57/CE.

Las siguientes normas de explotación no forman parte de la evaluación de los subsistemas estructurales.

4.4.1. *Norma para situaciones de emergencia*

Estas normas se aplican a todos los túneles.

De acuerdo con los requisitos esenciales señalados en el capítulo 3, las normas de explotación específicas de la seguridad en los túneles son las siguientes:

- la norma de explotación controla el estado del tren antes de que acceda a un túnel a fin de detectar cualquier defecto que resulte perjudicial para su comportamiento en circulación y poder efectuar la acción adecuada;
- en caso de incidente fuera del túnel, la norma de explotación podrá detener un tren con algún defecto que resulte perjudicial para su comportamiento en circulación antes de acceder al túnel;
- en caso de incidente dentro del túnel, la norma de explotación dirigirá al tren hacia el exterior del túnel, o hacia el siguiente punto de lucha contra incendios.

4.4.2. *Plan de emergencia del túnel*

Estas normas se aplican a los túneles de más de 1 km de longitud.

- Se preparará un plan de emergencia bajo la dirección del (de los) administrador(es) de la infraestructura, en cooperación con los servicios de intervención en emergencias y las autoridades responsables de cada túnel. Las empresas ferroviarias que deseen usar el túnel deberán implicarse en la elaboración o adaptación del plan de emergencia. Los administradores de las estaciones deberán implicarse igualmente si una o varias estaciones de un túnel se utilizan como zona segura o como punto de lucha contra incendios.
- El plan de emergencia será coherente con las instalaciones existentes de autorrescate, evacuación, extinción de incendios y rescate.
- El plan de emergencia incluirá escenarios detallados de incidentes específicos en el túnel que se adapten a las condiciones locales del túnel.

4.4.3. Simulacros

Estas normas se aplican a los túneles de más de 1 km de longitud.

- a) Antes de la apertura de un túnel o de una serie de túneles, se efectuará un simulacro a escala real que comprenda los procesos de evacuación y rescate, y en el que participen todas las categorías de personal definidas dentro del plan de emergencia.
- b) El plan de emergencia definirá de qué manera todas las organizaciones implicadas pueden familiarizarse con la infraestructura y con qué frecuencia tendrán lugar las visitas al túnel y los simulacros teóricos o de otro tipo.

4.4.4. Procedimientos de aislamiento y puesta a tierra

Estas normas se aplican a todos los túneles.

- a) Cuando sea necesario desconectar la alimentación eléctrica de tracción, el administrador de la infraestructura comprobará que las secciones correspondientes de la catenaria o del carril conductor han sido desconectadas, e informará de ello a los servicios de intervención en emergencias antes de su entrada en el túnel o sección del mismo.
- b) El administrador de la infraestructura será responsable de desconectar la alimentación eléctrica de tracción.
- c) La responsabilidad y el procedimiento de la puesta a tierra se definirán en el plan de emergencia. Se dispondrán medidas para el aislamiento de la sección en la que haya tenido lugar el incidente.

4.4.5. Suministro de información a los pasajeros sobre seguridad y emergencias a bordo del tren

- a) Las empresas ferroviarias informarán a los pasajeros sobre los procedimientos de seguridad y de emergencias a bordo relacionadas con los túneles.
- b) Cuando dicha información se presente de manera escrita u oral, se facilitará, como mínimo, en la lengua del país por el que circule el tren y en inglés.
- c) Se definirá una norma de explotación que describa la manera en que la tripulación garantiza la completa evacuación del tren, si se presenta el caso, incluidos los pasajeros con problemas de audición que se encuentren en zonas cerradas.

4.4.6. Normas de explotación para trenes que circulan por túneles

- a) Los vehículos que cumplan la ETI, tal y como se define en la cláusula 4.2.3, podrán circular por túneles de acuerdo con los siguientes principios:
 - 1) se considera que el material rodante de categoría A cumple los requisitos de seguridad en túneles para el material rodante, en líneas donde la distancia entre los puntos de lucha contra incendios, o la longitud de los túneles, no supera los 5 km;
 - 2) se considera que el material rodante de categoría B cumple los requisitos de seguridad en túneles para el material rodante en todas las líneas;
 - 3) se considera que las locomotoras de mercancías cumplen los requisitos de seguridad en túneles para el material rodante en todas las líneas. Sin embargo, los administradores de la infraestructura de túneles que superen los 20 km de longitud podrán requerir locomotoras con una capacidad de circulación equivalente a la del material rodante de pasajeros de categoría B para remolcar trenes de mercancías en dichos túneles. Este requisito se especificará claramente en el registro de infraestructura definido en la cláusula 4.8.1 y en la declaración de red del administrador de la infraestructura;
 - 4) se considera que la maquinaria de vía cumple los requisitos de seguridad en túneles para el material rodante en todas las líneas;
 - 5) los trenes de mercancías serán admitidos en todos los túneles con arreglo a las condiciones especificadas en la cláusula 1.1.3.1. Las normas de explotación pueden gestionar la circulación segura tanto del tráfico de mercancías como de pasajeros, por ejemplo, separando ambos tipos de tráfico.
- b) Se permite la explotación del material rodante de categoría A en líneas donde la distancia entre puntos de lucha contra incendios, o la longitud de los túneles, supere los 5 km, en el caso de que no haya pasajeros a bordo.
- c) Se implementarán las normas de explotación para evitar que cunda el pánico y se produzcan evacuaciones espontáneas y no controladas, en caso de detención prolongada de un tren en un túnel sin que se haya producido un incidente frío o caliente.

4.5. Normas de mantenimiento

4.5.1. Infraestructura

Antes de poner un túnel en funcionamiento se preparará un expediente de mantenimiento que establezca al menos:

- 1) identificación de elementos propensos a sufrir desgaste, fallo, envejecimiento o cualquier otra forma de deterioro o degradación;
- 2) especificación de los límites de utilización de los elementos mencionados en el apartado 1 y una descripción de las medidas que han de tomarse para impedir que se sobrepasen esos límites;
- 3) identificación de aquellos elementos relevantes en las situaciones de emergencia y su gestión;
- 4) comprobaciones periódicas y actividades de revisión necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas y partes de ellos mencionados en el apartado 3.

4.5.2. Mantenimiento del material rodante

Los requisitos de mantenimiento para el material rodante se estipulan en la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

4.6. Cualificaciones profesionales

Las cualificaciones profesionales del personal requeridas para las operaciones específicas de seguridad en los túneles en los subsistemas a los que se aplica la presente ETI, y teniendo en cuenta las normas de explotación de la cláusula 4.4 de la presente ETI, son las indicadas a continuación:

4.6.1. Cualificaciones específicas para túneles de la tripulación del tren y del resto del personal

- a) Todo el personal de conducción o de acompañamiento de un tren, así como el que autorice los movimientos de trenes, tendrá los conocimientos y la capacidad de aplicarlos para gestionar situaciones degradadas en caso de incidente.
- b) Para el personal que lleve a cabo las tareas de acompañamiento de un tren, los requisitos generales se especifican en la ETI de explotación y gestión del tráfico.
- c) La tripulación del tren, tal y como se establece en la ETI de explotación y gestión del tráfico, conocerá las normas de comportamiento sobre seguridad en los túneles y, en concreto, serán capaces de evacuar un tren cuando esté detenido en un túnel.
- d) Esto implica, en particular, ordenar a los pasajeros que pasen al siguiente coche o que salgan del tren y conducirlos fuera del mismo a una zona segura.
- e) El personal auxiliar del tren (por ejemplo, el de limpieza o restauración), que no forma parte de la tripulación del tren tal como se define arriba, además de su instrucción básica, recibirá formación para que pueda prestar ayuda a la tripulación del tren en sus actuaciones.
- f) La formación profesional de los mecánicos y de los responsables del mantenimiento y la explotación de los subsistemas incluirá el tema de la seguridad en los túneles ferroviarios.

4.7. Condiciones de salud y seguridad

Las condiciones de salud y seguridad del personal requeridas para las operaciones específicas de seguridad en los túneles en los subsistemas a los que se aplica la presente ETI y para su puesta en marcha, son las indicadas a continuación:

4.7.1. Dispositivo de autorrescate

Las unidades de tracción tripuladas de los trenes de mercancías irán equipadas con un dispositivo de autorrescate para el maquinista y las demás personas a bordo que satisfaga las especificaciones, ya sea la del apéndice A, índice 2, o bien índice 3. La empresa ferroviaria debe elegir una de las dos soluciones definidas en estas especificaciones.

4.8. Registros de infraestructura y de material rodante

4.8.1. Registro de infraestructura

Las características de la infraestructura que deben incluirse en el «registro de la infraestructura ferroviaria» están enumeradas en la Decisión de Ejecución 2011/633/UE de la Comisión, de 15 de septiembre de 2011, sobre las especificaciones comunes del registro de la infraestructura ferroviaria.

4.8.2. *Registro de material rodante*

Las características del material rodante que deben incluirse en el «Registro Europeo de Tipos Autorizados de Vehículos» están enumeradas en la Decisión de Ejecución 2011/665/UE de la Comisión, de 4 de octubre de 2011, sobre el Registro Europeo de Tipos Autorizados de Vehículos Ferroviarios.

5. Componentes de interoperabilidad

En la ETI de seguridad en los túneles ferroviarios no se especifica ningún componente de interoperabilidad.

6. Evaluación de la conformidad y/o de la idoneidad para el uso de los componentes y verificación del subsistema

6.1. **Componentes de interoperabilidad**

No es aplicable puesto que en la ETI de seguridad en los túneles ferroviarios no se especifica ningún componente de interoperabilidad.

6.2. **Subsistemas**6.2.1. *Verificación CE (aspectos generales)*

a) La verificación CE de un subsistema se llevará a cabo con arreglo a uno o una combinación de varios de los siguientes módulos, en virtud de lo establecido en la Decisión 2010/713/UE:

- Módulo SB: examen CE de tipo,
- Módulo SD: verificación CE basada en el sistema de gestión de la calidad del proceso de producción,
- Módulo SF: verificación CE basada en la verificación del producto,
- Módulo SG: verificación CE basada en la verificación por unidad,
- Módulo SH1: verificación CE basada en un sistema de gestión de la calidad total más examen del diseño.

b) El procedimiento de aprobación y el contenido de la evaluación se definirán de común acuerdo entre el solicitante y el organismo notificado con arreglo a los requisitos especificados en la presente ETI y de conformidad con las normas establecidas en la sección 7 de la presente ETI.

6.2.2. *Procedimientos para la verificación CE de un subsistema (módulos)*

a) El solicitante elegirá uno de los módulos o combinación de módulos indicados en el siguiente cuadro.

Procedimientos de evaluación

Subsistema que se evalúa	Módulo SB+SD	Módulo SB+SF	Módulo SG	Módulo SH1
Subsistema de material rodante	X	X		X
Subsistema de energía			X	X
Subsistema de infraestructura			X	X

b) Las características del subsistema que serán evaluadas durante las fases relevantes se indican en el apéndice B.

6.2.3. *Soluciones existentes*

a) Si una solución existente ya está evaluada para una aplicación en condiciones comparables y está en servicio, se aplicará el siguiente procedimiento:

b) El solicitante acreditará que los resultados de los ensayos y verificaciones de la evaluación anterior de la aplicación están en conformidad con los requisitos de la presente ETI. En este caso, las evaluaciones anteriores de tipo relativas a las características del subsistema seguirán siendo válidas para la nueva aplicación.

6.2.4. Soluciones innovadoras

- a) Las soluciones innovadoras son soluciones técnicas que cumplen los requisitos funcionales y el espíritu de la presente ETI, pero que no son totalmente conformes con ella.
- b) Si se propusiera una solución innovadora, el fabricante o su representante autorizado en la Unión Europea aplicará los procedimientos descritos en el artículo 8.

6.2.5. Evaluación del mantenimiento

- a) De conformidad con el artículo 18, apartado 3, de la Directiva 2008/57/CE, el responsable de elaborar el expediente técnico que contenga la documentación requerida para la explotación y el mantenimiento será un organismo notificado.
- b) El organismo notificado verificará únicamente que se ha aportado la documentación solicitada para la explotación y el mantenimiento, definida en la cláusula 4.5 de la presente ETI. No es necesario que el organismo notificado verifique la información contenida en la documentación presentada.

6.2.6. Evaluación de las normas de explotación

De conformidad con los artículos 10 y 11 de la Directiva 2004/49/CE, las empresas ferroviarias y los administradores de las infraestructuras demostrarán que su sistema de gestión de la seguridad cumple los requisitos de la presente ETI, cuando soliciten un certificado de seguridad o una autorización de seguridad, tanto si son nuevos como modificación de uno existente. No es necesario que un organismo notificado evalúe la conformidad con las normas de explotación de la presente ETI.

6.2.7. Requisitos adicionales para la evaluación de las especificaciones que afectan al administrador de la infraestructura

6.2.7.1. Prevención del acceso no autorizado a las salidas de emergencia y a las salas técnicas

La evaluación confirmará que:

- a) las puertas de salida de emergencia a la superficie y las puertas de las salas técnicas están dotadas de cerraduras adecuadas;
- b) las cerraduras se ajustan a la estrategia general de seguridad del túnel y de la infraestructura adyacente;
- c) las salidas de emergencia no se pueden cerrar con llave desde dentro y las personas pueden abrirlas durante la evacuación;
- d) se han instalado dispositivos de acceso para los servicios de intervención en emergencias.

6.2.7.2. Resistencia al fuego de las estructuras de túnel

El organismo notificado evaluará la conformidad con los requisitos sobre protección contra incendios de las estructuras, definidos en 4.2.1.2, utilizando los resultados de los cálculos y/o ensayos efectuados por el solicitante, o mediante un método equivalente.

- 1) Para verificar que la integridad del revestimiento del túnel se mantiene durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para permitir el autorrescate, la evacuación de los pasajeros y del personal del tren y la actuación de los servicios de intervención en emergencias, basta con demostrar que el revestimiento del túnel puede soportar una temperatura de 450 °C a nivel del techo durante ese mismo período de tiempo.
- 2) La evaluación de la resistencia de túneles sumergidos o túneles que puedan provocar el desplome de estructuras cercanas importantes se llevará a cabo de conformidad con una «curva temperatura-tiempo» apropiada elegida por el solicitante.

Dicha verificación no es necesaria para los túneles en roca sin sostenimiento adicional.

6.2.7.3. Reacción al fuego de los materiales de construcción

Para la evaluación de la cláusula 4.2.1.3, letra c), el organismo notificado solamente comprobará que se ha presentado la lista de materiales que no contribuyen significativamente a la carga de fuego.

6.2.7.4. Instalaciones para el autorrescate, el rescate y la evacuación en caso de incidente

- a) El organismo notificado comprobará que la solución adoptada queda claramente especificada mediante una declaración en el expediente técnico y que cumple los requisitos de la cláusula 4.2.1.5. Para evaluar la evolución de las condiciones en la zona segura durante un incidente, el organismo notificado verificará que las puertas y las estructuras que separan la zona segura del túnel pueden soportar el aumento de temperatura en el tubo más cercano.
- b) En los casos donde sea de aplicación la cláusula 4.2.1.2, letra b), las puertas de acceso a la zona segura se podrán evaluar con arreglo a una curva distinta a la seleccionada según la cláusula 6.2.7.2, apartado 2, recogida más arriba.

6.2.7.5. Acceso y equipamiento para los servicios de intervención en emergencias

Mediante la verificación del expediente técnico y el análisis de la información que acredite la consulta a los servicios de intervención en emergencias, el organismo notificado confirmará que se han cumplido los requisitos de las cláusulas 4.2.1 y 4.4.

6.2.7.6. Fiabilidad de las instalaciones eléctricas

El organismo notificado solamente confirmará que se ha efectuado una evaluación en caso de avería y que esta se ajusta a los requisitos funcionales del apartado 4.2.2.5.

6.2.8. Requisitos adicionales para la evaluación de las especificaciones que afectan a las empresas ferroviarias

6.2.8.1. Dispositivo de autorrescate

La evaluación de conformidad se describe en las especificaciones del apéndice A, índices 2, 3 y 4.

7. APLICACIÓN

Este apartado define la estrategia de aplicación para la ETI de seguridad en los túneles ferroviarios.

- a) La presente ETI no requiere modificaciones de los subsistemas que ya están en servicio a menos que se acondicionen o renueven.
- b) A menos que se indique otra cosa en la sección 7.3 («Casos específicos»), se considera que todo el material rodante nuevo de categoría B que cumpla la ETI alcanza un nivel de seguridad en el túnel y en caso de incendio superior al del material rodante que no cumpla la ETI. Esta hipótesis se utiliza para justificar la explotación segura del nuevo material rodante conforme con la ETI en túneles viejos no conformes con la ETI. Por lo tanto, se considera que todos los trenes de categoría B conformes con la ETI son aptos para su integración segura, con arreglo al artículo 15, apartado 1, de la Directiva 2008/57/CE, en todos los túneles no conformes con la ETI en el ámbito geográfico de aplicación de la presente ETI.
- c) Sin perjuicio de lo anterior, pueden ser necesarias medidas más exigentes que las que se establecen en la presente ETI para alcanzar el nivel deseado de seguridad en el túnel. Dichas medidas solo pueden ser implantadas en los subsistemas de infraestructura, energía y explotación y no limitarán la autorización o utilización del material rodante que cumpla la ETI.

7.1. Aplicación de la presente ETI a nuevos subsistemas

7.1.1. Observaciones generales

- a) La presente ETI se aplica a todos los subsistemas incluidos dentro de su ámbito de aplicación que se hayan puesto en servicio tras la fecha de aplicación de la presente ETI, excepto si se especifica otra cosa en los apartados siguientes.
- b) La aplicación de la presente ETI a la maquinaria de vía es voluntaria. La maquinaria de vía que no haya sido evaluada y no haya sido declarada conforme con la presente ETI estará sujeta a las normas nacionales. En este caso, se aplicarán los artículos 24 y 25 de la Directiva 2008/57/CE.

7.1.2. Material rodante nuevo

Para el material rodante nuevo se aplicarán las normas de implementación establecidas en la cláusula 7.1.1 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

7.1.3. Nuevas infraestructuras

La presente ETI se aplica a toda la infraestructura nueva que esté incluida dentro de su ámbito de aplicación.

7.2. Aplicación de la presente ETI a los subsistemas ya en servicio

7.2.1. Acondicionamiento o renovación de material rodante

En caso de renovación o acondicionamiento del material rodante existente, se aplicarán las normas de implementación establecidas en la cláusula 7.1.2 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

7.2.2. *Medidas de acondicionamiento o renovación de túneles*

Según el artículo 20, apartado 1, de la Directiva 2008/57/CE, se considera que cualquier modificación de los parámetros básicos de los subsistemas estructurales, tal y como se establece en la presente ETI, afectan globalmente a la seguridad del subsistema de infraestructura en cuestión. Por lo tanto, los Estados miembros decidirán hasta qué punto se debe aplicar la presente ETI al proyecto. A menos que se especifique otra cosa en la sección 7.3 («Casos específicos»), el resultado de los trabajos de renovación o acondicionamiento garantizará que se mantiene o mejora la compatibilidad de las instalaciones fijas con el material rodante que cumpla la ETI.

7.2.3. *Subsistema de explotación*

- a) Los aspectos de explotación y su implementación se establecen en la ETI de explotación y gestión del tráfico.
- b) Cuando se ponga en servicio un túnel renovado o acondicionado, se le aplicarán los requisitos para túneles nuevos de la presente ETI.

7.2.4. *Circulación de material rodante nuevo en túneles existentes*

- a) La categoría del nuevo material rodante previsto para circular en túneles existentes se seleccionará con arreglo a la cláusula 4.4.6, letra a).
- b) Sin embargo, un Estado miembro podrá permitir la circulación de material rodante nuevo de categoría A en túneles existentes de más de 5 km de longitud, siempre que la explotación de dicho material rodante ofrezca un nivel de seguridad contra incendios equivalente o superior al del material rodante utilizado anteriormente. El nivel de seguridad equivalente o superior para los pasajeros y el personal del tren se justificará mediante la utilización el método común de seguridad sobre evaluación de riesgos.

7.3. **Casos específicos**

7.3.1. *Observaciones generales*

- a) Los casos específicos relacionados en la cláusula siguiente describen las disposiciones especiales requeridas y autorizadas en determinadas redes de los Estados miembros.
- b) Dichos casos específicos se clasifican como casos «T»: casos «temporales»: está previsto que puedan incluirse en el sistema correspondiente en el futuro. Como consecuencia, serán objeto de revisión en el transcurso de las revisiones futuras de la presente ETI.
- c) Cualquier caso específico aplicable al material rodante en el ámbito de la presente ETI se detallará en la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

7.3.2. *Normas de explotación para trenes que circulan en túneles (cláusula 4.4.6)*

a) **Caso específico de Italia («T»)**

Las estipulaciones adicionales para el material rodante destinado a circular en túneles existentes de Italia se detallan en la cláusula 7.3.2.20 de la ETI de locomotoras y coches de pasajeros.

b) **Caso específico del túnel del Canal de la Mancha («T»)**

Las estipulaciones adicionales para el material rodante de pasajeros destinado a circular en el Canal de la Mancha se detallan en la cláusula 7.3.2.21 de la ETI de locomotoras y coches e pasajeros.

Anejo II: Plano de conjunto de la sección del túnel empleado

El plano 1 se incluye únicamente con fines ilustrativos. No se contempla acotar las dimensiones de la sección del tren, es información reservada y no ha sido objeto de estudio, únicamente se han seguido las pautas habituales de una simulación con estas características.



D

C

B

A

4

4

3

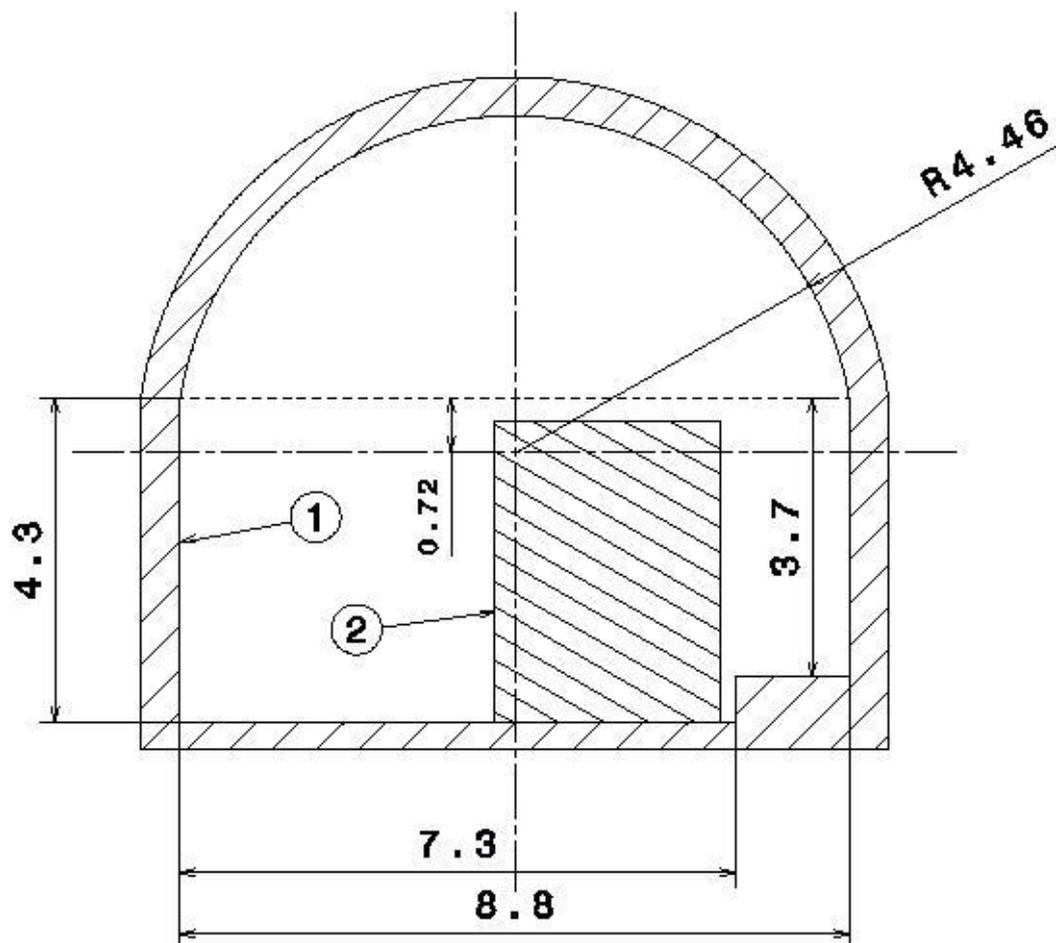
3

2

2

1

1



Vista de sección

1	Túnel	Hormigón
2	Conjunto Incendio-Tren	Aluminio

Este plano tiene finalidad educativa y no se ha empleado con otros objetivos.

Universidad de Valladolid

Conjunto de la sección del túnel Meorial

Dibujante diego	Fecha 04/08/2019
---------------------------	---------------------



Tam. A4	Plano número: 1
ESC. 1:100	Hoja 1/1

D

A

Anejo III: Datos graficados de la simulación

Introducción

En este anejo se dejarán los datos empleados en las gráficas del trabajo denominado “gráficos de los planos “SXX”” en el capítulo III, se han seleccionado solo aquellos datos que se consideran más representativos pues como se explica el informe completo hace una toma de estos datos cada medio segundo durante los 1200 s, dejando datos como las tablas 5, 6 y 7.

Datos Obtenidos

Temperatura

		Temperatura °C					
Sup (m)	tiempo (s)	30	60	180	300	600	1200
S01	0	63	66,5977592	124,4983	181,614	265,110284	324,747845
S02	25	22	17,624778	41,95694	78,32015	200,32326	325,942417
S03	50	19	18,219434	41,07283	91,51532	186,780568	326,53106
S04	75	17	22,3109402	67,17004	113,7871	195,411967	351,223877
S05	100	15	24,8984118	91,44937	135,7285	196,593733	369,332055
S06	125	15	21,1631019	92,0169	141,2412	204,197323	385,412282
S07	150	15	17,9051988	96,68759	148,8436	200,073263	402,05344
S08	175	15	15,9507469	93,28524	143,9093	200,625669	416,1702
S09	200	15	15,3894221	91,71716	138,2194	216,260592	426,61131
S10	225	15	14,9913449	86,70855	132,0962	210,93935	434,23862
S11	250	15	14,854064	79,55012	129,0665	205,952013	441,191571
S12	275	15	14,8500061	78,17199	123,7742	214,563106	446,879803
S13	300	15	14,8500061	79,03617	120,4856	221,806566	450,788922
S14	325	15	14,8500061	71,89813	114,5925	222,656851	453,677306
S15	350	15	14,8500061	67,38136	107,2556	207,220793	455,253088
S16	375	15	14,8500061	49,89787	80,18315	168,812314	457,181647
S17	400	15	14,8500061	35,38282	73,19947	169,729476	460,220806
S18	425	15	14,8500061	35,62453	75,72388	184,137558	460,515318
S19	450	15	14,8500061	31,1232	72,75272	184,959452	460,357644

Tabla 5: Tabla de temperaturas en los planos de 1,8m de altura sobre la acera.

Esta toma de datos tiene como curiosidad que se mide la temperatura media de la superficie, por lo tanto, la medida es de la distancia destacada hasta la distancia destacada en la siguiente superficie, deberá tenerse en cuenta para futuras consideraciones de riesgos. También sucede con las otras dos tablas (6 y 7).



Concentración CO

		CO (ppm)					
Sup (m)	tiempo (s)	30	60	180	300	600	1200
S01	0	6,699050487	6,9392381	12,47785	17,08221	22,7365992	26,4528868
S02	25	1,022535906	0,44737605	3,949986	8,481316	18,6208654	26,652831
S03	50	0,683273536	0,53734161	4,008188	10,07096	18,0814076	26,9374719
S04	75	0,284575122	1,10895359	7,382534	12,338	19,4321086	29,181852
S05	100	0,025069313	1,52309124	10,01309	14,30691	19,3298719	30,7703559
S06	125	0,001362471	0,96100694	10,522	14,805	19,7084731	32,152956
S07	150	2,88E-10	0,45032454	10,55607	15,46115	19,5712266	33,5261518
S08	175	1,34E-18	0,16154407	10,16223	14,96995	19,3048851	34,6697975
S09	200	3,10E-26	0,07892136	9,874083	14,40393	20,4441207	35,4565806
S10	225	1,31E-33	0,02070414	9,530818	13,91388	20,2956552	36,0607148
S11	250	0	0,00058237	8,611502	13,50061	18,9637324	36,6259975
S12	275	0	1,33E-10	8,648363	13,09827	20,1851379	37,0136647
S13	300	0	5,58E-17	8,514166	12,70768	20,6203583	37,2848692
S14	325	0	1,93E-23	7,982827	12,44974	20,5902529	37,4689826
S15	350	0	7,69E-30	7,220498	11,31846	19,2248865	37,5878794
S16	375	0	2,19E-37	4,890573	8,110106	16,4622722	37,6762211
S17	400	0	0	3,106931	7,763958	16,5974901	37,775969
S18	425	0	0	3,038927	7,912813	17,529837	37,7661389
S19	450	0	0	2,368433	7,497902	17,441903	37,7531749

Tabla 6: Tabla de concentraciones de CO en los planos de 1,8m de altura.

Concentración Humos

		Humo (m)					
Sup (m)	tiempo (s)	30	60	180	300	600	1200
S01	0	775,5015394	660,790997	104,4805	50,72925	33,8074917	28,1764446
S02	25	952,7703529	2155,6995	200,8436	85,3974	38,8372533	27,2125911
S03	50	1927,639018	2105,7241	190,5768	72,95859	39,4746434	26,7126446
S04	75	6382,591538	1464,79884	104,1609	59,72075	37,7122158	24,7305134
S05	100	118002,6908	1178,7658	74,43436	50,99575	37,5101482	23,4455174
S06	125	130326869,5	2096,36527	74,58677	49,40716	36,4934245	22,4303888
S07	150	5745169369	3753,03368	71,71993	47,43246	37,3720988	21,5053352
S08	175	5760368640	6791,64851	73,76244	48,88822	37,3821936	20,792866
S09	200	5760368640	14445,9386	75,09053	50,83877	35,4782385	20,3058326
S10	225	5760368640	132103,97	79,93292	52,87054	36,3739539	19,9717051
S11	250	5760368640	428000854	88,18108	54,22332	37,4420549	19,6910858
S12	275	5760368640	5752901603	91,30869	56,71677	36,2396531	19,475575
S13	300	5760368640	5760368640	89,01178	58,12319	35,6570315	19,3370565
S14	325	5760368640	5760368640	99,60419	61,22453	35,4317536	19,2435611
S15	350	5760368640	5760368640	108,5176	66,07373	37,7522154	19,1961465
S16	375	5760368640	5760368640	199,7895	100,0625	45,0976395	19,1389274
S17	400	5760368640	5760368640	244,6621	95,42803	44,0183165	19,059551
S18	425	5760368640	5760368640	250,8187	92,29353	41,4027848	19,0574847
S19	450	5760368640	5760368640	323,725	97,22312	41,5009588	19,0649877

Tabla 7: Tabla de concentraciones de humos en los planos de 1,8m de altura.

Anejo IV: Especificaciones técnicas sobre la instalación de la ventilación

Criterios de Selección

Muchos de estos criterios vienen propuestos por la empresa cliente, normativa y por último por la necesidad.

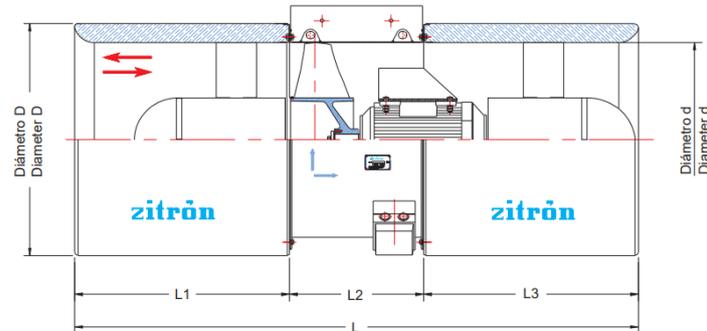
- Empuje: 6,041 N.
- V. Aire en el túnel: 2,778 m/s.
- Coeficiente ventilador: 0,9.
- Coeficiente montaje: 0,8.
- Coeficiente distancia: 1.
- Distancia entre primeros ventiladores y bocas: 250 m.
- Distancia entre ventiladores: 280 m.

Ficha técnica

Muestra la información a través de la tabla 8.



Empresa: Zitrón.
Modelo: JZR (reversible).
Calidad: ISO 9001, UNE 66901.
Nombre completo: JZR 10 30/4.
Geometría: JZR 10



Geometría: JZR	
D(mm)	1200
d(mm)	1000
L(mm)	2700
L1(mm)	1025
L2(mm)	650
L3(mm)	1025
Peso (kg)	850

Características técnicas del modelo: 30/4	
Caudal (m ³ /s)	26,3
Velocidad del chorro (m/s)	33,5
Empuje teórico (N)	1057
Empuje nominal (N)	1004
Pot consumida (kW)	29,5
Pot. Instalada (kW)	30
Niv. Sonoro a 10m (dB)	74

Tabla 8: Especificaciones del fabricante sobre el modelo JZR 10 30/4. Fuente: Zitrón

Descripción: Alta eficiencia con posibilidad de poder vehicular aire a 200 °C, 250 °C y 400 °C bajo demanda. Carcasa de acero laminado, con brida para la fijación de amortiguadores de ruido y soporte para el amarre del motor eléctrico. Rodete formado por un cuerpo de álabes en aluminio fundido y perfil simétrico (reversible). El motor es eléctrico trifásico, con rodamientos lubricados para ciclos de 40.000 h. Amortiguadores de ruido en la entrada y la salida, de tipo tubular.

Ensayos: Los ventiladores de chorro se someten a ensayos, ha sido diseñado y desarrollado por el departamento de Aerodinámica de ZITRÓN, un Banco de ensayos, especialmente adecuado para este tipo de pruebas, se obtiene:

- Caudal.
- Empuje real.
- Nivel sonoro.

Condiciones de los ensayos:

- Densidad del aire: 1,2 kg/m³.
- Frecuencia de red: 50 Hz.

Anejo V: Estimación de costes del trabajo

La ejecución del trabajo ha sido un esfuerzo conjunto de estudiante y tutor a través de la empresa INECO y empleando recursos disponibles en la misma. Como se puede observar en las tablas 9 y 10, la mayor parte del coste se invierte alrededor del programa ANSYS. Este programa ha requerido de muchas horas de aprendizaje, ensayos erróneos y correcciones.

Costes Trabajo			
	€/h	horas	€
Participantes			
Tutor	17,04545	50	852,2727
Estudiante	8,522727	400	3409,091
Recursos Internos			
Licencias ANSYS (estimada)	14,28043	308	4398,372
Oficina	2,883401	400	1153,36
ThinkPad	0,121077	92	11,13907
ThinkStation	0,602273	308	185,5
Total	43,45536	450	10009,74

Tabla 9: Precio estimado del trabajo ejecutado

Supuestos		
1 año	12	meses
1 mes	22	dias
1 dia	7	horas
trabajadores	240	trab/planta
periodo de amortización PC	4	Años
ThinPad	895	€
ThinkStation	4452	€
licencia ANSYS	26390,23	€/año
oficinas en Madrid	34,5	€/(m2*mes)
superficie oficina	3089	m2

Tabla 10: estimaciones para los cálculos

Es importante recordar que el presente trabajo forma parte de un informe de ventilación para completar anejos de proyectos en vías de desarrollo y que, como consecuencia, no toda la información deseada se puede presentar. Es un acuerdo entre tutor y estudiante, quienes determinan que es susceptible de ser relevante o, por el contrario, es información muy reveladora y no aporta valor al trabajo en sí.



Anejo VI: Valores empleados para cálculos

$$V_c = K_1 K_2 \left[\frac{gHQ}{\rho C_p A \left(\frac{Q}{\rho C_p A} + T \right)} \right]^{1/3} = 2.778 \frac{m}{s} \quad (8)$$

variable	valor	uds.
K1	0,61	
K2	1,06197234	
g	9,81	m/s
H	8,04	m
Q	3000000	W
Cp	1,4	J/g*K
A	61,7727	m ²
T	288	K
ρ	1,225	Kg/m ³

Tabla 11: Valores empleados para la velocidad crítica

$$D_h = \frac{4 * A}{P} = 8.246 \text{ m} \quad (7)$$

variable	valor	uds.
A	61,7727	m ²
P	29,965	m
Dh	8,24598031	m

Tabla 12: Valores empleados para el diámetro hidráulico