

4. MÉTODO GENERAL

El principal objetivo en este caso es establecer un método que permita la comparación del riesgo del túnel objeto de estudio con el correspondiente a un túnel calificado como “túnel virtual” que, tomado como referencia, marcará el nivel de riesgo aceptable para su diseño y posterior explotación.

Una vez realizado el análisis de riesgo se establecerá la necesidad o no de adoptar medidas de compensación de manera obligatoria, en caso de encontrarse el túnel en un nivel de riesgo muy superior al obtenido para el túnel virtual, o si por el contrario, al ser el nivel de riesgo muy similar se considerará seguro para su explotación el túnel en estudio.

El Método General de análisis de riesgo en túneles se basa, a su vez, en la integración de tres modelos, cada uno de los cuales trata de reproducir un determinado aspecto del riesgo del túnel, para llegar finalmente a cuantificar el riesgo del túnel analizado. Estos modelos son:

- **Modelo de riesgo del túnel**

Este modelo trata de reproducir el riesgo de accidente que da lugar a un escenario de incendio en el túnel analizado en función de sus características de diseño, equipamientos y explotación. Para ello, se contemplan una serie de escenarios de accidente, todos ellos desencadenantes de incendios en el interior del tubo, y se parametrizan mediante una serie de factores todas las características del túnel.

- **Modelo de ventilación**

El objetivo de este modelo es simular el comportamiento de la ventilación del túnel ante un incendio, para cada uno de los escenarios que se contemplan.

Con objeto de simplificar el estudio a realizar se han establecido dos categorías de túneles en función de su ventilación, aplicándole a cada grupo un modelo de ventilación distinto:

a) Túneles sin ventilación forzada exigida por el R.D. 635/2006

Se emplea el **Modelo tabulado de ventilación**

En este caso se modeliza la ventilación con la ayuda o soporte de unas tablas numéricas en las que se aportan los datos correspondientes al comportamiento de los humos para cada tipo de incendio.

Será de aplicación en aquellos túneles en los que el R.D. 635/2006 no exija la instalación de un sistema de ventilación forzada, es decir, dispongan de una ventilación natural. Estos serán los **túneles interurbanos de longitud inferior o igual a 500 metros y los túneles urbanos de longitud inferior o igual a 200 m.**

b) Túneles con ventilación forzada exigida por el R.D. 635/2006

Se emplea el **Modelo unidimensional de ventilación**

En este caso la modelización se realiza con el empleo de un programa auxiliar de modelización unidimensional de humos para simular y evaluar su comportamiento. Siempre que el autor del análisis de riesgo lo estime conveniente, se podrá complementar el análisis realizado con un modelo unidimensional mediante el empleo de modelos de ventilación más complejos, como pueden ser los modelos tridimensionales.

Se deberá aplicar este modelo en todos aquellos túneles en los que el R.D. 635/2006 exija la instalación de un sistema de ventilación forzada, tanto si disponen de él como si no. Estos serán los **túneles interurbanos de longitud superior de 500 m y los túneles urbanos de más de 200 m.**

Este modelo también puede aplicarse, si el autor del análisis de riesgo lo considera conveniente, en túneles que carezcan de este sistema de ventilación, es decir, túneles sin ventilación forzada.

En cualquier caso, **el modelo de ventilación empleado para analizar el comportamiento del humo en el túnel deberá ser el mismo tanto para el túnel real como para el túnel virtual**, tal y como se define posteriormente.

Cuando el analista lo estime necesario, podrá complementarse el análisis de riesgo realizado con el modelo de ventilación propuesta para cada caso, mediante el empleo de modelos de ventilación más completos y complejos.

- **Modelo de comportamiento de los usuarios**

Este modelo permite determinar el número de vehículos afectados en cada escenario y reproduce el comportamiento de los usuarios para evacuar el túnel, una vez que se ha producido un accidente que da lugar a un incendio.

Siempre que el autor del análisis de riesgo lo considere necesario, se podrá complementar el análisis realizado con el modelo de comportamiento de los usuarios propuesto para cada caso, mediante el empleo de modelos de evacuación o de comportamiento de usuarios más completos y complejos.

Por tanto, los modelos a aplicar dentro del Método General de análisis de riesgo en túneles serán los que se resumen en la siguiente tabla:

MODELOS DEL MÉTODO GENERAL		LONGITUD	TRAMO	VENTILACIÓN FORZADA EXIGIDA POR R.D. 635/2006
RIESGO DEL TÚNEL		$\forall L$	Interurbano / Urbano	Sí / No
VENTILACIÓN	TABULADO	$L \leq 500$ m	Interurbano	No
		$L \leq 200$ m	Urbano	
	UNIDIMENSIONAL	$L > 500$ m	Interurbano	Sí
		$L > 200$ m	Urbano	
EVACUACIÓN DE USUARIOS		$\forall L$	Interurbano / Urbano	Sí / No

Tabla 2. Modelos a aplicar para cada túnel dentro del Método General de análisis de riesgo

4.1 MODELO DE RIESGO DEL TÚNEL

Este modelo trata de reproducir el riesgo del túnel a través de una serie de escenarios de incendio representativos de diferentes accidentes que impliquen el incendio de vehículos en el interior de un túnel. Para cada escenario se determinará la posición del incendio en el túnel a analizar, pudiéndose estudiar cualesquiera otras posiciones de incendio que el autor del análisis estime oportunas pero analizando en todo caso la posición obtenida siguiendo el procedimiento establecido en el apartado 4.1.1.3, de manera que se pongan de manifiesto las diferentes medidas de seguridad con las que está dotado un túnel para poder favorecer la huida de los usuarios y mitigar los efectos del incendio sobre ellos. Este modelo, combinado con los otros dos modelos que conforman el Método General, permite determinar el riesgo asociado al túnel analizado.

Para poder determinar el nivel de riesgo del túnel, conforme a los escenarios estudiados en la elaboración del análisis de riesgo, se deberán seguir los pasos que se describen de forma resumida a continuación:

1. Determinación del Coeficiente de Riesgo del túnel virtual (CR_{TV})

El túnel virtual se define como un “túnel modelo de referencia”, de la misma longitud, número de carriles y tipo de circulación de tráfico (unidireccional o bidireccional) que el túnel objeto de análisis (túnel real), equipado con todas las instalaciones y equipamiento que establece el Real Decreto 635/2006 para su categoría. En posteriores apartados se completará esta definición para cada una de las características a considerar.

2. Determinación del Coeficiente de Riesgo del túnel real objeto de análisis (CR_{TR})

Siguiendo la misma sistemática que para el túnel virtual se obtendrá el Coeficiente de Riesgo del túnel real, es decir, considerando la geometría, equipamiento y condiciones de explotación reales del túnel analizado.

3. Determinación del Índice de Riesgo del túnel (*IR*)

Se define como índice de riesgo asociado al túnel el cociente entre las magnitudes anteriores, es decir, el resultado de la comparación directa entre el Coeficiente de Riesgo del túnel real y el Coeficiente de Riesgo del túnel virtual:

$$IR = \frac{CR_{TR}}{CR_{TV}}$$

El cociente anterior, en general dará como resultados cifras próximas a la unidad, obteniéndose valores superiores cuando el túnel real no disponga de todo el equipamiento que se requiere para su categoría, según lo establecido en el Real Decreto 635/2006, existan deficiencias en los parámetros geométricos de diseño, etc.

En caso contrario, el índice de riesgo será igual a la unidad o presentará valores ligeramente inferiores a la misma si, por ejemplo se hubiera dotado al túnel objeto de estudio de un equipamiento extraordinario o presentara unas características geométricas de diseño más favorables que las consideradas como referencia para el túnel virtual.

4. Comparación con los criterios de aceptación del riesgo

Una vez obtenido este valor final, se debe realizar la comparación del resultado obtenido con los criterios de aceptación de riesgo propuestos en la metodología y, en su caso, determinar la necesidad o no de adoptar medidas compensatorias durante la explotación del túnel.

4.1.1 ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS

4.1.1.1 Consideraciones previas

Cada escenario está compuesto de una sucesión de acontecimientos. Comienza por un acontecimiento desencadenante y continúa con la sucesión temporal de sucesos ordenada cronológicamente hasta que los usuarios se encuentran a salvo o, hasta la llegada de los servicios de emergencia, si es que esto ocurre posteriormente.

El estudio de los escenarios entre otras cosas permite:

- Mostrar de un modo concreto qué papel desempeña cada elemento (o equipamiento) o procedimiento en la mitigación de las consecuencias del incendio sobre los usuarios del túnel.
- Señalar las interacciones entre estos diferentes elementos o procedimientos.
- Identificar los posibles puntos débiles de cada elemento así como del funcionamiento conjunto.
- Determinar la existencia de zonas más o menos peligrosas, tanto en el túnel como en el entorno (opacidad, gases tóxicos, temperatura,...) y evaluar el número de personas presentes y expuestas.

Los elementos a considerar para el estudio de los escenarios son los siguientes:

- Las características físicas del incendio, es decir, la cantidad de calor, humo y gases tóxicos emitidos por el incendio en función del tiempo, según el tipo de vehículo cuyo incendio desencadena el fuego en el túnel.
- Los criterios de supervivencia en atmósferas con humos, tóxicos o de radiación para los usuarios de los túneles, es decir, cuáles son las cantidades admisibles y durante cuánto tiempo han de darse para considerar que una persona ha sido afectada.
- El comportamiento de los usuarios, tanto en la formación de la congestión de los vehículos detenidos en el interior del túnel, como cuando los abandonan para huir a pie hacia las salidas de emergencia.

4.1.1.2 Descripción de los escenarios

Escenario 1 (E1):

Corresponde a la hipótesis de incendio de uno o dos vehículos ligeros. Se considera como potencia máxima de fuego representativa de este escenario **8 MW**.

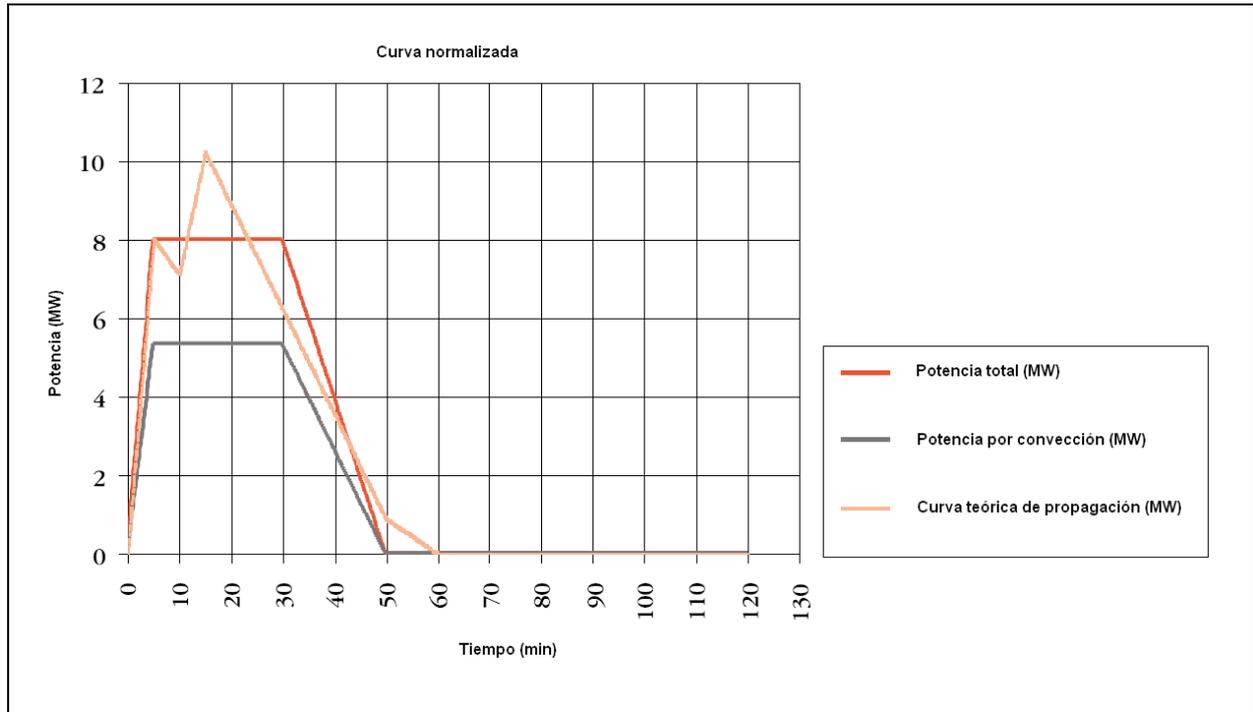


Ilustración 1. Curva normalizada de potencia de incendio para el escenario 1

Abarca los supuestos siguientes:

- Vehículo ligero aislado:
 - Vehículo ligero pequeño: con un potencial calorífico de 6.000 MJ.
 - Vehículo ligero grande: 12.000 MJ.
- Vehículos turismos con propagación: potencia calorífica de 18.000 MJ.
 - Vehículo ligero pequeño con propagación a otros dos vehículos ligeros pequeños.
 - Vehículo ligero grande con propagación a otro pequeño.

Escenario 2 (E2):

Corresponde a la hipótesis de incendio de un vehículo pesado y otro vehículo ligero. Se considera como potencia máxima de fuego representativa de este escenario **30 MW**.

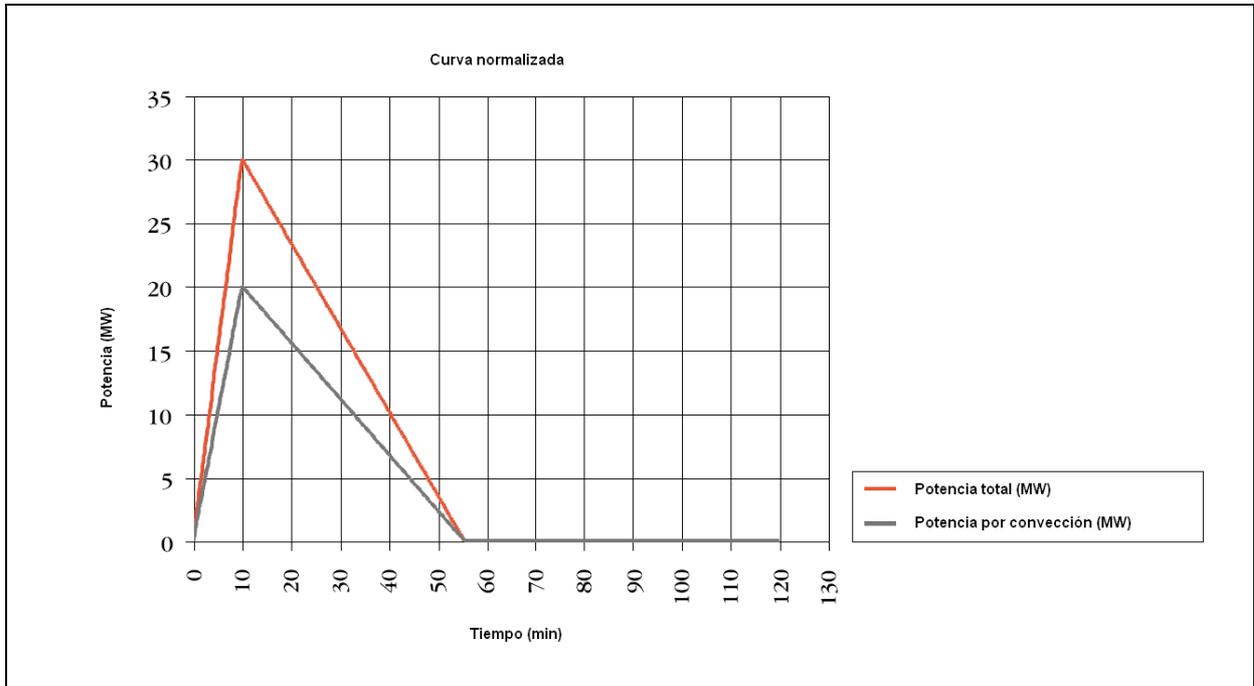


Ilustración 2. Curva normalizada de potencia de incendio para el escenario 2

Englobaría los dos siguientes supuestos:

- Incendio de un vehículo pesado pequeño o de un vehículo pesado sin cargamento: 30 MW en pico. El incendio dura un poco menos de una hora con un pico muy corto de 30 MW. El potencial calorífico es de 50.000 MJ.
- Incendio de un vehículo pesado cargado con frutas, verduras, embalaje o similar, valor estandarizado 30 MW. En este caso el incendio es progresivo., con un potencial calorífico de 125.000 MJ.

Escenario 3 (E3):

Corresponde a la hipótesis de incendio de un vehículo ligero y un autocar. En este caso se considera como potencia máxima de fuego del incendio **15 MW**.

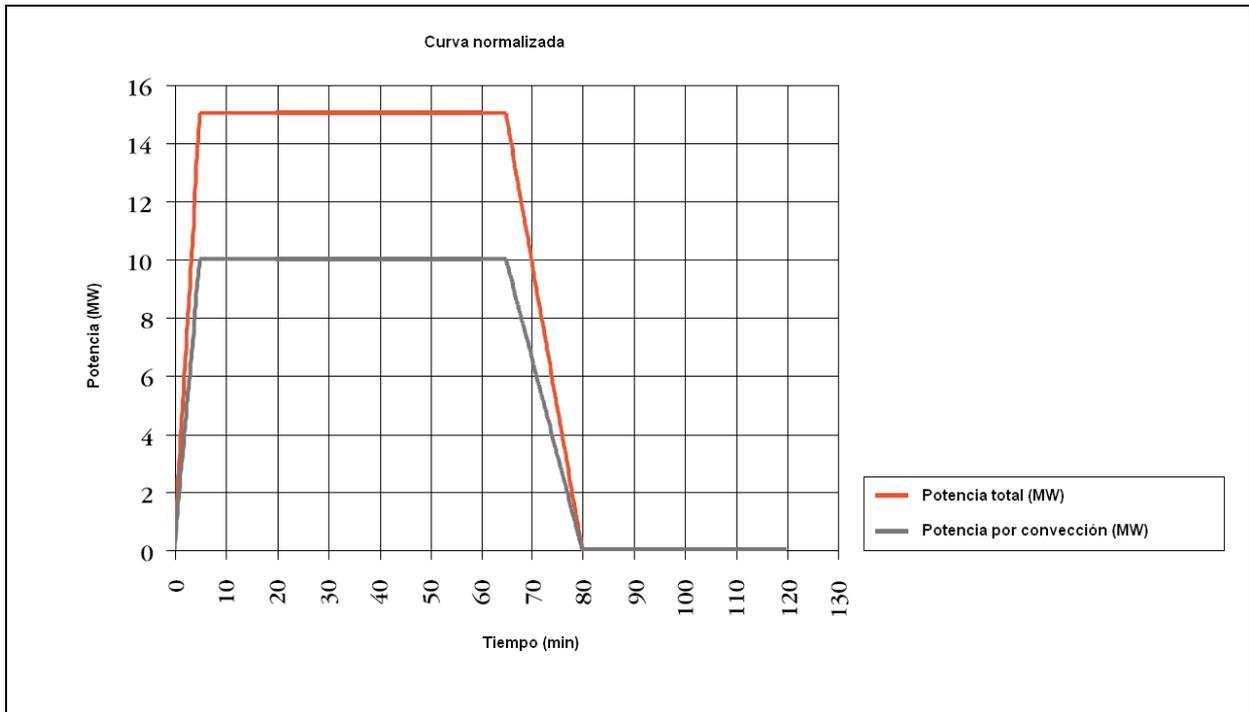


Ilustración 3. Curva normalizada de potencia de incendio para escenario 3

Engloba dos posibles hipótesis:

- Incendio de un vehículo ligero con propagación a un autocar.
- De un vehículo ligero grande que se propaga a un autocar. Por vehículo ligero grande se entiende el caso de furgones cargados con 1.200 kg de carga y una superficie de 6 m².

Escenario 4 (E4):

Corresponde a la hipótesis de incendio de un vehículo pesado y un autocar. Se considera como potencia máxima de fuego representativa de este escenario **30 MW**.

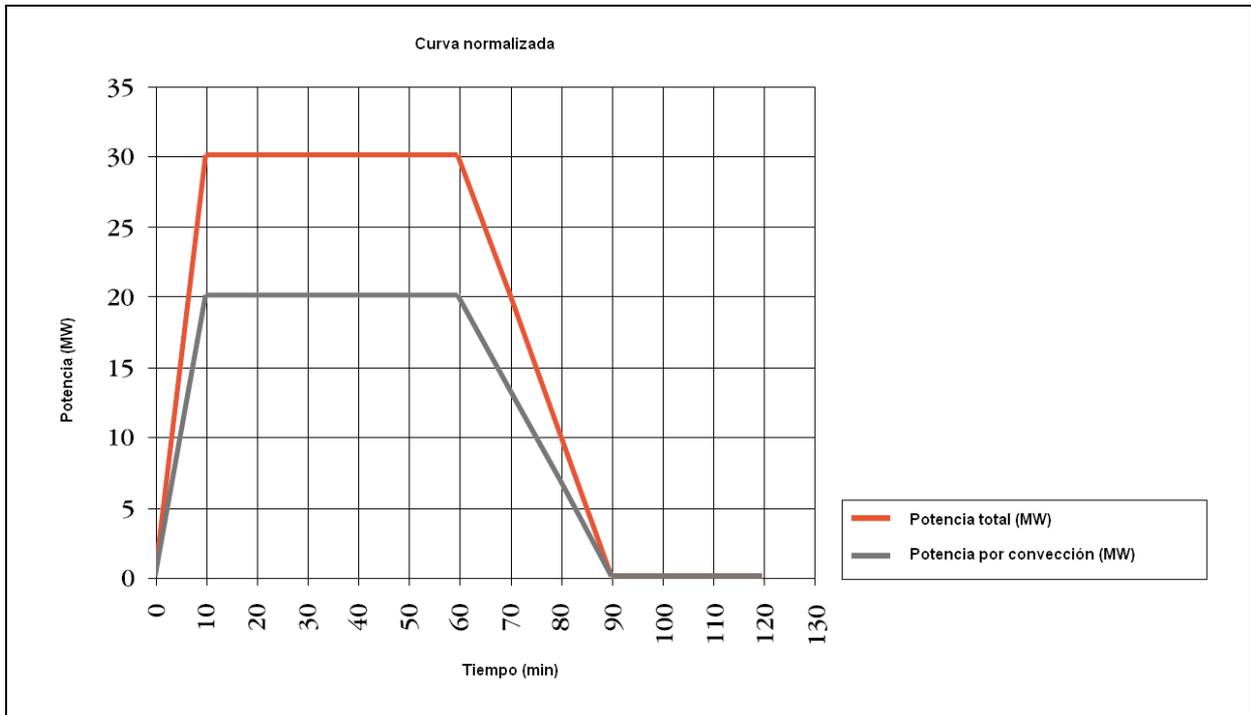


Ilustración 4. Curva normalizada de potencia de incendio para el escenario 4

Este escenario es análogo en potencia de incendio de referencia al escenario 2 si bien se implica en el accidente un autocar con objeto de analizar la repercusión que tiene la presencia de este tipo de vehículos, con una mayor duración de la evacuación de los ocupantes.

Escenario 5 (E5):

Incendio de un vehículo capaz de provocar un incendio de gran magnitud y otro vehículo, con una potencia de incendio de referencia de hasta **100 MW**.

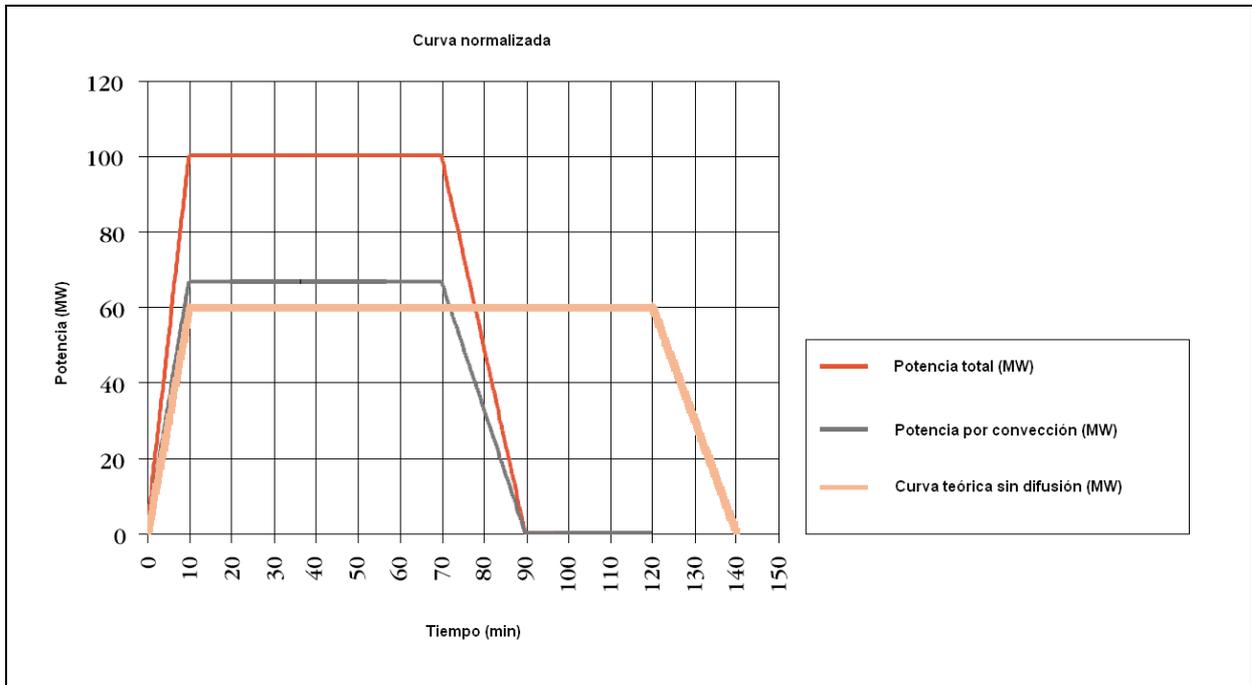


Ilustración 5. Curva normalizada de potencia de incendio para el escenario 5

Se considera representativo este escenario de los posibles accidentes en que se vean involucrados transportes de mercancías especiales capaces de provocar incendios de elevada potencia.

El resto de vehículos en el interior del túnel en el momento que se producen los accidentes con incendio que definen estos cinco escenarios se consideran todos vehículos ligeros (automóviles), de cara a la determinación del número de personas atrapadas en el túnel para cada uno de los escenarios.

4.1.1.3 Posicionamiento del incendio en el túnel

Con objeto de determinar la posición o posiciones representativas de la localización del accidente en el interior del túnel, se establecen a continuación los criterios a tener en cuenta en función de las características que presente el túnel objeto de estudio. Esta posición o posiciones del incendio en el túnel deberán ser siempre estudiadas, pudiendo además analizar otras posiciones cuando el analista lo estime necesario. **Se deberá tener siempre presente que, para cada análisis, el criterio de posicionamiento del incendio debe ser el mismo en el túnel real y en el virtual.**

Se pueden distinguir los siguientes casos:

- **Túneles unidireccionales**

Sin salidas de emergencia ni en el túnel real ni en el virtual

La posición del incendio pésima sería cuando el accidente tuviera lugar en las inmediaciones de la boca de salida y, por ausencia de tiro natural o por condicionantes atmosféricos adversos se produjera el reflujo del humo hacia aguas arriba del incendio. En este caso la cola de vehículos que se forma estaría siendo invadida por el fluir de los humos y aumentarían notablemente las posibilidades de producción de víctimas.

Se considerará que el incendio se localiza en las proximidades de la boca de salida, a una distancia del 80% de la longitud medida desde la boca de entrada, tanto para túnel real como para el túnel virtual.

Sin salida/s de emergencia en el túnel real pero sí en el virtual

Se considerará lo siguiente:

- Túnel real. Se analiza el túnel con su longitud exacta, contando como únicas salidas de emergencia las propias bocas del tubo. El incendio se posicionaría en la proximidad de la boca de salida, a una distancia del 80% de su longitud medida desde la boca de entrada.
- Túnel virtual. Será de la misma longitud que el túnel real, pero en el análisis sólo se estudiará el mayor tramo de túnel comprendido entre salidas consecutivas (considerando como salidas tanto las bocas como las salidas de emergencia). El incendio se posicionaría siguiendo el mismo criterio, a una distancia del 80% de su longitud medida desde la boca de entrada.

Con salida/s de emergencia en el túnel real y en el virtual

El incendio se posicionará coincidiendo con una salida de emergencia, tanto para el caso del túnel real como para el caso del túnel virtual, realizándose el análisis del mayor tramo de túnel entre dos salidas que tengan una tercera entre ellas (en la que se produce el incendio). Así pues el tramo de estudio quedará definido por las salidas inmediatamente anterior y posterior a aquella que ha quedado inhabilitada por el incendio.

- **Túneles bidireccionales**

Sin salidas de emergencia ni en el túnel real ni en el virtual

Se deberán analizar dos posiciones del incendio:

- La definida para los túneles unidireccionales: al 80% de la longitud del túnel medida desde la boca de entrada
- El incendio ubicado en el centro del túnel, considerando en este caso el humo dividido en dos frentes que avanzan uno hacia cada boca del túnel como se establece más adelante en la presente metodología.

Sin salida/s de emergencia en el túnel real pero sí en el virtual

Se deberán analizar las mismas dos posiciones que en el caso anterior, pero teniendo en cuenta que:

- Túnel real. Se analiza el túnel con su longitud total.
- Túnel virtual. Será de la misma longitud que el túnel real, pero en el análisis sólo se estudiará el mayor tramo de túnel comprendido entre salidas consecutivas (considerando como salidas tanto las bocas como las salidas de emergencia).

Con salida/s de emergencia en el túnel real y en el virtual

Se seguirá el mismo criterio que para túneles unidireccionales, tanto para el túnel real como para el virtual. El incendio se posicionará en una salida de emergencia, realizándose el análisis del mayor tramo de túnel entre dos salidas que tengan una tercera entre ellas (en la que se produce el incendio).

4.1.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO DEL TÚNEL

4.1.2.1 Coeficiente de Riesgo del túnel virtual

Se ha definido anteriormente el túnel virtual, como aquel túnel de referencia que con la misma longitud, número de carriles y tipo de circulación (unidireccional o bidireccional) que el túnel real estudiado disponga de todo el equipamiento que para su categoría establece el Real Decreto 635/2006.

Para determinar el **Coeficiente de Riesgo del túnel virtual (CR_{TV})** se realizará un análisis de riesgo en el que se estudien los siguientes escenarios de manera obligatoria:

- E1: Incendio de uno o dos vehículos ligeros con potencia de fuego inferior a 8 MW.
- E2: Incendio de un vehículo pesado y un vehículo ligero con potencia de fuego de hasta 30 MW.

Esta potencia de incendio se establece en 30 MW si bien para su estudio y modelización dentro del presente método se ha considerado que, debido a la naturaleza de los vehículos implicados correspondería con una ley desarrollo del fuego en forma triangular, con la potencia de pico citada (30 MW). Este hecho se ha tenido en cuenta en el establecimiento de las velocidades de los humos y en el establecimiento de los tiempos de desestratificación ya tabulados en el modelo.

- E3: Incendio de un vehículo ligero y un autocar. Potencia de incendio 15 MW.
- E4: Incendio de un vehículo pesado y un autocar. Potencia de incendio 30 MW.

En este caso, al estar implicado en el suceso un autocar y un vehículo pesado, se considera que el incendio alcanzará esta potencia de referencia, si bien la ley de evolución de la potencia que puede asociarse al mismo sería poligonal con la existencia de una meseta correspondiente al mantenimiento de dicha potencia durante un periodo de tiempo representativo.

- E5: Incendio de un vehículo pesado que transporte mercancías capaces de provocar un incendio de gran magnitud y otro vehículo. Potencia de incendio de hasta 100 MW.

La sistemática a seguir para el estudio de cada uno de los escenarios establecidos anteriormente será la siguiente:

1. Determinación de la probabilidad porcentual de ocurrencia de cada uno de los cinco escenarios anteriores

En primer lugar, en función del análisis de las características del tráfico donde se encuentra ubicada la vía y de la composición del mismo, se determinarán las probabilidades unitarias de producirse cada uno de los escenarios anteriores.

La determinación de la probabilidad asociada a cada escenario puede hacerse mediante un estudio estadístico de la composición del tráfico que circula por el túnel y obteniendo la probabilidad de alcance entre vehículos de distinto tipo o, en su defecto, empleando los coeficientes así determinados para la composición media del tráfico en la RCE.

Porcentaje de vehículos pesados	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Escenario	Probabilidades de ocurrencia (en tanto por uno)					
E1	0.85	0.76	0.67	0.58	0.45	0.36
E2	0.11	0.18	0.25	0.31	0.42	0.48
E3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
E4	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04
E5	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	0.10

Tabla 3. Probabilidades porcentuales de ocurrencia de los escenarios de incendio

Las probabilidades de cada escenario así obtenidas deberán mantenerse durante todo el análisis, tanto para el túnel virtual como para el túnel real.

Con objeto de ajustar el peso de cada escenario en función de la cifra exacta del porcentaje de vehículos pesados, se puede proceder a una interpolación lineal entre los valores reflejados en la tabla anterior. En los túneles con un porcentaje de vehículos pesados inferior al 5% se emplearán los valores propuestos para un 5% de pesados, salvo que se dispongan de datos más precisos.

Por otro lado, es bien conocido que un incremento en la intensidad de tráfico de una carretera lleva aparejado un incremento del número de accidentes, siendo la relación entre

ambas variables no lineal. Para tener en cuenta este fenómeno se ha tenido en cuenta la siguiente relación entre ambas variables¹:

$$ACV = b \times IMD^a$$

Siendo:

ACV \equiv Número de accidentes con víctimas

a \equiv constante

b \equiv constante

A partir de los datos de accidentes con víctimas en los túneles de la RCE desde el año 2003, se ha obtenido un valor medio de la constante “a” para carreteras convencionales y otro para carreteras de calzadas separadas:

- Carreteras convencionales: a = 0'7277 & b = 0'0005 $\rightarrow ACV = 0'0005 \times IMD^{0'7277}$
- Autopistas y Autovías: a = 0'9291 & b = 0'00005 $\rightarrow ACV = 0'00005 \times IMD^{0'9291}$

Aceptando como intensidad media diaria por carril (*IMDc*) de referencia 2.000 veh/día y carril, se considerará la influencia de la intensidad de tráfico del túnel multiplicando la probabilidad porcentual de cada escenario (obtenida a partir del % de pesados) por el factor corrector F_{IMD} . En túneles con más de un tubo se considerará cada tubo por separado:

$$F_{IMD} = \frac{ACV_{TUBO}}{ACV_{IMDc=2.000}} = \frac{b \times (N^{\circ} \text{ carriles} \times IMDc)^a}{b \times (N^{\circ} \text{ carriles} \times 2.000)^a} = \left(\frac{IMDc}{2.000} \right)^a$$

Siendo el número de carriles el de toda la carretera y el parámetro “a” el correspondiente al tipo de carretera en el que se encuentra el túnel.

¹ Propuesta por Rune Elvik et al. en “The handbook of road safety measures” basándose en los diversos estudios realizados

2. Determinación del número de personas atrapadas y potenciales víctimas (muertos o heridos) para cada uno de los escenarios analizados

Para cada uno de los cinco escenarios analizados se obtendrá, como índice o valor representativo, el número de personas atrapadas sin posibilidad de acceder a una de las bocas del túnel o a las salidas de emergencia existentes de la forma que se indica en el apartado 4.3.

3. Determinación del factor corrector del coeficiente de riesgo

Para considerar en el análisis elementos de la geometría, el equipamiento y la explotación del túnel, que no se tienen en cuenta en el estudio realizado para cada uno de los escenarios, se introduce este factor corrector producto de una serie de factores de ponderación que tienen en cuenta estos elementos:

$$F_{TV} = F_g \times F_{eq} \times F_{ex}$$

Siendo:

F_g \equiv Factor de ponderación por criterios de diseño geométricos del túnel

F_{eq} \equiv Factor de ponderación por criterios del equipamiento del túnel

F_{ex} \equiv Factor de ponderación por criterios de la explotación del túnel

En el apartado 4.1.2.3 se desarrolla en detalle la determinación de cada uno de estos factores.

4. Obtención del Coeficiente de Riesgo del túnel virtual

La integración de las consecuencias de los diferentes escenarios en un único resultado se realizará con el sumatorio correspondiente al producto del número de personas afectadas por la probabilidad relativa de producirse cada uno de los escenarios anteriores.

Ese valor será el denominado Coeficiente de Riesgo del túnel virtual (CR_{TV}).

$$CR_{TV} = F_{TV} \times \sum (N^\circ \text{ afectados} \times \text{prob. porcentual del escenario } E_i)$$

En el análisis de riesgo se debe considerar que **el túnel virtual está dotado de todo el equipamiento que le corresponda según su clasificación estipulada en el anexo I del Real Decreto 635/2006, sin contemplar ninguna excepcionalidad en el mismo.** No obstante, se matizan a continuación algunos aspectos respecto al equipamiento del túnel virtual a tener en cuenta al realizar el análisis de riesgo:

- Anchura de carriles

El Real Decreto 635/2006 establece en el punto 2.2.1 de su anexo I que se deberán cumplir los criterios y especificaciones recogidos en la Norma de trazado 3.1-IC de la Instrucción de Carreteras.

Se considera pues que la anchura de referencia para los carriles de circulación es, tal como establece la Norma 3.1 I.C. Trazado, de 3'5 metros en todas la carreteras salvo en las C-40 que se fija en 3 metros.

- Anchura de arcén derecho

Según se establece en la Norma 3.1 I.C. Trazado, el diseño de la sección transversal de los túneles prevé la disposición, en las secciones proyectadas, de un arcén derecho de al menos 2'5 metros de anchura.

El arcén definido en el párrafo anterior puede quedar reducido a una anchura de 1'0 metros por una posible ampliación del número de carriles de circulación, o por existir dificultades geotécnicas en el macizo o terreno donde se encuentra emplazado el túnel.

Asimismo se establece que en el caso de los túneles en los que la velocidad esté limitada o controlada mediante señalización variable, con tráfico poco intenso (saturación prevista a más de veinte años), se podrá ajustar la sección transversal disponiendo arcenes de anchura 1'0 metros.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente se tomará dicha dimensión (1'0 metros) como anchura de referencia para el arcén derecho del túnel virtual.

- Pendiente longitudinal

Se establece una pendiente longitudinal de referencia de un 3%, que será la asignada al túnel virtual, con objeto de ponderar la variación en la peligrosidad del túnel en función de la inclinación de su rasante.

Este factor se introduce con el único objetivo de poner de manifiesto la mayor accidentalidad de los túneles con pendientes superiores a la señalada y no para analizar el comportamiento de los humos. **Para la simulación del comportamiento de los humos se deberá considerar la pendiente real del túnel, tanto para el túnel real como para el virtual, aunque sea superior al 3%, con objeto de comparar los túneles en las mismas condiciones.**

- Aceras

El Real Decreto 635/2006 establece que en los túneles nuevos sin carril de emergencia, deben habilitarse aceras, preferentemente elevadas, para que los usuarios del túnel las empleen en caso de avería o accidente. Esto no será de aplicación cuando las características de la construcción del túnel no lo permitan o sólo lo permitan con costes desproporcionados y cuando el túnel sea unidireccional y disponga de vigilancia permanente y sistema de cierre de los carriles.

Por su parte la Norma 3.1 I.C. Trazado establece la anchura necesaria de las aceras en **0'75 metros**, debiendo además respetarse en su diseño la no presencia de obstáculos en las mismas y la existencia de rebajes en los bordillos en las zonas de evacuación, con objeto de facilitar la evacuación de personas de movilidad reducida.

Por tanto, se considera que el túnel virtual dispone de una acera que cumple con estas características.

- Salidas de emergencia

Se considerará que el túnel virtual dispone de las correspondientes salidas de emergencia ubicadas a las interdistancias máximas que para ellas se reflejan en el Real Decreto 635/2006.

Al analizar el túnel se estudiará el tramo entre salidas consecutivas (de emergencia o bocas) cuya longitud sea mayor.

- Ventilación

Se considera que el túnel virtual tendrá ventilación artificial siempre que así lo exija la normativa, debiendo aplicar siempre el mismo modelo de ventilación para estudiar tanto el túnel virtual como el real.

Para estudiar el tipo de ventilación (unidireccional, semitransversal o transversal) a disponer en un túnel se deben llevar a cabo estudios de mayor profundidad que el propuesto por la presente metodología que tengan en cuenta, además de las variables físicas del fenómeno, otros factores relevantes como los económicos.

- Intensidad de tráfico

Respecto a la intensidad del tráfico de referencia en el túnel virtual se tendrán presentes las siguientes consideraciones:

- En el caso de un nuevo túnel, se realizará el análisis de riesgo para un nivel de tráfico de referencia correspondiente al año horizonte de diseño (20 años después de la entrada en servicio).
- Si se tratase de la evaluación de un túnel existente en explotación se tomará como referencia el tráfico real existente o la prognosis del mismo durante el horizonte analizado.
- En caso de que las intensidades de tráfico previstas o existentes supongan un “nivel de servicio de referencia” del túnel superior al nivel C, se adoptará la intensidad de tráfico correspondiente al nivel de servicio C para el cálculo del Coeficiente de Riesgo del túnel virtual.

Se trata así de establecer un valor de referencia correspondiente a unas condiciones de circulación límites a largo plazo, a partir de las cuales se considera que el riesgo en el túnel se eleva considerablemente y puede alcanzar valores no asumibles.

- Tiempo de respuesta de los servicios de emergencia

Se considera un tiempo de respuesta de los servicios de emergencia ante un incidente de en torno a 15 minutos, esto implica que llegarán al túnel unos 15 minutos después de haberse producido el aviso.

En la determinación de Coeficiente de Riesgo del túnel virtual se deberá tener en cuenta el procedimiento para determinar el factor corrector, así como la forma de considerar otros parámetros del equipamiento del túnel.

4.1.2.2 Coeficiente de Riesgo del túnel real

El estudio se realizará de forma análoga a lo establecido para el túnel virtual pero teniendo en cuenta las características del túnel en cuanto a sus parámetros geométricos, equipamiento y equipos de explotación existentes.

El coeficiente así obtenido se denominará **$CR_{TR} \equiv$ Coeficiente de Riesgo del túnel real**:

$$CR_{TR} = F_{TR} \times \sum (N^{\circ} \text{afectados} \times \text{prob. porcentual del escenario } E_i)$$

Es necesario poner de manifiesto que el Coeficiente de Riesgo del túnel real no se corresponde con una cifra exacta que marque un valor absoluto sobre el nivel de riesgo asociado al túnel. Se trata de un índice relativo, variable en función de las hipótesis de cálculo adoptadas para cada escenario analizado, pero que asociado a esas condiciones geométricas, de equipamientos y de explotación consideradas, permite comparar su valor con el obtenido para el mismo túnel dotado de otros equipamientos o condiciones de explotación.

En la determinación de Coeficiente de Riesgo del túnel real considerar lo establecido en el apartado correspondiente respecto a la determinación del coeficiente corrector y respecto a la consideración de otros parámetros del equipamiento del túnel.

4.1.2.3 Factor corrector del coeficiente de riesgo

Se expone a continuación el procedimiento para obtener el **Factor corrector del coeficiente de riesgo** (F_{TV} o F_{TR} según se obtenga para el túnel virtual o para el real) necesario para obtener los coeficientes de riesgo de los túneles virtual y real.

Este factor pretende considerar cómo influyen en la disminución o aumento de la tasa de accidentalidad correspondiente al tramo de túnel objeto del análisis, la modificación de factores de diseño no considerados en su totalidad en el análisis realizado para cada una de los escenarios definidos. Se pretende así evaluar de una forma cuantitativa cómo de seguro es el túnel durante su fase de explotación, en función de su geometría, equipamiento y condiciones de explotación, por medio de unos valores de ponderación representados a través de una serie de factores modificadores del coeficiente de riesgo.

El factor corrector del coeficiente de riesgo para el túnel real, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$F_{TR} = F_g \times F_{eq} \times F_{ex}$$

Siendo:

$F_g \equiv$ Factor de ponderación por criterios de diseño geométricos del túnel

$F_{eq} \equiv$ Factor de ponderación por criterios del equipamiento del túnel

$F_{ex} \equiv$ Factor de ponderación por criterios de la explotación del túnel

A continuación se analizan cada uno de estos factores:

Factor de ponderación por criterios de diseño geométrico del túnel (F_g)

Este factor de ponderación depende a su vez de una serie de factores geométricos del túnel de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_g = F_{g_{CAR}} \times F_{g_{ARC}} \times F_{g_{APA}} \times F_{g_{ACE}} \times F_{g_{PAV}} \times F_{g_{PTE}} \times F_{g_{REV}}$$

Siendo:

$F_g \equiv$ Factor de ponderación por criterios de diseño geométrico del túnel

$F_{g_{CAR}} \equiv$ Factor de anchura de carriles

Fg_{ARC} \equiv Factor de anchura del arcén derecho

Fg_{APA} \equiv Factor de apartaderos

Fg_{ACE} \equiv Factor de aceras

Fg_{PAV} \equiv Factor de tipo de pavimento

Fg_{PTE} \equiv Factor de pendiente longitudinal

Fg_{REV} \equiv Factor de revestimiento rígido

Pasamos a continuación a ver cada uno de estos factores geométricos:

- Factor de anchura de carriles (Fg_{CAR})

En el Real Decreto 635/2006 se establece que se deben cumplir la Norma 3.1-IC de trazado y, además, que la anchura de carriles de circulación en el caso de vehículos lentos no debe ser inferior a 3'5 metros.

Asimismo la Norma 3.1 I.C. Trazado determina, en su apartado 7.4.1 en el que se establecen las secciones transversales tipo correspondientes a los tramos en túnel, que la anchura de cada uno de los carriles de circulación debe ser de 3'5 metros. Tan solo en el caso de las carreteras convencionales del tipo C-40 se podrán disponer carriles de circulación en su trazado de 3'0 metros de ancho, esta dimensión también se mantiene en el interior de los túneles.

En general, la existencia de carriles con anchura inferior a 3'5 metros será un factor negativo pues en raras ocasiones se puede ampliar la anchura de los carriles de circulación sin verse afectados otros elementos de la plataforma. Las elevadas intensidades de circulación existentes en determinadas vías hacen necesario habilitar más carriles de circulación dentro de una determinada plataforma, a costa de reducir o incluso eliminar ciertos elementos como los arcenes y/o aceras existentes. La inclusión de nuevos carriles de circulación puede ocasionar la reducción de las dimensiones. Se ha introducido este factor (Fg_{CAR}) con objeto de evaluar la influencia de este hecho.

Por otra parte, el habilitar nuevos carriles no conlleva únicamente un factor negativo sobre la seguridad sino que influirá muy positivamente en el nivel de servicio de la

vía, del túnel en este caso, lo que se contempla en el método de análisis de riesgo a través de la intensidad de circulación por carril considerada en el estudio.

Según los estudios realizados hasta la fecha, la anchura de carriles influye de manera notable en los índices de accidentalidad cuando se rebasan ciertos límites en su estrechamiento. Cuando la anchura de los carriles se reduce hasta los 3'0 metros, los índices de accidentalidad sufren un incremento muy notable que puede llegar a cifras del orden del 15% ó 20%.

Anchuras superiores a los 3'5 metros no influyen significativamente sobre la tasa de accidentes hasta determinados límites que en general no suelen rebasarse. Los carriles con una anchura sobredimensionada provocan también un efecto negativo sobre la seguridad, aumentando la oscilación de las trayectorias de los vehículos y aportando una falsa sensación de mayor seguridad. Este hecho también debe considerarse de forma negativa.

Se establece la siguiente tabla con objeto de definir la influencia del factor anchura de carril.

Anchura de carril (m)	Factor de ponderación $\equiv Fg_{CAR}$
> 3'60	1'03
3'40 - 3'60	1'00
3'20	1'03
3'00	1'08
< 3'00	1'15

Tabla 4. Factor anchura de carril

Sin perjuicio de los intervalos expuestos se contempla la posibilidad de realizar una interpolación lineal dentro de cada intervalo en función de las dimensiones reales de los carriles de circulación existentes.

En el caso de carreteras convencionales C-40 se aplicarán factores de ponderación por anchura de carril, análogos a los establecidos en la tabla 6, pero en torno al valor de 3'00 metros de ancho que, como se ha comentado anteriormente, es el ancho establecido para los carriles de este tipo de carreteras en la Norma 3.1 I.C. Trazado.

- Factor de anchura del arcén derecho (Fg_{ARC})

Se establece en el Real Decreto 635/2006 que el diseño de la sección tipo del túnel debe adaptarse a las secciones previstas en la Norma 3.1 I.C. Trazado.

A este respecto se establece la necesidad de incluir en los túneles un arcén con anchura suficiente para permitir la detención de un vehículo en caso de avería o situación de emergencia. Dicho arcén constituye además una vía de acceso de los servicios de emergencia y evacuación muy necesaria en caso de accidente. Su existencia es especialmente beneficiosa en el caso de túneles bidireccionales con elevada intensidad de tráfico.

Además de su influencia positiva sobre el mantenimiento del servicio del túnel en caso de producirse incidentes de menor importancia, presenta una función preventiva muy acusada al evitar que situaciones inicialmente con un factor de riesgo bajo desencadenen posteriores accidentes de mayor gravedad.

Tal y como se ha expuesto anteriormente, se toma como valor de referencia (adoptado por tanto por el túnel virtual) la existencia de un arcén de dimensión mínima 1'0 metros al que se le asigna un valor de ponderación unitario.

La ponderación del factor arcén se evalúa con el siguiente criterio:

Anchura del arcén derecho (m)	Factor de arcén derecho $\equiv Fg_{ARC}$
$\geq 2'50^*$	0'90
1'00	1'00
< 1'00	1'05

Tabla 5. Factor anchura del arcén derecho

* o con carril de emergencia continuo y señalizado para su no ocupación que permita apartar un vehículo y la circulación sin interferencia de los servicios de emergencia

Para valores intermedios (arcenes entre 1 y 2'5 metros) se emplearán los valores obtenidos por interpolación lineal entre los valores anteriores

- Factor de existencia de apartaderos en el túnel (Fg_{APA})

La existencia de apartaderos en túneles bidireccionales está asociada en general a la inexistencia de un arcén suficiente para permitir la detención de un vehículo sin interferir al resto del tráfico que circula.

A este respecto el Real Decreto 635/2006 incluye en el punto 2.7.3 del anexo I la siguiente evaluación sobre el efecto de la existencia de apartaderos:

“en túneles existentes..., no será preciso habilitar apartaderos si la anchura total del túnel accesible para vehículos, excluyendo las partes elevadas y los carriles normales de circulación, sea al menos igual a la anchura normal de un carril”.

En función de lo anterior, el efecto de un apartadero se puede considerar asimilable en cierta medida a la existencia de un carril auxiliar, si bien su efecto es puntual frente a la existencia de dicho carril que permite apartarse a los vehículos de forma permanente en todo el tramo.

Teniendo en cuenta lo anterior se establece como factor de ponderación de apartaderos el expresado en la siguiente tabla:

Existencia de apartaderos cumpliendo el R.D. 635/2006 (en los túneles que sea necesario)	Factor de apartaderos $\equiv Fg_{APA}$
SI	1'00
NO	1'05

Tabla 6. Factor existencia de apartaderos

- Factor de existencia de aceras para evacuación (Fg_{ACE})

La obligación de dotar de aceras el interior de un túnel está reflejada en el R.D. 635/2006, que establece en el punto 2.4.1 de su anexo I la necesidad de la existencia de aceras en los túneles nuevos que no dispongan de carril de emergencia, siempre y cuando las características de construcción del túnel lo permitan o su implantación no suponga costes desproporcionados, siendo también de excepción el caso de los túneles unidireccionales que dispongan de vigilancia permanente y sistema de cierre de los carriles.

Por su parte la Norma 3.1 I.C. Trazado, en su punto 7.4.1 recomienda disponer siempre, a ambos lados de la sección de la calzada, aceras elevadas de 0'75 m de ancho.

Las aceras deberán disponer de los necesarios rebajes para acceso a las salidas de emergencia y no tener obstáculos en su recorrido que impidan circular por ellas.

Se considera su influencia de acuerdo con el siguiente criterio:

Anchura de aceras (m)	Factor de aceras $\equiv F_{g_{ACE}}$
$\geq 0'75$ m	1'00
$< 0'75$	1'05
Sin aceras	1'10

Tabla 7. Factor de anchura de aceras

- Factor de tipo de pavimento ($F_{g_{PAV}}$)

Este tipo de pavimento es de aplicación para aquellos túneles cuya longitud supere los 1.000 metros, según establece el R.D. 635/2006.

La principal ventaja del empleo de este tipo de pavimento se pone de manifiesto por su mejor comportamiento ante el fuego.

Se considera su influencia de acuerdo con el siguiente criterio:

Tipo de pavimento	Factor de pavimento $\equiv F_{g_{PAV}}$
De Hormigón	1'00
Bituminoso	1'05

- Factor de pendiente longitudinal del túnel ($F_{g_{PTE}}$)

El incremento de la tasa de accidentalidad en relación con la pendiente longitudinal del túnel está directamente relacionado con la diferencia de velocidades inducidas por la existencia de la propia rampa o pendiente del túnel en las distintas categorías de vehículos.

Se provoca por dicha causa un aumento en la probabilidad de producirse alcances así como accidentes en las maniobras de cambios de carriles para el adelantamiento. El incremento de estas será notable, pues cuando la pendiente es más acusada existe una mayor diferencia de velocidades entre las distintas categorías de vehículos. Asimismo variarán de forma importante las distancias de frenado.

Se evalúa la influencia de la pendiente de la rasante de acuerdo con la siguiente expresión. En aquellos túneles cuya rasante se desarrolle en rampa se puede

estudiar la posibilidad de no considerar este factor o de tenerlo en cuenta en torno al valor del 5% en lugar del 3%.

Pendiente del túnel	Factor de pendiente longitudinal $\equiv Fg_{PTE}$
0%	0'955
< 3%	$0'955 + (0'015 \cdot \text{pendiente} (\%))$
3%	1'00
> 3%	$1'00 + (0'02 \cdot \text{exceso de pendiente sobre el 3\%})$

Tabla 8. Factor pendiente del túnel

Se observa que un túnel con una pendiente de un 3% tendrá un factor igual a la unidad, que es el que le correspondería al túnel virtual.

Para el valor de la pendiente se tomará la pendiente máxima, siempre y cuando esta se produzca en un tramo de longitud igual o mayor que la distancia máxima entre salidas de emergencia. En el caso de no cumplirse lo anterior, se tomará la pendiente media ponderada del túnel definida de la siguiente forma:

$$\overline{p}_{\text{túnel}} = \frac{(\sum p_i \cdot d_i)}{L} \cdot 100$$

Donde:

$\overline{p}_{\text{túnel}}$ \equiv Pendiente media ponderada del túnel (%)

p_i \equiv Pendiente media en el tramo "i" definido por la distancia d_i (%)

d_i \equiv Distancia correspondiente al tramo de túnel "i". La suma de la longitud de todos los tramos en que se ha dividido el túnel será la longitud del mismo (L).

L \equiv Longitud total del túnel

i \equiv Subíndice que indica uno de los tramos en que se ha dividido el túnel, que tiene una longitud d_i y una pendiente media p_i .

En el caso de túneles cortos ($L \leq 200$ m) si la pendiente máxima no se produce en más del 50 % de su longitud, se tomará la pendiente longitudinal media del túnel.

- Factor de existencia de un revestimiento rígido del túnel (Fg_{REV})

El dotar al túnel de este tipo de revestimiento o no influye también como factor de riesgo a la hora de provocar un posible incidente o accidente que pueda

complicarse y ocasionar daños mayores a los que inicialmente supone. La caída sobre el pavimento o sobre los vehículos en circulación de bloques de roca, fragmentos de hormigón proyectado o el desprendimiento de láminas de impermeabilización, puede dar lugar a situaciones de riesgo que deben ser ponderadas. Estos acontecimientos pueden tener lugar durante las condiciones de explotación normales o como consecuencia de un accidente y el posible incendio originado, complicando más la situación existente.

En el Real Decreto 635/2006 se evalúa este punto de la siguiente forma:

“Si el túnel no dispusiese de un revestimiento rígido, deberán instalarse secciones de auscultación permanentes en algunas zonas del túnel para tomar las medidas que en cada caso indique el manual de explotación”.

Se considerará que el túnel virtual dispone de revestimiento, por lo que la no existencia del mismo y la ausencia o no de auscultación se introducirá en el modelo con este factor de ponderación, según el criterio siguiente:

Tipo de revestimiento del túnel	Factor de revestimiento $\equiv Fg_{REV}$
Túnel sin revestimiento rígido y sin instrumentación	1'06
Túnel sin revestimiento rígido y con instrumentación	1'03
Túnel revestido	1'00

Tabla 9. Factor tipo de revestimiento del túnel

Factor de ponderación por criterios de equipamiento del túnel (F_{eq})

En general la ponderación de estos factores estará ya reflejada en la determinación del coeficiente de riesgo básico del túnel real, pues la existencia de mejoras en el equipamiento habrán redundado en una disminución de las posibles víctimas o usuarios afectados para cada uno de los distintos escenarios analizados.

No obstante, existen una serie de equipamientos de seguridad que desempeñan una labor preventiva en la producción de accidentes, cuya ponderación no queda reflejada en el análisis de eventos que se realice una vez desencadenado el accidente en cada uno de los escenarios analizados.

Este es el caso de posibles desprendimientos de elementos correspondientes a la decoración o adecuación funcional del túnel, tales como paneles de revestimiento u otros elementos, así como el caso de producirse la presencia de animales en el interior del túnel, desprendimientos de cargas de vehículos, etc. Estos incidentes sólo pueden ser detectados si

existe una vigilancia permanente de la infraestructura y, la actuación precoz sobre los mismos puede evitar el que se ocasionen accidentes de mayor gravedad.

Este factor de ponderación de equipamiento del túnel dependerá de dos factores, según la siguiente expresión:

$$F_{eq} = F_{eq_{SSEE}} \times F_{eq_{CC}} \times F_{eq_{OTR}}$$

Siendo:

F_{eq} \equiv Factor de ponderación por criterios de equipamiento del túnel

$F_{eq_{SSEE}}$ \equiv Factor de proximidad de los servicios de emergencia

$F_{eq_{CC}}$ \equiv Factor de existencia de centro de control

$F_{eq_{OTR}}$ \equiv Factor que engloba otras mejoras en la dotación sobre la exigida en el R.D. 635/2006

A continuación se analizan estos dos factores de equipamiento:

- Factor de proximidad de los servicios de emergencia

La presencia de los servicios de emergencia (principalmente bomberos y/o equipos de primera intervención) en los primeros minutos tras producirse un accidente y/o incendio en un túnel, puede ser determinante en la reducción de las consecuencias del mismo, al socorrer a posibles usuarios atrapados en el interior del túnel.

El Método General de análisis de riesgo en túneles se basa, tal como se verá en el modelo de comportamiento de los usuarios, en la auto-evacuación² de los usuarios. No obstante, se debe tener en cuenta que los servicios de emergencia, en caso de llegar a tiempo, pueden rescatar a usuarios atrapados reduciendo las víctimas.

De forma simplificada, esto se tiene en cuenta modificando el riesgo del túnel con el siguiente factor en función del tiempo de respuesta de los servicios de emergencia

²Auto-evacuación: se entiende por auto-evacuación o auto-rescate la acción del usuario de ponerse a salvo por sus propios medios, sin que intervengan los servicios de emergencia oportunos, es decir, es la huida del usuario de la zona de la catástrofe (el incendio en este caso) hacia la zona de seguridad en la que se encontrará a salvo.

ante un aviso. Este tiempo es conveniente que sea determinado a partir de tiempos de respuesta a situaciones reales o ante simulacros de emergencia.

El factor se pondera de acuerdo a los valores de la siguiente tabla:

Tiempo de llegada de los servicios de emergencia	Factor de servicios de emergencia \equiv Feq_{SSEE}
< 2 minutos	0'75
2-5 minutos	0'85
5-10 minutos	1'00
10-15 minutos	1'15
> 15 minutos	1'25

Tabla 10. Factor de proximidad de los servicios de emergencia

- Factor de existencia de centro de control permanente y vigilado con posibilidad de control de accesos (Feq_{CC})

El factor de ponderación de este elemento de control se considera con una disminución del coeficiente básico de peligrosidad de la siguiente forma:

Existencia de centro de control permanente y vigilado con control de accesos	Factor de centro de control \equiv Feq_{CC}
SI	0'90
NO	1'00

Tabla 11. Factor de existencia de Centro de Control

- Factor de otras mejoras sobre las dotaciones de seguridad mínimas exigidas en el Real Decreto 635/2006 (Feq_{OTR})

Las mejoras introducidas en el equipamiento y dotaciones de seguridad previsto para el túnel objeto de análisis deben ser evaluadas por el autor del análisis de riesgo del túnel.

Asimismo debe ser evaluada la existencia o no de ciertos equipamientos adicionales que influyen en el proceso de evacuación o rescate y que se detallan a continuación:

- o Conexiones transversales para acceso de los servicios de emergencia
- o Cruce de la mediana fuera de cada boca

- Doble suministro eléctrico (además de lo considerado respecto al mantenimiento de la iluminación en las siguiente páginas)
- Existencia de mediana en el túnel (caso de túneles bidireccionales)
- Red de hidrantes
- Semáforos interiores en caso necesario
- Sistemas de radiocomunicación para servicios de emergencia

La influencia de estas medidas se justificará de acuerdo a la metodología o documentación adicional aportada en el estudio de riesgos y en ningún caso se ponderará con un factor ($F_{eq_{OTR}}$) inferior a 0'9 en su conjunto.

Factor de ponderación por criterios de explotación del túnel (F_{ex})

Dentro de este apartado se incluyen y ponderan aquellas medidas adicionales que incluidas en los protocolos de explotación del túnel pueden reducir los factores de peligrosidad notablemente, paliando ciertas deficiencias de diseño, sobre todo en el caso de túneles en explotación.

Este factor de ponderación de la explotación del túnel es función a su vez de tres factores según la siguiente expresión:

$$F_{ex} = F_{ex_{AVP}} \times F_{ex_{RAD}}$$

Siendo:

$F_{ex} \equiv$ Factor de ponderación por criterios de explotación del túnel

$F_{ex_{AVP}} \equiv$ Factor de permisividad o no de adelantamiento de vehículos pesados en túneles con más de un carril por sentido

$F_{ex_{RAD}} \equiv$ Factor de existencia de sistemas de control de velocidad (radares)

A continuación se analizan estos factores:

- Factor de permisividad o no de adelantamiento de vehículos pesados en túneles con más de un carril por sentido ($F_{ex_{AVP}}$)

El factor de peligrosidad de adelantamiento de vehículos pesados (VP) en túneles unidireccionales con más de un carril por sentido está evaluado en función del porcentaje de vehículos pesados que circulen por el carril derecho dentro del tubo y del nivel de restricción de adelantamiento que se prescriba. Cuanto mayor sea dicho porcentaje y exista una mayor libertad de adelantamiento, el riesgo por colisión dentro del túnel será mayor, independientemente de otros factores que afectarían a la accidentalidad del túnel en cuestión como el porcentaje de pendiente o rampa que pueda haber dentro del mismo (factor que ya se ha tenido en cuenta en puntos anteriores).

Como se observa en los resultados de la tabla, cuando la prohibición de adelantar es total y mayor es el porcentaje de vehículos pesados a los que se les restringe el adelantamiento, menor riesgo hay de accidente, es decir, menor es el factor modificador del Coeficiente de Riesgo básico del túnel real:

Restricción adelantamiento a VP	% VP	Factor de adelantamiento de VP ($F_{ex_{AVP}}$)
Sin restricción	Cualquier %	1'00
Con restricción	5%	0'97
Con restricción	10%	0'93
Con restricción	15%	0'90
Con restricción	20% o más	0'87

Tabla 12. Factor de restricción de adelantamiento a vehículos pesados

Para valores del %VP intermedios en relación con los marcados en el cuadro puede aplicarse una interpolación lineal.

- Factor de existencia de sistemas de control de velocidad (radares), anunciados y con posibilidad de sanción, en los accesos o en el interior del túnel ($F_{ex_{RAD}}$)

Las situaciones en las que las limitaciones de velocidad no van acompañadas de sistemas de control de las mismas, pueden dar lugar a que la imprudencia de ciertos conductores sea mayor, debido a que no hay posibilidad de registrar la infracción. Por el contrario, si se anuncia la existencia de un radar, la temeridad de esos usuarios se reduce, bajando incluso la velocidad media específica del tramo, ya que al haber un registro de la infracción y su correspondiente penalización, se logra una mayor concienciación del conductor.

Por todo esto, puede establecerse un factor de ponderación de la existencia de radar (F_{EXRAD}) que tenga en cuenta la reducción de la peligrosidad por la presencia de estos sistemas. Los valores que se adoptan para el mismo son los siguientes:

Existencia de radar en los accesos o el interior del túnel	Factor de radar (F_{EXRAD})
NO	1'00
SI	0'92

Tabla 13. Factor de existencia de radar

Criterios modificadores adicionales

En este apartado se incluyen aquellos criterios modificadores por equipamiento tanto de infraestructura como de instalaciones, que si bien no tienen asignado un factor de ponderación determinado, si presentan una serie de aspectos a tener en cuenta a la hora de modificar el CRb_{TR} .

- Drenaje de líquidos tóxicos

La disposición de caces con ranuras, u otros dispositivos que permitan el drenaje de líquidos tóxicos e inflamables es obligada para aquellos túneles de longitud superior a 500 metros, si se permite el paso de mercancías peligrosas.

Este es un equipamiento que tiene especial importancia ante el paso de vehículos de transporte de mercancías peligrosas, por lo que se debe tener siempre en cuenta cuando se realice el correspondiente análisis de riesgo para el paso de este tipo de mercancías mediante el Método de Mercancías Peligrosas.

No obstante, al analizar el riesgo del túnel con el Método General, la presencia de elementos de drenaje de líquidos tóxicos en el túnel puede suponer la disminución de los efectos de los incendios de mayor potencia considerados en los escenarios. Se establece por tanto que, para el caso de existir este dispositivo de drenaje, en los escenarios E2, E4 y E5 del modelo se aplicará una reducción del 5% sobre el número de personas afectadas.

- Salidas de emergencia

Su existencia o no y su ubicación respecto a la posición considerada del foco del incendio será determinante para la obtención de unos coeficientes de peligrosidad

homogéneos, tal como se detallan en el epígrafe “Posicionamiento del incendio en el túnel”, dentro del apartado 4.1.1.3.

- Iluminación de seguridad y emergencia

La existencia de iluminación de seguridad y de emergencia facilita la evacuación de los usuarios tras un accidente, especialmente cuando se produce la desestratificación de los humos. Para tener en cuenta esto, se considera en el modelo de comportamiento de los usuarios que la velocidad de auto-evacuación o de escape de los usuarios con el humo desestratificado es de 0'5 m/s hasta que salgan del túnel o sean considerados víctimas (por haber transcurrido el tiempo adicional de evacuación tras la desestratificación). En caso contrario, la velocidad de auto-evacuación será de 0'3 m/s tras la desestratificación del humo, tal como se define en el apartado 4.3.

No obstante, para que esta iluminación funcione adecuadamente durante un incendio se debe garantizar que está alimentada en todo momento para permitir su funcionamiento ininterrumpido, para lo que el túnel debe disponer de SAI y suministro alternativo de electricidad.

- Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI)

La exigencia de disponer SAI está unida, en el modelo, a la instalación obligatoria de la iluminación de seguridad y emergencia así como de un suministro alternativo de electricidad, tal como se ha señalado en el punto anterior. Por este motivo se considera una dotación complementaria de la iluminación que se tiene en cuenta conjuntamente, considerando que se mantiene la velocidad de evacuación según los valores expuestos en el párrafo anterior.

- Suministro alternativo de electricidad

Lo mismo ocurre con el suministro alternativo de electricidad. Este se considera en el modelo conjuntamente con la iluminación y el SAI.

Se entiende aquí este suministro en un sentido amplio, considerando como tal tanto a la doble fuente de suministro de energía como al grupo electrógeno, siempre y

cuando estos permitan el funcionamiento de la iluminación de seguridad y de emergencia y de la ventilación en modo degradado, en todo momento.

- Puestos de emergencia

Estos puestos están dotados en su equipamiento más básico de extintores y postes SOS para la comunicación de incidencias al centro de control (en caso de existir) o a la central de comunicaciones de los organismos competentes según la vía.

La presencia de los extintores proporcionará a los usuarios la posibilidad de actuar sobre fuegos de pequeña potencia en el momento de inicio del incendio. Con objeto de poder evaluar esta mejora en la seguridad, se considerará que cuando un túnel disponga de extintores se reducen las personas afectadas de la forma siguiente:

E1: Incendio de 8 MW. Se considera que la presencia de extintores permitirá sofocar un 10% de los conatos de incendio en su origen. Se reducirá en consecuencia en este porcentaje el número de personas atrapadas en este escenario.

E3: Incendio de 15 MW. Se considera que la presencia de extintores permitirá sofocar un 5% de los conatos de incendio en su origen. Se reducirá en este porcentaje en número de personas atrapadas.

E2, E4 y E5: No influye. Se considera que incendios de potencia elevada no pueden ser sofocados por los usuarios con el empleo de los extintores.

- Megafonía

Los sistemas de megafonía en un túnel, siempre que exista un centro de control equipado con circuito cerrado de televisión (CCTV) y sistema de detección automática de incidentes (DAI), permiten informar a los usuarios de la necesidad de evacuar el túnel ante un determinado incidente.

Esto se considera en el modelo de comportamiento de los usuarios reduciendo un máximo de 5 segundos el tiempo de reacción de todos los usuarios del túnel tras el/los vehículo/s implicado/s en el accidente, para cada uno de los escenarios analizados y siempre que en el túnel además de disponer de megafonía disponga también de centro de control con CCTV y DAI.

Los segundos a reducir el tiempo de reacción de los usuarios (de 0 a 5 segundos) se determinarán justificadamente por el autor del análisis, debiendo considerar que entre un 20 y un 40% (1 a 2 segundos) se asignarán por la existencia de megafonía en las salidas de emergencia y vías de evacuación, y el resto por la existencia de megafonía en el interior del tubo.

- Paneles de señalización variable

Tal como establece el Reglamento General de Circulación: Los paneles de mensaje (o de señalización) variable tienen por objeto regular la circulación adaptándola a las circunstancias cambiantes del tráfico. Se utilizarán para dar información a los conductores, advertirles de posibles peligros y dar recomendaciones o instrucciones de obligado cumplimiento.

Estos paneles tienen una alta efectividad al estar los usuarios de la carretera habituados a ellos. Para tenerlos en consideración en la modelización se va a considerar una reducción del tiempo de reacción de los usuarios tras el/los accidentado/s de hasta 8 segundos para túneles con paneles en su interior y de hasta 4 segundos para túneles con paneles próximos a sus bocas, siempre que el túnel disponga también de centro de control con CCTV y DAI.

- Señalización de salidas y equipamientos de emergencia

La existencia de la cartelería adecuada a la normativa contribuirá a facilitar la evacuación de los usuarios del túnel, al permitirles la localización más rápida de salidas, postes de comunicación y extintores.

Puesto que la auto-evacuación de los usuarios es especialmente complicada tras la desestratificación de los humos del incendio, se considera que el disponer de este equipamiento permite incrementar en 0'1 m/s la velocidad de auto-evacuación en estas circunstancias.

- Equipos para cierre del túnel

Los equipos para cierre del túnel están compuestos principalmente por semáforos y barreras exteriores y para ser completamente operativos deben tener una respuesta rápida tras un incidente que exija el cierre del túnel.

En los casos en que no exista centro de control, se considerará que no son operativos en tiempos cortos para realizar un cierre efectivo del túnel, salvo que se proyecte su operación asociada a determinados niveles de detección.

Si existe un centro de control asociado se considerará que el operador puede efectuar un cierre efectivo del túnel en un tiempo adecuado.

En defecto de los datos más precisos que pueda disponer el autor del análisis, se establecen los siguientes criterios para determinar su efectividad:

- Semáforos + barreras → No operativo (salvo programación)
- Semáforos + barreras + C. Control → Cierre del túnel en 4 minutos
- Semáforos + barreras + C. Control + DAI → Cierre del túnel en 3 minutos

En caso de que se considere que los semáforos se operan de forma automática, asociando su funcionamiento al alcance de determinados valores de los equipos de detección de opacidad o detección de incendio, el autor del análisis de riesgo determinará los tiempos en que considera que se establece el cierre del túnel y en consecuencia el cese de entrada de vehículos en su interior.

- Mensajería de emergencia por canales de radio para usuarios

Este equipamiento de seguridad permite interceptar un número determinado de canales de radios comerciales e introducir en los mismos un mensaje para los usuarios, de forma que los usuarios que estén escuchando estos canales de radio reciban el mensaje.

Se considera que un alto porcentaje de los usuarios que reciban el mensaje seguirán sus indicaciones, pero este mensaje no le llegará a muchos usuarios.

En la modelización se tendrá en cuenta este equipamiento reduciendo el tiempo de reacción de todos los usuarios tras el/los accidentado/s en un máximo de 5 segundos, siempre que exista también un centro de control con CCTV y DAI.

En la siguiente tabla se resumen los aspectos mencionados anteriormente:

EQUIPAMIENTO	CRITERIOS MODIFICADORES ADICIONALES	
	EXISTE	NO EXISTE
<i>Drenaje de líquidos tóxicos</i>	Se establece una reducción del número de personas atrapadas en los escenarios E2, E4 y E5 del 5%, es decir, se multiplicará por un factor reductor de 0'95	No se hace ninguna consideración.
<i>Salidas de emergencia</i>	Ver epígrafe 4.1.1.1.3 "Posicionamiento del incendio en el túnel"	Ver epígrafe 4.1.1.1.3 "Posicionamiento del incendio en el túnel"
<i>Iluminación de seguridad y emergencia</i>	Se mantendrá la velocidad de auto-evacuación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y en 0'5 m/s en zonas con humo desestratificado (siempre que el túnel disponga además de SAI y suministro alternativo de electricidad)	Se mantendrá la velocidad de auto-evacuación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y en 0'3 ó 0,4 m/s (según el caso) en zonas con humo desestratificado (cuando no se disponga de alguno de los 3 equipamientos evaluados).
<i>Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)</i>	Se pondera conjuntamente con la iluminación de seguridad y emergencia y con el suministro alternativo de electricidad	Ídem
<i>Suministro alternativo de electricidad</i>	Se pondera conjuntamente con la iluminación de seguridad y emergencia y con el SAI	Ídem
<i>Puestos de emergencia</i>	Para E1 (Incendio de 8 MW): reducción de un 10% del número de personas atrapadas, es decir, se multiplicará por un factor reductor de valor 0'90 Para E3 (Incendio de 15 MW): reducción de un 5% del número de personas atrapadas, es decir, se multiplicará por un factor reductor de valor 0'95.	No se hace ninguna consideración
<i>Megafonía</i>	Reducción de hasta 5 segundos en el tiempo de reacción de todos los usuarios tras el/los accidentado/s si el túnel tiene además CC con CCTV y DAI	No se hace ninguna consideración
<i>Paneles de señalización variable</i>	Reducción de hasta 8 segundos en el tiempo de reacción de todos los usuarios tras el/los accidentado/s si el túnel tiene además CC con CCTV y DAI	No se hace ninguna consideración
<i>Señalización de salidas y equipamientos de emergencia</i>	Se mantendrá la velocidad de autoevaluación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y se aumentará la velocidad en 0'1 m/s en zonas con humo desestratificado, es decir 0,6 m/s si dispone de SAI y suministro alternativo de electricidad y 0'4 m/s en caso contrario.	Se mantendrá la velocidad de autoevaluación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y en 0'3 ó 0'5 m/s (según los casos) en zonas con humo desestratificado.
<i>Equipos para cierre del túnel</i>	a) Semáforos + barreras: No operativo b) Semáforos + barreras + C.C.: cierre 4 min. c) Semáforos + barreras + C.C. + DAI: 3 min.	No se hace ninguna consideración
<i>Mensajería por radio para usuarios</i>	Reducción de 5 s en el tiempo de reacción de todos los usuarios tras el/los accidentado/s si el túnel tiene además CC con CCTV y DAI	No se hace ninguna consideración

Tabla 14. Criterios modificadores adicionales

4.1.2.4 Índice de riesgo del túnel

Se define como índice de riesgo asociado al túnel analizado (IR) el cociente entre el Coeficiente de Riesgo del túnel real y el Coeficiente de Riesgo del túnel virtual, tal como se refleja en la fórmula siguiente:

$$IR = \frac{CR_{TR}}{CR_{TV}}$$

Un valor próximo o inferior a la unidad será indicativo de que el túnel reúne unas condiciones similares a las del túnel virtual y, por tanto aceptables. Por el contrario, un valor elevado del índice de riesgo (superior a la unidad) determinará un Coeficiente de Riesgo superior para el túnel objeto de estudio que para el túnel virtual, que será consecuencia de unas condiciones del túnel analizado alejadas de las establecidas como seguras en la normativa aplicable.

Los valores de aceptación o rechazo del diseño para las condiciones de explotación del túnel se especifican en apartados posteriores.

4.2 MODELOS DE VENTILACIÓN

Para modelizar el comportamiento de los humos producidos por un incendio en el interior de un túnel se definen en la presente metodología dos modelos de ventilación:

- Modelo tabulado de ventilación
- Modelo unidimensional de ventilación

En los análisis de riesgo encaminados a determinar el tipo de ventilación a disponer en un túnel (unidireccional, semi-transversal o transversal) será conveniente el empleo de modelos de ventilación más complejos que permitan una mejor comparación de los distintos sistemas de ventilación, teniendo en cuenta otros factores relevantes como los económicos, mediambientales, etc.

Además, en cualquier otro tipo de análisis de riesgo y siempre que el autor del análisis lo considere necesario, se podrán complementar los resultados obtenidos empleando estos modelos con los obtenidos utilizando modelos de ventilación más complejos.

Se pasa a continuación a desarrollar estos modelos así como a recordar, pues ya se estableció en el apartado 4. Método General, cuando es aplicable cada uno de ellos.

4.2.1 MODELO TABULADO DE VENTILACIÓN

Este modelo, tal y como se ha establecido en el apartado 4 y clarificado en la tabla 2, **será aplicable a los túneles en los que el R.D. 635/2006 no exija la instalación de un sistema de ventilación forzada en el túnel**, es decir, túneles interurbanos de longitud menor o igual a 500 m y túneles urbanos de longitud menor o igual a 200 m.

Su utilización permite desarrollar de manera simplificada la modelización de los incendios tipo que están asociados a cada uno de los cinco escenarios cuyo estudio debe desarrollarse. No obstante, siempre que lo estime necesario el autor del análisis o que lo solicite la Autoridad Administrativa será necesario comprobar los resultados obtenidos realizando un estudio mediante el modelo unidimensional de ventilación.

4.2.1.1 Producción de humos

Con objeto de evaluar de manera simplificada la producción de humo de cada uno de los escenarios objeto de estudio, pueden adoptarse las cifras propuestas por la PIARC de acuerdo a los distintos tipos de vehículos implicados en el accidente.

Los valores se resumen en la tabla que se inserta a continuación:

Escenario / vehículos implicados	Caudal de humo producido
E1: Incendio de vehículo ligero de hasta 8 MW de potencia	20 -30 m ³ /s
E2: Incendio de un vehículo pesado de 30 MW	60-90 m ³ /s
E3: Incendio de un vehículo ligero y un autocar de 15 MW	50 m ³ /s
E4: Incendio de un vehículo pesado y un autocar de 30 MW	90 m ³ /s
E5: Incendio de un vehículo pesado de hasta 100 MW	100-150 m ³ /s

Tabla 15. Caudal de humo producido

4.2.1.2 Comportamiento de los humos

La modelización del movimiento de los humos es fundamental durante el estudio del escenario de incendio. Para la identificación de las zonas de riesgo en el túnel es necesario determinar cuál va a ser la evolución de la temperatura en el interior del túnel y, sobre todo del movimiento de los humos en su interior en el transcurso de los 15 ó 20 minutos subsiguientes al incendio.

Cabe destacar que los datos numéricos que se presentan en este apartado incluyen en sus valores determinadas características asociadas a los ensayos de los que proceden, entre las que se encuentran las condiciones atmosféricas específicas de cada test realizado. Por ello en el modelo tabulado no se han definido parámetros referidos a condiciones de contorno de tipo atmosférico y/o topográfico.

Desplazamiento del humo

En condiciones ideales de no existencia de corriente longitudinal en el túnel y de pendiente nula de la bóveda o el techo, el humo se distribuirá y avanzará por igual en ambas direcciones desde el foco del incendio. No obstante, lo más habitual es que las condiciones de corriente longitudinal y de pendiente definan una dirección predominante en la que se desplace el humo. Para estudiar el problema será necesario determinar o estimar una velocidad media de avance de la columna de humo.

En los primeros momentos el humo permanecerá y se desplazará por la parte superior de la sección del túnel. Al cabo de cierto tiempo, por efecto del enfriamiento en contacto con la superficie de la bóveda o techo del túnel, el humo acabará descendiendo ocupando todo el espacio de la sección del túnel y reduciendo su velocidad de avance. La longitud recorrida antes de ocupar toda la sección, es decir, antes de producirse la desestratificación, depende de diversos factores entre los que cabe destacar la potencia de fuego.

Para estimar la velocidad inicial de desplazamiento del humo puede estimarse de forma aproximada aplicando las ecuaciones de la dinámica de fluidos.

Con objeto de realizar una estimación que permita obtener dicha velocidad de forma sencilla para la aplicación del presente modelo, puede considerarse que el humo avanza desde el comienzo del incendio hasta el momento en que se inicia su desestratificación a una velocidad determinada mediante la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{Q_h}{S_t}$$

Siendo:

V_h ≡ Velocidad de desplazamiento del humo

Q_h ≡ Caudal de humos producido por cada tipo de incendio y recogido en la tabla anterior

S_t ≡ Sección transversal efectiva ocupada por el humo en su desplazamiento

En el caso de que el humo se desplace en régimen laminar, es decir, estratificado y pegado al techo de la sección del túnel, puede considerarse que la sección efectiva ocupada por dicha masa oscilará entre el 20 y el 50% de la sección transversal del túnel. Los valores anteriores son variables y están relacionados de forma directa con el caudal de humos producido a causa de la propia potencia del incendio considerado. El autor de análisis deberá definir el criterio adoptado y mantenerlo en todos los túneles comparados.

En los escenarios analizados se aplicarán por tanto las velocidades de referencia calculadas de acuerdo con el criterio anterior, justificándose la elección entre los extremos de la horquilla de posibles valores, en función de otros parámetros considerados por el autor del análisis que tengan en cuenta las condiciones reales del túnel, tales como su pendiente o el tiro existente por condiciones naturales.

A modo de referencia se adjuntan la tabla correspondiente a la velocidad de desplazamiento del humo para un túnel de 70 m² de sección, suponiendo que toda la columna de humo fluye en un único sentido por condiciones geométricas y/o de tiro natural del túnel, al ser el caso más desfavorable:

Escenario: vehículos implicados y potencia	Caudal de humo producido (distribución 100%)	Velocidad desplazamiento. del frente Sección: 70 m²
E1: Incendio de un vehículo ligero. 8 MW de potencia	20 -30 m ³ /s	0'76 – 1'71 m/s
E2: Incendio de un vehículo pesado. 30 MW	60-90 m ³ /s	1'79 – 3'06 m/s
E3: Incendio de un vehículo ligero y un autocar. 15 MW	50 m ³ /s	1'90 – 2'86 m/s
E4: Incendio de un vehículo pesado y un autocar. 30 MW	90 m ³ /s	2'68 – 3'06 m/s
E5: Incendio de un vehículo de pesado. 100 MW	100-150 m ³ /s	2'86 – 4'5 m/s

Tabla 16. Factor de velocidad de desplazamiento del frente de humos

En túneles bidireccionales se estudiará también el caso de dos frentes de similares características (distribución 50%-50%), avanzando cada uno en un sentido. En este caso la velocidad de desplazamiento del humo será algo inferior, tal como indica la siguiente tabla:

Escenario: vehículos implicados y potencia	Caudal de humo producido (distribución 50%-50%)	Velocidad desplazamiento. de cada frente Sección: 70 m²
E1: Incendio de un vehículo ligero. 8 MW de potencia	20 -30 m ³ /s	0'48-1'07 m/s
E2: Incendio de un vehículo pesado. 30 MW	60-90 m ³ /s	1'07-1'84 m/s
E3: Incendio de un vehículo ligero y un autocar. 15 MW	50 m ³ /s	1'19-1'79 m/s
E4: Incendio de un vehículo pesado y un autocar. 30 MW	90 m ³ /s	1'61-1'84 m/s
E5: Incendio de un vehículo de pesado. 100 MW	100-150 m ³ /s	1'43-2'14 m/s

Tabla 17. Factor de velocidad de desplazamiento del frente de humos

Para obtener velocidades de desplazamiento del humo para otras secciones, tomando como sección de referencia la de 70 m² basta con considerar que el caudal y el porcentaje de sección ocupada de humo son los mismos en ambos casos.

Por ejemplo, el cálculo de velocidades para una sección de 90 m² sería:

Q_h ≡caudal de humo

V_{h1} ≡velocidad de humo para sección efectiva de túnel S_{t1}

S_{t1} ≡sección efectiva correspondiente a 70 m² = $\alpha \cdot 70$

V_{h2} ≡velocidad de humo para sección efectiva de túnel S_{t2}

S_{t2} ≡sección efectiva correspondiente a 90 m² = $\alpha \cdot 90$

α ≡factor de sección efectiva. Sus valores varían entre 0'20 y 0'50

El caudal de humo se mantiene para cada escenario de incendio con su valor correspondiente.

$$Q_h = V_{h1} \cdot S_{t1}$$

$$Q_h = V_{h2} \cdot S_{t2}$$

$$1 = \frac{V_{h1} \cdot S_{t1}}{V_{h2} \cdot S_{t2}} \rightarrow V_{h2} = \frac{V_{h1} \cdot S_{t1}}{S_{t2}} \rightarrow V_{h2} = V_{h1} \cdot \frac{S_{t1}}{S_{t2}} \rightarrow V_{h2} = V_{h1} \cdot \frac{\alpha \cdot 70}{\alpha \cdot 90}$$

Por tanto, resulta que el valor de la velocidad de humo para una sección de túnel de 90 m² es :

$$V_{h2} = V_{h1} \cdot \frac{70}{90} \rightarrow V_{h2} = V_{h1} \cdot \frac{7}{9}$$

Proceso de desestratificación

Una vez que se produzca la desestratificación de los humos, hecho que acontecerá de modo aproximado según la tabla de tiempos incluida a continuación, debe considerarse que el humo avanza dentro del túnel a una velocidad más reducida, al ocupar el conjunto de la sección disponible. En este momento se aplicarán valores de la velocidad de desplazamiento de la masa de humos del orden del 50% de los valores reflejados en los cuadros anteriores.

Tal y como se ha expuesto, la desestratificación comienza a producirse en el entorno de escasos minutos después del comienzo del incendio. A partir de este momento el humo empieza a ocupar toda la sección del túnel. Desde el momento de inicio de la desestratificación del humo y hasta que la desestratificación es completa, se considera que los usuarios disponen de un tiempo de evacuación limitado en estas condiciones (denominado tiempo adicional), que variará principalmente en función de la potencia del incendio.

Según estudios realizados hasta la fecha en función de la potencia del incendio en túneles de características de diseño dentro de parámetros habituales, se obtienen los siguientes tiempos de referencia desde el comienzo del incendio hasta que el humo comienza a ocupar toda la sección del túnel (tiempo de desestratificación). Asimismo y en función de la potencia de incendio se han determinado los tiempos que transcurren desde el inicio de la desestratificación hasta que ésta es completa (tiempo adicional), que marca el límite hasta el que los usuarios evacúan el túnel en condiciones de ambiente degradadas, limitando por tanto su velocidad de escape. Más allá de este tiempo adicional, los usuarios aún presentes en el túnel se considerarán víctimas.

Escenario: vehículos implicados y potencia	Tiempo de desestratificación (t_{DES})	Tiempo adicional (t_{AD})
E1: Incendio de un vehículo ligero. 8 MW de potencia	300 s	60 s
E2: Incendio de un vehículo pesado. 30 MW	247 s	60 s
E3: Incendio de un vehículo ligero y un autocar. 15 MW	260 s	60 s
E4: Incendio de un vehículo pesado y un autocar. 30 MW	247 s	60 s
E5: Incendio de un vehículo de pesado. 100 MW	77 s	45 s

Tabla 18. Tiempo de inicio de desestratificación del humo y tiempo adicional de evacuación

4.2.2 MODELO UNIDIMENSIONAL DE VENTILACIÓN

En el caso de que el R.D. 635/2006 exija la disposición de un sistema de ventilación forzada y de los correspondientes protocolos de funcionamiento de dicha ventilación en el túnel analizado, la modelización de la ventilación mediante el modelo tabulado de ventilación, que emplea tablas de velocidad de desplazamiento del humo por el túnel y de valoración de tiempos de mantenimiento de su estratificación, no resulta aplicable. Se debe recurrir entonces a emplear un modelo unidimensional de ventilación, que refleje la evolución de la masa de humo y de los parámetros que la definen a lo largo del túnel, en función del tiempo.

Se debe remarcar que el modelo unidimensional de ventilación también es posible aplicarlo a túneles sin ventilación forzada, si el autor del análisis de riesgo lo considera necesario, tal como se indicó en el apartado correspondiente.

En general, los modelos unidimensionales de cálculo permiten delimitar las zonas de riesgo para los usuarios a lo largo del túnel, en función del tiempo transcurrido desde el comienzo del incendio hasta la resolución de la situación de cada escenario.

No obstante, siempre que el autor del análisis de riesgo lo estime conveniente, se podrá complementar el análisis realizado con un modelo unidimensional de ventilación mediante el empleo de modelos de ventilación más complejos, como pueden ser los modelos tridimensionales. Con respecto a estos últimos cabe destacar que requieren importantes conocimientos de mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, radiación y combustión, motivo por el cual será especialmente necesaria una alta experiencia en su manejo para emplear este tipo de modelos.

4.2.2.1 Comportamiento de los humos

Los modelos de una dimensión o unidimensionales resuelven las ecuaciones de la mecánica de fluidos en el supuesto de que los parámetros físicos (velocidad, temperatura, presión, concentración,...) sean constantes en la sección transversal. Estos modelos pueden presentar diferentes niveles de modelización.

La ventaja de los modelos unidimensionales respecto a los tridimensionales proviene de su sencillez de empleo, lo que permite estudiar numerosos escenarios y multiplicar las variantes, estudiándolos con un coste reducido.

Además, siempre proporcionan información valiosa para la comprensión del mecanismo del movimiento de aire y, asimismo son útiles para los túneles ventilados transversalmente. Permiten igualmente una buena evaluación de los efectos de la ventilación y su influencia en el desarrollo del incendio, estando especialmente bien adaptados al estudio de la ventilación longitudinal.

El principal objetivo es delimitar las zonas de riesgo para los usuarios en función de la concentración de contaminantes y la desestratificación del humo a lo largo del túnel.

Con respecto a las zonas de riesgo para los usuarios en el interior del túnel, una vez ocurrido el incendio, éstas dependerán del estado de estratificación de los humos, del grado de opacidad, de la toxicidad, de la temperatura a la que están expuestos los usuarios y de la radiación de calor recibida por los mismos.

El valor fundamental a reflejar por el modelo se corresponderá con la evolución de la opacidad del aire, en función del coeficiente de extinción (k), a lo largo del túnel y en función

del tiempo. Se considera que $k = 0'4 \text{ m}^{-1}$ es un valor crítico de coeficiente de extinción para el humo en un túnel de carretera.

Por otro lado, dentro de los varios parámetros que sirven para definir el modelo unidimensional de ventilación se pueden tomar como referencia los valores siguientes referidos al coeficiente de fricción, al coeficiente de convección (máximo y mínimo), a la emisividad de la pared del túnel y al producto de la sección transversal media de un vehículo por su correspondiente coeficiente de arrastre, a falta de unos datos más específicos:

- Coeficiente de fricción: un valor corriente de este coeficiente es $0'020$
- Coeficiente de convección mínimo y máximo: como valores aproximados se podrán tomar $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ respectivamente.
- Emisividad de la pared: se podrá tomar de forma general el valor de $0'7$
- $\Sigma \cdot C_x$: Σ es la sección transversal media y C_x es el coeficiente medio de arrastre para un tipo de vehículo determinado. Para vehículos ligeros se podrá tomar generalmente un valor de $0'9 \text{ m}^2$ y para vehículos pesados $4'55 \text{ m}^2$

Gráfico obtenido de la evolución del humo

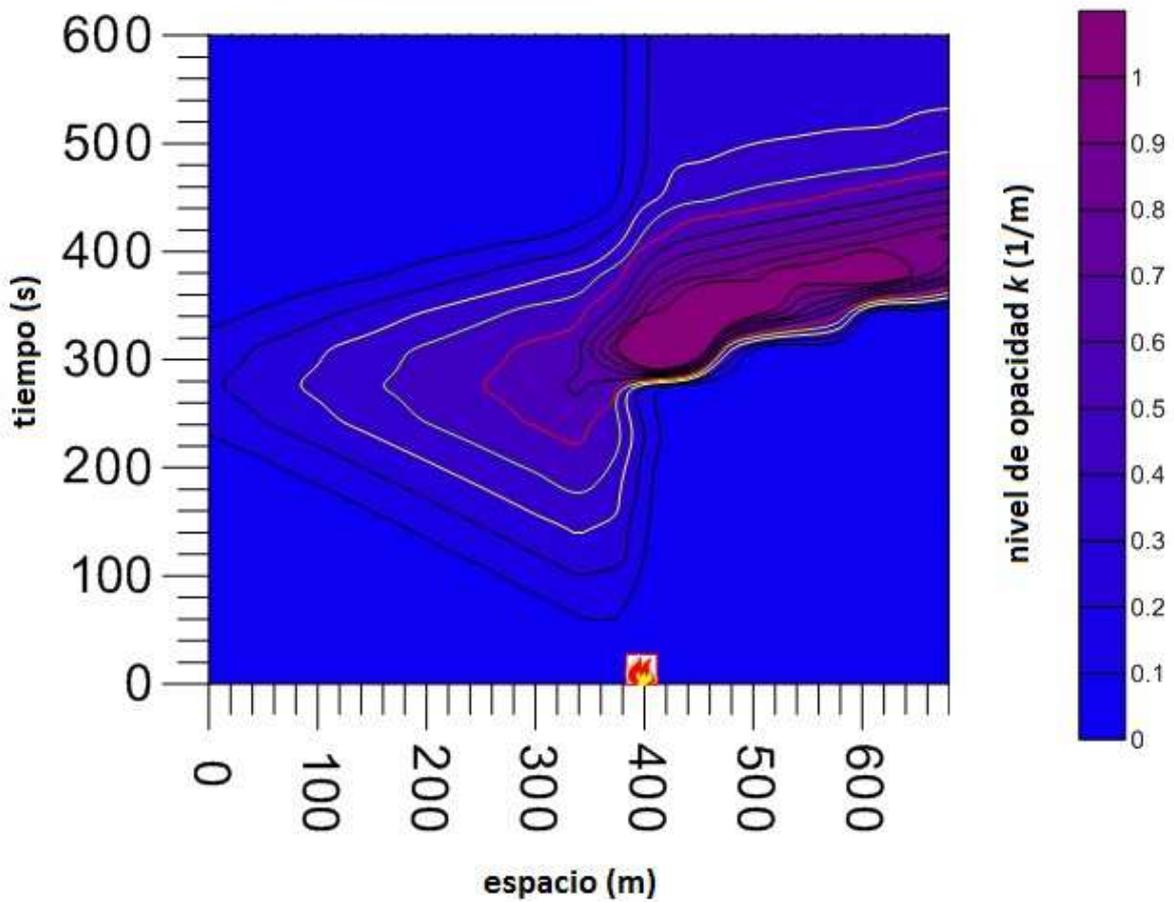


Ilustración 6. Gráfico de la evolución del humo

Línea de opacidad de $k = 0'3 \text{ m}^{-1}$

Línea de opacidad de $k = 0'4 \text{ m}^{-1}$

Línea de opacidad de $k = 0'5 \text{ m}^{-1}$



4.2.2.2 Protocolos de ventilación

Según el tipo de túnel, la utilización de la ventilación para mantener las condiciones de visibilidad y supervivencia se realiza según diferentes estrategias:

- Túneles unidireccionales con ventilación longitudinal y sin congestión: el protocolo a seguir consiste en empujar el humo en el sentido de la circulación. De este modo los usuarios bloqueados por detrás del incendio pueden dirigirse a pie a las salidas de emergencia y, los usuarios situados en la zona desde la que se empujan los humos pueden escapar libremente en sus vehículos antes de que la parte del túnel en la que se encuentran sea invadida por los humos.
- Resto de casos: la estrategia es en principio, limitar la velocidad del flujo de aire de modo que se mantenga la estratificación de los humos. De este modo se permite a los usuarios bloqueados por el incendio escapar por las salidas de emergencia, bajo una capa de humos situados en la bóveda.

4.3 MODELO DE COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS

Bien es sabido que la modelización de la conducta humana ante situaciones extremas, como es un incendio en el interior de un túnel, es un aspecto muy complejo de evaluar. En la actualidad, existen aplicaciones informáticas muy sofisticadas capaces de predecir la pauta que seguirán las personas ante un suceso como el mencionado anteriormente que tienen en cuenta multitud de variables.

En la presente Metodología, en un intento de simplificar la labor del cálculo del Índice de Riesgo por parte del analista, se propone un modelo matemático más simplificado. No obstante, **el autor del análisis de riesgo, siempre que lo estime conveniente, podrá emplear modelos más complejos que el mostrado, como complemento al análisis realizado siguiendo la presente metodología.**

Una vez determinados los usuarios afectados por el accidente y definida su trayectoria de auto-evacuación, el conteo de los usuarios que quedan atrapados, siendo considerados víctimas del escenario estudiado, se realizará siguiendo un procedimiento distinto según se haya usado el modelo tabulado o el unidimensional de ventilación en el análisis, tal y como se establece posteriormente.

4.3.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE USUARIOS AFECTADOS

Para la determinación del promedio de personas que se ven afectadas por el accidente que se produce en el túnel, se propone la utilización de la formulación³ establecida en el presente apartado.

El número de personas afectadas será la suma de las que se encuentran en el túnel en el momento de producirse el accidente más las que acceden al mismo una vez se ha producido este, por desconocer lo ocurrido.

Para determinar el número de vehículos afectados será necesario en primer lugar obtener el número de vehículos presentes en el túnel, para lo que se contemplan dos fases:

³ Las fórmulas propuestas en este apartado han sido definidas por el CETU en el fascículo 4 "Les études spécifiques des dangers (ESD)" (Los estudios específicos de riesgo) de la publicación "Guides des dossiers de sécurité des tunnels routiers" (Guías de los archivos de seguridad de los túneles de carretera)

1. Régimen de circulación libre

Cuando el régimen circulatorio es en tráfico fluido, permanente y homogéneo, la distancia entre vehículos es:

$$d = \frac{V}{I}$$

Donde:

d \equiv Distancia media entre los parachoques delanteros de dos vehículos consecutivos en movimiento (m).

V \equiv Velocidad de circulación (m/s).

I \equiv Intensidad de circulación por carril (veh/s).

Si se denomina L a la longitud del túnel, entonces el número de vehículos presentes en el túnel (N) será:

$$N = \frac{L}{d}$$

Y sustituyendo la distancia (d) por el cociente entre velocidad (V) y la intensidad de circulación (I):

$$N = \frac{L \times I}{V}$$

Donde:

N \equiv Número de vehículos presentes en túnel por carril (veh/carril).

L \equiv Longitud del túnel (m).

I \equiv Intensidad por carril de la circulación (veh/s/carril).

V \equiv Velocidad de circulación (m/s).

2. Congestión

Cuando se produce un incendio, se supone que la circulación de los vehículos se detiene completamente desde el instante $t=0$, en el punto donde se ha producido el

incendio, formándose una cola de vehículos parados. La velocidad con la que crece hacia aguas arriba del incendio la cola de los vehículos parados a partir de este punto, denominada velocidad de crecimiento de la cola de vehículos (V_C), responde a la siguiente expresión:

$$V_C = \frac{I}{\frac{1}{d_0} - \frac{I}{V}}$$

Donde:

$V_C \equiv$ Velocidad de crecimiento o remonte de la cola de vehículos parados (m/s).

$d_0 \equiv$ Interdistancia entre vehículos detenidos (m). Se adoptará, a falta de datos más precisos, la longitud del vehículo promedio (8 metros) más dos metros.

$I \equiv$ Intensidad por carril de la circulación (veh/s/carril).

$V \equiv$ Velocidad de circulación (m/s).

La congestión irá remontando hasta la entrada del túnel en un tiempo (t), que se comparará con el tiempo necesario para cerrar el túnel de acuerdo con los criterios definidos posteriormente.

$$t = \frac{L^*}{V_C}$$

Donde:

$t \equiv$ Tiempo de remonte de la cola de vehículos hasta la boca de entrada (s).

$L^* \equiv$ Longitud de cola de vehículos parados que se ha formado desde el foco del incendio hacia la entrada del túnel hasta el momento en que dejan de entrar vehículos en el túnel (m).

Tasa de ocupación de los vehículos

A partir de la formulación anterior, una vez determinado el número de vehículos atrapados en el túnel por carril (N), para obtener el número de personas en el túnel se deberá tener en cuenta la tasa de ocupación de cada tipo de vehículo y la proporción de vehículos de este tipo en la composición del tráfico que circula por el túnel. El reparto de los vehículos

afectados entre ligeros y pesados se podrá realizar teniendo en cuenta el reparto en el tráfico que circula por la carretera o, ante falta de datos o un porcentaje de pesados no muy elevado, considerando todos los vehículos atrapados como ligeros, salvo los que provocan el accidente en cada escenario. Como regla general y a falta de datos más precisos del túnel analizado, no se consideran más autobuses atrapados en el túnel que el definido en el escenario 3.

Para calcular el número de personas presentes en el túnel por carril se adoptarán las siguientes tasas de ocupación:

TIPO DE VEHÍCULO	TASA DE OCUPACIÓN (personas/vehículo)
Vehículo ligero	1'5
Vehículo pesado	1
Autocar/autobús	30

Tabla 19. Tasa de ocupación de vehículos

Criterio de cierre del acceso de vehículos al interior del túnel

Por lo general aunque se haya producido un accidente en el interior del túnel, los usuarios seguirán entrando en él ante la ausencia de señales ópticas de prohibición (existencia de semáforos en rojo) o de impedimentos físicos a su desplazamiento (existencia de barreras).

De acuerdo con lo anterior, con objeto de establecer un modelo de comportamiento del conjunto de los usuarios de la vía se establece que los vehículos siguen entrando en el túnel hasta que sucede uno de los siguientes hechos:

- El túnel está saturado de vehículos y la cola rebase la boca de entrada, siendo por lo tanto imposible franquearla,
- El humo del incendio producido en su interior comience a salir por la boca de entrada,
- O existan semáforos o barreras que limiten el paso al interior del túnel

4.3.2 PROCESO DE EVACUACIÓN DE LOS USUARIOS

Para la modelización del desplazamiento de los usuarios que abandonan sus vehículos y se dirigen a pie a las salidas de emergencia se recomienda utilizar las siguientes suposiciones:

- Tiempo de reacción de los usuarios implicados en el accidente en empezar a evacuar el túnel: 90 segundos para ligeros y pesados, excepto autobuses que serán 300 segundos hasta salir el último ocupante.
- Tiempo de reacción de los restantes usuarios afectados desde que llegan a la cola de vehículos o ven a un usuario de otro vehículo evacuando: 15 segundos.
- Velocidad de auto-evacuación del usuario:
 - Con visibilidad clara (humo estratificado): $V_{e1} = 1'0$ m/s.
 - Con visibilidad reducida (humo desestratificado): $V_{e2} = 0'3$ a $0'6$ m/s (según el equipamiento disponible, tal como se ha establecido en el apartado 4.1.1.2).

En el modelo de comportamiento de los usuarios se considera en primer lugar que, como se ha comentado, los usuarios de los vehículos implicados en el accidente tardan 90 segundos en reaccionar y empezar a evacuar el túnel. A continuación, los siguientes vehículos entran en el túnel se detendrán cuando lleguen a la cola de vehículos detenidos o cuando se crucen con un usuario del vehículo precedente evacuando el túnel, lo que ocurra primero. Cada vehículo se detendrá a distancia del precedente (usuario o vehículo) del doble de largo medio de un vehículo, es decir dejando un espacio equivalente a un vehículo entre ambos. Finalmente, los usuarios del vehículo tardarán un máximo de 15 segundos en iniciar la evacuación del túnel.

Los túneles que dispongan de un sistema de ventilación forzada, se entiende que éste permite mantener la estratificación del humo durante la evacuación de los usuarios o bien puede empujar el humo en el sentido en que no hay usuarios afectados (en túneles unidireccionales). Por ello, con carácter general y siempre que se pueda garantizar el adecuado funcionamiento de la ventilación forzada, se considerará en estos casos que se mantiene la velocidad de auto-evacuación de los usuarios en el valor correspondiente a humo estratificado.

En túneles unidireccionales, será más peligroso cuando tengan pendiente descendente en sentido del tráfico y/o condiciones atmosféricas que favorezcan el flujo del humo en sentido contrario al de circulación. Puesto que, en este caso, el humo avanzará hacia donde los vehículos están retenidos y los usuarios evacuarán el túnel hacia la boca de entrada, al igual que el humo.

Este será el caso más habitual a estudiar en túneles unidireccionales con más de un tubo, puesto que el tubo a estudiar será el que presente estas características (pendiente descendente y corriente longitudinal ascendente por tiro natural). En túneles bidireccionales, al haber vehículos parados a ambos lados del incendio, será peligroso tanto si el humo avanza en un sentido como si avanza en el contrario, debiendo analizar además el caso de dividirse el humo en dos frentes avanzando cada uno en un sentido.

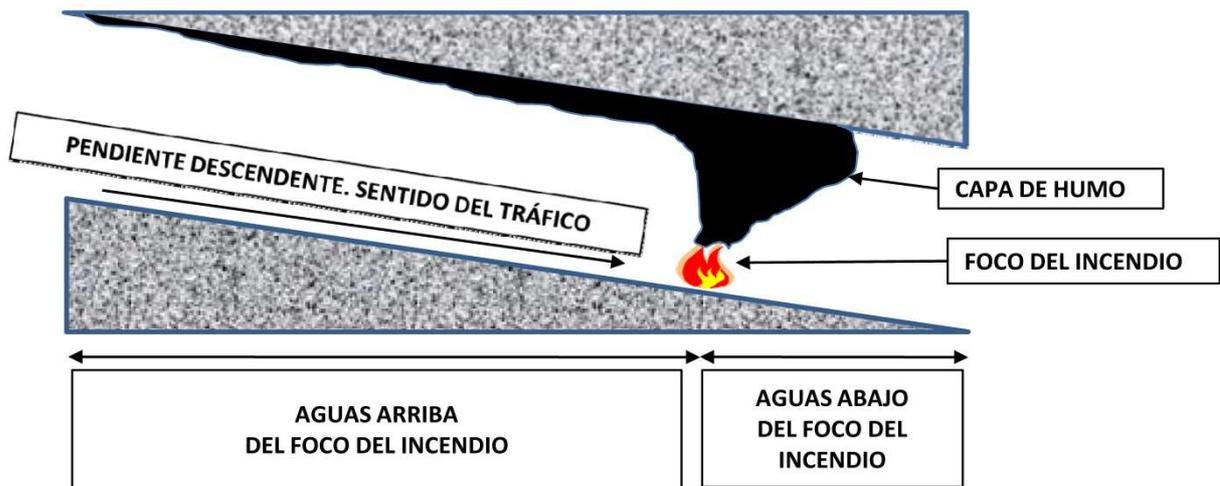


Ilustración 7. Representación esquemática del foco del incendio.

Trayectorias de evacuación de los usuarios

La representación de las trayectorias de evacuación de los usuarios se realiza en un plano espacio-tiempo. Cada trayectoria de evacuación se representa por un máximo de tres tramos rectos, definidos por tanto por cuatro puntos de coordenadas espacio-tiempo. Los tres tramos rectos se corresponden con:

- Tramo 1: Punto 1 a 2. Tiempo de reacción del usuario
- Tramo 2: Punto 2 a 3. Evacuación del túnel con humo estratificado
- Tramo 3: Punto 3 a 4. Evacuación del túnel con humo desestratificado
 - Usuarios de los vehículos implicados en el accidente ($n=0$)

Punto	Tiempo (s)	Espacio (m)
1	$T_0^1 = 0$	$S_0^1 = L_i$

2	$T_0^2 = t_{0r}$	$S_0^2 = L_i$
3	$T_0^3 = \text{Mínimo} \left(t_d; T_0^2 + \frac{S_0^2}{V_{e1}} \right)$	$S_0^3 = S_0^2 - V_{e1} \times (T_0^3 - T_0^2)$
4	$T_0^4 = T_0^3 + \frac{S_0^3}{V_{e2}}$	$S_0^4 = 0$

Tabla 20. Ecuaciones de la trayectoria de auto-evacuación de usuarios implicados en el accidente

Siendo:

$T_n^i \equiv$ Tiempo del punto i del usuario n (s)

$S_n^i \equiv$ Espacio del punto i del usuario n (m)

Con: $i \equiv$ Número de punto de la trayectoria de evacuación ($1 \leq i \leq 4$)

$n \equiv$ número de vehículo ($n=0 \rightarrow$ vehículos implicados en el accidente)

$L_i \equiv$ Distancia desde la salida (de emergencia o boca) tomada por los usuarios hasta el foco del incendio (m)

$t_{0r} \equiv$ Tiempo de reacción del usuario 0 (s). Es el tiempo que transcurre desde que el usuario tiene conocimiento de que se ha producido el accidente hasta que el usuario comienza la auto-evacuación del túnel.

$t_d \equiv$ Tiempo de inicio de la desestratificación del humo (s)

$V_{e1} \equiv$ Velocidad de auto-evacuación de los usuarios con visibilidad clara, es decir, humo estratificado (m/s)

$V_{e2} \equiv$ Velocidad de auto-evacuación de los usuarios con visibilidad reducida, es decir, humo desestratificado (m/s)

- Usuarios de los vehículos no implicados en el accidente ($n \geq 1$)

Se analizan a continuación las ecuaciones punto a punto:

Punto 1

Los vehículos que van llegando al túnel para una intensidad I_s (en vehículos/segundo) tienen un retraso en tiempo, igual a n/I_s .

Si restamos además el tiempo empleado en recorrer la longitud de n vehículos a la velocidad de circulación por la carretera (V en m/s), y llamamos D_{max} a la densidad máxima (en vehículos/metro) que a su vez es la inversa del doble de la longitud media de un vehículo, se obtiene:

$$T_n^1 = \frac{n}{I_s} - \frac{n}{D_{max} \times V}$$

Por otro lado, si se divide la longitud total de la cola de vehículos (n/D_{max}) entre este tiempo se obtiene la velocidad de formación de cola (V_c):

$$V_c = \frac{\frac{n}{D_{max}}}{\frac{n}{I_s} - \frac{n}{D_{max} \times V}} = \frac{I_s}{D_{max} - \frac{I_s}{V}}$$

Para la determinación de la coordenada espacio del vehículo n -ésimo, se debe tener en cuenta que el vehículo se detendrá a $1/D_{max}$ del vehículo precedente, si llega a la cola de vehículos, o a esa misma distancia del primer usuario que vea evacuando el túnel. Surgen así tres posibles ecuaciones para definir las coordenadas del punto 1 según la relación del tiempo de llegada del vehículo n -ésimo (T_n^1) con el tiempo de inicio de la auto-evacuación de usuario $(n-1)$ -ésimo (T_{n-1}^2) y con el tiempo de inicio de la desestratificación del humo (t_d):

Si $T_n^1 \leq T_{n-1}^2 \rightarrow$ El vehículo llega a la cola antes de que los usuarios del vehículo precedente comiencen la auto-evacuación:

$$S_n^1 = S_{n-1}^1 - \frac{1}{D_{max}}$$

Si $T_{n-1}^2 < T_n^1 \leq t_d \rightarrow$ El vehículo no llega a la cola, pues antes se encuentra con los usuarios del vehículo precedente evacuando con el humo aún estratificado:

$$S_n^1 = S_{n-1}^1 - V_{e1} \times (T_n^1 - T_{n-1}^2) - \frac{1}{D_{max}}$$

Si $T_n^1 > t_d \rightarrow$ El vehículo no llega a la cola, pues antes se encuentra con los usuarios del vehículo precedente evacuando con el humo desestratificado:

$$S_n^1 = S_{n-1}^1 - V_{e1} \times \text{máximo}[0; (t_d - T_{n-1}^2)] - V_{e2} \times (T_n^1 - t_d) - \frac{1}{D_{\max}}$$

La condición de máximo asegura que este sumando se anule en caso de que $t_d < T_{n-1}^2$.

Punto 2

El tramo entre los puntos 1 y 2 es el tiempo que los usuarios tardan en salir de vehículo y comenzar la auto-evacuación del túnel, por lo que el punto 2 tiene coordenada espacio igual que el punto 1 y un retraso en el tiempo respecto al anterior igual al tiempo de reacción (t_r) hasta iniciar la evacuación del túnel:

$$S_n^2 = S_n^1$$

$$T_n^2 = T_n^1 + t_r$$

Punto 3

Este punto marca el corte de la trayectoria de los usuarios con el tiempo en que se produce la desestratificación de los humos, por lo que caben dos posibilidades:

Si $T_n^1 < t_d \rightarrow$ Se inicia la auto-evacuación hasta de desestratificarse el humo:

$$S_n^3 = S_n^2 - V_{e1} \times (t_d - T_n^2)$$

$$T_n^3 = t_d$$

En caso contrario:

$$S_n^3 = S_n^2$$

$$T_n^3 = T_n^2$$

Punto 4

Este punto define el corte de la trayectoria de auto-evacuación con la salida del túnel tomada por los usuarios. En este caso, túnel unidireccional sin salidas de emergencia, se ha considerado que los usuarios salen por la boca de entrada, por lo que la coordenada espacio es nula:

$$S_n^4 = 0$$

$$T_n^4 = T_n^3 + \frac{S_n^3}{V_{e2}}$$

A partir de esta formulación definida se obtendría el gráfico con las trayectorias de auto-evacuación que, en el caso particular de un túnel unidireccional de 500 m de longitud, quedaría de la siguiente forma:

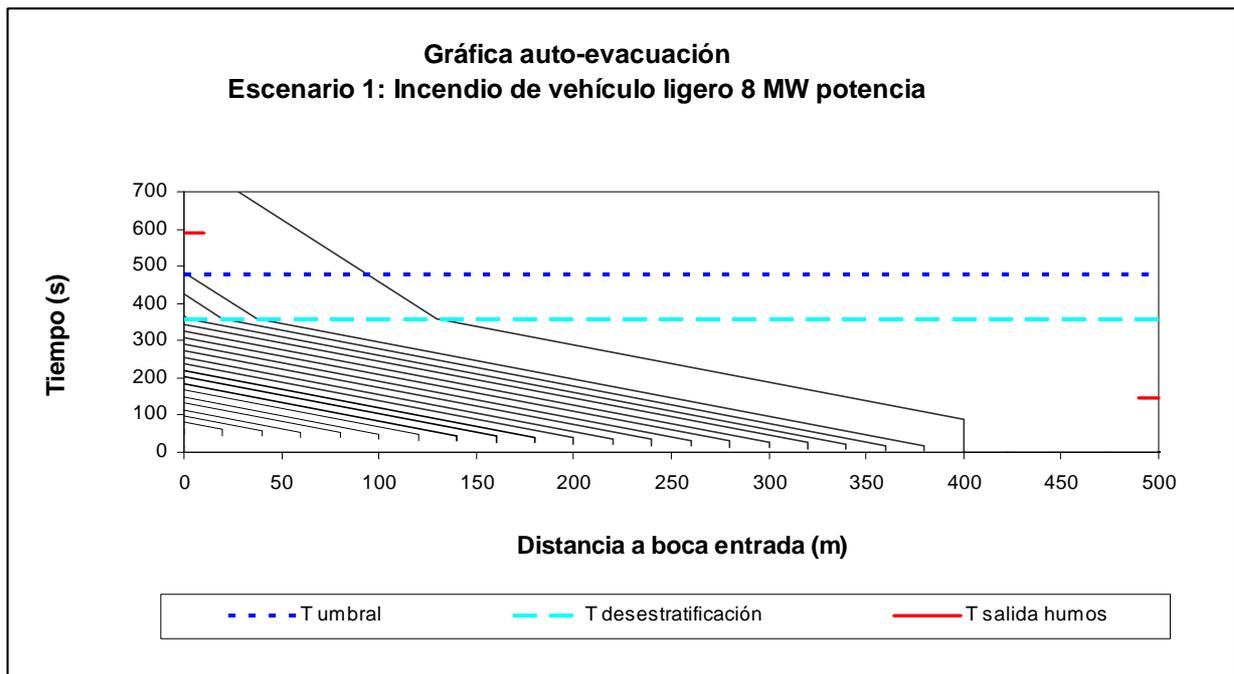


Ilustración 8. Gráfico de auto-evacuación de un túnel unidireccional

En el caso de un túnel bidireccional quedarían usuarios atrapados a ambos lados del foco del incendio, evacuando unos hacia aguas arriba del incendio y otros hacia aguas abajo del mismo, como se muestra en el siguiente gráfico.

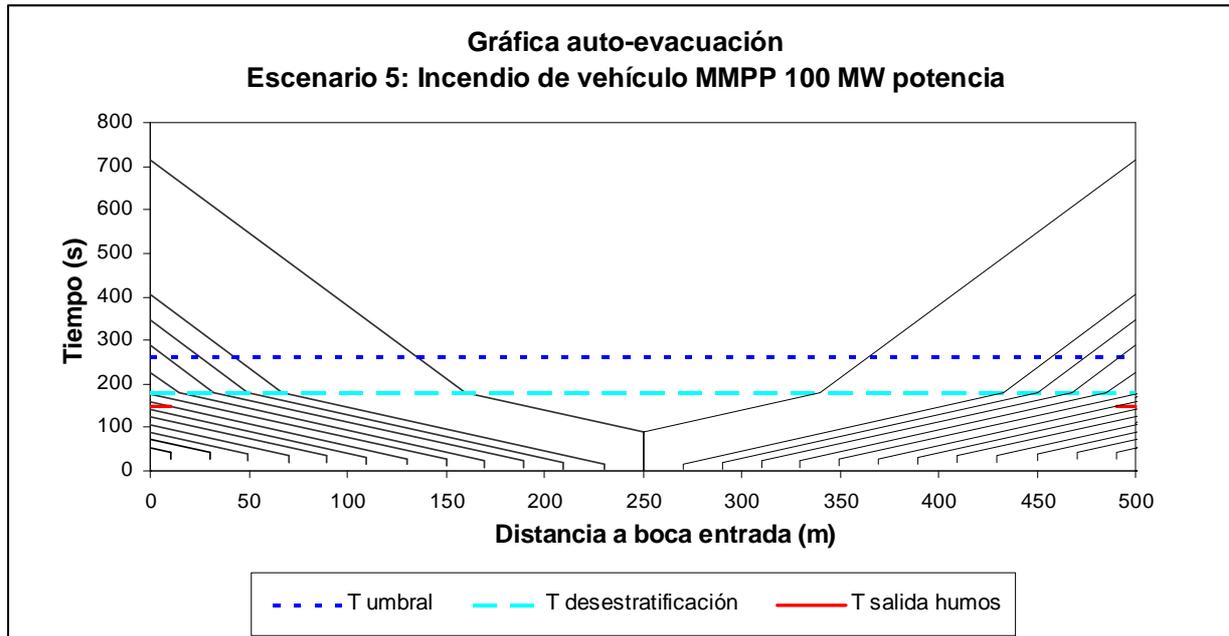


Ilustración 9. Gráfico de auto-evacuación de un túnel bidireccional

En ambos gráficos, cada una de las trayectorias de auto-evacuación representa a la primera persona que evacua un vehículo.

4.3.3 RECUENTO DE USUARIOS ATRAPADOS EN EL TÚNEL

En este punto se expone el modo en que se contabilizan las personas que se verán atrapadas en el interior del túnel, que son aquellas que no pueden efectuar la auto-evacuación de forma satisfactoria siendo por tanto víctimas mortales del accidente.

Se parte, como se ha mencionado anteriormente, de la determinación de los vehículos que quedarán atrapados en el túnel debido a las consecuencias del incendio producido en su interior, pasando a contabilizar las personas potencialmente víctimas del incendio teniendo en cuenta las tasas de ocupación de vehículos. No obstante, el autor del análisis de riesgo puede modificar los valores de las tasas de ocupación de vehículos propuestos, basándose en el análisis de las tasas de ocupación realmente constatadas en los vehículos que circulen por la carretera objeto de estudio.

4.3.3.1 Cuando se emplea el modelo tabulado de ventilación

En este caso se considera que una persona queda atrapada en el túnel, siendo por tanto víctima del incendio correspondiente, cuando su trayectoria de huida rebasa el tiempo adicional de evacuación, tras haberse iniciado la desestratificación de los humos, que aparece en las gráficas anteriores como tiempo umbral.

El recuento de personas se hará teniendo en cuenta los datos de composición del tráfico y de ocupación de vehículos considerados anteriormente, mediante la siguiente expresión:

$$P = veh_{total} \times \left(1 - \frac{\%VP}{100}\right) \times Tasa_{VL} + veh_{total} \times \frac{\%VP}{100} \times Tasa_{VP}$$

Siendo:

$P \equiv$ Número de personas atrapadas por carril en el túnel.

$veh_{TOTAL} \equiv$ Número total de vehículos atrapados por carril en el túnel.

$\%VP \equiv$ Porcentaje de vehículos pesados.

$Tasa_{VL} \equiv$ Tasa de ocupación de vehículos ligeros.

$Tasa_{VP} \equiv$ Tasa de ocupación de vehículos pesados.

Al número de víctimas determinado con esta fórmula, habrá que añadir en su caso la víctimas de los vehículos implicados en el accidente según el escenario considerado.

4.3.3.2 Cuando se emplea el modelo unidimensional de ventilación

El criterio que determina el número de usuarios que no pueden completar su evacuación en condiciones de seguridad, al emplear el modelo unidimensional de ventilación, se basa fundamentalmente en el establecimiento de un nivel de opacidad o coeficiente de extinción (k) crítico para el humo de un incendio en un túnel, que una vez alcanzado da lugar a que el usuario se vea atrapado por falta de visibilidad.

Se considera que, todo usuario que en su huida se encuentre en un ambiente con un nivel de opacidad de humo dado por un coeficiente de extinción $k > 0'4 \text{ m}^{-1}$, no podrá continuar

la evacuación y quedará atrapado en el túnel. Esto es debido a que, para un valor de $k = 0'4 \text{ m}^{-1}$ se obtienen unas distancias de visibilidad entre 5 y 15 m, valor que se considera crítico para poder orientarse en el interior de un túnel cuyas distancias entre hastiales son de este orden.

Este valor se basa en la siguiente argumentación (Fujimura):

La opacidad de los humos en un túnel de carreteras puede establecerse a través de la siguiente expresión:

$$k = 83.000 \times \frac{C_{CO_2}}{T_g}$$

Donde:

$k \equiv$ Coeficiente de extinción o nivel de opacidad (m^{-1}).

$T_g \equiv$ Temperatura de la mezcla gaseosa en un punto del túnel (K).

$C_{CO_2} \equiv$ Fracción volumétrica de CO_2 en el mismo punto (m^3 de CO_2 / m^3 de mezcla gaseosa).

Por otra parte, la distancia de visibilidad (D) puede estimarse usando el coeficiente de extinción de la mezcla aire-humo como:

$$D = \frac{C}{k} \text{ (se considera el caso de humos no irritantes)}$$

Donde C es una constante dependiente de qué tipo de objeto es el que hay que ver, que toma por valores 2 si se trata de un objeto reflectante ó 6 para un letrero luminoso.

Por tanto, al gráfico de evolución de los humos, obtenido con el modelo unidimensional de ventilación, habrá que añadir las trayectorias de auto-evacuación, determinadas con el modelo de comportamiento de los usuarios, y sumar el número de trayectoria que interceptan la isolínea $k = 0'4$ para cada uno de los escenarios.

Una vez determinado el número de líneas interceptadas, puesto que cada una representa a todos los usuarios de un vehículo, habrá que obtener el número de víctimas empleando la misma expresión del apartado anterior y sumando, en su caso, las víctimas de los vehículos implicados en el accidente.

4.4 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Una vez aplicado el Método General de análisis de riesgo descrito en los apartados anteriores se obtendrá el **Índice de Riesgo** del túnel analizado que se deberá comprobar con los criterios de aceptación que se definen a continuación.

Se fijan como criterios para calificar el túnel como seguro los siguientes:

- **Túneles seguros:** serán aquellos que presenten un valor del índice de riesgo muy próximo a la unidad. Se considerarán aceptables todos los túneles que presenten un **valor del índice de riesgo inferior a 1'15**.
- **Túneles con posibles restricciones:** serán aquellos que presenten un valor del **índice de riesgo comprendido entre 1'15 y 1'50**.

Este caso se corresponde con túneles en los que el riesgo es compatible con mantenerlos en servicio durante un cierto periodo de tiempo, a determinar individualmente por la Autoridad Administrativa. Será necesario estudiar las medidas complementarias aplicables para incrementar la seguridad en el túnel o en sus inmediaciones, que se pueden aplicar a medio plazo. En cada caso, será la Autoridad Administrativa la que deba aprobar las medidas a adoptar.

- **Túneles con peligrosidad elevada:** serán aquellos que presenten un valor del **índice de riesgo superior a 1'50** y no se considerarán seguros.

Estos túneles requerirán la adopción de medidas complementarias para aumentar su seguridad y poder mantenerse o ponerse en servicio, según su caso. En cada caso, será la Autoridad Administrativa la que deba aprobar las medidas a adoptar.

Una vez realizado el análisis de riesgo mediante el Método General, deberá estudiarse si dicho estudio debe ser complementado con un análisis de riesgo específico para considerar la circulación por el túnel de vehículos de mercancías peligrosas, para lo cual se empleará el Método de Mercancías Peligrosas propuesto en el apartado 5 de la presente Metodología.

4.5 CUADROS DE PARÁMETROS, FACTORES Y ECUACIONES

4.5.1 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO

- Coeficiente de Riesgo del túnel virtual (CR_{TV})

$$CR_{TV} = F_{TV} \times \sum(N^{\circ} \text{afectados} \times \text{prob. porcentual del escenario } E_i)$$

- Coeficiente de Riesgo del túnel real (CR_{TR})

$$CR_{TR} = F_{TR} \times \sum(N^{\circ} \text{afectados} \times \text{prob. porcentual del escenario } E_i)$$

Siendo:

$$F_{TV} = F_g \times F_{eq} \times F_{ex}$$
$$F_{TR} = F_g \times F_{eq} \times F_{ex}$$

Donde:

- $F_g \equiv$ Factor de ponderación por criterios de diseño geométricos del túnel

$$F_g = F_{g_{CAR}} \times F_{g_{ARC}} \times F_{g_{APA}} \times F_{g_{ACE}} \times F_{g_{PAV}} \times F_{g_{PTE}} \times F_{g_{REV}}$$

Siendo:

$F_{g_{CAR}} \equiv$ Factor de anchura de carriles

$F_{g_{ARC}} \equiv$ Factor de anchura del arcén derecho

$F_{g_{APA}} \equiv$ Factor de apartaderos

$F_{g_{ACE}} \equiv$ Factor de aceras

$F_{g_{PAV}} \equiv$ Factor de tipo de pavimento

$F_{g_{PTE}} \equiv$ Factor de pendiente longitudinal

$F_{g_{REV}} \equiv$ Factor de revestimiento rígido

- $Feq \equiv$ Factor de ponderación por criterios del equipamiento del túnel

$$Feq = Feq_{SSEE} \times Feq_{CC} \times Feq_{OTR}$$

Siendo:

$Feq_{SSEE} \equiv$ Factor de proximidad de los servicios de emergencia

$Feq_{CC} \equiv$ Factor de existencia de centro de control

$Feq_{OTR} \equiv$ Factor que engloba otras mejoras en la dotación sobre la exigida en el R.D. 635/2006

- $Fex \equiv$ Factor de ponderación por criterios de la explotación del túnel

$$Fex = Fex_{AVP} \times Fex_{RAD}$$

Siendo:

$Fex_{AVP} \equiv$ Factor de permisividad o no de adelantamiento de vehículos pesados en túneles con más de un carril por sentido

$Fex_{RAD} \equiv$ Factor de existencia de sistemas de control de velocidad (radares)

- Índice de Riesgo del túnel (IR)

$$IR = \frac{CR_{TR}}{CR_{TV}}$$

4.5.2 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE RIESGO

- Probabilidades porcentuales de ocurrencia

Porcentaje de vehículos pesados	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Escenario	Probabilidades de ocurrencia (en tanto por uno)					
E1:	0.85	0.76	0.67	0.58	0.45	0.36
E2:	0.11	0.18	0.25	0.31	0.42	0.48
E3:	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
E4:	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04
E5:	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	0.1

Tabla 21. Valores de referencia de las probabilidades porcentuales de ocurrencia

Factor corrector de la probabilidad porcentual de ocurrencia por la intensidad de tráfico que circula por la carretera:

$$F_{IMD} = \left(\frac{IMD_c}{2.000} \right)^a$$

Siendo:

- Carreteras convencionales: $a = 0'7277$
- Autopistas y Autovías: $a = 0'9291$

- Factores de ponderación

FACTORES DE PONDERACIÓN GEOMÉTRICOS	
Anchura de carril (m)	Factor de ponderación $\equiv F_{g_{CAR}}$
> 3'60	1'03
3'40 - 3'60	1'00
3'20	1'03
3'00	1'08
< 3'00	1'15
Anchura del arcén derecho (m)	Factor de arcén derecho $\equiv F_{g_{ARC}}$
$\geq 2'50^*$	0'90
1'00	1'00
< 1'00	1'05

Existencia de apartaderos cumpliendo R.D. 635/2006 (en los túneles que sea necesario)		Factor de apartaderos $\equiv Fg_{APA}$
SI		1'00
NO		1'05
Anchura de aceras (m)		Factor de aceras $\equiv Fg_{ACE}$
$\geq 0'75$ m		1'00
$< 0'75$		1'05
Sin aceras		1'10
Tipo de pavimento		Factor de pavimento $\equiv Fg_{PAV}$
De hormigón		1'00
Bituminoso		1'05
Pendiente del túnel	Factor de pendiente longitudinal $\equiv Fg_{PTE}$	
0%	0'955	
$< 3\%$	$0'955 + (0'015 \cdot \text{pendiente } (\%))$	
3%	1'00	
$> 3\%$	$1'00 + (0'02 \cdot \text{exceso de pendiente sobre el } 3\%)$	
Tipo de revestimiento del túnel		Factor de revestimiento $\equiv Fg_{REV}$
Túnel sin revestimiento rígido y sin instrumentar		1'06
Túnel sin revestimiento rígido e instrumentado		1'03
Túnel revestido		1'00

Tabla 22. Factores de ponderación geométricos

FACTORES DE PONDERACIÓN POR EQUIPAMIENTO	
Tiempo de llegada de los servicios de emergencia tras un incidente	Factor de servicios de emergencia $\equiv Feq_{SSEE}$
< 2 minutos	0'75
2-5 minutos	0'85
5-10 minutos	1'00
10-15 minutos	1'15
> 15 minutos	1'25
Existencia de C.C. permanente y vigilado con control de accesos	Factor de centro de control $\equiv Feq_{CC}$
SI	0'90
NO	1'00
Otras mejoras sobre las dotaciones de seguridad mínimas exigidas por el R.D. 635/2006	Factor otras mejoras $\equiv Feq_{OTR}$
SI	$\geq 0'90$
NO	1'00

Tabla 23. Factores de ponderación por equipamiento

FACTORES DE PONDERACIÓN POR EXPLOTACIÓN DEL TÚNEL		
Restricción adelantamiento a V.P.	% V.P.	Factor de adelantamiento de V.P. (Fex _{AVP})
Sin restricción	Cualquier %	1'00
Con restricción	5%	0'97
Con restricción	10%	0'93
Con restricción	15%	0'90
Con restricción	20% o más	0'87
Existencia de radar en los accesos o el interior del túnel		Factor de radar (Fex _{RAD})
NO		1'00
SI		0'92

Tabla 24. Factores de ponderación por explotación del túnel

- Criterios modificadores adicionales del Coeficiente de Riesgo

EQUIPAMIENTO	CRITERIOS MODIFICADORES ADICIONALES	
	EXISTE	NO EXISTE
<i>Drenaje de líquidos tóxicos</i>	Se establece una reducción del número de personas atrapadas en los escenarios E2, E4 y E5 del 5%, es decir, se multiplicará por un factor reductor de 0'95	No se hace ninguna consideración.
<i>Salidas de emergencia</i>	Ver epígrafe 4.1.1.1.3 "Posicionamiento del incendio en el túnel"	Ver epígrafe 4.1.1.1.3 "Posicionamiento del incendio en el túnel"
<i>Iluminación de seguridad y emergencia</i>	Se mantendrá la velocidad de auto-evacuación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y en 0'5 m/s en zonas con humo desestratificado (siempre que el túnel disponga además de SAI y suministro alternativo de electricidad)	Se mantendrá la velocidad de auto-evacuación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y en 0'3 ó 0,4 m/s (según el caso) en zonas con humo desestratificado (cuando no se disponga de alguno de los 3 equipamientos evaluados).
<i>Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)</i>	Se pondera conjuntamente con la iluminación de seguridad y emergencia y con el suministro alternativo de electricidad	Ídem
<i>Suministro alternativo de electricidad</i>	Se pondera conjuntamente con la iluminación de seguridad y emergencia y con el SAI	Ídem
<i>Puestos de emergencia</i>	Para E1 (Incendio de 8 MW): reducción de un 10% del número de personas atrapadas, es decir, se multiplicará por un factor reductor de valor 0'90 Para E3 (Incendio de 15 MW): reducción de un 5% del número de personas atrapadas, es decir, se multiplicará por un factor reductor de valor 0'95.	No se hace ninguna consideración
<i>Megafonía</i>	Reducción de hasta 5 segundos en el tiempo de reacción de todos los usuarios tras el/los accidentado/s si el túnel tiene además CC con CCTV y DAI	No se hace ninguna consideración
<i>Paneles de señalización variable</i>	Reducción de hasta 8 segundos en el tiempo de reacción de todos los usuarios tras el/los accidentado/s si el túnel tiene además CC con CCTV y DAI	No se hace ninguna consideración

<i>Señalización de salidas y equipamientos de emergencia</i>	Se mantendrá la velocidad de autoevaluación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y se aumentará la velocidad en 0'1 m/s en zonas con humo desestratificado, es decir 0,6 m/s si dispone de SAI y suministro alternativo de electricidad y 0'4 m/s en caso contrario.	Se mantendrá la velocidad de autoevaluación en 1 m/s en zonas sin humo desestratificado y en 0'3 ó 0'5 m/s (según los casos) en zonas con humo desestratificado.
<i>Equipos para cierre del túnel</i>	a) Semáforos + barreras: No operativo b) Semáforos + barreras + CC: cierre 4 min. c) Semáforos + barreras + CC + DAI: 3 min.	No se hace ninguna consideración
<i>Mensajería por radio para usuarios</i>	Reducción de 5 s en el tiempo de reacción de todos los usuarios tras el/los accidentado/s si el túnel tiene además CC con CCTV y DAI	No se hace ninguna consideración

Tabla 25. Resumen de criterios modificadores adicionales

4.5.3 PARÁMETROS PARA LA MODELIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL HUMO

PARÁMETROS	ESCENARIOS DE INCENDIO				
	E1: Potencia de incendio 8MW	E2: Potencia de incendio 30MW	E3: Potencia de incendio 15MW	E4: Potencia de incendio 30MW	E5: Potencia de incendio 100MW
Distribución del caudal: 50%. Sección tipo: 70 m²					
Caudal de humo producido (m³/s)	20-30	60-90	50	90	100-150
Velocidad desplazamiento de cada frente (m/s)	0'48-1'07	1'07-1'84	1'19-1'79	1'61-1'84	1'43-2'14
Distribución del caudal: 100%. Sección tipo: 70 m²					
Caudal de humo producido (m³/s)	20-30	60-90	50	90	100-150
Velocidad desplazamiento de cada frente (m/s)	0'76-1'71	1'79-3'06	1'90-2'86	2'68-3'06	2'86-4'5
Tiempo de desestratificación de humos					
Tiempo de inicio desestratificación (s)	300	247	260	247	77
Tiempo adicional (s)	60	60	60	60	45
Tiempo hasta desestratificación completa (s)	360	307	320	307	122

Tabla 26. Parámetros para la modelización del movimiento del humo

4.5.4 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS TRAYECTORIAS DE AUTO-EVACUACIÓN DE LOS USUARIOS

- Usuarios de los vehículos implicados en el accidente ($n=0$)

Punto	Tiempo (s)	Espacio (m)
1	$T_0^1 = 0$	$S_0^1 = L_i$
2	$T_0^2 = t_{0r}$	$S_0^2 = L_i$
3	$T_0^3 = \text{Mínimo} \left(t_d; T_0^2 + \frac{S_0^2}{V_{e1}} \right)$	$S_0^3 = S_0^2 - V_{e1} \times (T_0^3 - T_0^2)$
4	$T_0^4 = T_0^3 + \frac{S_0^3}{V_{e2}}$	$S_0^4 = 0$

Tabla 27. Ecuaciones de la trayectoria de auto-evacuación de usuarios implicados en el accidente

Siendo:

$T_n^i \equiv$ Tiempo del punto i del usuario n (s)

$S_n^i \equiv$ Espacio del punto i del usuario n (m)

Con: $i \equiv$ Número de punto de la trayectoria de evacuación ($1 \leq i \leq 4$)

$n \equiv$ número de vehículo ($n=0 \rightarrow$ vehículos implicados en el accidente)

$L_i \equiv$ Distancia desde la salida (de emergencia o boca) tomada por los usuarios hasta el foco del incendio (m)

$t_{0r} \equiv$ Tiempo de reacción del usuario 0 (s). Es el tiempo que transcurre desde que el usuario tiene conocimiento de que se ha producido el accidente hasta que el usuario comienza la auto-evacuación del túnel.

$t_d \equiv$ Tiempo de inicio de la desestratificación del humo (s)

$V_{e1} \equiv$ Velocidad de auto-evacuación de los usuarios con visibilidad clara, es decir, humo estratificado (m/s)

$V_{e2} \equiv$ Velocidad de auto-evacuación de los usuarios con visibilidad reducida, es decir, humo desestratificado (m/s)

- Usuarios de los vehículos no implicados en el accidente ($n \geq 1$)

Punto 1

$$T_n^1 = \frac{n}{I_s} - \frac{n}{D_{\max} \times V}$$

$$\text{Si } T_n^1 \leq T_{n-1}^2 \rightarrow S_n^1 = S_{n-1}^1 - \frac{1}{D_{\max}}$$

$$\text{Si } T_{n-1}^2 < T_n^1 \leq t_d \rightarrow S_n^1 = S_{n-1}^1 - V_{e1} \times (T_n^1 - T_{n-1}^2) - \frac{1}{D_{\max}}$$

$$\text{Si } T_n^1 > t_d \rightarrow S_n^1 = S_{n-1}^1 - V_{e1} \times \text{máximo}[0; (t_d - T_{n-1}^2)] - V_{e2} \times (T_n^1 - t_d) - \frac{1}{D_{\max}}$$

Punto 2

$$S_n^2 = S_n^1$$

$$T_n^2 = T_n^1 + t_r$$

Punto 3

$$\text{Si } T_n^2 \leq T_{n-1}^2 < t_d \rightarrow S_n^3 = S_n^2 - V_{e1} \times (t_d - T_n^2) \ \& \ T_n^3 = t_d$$

$$\text{Si } T_n^2 \leq T_{n-1}^2 > t_d \rightarrow S_n^3 = S_n^2 \ \& \ T_n^3 = T_n^2$$

Punto 4

$$S_n^4 = 0$$

$$T_n^4 = T_n^3 - \frac{S_n^3}{V_{e2}}$$

4.5.5 RECUENTO DE USUARIOS ATRAPADOS EN EL INTERIOR DEL TÚNEL

$$P = veh_{total} \times \left(1 - \frac{\%VP}{100}\right) \times Tasa_{VL} + veh_{total} \times \frac{\%VP}{100} \times Tasa_{VP}$$

Siendo:

$P \equiv$ Número de personas atrapadas por carril en el túnel.

$veh_{TOTAL} \equiv$ Número total de vehículos atrapados por carril en el túnel.

$\%VP \equiv$ Porcentaje de vehículos pesados.

$Tasa_{VL} \equiv$ Tasa de ocupación de vehículos ligeros.

$Tasa_{VP} \equiv$ Tasa de ocupación de vehículos pesados.

Se deberán añadir a P los usuarios de los vehículos implicados en el accidente según el escenario analizado.

TIPO DE VEHÍCULO	TASA DE OCUPACIÓN (personas/vehículo)
Vehículo ligero	1'5
Vehículo pesado	1
Autocar/autobús	30

Tabla 28. Resumen de tasas de ocupación de vehículos