Diseño y estrategias de ventilación en nuevos ferrocarriles suburbanos.

Juan Manuel Sanz Sacristán, Jefe de Sección de Instalaciones del Transporte de Euroestudios.
José Miguel Vera Serrano, Jefe de Proyectos de Instalaciones del Transporte de Euroestudios.

El correcto dimensionamiento y una adecuada estrategia de funcionamiento del sistema de ventilación en túneles ferroviarios suburbanos es de una extrema importancia, no sólo desde el punto de vista de la seguridad, sino también desde el punto de vista del confort y del consumo de energía en el propio sistema y en la circulación del material móvil.

En este artículo queremos centrarnos en los sistemas suburbanos cuyas principales características corresponden a: elevadas circulaciones, principalmente de material móvil eléctrico de pasajeros, grandes longitudes de túneles, posibilidad de ramales y bifurcaciones y disposición de diversas estaciones subterráneas a intervalos más o menos regulares. No se tratan los túneles ferroviarios, que se caracterizan por no disponer de estaciones y de una disposición lineal y uniforme.

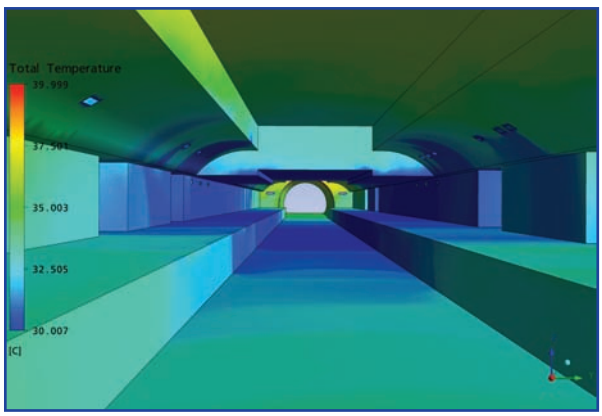
Diseño de la obra civil

Para un adecuado diseño y funcionamiento de la ventilación de un sistema suburbano es de especial importancia que se tenga en cuenta la misma desde el inicio del diseño de la obra civil, ya que su configuración, ubicación y dimensiones de los pozos y conductos de ventilación tanto en estaciones como en los túneles, tal y como se describe más adelante, permitirá desarrollar adecuadamente los distintos sistemas y garantizará el adecuado funcionamiento para cada una de las situaciones previstas.

Experiencias recientes de Euroestudios en diseños de ventilación de suburbanos

Recientemente Euroestudios ha participado en el diseño de la ventilación de diversos metros de ámbito internacional. En varios de esos diseños se partía de una obra civil ya definida y en ejecución y que, por tanto, no podía ser modificada. Esta condición obligó a un mayor esfuerzo en el diseño y optimización de los distintos equipos y a una detallada simulación, realizada por la sección de I+D+i de Euroestudios, mediante software de dinámica de fluidos (CFD) con el objeto de garantizar la adecuada respuesta de la ventilación en las distintas situaciones previstas.

Uno de los aspectos de relevancia contemplado en estos proyectos es el de la temperatura en andenes, ya que se trataba de un verano muy caluroso y los trenes no disponían de regeneración de energía, disipándose la energía del freno eléctrico en la zona de andenes, a lo que había que sumar el calor disipado por las personas y las



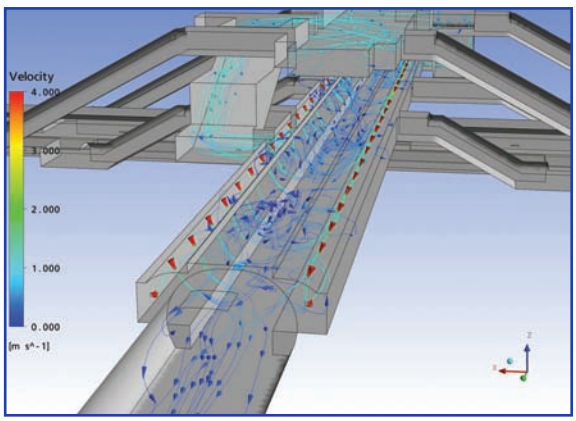


Figura 1 y 2. Simulación de condiciones extremas de temperatura en andenes y de la ventilación de confort

instalaciones de la estación. Todo ello se consideró mediante simulación 3D para optimizar los caudales de impulsión necesarios y dimensionar las unidades de tratamiento de aire mediante humectación adiabática.

Asimismo se analizó la influencia de la temperatura del túnel sobre la temperatura en la estación, provocada por el movimiento de aire inducido por la circulación de los trenes, con el objeto de optimizar el consumo actual empleado en la refrigeración de los túneles. Este estudio se realizó mediante cálculos bidimensionales, así como simulaciones tridimensionales, y concluyó en la disposición de los sensores y control necesario para obtener una importante reducción de energía en determinados intervalos de explotación.

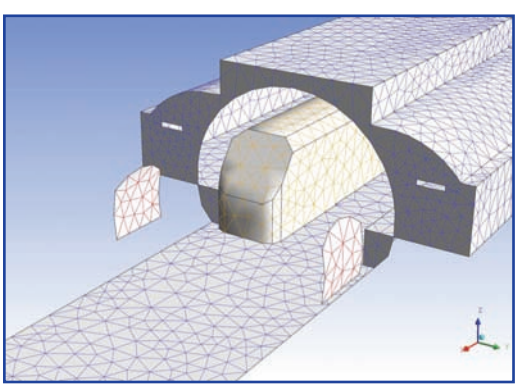


Figura 3. Mallado para simulación de la influencia del movimiento de los trenes.

Otro aspecto de importancia analizado fue la evolución de un incendio, tanto en túnel como en estación, para asegurar unas adecuadas condiciones de evacuación de los usuarios. En este proyecto esta condición tenía un especial interés, ya que al estar la obra civil cerrada no se podía modificar las dimensiones y disposición de huecos y rejillas, además de no disponer de ventilación independiente en los vestíbulos de la de andenes.

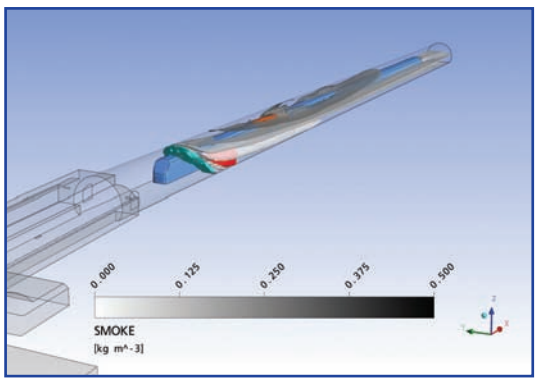
El resultado final contemplado en el proyecto (verificado mediante simulación computacional) permitió, con un consumo de energía reducido (tanto en la propia ventilación como el consumo de tracción de los trenes), establecer las adecuadas renovaciones de aire, el control de la temperatura en las estaciones y en los túneles, y establecer un control de los humos de un posible incendio, compatible con unas condiciones adecuadas de evacuación.

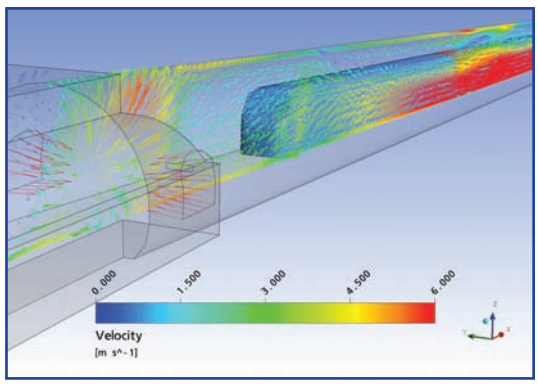
En caso de no estar condicionado por una obra civil ya definida, se pueden establecer sistemas más seguros y optimizados, como se describe a continuación.

Funciones que debe considerar la ventilación

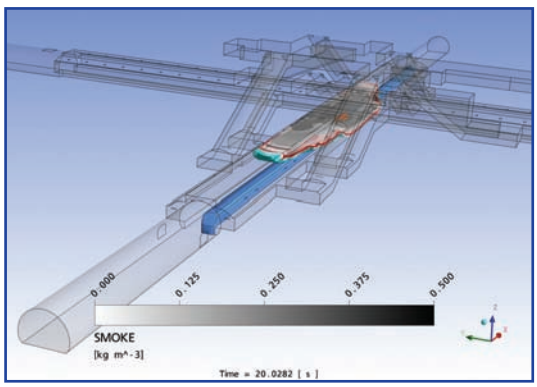
La ventilación de un túnel suburbano debe responder a las siguientes necesidades del servicio:

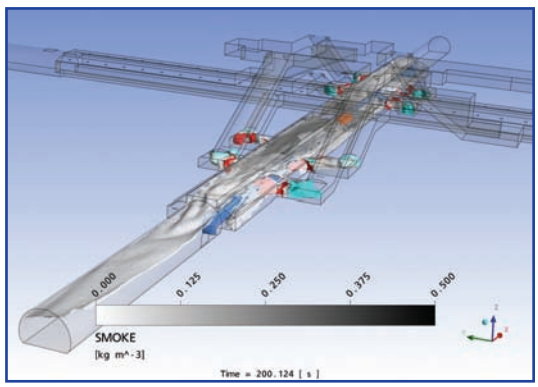
- Garantizar la renovación del aire tanto en las estaciones como en los túneles.
- Asegurar que las temperaturas en las zonas con pasajeros no sean elevadas.
- Evitar que en los túneles se produzcan grandes variaciones de presión, lo que conlleva un elevado gasto energético de tracción y molestias a los usuarios.
- Establecer un control sobre los humos en caso de incendio compatibles con unas condiciones de evacuación preestablecidas.





Figuras 4 y 5. Simulación de incendio en las proximidades de la estación. Se garantiza que el humo no invade los andenes.





Figuras 6 y 7. Evolución del incendio de un tren en la zona de andenes, verificando que el humo no se propaga hacia las escaleras y vestíbulos.

Durante el diseño de la ventilación se deben tener en cuenta otras consideraciones que, sin ser directamente funciones de la ventilación, tienen gran importancia y no deben ser descuidadas:

- Reducción de consumo del sistema de ventilación.
- Bajos niveles de ruido al exterior y al interior.
- Sensores y sistemas de control para activación automática.
- Facilidad de mantenimiento y reparación del sistema.
- Condiciones de operación de cada uno de los equipos y durabilidad del conjunto.
- Disposición de rejillas en el exterior.
- Disposición de conductos y rejillas en estación.

Todas estas funciones se consiguen mediante la adecuada disposición y configuración de los pozos de ventilación y compensación en los túneles y en las estaciones. En caso de contemplar las estrategias de ventilación en la fase de desarrollo de la obra civil, los resultados que se alcanzarán posteriormente, al diseñar la ventilación, serán mejores y redundarán en un menor consumo de energía y una respuesta más segura.

Pasamos a describir un sistema de ventilación idóneo para un sistema suburbano y sus implicaciones en la obra civil.

Disposición General de los Pozos de Ventilación.

Los túneles ferroviarios de nueva construcción facilitan la definición de las estrategias de ventilación al no haber tantos condicionantes como en una obra civil ya materializada. En infraestructuras ferroviarias compuestas por túneles que comunican estaciones subterráneas de pasajeros, como es el caso del metro, o como recientemente se están realizando en corredores ferroviarios para trenes de altas prestaciones (hasta 220 km/h), no cabe centrar la atención de manera aislada en la

estrategia de ventilación definida para el interior de los túneles. Además, habrán de analizarse cuáles son las situaciones que puedan coexistir en las estaciones contiguas, formando parte de la estrategia global de ventilación.

Los sistemas de ventilación tienen que estar pensados para trabajar bajo situaciones muy diferenciadas: una es la de funcionamiento de confort, que corresponderá a una situación normal de explotación con el objetivo de garantizar una renovación del aire y conseguir unas condiciones aceptables de salubridad y temperatura; y otra es la de funcionamiento de emergencia por incendio, cuya prioridad será la de confinar el humo entre el punto del incendio y el pozo de extracción más cercano, manteniéndolo estratificado el mayor tiempo posible y siempre evitando que invada la zona de evacuación de las personas.

Se describen a continuación, de acuerdo con nuestra experiencia y estudios realizados, las disposiciones idóneas de los distintos pozos de ventilación de un nuevo sistema de transporte suburbano:

Pozos de compensación.

Son pozos con comunicación directa entre el exterior y el túnel y cuya función es la de equilibrar o compensar con el exterior las presiones generadas en el interior de los túneles por la circulación de los trenes. Normalmente se ubica un pozo en cada extremo de las estaciones, aunque en caso de grandes distancias entre estaciones conviene poner pozos intermedios.

A través de estos pozos también se evacuará parte del aire con mayor presión impulsado desde los andenes de la estación.

Pozos de extracción entre estaciones.

Son pozos con ventilación forzada, situados en la parte central de los túneles que permiten extraer el humo de su interior en caso de emergencia. También se pueden emplear para garantizar la ventilación de los túneles en circunstancias excepcionales en las que las masas de aire movidas al paso de los trenes sean insuficientes (como, por ejemplo, cuando se para un tren en mitad del túnel durante un largo periodo de tiempo).

En túneles de longitudes elevadas y/o con secciones reducidas, donde la resistencia global al avance de los trenes es mayor, se podrán configurar estos pozos para posibilitar el by-pass de comunicación con el exterior que favorecerá la ventilación natural al paso del material rodante y reducirá la resistencia global que se opone a los mismos (haciendo a la vez las funciones del pozo descrito anteriormente).

Pozos de ventilación de andenes.

Son pozos con ventilación forzada donde el aire es impulsado y extraído a través de rejillas presentes a nivel de andenes.

La configuración ideal es aquella que permite impulsar el aire, a través de unidades de tratamiento de aire (UTAs), por la parte inferior de los andenes y la extracción del humo, en caso de incendio, por rejillas situadas en la parte superior del espacio de los andenes. Esta disposición, más común en estaciones grandes, permite reducir los tiempos de reacción en caso de emergencia y posibilita mayores opciones de implantación del sistema de ventilación

En caso necesario, puede dotarse un solo pozo por andén, por donde se impulsará y se extraerá el aire (mediante equipos de ventilación reversibles). Se recomienda que la ubicación de este tipo de pozos sea en los extremos opuestos de cada uno de los andenes, con el objeto de mejorar el reparto uniforme del aire.

Pozos de ventilación para el vestíbulo de la estación.

Son pozos con ventilación forzada y de menores dimensiones a los anteriores. Deberán ser reversibles, funcionando normalmente uno para impulsión y otro para extracción (garantiza la renovación de aire de este espacio). Suelen disponer de UTA para acondicionamiento del aire impulsado. Su condición de reversibilidad permitirá, por ambos pozos, extraer el humo de un posible incendio ubicado en él o crear una sobrepresión que evite la propagación de un incendio generado en los andenes o en el túnel.

Estrategias de ventilación en túneles ferroviarios de nueva construcción.

Ventilación de confort de los túneles.

La ventilación de los túneles se obtiene normalmente mediante el movimiento de aire provocado por la circulación de los trenes, aportando aire fresco desde la estación de

partida o del anterior pozo de compensación y expulsando el aire sobrante por el siguiente pozo de compensación.

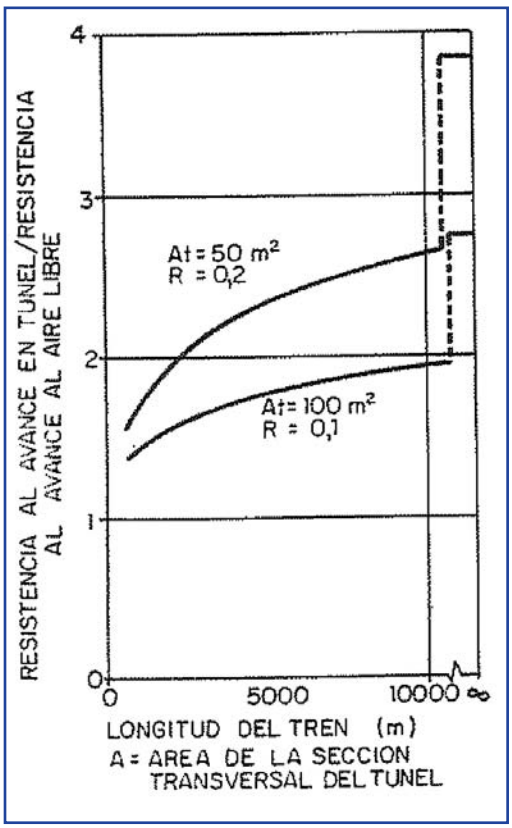
El tren, en su movimiento de circulación en un espacio confinado, produce una sobrepresión en la parte delantera y una depresión en la parte trasera que provoca un elevado desplazamiento de aire y un incremento de resistencia sobre el tren (tanto por las diferencias de presiones como por las fricciones laterales). La presión del caudal de aire inducido delante del tren será suficiente para vencer la pérdida de carga del pozo y desalojará una cantidad de aire al exterior, produciéndose una compensación de las presiones. De esta manera, el paso de los trenes generará caudales inducidos y constituirán una fuerza dinámica que aportará un intercambio de aire a través de los pozos de compensación con el exterior.

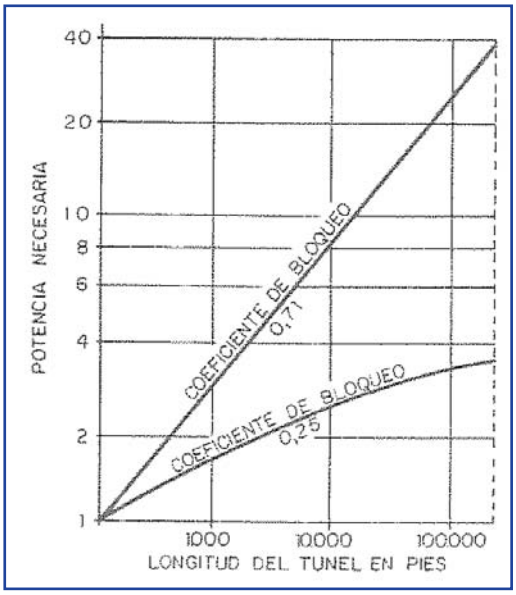
El movimiento del tren a lo largo del túnel tiene un efecto pistón, que provocará una reacción por variaciones de presión sobre la masa de aire que se opone a su avance, generando en la parte delantera del tren, como ya se ha mencionado, una región de mayor presión o "pelota compresiva" que será confinada en el interior de los túneles por sus paredes y otra región de menor presión o succión en su parte trasera, estableciéndose un caudal de aire inducido que será función de la velocidad de paso del tren, de sus propias características físicas y de la geometría del túnel.

El incremento de rozamiento lateral sobre el tren se producirá debido al aire que pasa de la parte delantera del tren (sobrepresión) a la cola del mismo (succión) por el diferencial de presión existente.

Dado que los trenes entran y salen a baja velocidad de los túneles (coincidiendo con la ubicación de las estaciones), no es necesario estudiar los efectos transitorios en este tipo de túneles ya que su influencia global es pequeña. En caso de que los trenes pudieran pasar a altas velocidades por las estaciones, convendría analizar mediante los software de cálculo existentes los efectos transitorios presentes, que en cualquier caso, debido a los pozos de compensación, serán menores que si no estuvieran presentes.

A continuación se recogen diversas gráficas experimentales donde se puede observar el incremento de resistencia al avance del tren:





Gráficos 1 y 2. Resultados experimentales relacionando incremento de resistencia al circular en túnel frente al aire libre y potencia de tracción necesaria en función de la longitud del túnel para distintos coeficientes de bloqueo (R) y áreas de túnel (At). Fuente: Tratado de Ferrocarriles II. Obra Civil e Instalaciones. Editorial Rueda

Como se puede observar, los incrementos de consumo son considerables y las posibles formas de reducir la energía consumida en la circulación los trenes puede obtenerse mediante disminución de la velocidad (no interesa para la adecuada explotación de la línea), disminución del coeficiente de bloqueo (aumento del área de la sección transversal del túnel, lo que es caro, o disminuir la sección frontal del tren, que viene impuesto por las condiciones de explotación) o disminución de la longitud de los túneles (lo que se obtiene mediante la disposición de pozos de compensación con el exterior a intervalos regulares). Como es de suponer, cuantas menos pérdidas de carga tenga el pozo de compensación (más sección libre de paso de aire, menor longitud, pocos cambios de dirección y evitar singularidades), mejor será su reducción de las variaciones de presiones y mejor cumplirá su función.

Cada caso requerirá su propio estudio en función de la geometría de los túneles y de las características físicas y cinemáticas de los trenes que circulen por ellos. Así, en túneles muy largos y/o con secciones reducidas (por ejemplo, del tipo monotubo y una sola vía), donde el coeficiente de bloqueo aumenta, definido por la relación existente entre el área de la sección transversal del tren y la del túnel, se podrá experimentar un incremento de la resistencia global al avance de hasta 2 ó 2,5 veces su valor respecto al que tendría en el exterior.

Como ejemplos y según estudios llevados a cabo, para un tren de metro circulando a una velocidad de 80 km/h en un túnel de dos vías, de 40 m² de sección y longitud 1.000 metros, la resistencia al avance del tren en su paso por túnel ha sido del orden de 1,5 veces respecto a la que tendría en el exterior, alcanzando la masa de aire inducida una velocidad en el túnel superior a 1,5 m/s. En el caso de un tren de altas prestaciones, circulando a 220 km/h en un túnel de dos vías, de 50 m² de sección y longitud 2.000 metros, la resistencia al avance ha pasado casi a triplicarse respecto a la que tendría en el exterior, alcanzando el aire en el túnel una velocidad en torno a 2,5 m/s.

Se puede afirmar que, en situación normal de funcionamiento, el movimiento de los trenes en túneles generará caudales de aire inducidos que permitirán la renovación y la ventilación del aire del interior de los túneles en a través de los pozos de compensación.

Potencia necesaria para túneles largos (Gallard, 1975)

TIPO DE TUNEL Y SECCION TRANSVERSAL	LONGITUD DEL TREN Y SECCION TRANSVERSAL	VELOCIDAD DEL TREN Km/h.	UN TREN EN EL TUNEL		TRES TRENES EN EL TUNEL		CINCO TRENES EN EL TUNEL	
			VELOCIDAD DEL AIRE m/seg.	POTENCIA KW	VELOCIDAD DEL AIRE m/seg.	POTENCIA KW	VELOCIDAD DEL AIRE m/seg.	POTENCIA KW
DOBLE VIA NO VENTILADO 49,5 m² (TUNEL DE KERENZERBERG)	202 m; 10,3m²	160	3,4	2160	-	-	-	-
	391 m, 10,3m²	160	4,5	3780	-	-	-	-
VIA UNICA NO VENTILADO 25 m² (TUNEL DE RICKEN)	391 m, 10,3m²	140	6,3	6040	9,9	4790	11,9	4140
		160	7,2	9010	11,3	7160	13,6	6180
VIA UNICA NO VENTILADO 36 m² (TUNEL DEL CANAL DE LA MANCHA)	780 m, 15,9m²	140	11,1	17030	16,0	11510	18,6	9030
DOBLE VIA NO VENTILADO 88 m²	780 m, 15,9m²	160	5,2	5690	-	-	-	-

(LONGITUD DEL TUNEL 49,5 Km.)

Tabla 1. Valores experimentales de potencia (kW) y de la velocidad del aire (m/s) en túneles largos para túneles de vía única y doble vía para velocidades de tren de 160 km/h y 140 km/h, según los estudios publicados por Gallard. Fuente: Tratado de Ferrocarriles II. Obra Civil e Instalaciones. Editorial Rueda.

Debe analizarse el equilibrio óptimo entre la sección de los túneles, el número y configuración de los pozos de compensación, las velocidades de explotación y los incrementos de potencia de tracción para obtener en cada caso la solución idónea.

Los equipos de ventilación de los pozos entre estaciones en condiciones normales se encontrarán parados, entrando en funcionamiento (modo extracción) cuando por circunstancias especiales se detecte que la renovación del aire es insuficiente, bien por la presencia de trenes detenidos en su interior o bien porque circulen a velocidades muy bajas.

Ventilación de confort de las estaciones.

En condiciones de confort, estarán en funcionamiento los equipos de impulsión de aire de los andenes a través de las UTAs, con o sin humectación en función de la temperatura existente en la estación, y con los caudales suficientes que garanticen unas condiciones aceptables de salubridad y temperatura.

En los vestíbulos se garantizará la renovación de aire y control de temperatura mediante la impulsión de aire en un lateral y la extracción de esa misma cantidad en el extremo contrario. La activación de la UTA en la impulsión dependerá de las condiciones de temperatura y humedad del aire.

Como puede deducirse, se tiene una cierta sobrepresión en el nivel de andenes que se liberará mediante los bypass de compensación de los extremos de la estación y que garantiza una cierta independencia del andén respecto al túnel y minimiza las molestias del aire movido por el tren al llegar a la estación.

Los trenes aportarán calor cuando estén parados en las estaciones. Estas emisiones de calor se deberán básicamente a los equipos de servicios auxiliares, la potencia de frenado, el funcionamiento de los motores, etc. Es por ello que se prefiere impulsar el aire bajo andenes con el objeto de mejorar la ventilación de dichos equipos.

Ventilación en caso de incendio en los túneles.

Para definir las estrategias de ventilación en caso de incendio es de vital importancia que la opción tomada sea la más segura de las posibles, que se pueda establecer automáticamente mediante los sensores dispuestos y que no deba modificarse en caso de que el foco se mueva.

En caso de que un tren empiece a arder en el interior de un túnel la mejor opción es que el tren intente llegar a la estación, ya que la evacuación de los pasajeros será más rápida y se facilita el acceso de los equipos de emergencia.

Cuando se detecta la presencia de un incendio en el túnel, los ventiladores de los pozos entre estación se pondrán en funcionamiento para extraer el humo con caudales de aire definidos para la situación de emergencia, se mantiene la impulsión en los andenes de las estaciones próximas y se activa la ventilación de impulsión de los vestíbulos potenciando la sobrepresión de estas estancias que impedirán la entrada del humo procedente del túnel, consiguiéndose el confinamiento del humo entre el punto del incendio y uno de los pozos entre estación a través del cual se expulsará. En estas condiciones prevalece la suposición de que habrá más gente en las estaciones que en el tren y que se supone que la mitad del pasaje del tren efectúa la evacuación en cada sentido.

La velocidad del aire en estas situaciones no deberá ser excesiva para evitar turbulencias y la mezcla del humo y los gases en toda la sección del túnel, con la consiguiente desestratificación del humo que lleva a la pérdida de visibilidad y de las condiciones compatibles con la evacuación.

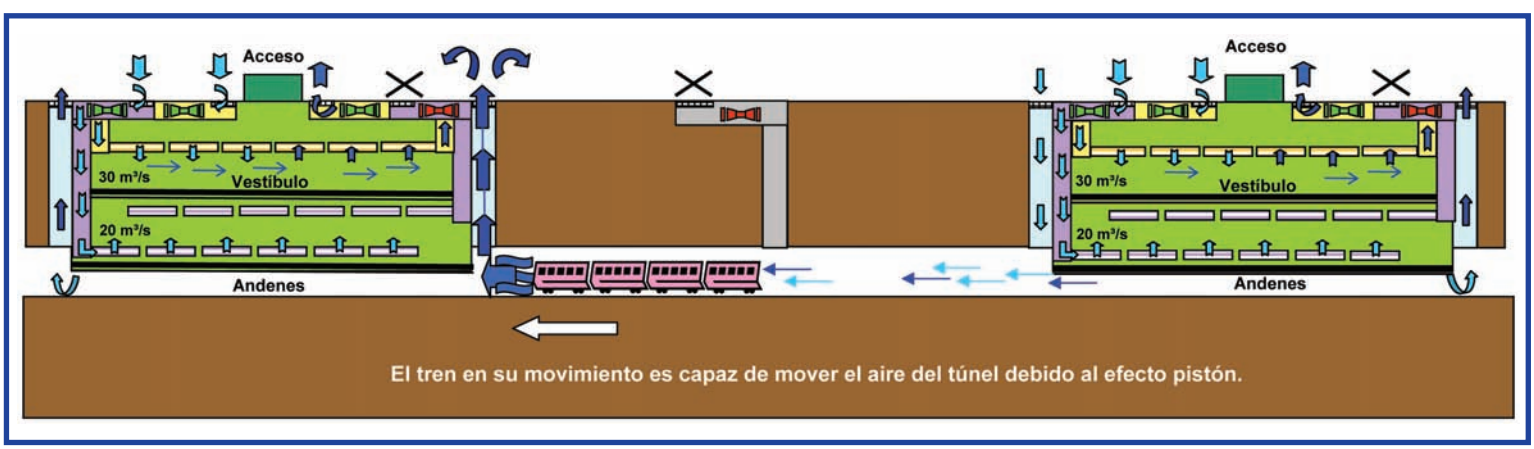
Ventilación en caso de incendio en andenes.

Si el incendio se detecta en los andenes de la estación o el tren ardiendo en movimiento llega a la misma, se paralizarán de inmediato los equipos de impulsión de aire y entrarán en funcionamiento los de extracción con los caudales de aire definidos para emergencia, evacuándose el humo por los pozos de ventilación de los andenes.

Todos los equipos del vestíbulo (reversibles), impulsarán aire sobrepresionándolo y evitando que el humo se propague hasta él por las escaleras.

Los equipos de los pozos entre estación permanecerán parados. En algunos casos se decide hacerlos trabajar en impulsión mediante equipos reversibles con la finalidad de potenciar

Figura 8. Esquema gráfico de la ventilación de las estaciones y del túnel en situación de confort.



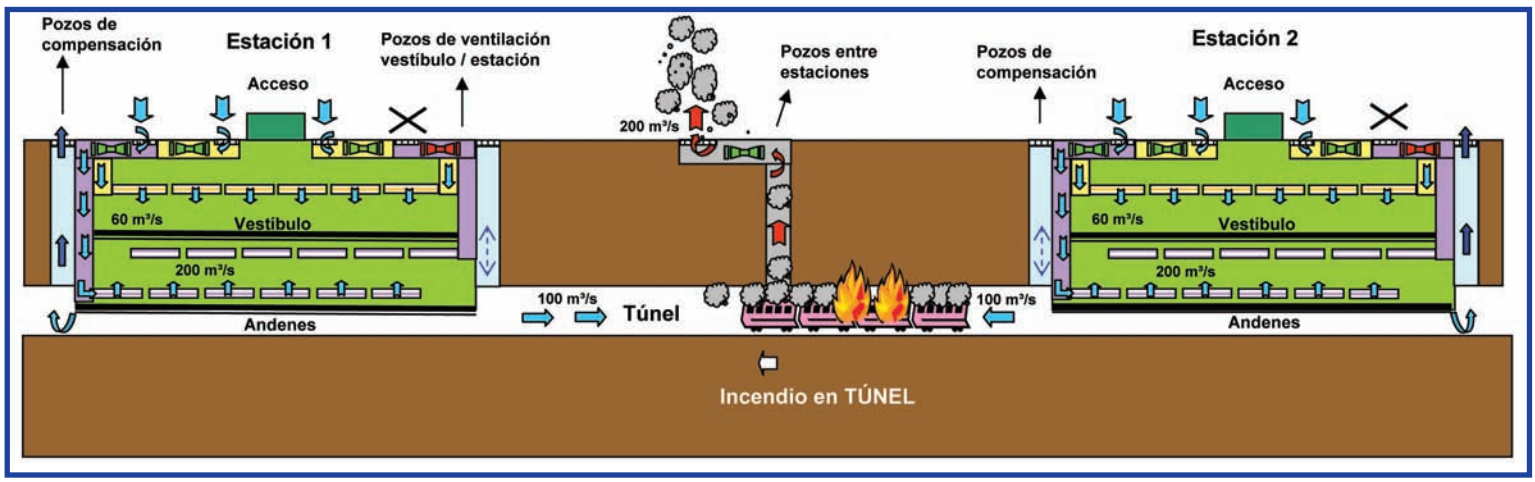


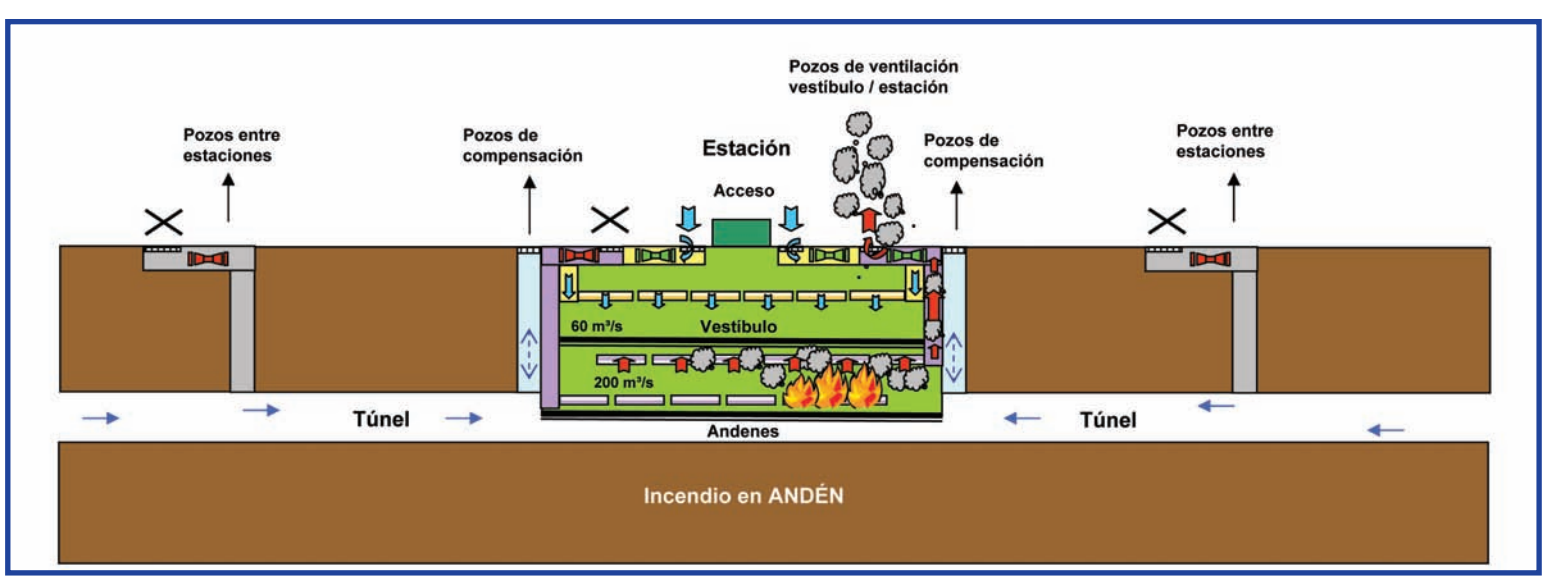
Figura 9. Esquema gráfico de la ventilación en caso de incendio en el túnel.

el confinamiento del humo en el punto de origen (la estación) y evitar la propagación por los túneles, pero con esta estrategia se podrán plantear situaciones críticas de difícil detección donde cualquier demora agravará los resultados.

Por ejemplo, supongamos que el incendio se origina en el tren cuando éste se encuentra detenido en los andenes. Los sensores detectarán la presencia de un incendio y se activará todo el protocolo de ventilación de emergencia en andenes, incluyendo el funcionamiento en impulsión de los ventiladores de los pozos entre estación. Si desde el tren no se percatan de la situación y arrancan, caso probable si el incendio se origina en la parte trasera del mismo, la situación de emergencia será trasladada al túnel, en cuyo caso habrá un tiempo de transición hasta que los sensores detecten la presencia de fuego en los túneles con el tren circulando, activándose entonces el protocolo de emergencia de incendio en túneles que requerirá que los ventiladores de los pozos entre estación funcionen en modo extracción, justamente al contrario de como lo han estado haciendo hasta este momento, convirtiéndolos en elementos propagadores del humo y agravando la situación. Además, los equipos, pese a ser reversibles, tardarán un tiempo en cambiar su funcionamiento del modo impulsión al modo extracción, con lo que se añadirá una demora en la reacción del sistema.

Por eso, su funcionamiento sólo en modo extracción mejorará la velocidad de respuesta del sistema ante la presencia de situaciones críticas como la descrita y se eliminarán los efectos propagadores del humo, confinándolo en el peor de los casos, entre pozos contiguos.

Figura 10. Esquema gráfico de la ventilación en caso de incendio en andén..



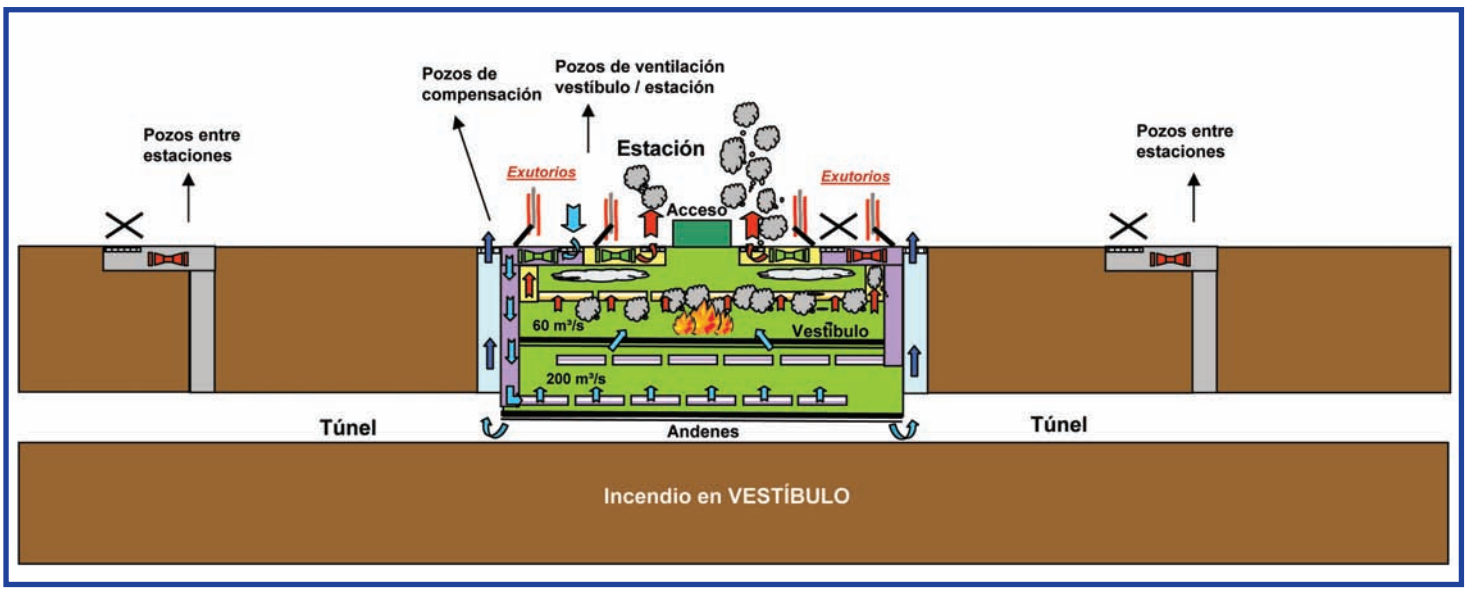


Figura 11. Esquema gráfico de la ventilación en caso de incendio en el vestíbulo de la estación.

Ventilación en caso de incendio en vestíbulo.

El objetivo de la ventilación en esta situación será extraer el humo en el propio vestíbulo, por lo que se pondrán los ventiladores del vestíbulo en extracción; y mantener las escaleras no afectadas y los andenes limpios de humos, por lo que los ventiladores de los andenes funcionarán en impulsión con caudales adecuados.

Esta situación estará apoyada por la tendencia natural del humo a subir. Siempre que sea posible, se estudiará la colocación de exutorios para la evacuación de humos al exterior.

Configuración y ubicación de los equipos.

Los equipos de ventilación alojados en los correspondientes pozos podrán ubicarse de maneras diferentes en función de las limitaciones derivadas de la obra civil. Podrán disponerse en horizontal bajo losas de hormigón en superficie, o en vertical anclados dentro de los pozos si hubiese restricciones de espacio. Los equipos de ventilación para los andenes podrán alojarse bajo losa en superficie o en salas de ventilación habilitadas a nivel de andenes.

Conclusiones.

- Definir una buena estrategia de ventilación mejorará el comportamiento global del sistema y optimizará los resultados en situaciones de emergencia, reduciendo la probabilidad de que acontezcan situaciones críticas.
- La adecuada ubicación y dimensionamiento de los pozos de compensación permitirá la renovación del aire de los túneles ferroviarios con una circulación normal de los trenes y reducirá la resistencia que se opone al avance de los mismos, repercutiendo en un ahorro de las necesidades de energía.
- Solamente se podrán definir estrategias de ventilación basadas en hipótesis que se puedan conocer de manera automática mediante los sensores dispuestos, como pueden ser posición del incendio, temperatura y velocidad del aire en el túnel, etc. Cualquier otra consideración que se quisiera realizar (como posición del incendio dentro del tren) requeriría establecer los correspondientes sensores y comunicarlos con el control de los ventiladores.
- Las estrategias deben definir la respuesta más segura y que permita afrontar adecuadamente la transición entre una situación y otra.
- En sistemas complejos es conveniente verificar mediante simulación CFD el adecuado comportamiento del humo en caso de incendio, verificando que los caudales y configuración de los pozos dispuestos aseguran un adecuado control y estratificación de los humos. También es conveniente verificar mediante este tipo de software el homogéneo reparto de caudales y temperaturas en condiciones de confort.

www.euroestudios.es