

EL PROYECTISTA ANTE LAS EXIGENCIAS DE COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE LAS INSTALACIONES DE LOS TÚNELES

Javier Borja López
Juan Ramón López Laborda
IDOM

1. Introducción

En general, el nivel de seguridad de un túnel de carretera es comparable al de los otros tramos a cielo abierto. En efecto, el número de víctimas en carretera por km y vehículo es, por norma general, menor en túneles que en el resto de la red viaria [1].

Sin embargo, existen determinados incidentes, que en caso de producirse en un túnel, podrían tener unas consecuencias mucho más graves que si se desarrollasen a cielo abierto. Entre estos incidentes se encontrarían el vertido de sustancias tóxicas, las inundaciones, el incendio, etc. De entre todos ellos, el que tiene una mayor influencia en la seguridad de los usuarios es el incendio en el túnel.

De hecho, las mayores tragedias que se han registrado en túneles carreteros han sido debidas a un incendio, y a raíz de las mismas, se ha producido un importante desarrollo normativo en el ámbito de la seguridad en túneles en los últimos años.

Así, a nivel europeo, se publicó la Directiva 2004/54/CE, y a nivel nacional, el Real Decreto 635/2006 (trasposición de dicha Directiva Europea) así como otras normas de ámbito autonómico.

En estas normas, específicas de túneles, se prescriben una serie de equipamientos e instalaciones de seguridad para cada túnel, en función de sus características (longitud, tráfico, situación, etc.).

Una característica relevante de dichas instalaciones, que el proyectista no debe pasar por alto en el diseño de las mismas, es su comportamiento frente al fuego.

Como comportamiento frente al fuego se entiende la respuesta (cambios en las propiedades químicas y/o físicas) de un objeto y/o estructura expuesto al fuego. Este concepto incluye tanto su reacción al fuego (cómo contribuye dicho objeto y/o estructura, con su propia descomposición, al fuego al que está expuesto) como su resistencia (capacidad para mantener determinadas propiedades durante la exposición al fuego).

En las normas específicas de túneles de aplicación en el ámbito nacional, mencionadas anteriormente, se definen unos criterios generales de comportamiento frente al fuego que deben cumplir las instalaciones de seguridad. Es tarea del proyectista definir con detalle las características de estas instalaciones y sus equipos teniendo en cuenta en cada caso las particularidades de cada túnel.

En este documento se pretende profundizar en este campo (exigencias de comportamiento al fuego de las instalaciones de los túneles), repasando determinados aspectos que puede resultar de interés para el proyectista.

2. Incendios en túneles. Caracterización

La mayor parte de los incendios que se han registrado en túneles carreteros han sido a causa de un defecto mecánico o eléctrico de los vehículos que por él circulan (sobrecalentamiento del motor o los frenos, fallos eléctricos, etc.) [2].

Otras causas menos frecuentes de incendio son las colisiones de vehículos, los fallos técnicos del equipamiento del túnel o determinadas operaciones de mantenimiento en el mismo.

Aunque las colisiones y otros accidentes de vehículos no constituyen la causa más frecuente de un incendio en un túnel, sí que los incendios más importantes han tenido su inicio en un accidente. La primera causa de colisiones y otros accidentes de tráfico es a menudo la falta de atención de los conductores. [1]

La frecuencia relativa de incendio de vehículos pesados es mayor que la de turismos, y cuando un vehículo pesado está implicado en un incendio en un túnel, hay un mayor riesgo de que éste se desarrolle de forma más severa. [1]

Para determinar las exigencias en lo que a comportamiento al fuego se refiere de las instalaciones de seguridad del túnel, es necesario en primer lugar caracterizar un hipotético incendio que podría desarrollarse en su interior.

Para la caracterización de este incendio suele utilizarse el valor de la potencia calorífica máxima y, cuando es preciso un análisis temporal, la curva de variación de la potencia durante el ciclo de vida del incendio.

La Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) propone [2] las siguientes potencias máximas de incendio en función de los vehículos implicados en el mismo:

<i>Tipo de vehículo</i>	<i>Potencia máxima</i>
Vehículo ligero de pequeñas dimensiones	2,5 MW.
Vehículo ligero de grandes dimensiones	5 MW.
Autobús	20 MW.
Vehículo pesado con carga inflamable (caso general)	20 – 30 MW.

Tabla 1 Potencias máximas de incendio (fuente: PIARC)

Sin embargo, el análisis de diversos accidentes acaecidos en túneles, así como de los resultados de diversos ensayos a escala real efectuados (Beneluxtunnel, Runehamar) reveló que estas potencias podrían ser mayores (especialmente en el caso de un vehículo pesado con carga inflamable), situándose en torno a los 100 MW [3].

En lo que se refiere a la evolución temporal del incendio, habría que indicar que la duración de incendios serios registrados en túneles oscila entre 20 minutos y 4 días [1]. La mayor parte de los incendios más severos han durado 2-3 horas; sin embargo, habría que destacar 4 incendios en túneles carreteros que se han prolongado particularmente:

Túnel	Situación	Año	Causa	Duración
Nihonzaka	Japón	1979	Colisión	4 días
Mont Blanc	Francia/Italia	1999	Auto-ignición veh. pesado	53 horas
Tauern	Austria	1999	Colisión	15 horas
Gotthard	Suiza	2001	Colisión	20 horas

Tabla 2 Duración de incendios en túneles

En relación con este tema (evolución temporal del incendio), entre los distintos textos de referencia destacan las curvas normalizadas proporcionadas por el Centre d'Études des Tunnels (CETU) en su documento [4]. La figura siguiente muestra esta curva para un incendio de 30 MW.

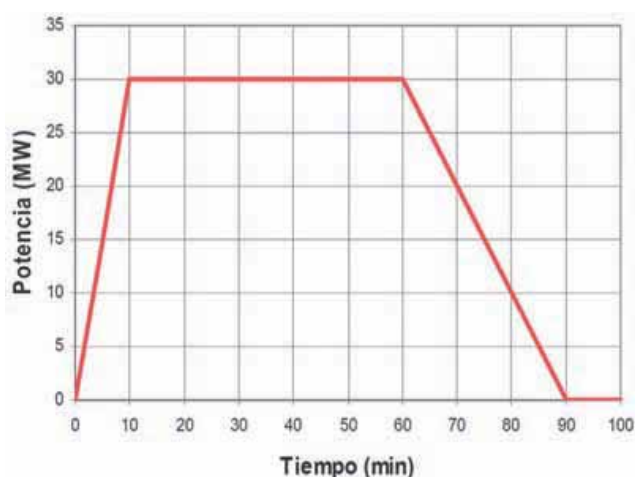


Figura 3 Curva de incendio normalizada. Incendio de 30 MW

Mediante esta caracterización del incendio el proyectista puede estimar la distribución de temperaturas en el túnel, que es necesaria para determinar, entre otras cosas, las exigencias de comportamiento al fuego de las instalaciones.

Para ello, en muchos casos es suficiente una aproximación unidimensional, en la cual las diferentes variables involucradas se suponen constantes en cada sección del túnel.

La temperatura máxima de un incendio se registra en el foco del mismo. En las distintas publicaciones de referencia ([2], [5]) se propone, como primera aproximación, la fórmula siguiente para el cálculo de la temperatura en la sección del foco (temperatura media en la sección), considerando una velocidad del aire V_0 “aguas

$$T_{foco} = \frac{\dot{Q}_{conv.inc}}{\rho_0 C_p S V_0} + T_0$$

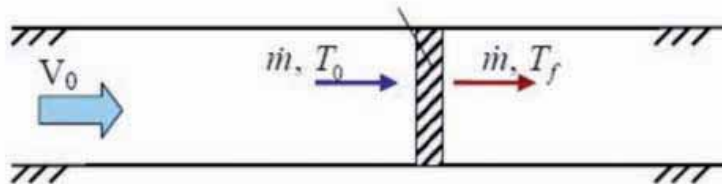
arriba” del incendio distinta de cero.

Donde $\dot{Q}_{conv.inc}$ es la potencia convectiva emitida por el incendio, ρ_0 la densidad del aire “aguas arriba del incendio”, C_p el calor específico del aire, S el área de la sección del túnel y V_0 la velocidad “aguas arriba del incendio”.

A partir de esta fórmula, se puede concluir que, para un túnel dado, la temperatura que se alcanza en el foco está muy influenciada por la potencia de incendio y por la velocidad del aire aguas arriba del mismo.

Hay que destacar que, al tratarse de un planteamiento unidimensional, esta T_{foco} es la media de la sección, con lo que se entiende que a lo largo de dicha sección se alcanzan temperaturas superiores a ésta.

Esta fórmula se deduce de forma inmediata de la aplicación de la ley de conservación de la energía en el punto de incendio, considerando el problema como unidimensional, sin calentamiento del aire por radiación y suponiendo que el incendio se desarrolla en una longitud muy pequeña.



$$\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \dot{Q}_{conv.inc}$$

$$(\rho_0 \cdot S \cdot V_0) C_p \cdot (T_{foco} - T_0) = \dot{Q}_{conv.inc}$$

$$T_{foco} = \frac{\dot{Q}_{conv.inc}}{\rho_0 S V_0 C_p} + T_0$$

$$\dot{Q}_{conv.inc}$$

Figura 4 Planteamiento unidimensional del problema

Hay que destacar que a medida que disminuye la velocidad V_0 de flujo, la temperatura en el foco aumenta. Dado que esta fórmula no es de aplicación para valores de V_0 próximos a cero, para determinar la temperatura máxima que se puede alcanzar en un incendio hay que dirigirse a alguna de las curvas normalizadas desarrolladas

a partir de diversos ensayos a escala real llevados a cabo en túneles (RWS, RABT, HCM, ISO) [6]. A modo de ejemplo se describen las curvas ISO y HCM.

$$T = 345 \log(8t + 1) + 20$$

La curva ISO-834, comúnmente utilizada para simular incendios en edificios, puede expresarse mediante la siguiente fórmula.

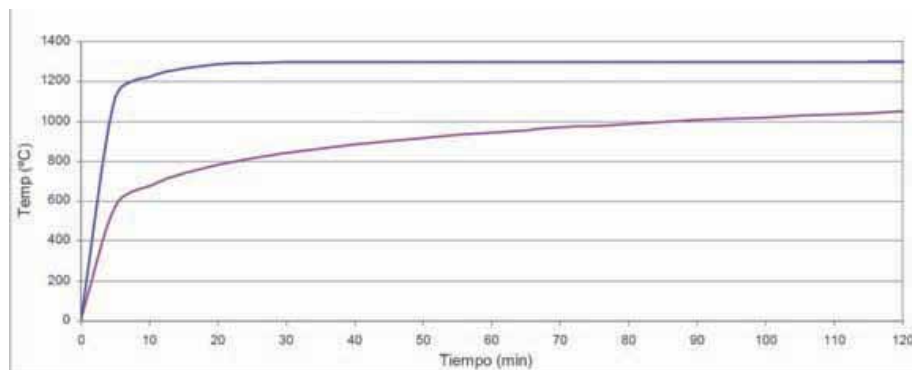
Siendo T la temperatura del aire en grados Celsius y t el tiempo en minutos.

Un incendio que siga esta función alcanzaría 700 °C en apenas doce minutos y llegaría hasta los 1150 °C tras cuatro horas (240 minutos).

$$T = 1280(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20$$

La función HCM o de hidrocarburos modificada, que aparece en las recomendaciones francesas, se puede expresar por la siguiente fórmula.

El aumento de la temperatura es inicialmente más rápido, alcanzando más de 1200 °C tras los diez primeros minutos del incendio. A los 120 minutos la temperatura está estabilizada en 1300 °C.



Estas funciones pueden representarse gráficamente por las siguientes curvas.

Figura 5 Curvas de temperatura CN y HCM

En lo que se refiere al perfil de temperaturas generado a lo largo de todo el túnel, hay que indicar que éste depende de múltiples factores, entre ellos el tiempo transcurrido desde el inicio del incendio, el material de la pared, su espesor y las temperaturas iniciales. Continuando con el cálculo unidimensional y utilizando de nuevo

$$Q_{\text{absorbido}} = Q_{\text{emitido.convección}} + Q_{\text{emitido.radiación}}$$

$$-\frac{1}{4} D_H \rho_0 V_0 C_p \frac{dT}{dx} = h_c (T - T_p) + \epsilon \sigma F (T^4 - T_p^4)$$

la ley de conservación de la energía, la ecuación que define este intercambio térmico en estado estacionario es la siguiente [5].

Su resolución no es inmediata ya que el calor emitido depende de la temperatura de la pared (T_p), la cual varía con la longitud y depende a su vez de los fenómenos de conducción. Una manera sencilla de resolver dicha ecuación de forma aproximada es la propuesta en [5], y consiste en incorporar la radiación dentro del término de transmisión por convección (utilizando un coeficiente de intercambio aparente) y

$$T = T_p + (T_{foco} - T_p) e^{-x/x_e}$$

$$x_e = \frac{C_p \rho_0 V_0}{4h_{app}}$$

suponer una temperatura de pared constante y conocida. La solución en este caso es la siguiente:

Sin embargo estas aproximaciones unidimensionales pueden no ser suficientemente precisas en algunos casos. En un incendio real los gases de combustión, humo y aire caliente se acumulan en la parte más alta del túnel, que es donde suelen instalarse diversos equipos de seguridad, alcanzando temperaturas elevadas en muy poco tiempo. Para precisar el grado de resistencia que deben presentar los diferentes elementos de seguridad puede ser necesario disponer de la distribución tridimensional de temperaturas, o al menos de la curva de temperaturas a una altura determinada.

Para ello, y a modo de ejemplo, se ha realizado una simulación de un incendio de 30 MW en estado estacionario en un túnel tipo (área: 62 m², perímetro: 31 m, longitud: 1.000 m, pendiente 0%), utilizando el software comercial SOLVENT.

Las siguientes imágenes muestran la distribución de temperaturas en el plano central del túnel para una velocidad inicial del aire nula (figura 6) y con una velocidad inicial del aire de 3 m/s (figura 7), suponiendo un caso estacionario.

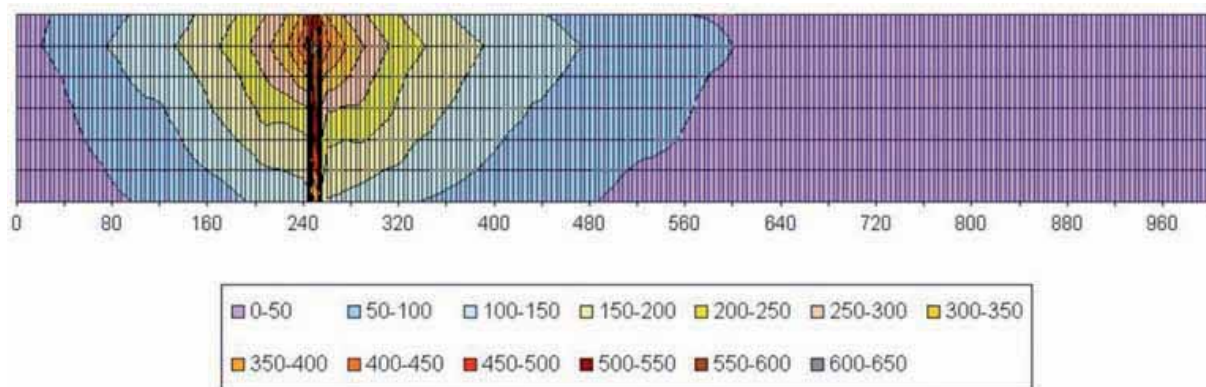


Figura 6 Distribuciones de temperatura con $V_0 = 0$ m/s

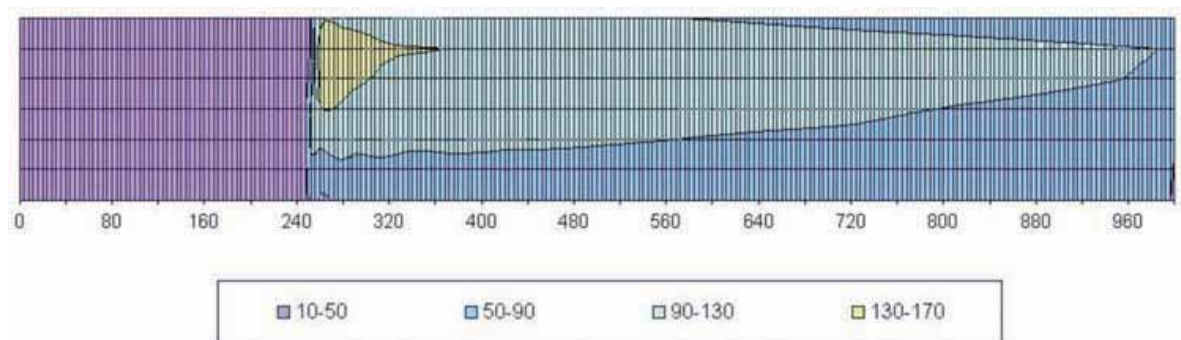


Figura 7 Distribuciones de temperatura con $V_0 = 3$ m/s

Puede verse como en el primer caso se alcanzan temperaturas más altas en la clave aunque su efecto queda limitado a las cercanías del foco. En el segundo caso, con velocidad de 3 m/s, las temperaturas son muy inferiores pero afectan a la mayor parte del túnel situado “aguas abajo” del incendio.

La siguiente gráfica muestra la temperatura media (naranja) de cada sección a lo largo de todo el túnel calculada a partir de la solución 3D generada por SOLVENT y la temperatura a un metro de la clave (rojo). Puede observarse como los valores aumentan considerablemente en este último caso.

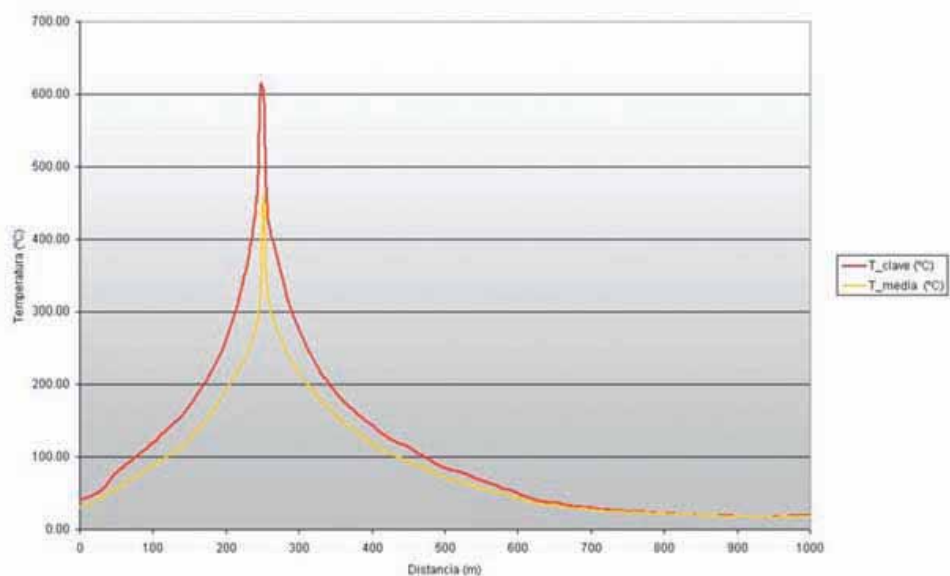


Figura 8 Distribución 1D de temperatura media y máxima en la sección

3. Diseño de las instalaciones ante un posible incendio

Como se ha indicado anteriormente, la normativa específica de túneles de ámbito nacional sólo proporciona unos criterios generales en lo que se refiere al comportamiento al fuego de las instalaciones.

Concretamente, la Directiva 2004/54/CE dice:

2.17. Suministro de electricidad y circuitos eléctricos

[...]

2.17.2. Los circuitos eléctricos, de medida y de control estarán diseñados de tal manera que un fallo local, debido, por ejemplo, a un incendio, no afecte a los circuitos que no hayan sufrido daños.

2.18. Resistencia de los equipos al fuego

El grado de resistencia al fuego de todos los equipos del túnel tendrá en cuenta las posibilidades tecnológicas y tendrá como finalidad mantener las necesarias funciones de seguridad en caso de incendio.

Esto viene a redundar en dos aspectos:

- En caso de incendio, las instalaciones no deben contribuir al mismo, ni a propagarlo.
- Determinadas instalaciones (instalaciones críticas) deben mantener su funcionamiento en caso de incendio al menos durante un tiempo mínimo.

En general, las instalaciones prescritas en estas normas se pueden clasificar en varios grupos:

- Aquéllas destinadas a evitar que se produzcan incidentes en el túnel. (iluminación, señalización, drenaje).
- Aquéllas destinadas a detectar rápidamente cualquier incidente que se produzca en el túnel (circuito cerrado de televisión, detector automático de incidentes, detección lineal de incendios, etc.).
- Aquéllas destinadas a facilitar la evacuación de los usuarios en caso de incidente (iluminación de evacuación, señalización de emergencia, megafonía, etc.).
- Aquéllas destinadas a evitar la propagación y expansión del incendio (ventilación, drenaje vertidos tóxicos/inflamables, etc.).
- Aquéllas destinadas a facilitar las labores de los servicios de emergencia (red de hidrantes, sistema de radiocomunicaciones, etc.).

De todas ellas, las que resultan críticas una vez que el incendio ha comenzado serían las destinadas a facilitar la evacuación de los usuarios y las destinadas a evitar la propagación del mismo. Tal y como se ha indicado en el capítulo 2, resulta especialmente crítico el sistema de ventilación.

Para proteger estas instalaciones críticas frente al fuego existen varias alternativas, algunas de las cuales se repasan a continuación.

3.1. Uso de equipos resistentes al fuego

Habitualmente, el equipamiento de seguridad instalado en el interior de los túneles (cámaras de vídeo, sensores de contaminación, luminarias, etc.) no está protegido frente al fuego. La mayoría de estos equipos tienen un rango de temperaturas de operación, fuera del cual los fabricantes no aseguran el correcto funcionamiento. Lógicamente, en una situación de incendio en la que la temperatura en el túnel aumenta considerablemente, los equipos más cercanos al foco del incendio dejarán de funcionar.

Sin embargo, es posible dotar de un cierto grado de resistencia al fuego a determinados equipos críticos que podrían funcionar durante el desarrollo de un incendio o al menos durante el periodo de evacuación del túnel por parte de los usuarios. Es el caso del sistema de ventilación.

El sistema de ventilación desempeña un papel fundamental en el control de un incendio y en particular del humo generado por él, que representa el mayor peligro potencial para los usuarios de un túnel.

En relación a los requerimientos que debe cumplir un sistema de ventilación, ni la Directiva Europea 2004/54/CE ni el Real Decreto 635/2006 incluyen especificaciones detalladas al respecto. En ambos textos se indica que el proyecto, la construcción y la explotación de este sistema deberán tener en cuenta, entre otros aspectos, el control del calor y el humo en caso de incendio. Asimismo, el Real Decreto 635/2006 —no así la Directiva— establece los sistemas de ventilación deberán poder extraer el humo generado por un incendio tipo de potencia mínima de 30 MW y caudal mínimo de 120 m³/s. (punto 2.11.4 del Anexo I). Por tanto, podría afirmarse que cualquier sistema de ventilación que cumpla este requisito sería válido, independientemente del grado de resistencia al fuego de sus equipos, al menos en los túneles que se encuentran dentro del ámbito de aplicación del Real Decreto 635/2006. Este requerimiento puede satisfacerse mediante diferentes soluciones que el proyectista debe evaluar técnica y económicamente en cada caso particular.

En otras normas fuera del ámbito de los túneles, concretamente en el Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado en marzo de 2006, en su Documento Básico

SI “Seguridad en caso de incendio”, se establece que los ventiladores utilizados en los sistemas del control de incendio deben ser de categoría F400 90, lo cual significa que el ventilador, aspirando aire a 400°C, ha de ser capaz de mantener sus prestaciones, dentro de unos límites mínimos de caudal volumétrico y presión estática, durante al menos 90 minutos. Esta nomenclatura hace referencia a la clasificación incluida en la norma UNE EN 12101-3:2002 —“Sistemas de control de humos y calor. Parte 3: Especificaciones para aireadores extractores de humos y calor mecánicos”— y a su corrección de 2005. Cuando se indica que los ventiladores deben tener una clasificación F400 90, se ha de entender que todos sus componentes (hélice, rodete, accionamiento, carcasa, alimentación, etc.) deben poder funcionar a esa temperatura durante ese tiempo.

A este respecto, en el ámbito internacional, destaca la norma francesa [11], que establece diferentes requerimientos de temperatura, tiempo de resistencia al fuego, velocidad del aire o caudal de extracción para diversos escenarios y sistemas de ventilación. Por ejemplo, en el caso de ventilación longitudinal en un túnel con prohibición de paso de mercancías peligrosas se especifica un valor de resistencia al fuego mínimo de 200° C, 2 horas y la posibilidad de proporcionar una velocidad media en la sección de 3 m/s, elevándose el valor de la temperatura hasta 400 °C en el caso de admitir el paso de mercancías peligrosas.

Muchos proyectistas optan por incluir el requisito de 400°C y 2 horas para los ventiladores de extracción de humos en túneles, en particular para ventiladores tipo jet o aceleradores. Esto se debe principalmente a la adopción habitual de la norma francesa, que fue la primera en aparecer, como referencia en el diseño de las instalaciones de seguridad, y en menor medida a que la mencionada norma UNE EN 12101-3:2002, hasta su corrección de 2005, sólo definía la categoría F400 como aquella en la que el ventilador resiste 400 °C durante 2 horas. Este hecho ha conllevado que este criterio se aplicara además a otros elementos participantes en el sistema de ventilación, como sucede con los conductos de impulsión y extracción de humos.

Tomando las simulaciones anteriores realizadas con SOLVENT puede observarse como en el caso de velocidad del aire nula existe un tramo de 25 metros en los que la temperatura cerca de la clave es superior a 400 °C. Si se establece una velocidad de 3 m/s no existe ningún tramo con temperaturas superiores a 150 grados (excepto justo en el foco del incendio). En cualquiera de los dos casos, si se instalaran ventiladores de tipo jet con un grado de resistencia F400 90 y distribuidos uniformemente, se aseguraría el funcionamiento de la mayor parte de ellos.

Cabría plantearse la elección de una resistencia al fuego mayor de 400°C. Sin embargo, a continuación se expone que este punto carece de interés práctico. En efecto, si en el túnel objeto de proyecto se pretende instalar un sistema de ventilación longitudinal, los cálculos de dimensionamiento deberán tener en cuenta este perfil de temperaturas en la clave, no sólo en la elección de la resistencia al fuego de los equipos y los cables de alimentación sino también en la consideración del descenso de rendimiento de los ventiladores con el aumento de la temperatura.

Tomando como referencia la fórmula siguiente, utilizada de forma general en el cálculo del empuje real de un ventilador axial [5], puede verse como éste disminuye de forma proporcional a la densidad del aire.

$$F_{real} = F_{teórico} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}} \cdot \left(1 - \frac{v_a}{v_{chorro}}\right) \cdot \eta$$

Considerando el aire como un gas ideal, el empuje del ventilador desciende de forma lineal con el aumento de la temperatura del aire (en Kelvin).

De estas fórmulas se deduce que para temperaturas por encima de 400°C, el rendi-

$$\rho = \rho_{ref} \frac{T_{ref}}{T}$$

miento de los ventiladores desciende más de un 60%. Por ello carece de interés en la práctica que el ventilador tenga una resistencia al fuego superior.

3.2. Situación de las instalaciones en un cuarto técnico protegido del fuego

Determinadas instalaciones de seguridad no requieren estar situadas físicamente en el interior del túnel. Es el caso de los transformadores, cuadros de distribución eléctricos principales, nodos principales de comunicación, determinados equipos informáticos, etc.. En general estos equipos se sitúan en salas o locales técnicos anexos al mismo, con lo que en caso de incendio en el interior del túnel, su funcionamiento estaría asegurado siempre que el recinto disponga de una resistencia al fuego suficiente.

En ese sentido, además de asegurar un espesor mínimo de los muros, el recinto debe contar con puertas resistentes al fuego, compuertas cortafuegos para los conductos de ventilación, sellados ignífugos de los conductos que accedan al recinto, etc..

Igualmente es recomendable dotar a estos recintos de sistemas de detección y extinción de incendios automáticos, por si se generase un incendio en los mismos. Un incendio en un local técnico en principio debería tener menor repercusión que un incendio en el túnel, ya que el tráfico no se vería directamente afectado.

3.3. Protección del cableado

La importancia de los cables en lo que se refiere a la seguridad frente al fuego radica en los siguientes puntos:

- Son elementos que cruzan las instalaciones de unas zonas a otras y pueden ser considerados como transmisores potenciales de los incendios.
- Una gran parte de su sección está formada por aislantes y cubiertas protectoras de materiales que pueden ser susceptibles de ser afectados por el fuego, generando humos y gases nocivos y corrosivos, que en la práctica los hacía irrespirables. Todo ello generaba la pérdida de visibilidad y la creación de un ambiente nocivo en las áreas por donde se extendía el incendio, entorpeciendo la evacuación de las personas y los trabajos de extinción.
- En el caso de los cables eléctricos, su integridad eléctrica puede quedar dañada al ser afectada por el fuego, interrumpiendo el suministro a determinados e incluso generando cortocircuitos que facilitan la aparición de nuevos focos de incendios.

Estas circunstancias han propiciado un desarrollo normativo que ha incrementado las exigencias de comportamiento frente al fuego de los cables, regulando el empleo de determinados materiales en la fabricación de los mismos, limitando otros y exigiendo la incorporación de cables especiales en determinados recintos.

Los cables pueden clasificarse según las normas que cumplen en lo referente a comportamiento frente al fuego. Así, se distinguen tres grandes grupos: los cables convencionales, los cables de seguridad y los cables de alta seguridad. La siguiente figura, desarrollada por la Asociación Española de Fabricantes de Cables y Conductores Eléctricos (FACEL), ilustra las diferencias existentes entre los tipos de cables.

Características de los diferentes tipos de cable				
	Convencional	Libre de halógenos		
		Seguridad	Alta seguridad	
		(S)	(AS)	(AS+)
Resistente al fuego ¹⁾				
No propagador del incendio ²⁾				
Baja emisión humos ³⁾				
Libre de halógenos ⁴⁾				
No propagador de la llama ⁵⁾				
1) ensayo realizado según la norma UNE-EN 50200 2) ensayo realizado según la norma UNE-EN 50266 3) ensayo realizado según la norma UNE-EN 61034 4) ensayo realizado según la norma UNE-EN 60287 5) ensayo realizado según la norma UNE-EN 60332-1-2				
		Menos Seguro Más Seguro		

Figura 9 Clasificación de los cables según su comportamiento al fuego

Como se observa en la figura, los cables de alta seguridad a su vez se subdividen en dos grupos:

- Cables no propagadores del incendio: Son aquellos cables que no propagan el fuego a lo largo de una instalación, incluso cuando ésta consta de un gran número de cables, ya que se autoextinguen cuando la llama que les afecta se retira o apaga. Su denominación es “AS”.
- Cables resistentes al fuego. Son aquellos cables que, además de no propagar el incendio, mantienen el servicio durante y después de un fuego prolongado. Su denominación es “AS+”.

En caso de incendio ambos tipos de cable (AS y AS+) tienen una emisión de gases opacos y de gases halógenos y corrosivos muy reducida.

Sobre los cables resistentes al fuego, hay que destacar que la norma UNE-EN 50.200 que aparecía en la figura anterior no es una norma constructiva de un tipo de cable, sino que es una norma que especifica el método de ensayo que permite clasificar el cable según su capacidad de mantener de forma fiable el suministro eléctrico cuando éste está expuesto al fuego. Este método se basa en la exposición directa del cable ensayado a la llama de un quemador de propano que proporciona una temperatura nominal constante de ataque de 842 °C. Para cada cable ensayado debe registrarse el tiempo de supervivencia, medido en minutos, hasta el punto de fallo, hasta un tiempo máximo de supervivencia de 120 min.

La norma donde se definen las características constructivas de un cable de seguridad es la UNE 211025 “Cables con una resistencia intrínseca al fuego, destinados a circuitos de seguridad”. Esta norma tiene por objeto definir las características de los cables diseñados para tener una resistencia intrínseca al fuego, y destinados a circuitos de seguridad (circuitos de señalización, detección y alarma, circuitos para servicios de evacuación y lucha contra incendios, etc.). En esta norma aparece la denominación de cable AS+, que se define como aquél que, entre otras cosas, tiene una categoría PH90 según el ensayo definido en la citada UNE-EN-50200. Esto es, asegura la continuidad del suministro de energía durante 90 minutos en las condiciones de dicho ensayo.

En la normativa específica de túneles de aplicación a nivel nacional (Directiva Europea 2004/54/CE y RD 635/2006) no se concreta qué tipo de cable debe utilizarse para alimentar cada equipo de seguridad. Sí que se definen los criterios generales, ya mencionados anteriormente: el diseño de los circuitos debe ser tal que un fallo

local no afecte a los circuitos que no hayan sufrido daños y la resistencia al fuego ha de ser suficiente para mantener las necesarias funciones de seguridad en caso de incendio.

En otras normas no específicas de túneles sí que se detalla el uso de cada tipo de cable. Es el caso del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), que en su instrucción técnica 28 (“Instalaciones en locales de pública concurrencia”) especifica que “los cables eléctricos destinados a circuitos de servicios de seguridad no autónomos o a circuitos de servicios con fuentes autónomas centralizadas, deben mantener el servicio durante y después del incendio, siendo conformes a la norma UNE-EN-50200 y tendrán emisión de humos y opacidad reducida”.

Igualmente, en el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales (Real Decreto 2267/2004) se indica (punto 9 de su Anexo II) que “en el caso de que los cables eléctricos alimenten a equipos que deban permanecer en funcionamiento durante un incendio, deberán estar protegidos para mantener la corriente eléctrica durante el tiempo exigible a la estructura de la nave en que se encuentre”.

De acuerdo con todo esto, en lo que se refiere a las instalaciones del túnel parece lógico adoptar los siguientes criterios:

- Aquellos cables que recorran el interior del túnel y sean susceptibles de transmitir un hipotético incendio deberán ser no propagadores del incendio.
- Los cables asociados a los equipos críticos (circuitos de seguridad: señalización, detección y alarma, servicios de evacuación, lucha contra incendio, etc.) deberán disponer de un nivel de resistencia al fuego suficiente para asegurar su cometido.

Entre estos circuitos críticos cabría destacar:

- Suministro de energía a ventiladores principales
- Iluminación de seguridad asociada a SAI
- Iluminación de emergencia si no está constituida por equipos autónomos
- Conexiones entre cuadros generales y secundarios, cuando de éstos dependa la alimentación a equipos críticos.
- Redes troncales de comunicaciones (fibra óptica del sistema de comunicaciones de la GTC, vídeo vigilancia, etc.).
- Líneas de suministro en media tensión.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 2, las temperaturas máximas que pueden registrarse en un túnel en caso de incendio pueden superar el nivel de resistencia de los cables RF normalizados (AS+). Es por ello que la instalación aérea de dichos

cables en el interior del túnel no asegura al 100% la resistencia frente a un incendio, siendo recomendable aplicar algún tipo de protección adicional. Una manera de asegurar esta resistencia al fuego es realizando la instalación subterránea de los cables.

En lo que se refiere a la instalación subterránea, cabría plantearse cuál es la profundidad mínima a la que deben disponerse los cables para asegurar la resistencia al fuego.

En ese sentido, la zona de la calzada que previsiblemente alcance una mayor temperatura en el túnel en caso de incendio es aquella sobre la cual se encuentra el foco incendiado. Para estimar las temperaturas alcanzadas en este punto puede tomarse la curva normalizada Tiempo - Temperatura (Curva CN), definida en la norma ISO 834 y utilizada tanto en el Eurocódigo (UNE-EN 1991-1-2:2004) como en el Código Técnico de la Edificación; así como la curva HCM, adoptada en la normativa francesa de seguridad en túneles [11].

Para estimar la influencia de estas temperaturas en el interior del hormigón a diferentes profundidades y tiempos se debe realizar un cálculo transitorio de transmisión de calor. Para ello, en este documento, se han realizado varias simplificaciones.

- Considerar el problema como unidimensional en el eje perpendicular al suelo.
- Tomar la temperatura del suelo igual a la temperatura del aire, es decir, considerando una transmisión por convección infinitamente alta.
- Las características del hormigón relacionadas con la transmisión del calor permanecen constantes, en particular la densidad, la conductividad y el calor específico.

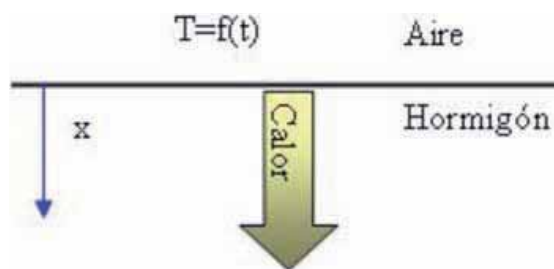


Figura 10 Planteamiento unidimensional del problema de transmisión del calor

La ecuación que define este problema simplificado es la siguiente.

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial x} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} \quad (a: \text{difusividad térmica} = \frac{\lambda}{\delta C_p})$$

Siendo las condiciones de contorno:

$T(0,x)$ = Temperatura inicial (10°C)

$T(t,0)$ = Función CN en un caso, y

$T(t,0)$ = Función HCM en otro.

La resolución analítica de este problema no estacionario y con condiciones de contorno dependientes del tiempo es compleja, por lo que se realizó un cálculo iterativo dividiendo el eje x en tramos de 5 centímetros (hasta una profundidad de 1 metro) y calculando la temperatura cada 5 minutos.

Se utilizó el método numérico de las diferencias finitas de forma que la solución en cada instante de tiempo sólo dependiera del instante anterior (método explícito).

La ecuación final a resolver en cada punto es:

$$T_P = \frac{a_E T_E^o + a_O T_O^o + (a_P - a_E - a_O) T_P^o}{T_P}$$

T_P : temperatura en un nodo (incógnita).

T_E : temperatura en el nodo siguiente (nodo a mayor profundidad).

T_O : temperatura en el nodo anterior.

o , superíndice “ o ”: temperatura en el instante anterior.

$$a_E = a_O = \frac{\lambda}{\Delta x}$$

$$a_P^o = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}$$

La siguiente figura muestra la temperatura alcanzada a diferentes profundidades al cabo de dos horas de incendio.

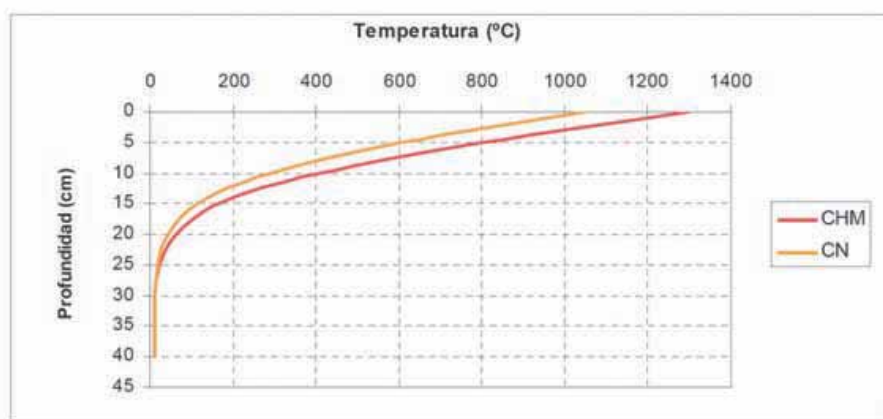


Figura 11 Distribución de temperaturas al cabo de dos horas

De estos datos puede deducirse que la colocación de los tubos embebidos en hormigón a una profundidad de 30 cm. (tomando el punto superior de los mismos) sería suficiente para que los cables que se tiendan por ellos no resulten afectados por la temperatura en caso de un incendio de dos horas de duración.

Este resultado se encuentra en concordancia con las fórmulas proporcionadas en [6] y [8], en las que se considera que un espesor de 25-30 cm. de hormigón es suficiente para aguantar 240 minutos en las condiciones de temperatura dadas por la curva CN.

Sin embargo existen otros factores, como la resistencia mecánica, que pueden aconsejar la colocación del cableado a un a mayor profundidad, por ejemplo en caso de circulación de vehículos pesados sobre estas canalizaciones.

Hay que indicar que las arquetas de una canalización enterrada pueden resultar puntos críticos en relación a la protección al fuego del cableado, por ello requieren de una atención especial por parte del proyectista. Para conseguir la protección requerida en cada caso existen diversas opciones que comprenden la utilización de una doble tapa, la incorporación de barreras o materiales de alta resistencia térmica, el sellado ignífugo de las ranuras, etc.

3.4. Redundancia de instalaciones

Una alternativa para asegurar el funcionamiento de determinadas instalaciones en un escenario de incendio es la de dotar a las mismas de un cierto nivel de redundancia, tanto a nivel de equipamiento, como a nivel de cableado.

Un ejemplo típico de configuración redundante es plantear la red troncal de comunicaciones según una configuración de anillo, tal y como se puede observar en la figura 12.

En el caso de que el túnel cuente con dos tubos, una rama de cada anillo puede situarse en el interior de cada uno de ellos. De esta manera aunque el anillo de comunicaciones resultase dañado en un punto como consecuencia de un incendio, la comunicación entre el centro de control y el resto de nodos podría mantenerse.

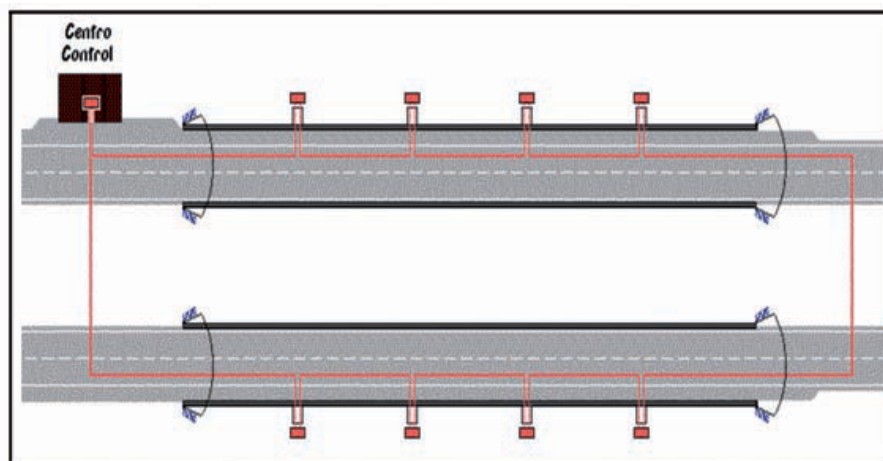


Figura 12 Redundancia mediante el uso de una topología de anillo

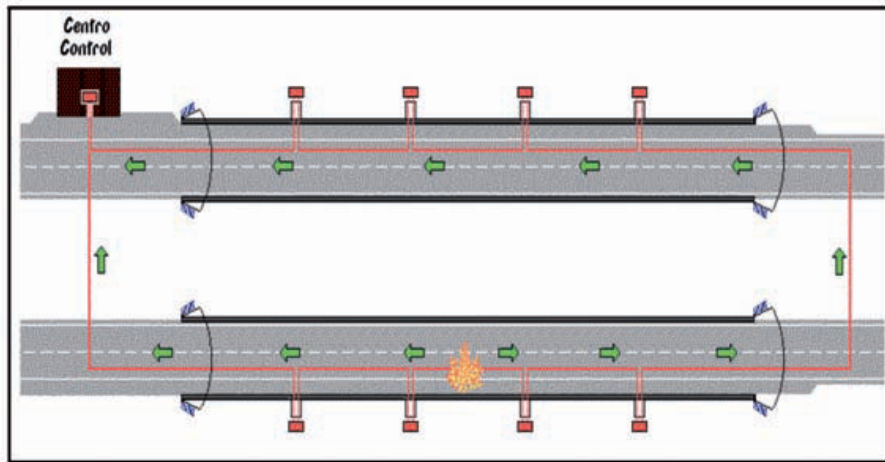


Figura 13 Un incendio en el túnel provoca el corte del anillo de comunicaciones, pero la comunicación se mantiene por las otras ramas del anillo

Otro caso típico de redundancia es el que se suele aplicar en el diseño del sistema de radiocomunicaciones basado en hilo radiante. Un esquema sin redundancia presenta el problema de que un accidente próximo al punto en el que están instalados los equipos de cobertura del túnel puede llegar a destruir el cable radiante, y dejar sin cobertura a prácticamente toda la longitud del túnel. Dicho problema se puede solucionar fácilmente con un esquema redundante, con estaciones de cobertura en cada una de las bocas del túnel y, en caso de ser necesario, estaciones repetidoras en el interior del mismo.

De este modo, tras dimensionar adecuadamente los equipos amplificadores, en caso de que se corte el cable radiante en algún punto, se alimentará el mismo desde las estaciones repetidoras más alejadas. Esta redundancia es de utilidad, además, en el caso de que una de las estaciones repetidoras deje de funcionar. Este concepto se ilustra en la figura siguiente.

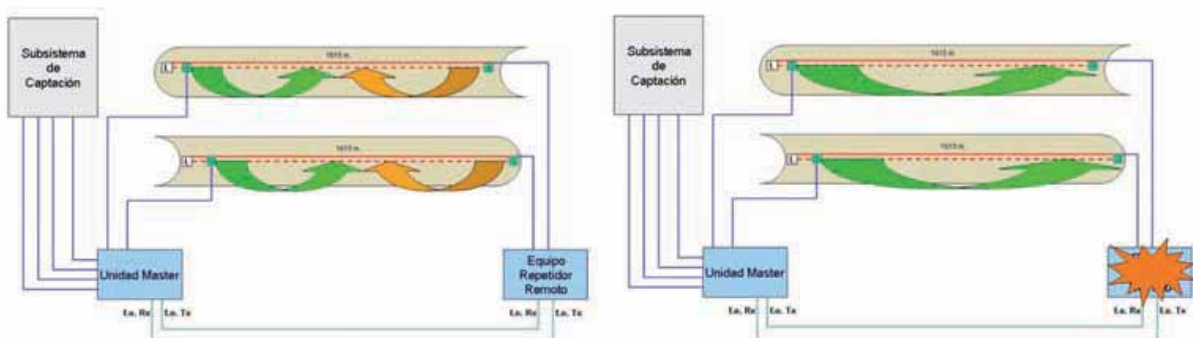


Figura 14 Izda., túnel bitubo con 2 estaciones repetidoras funcionando correctamente. Dcha., una de las estaciones no funciona y la otra se hace cargo de la transmisión a todo el túnel

3.5. Sectorización

Otra alternativa para asegurar el funcionamiento de determinadas instalaciones en un escenario de incendio es la sectorización de las mismas. Básicamente este método consiste en dividir los elementos que componen dicha instalación en varios sectores funcionalmente independientes, de tal modo que en caso de que se desarrolle un hipotético incendio, éste sólo ataque a uno de los sectores, manteniéndose el funcionamiento del resto.

Este método puede aplicarse a aquellas instalaciones que cuentan con elementos que han de situarse en el interior del túnel y que técnica o económicamente no es posible proteger.

La figura siguiente muestra un ejemplo de sectorización. Se trata de una configuración habitual de un sistema de iluminación de emergencia (destinada a la evacuación de los usuarios) alimentado bajo SAI de forma centralizada. En vez de alimentar el conjunto de las luminarias con una única línea que partiría desde el centro de transformación, éstas se alimentan desde unos cuadros secundarios (situados en un recinto protegido del fuego, habitualmente junto a las estaciones de emergencia) que alimentarían no a todas sino a un determinado número de las mismas.

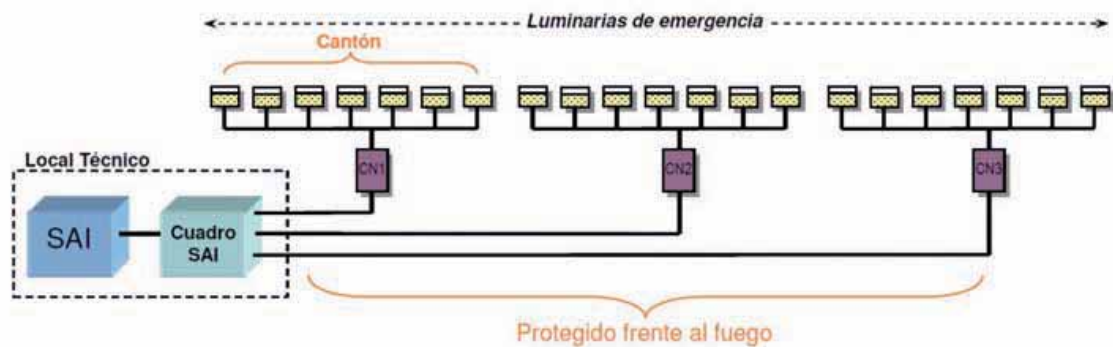


Figura 15 Sectorización de las luminarias de emergencia

En el diseño de los sistemas de megafonía también se suele adoptar este criterio, no sólo con el objetivo de protección frente al fuego, sino porque además permite la emisión de mensajes independientes a cada uno de los sectores, lo cual resulta de utilidad en caso de producirse la evacuación del túnel.

En la figura siguiente se muestra una configuración típica de un sistema de megafonía.

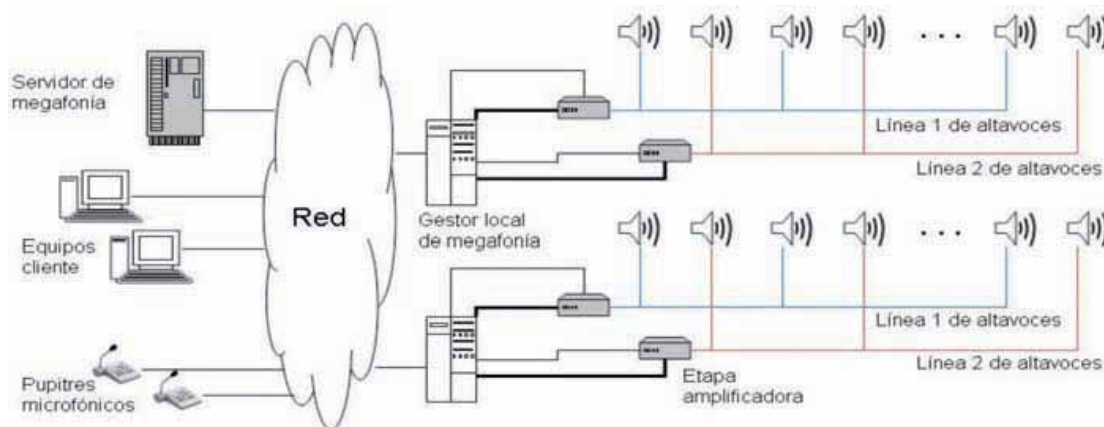


Figura 16 Sectorización del sistema de megafonía

4. Consideraciones finales

Tras el análisis efectuado en el resto de capítulos podemos concluir los siguientes puntos:

Los túneles ofrecen un grado de seguridad superior al del resto de tramos de la red viaria, sin embargo un incendio en su interior, evento estadísticamente poco probable, puede tener unas consecuencias severas.

En un incendio en un túnel se pueden registrar temperaturas puntuales muy elevadas, en las proximidades del foco del mismo.

El sistema de ventilación resulta clave para el control del incendio, por un lado en lo que se refiere a la expulsión de los humos generados, y por otro lado debido a la influencia que tiene en la distribución de temperaturas que se presenta en el interior del mismo.

Las normas específicas de túneles definen el equipamiento de seguridad mínimo con el que cada túnel debe contar. Sin embargo sólo proporcionan unos criterios generales sobre el comportamiento al fuego de este equipamiento, aspecto que el proyectista debe definir con detalle, considerando las particularidades de cada túnel.

Como criterios generales, estas instalaciones de seguridad:

- No deben contribuir al incendio, ni a la expansión del mismo
- Deben poder mantenerse en funcionamiento en caso de incendio (al menos aquellas instalaciones críticas), durante un tiempo mínimo.

Existen varios métodos para asegurar la protección frente al fuego de las instalaciones:

- Dotándolas de un cierto grado de resistencia al fuego directamente
- Incluyéndolas en un recinto protegido del fuego
- Asegurando su alimentación mediante cableado resistente al fuego (o protegiendo dicho cableado por ejemplo mediante su soterramiento).
- Dotándolas de redundancia
- Sectorizando los elementos de dicha instalación

En general, el proyectista deberá siempre estudiar cada caso particular con detalle, evaluando cuidadosamente las características del túnel (tipo de tráfico permitido, tiempo de evacuación de usuarios, sistema de ventilación adoptado, tipo de supervisión del túnel, etc.), el nivel de criticidad de cada instalación, el incendio que en él se podría desarrollar y la distribución de temperaturas que se podría alcanzar en ese caso.

Bibliografía

- [1] European Thematic network FIT-Fire In Tunnels. General Report. Año 2005.
- [2] PIARC. Comité Técnico C5 Road Tunnel Operations. “Fire and smoke control in road tunnels”. Año 2004.
- [3] IV Simposio de Túneles, Principado de Andorra. CEMIM/ETSII-UPM. “Enfoque global del sistema de ventilación”. Año 2005.
- [4] CETU. Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers. Fascicule 4: “Les études spécifiques des dangers (ESD)”. Año 2003.
- [5] CETU. Dossier Pilotes du CETU. 4.1 Ventilation. Año 2003.
- [6] IV Simposio de Túneles, Principado de Andorra. Manuel Romana Ruiz. “El comportamiento del hormigón de los túneles frente al fuego”. Año 2005.
- [7] PIARC. Comité Técnico C5 Road Tunnel Operations. “Fire and smoke control in road tunnels”. Año 2004.
- [8] CETU. Les guides du CETU. “Comportement au feu des tunnels routiers”. Año 2005
- [9] Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.
- [10] Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.
- [11] Circulaire Interministerielle N° 2000- 63 Du 25 Aout 2000, relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national. Año 2000. Ministère de L'in

terieur/Ministere de l'Equipement, des Transports et du Logement.

- [12] Real Decreto 842/2002, del 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.
- [13] Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra Incendios en los Establecimientos Industriales.
- [14] Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- [15] FACEL. “Los cables de alta seguridad (As) y (As+)”. Año 2008.
- [16] General Cable. “Cables eléctricos de alta seguridad (AS) y (AS+) ante los incendios y los efectos que se derivan de ellos.”. Año 2008.