

Sistemas informáticos de control de ventilación en túneles

**Espinosa, I.; Maroño, J.L.; Fernández S.; I FFII-CEMIM
Del Rey, I.; Alarcón, E.; ETSII-Universidad Politécnica de Madrid**

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.

En consecuencia, el presente artículo intenta reflejar las tendencias y alternativas que puedan contemplarse para el control de los humos en caso de túneles, incorporando resultados de medidas in-situ obtenidas en ensayos de puesta en marcha en túneles actualmente en explotación.

Introducción

Como toda obra pública los túneles son infraestructuras esencialmente seguras en que los accidentes graves son sucesos raros aunque

despiertan alarma social, al ser inesperados y afectar a un número alto de usuarios.

Este efecto se ha visto incrementado en los últimos años, que han sido pródigos en accidentes con fuego en túneles de tráfico, lo que ha motivado la preocupación de los organismos encargados de velar por la seguridad en el transporte así como de los usuarios en general. Ello ha dado lugar a un renovado interés por todos los aspectos relacionados con la seguridad de lo que son buena prueba los numerosos grupos de trabajo y proyectos europeos relacionados.

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. [10.]) 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 cabe 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 aplicados a la 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.] y [8.]).

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.

Comportamiento de los humos en caso de incendio

Cuando se inicia un incendio, la temperatura se va incrementando paulatinamente, aumentando la cantidad de gases generados los cuales por efecto de la flotabilidad se elevan a la parte superior de la sección del túnel. Si el incendio se produjese al aire libre, el calor generado por el incendio se disiparía. Sin embargo, cuando el incendio se produce en recintos cerrados, los gases acumulados en las proximidades del combustible, con una temperatura elevada, emiten energía por radiación la cual contribuye a gasificar el combustible existente incrementando la temperatura del foco. Este proceso de re-alimentación del incendio por radiación lleva a un incremento muy importante de la temperatura en las proximidades del foco denominado llamarada (flash-over).

Sin embargo, la existencia de corrientes forzadas modifican las condiciones típicas de los recintos cerrados. Así la Figura 3 muestra esta situación del penacho arrastrando aire vecino así como la interferencia con un viento lateral provocado por la ventilación natural o artificial y con una superficie de cierre del espacio superior que impide el desarrollo vertical de la llama y el penacho y provoca la formación de un estrato de humo con el techo que se extiende

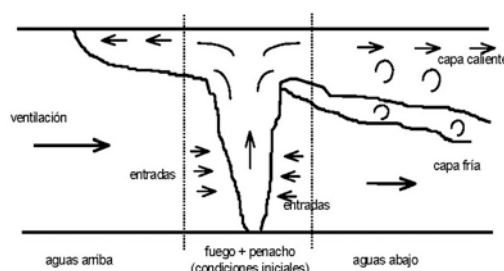


Figura 1. Esquema del desarrollo del incendio en túneles



Figura 2. Efecto de retroceso de los humos

en horizontal hasta que se enfría y se mezcla con la capa de aire limpio.

En función de las condiciones de la corriente de aire longitudinal existente en el túnel la distribución de la nube de humos se producirá en mayor o menor medida aguas arriba del foco produciendo el retorno (back layering) de la capa caliente de humos (Figura 2). Existe un determinado valor de velocidad longitudinal que produce la desaparición o reducción casi completa del retroceso de los humos si bien la situación de desestratificación aguas abajo es muy importante. El valor de velocidad que produce este efecto se conoce con el nombre de velocidad crítica.

Este modelo general de comportamiento depende en gran medida de la magnitud de la corriente longitudinal en el túnel. Así, cuando la velocidad del aire en el túnel es reducida, el movimiento del humo se produce a ambos lados pero en condiciones de estratificación hasta que, debido al enfriamiento, comienza a destruirse la capa situada en la altura del túnel.

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 [9.]) recomienda generar una corriente longitudinal de aire en el sentido del tráfico, de forma que el humo sea expulsado por la boca de salida.

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".

Esta estrategia es únicamente recomendable cuando aguas abajo del punto de fuego no se encuentran vehículos detenidos, tal como se muestra en la Figura 4 a.

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 (Figura 4 b). Para ello, la ventilación longitudinal debe ser accionada de forma que compense la corriente de aire existente, manteniendo ésta en valores reducidos.

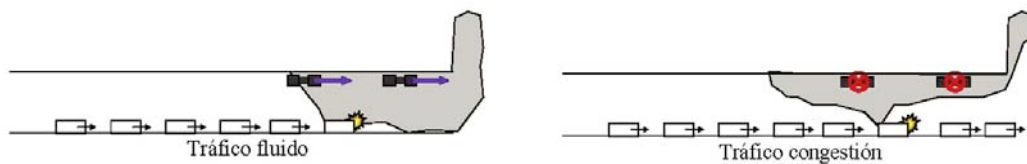
Esquema general de control

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



Figura 3. Influencia de la velocidad del aire en el comportamiento del humo

Figura 4. Estrategia para evacuación en ventilación longitudinal y tráfico congestionado o bidireccional



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.

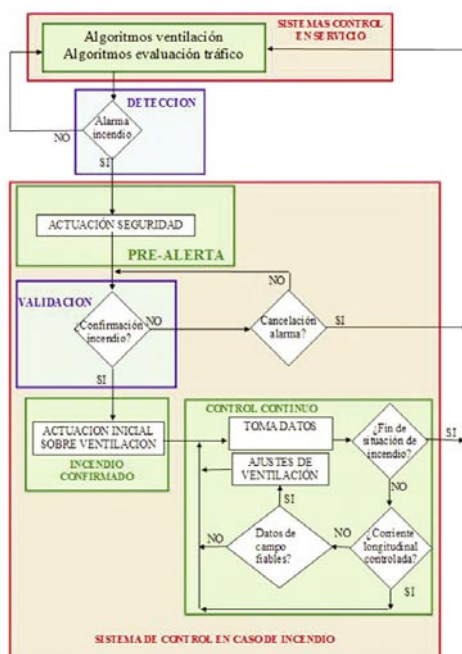


Figura 5. Esquema general de control de la ventilación en túneles de carretera

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 situación de servicio.

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 (Figura 4), 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.

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.

Puntos débiles en los sistemas de control

En los apartados anteriores se han expuesto algunos de los criterios generales a seguir en el desarrollo de los sistemas informáticos para el control de humos en caso de incendio. Sin embargo, las especificaciones detalladas a suministrar a los integradores de este tipo de sistemas deben contener un alto grado de detalle en los requisitos a implementar y las características de su desarrollo.

No obstante, incluso si las especificaciones teóricas son definidas en detalle, la programación e implementación de las aplicaciones e interfaces de operador “a medida” requiere partidas económicas significativas e importantes tiempos de desarrollo que no se suelen tener en cuenta en los proyectos.

Adicionalmente, la experiencia del integrador en el desarrollo de aplicaciones específicas de túneles y de sistemas de emergencia es crucial, ya que gran parte de los errores que se presentan habitualmente en la utilización de aplicaciones de gestión en caso de incendio se deben a “problemas típicos” que se encuentran con desafortunada frecuencia.

A continuación se describen algunos de los problemas relacionados con la gestión de aplicaciones informáticas en caso de incendio.

■ **Avalancha de alarmas:** al producirse un incendio en el túnel comienzan a recibirse, de forma prácticamente simultánea, multitud de alarmas procedentes de los sistemas de control con muy distinto grado de prioridad. Así, en túneles con alto grado de equipamiento suelen presentarse, entre otras:

- Alarmas del DAI (detección automática de incidentes) según se va realizando la frenada y parada de vehículos en el túnel.
- Alarmas de detección lineal de incendio.
- Alarmas de sensores de opacidad (y a veces de gases) por el movimiento del humo en el túnel.
- Señales de apertura de puertas o retiradas de extintor.
- Avisos de postes SOS.

El resultado de este proceso significa que el operador del centro de control recibe una cantidad de información difícilmente asimilable y, mucho menos, gestionable. Si bien este problema es de compleja resolución y el grado de entrenamiento y formación es muy importante, desde el punto de vista del desarrollo de la aplicación es posible implementar criterios que establezcan prioridades entre alarmas.

■ **Demanda de respuestas múltiples y complejas:** una vez el operador ha confirmado la existencia de un incendio en el túnel, tiene que realizar un gran número de actuaciones en muy breve espacio de tiempo (actuaciones de ventilación, iluminación,

cierre de túnel, llamada a servicios de emergencia, megafonía, respuesta a postes SOS, etc). Para facilitar esta tarea la aplicación debe estar desarrollada para plantear propuestas de actuación simples, evitando la utilización de ventanas y aplicaciones múltiples.

■ **Falta de robustez ante actuaciones inadecuadas:**

muy relacionado con el aspecto anterior, pero de enorme importancia, es la necesidad de que el sistema de control impida o dificulte la realización de actuaciones por el operador que puedan incrementar el riesgo en el túnel. Así, por ejemplo, la utilización de mensajes de doble confirmación (del tipo similar a la existente en las aplicaciones ofimáticas) para la cancelación de una alarma de incendio reducen el riesgo de cometer errores que alargan dramáticamente los tiempos de respuesta.

■ **Lentitud e inestabilidad del sistema informático:**

la avalancha de alarmas que se produce en caso de incendio, así como la generación de gran número de actuaciones desde la aplicación de control puede llevar a tiempos de ejecución sorprendentemente largos (del orden de las decenas de segundo). En el caso de las actuaciones de servicio estas ralentizaciones del sistema pueden resultar incómodas para el operador pero en caso de incendio estos tiempos generan dudas en el operador acerca del correcto funcionamiento del sistema lo que a su vez contribuye a que éste realice acciones posteriores que resulten desfavorables. Este tipo de problemas, detectables mediante las imprescindibles pruebas en real del sistema, pueden solventarse con información actualizada en las pantallas acerca de las actuaciones que van a ejecutarse y el estado de ejecución.

■ **Transferencia completa de responsabilidad al operador:**

si bien es evidente que la responsabilidad del operador en la gestión de este tipo de incidentes es enorme, las especificaciones del sistema de control deben definir claramente que actuaciones debe realizar los sistemas automáticos reduciendo en la medida de lo posible, el

traslado de la responsabilidad de estas decisiones al operador si los sistemas automáticos disponen de información para hacerlo. Así, por ejemplo, es muy difícil (por no decir imposible) lograr que un operador de consola (por muy completa que sea su formación y entrenamiento) sea capaz de lograr una velocidad en el túnel de entre 1 y 2 m/s mediante el encendido y desconexión de aceleradores.

■ **Ausencia de criterios en escenarios atípicos:**

aunque no es posible (pero deseable) contemplar en la redacción de especificaciones de un sistema de control todos los posibles escenarios que pueden darse en caso de incendio, es fundamental que sean contemplados y decidido el procedimiento (aunque sea manual y no automático) que se adoptaría en caso de producirse. En cualquier caso es preferible que la ocurrencia de un escenario “no probable pero posible” se haya tenido en cuenta evitando el incremento de los riesgos por actuaciones totalmente incorrectas. Algunos ejemplos de estas situaciones podrían ser: incendio simultáneo en dos tubos, fallo de comunicaciones entre túnel y centro de control, funcionamiento del túnel en modo de alimentación degradado e incendio simultáneo, explotación en tráfico bidireccional de un túnel unidireccional, etc)

■ **Imposibilidad de formación práctica al operador:**

a diferencia de lo que sucede con la gestión en situación de servicio donde el operador puede “practicar” con la aplicación durante la explotación habitual del túnel, en el caso de incendio el desencadenamiento de las actuaciones de incendio suele implicar el cierre del túnel, inadmisibles salvo en las pruebas específicas del sistema o la realización de simulacros.

Esta situación suele cubrirse con la elaboración de manuales teóricos de funcionamiento que muestran las “pantallas” que el operador se encontrará durante el desarrollo de un incidente de incendio. Sin embargo es fundamental que el operador pueda practicar con aplicaciones simuladas verificando la “reacción” del sistema en estas situaciones límites.

Algunos ejemplos prácticos

Túnel unidireccional con tráfico denso

El túnel de estudio está formado por dos tubos con tráfico unidireccional, cierta longitud y ventilación longitudinal con aceleradores pero en el que se producen retenciones de vehículos con cierta frecuencia en el interior del túnel.

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, la detección lineal de incendios, sensores de CO y opacidad, numerosos anemómetros interiores, CCTV y sistema DAI, etc.

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 (Ref. 4) gobierna el funcionamiento de los aceleradores.

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, el sistema de control 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 pero juega un papel fundamental en las actuaciones de incendio, tal como se verá posteriormente.

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 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 el tráfico es 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 en caso de tráfico denso.

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.

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.

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 trafico	Arranque 1 vent A favor del trafico
47	Vest < 0	m > 0	Vest > Vref	En contra del trafico	Desconexión 1 ventilador
48	Vest < 0	m > 0	Vest > Vref	PARADOS	Arranque 1 vent A favor del trafico

Tabla 1. Ejemplo de tabla de actuaciones de control continuo

El algoritmo de control implementado tiene como magnitudes de decisión la velocidad media del túnel y la tendencia mostrada durante sucesivos períodos 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 Figura 6 puede apreciarse un ejemplo del citado cálculo.

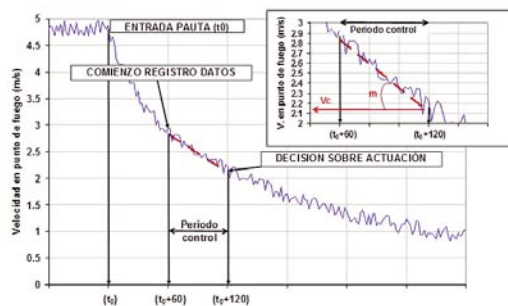


Figura 6. Ejemplo de cálculo de las variables de decisión

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 1.

Para la evaluación del estado del tráfico se emplea 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.

Túnel bidireccional

El túnel de estudio presenta una gran longitud (en torno a los 5 km), con un perfil ascendente en rampa y con una diferencia de cotas entre las bocas de unos 200 metros, 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 con cuatro cantones de ventilación y caudal nominal de 140 m³/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 la que se ha eliminado el conducto sobre falso techo.

Volviendo al esquema general de control ya descrito, 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:

$$\Delta P_{jet} + \Delta P_{roz} + \Delta P_{sing} + \Delta P_{traf} + \Delta P_{ext} = 0$$

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.

Una vez confirmada la situación de incendio el sistema de control establece la actuación preprogramada sobre la ventilación. 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.

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 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 semitransversal.

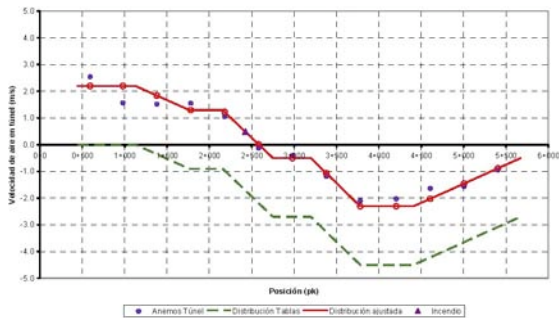


Figura 7. Metodología de ajuste de la ley de distribución de caudal

De esta forma se obtiene una aproximación razonable a la verdadera velocidad en ese momento en el punto de fuego. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de este procedimiento.

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 6).

Con objeto de verificar el comportamiento de los sistemas de control integrados en el túnel deben efectuarse campañas de ensayos previas a la apertura. Así, por ejemplo, en la Figura 8 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en los ensayos previos. En este caso particular se simuló en el sistema de

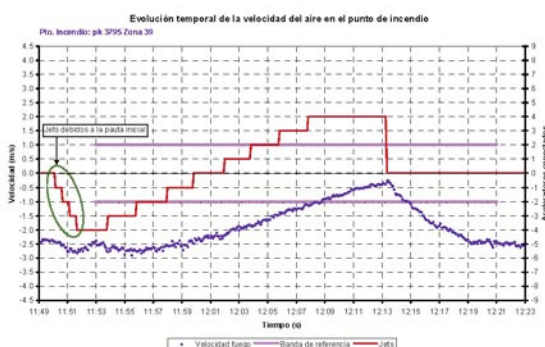


Figura 8. Actuaciones del sistema de control continuo en los ensayos aerodinámicos

control un valor erróneo de diferencia de presión, de forma que el sistema de control continuo fuese probado en una situación altamente desfavorable.

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.

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.

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. Stroppa, W. *Practical experience in ventilation design for longitudinal and semi transverse ventilation systems. 2nd Symposium on Tunnel Safety and Ventilation, 19-21 April 2004, Graz (Austria), pp 227-234.*
8. 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).*
9. Sturm, P.J., Bacher, M., Brandt, R. *Evolving needs of tunnel ventilation in a changing world. 4th Symposium on Tunnel Safety and Ventilation, 21-23 April 2008, Graz (Austria), pp 8-21.*
10. *Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en la red de carreteras del estado.*
11. *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.*