

Área temática: ITS en túneles

Título de la comunicación: Gestión inteligente de tráfico en el túnel de Bielsa Aragnouet

Autores:

Patrick Persona, Director del Consorcio para la gestión, conservación y explotación del Túnel de Bielsa-Aragnouet y sus accesos. patrick@bielsa-aragnouet.org

Fernando Portugués Salgado, Geocontrol. fportugues@geocontrol.es 616 613 014

Daniel Octavio de Toledo, Geocontrol. danieltoledo@geocontrol.es 608 29 28 84

Resumen

El túnel de Bielsa-Aragnouet es un túnel transfronterizo entre España y Francia inaugurado en el año 1976; monotubo y bidireccional, de 3070 m de longitud. Comunica la Comunidad Autónoma española de Aragón con el Departamento francés de Altos Pirineos, atravesando el Pirineo central.

Para paliar los efectos del paso del tiempo en la infraestructura, recientemente, el túnel ha sido objeto de obras de acondicionamiento y modernización. Dentro del capítulo de obra civil, se ha mejorado el sistema de impermeabilización y drenaje, así como renovación de firme y refuerzo y reparación de determinadas secciones del túnel.

En materia de instalaciones de seguridad, el túnel ha sido objeto de una importante mejora al dotarle de sistemas de ventilación, iluminación, protección contra incendios, suministro eléctrico, señalización dinámica y de cierre del túnel, sistema de CCTV y DAI, sistema de comunicaciones y sistema de gestión técnica centralizada. De esta manera, el túnel cuenta con todos los equipamientos necesarios según las normativas de referencia.

Debido requisitos normativos de las autoridades francesas, se ha implantado un sistema inteligente de gestión de tráfico que permite la regulación de tráfico en modo alterno bidireccional para vehículos ligeros, y unidireccional para vehículos pesados. Para aumentar la seguridad se ha implantado un algoritmo de gestión de ventilación que reduce el riesgo en caso de incendio de un vehículo en el interior del túnel.

Para poder gobernar todos estos sistemas, se ha implantado un nuevo centro de control en la boca española, desde el cual se monitorizan todas las instalaciones mediante un videowall ubicado en la sala de operadores. El edificio alberga también los locales técnicos que abastecen al primer tercio del túnel; así como una sala de crisis para reunión y coordinación en caso de emergencia.

1 NOMENCLATURA EMPLEADA

Arreglo: Conjunto de detección, conteo y clasificación de vehículos formado por una espira y un sensor piezoeléctrico.

CETU: Centre d'Etudes des Tunnels. Organismo francés, referente mundial em matéria de seguridad en túneles.

CFD: Computational Fluid Dynamics. Estudio computacional de incendios en el dominio tridimensional.

CNESOR: Comisión Nacional de Seguridad Francesa.

GTC: Sistema de Gestión Técnica Centralizada.

IMD: Intensidad Media Diaria de circulación (veh/día).

VP: vehículo pesado.

VL: vehículo ligero.

Vc: velocidad crítica de ventilación en caso de incendio.

2 INTRODUCCIÓN

El Túnel de Bielsa es un túnel transfronterizo que comunica las regiones de Altos Pirineos en Francia y de Aragón en España, que se inauguró el 5 de noviembre de 1976.

El Túnel de Bielsa tiene una longitud de 3070m y conecta la carretera A-138 española con la RD 173 francesa. A continuación se muestran las características del túnel:

Nº de tubos	1	Pendiente media	5.11%
Nº vías por tubo	2	Area transversal	35.6m ²
Tipo de circulación	según 4 modos	Perímetro	23m
Longitud	3070m	Gálibo establecido	4.3m
Longitud tramo español	1306m	Altura en clave	5.38m
Longitud tramo francés	1764m	Anchura útil máxima	7.5m
Cota Boca Sur	1664m	Anchura calzada	6m
Cota Boca Norte	1821m	Aceras	Sí
Desnivel	157m	Anchura aceras	0.5-0.75m

Tabla 1: principales características del Túnel de Bielsa – Aragnouet

3 CONDICIONANTES NORMATIVOS

3.1 Normativa analizada en el proyecto de modernización del Túnel de Bielsa

Cuando se elaboró el proyecto de Modernización del Túnel de Bielsa, al tratarse de un túnel transfronterizo, se tuvieron en cuenta las normativas aplicables de los 2 países.

La normativa aplicada para el Túnel de Bielsa se detalla a continuación:

- Directiva Europea 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 29 de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la Red Transeuropea de Carreteras.
- Anexo 2 de la Circular Interministerial Nº 2000-63.
- Real Decreto 635/2006 de 26 de Mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

3.2 Requerimientos normativos de la CNESOR

En el año 2010, en el transcurso de la obra, la CNESOR examinó el proyecto de modernización del Túnel de Bielsa, exigiendo una serie de cambios; entre estos cambios destaca la imposición del tráfico unidireccional para todos los vehículos, cuando en el

proyecto se preveía la implantación de tráfico bidireccional evitando el cruce de los vehículos pesados.

El Consorcio, tras conversaciones posteriores con la CNESOR, propuso un sistema de gestión inteligente de tráfico que viene marcado principalmente por:

- Posibilidad de tráfico bidireccional para los vehículos ligeros, pero no para los vehículos pesados, que siempre circulan por el túnel con tráfico unidireccional.
- Implantación de la ventilación de precaución cuando un VP circula por el túnel.
- Las autocaravanas se consideran VP.

Para poder llevar a cabo estas condiciones impuestas por la CNESOR, el sistema inteligente de tráfico ha sido diseñado según 4 modos de explotación, que se resumen en el Apartado 8 de este documento.

4 Requisitos funcionales

Además de los requisitos normativos y exigencias de los Organismos que velan por la seguridad en los túneles, para imponer este sistema de gestión de tráfico, fue preciso incorporar requisitos de tipo funcional para viabilizar el tránsito vehicular en su interior, tales como:

- Gestionar la formación de colas en ambos accesos.
- Minimizar los tiempos de espera en los accesos, siendo 10 minutos el tiempo máximo de espera tolerable.

5 ESTUDIO DE TRÁFICO

5.1 Datos de partida:

El Consorcio presentó a la CNESOR, tal como se ha descrito en el Apartado 3, una propuesta de gestión inteligente de tráfico, en la que se permite el tráfico bidireccional para VL, siendo siempre unidireccional para los VP.

En caso de fallo de uno de los arreglos, se ha establecido que el sistema bascula a modo unidireccional, al no poder detectar correctamente los VP y desencadenar las acciones previstas para pasar de modo M2/M4 a modo M3 (descrito en Apartado 8).

Por ello, para poder determinar los ciclos óptimos en función de la época del año, se ha realizado un estudio de tráfico suponiendo la implantación de tráfico unidireccional alternativo, con ciclos fijos.

Para obtener los ciclos óptimos, se han empleado datos históricos de tráfico por el túnel, desde el año 2006.

Es de reseñar que el tráfico en el túnel es característico de la época del año. Los datos históricos revelan que la IMD es máxima en el periodo comprendido entre mediados de julio y mediados de agosto.

5.2 Resultados obtenidos:

En base a este estudio, se obtuvieron unos ciclos de paso óptimos en función de la época del año.

Además, de este estudio se extrajo la conclusión de que a veces se superan los tiempos máximos deseables de espera, que en un primer momento se esperaba que fuesen de 10min.

Esto se traduce en que, en caso de estar en modo de gestión de colas, como ocurre cuando existen VP en ambos accesos del túnel, se deben optimizar los ciclos de paso. La manera de poder optimizar los ciclos de paso por el túnel es a través de modificar el tiempo de apertura de los semáforos.

El sistema inteligente de tráfico es capaz de calcular el tiempo de apertura del semáforo de cada entrada de manera que se optimiza la apertura en verde, lo que redundará en una gestión óptima de los tiempos de paso de vehículos.

6 CAMPAÑA DE MEDICIONES DE LA VENTILACION

Uno de los requisitos exigidos por la CNESOR en 2010 fue la realización de una campaña de mediciones de la velocidad del aire dentro del túnel, porque de esta manera se podría calcular el valor real de la pérdida de carga asociada a la fricción con las paredes del túnel.

Las causas de la ventilación natural dentro del túnel son 3:

- La diferencia de peso de las columnas de aire a cada lado del accidente geográfico a través del que discurre el túnel.
- El efecto del viento, que produce una sobrepresión o depresión según la incidencia con los accidentes geográficos.
- El efecto termostático producido por la pendiente del túnel y la diferencia entre las temperaturas del aire en el interior y el exterior.

La influencia de estos 3 parámetros no siempre es fácil de determinar, por lo que la manera más efectiva de calcular el valor real de la pérdida de carga debida a la fricción del aire con las paredes es mediante la aplicación de la fórmula:

$$\Delta P_{bocas} = \Delta P_{lineales} + \Delta P_{singulares} = \left(\lambda \frac{L}{D_h} + \xi_E + \xi_S \right) \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (1)$$

De acuerdo a la publicación “Dossier Pilote de Ventilation” del CETU, para el cálculo de la pérdida de carga, se debe escoger el percentil 95 de la muestra de velocidades. Este valor se iba a emplear a posteriori para la realización de simulaciones CFD en 3D.

La duración de esta campaña fue de un año. Se emplearon 5 anemómetros a distancias similares dentro del túnel, con objeto de obtener un dato característico de toda la longitud del túnel. La campaña comenzó el 9 de febrero de 2011 y finalizó el 21 de febrero de 2012.

Una vez la campaña realizada, se obtuvo la siguiente tabla recopilatoria de datos:

Percentil 95 de velocidad (m/s)			
Sentido	Sin distinguir horario	De 8,00h a 00,00h	De 00,00h a 8,00h
Francia	3,46	3,5	3,44
España	4,06	4,15	3,98
Valor absoluto	3,85	4,01	3,75

Tabla 2: resumen de valores obtenidos en la campaña de mediciones del tiro natural en el Túnel de Bielsa

El valor obtenido finalmente como percentil 95 es el de 3.85m/s.

7 ANÁLISIS DE RIESGOS

En el marco del Dossier de Seguridad del Túnel de Bielsa, realizado por Geocontrol, se realizó un Análisis de Riesgos muy exhaustivo para sacar conclusiones de cara a los posibles modos de explotación del túnel.

La CNESOR sugirió estudiar de qué manera influye el disponer de una leve velocidad en sentido España – Francia, contando con un retén de bomberos de primera intervención en la Boca Sur del túnel.

7.1 Primer Análisis de riesgos:

Por ello, se realizó un primer Análisis de Riesgos a finales de junio 2012, en el que se analizaron los casos siguientes, en 4 familias:

7.1.1 Familias de escenarios:

a) Familia 1: incendio con tráfico unidireccional

Escenarios con incendios que involucran VP y VL, de 30MW y 100MW de potencia, en época estival y fuera de época estival, con una tasa de tráfico del percentil 95 de tráfico estival, y con contrapresiones de 100Pa y 200Pa, en distintas ubicaciones del túnel.

Se observó que el hecho de tener una contrapresión natural elevada puede ser causante de mayor gravedad en caso de incendio, debido a que los humos pueden afectar a los vehículos aguas abajo del incendio.

Fruto de estos estudios, se decidió implantar la velocidad de precaución, de valor 1.5m/s, en el sentido de avance del VP. De esta forma, se ayuda a evitar que los humos del incendio puedan afectar a los vehículos aguas abajo del incendio, cuando la ventilación no ha alcanzado el valor de la velocidad crítica de incendio.

Esto implicó la realización de nuevos escenarios de estudio dentro del marco del Análisis de Riesgos.

b) Familia 2: incendio con tráfico bidireccional en periodo estival

Escenarios con Incendios que involucran sólo VL, de 15MW de potencia, en época estival, con una tasa de tráfico del percentil 99 del tráfico estival, y con velocidades impuestas de 1, 1.25 y 1.5m/s en sentido España – Francia, en distintas ubicaciones del túnel.

El objeto de esta prueba es deducir de la terna de velocidades estudiadas (1, 1.25, 1.5) m/s en sentido España - Francia, cuál es la más favorable desde el punto de vista de la seguridad. De este estudio se obtuvo que $v=1.5\text{m/s}$ es la velocidad óptima de la terna propuesta, desde el punto de vista de la seguridad.

Dado que la IMD en época estival es superior a la IMD del resto de meses del año, se decidió proponer la presencia de un retén de bomberos de primera intervención en la Boca Sur del túnel. La leve velocidad de 1.5m/s está pensada para permitir a los bomberos de la Boca Sur intervenir en caso de incendio en el túnel, evitando que les afecten los humos en su intervención.

c) Familia 3: incendio con tráfico bidireccional fuera de época estival

Escenarios con Incendios que involucran sólo VL, de 15MW de potencia, fuera de época estival, con una tasa de tráfico del percentil 99 del tráfico estival, y con un tiro natural de 3.85m/s (percentil 95 de la muestra de velocidades registradas) en ambos sentidos, en distintas ubicaciones del túnel.

d) Familia 4: incendio con tráfico bidireccional fuera de época estival

Escenarios con Incendios que involucran sólo VL, de 15MW de potencia, fuera de época estival, con una tasa de tráfico del percentil 99 del tráfico estival, y con un tiro natural de 3.85m/s (percentil 99 de la muestra de velocidades registradas) en ambos sentidos, en distintas ubicaciones del túnel.

Los escenarios citados se realizaron con el software Camatt, desarrollado por el CETU, que modeliza el incendio con un análisis 1D.

Para obtener un resultado más preciso, algunos de los escenarios en modo bidireccional se simularon también con el programa Solvent, que modeliza los incendios con un análisis 3D.

7.1.2 Conclusiones:

a) Nivel de gravedad asociado a los escenarios:

Para poder deducir el nivel de gravedad de cada escenario, se emplea la matriz Gravedad Vs Frecuencia, con el criterio empleado en el Dossier Preliminar de Seguridad.

En esta matriz se clasifican los escenarios en 5 niveles de gravedad en función del nº de muertos y heridos, y también se clasifican según su probabilidad de ocurrencia en 6 niveles.

Se elabora la matriz Gravedad Vs Frecuencia situando cada escenario en una celda, de forma que se le asigna un nivel de riesgo, que puede ser aceptable o no.

Las conclusiones globales del Análisis de Riesgos son que el tráfico bidireccional implica un nivel aceptable de riesgo en su explotación. Sin embargo, algunos escenarios estudiados en modo unidireccional se situaron en la zona inaceptable de riesgo, pero tal como se ha señalado, se decidió implantar la velocidad de precaución de 1.5m/s en el sentido del VP para mejorar el resultado de estos escenarios.

b) Integración de autocaravanas como VP:

Otro dato a tener en cuenta es que se desconoce cuál será el nuevo porcentaje de VP, dado que las autocaravanas pasan a formar parte de los VP. Por ello, el sistema de gestión inteligente de tráfico está diseñado para poder discriminar los vehículos según su distancia entre ejes.

7.1.3 Necesidad de nuevas simulaciones considerando la velocidad de precaución:

Dado que quedó pendiente el estudio de cómo mejora el resultado de los escenarios en modo unidireccional cuando existe velocidad de precaución de 1.5m/s en el sentido del VP, a finales de octubre de 2012 se presentó un segundo Análisis de Riesgos, que se detalla a continuación.

7.2 Segundo Análisis de riesgos:

7.2.1 Familias de escenarios:

a) Familia 1: incendio con tráfico unidireccional – simulaciones en 3D

Escenarios con incendios que involucran VP y VL, de 30MW y 100MW de potencia, en época estival, con una tasa de tráfico del percentil 95 de tráfico estival, y con velocidades de precaución de 1.5m/s en el sentido del VP. La ubicación del túnel para el incendio es la que había presentado mayor nivel de riesgo en el anterior Análisis de Riesgos.

Se ha añadido un nuevo factor, que es la presencia o no de un Autobús en el tráfico.

Para llevar a cabo este análisis, se han realizado las simulaciones en 3D.

b) Familia 2: incendio con tráfico bidireccional

Escenarios con incendios que involucran sólo VL, de 15MW de potencia, en época estival y fuera de época estival, con una tasa de tráfico del percentil 99 de tráfico estival, y con velocidades de 1.5m/s de España – Francia, y de 3.85m/s (percentil 95 de la muestra de velocidades registradas), en varias ubicaciones del túnel.

Las simulaciones se han realizado con un análisis en 3D y 1D.

c) Familia 3: incendio con tráfico unidireccional – simulaciones en 1D

Escenarios con incendios que involucran VP y VL, de 30MW y 100MW de potencia, en época estival, con una tasa de tráfico del percentil 95 de tráfico estival, y con velocidades de precaución de 1.5m/s en el sentido del VP. La ubicación del túnel para el incendio es la que había presentado mayor nivel de riesgo en el anterior Análisis de Riesgos.

Se ha añadido un nuevo factor, que es la presencia o no de un Autobús en el tráfico.

Para llevar a cabo este análisis, se han realizado las simulaciones en 1D.

7.2.2 Conclusiones:

Las conclusiones de este nuevo Análisis de Riesgos son parecidas a las del documento anterior, aunque con algunas diferencias:

- a) El nivel de riesgo asociado al tráfico bidireccional es aceptable.
- b) La puesta en servicio de la velocidad de precaución supone una mejora sustancial de seguridad cuando un VP pasa por el túnel.

8 ESTRATEGIAS DE VENTILACION

El Análisis de Riesgos descrito en el apartado 7 se integró dentro del Dossier de Seguridad del Túnel de Bielsa.

Como consecuencia de este Análisis de Riesgos, así como de reuniones mantenidas entre el Consorcio y los servicios de emergencias franceses y españoles, se diseñaron los modos de explotación del túnel, que se detallan en la Tabla 3:

Modo tráfico	Horario	Tipo tráfico	Periodo	Ventilación sin incendio	Ventilación con incendio	Sentido
M1	22h/6h	Unidireccional	Indiferente	Apagada	Vc	Sentido tráfico
M2	6h-22h	Bidireccional para VL	Todo año salvo periodo estival (15/7 - 15/8)	Apagada	Vc	Menos usuarios impactados
M3	6h-22h	Unidireccional	Indiferente	1.5m/s (sentido tráfico)	Vc	Sentido tráfico
M4	6h-22h	Bidireccional para VL+retén bomberos	Periodo estival (15/7 - 15/8)	1.5m/s (España - Francia)	Vc	España-Francia

Tabla 3: resumen de modos de explotación

9 RED DE CAMPO IMPLANTADA Y PROGRAMACION EN EL SCADA

La red de campo del sistema inteligente de tráfico está compuesta por 5 arreglos en cada acceso al túnel.

9.1 Elementos de la red de campo:

9.1.1 Lado español:

- a) Arreglo EE1: arreglo situado a la altura del centro COEX, a unos 5 km del acceso sur, cuya función es informar al Centro de Control del paso de un VP para desencadenar las acciones pertinentes para el paso de modo M2 a M3 o de modo M4 a M3.
- b) Arreglo EE2: arreglo situado a unos 300m del semáforo de entrada a la Boca Sur del túnel.

Su función es enviar a la GTC la señal de paso del VP por su ubicación para que la GTC chequee la doble condición para acceso del VP al túnel [(1) ausencia de vehículos en contrasentido y (2) $v > 1.5\text{m/s}$ en el sentido del VP]. Si una de las 2 condiciones no se verifica, el semáforo se pone en rojo.

- c) Arreglo EE3: arreglo situado a unos 40m del semáforo de entrada a la Boca Sur del túnel.

Su función es enviar a la GTC la señal de paso del VP por su ubicación para que la GTC chequee la doble condición para acceso del VP al túnel [(1) ausencia de vehículos en contrasentido y (2) $v > 1.5\text{m/s}$ en el sentido del VP]. Si una de las 2 condiciones no se verifica, el semáforo se pone en rojo.

- d) Arreglo EE4: arreglo situado en la entrada del túnel en boca sur en la vía derecha en sentido Esp-Fr.

Su función es informar a la GTC de que el VP ha accedido al túnel y de esta manera, poder realizar el balance de VP en el interior del túnel.

- e) Arreglo EE5: arreglo situado en la salida del túnel en boca norte en la vía derecha en sentido Esp-Fr.

Su función es informar a la GTC de que el VP ha salido del túnel y de esta manera, poder realizar el balance de VP en el interior del túnel.

9.1.2 Lado francés:

- a) Arreglo EF1: arreglo situado a la altura del puente de los Templarios, a unos 9 km de la boca Norte del Túnel, cuya función es informar al centro de control del paso de un VP para desencadenar las acciones pertinentes para el paso de modo M2 a M3 o de modo M4 a M3.
- b) Arreglo EF2: arreglo situado a unos 300m del semáforo de entrada a la Boca Sur del túnel.

Su función es enviar a la GTC la señal de paso del VP por su ubicación para que la GTC chequee la doble condición para acceso del VP al túnel [(1) ausencia de vehículos en contrasentido y (2) $v > 1.5\text{m/s}$ en el sentido del VP]. Si una de las 2 condiciones no se verifica, el semáforo se pone en rojo.

- c) Arreglo EF3: arreglo situado a unos 40m del semáforo de entrada a la Boca Sur del túnel.

Su función es enviar a la GTC la señal de paso del VP por su ubicación para que la GTC chequee la doble condición para acceso del VP al túnel [(1) ausencia de vehículos en contrasentido y (2) $v > 1.5\text{m/s}$ en el sentido del VP]. Si una de las 2 condiciones no se verifica, el semáforo se pone en rojo.

- d) Arreglo EF4: arreglo situado en la entrada del túnel en boca sur en la vía derecha en sentido Esp-Fr.

Su función es informar a la GTC de que el VP ha accedido al túnel y de esta manera, poder realizar el balance de VP en el interior del túnel.

- e) Arreglo EF5: arreglo situado en la salida del túnel en boca sur en la vía derecha en sentido Fr- Esp..

Su función es informar a la GTC de que el VP ha salido del túnel y de esta manera, poder realizar el balance de VP en el interior del túnel.

9.2 Criterios seguidos en la programación en el SCADA:

9.2.1 Tiempo previsible de tránsito:

Se han realizado medidas en campo con vehículos pesados para obtener unos valores previsibles de tiempo necesario para tránsito hacia el túnel, que se exponen a continuación:

- a) En el acceso francés:

Fr	EF-1	EF-2	EF-3	EF-4	EF-5
----	------	------	------	------	------

t (min)	0	11min25s	11min45s	11min55s	15min20s
---------	---	----------	----------	----------	----------

b) En el acceso español:

Esp	EE-1	EE-2	EE-3	EE-4	EE-5
t (min)	0	5min25s	5min50s	6min5s	10min20s

9.2.2 Vehículo desaparecido:

Se considera que un vehículo pesado se encuentra desaparecido cuando, en su tránsito hacia el túnel, tarda más de lo previsto en llegar desde uno de los arreglos hasta el siguiente. Se han establecido los siguientes valores:

- a) Vehículo desaparecido entre arreglos EE1 y EE2: 7min
- b) Vehículo desaparecido entre arreglos EF1 y EF2: 14min40s.
Este valor se ha obtenido aplicando al tramo francés la misma parte proporcional (entre tiempo de vehículo desaparecido y tiempo previsible) que la considerada en el tramo español.
- c) Vehículo desaparecido entre arreglos EE2 y EE3 o entre EF2 y EF3: 1min
- d) Vehículo desaparecido entre arreglos EE3 y EE4 o entre EF3 y EF4: 1min
- e) Vehículo desaparecido entre arreglos EE4 y EE5 o entre EF4 y EF5: 6min40s

Para las espiras internas se ha programado que si un vehículo tarda más de 5min en pasar de una región a la siguiente, el contador de esta región se resetea a 0.

9.2.3 Prioridad de acceso al túnel:

Dado que los arreglos EE1 y el EF1 no se encuentran a la misma distancia de la boca del túnel, se establece que, en caso de que un VP haya pasado (cuando se tiene modo M2) por EE1 y otro VP haya pasado por EF1, tiene prioridad aquel que ha activado la preventilación en su sentido de avance.

Se ha establecido que se empieza a preventilar 4min30s antes de la llegada del VP a la boca del túnel, es decir:

- a) Lado español:
Se empieza a preventilar una vez ha transcurrido 1min desde el paso del VP por EE1.
- b) Lado francés:
Se empieza a preventilar una vez ha transcurrido 7min desde el paso del VP por EF1.

9.2.4 Zona de espera:

Se establece que un vehículo se encuentra en zona de espera:

- a) Si es un VP, cuando está entre los arreglos EE1 y EE4 o entre los arreglos EF1 y EF4.
- b) Si es un VL, cuando está entre los arreglos EF2 y EF4 o entre los arreglos EE2 y EE4.

9.2.5 Tiempo para que un semáforo se ponga en rojo cuando pasa un VP por el túnel:

De cara a fijar los tiempos en que un semáforo se pone en rojo cuando pasa un VP por el túnel, se establece que el tiempo máximo deseable de espera en la boca del túnel es de 10min.

Teniendo esta condición de contorno y habiendo medido los tiempos de tránsito de un VP hacia el túnel, se pueden obtener los momentos en que un semáforo debe ponerse en rojo cuando un VP pasa por el túnel.

A continuación se muestran varios ejemplos:

- a) Caso en que un VP circula de Esp-Fr:

Semáforo en BN:

Si en $t=0$ el VP pasa por EE1, el semáforo en BN se pone en rojo en $t=2\text{min}$.

El tiempo de 2min se ha escogido porque se intenta que, en el momento en que el VP llega a la BS, el último vehículo (tanto VP como VL) en contrasentido haya desalojado el túnel.

Puesto que se ha obtenido que un VP1 tarda 3min30s en atravesar el túnel de BN a BS, y un VP2 tarda 5min30s en circular desde EE1 hasta EE2, se establece que el semáforo en BS se ponga en rojo en $t=2\text{min}$.

De esta manera se logra que al llegar al VP2 al arreglo EE2, el último vehículo en contrasentido ya haya abandonado el túnel, verificándose una de las 2 condiciones para acceso del VP2 al túnel, y optimizando los tiempos.

Semáforo en BS:

Si en $t=0$ el VP pasa por EE1, el semáforo en BS se pondrá en rojo en un momento u otro dependiendo de una circunstancia: existencia o no de vehículos en zona de espera en el acceso opuesto.

Si no existen vehículos en zona de espera en el acceso francés, el semáforo en BS permanecerá en verde hasta la aparición de un vehículo en zona de espera en acceso francés, o hasta que lo origine el tránsito de un VP de Esp-Fr.

Por el contrario, en caso de que existan vehículos en zona de espera en el acceso francés, el momento en que el semáforo en BS se ponga en rojo será función de la condición de tiempo máximo de espera de 10min en cada boca.

Es decir, si en $t=0$, el VP1 ha pasado por EE1, en $t=6\text{min}5\text{s}$ el VP ha pasado por EE4 y en $t=2\text{min}$ se ha puesto en rojo el semáforo en BN, el semáforo en BS se pondrá en rojo en $t=2+10-4\text{min}15\text{s} = 7\text{min}45\text{s}$.

Una vez el VP1 ha salido del túnel por la BN, comienza la maniobra de preventilación en caso de que un VP se encuentre en zona de espera en acceso francés sin más demora. Si existen sólo VL en zona de espera, no se desencadena la maniobra de la preventilación.

b) Caso en que un VP circula de Fr-Esp:

Semáforo en BS:

Si en $t=0$ el VP pasa por EF1, el semáforo en BS se pone en rojo en $t=7\text{min}15\text{s}$.

El tiempo de $7\text{min}15\text{s}$ se ha escogido porque se intenta que, en el momento en que el VP llega a la BN, el último vehículo (tanto VP como VL) en contrasentido haya desalojado el túnel.

Puesto que se ha obtenido que un VP1 tarda $4\text{min}15\text{s}$ en atravesar el túnel de BS a BN, y un VP2 tarda $11\text{min}30\text{s}$ en circular desde EF1 hasta EF2, se establece que el semáforo en Bs se ponga en rojo en $t=7\text{min}15\text{s}$.

De esta manera se logra que al llegar al VP2 al arreglo EF2, el último vehículo en contrasentido ya haya abandonado el túnel, verificándose una de las 2 condiciones para acceso del VP2 al túnel, y optimizando los tiempos.

Semáforo en BN:

Si en $t=0$ el VP pasa por EF1, el semáforo en BN se pondrá en rojo en un momento u otro dependiendo de una circunstancia: existencia o no de vehículos en zona de espera en el acceso opuesto.

Si no existen vehículos en zona de espera en el acceso español, el semáforo en BN permanecerá en verde hasta la aparición de un vehículo en zona de espera en acceso español, o hasta que lo origine el tránsito de un VP de Fr-Esp.

Por el contrario, en caso de que existan vehículos en zona de espera en el acceso español, el momento en que el semáforo en BN se ponga en rojo será función de la condición de tiempo máximo de espera de 10min en cada boca.

Es decir, si en $t=0$, el VP1 ha pasado por EF1, en $t=12\text{min}$ el VP ha pasado por EF4 y en $t=8\text{min}15\text{s}$ se ha puesto en rojo el semáforo en BS, el semáforo en BN se pondrá en rojo en $t=8\text{min}15\text{s}+10-3\text{min}30\text{s} = 14\text{min}45\text{s}$.

Una vez el VP1 ha salido del túnel por la BS, comienza la maniobra de preventilación en caso de que un VP se encuentre en zona de espera en acceso francés sin más demora. Si existen sólo VL en zona de espera, no se desencadena la maniobra de la preventilación.

9.2.6 Gestión de colas:

La gestión de colas se activa en el momento en que los 2 semáforos de las bocas se encuentran en rojo.

El objeto de la gestión de colas es optimizar el tiempo en verde de los semáforos para desalojar la cola en el tiempo óptimo.

9.2.7 Preventilación:

A lo largo de las pruebas de nivel 1 de tráfico realizadas, se ha empleado el término preventilación a la disposición de una ventilación forzada de valor $v > 1.5\text{m/s}$ cuando un VP atraviesa el túnel en régimen unidireccional. El objeto de la preventilación es minimizar el efecto del backlayering de humos en caso de un incendio de VP.

a) Tabla de accionamiento de ventiladores:

Se ha dispuesto de una tabla en la que se indican los ventiladores necesarios para invertir un tiro natural específico y obtener un valor de velocidad del aire de $v > 1.5\text{m/s}$.

Esta tabla se expone a continuación:

Velocidad a compensar (m/s)	(X)	(Y)
-5.3	42	26
-3.85	30	20
-3	23	16
-2	17	12
-1.5	15	9
-1	14	8
-0.5	12	6
0.5	10	6
1	7	4

Tabla 9.2.7: nº de ventiladores a arrancar y mantener para vencer tiro natural en el túnel

Donde:

X: número de ventiladores a arrancar para invertir el tiro natural

Y: número de ventiladores a mantener para que, una vez superado el umbral de 1.5m/s , la velocidad permanezca siempre por encima de este límite.

b) Principios de funcionamiento:

Los primeros ventiladores en arrancar son aquellos con menos horas de uso.

Se tiene desde el principio el mismo número de ventiladores por cada estación remota (con una diferencia máxima de un ventilador) siempre que no se supere la cantidad de 14 ventiladores accionados por remota.

En caso de ser necesarios más ventiladores, se empiezan a arrancar ventiladores de la estación remota del edificio del apartadero, que controla 26 ventiladores.

La fase de arranque de ventiladores dura 2min. Una vez transcurridos 2min, se pasa a la fase de mantenimiento, en la que se desactivan varios ventiladores para obtener los (Y) ventiladores necesarios para mantener la velocidad en $v > 1.5\text{m/s}$ en el sentido del VP.

En caso de que la velocidad bajase de $v=1.5\text{m/s}$ en el sentido del VP, se activan ventiladores suplementarios para que $v > 1.5\text{m/s}$. La GTC hace una lectura cada 12s y, en caso de estar por debajo de este umbral, se activa un ventilador suplementario.

9.2.8 Características de un VP:

Tal como se ha señalado en el apartado 3, las autocaravanas se consideran VP.

Tras realizar una examinación de las características de las autocaravanas en modelos comerciales, se ha programado que se consideran como autocaravanas aquellos vehículos de 2 ejes cuya distancia entre ejes es superior a 3.4m.

Los arreglos colocados en los accesos constan de 2 sensores piezoeléctricos, que son capaces de medir la distancia entre ejes de cualquier vehículo, de forma que se pueden disgregar aquellos vehículos con distancia entre ejes $> 3.4\text{m}$.

Los vehículos pesados que no son autocaravanas son los camiones, identificados al disponer de más de 2 ejes.

9.2.9 Condiciones de contorno:

En un principio se deseaba establecer como condición de contorno un tiempo máximo de 10min de espera en ambas bocas, en caso de que existiese gestión de colas.

Sin embargo, el hecho de tener la condición de la preventilación como necesaria para el paso de VP por el túnel ha modificado el tiempo máximo de espera.

Las pruebas efectuadas de preventilación en modo real han desvelado que en el caso más desfavorable se requieren 3min para invertir el tiro natural (en cuyo caso para invertir el tiro en sentido opuesto, una vez ha salido el VP del túnel, se requiere un máximo de 2min) y alcanzar 1.5m/s en el sentido del VP. Por tanto, el tiempo máximo de espera ha pasado a ser de $4\text{min}15\text{s}+3+3\text{min}30+2\text{min}=12\text{min}45\text{s}$, que tendría lugar cuando existe gestión de colas.

10 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE CAMPO Y VENTILACION

Tal como se ha abordado en puntos anteriores, existen 4 modos de explotación normal durante el año.

Se han realizado un gran número de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de todos los modos de tráfico implementados.

Las pruebas de tráfico realizadas se describen a continuación:

10.1 Pruebas de tráfico:

10.1.1 Grupo 1: tráfico de VP en sentido España – Francia

Se han realizado pruebas que se dividen en 6 subgrupos, en los que se comprueba de qué manera se activan las acciones para pasar de modo M2 a M3 en función de que un VP se detecte por las espiras EE1/EF1, EE2/EF2, EE3/EF3, suponiendo también que exista tráfico en el acceso opuesto.

Se han incluido otros factores como por ejemplo la aparición simultánea de otros VP tanto en el mismo sentido de circulación como en el sentido opuesto; de esta manera se ha podido constatar la correcta implementación de los algoritmos en casos particulares de VP que aparecen por los arreglos EE2/EF2 y EE3/EF3 sin haber sido detectados previamente en los arreglos EE1/EF1.

Por último, se han probado otros casos particulares en que un VP que ha sido detectado en un arreglo, tarda demasiado tiempo en ser detectado en el siguiente, de manera que se considera desaparecido.

El objetivo de las pruebas ha sido comprobar que se cumplen las 2 condiciones para permitir el acceso de un VP al túnel:

- Ausencia de vehículos en contrasentido (1)
- Ventilación de precaución implantada en el sentido del VP (2)

Una de las variables que se ha analizado y ajustado en estas pruebas es la implantación de la ventilación de precaución en el sentido del VP.

Las pruebas realizadas han permitido calcular en condiciones reales el tiempo que el sistema de ventilación requiere para implantar la velocidad de 1.5m/s en el sentido del VP.

En un primer momento se elaboró una tabla de ventilación en base a simulaciones con el software Camatt, en la que se indica el nº de ventiladores que se deben arrancar y mantener para alcanzar la velocidad de 1.5m/s lo antes posible. Posteriormente, estas pruebas han permitido calcular el nº real de ventiladores a arrancar y mantener para lograr este objetivo, así como los tiempos necesarios.

Dado que estas pruebas conllevan alteraciones en el tráfico, se han realizado con los elementos de campo de tráfico (semáforos, barreras, arreglos) en modo simulado. Sin embargo, el sistema de ventilación sí que se ha probado en modo real, para poder obtener los datos citados de tiempos para alcanzar velocidad de precaución, nº de ventiladores, etc.

10.1.2 Grupo 2: tráfico de VP en sentido Francia - España

En este grupo las pruebas realizadas son las mismas que en el grupo 1, con la diferencia que los casos estudiados son en sentido Francia – España.

Las pruebas efectuadas han permitido corroborar lo mismo que se buscaba en las pruebas del grupo 1, es decir, la correcta implementación de los algoritmos para pasar de modo M2 a modo M3 en todos los casos posibles.

10.1.3 Grupo 3: otras pruebas de tráfico:

En el último grupo de pruebas de tráfico se han realizado pruebas diferentes a las señaladas en los grupos 1 y 2.

En el grupo 3 se ha comprobado:

- a) Correcta implementación de los modos degradados de tráfico: se ha programado que, en caso de fallo de uno de los arreglos en modo M2, el sistema bascula a modo unidireccional, definido como M0.

En este modo de tráfico, el tráfico de todos los vehículos es unidireccional alternativo, con ciclos de tráfico que se han obtenido en base a un histórico de datos de tráfico de que dispone el Consorcio desde el año 2006.

Estas pruebas se han realizado con los elementos de campo de tráfico (barreras, semáforos, arreglos) en modo simulado, para no alterar el tráfico del túnel.

- b) Correcta implementación del modo nocturno: se ha programado que en horario nocturno, el tráfico sea unidireccional. Dada la baja IMD en este horario, se ha previsto que los semáforos de ambas bocas estén en rojo hasta que aparezca un vehículo, en cuyo caso se le permite el paso por el túnel.

Estas pruebas se han realizado con los elementos de campo de tráfico (barreras, semáforos, arreglos) en modo simulado, para no alterar el tráfico del túnel.

- c) Correcta programación de los algoritmos para casos en que se debe pasar de modo M4 a modo M3, a través de varios casos de aparición de un VP por ambos accesos.
- d) Correcta implementación de la gestión de colas: en caso de que existan VP en ambos accesos del túnel, se ha previsto que se calculen de forma automática los ciclos óptimos de paso por el túnel en función de la longitud de la cola.

Esta prueba ha conllevado la verificación del funcionamiento en modo real de los PMVs en modo “cuenta atrás”.

Al margen de estas pruebas, se han realizado pruebas en modo real del correcto funcionamiento de los VP en todos los arreglos que definen la red de campo de tráfico, para constatar que efectivamente, en el momento de detectar un VP, se envía a la GTC la orden de activación de velocidad de precaución, cierre de ambos accesos al túnel, verificación de ausencia de vehículos en contrasentido, etc.

10.2 Pruebas de ventilación:

De la misma manera que se han realizado pruebas del sistema de tráfico, también se han realizado pruebas relativas al sistema de ventilación:

10.2.1 Prueba de humos fríos:

La prueba de humos fríos se realizó en el año 2012 y tenía un doble objetivo: verificar el correcto funcionamiento del sistema de ventilación, por una parte para la puesta a punto de la velocidad de precaución cuando un VP se detecta en el arreglo EF1, y por otra parte, cuando existe un incendio en modo M2.

En ambas pruebas se simuló en modo real cómo funcionaría el sistema de ventilación en dos situaciones diferentes, una bastante usual, siempre que un VP se encuentre en uno de los accesos del túnel, y otra menos usual, que es el caso de incendio en modo M2.

Una de las conclusiones de esta prueba es que el sistema de conteo interno de vehículos funciona correctamente, puesto que en caso de incendio en modo M2 se debe ventilar en el sentido con menos usuarios impactados.

10.2.2 Prueba de humos tibios:

En el año 2013 se realizó la prueba de humos tibios, en la cual se simuló igualmente un incendio en modo M2 de explotación y se hizo una comprobación similar a la de humos fríos.

Se pudo constatar en esta prueba nuevamente que el sistema de conteo interno de vehículos funciona correctamente, accionando la ventilación en el sentido con menos usuarios impactados.

También se comprobó la correcta programación del algoritmo de ventilación en caso de incendio, en el que, tras múltiples ajustes, se programó un intervalo en que se debía mantener la velocidad crítica para ventilación en caso de incendio.

Otro de los objetivos de la prueba era verificar si existe estratificación. Se pudo constatar que a velocidades bajas, del orden de 1m/s, la estratificación existe en unos 100m de distancia. Cuando la velocidad alcanza valores más elevados, del orden de 3m/s, no existe estratificación.

11 CONCLUSIONES

- El sistema de gestión inteligente propuesto por el Consorcio Túnel de Bielsa es un sistema que cumple con las exigencias de seguridad formuladas por la CNESOR y permite el tráfico bidireccional para los VL.
- Dado que se requiere considerar las autocaravanas como VP, es necesario realizar una campaña de obtención de datos de tráfico para poder obtener el nuevo porcentaje de VP, que tiene influencia directa en el funcionamiento del sistema de ventilación.
- El sistema de tráfico se ha definido bajo hipótesis teóricas. Por ello es necesaria la realización de un periodo de rodaje lo suficientemente extenso, para poder ajustar todas las variables que definen el sistema y adaptar el sistema a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

“Dossier de Sécurité du Tunnel d’Aragouet – Bielsa”.

VERGNAULT. J.M. (26/6/2012). “Rapport d’analyse et d’avis. Projet de remise en mode bidirectionnel du trafic des véhicules légers ».

VERGNAULT. J.M. (6/11/2012). “Rapport de sécurité du tunnel d’Aragouet – Bielsa. DOSSIER DE SECURITE ».

« Avis de la Commission Nationale d’Evaluation de la Sécurité des Ouvrages Routiers ». Séance du 6 juillet 2012, Paris.