

# Sistemas de control de ventilación en túneles

*Espinosa, I.<sup>1</sup>; Maroño, J.L.<sup>1</sup>; Del Rey, I.<sup>2</sup>; Alarcón, E.<sup>2</sup>.*

<sup>1</sup> *FFII-CEMIM. José Gutiérrez Abascal, 2, 28006, Madrid. España.*

<sup>2</sup> *ETSII-Universidad Politécnica de Madrid. J. Gutiérrez Abascal, 2, 28006, Madrid. España.*

## RESUMEN

La entrada en vigor del R.D. 635 del año 2006, sobre los requisitos mínimos de seguridad en túneles de carretera establece la necesidad de profundizar en las características y prestaciones a exigir para los sistemas informáticos de control de ventilación en túneles tanto para las situaciones de servicio como de incendio.

En general, este tipo de sistemas tienen como objetivo fundamental lograr la reducción de los tiempos de respuesta por parte de los sistemas, y del personal de explotación, a la vez que aportar la mayor flexibilidad posible en las pautas de actuación manuales y automáticas.

Sin embargo, las aplicaciones informáticas a implementar precisan tener en cuenta las diferencias en las tipologías de los sistemas de ventilación y las condiciones distintas que se pueden dar en la explotación del túnel, como por ejemplo, el tráfico denso o fluido en el interior del túnel en caso de incidente. Esto requiere estrategias de ventilación complejas que en algunos casos pueden ser predefinidas en el sistema de control.

Con el objetivo de optimizar el funcionamiento de la ventilación es posible desarrollar algoritmos de control que establecen actuaciones sobre los distintos equipos en función de las condiciones previas al inicio del incidente pero también la evolución de las mismas durante el mismo.

En consecuencia, el presente artículo intenta reflejar las tendencias y alternativas que puedan contemplarse para el control de los humos en caso de túneles planteados desde un punto de vista tanto teórico, en función de las recomendaciones internacionales, como práctico al incorporar resultados de medida in-situ obtenidas en la verificación de sistemas de este tipo implementados sistemas de control de túneles en explotación.

**Palabras clave:** *Real Decreto 635, sistemas control, ventilación, algoritmos, ensayos*

## 1 INTRODUCCIÓN

A raíz de los graves accidentes acaecidos en la última década en túneles carreteros de Europa (Tauern, Mont Blanc, San Gotardo, etc.), la sensibilidad social acerca del nivel de seguridad exigible en los túneles de carretera ha aumentado considerablemente. Prueba de ello son las cada vez más exigentes normativas que obligan a incluir mayores y mejores equipamientos de seguridad.

En este sentido, en 2004 el Consejo Europeo elaboró la directiva 2004/54/CE con ánimo de homogeneizar y sentar una base común con respecto al nivel mínimo de seguridad exigible a los túneles situados en carreteras de la llamada red transeuropea. En España, el Real Decreto 635/2006 de aplicación exclusiva a la red de Carreteras del Ministerio de Fomento (Ref. [11.]) constituye la transposición de dicha directiva al ordenamiento jurídico nacional.

Esta Normativa clasifica los túneles existentes atendiendo a una serie de parámetros clave entre los que caben citar la longitud, los niveles de tráfico, el tipo de circulación (unidireccional o bidireccional) y la afectación por entorno urbano. Así, para cada categoría establece unos requisitos de seguridad (medidas y sistemas) a disponer en el túnel. Dentro del conjunto de medidas, además de las tradicionales instalaciones de seguridad (ventilación, iluminación, protección frente a incendios, etc) se hace especial mención a la necesidad de disponer de sistemas informáticos de extracción de humos.

Este aspecto viene a reflejar la inquietud cada vez mayor que existe, en el ámbito de las medidas de seguridad contra incendio, en los procesos activos de control de humos mediante la gestión continua del sistema de ventilación.

En efecto, es reconocido que la magnitud de la velocidad del aire en el punto de fuego juega un papel fundamental a la hora de controlar la evolución de la nube de humos, principal causante de las víctimas en incendios de túneles, por lo que es preciso mantener controlada la corriente longitudinal en el túnel durante todo el desarrollo del incendio. Es en este punto donde contar con algoritmos automáticos de control puede significar una ventaja decisiva en el tratamiento del incendio.

Actualmente, **el control automático de la ventilación en servicio suele estar adecuadamente tratado**, empleándose profusamente diversos algoritmos que de una manera u otra accionan los equipos de ventilación tratando de mantener en todo momento las mejores condiciones ambientales en el interior del túnel. Aunque los algoritmos basados en intervalos constituyen la opción más sencilla y probada en la actualidad (véase por ejemplo la Ref. [3.]), desde hace ya varios años se están empleando alternativas más complejas, basadas en la medida de los niveles de tráfico antes de su entrada al túnel, el empleo de controladores PID o la aplicación de reglas basadas en lógica borrosa (Ref. [4.])

Sin embargo, en lo referente al control de la ventilación en caso de incendio no existe todavía un esquema generalizado. No obstante, algunas propuestas han sido puestas en práctica. En la Ref. [5.] pueden encontrarse recomendaciones y generalidades de cara a la implementación y diseño de algoritmos de control de la corriente longitudinal, mientras que existen numerosas referencias de experiencias prácticas en otros países europeos como Austria o Francia (ver Ref. [6.], [7.], [8.] y [9.]).

A nivel nacional son también múltiples las aplicaciones reales en túneles en explotación en las que los autores han participado en todas las fases de desarrollo del sistema de ventilación y su control: **dimensionamiento** del sistema de ventilación, **definición de las estrategias y criterios** de actuación, **desarrollo de modelos numéricos** para definir las pautas de actuación específicas a implementar en el sistema de control, propuesta de un **esquema de control general** en caso de incendio, **especificación de los algoritmos** de control a implementar, **apoyo en la implementación** de las aplicaciones y, finalmente, **la realización de las pruebas de puesta en marcha y verificación en campo**.

En el presente artículo, no pudiendo abordar en la profundidad deseada todos estos aspectos, se ha procurado presentar las principales ideas partiendo desde un enfoque conceptual hasta la presentación de experiencias prácticas y medidas en campo.

## 2 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN EN CASO DE INCENDIO

Hablando en términos generales, las estrategias de ventilación en caso de incendio dependen fundamentalmente de dos factores esenciales: el sistema de ventilación instalado en el túnel y el estado del tráfico en el momento de producirse el incendio.

En el caso de túneles ventilados longitudinalmente con tráfico unidireccional, si la circulación era fluida antes del incidente, la tendencia actual (véase a modo de ejemplo las Refs. [1.], [5.] o [10.]) recomienda generar una corriente longitudinal de aire en el sentido del tráfico, de forma que el humo sea expulsado por la boca de salida. Esta estrategia es únicamente recomendable cuando aguas abajo del punto de fuego no se encuentran vehículos detenidos, tal como se muestra en la Fig. 1. Para evitar que los humos retrocedan aguas arriba del incendio, donde necesariamente habrá vehículos detenidos, es preciso que la velocidad del aire alcance al menos un valor mínimo, habitualmente denominada 'velocidad crítica'.

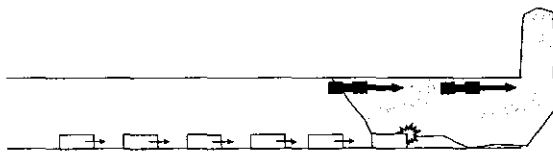


Fig. 1. Estrategia para ventilación longitudinal y tráfico fluido

Por su parte, en el caso de túneles ventilados longitudinalmente con tráfico bidireccional, o unidireccional congestionado, la estrategia anteriormente indicada deja de ser recomendable, ya que implicaría impulsar los humos del incendio sobre usuarios del túnel. En ese caso lo que se busca es facilitar la estratificación de los humos, de forma que se favorezca la evacuación de los usuarios del túnel y el acceso de los servicios de emergencia (Fig. 2). Para ello, la ventilación longitudinal debe ser accionada de forma que compense la corriente de aire existente, manteniendo ésta en valores reducidos.

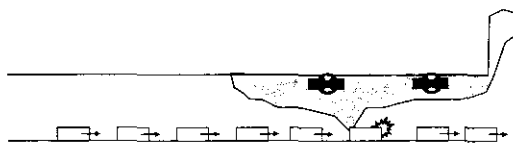


Fig. 2. Estrategia para evacuación en ventilación longitudinal y tráfico gestionado o bidireccional

### 3 ESQUEMA GENERAL DE CONTROL

Durante el funcionamiento en servicio una de las mayores preocupaciones es la utilización de un sistema de control que, a partir de las capacidades de la instalación permita un correcto mantenimiento de los niveles de confort y seguridad para el usuario. Para ello es preciso emplear procedimientos de control robustos y fiables teniendo siempre en cuenta el interés de la reducción de los gastos de explotación.

El equilibrio entre estos dos objetivos es difícil de predecir de una forma teórica siendo por tanto imprescindible que el sistema sea parametrizable y por tanto, configurable a partir de la experiencia recogida en las fases de puesta en marcha y el propio servicio del túnel.

En los escenarios de incendio el objetivo principal es la seguridad de los usuarios, para lo cual es preciso conseguir el mayor control posible de la nube de contaminantes generada.

Para cumplir los objetivos expuestos se propone la utilización de distintas etapas de control que se pueden agrupar en las siguientes categorías:

1. Funcionamiento en situación de servicio
2. Detección, validación y localización de la incidencia
3. Actuaciones de seguridad en caso de incendio: prealerta
4. Selección de la pauta de actuación en caso de incendio
5. Actuaciones de control continuo de la corriente longitudinal
6. Expulsión de los humos
7. Reestablecimiento de la incidencia

Todas estas etapas deben estar integradas en el sistema global de control del resto de instalaciones con el objetivo de optimizar el comportamiento global del túnel.

Siguiendo este planteamiento, el esquema general de control (Fig. 2), debe ser complementado con la información anterior.

En cualquier caso no se recomienda emplear sistemas completamente autónomos en los que la intervención humana sea innecesaria, sobre todo teniendo en cuenta el razonable nivel de supervisión de los túneles.

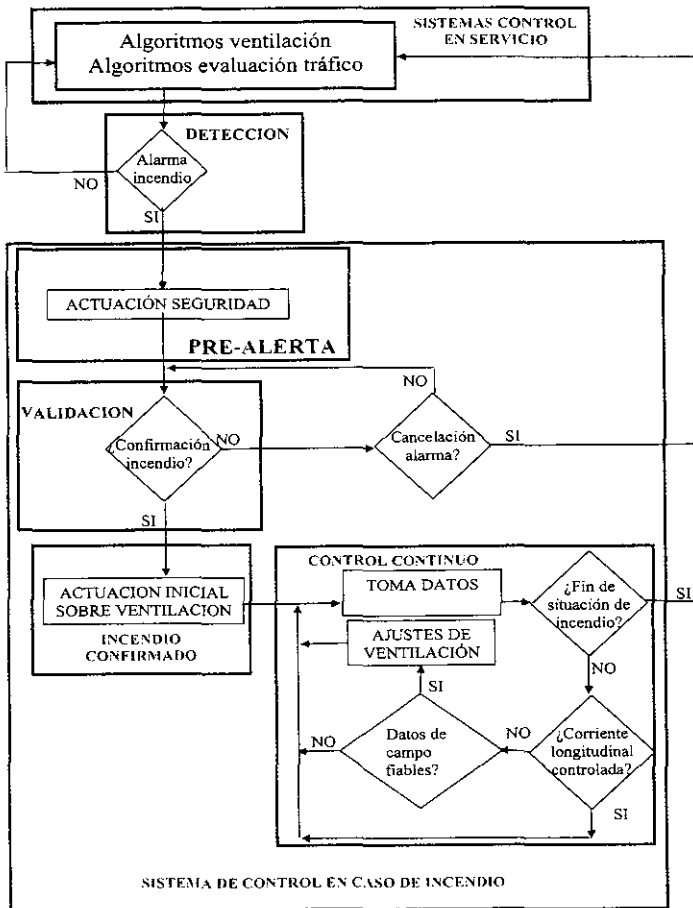


Fig. 3. Esquema general de control de la ventilación en túneles de carretera

Este punto es especialmente importante en túneles donde puedan darse retenciones donde se recomienda actuar según tres fases:

- **Fase 1: Apoyo a la evacuación.**

Durante los primeros momentos del incidente, en caso de que se tenga retención de vehículos en el tubo afectado del túnel, no es recomendable expulsar los humos aguas abajo del foco sino que es preferible intentar mantener una velocidad moderada del aire en la zona del foco en el sentido del tráfico. De esta forma se busca mantener en la medida de lo posible la estratificación de la nube de humos otorgando mayor tiempo de escape a los usuarios de los vehículos. Esta actuación, que a priori puede parecer sencilla, requiere de procesos de control complejos, como se describirá posteriormente.

- **Fase 2: Expulsión de humos.** Una vez los vehículos situados aguas abajo del foco han abandonado el túnel (o han sobrepasado la ubicación del pozo) es conveniente incrementar la velocidad aguas arriba del foco. De esta forma se busca evitar el retroceso de la capa de humos lo que aporta la máxima seguridad en todas las condiciones de ventilación.

Esta es la situación preferible que, en caso de no darse congestión en el túnel debe adoptarse como actuación recomendable.

- **Fase 3: Actuaciones excepcionales servicios emergencia**  
Normalmente, como complemento a las actuaciones anteriores es conveniente implementar en el sistema de control una serie de actuaciones, denominadas excepcionales, que conllevarán el encendido de la ventilación en el sentido deseado (hacia una u otra boca) de una forma automática bajo petición desde el sistema de control.

Este tipo de actuaciones reducen el tiempo de intervención en caso de que sea solicitada alguna de estas actuaciones por los servicios de emergencia.

No obstante, es conveniente disponer de un conjunto de sistemas automáticos que permitan reducir los tiempos de actuación y optimizar el comportamiento del sistema, tal como se describen a continuación.

## 4 SISTEMAS DE CONTROL APLICADOS A UN TÚNEL UNIDIRECCIONAL.

### 4.1 Descripción de la infraestructura

El túnel de estudio está formado por dos tubos con tráfico unidireccional y longitud en torno a los 2000 metros pero con retención de vehículos en el interior del túnel con una cierta frecuencia, lo que ha condicionado el diseño del sistema de control de ventilación.

En cuanto a los sistemas de seguridad del túnel, debido a los elevados niveles de tráfico y longitud considerable, dispone de un alto nivel de supervisión (centro de control permanente) y alto grado de equipamiento que incluye, además de muchos otros no directamente relacionados con la ventilación, de detector lineal de incendios, sensores de CO y opacidad, numerosos anemómetros interiores, megafonía, barreras, y sistemas DAI (detección automática de incidentes) y CCTV.

## 4.2 Funcionamiento en servicio

Durante el funcionamiento normal de las instalaciones el sistema de control monitoriza constantemente los niveles de CO y opacidad en el interior del túnel. Un algoritmo de control definido a intervalos gobernará el funcionamiento de los aceleradores. En la Tabla 2 se muestran a continuación los umbrales considerados en el funcionamiento en servicio.

Umbrales	Conc. CO (ppm)	Opacidad ( $m^{-1}$ )
$U_{CO_1}^{CO}, U_{OP_1}^{OP}$	20	$1.5 \times 10^{-3}$
$U_{CO_2}^{CO}, U_{OP_2}^{OP}$	40	$2.5 \times 10^{-3}$
$U_{CO_3}^{CO}, U_{OP_3}^{OP}$	75	$5 \times 10^{-3}$
$U_{CO_4}^{CO}, U_{OP_4}^{OP}$	150	$7 \times 10^{-3}$

Tabla 2. Umbrales de contaminantes para el control de la ventilación en servicio

Con el fin de atenuar las fluctuaciones temporales de las medidas, se efectúa un alisado temporal de los registros de cada sensor. Finalmente, las decisiones se toman considerando un valor representativo del túnel, obtenido para cada período de integración a partir de los valores alisados de los aparatos de medida.

Por último, en función del umbral en el que se encuentren los valores representativos, se conectará un determinado número de aceleradores, siempre en el mismo sentido que el tráfico, con el fin de diluir los contaminantes, proporcionando así las mejores condiciones ambientales posibles.

Paralelamente, se evalúa el estado del tráfico en el interior del túnel por medio de las alarmas del sistema DAI y de las espiras aforadoras. El estado del tráfico no interviene en la regulación en servicio; sin embargo, jugará un papel fundamental en las actuaciones de incendio, tal como se verá posteriormente.

## 4.3 Funcionamiento en incendio

En caso de producirse una detección de incendio o de solicitarse manualmente desde el puesto de operador, el sistema de control pasa automática e inmediatamente a modo de incendio. En este punto es importante destacar que en el túnel se emplea un novedoso sistema de tratamiento de las señales de detección. En primer lugar, la generación de alarmas no se reduce a los detectores de incendio o sensores de CO y opacidad, sino que también se han integrado determinadas alarmas del sistema DAI dentro de la lógica de la detección. En segundo lugar, no sólo se considera un valor umbral para los detectores de CO y opacidad, sino que también fuertes gradientes temporales son evaluados.

Con todo ello se calcula un Índice de Detección, que indica las localizaciones de incendio más probables de acuerdo con las señales recibidas. Esta información se muestra al operador en caso de incendio, facilitando así el proceso de toma de decisión.

En cualquier caso, una vez se produce la detección de incendio, el sistema aplica las medidas precautorias establecidas (entrada en prealerta). En este caso, la prealerta implica la parada de la ventilación de ambos tubos. En caso de que la alarma de incendio sea verdadera, se continúa con el resto de actuaciones predeterminadas.

Como se indica en el esquema general, dentro de la secuencia de incendio la primera acción a ejecutar consiste en las actuaciones iniciales. En términos generales, la pauta inicial en el tubo siniestrado consistirá en la conexión de un determinado número de aceleradores en el sentido del tráfico en función del estado del mismo. Dependiendo de esto, la actuación buscada consistirá en favorecer la corriente longitudinal para impulsar los humos por la boca de salida (si tráfico fluido) o por el contrario, mantener una velocidad de aire reducida que facilite la estratificación de los humos y, con ello, la evacuación de los usuarios.

Con este fin está diseñado un juego de pautas iniciales, en función de la posición del incendio y del estado del tráfico estimado en el momento de producirse el incidente, calculado durante el funcionamiento en servicio. Si el estado del tráfico es fluido, la velocidad longitudinal buscada será de 3.5 m/s, reduciéndose a 2 m/s en caso de tráfico denso y a 1 m/s en caso de tráfico congestionado. En cualquier caso, el sistema automático de estimación de tráfico únicamente propone al operador un estado del mismo, correspondiendo a éste la decisión final a tomar.

Finalmente, en el tubo no siniestrado se conectan varios aceleradores en sentido contrario al tráfico con objeto de prevenir recirculación de humos de un tubo al otro.

#### **4.4 Control continuo de la velocidad del aire**

La segunda fase de las actuaciones previstas para incendio consiste en el control de la corriente longitudinal. El incendio, en su evolución, modifica sustancialmente las condiciones en el interior del túnel. Esto hace que, por lo general, la pauta inicial no sea la opción más adecuada según transcurre el tiempo y el incendio se desarrolla. En el presente caso estas consideraciones, sobre todo por las distintas condiciones de tráfico que pueden existir.

Con este motivo se ha desarrollado un algoritmo de control continuo, cuya misión consiste en mantener el control de la corriente longitudinal, favoreciendo así la evacuación de los usuarios o la expulsión de los humos por la boca de salida del tráfico.



Dos son los parámetros fundamentales del sistema de control continuo: la velocidad del aire en el túnel y la velocidad objetivo a la cual se desea hacer tender aquella. En el caso del presente túnel, el cálculo de la velocidad del aire en el punto de incendio puede realizarse de manera directa, como promedio de los diferentes anemómetros disponibles. Sin embargo, no resulta recomendable emplear todos los anemómetros instalados en el túnel para calcular la velocidad media, ya que ciertos medidores se encontrarán afectados por ventiladores conectados o por la capa de humos existente en el entorno del fuego. Teniendo esto en cuenta, el cálculo de la velocidad media se realiza en cada instante teniendo en cuenta únicamente los anemómetros considerados representativos, según criterios de cercanía al foco y a aceleradores conectados.

Respecto a la velocidad objetivo, se determinará teniendo en cuenta la evolución del tráfico en la zona situada aguas abajo del foco: 3.5 m/s para tráfico fluido, 2 m/s para tráfico denso y 1 m/s para tráfico congestionado. El carácter turbulento del flujo y la incertidumbre de los equipos de medida no recomienda la utilización de una consigna fija. En estas circunstancias, el comportamiento del sistema de control sería fuertemente inestable.

En su lugar se propone la utilización de consignas de velocidad no definidas por un valor concreto sino por un intervalo o banda de tolerancia que comprenda al valor objetivo, las cuales reducen su amplitud según avanza el tiempo de incendio (véase Fig. 4 (a)).

Para la evaluación del estado del tráfico se empleará un algoritmo específico, que en función de las alarmas del sistema DAI indica el estado del tráfico en la sección comprendida entre el punto de fuego y la boca de salida del túnel. Al igual que en el caso anterior, el algoritmo propone al operador un estado del tráfico, debiendo ser validado explícitamente por éste.

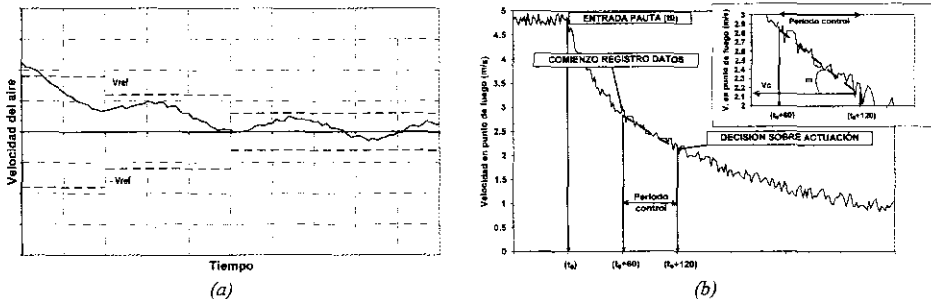


Fig. 4. (a) reducción temporal de las bandas de tolerancia; (b) ejemplo de cálculo de las variables de decisión

El algoritmo de control implementado es de tipo predictivo-correctivo, teniendo como magnitudes de decisión la velocidad media del túnel y la tendencia mostrada durante sucesivos periodos de control. Las citadas magnitudes de decisión se calculan al final de los periodos de control mediante ajuste lineal, para mitigar el efecto de las fluctuaciones temporales de carácter aleatorio. En la Fig. 4 (b) puede apreciarse un ejemplo del citado cálculo.

Finalmente, con los valores obtenidos para las variables de control se toma una decisión de accionamiento de la ventilación, siguiendo un esquema predeterminado recogido en una tabla de actuaciones predeterminada, un ejemplo de la cual se muestra en la Tabla 3.

ACTUACIONES CORRECCIÓN VELOCIDAD					
Escenario	Sentido del flujo de aire	Tendencia velocidad aire	Relación Vest/Vref	Sentido funcionamiento ventiladores en marcha	ACTUACIÓN
46	Vest < 0	m > 0	Vest   >   Vref	A favor del tráfico	Arranque 1 vent A favor del tráfico
47	Vest < 0	m > 0	Vest   >   Vref	En contra del tráfico	Desconexión 1 ventilador
48	Vest < 0	m > 0	Vest   >   Vref	PARADOS	Arranque 1 vent A favor del tráfico

Tabla 3. Ejemplo de tabla de actuaciones de control continuo

## 5 SISTEMAS DE CONTROL APLICADOS A UN TÚNEL BIDIRECCIONAL.

En el presente apartado se describirán los sistemas y algoritmos de control aplicados al caso particular de un túnel bidireccional de montaña equipado con un sistema de ventilación semitransversal.

### 5.1 Descripción de la infraestructura

El túnel de estudio presenta una longitud de 5230 m, con un perfil ascendente en rampa y con una diferencia de cotas entre las bocas es de aproximadamente 196 m, lo que origina en un importante periodo del tiempo situaciones de tiro natural significativo. La circulación se desarrolla en doble sentido.

El sistema de ventilación instalado es de tipo semitransversal, organizado en cuatro cantones de longitudes aproximadas de unos 1250 metros y estaciones de ventilación situadas en los emboquilles del túnel. Cada estación incorpora dos ventiladores de aire fresco y dos de extracción, reversibles, uno para cada sector, dispuestos en paralelo, con un caudal nominal de 140 m<sup>3</sup>/s. Los conductos de ventilación, situados en el falso techo, cuentan con una serie de trampillas cada 50 m que permiten que por cada cantón se pueda insuflar aire fresco o extraer humos en caso de incendio.

Adicionalmente, para facilitar el control de los humos en situación de incendio se ha dispuesto una serie de aceleradores de chorro en la parte central del túnel, en una longitud de 200 metros en la que se ha eliminado el conducto sobre falso techo. En total existen 9 aceleradores, dispuestos en tres grupos que podrán ser accionados independientemente en función de las condiciones existentes en el interior del túnel al producirse el incendio. En la Fig. 5 puede apreciarse un esquema global del sistema de ventilación del túnel.

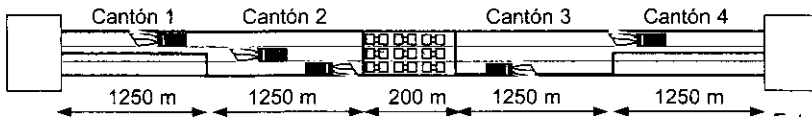


Fig. 5. Esquema general del sistema de ventilación

## 5.2 Funcionamiento en servicio

Volviendo al esquema general de control presentado en el esquema general, durante el funcionamiento habitual del túnel el sistema de control se encuentra trabajando en servicio. Todos los cantones funcionan en modo inyección, trabajando a un régimen variable en función de los niveles de CO y opacidad registrados en el interior del túnel. Finalmente, la inyección de aire se realiza de manera distribuida por toda la longitud del túnel, por lo que todas las trampillas estarán abiertas a fin de permitir el aporte de aire fresco en todo el túnel. Paralelamente, se efectúa un cálculo estimativo del nivel de diferencia de presión entre las bocas del túnel. Este valor, irrelevante durante el funcionamiento en servicio, será de gran importancia en caso de incendio, ya que, como se verá más adelante, juega un papel fundamental en las actuaciones iniciales sobre ventilación.

El sistema desarrollado para la estimación de la diferencia de presión entre bocas se basa en la resolución, en régimen permanente, de la ecuación de equilibrio aerodinámico del túnel, ecuación (1):

$$\Delta p_{jet} + \Delta p_{roz} + \Delta p_{sing} + \Delta p_{traf} + \Delta p_{ext} = 0 \quad (1)$$

en donde los términos representados denotan la contribución de los aceleradores, de las pérdidas de carga por rozamiento y singularidades, el efecto pistón del tráfico y finalmente la diferencia de presión externa, incógnita del problema y valor que equilibra la ecuación. La expresión (1) se evalúa empleando valores instantáneos de intensidad de tráfico, velocidad de aire, etc., realizándose a continuación un alisado con el fin de amortiguar la importancia de las incertidumbres presentes en el proceso de cálculo. Este cálculo se efectúa constantemente mientras el sistema se encuentra en servicio, de forma que en caso de incendio esté disponible un valor alisado, representativo del nivel de diferencia de presión existente.

## 5.3 Funcionamiento en incendio

En caso de producirse una detección de incendio, por medio del detector lineal o de los sensores de CO y opacidad, o de solicitarse manualmente desde el puesto de operador, el sistema de control pasa automática e inmediatamente a modo de incendio. La primera actuación consiste en lo que se denomina 'prealerta' o actuaciones de seguridad, encaminadas a poner a la instalación en modo de espera mientras se confirma o no la existencia del incendio. En el caso particular del túnel de estudio, las actuaciones de prealerta implican la parada automática del sistema de ventilación.

Durante la prealerta, los operadores deben localizar el origen de la alarma mediante el sistema CCTV, con el fin de evaluar si debe o no ser aceptada. No obstante, para cubrir el supuesto de que no se encontrara nadie supervisando el sistema en el momento de la recepción de la alarma, existe una temporización (en función de la verosimilitud del sistema que generó la alarma) que permitiría el paso automático a incendio una vez transcurrida.

Una vez confirmada la situación de incendio el sistema de control establece la actuación inicial sobre la ventilación, esto es, la pauta de actuación inicial considerada óptima para el escenario de incendio en los primeros instantes del desarrollo del fuego. Esta actuación dependerá de la posición en la que se ha detectado el incendio y del nivel de diferencia de presión calculado en el momento de detectarse el mismo. De manera general, la actuación inicial implicará la puesta en extracción del cantón o cantones afectados por el incendio; las actuaciones con los cantones no afectados tienen por objeto facilitar el control de la corriente longitudinal, de forma que se favorezca el confinamiento de la nube de humos en torno a los cantones en extracción.

Paralelamente, se conectará un número predeterminado de aceleradores en función del nivel de diferencia de presión calculado, con el fin de contrarrestar el tiro natural existente. En este punto es preciso indicar que las altas incertidumbres presentes en la estimación del tiro natural (sobre todo provenientes del término de tráfico) aconsejan agrupar los valores esperables de diferencia de presión en torno a niveles (alto sentido norte, medio sentido sur, etc.) en los cuales la actuación sobre la ventilación longitudinal sea idéntica.

#### **5.4 Control continuo de la velocidad del aire**

La segunda fase de las actuaciones sobre la ventilación en caso de incendio confirmado corresponde al control continuo de la corriente longitudinal. La necesidad de proceder a este ajuste estriba en que la evolución del incendio modifica sensiblemente las condiciones en el interior del túnel. Esto hace que, por lo general, la pauta inicial no sea la opción más adecuada según transcurre el tiempo y el incendio se desarrolla.

En el caso túneles equipados con sistema de ventilación semitransversal y con fuerte pendiente estas consideraciones son si cabe aún más importantes, puesto que el desplazamiento del punto de cero de la velocidad podría conllevar consecuencias sumamente perjudiciales.

En el caso de los túneles con ventilación semitransversal, el control continuo es algo más complicado que en el caso longitudinal, ya que, de manera general, dependerá no sólo de las condiciones de presión externas, de tráfico y del efecto chimenea, sino que también influirá la posición del incendio y el esquema de funcionamiento de la ventilación transversal.

Otra diferencia remarcable con respecto al caso longitudinal es que aquí la velocidad objetivo es única (cero), ya que en todo momento se pretende reducir la velocidad del aire en el entorno del fuego a la vez que se genera un perfil convergente de velocidad.

Para solventar este problema se propuso el empleo de un método indirecto que permita la estimación de la velocidad del aire en el entorno del foco:

1. Determinación de la ley de distribución longitudinal de caudal, partiendo de las condiciones de funcionamiento **reales** de la ventilación de cada uno de los cantones (modo de funcionamiento, régimen y apertura de exutorios).
2. Ajuste por mínimos cuadrados de dicha ley a las lecturas **reales** de velocidad obtenida con los distintos anemómetros del túnel.
3. Estimación de la velocidad del aire en el foco empleando la distribución ajustada

De esta forma se obtiene una aproximación razonable a la verdadera velocidad en ese momento en el punto de fuego. En la Fig. 6 se muestra un ejemplo de este procedimiento.

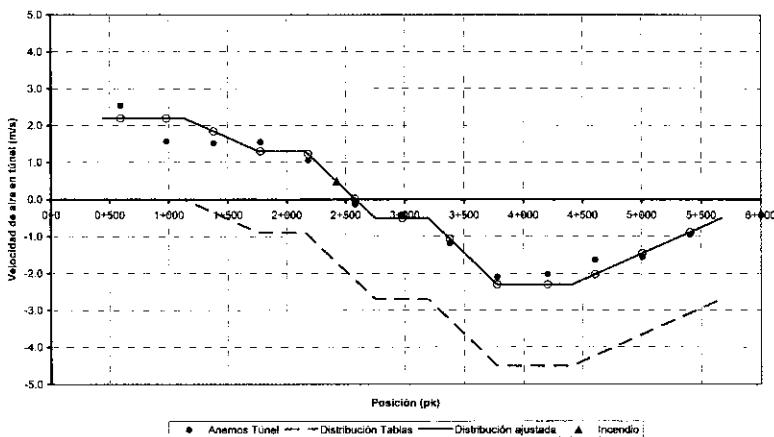


Fig. 6. Metodología de ajuste de la ley de distribución de caudal

Efectuando este cálculo en diversos instantes de tiempo es posible obtener una evolución temporal de la velocidad del aire en el punto de fuego. Al igual que para el caso longitudinal, al término de los períodos de control se efectuará un ajuste lineal de la evolución temporal, obteniéndose así tanto la velocidad en el instante de control como la tendencia de la misma. Finalmente, sobre estos cálculos se aplicarán las mismas reglas de control e idénticas bandas de tolerancia definidas para el caso de túnel longitudinal (apartado 0).

## 5.5 Ensayos de verificación y puesta en marcha

Con objeto de verificar el comportamiento de los sistemas de control integrados en el túnel, se efectuó una campaña de ensayos previa a la apertura, complementados con un ensayo de humos fríos. En la Fig. 7 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en los ensayos previos. En este caso particular se simuló en el sistema de control un valor erróneo de diferencia de presión, de forma que el sistema de control continuo fuese probado en una situación altamente desfavorable. En color rojo se muestran las actuaciones automáticas sobre los aceleradores que, partiendo de una actuación inicial no adecuada (así se decidió en la planificación de este ensayo concreto) modifica su situación, apagándolos uno a uno para proceder a encender en sentido contrario los necesarios (en este caso 4 unidades).

En la figura puede observarse la evolución de la velocidad del aire en la ubicación del foco comprobarse cómo inmediatamente el sistema de control compensa el error introducido en la pauta inicial, llevando la velocidad en el punto de fuego hasta la banda de tolerancia admitida.

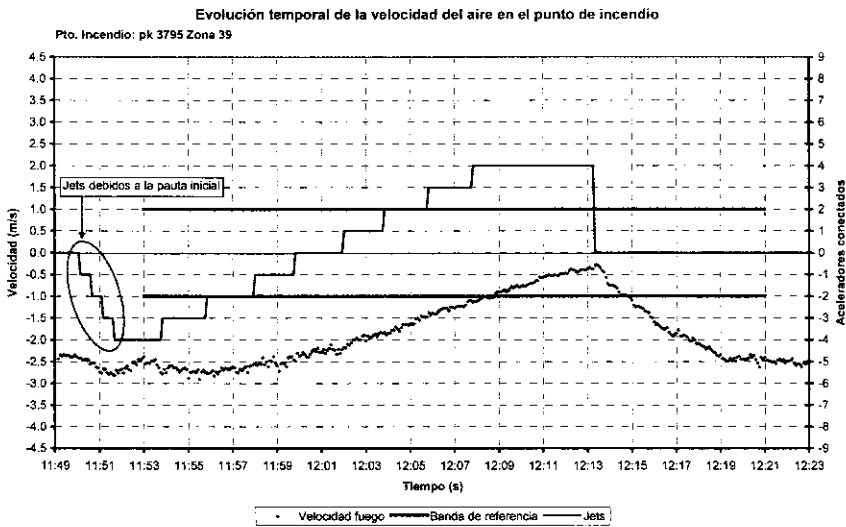


Fig. 7. Actuaciones del sistema de control continuo en los ensayos aerodinámicos

Este tipo de ensayos pueden complementarse con los de humos fríos, que permiten adicionalmente observar el desplazamiento de la nube de humos. Así, en la Fig. 8 se adjunta la evolución temporal de la velocidad del aire en el punto de fuego, comparando la estimación según el procedimiento anteriormente indicado y el registro directo con una sección de medida. Asimismo, también se puede observar el desplazamiento de la nube de humos registrado mediante el sistema de grabación.

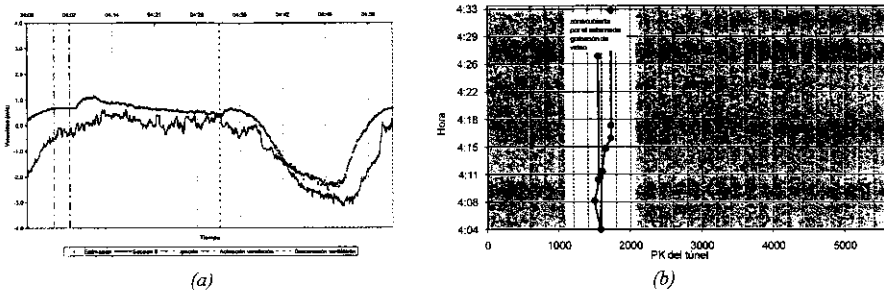


Fig. 8. (a): velocidad en punto de fuego (b) evolución de la nube de humos

Puede apreciarse cómo la pauta inicial, con la ayuda del sistema de control continuo, mantuvo confinada la nube de humos en una longitud inferior a los 300 m durante el ensayo. Esto favoreció la estratificación de los humos, tal como puede apreciarse en la Fig. 9.



Fig. 9. Desarrollo del ensayo de humos

## 6 CONCLUSIONES

La entrada en vigor del Real Decreto 635 del año 2006, sobre los requisitos mínimos de seguridad en túneles de carretera establece la necesidad de disponer de sistemas informáticos de control de ventilación en túneles tanto para las situaciones de servicio como de incendio.

En general, este tipo de sistemas tienen como objetivo fundamental lograr la reducción de los tiempos de respuesta por parte de los sistemas, y del personal de explotación, a la vez que aportar la mayor flexibilidad posible en las pautas de actuación manuales y automáticas.

Sin embargo, es fundamental que **las aplicaciones informáticas a implementar** tengan en cuenta las diferencias en las tipologías de los sistemas de ventilación y las condiciones distintas que se pueden dar en la explotación del túnel, como por ejemplo, el tráfico denso o fluido en el interior del túnel en caso de incidente, así como las condiciones de tiro natural.

Esto requiere estrategias de ventilación complejas que en numerosos casos pueden ser predefinidas en el sistema de control y complementarse con algoritmos de control que establecen actuaciones sobre los distintos equipos en función de las condiciones previas al inicio del incidente pero también la evolución de las mismas durante el mismo.

El presente artículo plantea, desde el punto de partida global, las consideraciones a tener en cuenta en este tipo de sistemas mostrando algunas aplicaciones prácticas en túneles actualmente en explotación.

## REFERENCIAS

1. Fire and smoke control in road tunnels. PIARC Committee on Road Tunnels, World Road Association, 1999.
2. Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels. PIARC Committee on Road Tunnels, World Road Association, 2007.
3. CMM\_SPR\_03. Agosto 2002. Informe interno.
4. Marsault, M.-N., Apvrille, J.-M., Martin, J.-C. Contrôle Comande de la Ventilation. Experimentation Logique Floue. Rapport. Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), 2001.
5. Pospisil, P., Brandt, R. Smoke control in road tunnels. Conference Significance of Tunnels in Transport, 16-18 June 2005, Podbanské (Slovakia).
6. Wehner, M., Brandt, R., Simon, I. Optimal smoke extraction by controlling the longitudinal flow velocity using a punctual air supply or extraction. Fifth International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, 25-27 October 2004, London (U.K.).
7. Watlt, A. Safety measures for road tunnels-newest developments for the Plabutschunnel, Austria. 2<sup>nd</sup> Symposium on Tunnel Safety and Ventilation, 19-21 April 2004, Graz (Austria), pp 163-170.
8. Stroppa, W. Practical experience in ventilation design for longitudinal and semi transverse ventilation systems. 2<sup>nd</sup> Symposium on Tunnel Safety and Ventilation, 19-21 April 2004, Graz (Austria), pp 227-234.
9. Bettelini, M., Brandt, R., Riess, I. Progress in Tunnel Ventilation-The Mont Blanc Tunnel. AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress, 10-13 June 2001, Milano (Italy).
10. Sturm, P.J., Bacher, M., Brandt, R. Evolving needs of tunnel ventilation in a changing world. 4<sup>th</sup> Symposium on Tunnel Safety and Ventilation, 21-23 April 2008, Graz (Austria), pp 8-21.
11. Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en la red de carreteras del estado.



12. Ministère de l'intérieur et de l'aménagement du territoire-Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer. Circulaire Interministerielle n° 2006-20 du 29 Mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 m.