

CONTRASTE DEL DIMENSIONAMIENTO Y DEL CONTROL DE LA VENTILACIÓN INSTALADA EN LOS TÚNELES DE LA AP-1, VITORIA-EIBAR. RESULTADOS TRAS LA SIMULACIÓN Y PRUEBAS REALIZADAS

D. Ismael Corrales Toribio

*Ingeniero Jefe de Proyectos de Instalaciones
TEKIA, Ingenieros, S.A.*

1. Introducción

El presente artículo tiene por objeto dar a conocer los ensayos sobre los sistemas de ventilación realizados por TEKIA INGENIEROS, S.A. en los túneles de la Autopista AP-1 en el tramo Eskoriatza-Luko.

El proyecto, cuya metodología y resultados a continuación se abordan, surge de la necesidad de culminar la puesta en marcha del sistema de ventilación de los túneles de Zarimutz, Isuskitza y Luko, paso imprescindible para garantizar sus correctas prestaciones tanto en condiciones de servicio habitual como en caso de incendio.

2. Ensayos en campo, medio indispensable para contrastar la eficacia del sistema de ventilación

El sistema de ventilación supone un elemento fundamental dentro del equipamiento de seguridad de que consta un túnel. Interviene en condiciones normales de operación para garantizar una atmósfera saludable y de confort a los conductores, y en caso de incendio para controlar la nube de humos y facilitar la evacuación de los usuarios.

Debido a la importancia que se atribuye a este sistema, su peso durante la fase de ingeniería ha cobrado una especial relevancia en los últimos tiempos. Los diseños

han sufrido una evolución constante, en parte debido a las exigencias normativas y por otra al conocimiento acumulado y la aparición de nuevas herramientas de ingeniería, aumentando de manera significativa la contribución que aporta este sistema a la seguridad.

Por otra parte, un sistema adecuadamente dimensionado es tan solo un primer paso para una ventilación eficiente en un túnel. Tanto para la ventilación sanitaria como para la ventilación en caso de incendio son necesarios algoritmos que, incorporados a los sistemas de control, permitan el uso óptimo de los medios disponibles. Mayor detenimiento requiere la definición de pautas de actuación para el caso de incendio; está demostrado que si bien una adecuada gestión del sistema de ventilación ayuda a salvaguardar la integridad de las personas atrapadas en el interior del túnel, un incorrecto uso del mismo puede convertir un incidente con fuego en un trágico acontecimiento.

Sin embargo, cabe señalar que la fase de ingeniería (dimensionamiento del sistema junto con la definición de la lógica de la operación) no asegura por sí misma la consecución de los objetivos que a dicho sistema se le asignan. Resulta imprescindible una fase de puesta en marcha que incluya la realización de ensayos en campo.

Los ensayos en campo permiten, por un lado, contrastar que la capacidad del sistema de ventilación se corresponde con las exigencias de diseño, y por otro, verificar que la sistemática de control definida asegura los objetivos preestablecidos.

Resumiendo, son varias las etapas necesarias para la consecución de un proyecto integral de ventilación:

- Estudio teórico de dimensionamiento, que justifique el tipo y capacidad de ventilación necesaria en el túnel.
- Definición de las pautas de control (algoritmos), que detallen la casuística de operación tanto en condiciones habituales de servicio como en caso de incendio. Estas pautas necesariamente deberán integrarse en la aplicación de control.
- Ensayos de campo, los dos puntos anteriores deben ser refrendados por pruebas en el entorno real que avalen los resultados.

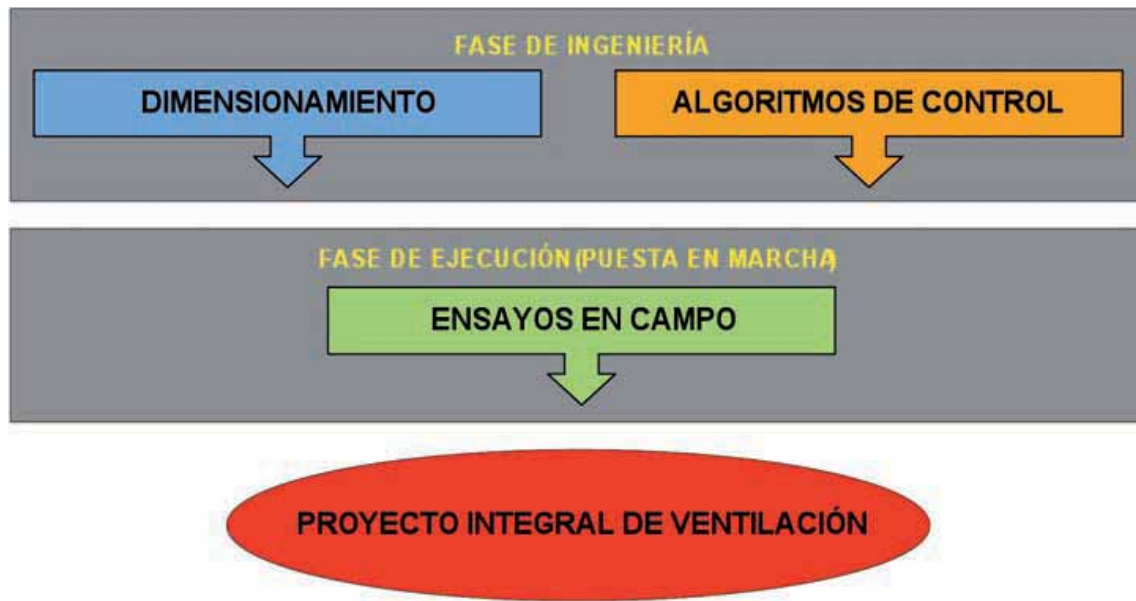


Fig 1. Etapas de un proyecto integral de ventilación

Por último, es importante señalar que si bien los ensayos en campo se están abordando desde la óptica del diseño de un nuevo túnel, cobran igual o mayor importancia en el caso de túneles ya en servicio. Resulta frecuente en estos últimos, especialmente en los de mayor antigüedad, que se encuentren equipados con sistemas de ventilación pero, o no se tenga constancia de sus prestaciones (en ocasiones no existen proyectos de dimensionamiento, en otras éstos no son fiables por el envejecimiento de los ventiladores) o se haga de ellos un uso inadecuado (es posible que no se hayan definido pautas de actuación, o que no se correspondan con las condiciones actuales de tráfico o bien que no se encuentren implementadas en la aplicación de control). En estos casos, los ensayos en campo, unidos a una fase posterior de reingeniería, adecuarían estos sistemas a los requerimientos exigibles de seguridad.

3. La autopista AP-1

Los túneles objeto de estudio se sitúan en la Autopista AP-1, concretamente en el tramo que discurre entre Eskoriatza (Guipúzcoa) y Luko (Álava). Este tramo, de 17 kilómetros y cuya apertura se produjo en abril de 2.009, permite la puesta íntegra en servicio de la autopista Eibar-Vitoria (AP-1), la nueva vía de 46 kilómetros de longitud que se plantea como un eje fundamental en la red vasca de carreteras. Permite la comunicación por carretera de la capital alavesa con el límite entre los territorios históricos de Guipúzcoa y Vizcaya, conectando por tanto con la autopista A-8. Atraviesa las comarcas del Alto y Bajo Deba en Guipúzcoa y el norte del territorio de Álava hasta conectar con su capital.

Sus promotores son el Gobierno Vasco y las Diputaciones Forales de Guipúzcoa y Álava. En el tramo guipuzcoano, la explotación es gestionada por BIDEGI S.A., mientras que en el tramo alavés hace lo propio VÍAS DE ÁLAVA S.A.

Geográficamente la autopista se ubica en una zona montañosa de orografía complicada, de ahí que haya sido necesaria la construcción de numerosos túneles y viaductos a lo largo del trazado.

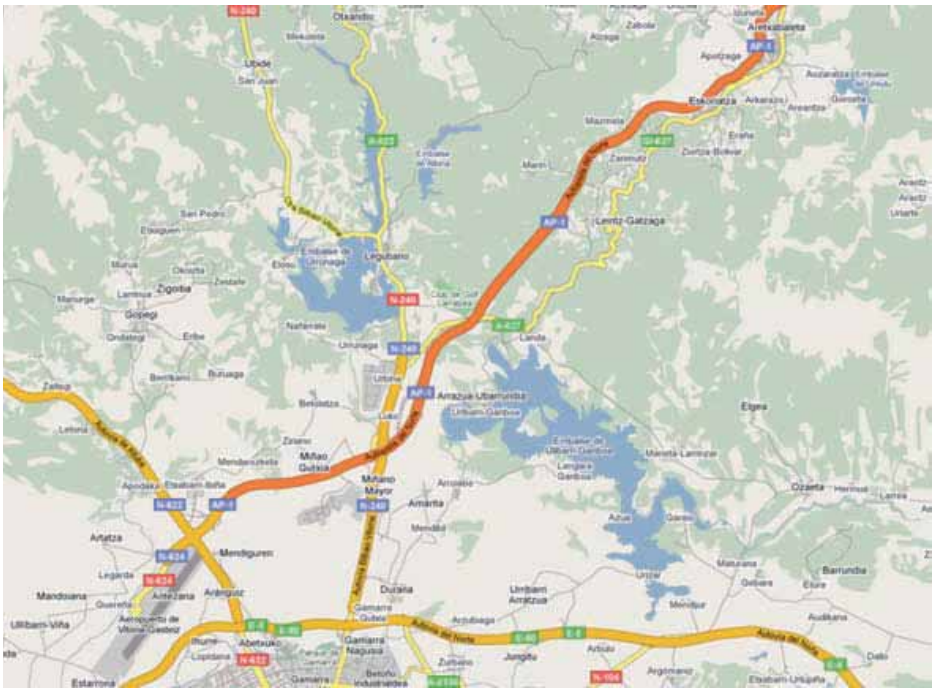


Fig 2. Plano general de situación de la Autopista AP-1, tramo Eskoriatza-Luko

3.1. Túneles de Isuskitz, Zarimutz y Luko

En el tramo Eskoriatza - Luko se localizan los túneles de Zarimutz (Guipúzcoa), Luko (Álava) e Isuskitz, que atraviesa la frontera entre ambas provincias.

Cada túnel se compone de dos tubos unidireccionales de 2 carriles de circulación por sentido. Sus características constructivas se resumen en la siguiente tabla:

	Zarimutz	Isuskitz	Luko
Longitud (m)	503 - 508	3.405 – 3.415	625
Sección (m ²)	89,3	Variable (76,7 / 70,8)	88,4
Perímetro (m)	37,22	Variable (33,25 / 32,29)	36,8
Altura máxima (m)	8	7,6	8,1
Pendiente (%)	±2	±2,5	±2,2

Tabla 1. Características geométricas de los túneles

3.2. Sistema de ventilación

Ventilación principal

Los tres túneles cuentan con ventilación de tipo longitudinal, compuesta por un número variable de ventiladores de chorro reversibles distribuidos por parejas a lo largo del trazado. El número de equipos por túnel depende de las características geométricas de cada uno (fundamentalmente longitud y pendiente). Destaca el túnel de Isuskitza, que cuenta con 20 ventiladores en el tubo de pendiente positiva y 26 en el de pendiente negativa (equipos de 55 KW, 1840 N. y 32.3 m³/s).

En la fase de diseño la capacidad de ventilación de los túneles fue dimensionada para que pudiese hacer frente a las necesidades de evacuación de los humos generados por un incendio tipo de 30 MW, con independencia de la hipotética adversidad en las condiciones ambientales y de tráfico.

Por otro lado, el sistema se complementa con la existencia de anemómetros de tipo hélice. Se ubican en la clave del túnel y se encargan de la medición de la componente longitudinal de la velocidad del aire.

Otros sistemas

En la ventilación en caso de incendio intervienen los sistemas de detección automática, tales como el cable de detección lineal, el DAI, o los medidores de gases contaminantes y opacidad.

Durante las pruebas realizadas se comprobó el funcionamiento del cable de detección lineal de temperatura y las condiciones de detección de incendio de otros elementos, ya que las simulaciones numéricas habían puesto de manifiesto la importancia de una rápida detección para conseguir una eficacia óptima en las estrategias de ventilación.

4. Ensayos de ventilación

4.1. Objetivos

Los objetivos pretendidos por el proyecto eran básicamente el contraste de:

- El correcto dimensionamiento del sistema, comprobando que el sistema (número y empuje de los ventiladores) es capaz de hacer frente a un incendio de las dimensiones definidas en la etapa de diseño (o marcadas por la normativa, en caso de que fuera más restrictiva).

- La adecuada operación del sistema, que asegure que se disponen de las herramientas y pautas (algoritmos de control) necesarias para hacer un correcto uso de la instalación y optimizar su rendimiento.

Para conseguir los objetivos anteriores se hace necesaria la realización de una batería de ensayos de diferente naturaleza:

- Ensayos preliminares de funcionamiento, para la verificación del funcionamiento individual de cada equipo y su integración en el sistema de control. Estas pruebas fueron acometidas con anterioridad por la Dirección Facultativa de la obra.
- Ensayos aerodinámicos, encaminados a obtener una caracterización del túnel (infraestructura y sistema de ventilación) que permita evaluar la capacidad real del sistema.
- Incorporados los datos obtenidos al modelo matemático representativo es posible ajustar su comportamiento y conocer la desviación respecto de las hipótesis utilizadas en el dimensionamiento teórico, donde necesariamente fue necesario asumir determinadas hipótesis sobre variables desconocidas tales como rozamientos, rendimientos de la instalación, etc.
- Por otra parte, la comparación entre los valores medidos por los anemómetros utilizados en el ensayo y los obtenidos por los anemómetros fijos del túnel permite la calibración de estos últimos.
- Ensayos con humos calientes y fuego real (pequeña escala), encaminados a representar efectos térmicos y de movimiento de humos en el interior de los túneles. Permiten evaluar la eficiencia de los algoritmos de ventilación implementados.
- Las pruebas con fuego real, a diferencia de las de humos calientes, pueden ser utilizadas para aproximarse de manera más realista a las condiciones de incendio de un vehículo. Además, ayudan a evaluar el comportamiento de los sistemas de detección automática de incendios.

4.2. Ensayos aerodinámicos

Para la realización del ensayo se dispone en el interior del túnel de dos secciones de medida de la velocidad del aire, evitando la cercanía de ventiladores y posibles obstáculos (paneles de señalización, etc.) e intentando coincidir con los anemómetros fijos del túnel.

Cada sección de medida está formada por una rejilla de sondas (malla de medida), distribuidas en diferentes alturas e instaladas sobre estructura rígida.



Fig 3. Montaje de equipos de medición en el túnel

Las pruebas consisten en la medición de la velocidad del aire mientras se opera el sistema de ventilación. Se parte del sistema de ventilación detenido para la obtención de las condiciones del tiro natural del túnel, arrancando progresivamente los equipos hasta alcanzar el 100% de la capacidad total. Dada la reversibilidad de los ventiladores, la prueba se realiza primero con ventilación directa, repitiéndose a continuación en sentido inverso.

Con los registros obtenidos por los anemómetros se calcula la medida representativa de la velocidad del aire en función de los diferentes regímenes de ventilación en funcionamiento, y a partir de ahí, mediante ajuste del modelo matemático previamente construido, se obtienen los parámetros significativos del sistema.

4.3. Ensayos con humos calientes

Los ensayos con humos calientes ofrecen una buena alternativa a los ensayos con fuego real. Los humos utilizados en los ensayos son blanquecinos, limpios e ino- cuos, de modo que se puede asegurar lo siguiente:

- No implican riesgo para la infraestructura e instalaciones del túnel. No se precisa la protección del túnel ni de sus instalaciones; tampoco la limpieza a su finalización.
- No exigen el cierre del tramo completo de carretera. Además, el riesgo de afección a la circulación por el tubo activo es nula, pues los humos al entrar en contacto con la atmósfera al aire libre se difuminan por completo.
- Al no entrañar ningún riesgo, se pueden realizar sin necesidad de medios externos de emergencias (Bomberos).

La realización de pruebas de ventilación con humos calientes ofrece un método alternativo de contraste de las medidas adoptadas frente al fuego; a pesar de no repro-

ducir todas las condiciones de un incendio real contribuye a identificar fallos en las instalaciones o su control y mejorar la operación.

Los ensayos con humos calientes se realizaron en los túneles de Zarimutz y Luko una vez hubieron finalizado los ensayos aerodinámicos. Manteniendo las secciones de medida de la velocidad del aire, se fijó un punto del túnel como foco del “fuego”, desplegándose allí la maquinaria de generación de humos calientes.

Metodología

Para la realización de los ensayos con humos calientes se dispone en el túnel, además de las secciones de medida de la velocidad, de secciones de registro de vídeo. La grabación de imágenes con medios adicionales a los propios del túnel resulta clave para el análisis posterior del ensayo, pues las cámaras fijas del túnel, por situarse en altura, pierden rápidamente la visión al verse afectadas directamente por la nube de humos.

Algoritmos implementados y evaluados

Como se viene comentando, el principal objetivo de los ensayos con humos calientes es contrastar la eficacia de los algoritmos implementados.

Los algoritmos de control de humos en caso de incendio generalmente prevén dos escenarios diferentes (éste es el caso de los túneles en estudio):

Como se viene comentando, el principal objetivo de los ensayos con humos calientes es contrastar la eficacia de los algoritmos implementados.

Los algoritmos de control de humos en caso de incendio generalmente prevén dos escenarios diferentes (éste es el caso de los túneles en estudio):

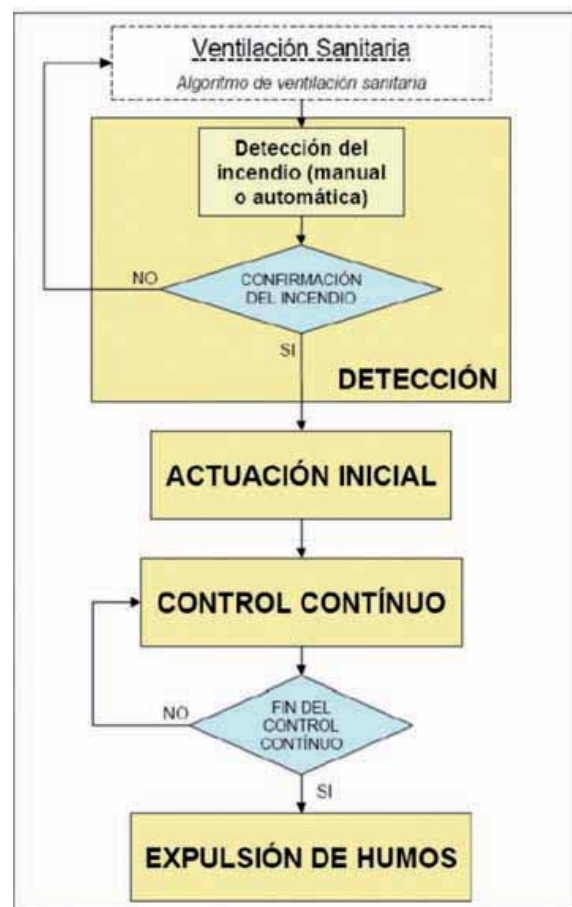


Fig 4. Algoritmo de incendio

- Tráfico unidireccional fluido (no hay vehículos detenidos aguas abajo del incendio). Una vez se detecta el incendio, el control de la ventilación en este caso trata de actuar con capacidad suficiente en el sentido del tráfico para evitar el retroceso de los humos, de manera que los usuarios aguas arriba no se vean afectados en la evacuación.
- Tráfico bidireccional o unidireccional congestionado (existen vehículos retenidos a ambos lados del incendio). Obliga a descartar la pauta anterior pues la nube de humos arrastrada aguas abajo resultaría perjudicial para los usuarios atrapados en ese tramo. Se actúa una primera fase de control de humos, coincidente en el tiempo con la fase de evacuación de los usuarios, donde se trata de favorecer la estratificación de los humos, procurando que la velocidad del aire en el interior del túnel sea baja. Esta fase, compleja desde el punto de vista de la regulación del caudal del aire, precede a la evacuación masiva de los humos, una vez los usuarios han evacuado a zonas seguras.

El ensayo se repite dos veces consecutivas, asegurando entre una y otra la limpieza completa de humos dentro del túnel. En la primera se comprueba la eficacia del algoritmo bajo la hipótesis de usuarios retenidos a ambos lados del foco del incendio, mientras que en el segundo se actúa bajo la hipótesis de tráfico unidireccional fluido, sin usuarios atrapados aguas abajo del foco.

Producción de humos

La producción de humos calentados se consigue mediante la utilización de máquinas de quemado de aceite especial y calentadores de propano.



Fig 3. Montaje de equipos de medición en el túnel

La temperatura de salida de los humos, entorno a los 100°C, es suficiente para que éstos tomen altura (fenómeno de estratificación) y simulen parcialmente el comportamiento de los humos generados por un incendio real, aunque no permiten evaluar el funcionamiento de las alarmas asociadas al cable de detección lineal de temperatura.

4.4. Ensayos con fuego real a pequeña escala

Los ensayos con fuego permiten introducir los efectos de la temperatura sobre el movimiento del aire en el túnel, pudiéndose llegar a reproducir las condiciones de un incendio con bastante realismo.

Con excepción de escenarios experimentales como el “Memorial Tunnel”, los realizados en el “Túnel de San Pedro de Anes (Asturias)”, y algún otro, los ensayos con fuego nunca se realizan reproduciendo grandes incendios sino, en el mejor de los casos, simulando incendios de un solo vehículo ligero (2-4 MW).

Cuanto mayor sea la energía disipada en el foco del incendio simulado, más realista será el ensayo y más concluyentes serán los resultados. Pero también será mayor el riesgo de daño sobre las instalaciones o la infraestructura.

El ensayo con fuego se realizó en el túnel de Isuskitza, con la ayuda de servicios externos de emergencias, Bomberos de Guipúzcoa y Álava, que se encargaron del prendido y extinción del fuego, y el mantenimiento de las condiciones de seguridad durante el desarrollo del ensayo. La realización de ensayos con fuego real exige el cierre completo del tramo de autopista. Los medios de extinción de los Bomberos se sitúan en el tubo contiguo al que se ensaya, de manera que puedan actuar rápidamente si la situación lo requiere.

Metodología

La metodología seguida en la realización del ensayo fue similar a la de las pruebas con humos calientes. El ensayo se realizó dos veces consecutivas, probando en cada una de ellas el funcionamiento del escenario correspondiente (caso de tráfico unidireccional fluido y caso de tráfico bidireccional o unidireccional congestionado).

A diferencia de las pruebas con humos calientes el algoritmo de incendio se evalúa de manera integral; esto significa que la fase de detección y localización del incendio es también automática, limitándose el operador del Centro de Control a la validación de la alarma y la elección del escenario contemplado en cada caso.

Para la realización del ensayo se dispuso en el interior del túnel, además de secciones de medida de la velocidad y de registro de vídeo, de sondas de temperatura en torno al foco del incendio. Las secciones de medida de la temperatura se situaron a 5 y 10 m. del foco del incendio. Sobre el foco se montó también otra sección de medida situada en el lateral y otra sonda fijada a la clave del túnel.

Con la medición de la temperatura se pretendían los siguientes objetivos:

- En tiempo real, asegurar que las instalaciones situadas en torno al foco del incendio no soportaran temperaturas superiores a sus umbrales de funcionamiento.
- A posteriori, evaluar el funcionamiento del cable de detección lineal de temperatura y conocer cualitativamente la magnitud del incendio generado.
- Obtener información útil para la calibración de los modelos matemáticos utilizados.

Foco del incendio

La técnica de generación de incendio se basó en el prendido de bandejas que contenían una mezcla de combustible compuesta por gasoil, gasolina y aceite. Bastante extendida en la actualidad, consigue, además de temperatura, una considerable producción de humos.



Fig 6. Preparación del foco del incendio



Fig 7. Generación de fuego

5. Conclusiones

A continuación se presenta el tipo de información que se deriva de la realización de los ensayos en campo, particularizando donde proceda para el caso de los túneles objeto de estudio.

- Las hipótesis que se asumen al realizar el diseño teórico no siempre se corresponden con la realidad. De entre los parámetros más influyentes, se ha podido

comprobar que el rendimiento de un sistema de ventilación puede resultar un 10-15% inferior al estimado, bajando sensiblemente en caso de ventilación inversa. En este sentido cabe destacar la adecuada dotación de los túneles de Zarimut y Luko y el sobredimensionamiento de Isuskitza, capaz de hacer frente a incendios de potencia muy superior a la de diseño.

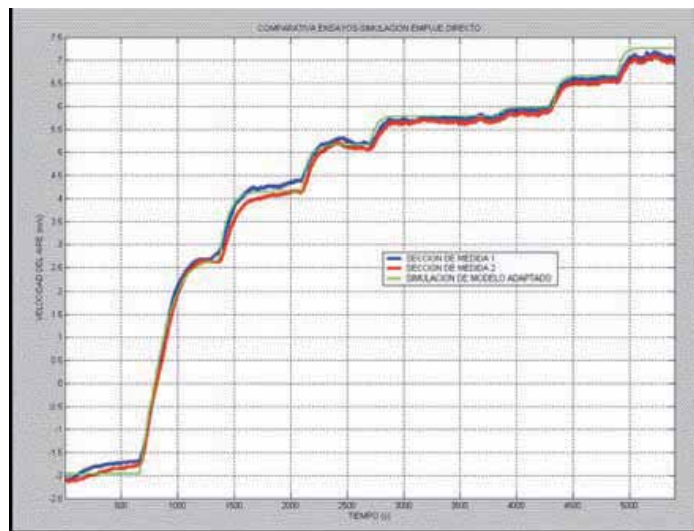


Fig 8. Obtención del rendimiento del sistema

- En condiciones normales de operación, sólo una pequeña parte de los ventiladores son suficientes para mantener un alto nivel de calidad del aire, pudiendo optimizarse el consumo energético si se tiene este factor en cuenta en el diseño de los algoritmos de ventilación sanitaria.
- La posición y ubicación de los anemómetros resulta clave para la medición de la velocidad en el túnel; más si cabe si ésta se utiliza para realizar un control continuo de los humos. En ocasiones, la necesidad de reubicar elementos durante la ejecución de la obra (paneles de señalización, etc.) afecta negativamente en este aspecto. Por otra parte, es importante señalar que para obtener la medida de la velocidad es imprescindible la utilización de más de un equipo; estos, por más que se encuentren correctamente calibrados, miden valores diferentes en función de las circunstancias de cada momento (dada su ubicación cenital en la sección del túnel), de manera que sólo la medida de varios equipos ayuda a compensar los efectos individuales.
- En línea con el punto anterior, la ubicación de las cámaras de TV fijas respecto a la sección transversal del túnel resulta crítica a la hora de realizar el seguimiento del incendio y poder conocer el movimiento de los humos y cómo afecta a las condiciones de evacuación de los usuarios. Dado que el humo caliente producido por un incendio asciende inmediatamente y ocupa la parte más

alta de la sección, como solución estándar no se recomienda la ubicación cenital de las cámaras.

- Los algoritmos de ventilación que, ante ciertos escenarios, tratan de mantener la estratificación de los humos con ayuda del sistema de ventilación se muestran válidos en túneles de longitud significativa, como Isuskitza. Sin embargo, en túneles cortos, como Zarimutz y Luko, resultó inadecuada, optándose por el apagado de la ventilación y permitiendo el libre flujo de los humos. Se demostró en estos túneles que cualquier actuación que implique el arranque de ventiladores no resulta beneficiosa para la estratificación de los humos, por la cercanía entre foco de incendio y ventiladores.

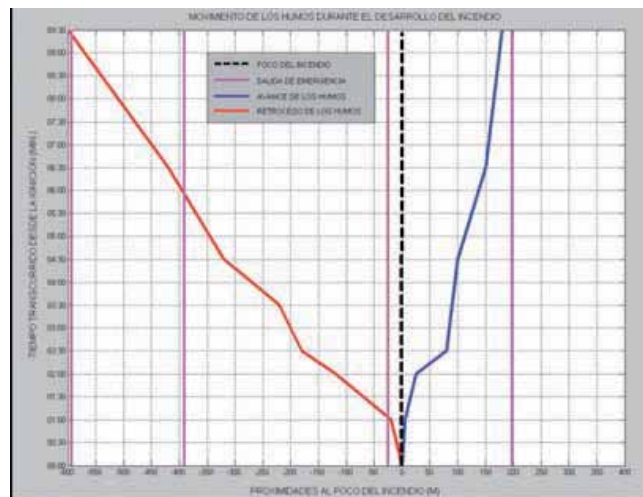


Fig 9. Movimiento de los humos



Fig 10. Ejemplo de actuación incorrecta de la ventilación en Zarimutz

- Las simulaciones informáticas realizadas pusieron de manifiesto que una rápida activación del sistema de ventilación contribuye de manera significativa al

control de los humos. En Isuskitza el cable de detección lineal de temperatura, en ambas igniciones, tuvo un tiempo de respuesta inferior a los 90 segundos (en ambos casos alarma por gradiente).

Por otra parte, durante la fase de detección del incendio los medidores de gases contaminantes y opacidad no generaron alarmas ni medidas significativamente altas.

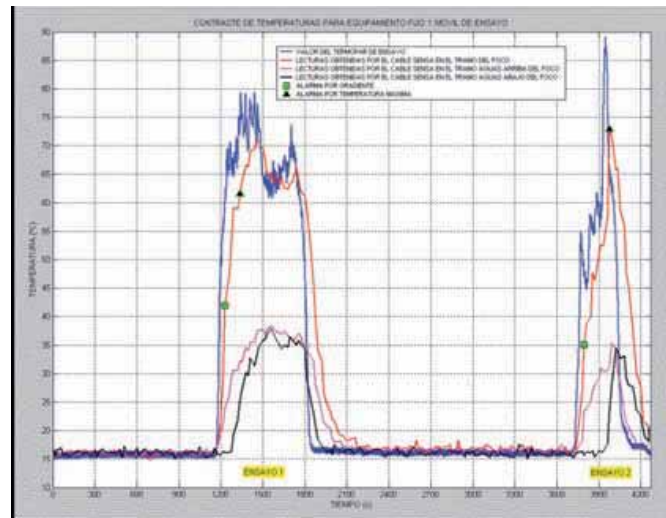


Fig 11. Registro de temperaturas

Cabe finalizar el artículo insistiendo en la necesidad de incorporar la validación experimental como etapa imprescindible en un proyecto de ventilación. Para túneles en diseño, como último escalón en la puesta en marcha del sistema, y en túneles ya en servicio como medio indispensable para conocer las prestaciones del mismo y, en caso necesario, introducir las mejoras oportunas.

6. Referencias

Para la redacción del presente artículo y la realización del proyecto objeto del mismo se ha hecho uso principalmente de las siguientes referencias:

- “Dossiers Pilotes du CETU. 4.1. Ventilation” (CETU, 2.003).
- “Fire and Smoke Control in Tunnels”, (PIARC, 1.999).
- “The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program”, Basic Findings. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration.
- “State of the Art Report on Full Scale Testing of Tunnels under Fire”, Work Package 6, Task 6-1 (UPTUN, 2.003).
- Decreto Foral de Vizcaya 134/2008, Instrucción Técnica de Ventilación (IV) sobre las disposiciones y especificaciones de carácter técnico que debe satisfacer el diseño de un sistema de ventilación para túneles.