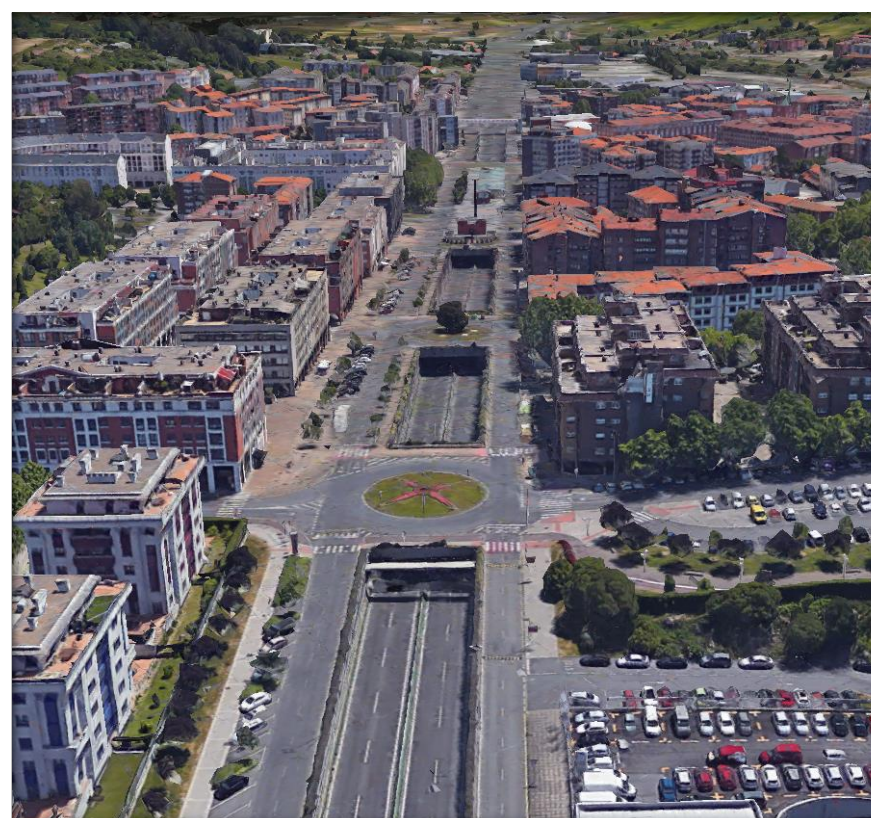


PROYECTO CONSTRUCTIVO DE ADECUACIÓN DEL TÚNEL DE LA AVANZADA EN LA BI-637
Nº EX.: 2020/004/073/10

PROYECTO DE ADECUACIÓN DEL TÚNEL DE LA AVANZADA EN LA BI-637



Anejo 08 - Ventilación

Anejo 08. Ventilación

Control de firmas

Realizado	Aprobado
Thomas Coppens	Jorge Bezhold
Fecha y Firma	Fecha y Firma
No precisa firma si está aprobado electrónicamente mediante ruta	

Información del Documento	
Código Documento	P0210L59-ATA-AP-EM-AN-0008
Referencia	P0210L59

Registro de cambios

Rev	Fecha	Autor	Sección afectada	Cambios
00	26/05/2021	Thomas Coppens	Todas	Edición inicial
01	20/10/2021	Thomas Coppens	Todas	Actualización

Anejo 08. Ventilación

INDICE	
1	INTRODUCCIÓN..... 6
1.1	Objetivo y Alcance 6
1.2	Características principales del túnel de La Avanzada 6
1.3	Decreto Foral de Seguridad de Túneles de Carreteras 6
1.4	Clasificación del túnel de La Avanzada 6
2	VENTILACIÓN DE TÚNEL 7
2.1	Introducción 7
2.1.1	Estado actual..... 7
2.1.2	Necesidades de ventilación mecánica 7
2.1.3	Análisis del marco normativo y recomendaciones..... 7
2.2	Tipos de sistemas de ventilación 8
2.2.1	Ventilación natural..... 8
2.2.2	Ventilación longitudinal 8
2.2.3	Ventilación longitudinal con extracción masiva de humo..... 9
2.2.4	Ventilación semi-transversal 9
2.2.5	Ventilación transversal 10
2.3	Descripción del sistema de ventilación del túnel 10
2.3.1	Elección del tipo de ventilación 10
2.3.2	Ventilación longitudinal 10
2.3.3	Estrategia de ventilación 11
2.4	Criterios de diseño..... 11
2.5	Metodología empleada para el diseño 12
2.6	Dimensionamiento de la ventilación sanitaria..... 13
2.6.1	Conceptos generales..... 13
2.6.2	Límites de contaminantes en interior de túneles y en entornos urbanos 13
2.6.3	Emisiones de contaminantes de vehículos 13
2.6.4	Condiciones de tráfico consideradas en los cálculos..... 14
2.6.5	Otras hipótesis de cálculo consideradas 15
2.6.6	Resultados de los cálculos preliminares..... 15
2.7	Cálculo unidimensional para la ventilación en caso de un incendio..... 17
2.7.1	Conceptos generales..... 17
2.7.2	Potencia de incendio 17
2.7.3	Velocidad crítica 18
2.7.4	Resultados de los cálculos preliminares..... 18
2.8	Modelo y simulación de ventilación unidimensional 22
2.8.1	Descripción del túnel de la Avanzada 22
2.8.2	Posicionamiento del incendio en el túnel..... 22
2.8.3	Modelo de ventilación 22
2.8.4	Resultados 22
2.9	Cálculo tridimensional para la ventilación en caso de incendio..... 23
2.9.1	Conceptos Generales 23
2.9.2	Descripción del Software empleado 24
2.9.3	Descripción del túnel de la Avanzada 24
2.9.4	Modelo Computacional..... 25
2.9.5	Escenarios de Incendio..... 27
2.9.6	Condiciones de Contorno 27
2.9.7	Resultados de Escenario 1..... 28
2.9.8	Resultados de Escenario 2..... 30
2.10	Solución propuesta 33
2.10.1	Ventiladores 33
2.10.2	Elementos auxiliares 33
2.10.3	Localización de los ventiladores 33
2.11	Control de la ventilación..... 33
2.11.1	Condiciones normales: 33
2.11.2	Condiciones de un incendio: 34
3	CONTROL DE LA CALIDAD AMBIENTAL 34
3.1	Detector de CO 34
3.1.1	Arquitectura del sistema 34
3.1.2	Ubicación de los detectores 34
3.2	Detector de NO ₂ 34
3.2.1	Arquitectura del sistema 35
3.2.2	Ubicación de los detectores 35
3.3	Opacímetro..... 35
3.3.1	Arquitectura del sistema 35
3.3.2	Ubicación de los detectores 35
3.4	Anemómetro 35
3.4.1	Arquitectura del sistema 35
3.4.2	Ubicación de los detectores 35
4	VENTILACIÓN DE SOBREPRESIÓN 36
4.1	Introducción 36
4.2	Alcance del sistema 36
4.3	Problema asociado la entrada del humo 36
4.3.1	Inhalación de gases tóxicos 36
4.3.2	Altas temperaturas 36
4.3.3	Baja visibilidad 36
4.4	Descripción de la ventilación de sobrepresión 37
4.4.1	Descripción del sistema 37
4.4.2	Características y descripción del sistema 37
4.4.3	Clasificación del sistema 38
4.4.4	Criterio de diferencia de presión 38
4.4.5	Criterio de flujo de aire 38
4.5	Cálculos de ventilación de sobrepresión 38
4.6	Resultados..... 39
5	VENTILACIÓN Y CLIMATIZACIÓN DE LOS CUARTOS TÉCNICOS..... 39
5.1	Introducción 39
5.2	Requisitos de la norma 39
5.3	Ventilación de salas y cuartos técnicos..... 39

Anejo 08. Ventilación

5.3.1	Descripción del sistema	39
5.3.2	Criterio de diseño	39
5.3.3	Cálculos preliminares.....	40
5.3.4	Resultados	41
5.4	Climatización de salas y cuartos técnicos	41
5.4.1	Descripción del sistema	41
5.4.2	Criterio de diseño	41
5.4.3	Cálculos preliminares.....	41
5.4.4	Resultados	41

FIGURAS

Figura 1: Clasificación de túneles en servicio atendiendo al nivel de servicio y longitud	6
Figura 2: Requerimiento para el sistema de ventilación según la DF 91/2012	7
Figura 3: Ventilación natural.....	8
Figura 4: Ventilación longitudinal	8
Figura 5: Ventilación longitudinal	9
Figura 6: Ventilación semi-transversal	9
Figura 7: Ventilación transversal	10
Figura 8: Esquema desarrollo del incendio en túneles	11
Figura 9: Velocidad crítica y backlayering.....	11
Figura 10: Gráfica de distribución horaria del tráfico en día laboral, considerando ambos sentidos	15
Figura 11: Caudales de ventilación requeridos para límites en interior del túnel.....	15
Figura 12: Requisitos de efecto pistón, presión requerida y nº de ventiladores para el NOx	16
Figura 13: Requisitos de efecto pistón, presión requerida y nº de ventiladores para el CO	17
Figura 14: Requisitos de efecto pistón, presión requerida y nº de ventiladores para PM	17
Figura 15: Potencia de incendio	18
Figura 16: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Bilbao hasta la boca de Getxo (I)	19
Figura 17: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Getxo hasta la boca de Bilbao (I)	19
Figura 18: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Bilbao hasta la boca de Getxo (II)	20
Figura 19: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Bilbao hasta la boca de Getxo (II)	21
Figura 20: Representación de tramos y pendientes para el túnel de La Avanzada	22
Figura 21: Posicionamiento del incendio en el túnel de La Avanzada	22
Figura 22: Resultados para el sistema de ventilación en IDA Tunnel	23
Figura 23: Coeficiente de extinción en el túnel de La Avanzada en IDA Tunnel	23
Figura 24. Localización del Túnel de la Avanzada, carretera BI-637.....	24
Figura 25: Representación de tramos y pendientes para el túnel de la Avanzada	25
Figura 26. Plano de planta del túnel de la Avanzada	25
Figura 27. Detalle sección transversal propuesta del túnel de la Avanzada (P.K. 12+256)	25
Figura 28. Vista tipo sección y planta del modelo realizado.	25
Figura 29. Vista 3D del modelo geométrico del túnel de la Avanzada.	26
Figura 30. Mallado del modelo computacional.....	27
Figura 31. Ubicación del incendio.....	27
Figura 32. Tasa de liberación de calor obtenida en la simulación	28
Figura 33. Velocidad del aire en el interior del túnel. Escenario 1	28
Figura 34. Interrupción del tráfico debido al incendio	28
Figura 35. Tasa de liberación de calor obtenida en la simulación	31
Figura 36. Velocidad del aire en el interior del túnel. Escenario 2	31
Figura 37: Posición de los ventiladores en el túnel de La Avanzada.	33

Figura 38: Esquema de la ventilación en la galería de evacuación. 38

TABLAS

Tabla 1: Tráfico y % de pesados en las estaciones de aforo de la BI-637 - Año 2019	6
Tabla 2: Ventajas y desventajas de la ventilación natural	7
Tabla 3: Ventajas y desventajas de la ventilación natural	8
Tabla 4: Ventajas y desventajas de la ventilación longitudinal.....	8
Tabla 5: Ventajas y desventajas de la ventilación longitudinal con un pozo de extracción	9
Tabla 6: Ventajas y desventajas de la ventilación semi-transversal	9
Tabla 7: Ventajas y desventajas de la ventilación transversal.....	10
Tabla 8: Composición del tráfico	14
Tabla 9: Flota de vehículos considerada para país europeo	14
Tabla 10: Distribución del tráfico en día laboral, considerando ambos sentidos	14
Tabla 11: Caudales de ventilación requeridos para límites en interior del túnel	15
Tabla 12: Caudales de ventilación requeridos para límites NO ₂ en boca considerando límite urbano	16
Tabla 13: Caudales de ventilación requeridos para límites CO en boca considerando límite urbano.....	16
Tabla 14: Caudales de ventilación requeridos para límites PM en boca considerando límite urbano.....	16
Tabla 15: Posición de los ventiladores	18
Tabla 16: Pendientes del Túnel de la Avanzada	24
Tabla 17: Posición de los ventiladores	25
Tabla 18. Cálculos Mallado.	26
Tabla 19. Escenarios analizados.	27
Tabla 20. Datos de tráfico de túnel de La Avanzada.....	28
Tabla 21. Evolución de la velocidad del aire, Planta 2m. Escenario 1.	29
Tabla 22. Evolución del humo, Alzado. Escenario 1.	30
Tabla 23. Evolución de la visibilidad en el tiempo, Planta 2m. Escenario 1.....	30
Tabla 24. Evolución de la velocidad del aire, Planta 2m. Escenario 2.	31
Tabla 25. Evolución del humo, Alzado. Escenario 2	32
Tabla 26. Evolución de la visibilidad en el tiempo. Vista planta 2.0m. Escenario 2	33
Tabla 27: Ubicación de los detectores de CO en el túnel de La Avanzada.....	34
Tabla 28: Ubicación de los detectores de NO ₂ en el túnel de La Avanzada	35
Tabla 29: Ubicación de los opacímetros en el túnel de La Avanzada	35
Tabla 30: Ubicación de los anemómetros interiores en el túnel de La Avanzada	35
Tabla 31: Características de la ventilación de la galería	38
Tabla 32: Cálculos de pérdidas de carga de la ventilación de sobrepresión con la puerta abierta	38
Tabla 33: Cálculos de pérdidas de carga de la ventilación de sobrepresión con la puerta cerrada	39
Tabla 34: Punto de trabajo del ventilador en la galería	39
Tabla 35: Resultados del cálculo de necesidades de ventilación para los cuartos técnicos	41
Tabla 36: Resultados del cálculo de necesidades de climatización para los cuartos técnicos	41

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo y Alcance

El presente documento tiene por objeto el estudio y dimensionamiento de todos los sistemas de ventilación, presurización y climatización de la actuación. El propio túnel y sus dependencias contiguas deberán disponer de diferentes tipos de ventilación que tendrá que funcionar en circunstancias distintas:

- Ventilación del túnel
 - Ventilación sanitaria
 - Ventilación de emergencia
- Ventilación de sobrepresión para las galerías de emergencia
- Ventilación y climatización de los cuartos técnicos.
 - Ventilación de los cuartos técnicos
 - Climatización de los cuartos técnicos

Por lo tanto, se indicarán los criterios de diseño, las hipótesis y los cálculos de ventilación del túnel y de la ventilación de los cuartos técnicos y galerías.

Asimismo, se incluye un capítulo relativo al sistema de control de potencia de la ventilación (detectores de CO y NO2, opacímetros y anemómetros).

1.2 Características principales del túnel de La Avanzada

Las características principales del túnel serán las siguientes:

- Longitud de 824 m aproximadamente.
- Túnel bidireccional, doble sentido de circulación y dos carriles por sentido.
- Doce (12) galerías de evacuación (6 por sentido).
- Túnel urbano.
- Limitación de velocidad a 80 km/h.
- Circulación de mercancías peligrosas.
- Gálibo de circulación de 4,5 metros y altura libre mínima de 4,6 metros
- IMD y porcentaje de vehículos pesados.

ESTACIÓN	DÍA MEDIO		DÍA LABORABLE	
	IMD (veh/d)	% PESADOS	IML (veh/d)	% PESADOS
84A	92.896	3,00%	100.238	3,50%

Tabla 1: Tráfico y % de pesados en las estaciones de aforo de la BI-637 - Año 2019

Fuente: Elaboración propia

1.3 Decreto Foral de Seguridad de Túneles de Carreteras

La Diputación Foral de Bizkaia elaboró una Norma Foral de Seguridad de Túneles de Carreteras y, posteriormente, se aprobó el Decreto Foral 135/2006, de 23 de agosto, sobre Seguridad de Túneles en Carreteras, en adelante DFST, como una norma de seguridad de túneles, para la explotación y con instrucciones técnicas para el diseño seguro de los túneles dentro del Territorio Histórico de Bizkaia. Por lo tanto, el túnel de La Avanzada debe cumplir con las disposiciones existentes en el DFST.

El DFST define con precisión las disposiciones y especificaciones de carácter técnico referentes a las Instalaciones de Ventilación.

El presente anejo sigue las disposiciones y especificaciones técnicas que se recogen en el DFST, verificando, aunque no sea de obligado cumplimiento, que se cumple con las disposiciones recogidas en la Directiva 2004/54/CE.

Se ha tratado de tener en cuenta, en todo momento, las modificaciones propuestas en el Borrador de la revisión de las Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación en Túneles de Carreteras, facilitado por el Organismo de Inspección de Túneles de la Diputación de Bizkaia pendiente de aprobación.

Las soluciones planteadas parten de las bases establecidas en el DFST, con el criterio fundamental de la seguridad de las personas, previniendo las situaciones de riesgo que puedan poner en peligro la vida humana, el medio ambiente o la infraestructura del túnel, y proporcionando los requisitos necesarios para mitigar las posibles consecuencias de una situación de riesgo, permitiendo que las personas involucradas puedan ponerse a salvo a sí mismas y que los usuarios de la carretera puedan intervenir inmediatamente, asegurando una acción eficaz por parte de los servicios de emergencia, protegiendo el medio ambiente y limitando los daños materiales.

1.4 Clasificación del túnel de La Avanzada

El DFST establece los siguientes criterios de clasificación:

- Longitud del túnel
- El volumen de tráfico soportado o que se prevé que soporte el túnel, incluyendo la probabilidad y frecuencia de congestión de tráfico dentro del túnel
- El sentido de la circulación por tubo, único o doble
- Otros factores de riesgo relevantes: pendiente del túnel o su trazado

A su vez, establece tres umbrales de longitud del túnel:

- L1 = 500 m
- L2 = 350 m
- L3 = 200 m

De la misma forma, establece un umbral para el nivel de servicio que tiene en cuenta la posibilidad de congestión en el túnel en un plazo cercano y realiza una distinción entre los túneles en servicio y túneles nuevos.

Atendiendo a su nivel de riesgo, el DFST clasifica los túneles en tres tipos: I, II y III, siendo los de tipo I los de mayor riesgo. Los criterios de clasificación se muestran en la siguiente figura, para túneles en servicio, como es el caso del túnel de La Avanzada.

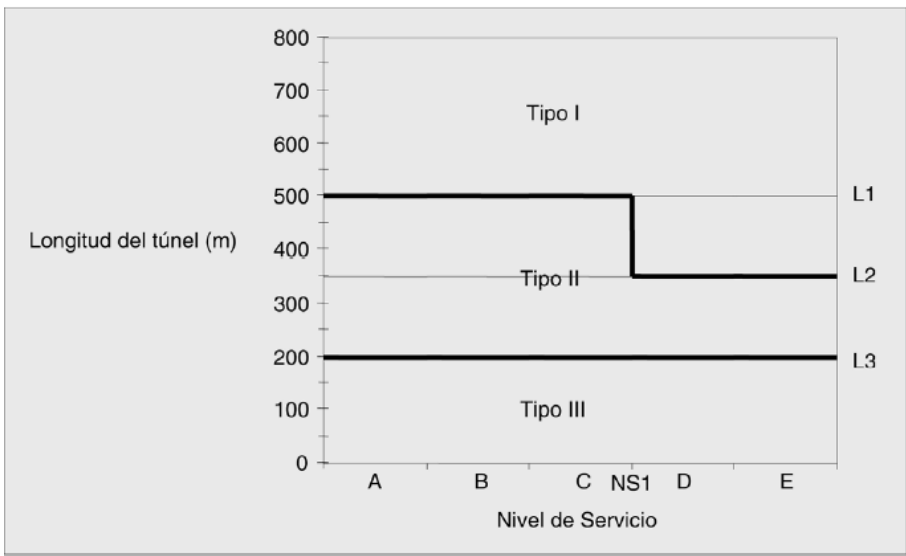


Figura 1: Clasificación de túneles en servicio atendiendo al nivel de servicio y longitud

Fuente: DFST

El túnel de La Avanzada, con una longitud de 824 m aproximadamente, se clasifica como TIPO I.

2 VENTILACIÓN DE TÚNEL

2.1 Introducción

En el capítulo que sigue se analiza y justifica el sistema de ventilación a implantar en el túnel.

2.1.1 Estado actual

El túnel actual de La Avanzada de unos 310 metros no dispone de ventilación mecánica para situación sanitaria o de emergencia. Existen incertidumbres e interpretaciones con relación a la clasificación del túnel de La Avanzada, la cual en función de quien la realiza establece el túnel como Tipo I o Tipo II.

Al no disponer de ningún ventilador en el túnel, no se va a proceder a la retirada de los equipos en el túnel existente.

A continuación, se desarrollan las distintas consideraciones para el dimensionamiento de la nueva ventilación mecánica del túnel ampliado de La Avanzada.

2.1.2 Necesidades de ventilación mecánica

El sistema de ventilación del túnel tiene como objetivo fundamental alcanzar los mayores niveles de seguridad posibles durante la explotación normal del túnel o durante una situación de emergencia. Por lo tanto, las dos funciones importantes que el sistema de ventilación tiene que cumplir son:

- Permite controlar y evacuar los contaminantes que se concentran en el interior de los túneles.
- Permite, en caso de incendio, mantener libre de humos las zonas habitadas de los túneles para facilitar la evacuación segura de los usuarios.

Para conseguir estos objetivos, se tiene que inducir un flujo de aire fresco que desplaza el aire dentro del túnel, tanto para evacuar el aire contaminado como para mantener el humo fuera de la zona ocupada por las personas.

Por lo tanto, se tendrá que dimensionar el sistema teniendo en cuenta:

- Las emisiones de contaminantes de los vehículos de la carretera cuando el tráfico es normal, denso y parado.
- El control del calor y el humo en caso de incendio.

2.1.3 Análisis del marco normativo y recomendaciones

Se ha realizado un análisis más detallado de las principales normativas. Por lo tanto, a continuación, se resumen las principales conclusiones y exigencias de las regulaciones con respecto a los sistemas de ventilación.

Normativas	Requerimiento del sistema de ventilación para un túnel similar al Túnel de La Avanzada
DE 2004/54/CE	No es necesario un sistema de ventilación mecánica
Circular francesa	Sistema de ventilación de extracción de humos
NFPA	Ventilación de emergencia requerido a partir de un análisis de ingeniería
PIARC	- Ventilación de confort para los contaminantes - Diseño de ventilación de emergencia
RD 635/2006	Sistema de ventilación mecánica no longitudinal, para un túnel de estas características, excepto si un análisis del riesgo garantiza lo contrario
Decreto Foral 91/2012	Sistema de ventilación mecánica longitudinal, para un túnel de estas características, excepto si un análisis del riesgo garantiza lo contrario

Tabla 2: Ventajas y desventajas de la ventilación natural

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de las normativas, que recomienda un sistema de ventilación forzado en los túneles de similares características que el túnel de La Avanzada, establece que este deberá ser capaces de controlar el humo generado por un incendio de potencia mínima 30 MW. Además, el caudal mínimo de humos extraído deberá ser superior a 120 m³/s.

El Decreto Foral 91/2012 de la Diputación Foral de Bizkaia exige contar con un sistema de ventilación artificial con su correspondiente sistema de automatismo en los túneles bidireccionales interurbanos de más de 500 metros de longitud (o incluso 350 metros en caso de que se congestionen de manera repetida). Los sistemas de ventilación deberán poder extraer el humo para un incendio tipo con potencia mínima de 30 MW y caudal mínimo de humos de 120 m³/s. En caso de que el túnel permita el tránsito de mercancías peligrosas, la nueva actualización de las Instrucciones Técnicas establece una potencia del incendio de 100 MW. En el caso de sistema longitudinal se deberá poder generar una velocidad longitudinal del flujo de aire de al menos 3 m/s en la posición del foco, para el escenario más desfavorable.

Tipo	Ventilación Sanitaria Forzada		Ventilación de Emergencia	
	Unidireccional	Bidireccional	Unidireccional	Bidireccional
Tipo I (L>500 m y congestionable de L>350 m)	SI	SI	SI	SI*
Tipo II	Se justificará su necesidad mediante cálculos			
Tipo III	NO	NO	NO	NO

Figura 2: Requerimiento para el sistema de ventilación según la DF 91/2012

Fuente: Decreto Foral 91/2012 de la Diputación Foral de Bizkaia

Tras el análisis de las diferentes normativas internacionales y teniendo en cuenta los apartados aplicables de las normativas más restrictivas, únicamente la normativa europea no exige una ventilación forzada para el presente caso.

Por lo tanto, se puede concluir que el túnel de La Avanzada tiene la obligación de disponer de una ventilación sanitaria y de emergencia, al tratarse de un túnel bidireccional y urbano, cuya longitud se sitúa entre los 500 y 1.000 metros.

Anejo 08. Ventilación

El Decreto Foral 91/2012 sugiere una configuración de tipo longitudinal para la ventilación de todos los túneles que entran en el ámbito de esta normativa, excepto si un análisis de ingeniería demuestra la necesidad de otro sistema, tales como transversal, semitransversal, longitudinal con extracción. Mientras que otras normativas ordenan lo contrario. En efecto, en la mayoría de las otras normas, la configuración recomendada para túneles bidireccionales congestionados es la configuración transversal o semitransversal, excepto si un análisis demuestra que otro sistema de ventilación es aceptable o se toman medidas compensatorias. Por lo tanto, la configuración final de la ventilación se determinará en el análisis de riesgo que se realizará en este presente proyecto.

Los sistemas de ventilación deberán poder extraer el humo para un incendio tipo con potencia mínima de 30 MW y caudal mínimo de humos de 120 m³/s, tal como lo establece la gran mayoría de las normativas. Si bien se puede contemplar algunos escenarios adicionales con incendios máximos de 100 MW en función de la tipología del tráfico en el túnel, como el tránsito de camiones con mercancías peligrosas.

Los criterios de dimensionamiento de la ventilación en operación normal se determinarán a partir de los informes de PIARC que analizan las emisiones de partículas de los vehículos y la demanda de aire fresco resultante para la ventilación en modo sanitario.

2.2 Tipos de sistemas de ventilación

Existen muy diversas tipologías de sistemas de ventilación en túneles. No obstante, para establecer la terminología empleada en este Proyecto a continuación se han recopilado y descrito, de forma simplificada, las tipologías empleadas. Se ha seguido el criterio PIARC por el que un túnel se clasifica atendiendo a su modo de funcionamiento en servicio.

2.2.1 Ventilación natural

La ventilación natural consiste en dejar que sea la propia circulación natural del aire por el túnel la que se encargue de evacuar los humos que se producen en su interior. Se considera que el movimiento de los vehículos inducirá la ventilación del túnel por efecto pistón.

En todo túnel se produce, de manera natural, una cierta circulación de aire en su interior, debido a la diferencia de presión existente entre ambas bocas. Esta diferencia de presión puede estar ocasionada por una diferencia de temperaturas entre ambos extremos del túnel, por diferencias de cota o por la dirección del viento. En caso de incendio el humo se estratifica en la parte superior y sale por la boca más cercana y de mayor cota.

La ventilación natural opera según la climatología del momento, y normalmente solamente es suficiente para renovar el aire de un túnel cuando éste es muy corto o cuando la intensidad del tráfico que por él circula es muy pequeña.

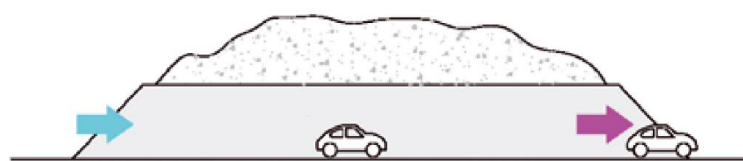


Figura 3: Ventilación natural

Fuente: PIARC

Ventajas	Desventajas
Coste de inversión y mantenimiento inexistente	Altamente dependiente de las condiciones atmosféricas
Para túneles cortos con poco tráfico	No permite ningún control en caso de incendio

Tabla 3: Ventajas y desventajas de la ventilación natural

Fuente: Elaboración propia

No existe ningún túnel bidireccional urbano con las mismas características longitudinales que el túnel de La Avanzada en España sin ventilación mecánica. Debido a la posibilidad de congestionarse con bastante frecuencia y la dificultad de conseguir una inducción del efecto pistón, ya que los vehículos circulan en sentidos opuestos, los túneles bidireccionales urbanos de más de 100 metros en España disponen todos de una ventilación longitudinal mínima para diluir parte de los contaminantes en caso de atasco.

El coste de este tipo de ventilación sería nulo, al no tener que instalar ningún equipo o realizar ninguna obra específica en los túneles. Sin embargo, los inconvenientes operacionales y de seguridad son tan grandes que esta configuración no se recomienda bajo ningún concepto.

2.2.2 Ventilación longitudinal

El sistema de ventilación longitudinal se basa en el uso de ventiladores instalados en la bóveda o hastiales que fuerzan la circulación natural del aire a lo largo del túnel. Por una de las bocas entra aire fresco y por la boca contraria sale el aire viciado. El sentido de circulación del aire es conveniente que coincida con el de la circulación de los vehículos cuando el túnel es unidireccional, con objeto de aprovechar el efecto pistón que producen éstos.

Generalmente, los ventiladores se colocan en clave del túnel cada cierto intervalo, aunque existen otros sistemas en que los ventiladores sólo se colocan en la boca de entrada del túnel, o en los pozos de ventilación intermedios.

Los ventiladores suelen ser reversibles, especialmente en el caso de túneles bidireccionales, para poder aprovechar la ventilación natural en el sentido en que ésta se produzca.

También se incluyen sistemas de medición de humos y de contaminantes con objeto de aplicar únicamente la potencia de ventilación que sea necesaria.

Este tipo de ventilación está especialmente indicado para túneles con sentido único de circulación. En caso de incendio se procede a la impulsión de los humos aguas abajo del incendio, permitiendo a los usuarios escapar a la vez que facilita la llegada de los equipos de socorro por la zona limpia del túnel. Sin embargo, en el caso de túneles con doble sentido de circulación, se deberán tomar varias precauciones para evitar el peligro que presenta este sistema en caso de incendio, al tener vehículos detenidos a ambos lados del incendio.



Figura 4: Ventilación longitudinal

Fuente: PIARC

Ventajas	Desventajas
Coste de inversión y mantenimiento reducido	Sistema de control muy compleja y numerosas estrategias de ventilación en caso de incendio
Gran ahorro de energía, al aprovechar de la energía dinámica de los vehículos	
No requieren la instalación de conductos que encarasen el coste y reducen la sección del túnel	
Recomendado para túneles unidireccionales y túneles bidireccionales cortos	

Tabla 4: Ventajas y desventajas de la ventilación longitudinal

Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

Este tipo de ventilación es la más usada en túneles urbanos bidireccionales en España cuyas características longitudinales son parecidas a las del túnel de La Avanzada. Es un sistema que no requiere una inversión muy grande al tener que instalar en la clave del túnel varios ventiladores tipo jet-fans que cuestan entre 20.000€ y 30.000€ por unidad dependiendo del diámetro y potencia eléctrica del ventilador, además de coste complementario de soporte, alimentación, control y programación. No requiere ninguna obra civil adicional.

Los túneles en España, cuyas características son muy parecidas a las del túnel de La Avanzada, que disponen de este tipo de ventilación son los 3 túneles de Artxanda en Bilbao: túnel de Artxanda-Ugasko (1.150 metros) túnel de Artxanda-La Salve (1.200 metros) y túnel de La Salve-Ugasko (700 metros). Todos son túneles urbanos bidireccionales con riesgo de congestión cuya longitud se acerca a la longitud proyectada del túnel de La Avanzada. Otro túnel urbano bidireccional que tiene una longitud similar a la de La Avanzada es el túnel de Pedralbes en la Ronda de Dalt de Barcelona de 780 metros.

Del estudio realizado con sistema de ventilación ya instalado en túneles existentes y con características similares a las del túnel de La Avanzada, se interpreta que este sistema es el más adecuado, tanto desde el punto de vista económico, como desde el de la operación o de la seguridad.

2.2.3 Ventilación longitudinal con extracción masiva de humo

Partiendo de la tipología anterior, cuando se tienen túneles en los que siendo el tráfico unidireccional la longitud es importante o pueden darse situaciones de atasco en el túnel se suelen emplear sistemas de tipo longitudinal pero apoyados con pozos intermedios. En algunos casos estos pozos únicamente son empleados en situación de incendio. En ese caso, los ventiladores longitudinales impiden la propagación de los humos dentro del túnel e impulsan el aire hacia el centro del túnel donde se sitúa el pozo de extracción.

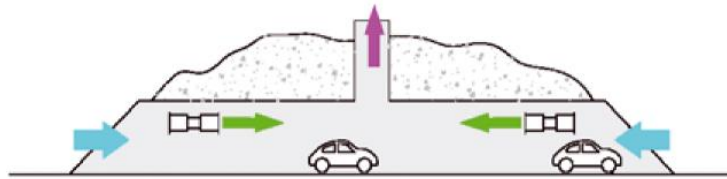


Figura 5: Ventilación longitudinal

Fuente: PIARC

Ventajas	Desventajas
Recomendado para túneles unidireccionales muy largo.	Coste de inversión y mantenimiento más elevado que la ventilación longitudinal.
Coste de inversión y mantenimiento menos elevado que una ventilación transversal	Funcionan como una ventilación longitudinal, pero con un pozo de ventilación que raramente se usa

Tabla 5: Ventajas y desventajas de la ventilación longitudinal con un pozo de extracción

Fuente: Elaboración propia

Pocos túneles bidireccionales en España o en el mundo disponen de este tipo de ventilación, ya que está más indicado para túneles unidireccionales largos, como pueden ser el caso de los túneles de la M-30 o los túneles de la M-12, todos en Madrid. El pozo intermedio encarece bastante la inversión comparándola con un túnel longitudinal sin pozo, ya que la excavación, el sostenimiento y el revestimiento del pozo vertical de varios metros de profundidad con una sección mínima suficiente como para extraer el caudal generado por los ventiladores longitudinales aumentan mucho la inversión realizada. Además, es conveniente disponer de un ventilador axial en estos pozos para soportar los caudales de extracción, encareciendo aún más el sistema de ventilación del túnel. Asimismo, se tendrá que disponer del espacio necesario y suficiente en superficie para disponer de la rejilla de extracción del aire al ras de la calle o en una chimenea elevada. Al tratarse de un

túnel urbano, esta necesidad es muy difícil de cumplir, sin expropiaciones o dificultades administrativas añadidas.

En España, el túnel bidireccional de Vallvidrera en la C-16 de Barcelona dispone de este tipo de instalación. Además de una ventilación longitudinal para asegurar los niveles adecuados de concentración de contaminantes y opacidad del aire en el túnel, se han construido cuatro chimeneas a lo largo del túnel de Vallvidrera, cada una equipada con ventiladores de disposición horizontal, capaces de soportar determinadas condiciones rigurosas de funcionamiento, en cuanto a la temperatura y al caudal de humos de extracción. Sin embargo, la longitud del túnel de Vallvidrera es más de 3 veces superior a la del túnel de La Avanzada. Además, se sitúa a la entrada de Barcelona por lo que dispone de más espacio para ubicar los pozos de ventilación.

2.2.4 Ventilación semi-transversal

El sistema de ventilación semi-transversal impulsa el aire desde el exterior o extrae el aire desde el interior por un conducto situado dentro de la sección del túnel de manera distribuida en toda la longitud del túnel, habitualmente en la clave y separado de la zona de circulación de los vehículos por un falso techo que conecta con estaciones de ventilación exteriores.

Este sistema requiere aberturas a distancia periódica en los conductos de ventilación constante, que suele ser rejillas o compuertas telecomandadas con posibilidad de abrirse o cerrarse en función de la evolución del incendio.

Este sistema es más caro de instalación y funcionamiento que el longitudinal pues necesita, además de los ventiladores, un falso techo y un conducto para el aire fresco. En cada tramo de conducto conectado a un ventilador se puede impulsar o extraer aire en función de las necesidades de cada instante.



Figura 6: Ventilación semi-transversal

Fuente: PIARC

Ventajas	Desventajas
Buena extracción del humo en caso de incendio, manteniendo una adecuada visibilidad	Coste de inversión y mantenimiento muy elevado
Recomendado para túneles de circulación bidireccional con posibilidad de congestión	Dificultad de establecer redundancias y márgenes de seguridad del sistema
	Reducción de la sección útil del túnel
	Elevado gasto energético

Tabla 6: Ventajas y desventajas de la ventilación semi-transversal

Fuente: Elaboración propia

En España, este tipo de ventilación no se suele utilizar con mucha frecuencia por el coste muy alto que supone, al tener que construir una sección transversal más grande en el túnel para incorporar un conducto de aire encima de la calzada. Además, se tiene que añadir el coste de la realización de pozos de extracción y/o impulsión en uno o varios extremos del túnel.

Por lo tanto, los dos túneles bidireccionales en España que tienen una solución parecida son túneles muy largos como es el caso del túnel de Somport y del túnel de Viella. Ambos se encuentran en el Pirineo central y miden

Anejo 08. Ventilación

más de 5 km de longitud. Por sus características geométricas y operativas, no se pueden comparar con el túnel de La Avanzada que es mucho más corto que estos túneles interurbanos.

2.2.5 Ventilación transversal

La ventilación transversal utiliza conductos de aire fresco como el aire viciado para distribuir el aire en el túnel y extraerlo de manera uniforme conectadas con estaciones de ventilación exteriores. Es el sistema más complejo y más seguro que existe, permitiendo utilizarlo en la inmensa mayoría de los túneles, con muy altas intensidades de tráfico. Sin embargo, es el sistema más caro de instalar y mantener.

Tanto el aire fresco como el aire viciado circulan a lo largo del túnel por unos conductos situados generalmente en la clave del túnel, separados de la zona ocupada por los vehículos por un falso techo y con un tabique divisorio entre ambos. Uniformemente, a lo largo de la longitud del túnel, se impulsa generalmente el aire fresco a su interior por la parte inferior del túnel y se aspira el aire viciado por la parte superior.

La velocidad del aire en el túnel es teóricamente nula, por lo que no existen limitaciones por tal motivo. Por otra parte, la seguridad en caso de incendio es mayor ya que se aspira el humo y se impulsa aire fresco simultáneamente en la zona concreta donde se produzca el fuego, con lo que la capacidad para evacuar los humos y gases tóxicos sin afectar a los usuarios del túnel se incrementa.

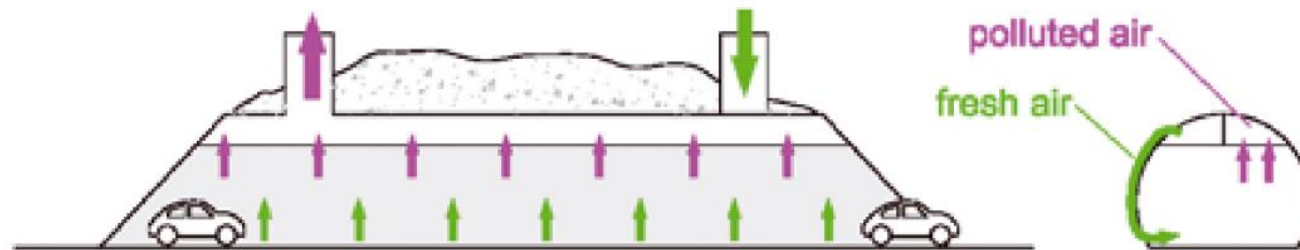


Figura 7: Ventilación transversal

Fuente: PIARC

Ventajas	Desventajas
Condiciones ambientales óptimas tanto en caso de incendio como por gases contaminantes	Coste de inversión y mantenimiento extremadamente elevado
Recomendado para túneles de circulación bidireccional largo con posibilidad de congestión	Dificultad de establecer redundancias y márgenes de seguridad del sistema
	Reducción de la sección útil del túnel
	Elevado gasto energético

Tabla 7: Ventajas y desventajas de la ventilación transversal

Fuente: Elaboración propia

El coste de este tipo de instalación es aún mayor al tipo de ventilación anterior porque se necesita obligatoriamente dos pozos de ventilación en ambos extremos, uno para la extracción y otro para la impulsión. Además, hace falta independizar los conductos para que uno este impulsando y el otro extrayendo. Por estas razones, su coste se justifica en muy pocos casos.

De hecho, dos túneles bidireccionales más emblemáticos en Europa usando un sistema de ventilación transversal atraviesan la cordillera montañosa de los Alpes. El primero es el túnel carretero de San Gotardo, en los Alpes Suizos, que tiene algo más de dieciséis kilómetros de longitud. Fue abierto al tráfico en 1980. Tiene tráfico en ambos sentidos y el sistema de ventilación es transversal. Tanto el aire limpio como el viciado se inyecta y se succiona a nivel de la clave en ambos conductos. El túnel carretero del Mont Blanc, también

en los Alpes, que comunica Francia con Italia, tiene una longitud de casi trece kilómetros. Fue abierto al tráfico en el año 1965. Tiene tráfico en ambos sentidos y el sistema de ventilación es transversal, con los colectores de aire bajo la calzada. El aire limpio se inyecta a nivel de la calzada y el viciado se succiona a nivel de la clave.

2.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel

2.3.1 Elección del tipo de ventilación

Según las Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación de Túneles de la Diputación Foral de Bizkaia, en el ámbito de aplicación de la presente norma, y prescindiendo de las ventajas y desventajas de otros tipos de ventilación, se utilizará Ventilación de Tipo Longitudinal, salvo que por las especiales características del túnel a estudio, el Estudio de Ventilación justifique la necesidad de ser utilizado cualquier otro tipo, pudiéndose utilizar otros sistemas de ventilación como longitudinal con extracción intermedia, transversal, semitransversal, mixto...

Debido a la imposibilidad de poner una ventilación transversal o semi-transversal en los túneles por condiciones económicas y técnicas muy desfavorables, se ha estudiado en los análisis de riesgo la aceptabilidad de un tipo de ventilación longitudinal, demostrando su comportamiento correcto. No se ha considerado necesario el disponer de pozos de ventilación intermedias en el trazado conectando con el exterior donde, en caso de incendio, se expulsa el humo al exterior, ya que la longitud que presentan los túneles no lo justifica.

2.3.2 Ventilación longitudinal

Como se ha mencionado en el apartado anterior, para el túnel de La Avanzada, se ha elegido un sistema de ventilación longitudinal como la opción más rentable, siendo su modo operativo apropiado para túneles bidireccionales.

El sistema longitudinal se basa en ventiladores de chorro (tipo jet fan) instalados a lo largo del túnel con una distribución desde ambas bocas. Los objetivos del sistema de ventilación son, por un lado, mantener niveles adecuados de calidad del aire dentro de los túneles durante el funcionamiento normal y, por otro lado, en caso de emergencia por incendio, controlar el humo y crear un entorno seguro para permitir a los usuarios del túnel escapen para que intervengan los servicios de emergencia.

El sistema de ventilación del túnel debe poder evitar cualquier tipo de retroceso del humo para el tamaño del incendio de diseño para proporcionar un área segura aguas arriba del incendio para favorecer la evacuación y garantizar una ruta libre de humo y para que los bomberos puedan actuar para luchar contra el incendio.

El diseño de la ventilación longitudinal tendrá que utilizar ventiladores completamente reversibles para poder controlar el humo en función de la posición del incendio. Los ventiladores se instalarán debajo de la cubierta del túnel encima de los carriles. Se ubicarán lo más cerca posible de las dos bocas del túnel.

Por otra parte, tal como lo menciona las nuevas Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación de Túneles de la Diputación Foral de Bizkaia (pendiente de aprobación), los ventiladores deberán contener y mover el humo generado por potencias de fuego del orden de 100 MW, al permitir el paso de mercancías peligrosas, cuyo caudal mínimo de humos es superior a 120 m³/s.

Esta potencia de fuego considerada es la base de todo el cálculo analítico posterior, pues da lugar a la temperatura de humos y a la velocidad crítica de éstos, que es la mínima a la que hay que empujar los humos para que no retrocedan, y la recomendable máxima también para evitar llenar de humo toda la sección del túnel, manteniendo un régimen laminar en el movimiento de aire.

Además de estar exigido en el Decreto Foral, el análisis de riesgo ha demostrado que el túnel de La Avanzada tiene que disponer de una ventilación forzada de tal manera que crease una corriente de aire reversible para facilitar una evacuación segura de los usuarios del túnel.

Anejo 08. Ventilación

2.3.3 Estrategia de ventilación

La ventilación del túnel con el fin de satisfacer los objetivos de salubridad y control de humos podrá darse por medios naturales o mediante el sistema de ventilación, dependiendo de las condiciones climatológicas y de circulación en cada instante.

Existirán dos protocolos de operación: operación normal y operación en caso de emergencia (con incendio).

2.3.3.1 Operación normal

El sistema de ventilación sanitaria del túnel debe inducir un flujo de aire fresco que desplace y diluya el aire del interior del túnel, el sentido de movimiento del aire en el túnel se realizará en cada momento en función de la dirección del viento predominante en cada momento, de forma que el aire que sale del túnel se diluya y aleje de los edificios y zonas ocupadas en cada momento. Por lo tanto, se tendrá que dimensionar el sistema teniendo en cuenta las emisiones de contaminantes de los vehículos de la carretera en función del tráfico actual y futuro previsto en la carretera.

Durante la operación normal de la infraestructura, los efectos climáticos junto con el efecto pistón de los turismos puede ser suficiente en la gran mayoría de casos para mantener unas condiciones de calidad de aire aceptables en el interior del túnel.

El control de la ventilación prevista permitirá la activación de la ventilación en cada momento en el sentido más favorable para la población según las condiciones meteorológicas y de tráfico de cada momento, intentando mantener una corriente de aproximadamente 1 m/s en el sentido del tiro natural, excepto en caso de que los niveles de contaminación superen los valores establecidos.

En caso de que los detectores adviertan con esta operativa un alto nivel de contaminantes se activarán progresivamente ventiladores adicionales en el sentido de la corriente de aire para aumentar la velocidad con tal de garantizar una corriente de aire suficiente para reducir los niveles de contaminantes.

Es importante disponer siempre de una corriente de aire en los túneles para favorecer el funcionamiento de los equipos de ventilación instalados en los centros de transformación y para proporcionar una renovación del aire en el interior del túnel, evitando aire viciado.

El protocolo de ventilación durante la explotación de los túneles podrá ser optimizado en fase de operación basándose en los datos recogidos por los sensores de contaminantes, las estaciones meteorológicas en las bocas y los anemómetros dispuestos en el túnel de manera que se minimice el cálculo de energía y se garantice en todo momento la renovación del aire anticipándose a posibles problemáticas.

2.3.3.2 Operación en caso de emergencia (con incendio)

La ventilación del túnel se logrará por medios naturales o mecánicos, dependiendo de las condiciones del túnel en términos de efecto de pistón de los vehículos en movimiento, viento externo y diferenciales de temperatura y presión entre las bocas.

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

Sin embargo, la existencia de corrientes forzadas modifica las condiciones típicas de los recintos cerrados. Así la siguiente figura muestra esta situación del penacho arrastrando aire viciado, así como la interferencia con un viento lateral provocado por la ventilación natural o artificial y con una superficie de cierre del espacio superior que impide el desarrollo vertical de la llama y el penacho y provoca la formación de un estrato de humo con el techo que se extiende en horizontal hasta que se enfría y se mezcla con la capa de aire limpio.

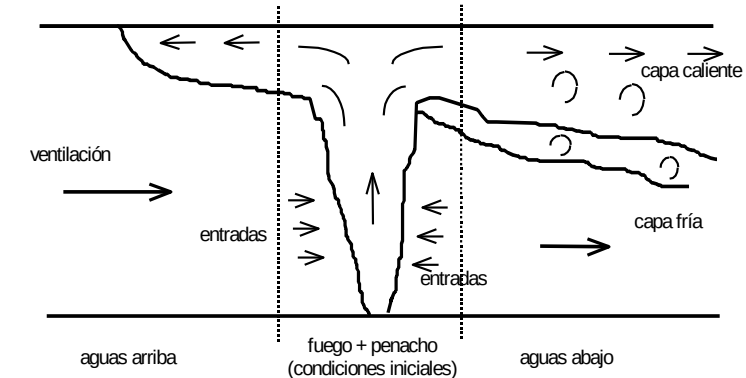


Figura 8: Esquema desarrollo del incendio en túneles

La ventilación natural puede ser suficiente para el funcionamiento normal, cuando el flujo de aire generado por los vehículos en movimiento o debido a diferentes condiciones meteorológicas en las bocas proporciona suficiente ventilación para mantener una calidad de aire aceptable.

No obstante, cuando sea necesario, la activación de los ventiladores de chorro de túnel se utiliza para producir suficiente flujo de aire para diluir los contaminantes a un nivel admisible durante el funcionamiento normal.

Durante la operación de emergencia con escenarios de incendio, se necesita ventilación para influir en el flujo de humo y productos de combustión a fin de crear un entorno más seguro para que los usuarios del túnel escapen y para que intervengan los servicios de emergencia.

Donde se ventila la sección incidente del túnel, un flujo de aire longitudinal empuja el humo a través del túnel aguas abajo del fuego, mientras que en el lado aguas arriba se ralentiza la progresión de la capa de humo. El fenómeno de la capa de humo que fluye en contra de la dirección del flujo de aire se denomina backlayering o retroceso del humo. Un aumento adicional de la velocidad del flujo de aire longitudinal a un cierto valor, llamado velocidad crítica, detendrá por completo el retroceso del humo o backlayering. Para velocidades iguales o superiores a la velocidad crítica, es poco probable que se produzca estratificación.

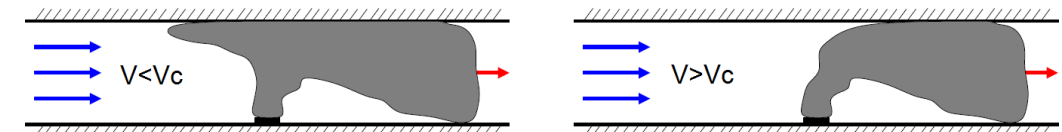


Figura 9: Velocidad crítica y backlayering

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, la mejor estrategia de ventilación en túneles bidireccionales, donde puede haber presencia de vehículos a ambos lados del incendio, es ventilar a bajas velocidades (1-1,5 m/s) con los ventiladores más alejados del foco del incendio para garantizar la máxima estratificación posible durante el proceso de evacuación. Una vez que la evacuación queda garantizada se puede elevar la ventilación a petición de los servicios de emergencia para lograr un camino libre de humos hasta el lugar del incendio (velocidad crítica).

2.4 Criterios de diseño

El sistema propuesto es de tipo longitudinal mediante ventiladores de chorro (tipo jet fan), lo cual significa que los ventiladores establecen una circulación lineal de aire a lo largo del túnel, introduciendo aire limpio por una boca y expulsando el aire viciado por la otra.

Por lo tanto, los criterios de diseño del sistema de ventilación del túnel son los siguientes:

- Sistema de ventilación longitudinal basado en ventiladores de chorro instalados a lo largo de los túneles para garantizar la calidad del aire y un entorno seguro para ambos modos de operación: normal y de emergencia.

Anejo 08. Ventilación

- Ventiladores 100% reversibles, ubicados en una línea en cada una de las bocas, único lugar con suficiente galibo para colocar un ventilador de un tamaño razonable.
- Los ventiladores tendrán una resistencia a altas temperaturas de 400°C durante al menos 2 horas, según fabricante.
- Potencia del incendio de 100 MW, tal como marca el Decreto Foral, al permitir el paso de mercancías peligrosas por el túnel.
- Ubicación del incendio más desfavorable (mayor distancia de evacuación y/o mayor retroceso del humo).
- Presión del viento en boca de 15 Pa en el sentido desfavorable para la ventilación del túnel.
- Condiciones ambientales de verano.
- Tiempo de cierre del túnel y tiempo de activación de la ventilación: 2 minutos a partir del inicio del incendio.

2.5 Metodología empleada para el diseño

La metodología empleada para el dimensionamiento de la ventilación se divide en tres fases:

1. Dimensionamiento de la ventilación mediante la computación de todas las pérdidas de carga existentes en el túnel que deben ser vencidas por los ventiladores tanto para confort como para todas las posibles situaciones de incendio

La utilización de cálculos unidimensionales en el diseño permite realizar un dimensionado de los equipos de ventilación necesarios para alcanzar el criterio de diseño establecido. Con este tipo de cálculos se obtiene la posición crítica de incendio, basado en la búsqueda del escenario más desfavorable mediante la realización de todos los cálculos necesarios de forma iterativa, considerando múltiples posiciones de incendio a lo largo del túnel.

Para la realización de estos cálculos se han utilizado las fórmulas proporcionadas por PIARC y CETU, las cuales realizan la suposición de que el sistema llega a un estado estacionario analizando todas las pérdidas de carga del sistema para la velocidad de diseño y bajo el incendio de diseño. Las variables implicadas en el cálculo son unidimensionales (características constantes en cada sección) bajo la hipótesis de un gas ideal.

Para cada disposición de ventiladores estudiada (número y posición) se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se sitúa el incendio en un punto. La posición del incendio se determina relativa a la boca de entrada, en cada iteración se traslada la posición del incendio recorriendo todo el tramo estudiado en pasos de 0,5% de la longitud del túnel.
2. Se calculan todos los términos de pérdidas de carga explicados con detalle en el Apéndice correspondiente, teniendo en cuenta la densidad y temperatura del aire en cada punto del túnel provocado por el incendio en cada posición estudiada.
3. Se calcula el empuje proporcionado por cada ventilador teniendo en cuenta la densidad del aire en su posición.
4. Se compara, en términos de presión, el empuje proporcionado por los ventiladores y las pérdidas creadas por una corriente de aire a la velocidad de diseño. Si el primero es mayor, el sistema tiene fuerza suficiente y la velocidad conseguida será mayor que la velocidad de diseño, si es menor, se considera no válido.
5. El cálculo se repite cambiando la posición del incendio y recorriendo así todo el túnel. Si el sistema se muestra insuficiente en una sola posición de incendio, la disposición estudiada es desechada.

El número final de ventiladores de cada tramo, como se ha mencionado anteriormente, será el necesario para hacer frente a todas las posiciones de incendio, considerando simultáneamente las pérdidas de carga generadas y el rendimiento de cada uno de los equipos, el cual varía según la densidad del aire.

Los cálculos se realizan mediante la programación de todas las fórmulas mostradas en los puntos anteriores en Visual Basic for Applications (VBA) de Microsoft Excel. Este entorno permite la introducción de los datos del túnel y de los equipos de forma sencilla y, al mismo tiempo, realizar iterativamente cientos de cálculos que sería imposible realizar sin una herramienta informática. Asimismo, facilita la representación e interpretación de los resultados mediante gráficas.

Los parámetros utilizados para modelar el problema de forma unidimensional (coeficiente de fricción de las paredes del túnel, pérdidas de carga provocadas por el incendio, perfil de temperatura a lo largo del túnel, rendimiento de los ventiladores, etc.) están en concordancia con las recomendaciones dadas por el CETU y PIARC (ver Apéndice correspondiente); así como con las indicaciones dadas por el Decreto Foral, el cual establece que la potencia de incendio a considerar —uno de los parámetros más significativos del cálculo— debe ser de 100 MW, equivalente a un vehículo pesado con mercancías peligrosas.

2. Verificación del dimensionamiento y modificación del mismo en caso de ser necesario mediante la simulación unidimensional del túnel con el software IDA-Tunnel.

El objetivo de esta fase es comprobar el dimensionamiento realizado en túneles complejos donde la simplificación en la formulación tenida en cuenta en el punto 1 puede llevar a diferencias significativas.

Para la realización de las simulaciones unidimensional se ha utilizado el software IDA-Tunnel. Este software discretiza el túnel en segmentos de diversa longitud y computa las pérdidas de carga de todo el sistema en su conjunto y determina los valores de temperatura, humedad, presión, densidad, velocidad de aire, presencia de humo, etc. para cada uno de los segmentos discretizados.

IDA-Tunnel es una aplicación para el cálculo de la ventilación en redes subterráneas basada en el software SES y proporciona herramientas para dimensionar y posicionar los pozos de ventilación, evaluar la geometría del túnel y el dimensionamiento de los ventiladores, estudiar el comportamiento térmico de la red, modelar los efectos del calor y del humo generados en un incendio o analizar el comportamiento del humo en situaciones de emergencia.

El programa construye un modelo unidimensional (1-D) a partir de las características de la red, dimensiones geométricas, climatología del lugar y propiedades del terreno, la información sobre los elementos de ventilación, circulación y tipos de trenes, cargas térmicas asociadas a equipamientos o personas, entre otros aspectos. También permite incluir incendios para analizar diferentes escenarios de emergencia y ayudar a la determinación de los algoritmos de ventilación.

El modelo unidimensional permitirá analizar los efectos transitorios que se producen en la red subterránea, la circulación de los vehículos, el efecto pistón y la transmisión de calor al terreno y al ambiente. El programa permite realizar una simulación de condiciones ambientales en el interior del sistema de larga duración, con el fin de obtener las condiciones previstas después de un tiempo determinado de funcionamiento del sistema (generalmente 20-30 años), además del cálculo de las condiciones en los días de diseño de verano e invierno, a lo largo de las diversas estaciones del año, así como en condiciones excepcionales, etc.

Los resultados que se obtienen son la presión, la temperatura, la humedad y la velocidad del aire en todos los puntos de la red. El modelo también resuelve los efectos asociados a la circulación de trenes, como el efecto pistón, así como la generación y dispersión de CO₂ y partículas, propagación de humos y visibilidad, filtración de agua y condensaciones, etc.

Se ha analizado con las simulaciones unidimensionales la posición de incendio más desfavorable determinada en la fase de dimensionamiento donde se analizan todas las posiciones de incendio posibles dentro del túnel con el fin de detectar el punto más vulnerable del túnel.

3. Verificación del dimensionamiento y modificación del mismo en caso de ser necesario mediante la simulación tridimensional del túnel con el software Fire Dynamics Simulator (FDS)

El objetivo de esta fase es comprobar el dimensionamiento realizado en túneles complejos donde la simplificación en la formulación tenida en cuenta en el punto 1 y en el punto 2 puede llevar a diferencias significativas.

El software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) empleado para realizar las simulaciones tridimensionales es Fire Dynamics Simulator (FDS), desarrollado por el Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology - NIST (USA) con la colaboración del VTT Building and Transport in Finland. Éste es un modelo de dinámica de fluidos computacional concebido de manera específica para reproducir los fenómenos relacionados con los incendios.

Anejo 08. Ventilación

Se trata del software CFD con mayor número de trabajos de verificación y validación en cálculo de incendios a nivel mundial, disponibles muchos de ellos en la web del programa (<https://pages.nist.gov/fds-smv/>). Ha sido utilizado además con éxito en numerosas ocasiones en el campo de la ingeniería de protección contra incendios.

FDS es un modelo computacional de dinámica de fluidos (CFD - Computational Fluid Dynamics). Este software está enfocado específicamente a la simulación del fenómeno del incendio en recintos cerrados. FDS resuelve numéricamente, empleando el método LES (Large Eddy Simulation), un tipo de ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para baja velocidad y flujo considerado desde un punto de vista térmico con énfasis en el transporte de humo y calor derivado del incendio.

FDS calcula los valores de densidad, velocidad, temperatura, presión y concentración de especies en cada celda mediante las ecuaciones de conservación de la masa, del momento y de la energía en función de las condiciones iniciales y de contorno definidas. Además, utiliza las propiedades de los materiales de los muros, paredes, suelo, techo, etc. para simular el desarrollo del incendio.

Con FDS se pueden crear además modelos de detección de incendios y también simular el crecimiento del fuego y los daños ocasionados por este durante el periodo transcurrido desde la alarma hasta el inicio de la reacción al incendio. También permite la introducción de rociadores en la simulación. Los modelos de rociadores (de diluvio, agua nebulizada, etc.) simulan unas gotas que se esparcen por todo el ámbito y producen efectos realistas como la interacción del arrastre entre las gotas y la columna de fuego. Dichas gotas también simulan los efectos del enfriamiento por evaporación, y esas temperaturas predicen de forma real la activación de múltiples rociadores.

FDS además permite analizar las corrientes de aire en casos donde no existe incendio, dando una idea en condiciones de confort de la homogeneidad de las condiciones ambientales en la infraestructura. Además, este análisis permite comprobar los modelos de incendio con pruebas de campo, comparando los datos medidos con los resultados obtenidos con el software.

El entorno de trabajo de FDS está formado por ficheros de texto, por lo que es necesario un preprocesador para el desarrollo de simulaciones con geometrías complejas. SENER trabaja con la herramienta Pyrosim para las labores de preproceso de FDS.

Adicionalmente, FDS dispone de una herramienta de visualización de resultados bastante potente, SmokeView, que permite realizar el postprocesado de la simulación y mostrar los parámetros escogidos en un entorno tridimensional.

2.6 Dimensionamiento de la ventilación sanitaria

2.6.1 Conceptos generales

El objetivo del sistema de ventilación en situación normal de servicio es garantizar que el aire del túnel mantenga unas condiciones adecuadas de confort y seguridad para los usuarios; asegurando la dilución de los contaminantes de los vehículos hasta los límites admisibles, y permitiendo una capacidad de reacción adecuada en caso de una rápida demanda de flujo.

Estudios anteriores solían considerar solo el monóxido de carbono (CO) como contaminante a mantener en valores aceptables, ya que el flujo de aire necesario sería suficiente para los demás contaminantes. Sin embargo, debido a los incrementos progresivos de los vehículos diésel, así como al mayor conocimiento de los efectos nocivos del dióxido de nitrógeno (NO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) son cada vez más importantes en el dimensionamiento del sistema de ventilación en modo de funcionamiento normal. El tercer factor a considerar para el sistema de ventilación en modo de operación normal (además de la concentración de CO y NO_x) es la disminución de la visibilidad en el túnel debido al humo generado en el proceso de combustión y la emisión de partículas.

En un túnel con ventilación longitudinal, como el presente caso, los contaminantes son barridos desde la boca de entrada hasta la boca de salida. En consecuencia, la concentración va aumentando hasta el valor máximo obtenido en la boca de salida. El equipo de ventilación requerido está calculado para proporcionar este flujo de aire requerido en cada situación de tráfico teniendo en cuenta las diferentes pérdidas que pueden aparecer en el túnel como pérdidas por fricción o empuje del vehículo.

La metodología de diseño se basa en el cálculo de las pérdidas debidas a los diferentes efectos que se pueden encontrar durante una operación normal en el túnel y el empuje real obtenido de los ventiladores tipo jet fan instalados, siguiendo el mismo procedimiento y datos de entrada utilizados en el modo de operación de emergencia.

$$\Delta P_{fans} \geq \Delta P_{friction} + \Delta P_{singularities} + \Delta P_{vehicles} + \Delta P_{wind}$$

2.6.2 Límites de contaminantes en interior de túneles y en entornos urbanos

Aunque las normas de calidad de aire establecen el control de múltiples factores (principalmente dióxido de azufre -SO₂-, óxidos de nitrógeno -NO y NO₂-, ozono troposférico, monóxido de carbono -CO-, benceno y partículas en suspensión -PM₁₀ y PM_{2.5}-), según las recomendaciones internacionales, los contaminantes que se deben analizar en el entorno de un túnel son principalmente NO₂, CO y partículas. Para estos contaminantes, existen varias normativas o guías que fijan límites recomendables. A continuación, se resumen los niveles exigidos por cada norma y recomendaciones:

PIARC: 2019R02EN - Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation

- Dióxido de Nitrógeno (NO₂): 1 p.p.m. o 1.906,89 µg/m³
- Monóxido de carbono (CO): 70 p.p.m. o 81,270 mg/m³
- Visibilidad (PM): 0,005 m-1 o 1.063,83 µg/m³

OMS: Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

- Dióxido de Nitrógeno (NO₂): 200 µg/m³ (medida en una hora)
- Concentración de partículas (PM₁₀): 50 µg/m³ (medida en 24 horas)

Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

- Dióxido de Nitrógeno (NO₂): 200 µg/m³ (medida en una hora)
- Concentración de partículas (PM₁₀): 50 µg/m³ (medida en 24 horas)
- Monóxido de carbono (CO): 10 mg/m³ (medida en 8 horas)

Como se puede observar, los límites establecidos dentro de un túnel siempre son superiores a los establecidos para un entorno urbano. Por tanto, en el dimensionamiento de la nueva ventilación del túnel de la Avanzada, se tendrá en cuenta que no se superen ninguno de ambos valores o, al menos, valores que puedan afectar a las aceras y edificios cercanos a ambas bocas. Hay que destacar que los límites que se calculan en este documento se realizan para la boca del túnel y que desde estas zonas habrá dilución y dispersión de los contaminantes hasta las zonas con permanencia de personas (aceras o edificios). Este aspecto está reforzado por la condición de cubierta no transitable en ambos emboquilles del túnel en su configuración final.

2.6.3 Emisiones de contaminantes de vehículos

Para las emisiones de contaminantes de vehículos se han empleado las tablas recogidas en el documento técnico “Túneles de carretera: emisiones de vehículos y demanda de ventilación” del año 2019 de PIARC.

La composición de vehículos se obtiene de las estaciones de aforo cercanas. La proporción de vehículos gasolina y Diesel se establece en un 50%. De acuerdo a estos valores se ha considerado en los cálculos el siguiente reparto de vehículos:

Anejo 08. Ventilación

Tipo de vehículo		Proporción (%)
Uso	Motor	
Vehículo de pasajeros (PC)	Eléctrico	0,00 %
	Gasolina	41,55 %
	Diésel	41,56 %
Vehículo de carga ligero (LDV)	Eléctrico	0,00 %
	Gasolina	0,00 %
	Diésel	13,35 %
Vehículo de mercancías pesado (HGV)	Diésel	3,54 %
TOTAL		100,00 %

Tabla 8: Composición del tráfico

Fuente: Elaboración propia

Las emisiones de cada tipo de vehículo se obtienen de las tablas del 2019 de PIARC, considerando una flota de vehículos de un país europea y que es la siguiente:

Distribución de la flota de vehículos por Emission Standard 2018 de PIARC							
Tipo	pre EU 1	EU 1	EU 2	EU 3	EU 4	EU 5	EU 6
PC gasolina	2,2%	2,3%	2,6%	2,1%	17,0%	35,7%	38,2%
PC diésel	0,2%	1,3%	2,2%	5,9%	16,8%	36,0%	37,5%
LDV gasolina	5,7%	3,3%	2,4%	4,3%	15,9%	29,7%	38,9%
LDV diésel	1,7%	1,7%	3,0%	8,3%	20,5%	33,6%	31,1%
HGV diésel	0,8%	0,6%	1,6%	4,9%	3,1%	29,2%	59,8%

Tabla 9: Flota de vehículos considerada para país europeo

Fuente: PIARC

Hay que destacar que los valores de emisiones recogido en el documento de PIARC se basa en unos estándares generales de composición de vehículos y suele presentar valores para el diseño elevados (las emisiones de todos los vehículos las suele considerar como el valor máximo permitido por la ley, cuando en la realidad una gran parte de los vehículos no alcanza el valor máximo permitido y muy pocos los superan). En este sentido hay que entender que el documento de PIARC es un documento para el diseño y que por tanto prefiere emplear hipótesis situadas del lado de la seguridad: El sobredimensionamiento de la ventilación de los túneles previsto por PIARC no suele tener gran importancia cuando se habla del interior del túnel (donde se permiten valores relativamente elevados al ser eventos de corta duración y que afectan a los usuarios en un periodo corto de tiempo) pero deben corregirse para considerar valores mucho más restrictivos y que consideran las 24 horas de los 365 días del año, en los que el sobredimensionamiento de la ventilación sería desproporcionado.

Los valores recogidos por PIARC son especialmente elevados en el número de partículas en suspensión en el que considera no sólo las derivadas del motor del vehículo sino también otras, como las posibles desprendidas de los frenos u otras partes de los vehículos, así como las que pueden remover del pavimento los vehículos en su circulación a lo largo del túnel. Estos valores se podrían reducir, en caso necesario, con otras medidas como podría ser la limpieza periódica del túnel.

2.6.4 Condiciones de tráfico consideradas en los cálculos

La IMD del túnel es de 100.236 en día laboral y un 3,5 % de tráfico de vehículos pesados. De manera general, no se espera que el tráfico de la vía se incremente, sino más bien que disminuya a consecuencia de otras actuaciones previstas en la red vial cercana. En cualquier caso, y del lado de la seguridad, se considerará que en hora punta el tráfico del túnel es el de su máxima capacidad (125 vehículos/km/carril para tráfico parado y 2.000 vehículos hora carril en el entorno de 30 km/h).

Dado que los valores de calidad ambiental en entornos urbanos se establecen en función de valores medios en determinados periodos de tiempo, se debe considerar la distribución horaria del tráfico (considerando ambos sentidos) en el interior del túnel y que se recoge a continuación. Estos valores se han obtenido de las estaciones de aforo dispuestas en la vía del año 2019.

HORA	Vehículos/hora	% Real sobre IML
1	603	0,60%
2	296	0,30%
3	172	0,17%
4	147	0,15%
5	237	0,24%
6	897	0,89%
7	1.834	1,83%
8	5.191	5,18%
9	6.414	6,40%
10	5.967	5,95%
11	4.884	4,87%
12	4.992	4,98%
13	5.467	5,45%
14	6.725	6,71%
15	8.011	7,99%
16	7.358	7,34%
17	6.229	6,21%
18	7.256	7,24%
19	7.122	7,10%
20	6.155	6,14%
21	5.652	5,64%
22	4.305	4,30%
23	2.937	2,93%
24	1.385	1,38%
Total	100.236	100,00%
Media	4.176	

Tabla 10: Distribución del tráfico en día laboral, considerando ambos sentidos

Fuente: Departamento de Infraestructuras y Desarrollo Territorial de la Diputación Foral de Bizkaia

Anejo 08. Ventilación

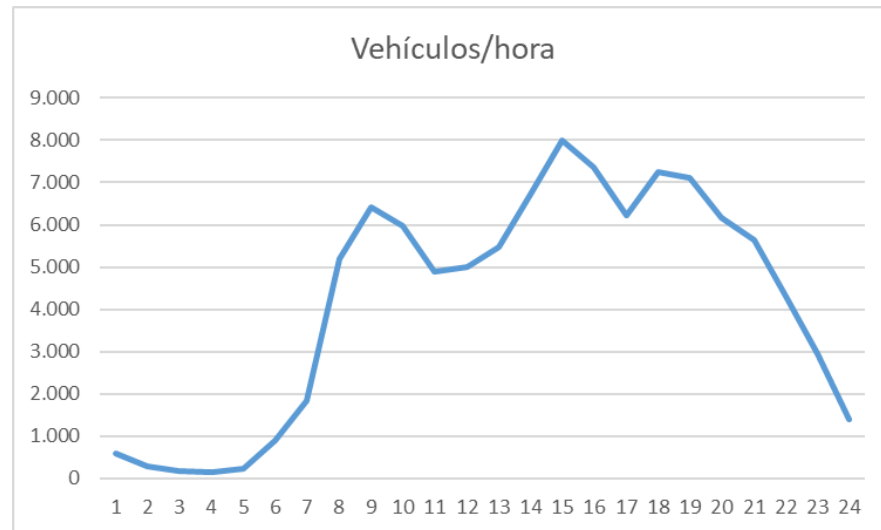


Figura 10: Gráfica de distribución horaria del tráfico en día laboral, considerando ambos sentidos

Fuente: Elaboración propia

El valor máximo para un intervalo de 8 horas es el comprendido entre las 14:00 y las 22:00 con un total de 54.507 vehículos y que equivale a 6.813 vehículos hora. El intervalo de 24 horas equivale a un tráfico medio de 4.176 vehículos hora.

2.6.5 Otras hipótesis de cálculo consideradas

Los datos del túnel son los siguientes:

- Longitud: 824 m.
- Área de la sección transversal 87 m²
- Perímetro de la sección transversal: 46.84 m
- 2 carriles por cada sentido
- Pendiente del túnel: tramo inicial del -3.58%, tramo intermedio de 2.24% y tramo final de 3.92%

Datos ambientales:

- Altura sobre el nivel del mar: 25 metros
- Temperatura: 20°C
- Densidad del aire: 1,2 kg/m³
- Relación entre NO₂ y NOx en el ambiente: 10%

Características del ventilador:

- Diámetro interior: 1,4 metros
- Velocidad del chorro: 32,3 m/s
- Caudal de aire: 49,7 m³/s
- Empuje teórico: 1926 N
- Empuje nominal: 1840 N
- Potencia instalada: 55 kW

2.6.6 Resultados de los cálculos preliminares

2.6.6.1 Flujos de aire estimados para dilución de contaminantes en operación normal

Para los valores límite de contaminantes recomendados por PIARC en interior de túneles obtenemos los siguientes resultados en hora punta, en función de la velocidad de circulación media:

Contaminantes	Velocidad del tráfico (km/h)	Caudal del aire requerido (m ³ /s)	Velocidad del aire (m/s)
CO	0	3,22	0,04
	10	7,63	0,09
	20	9,90	0,11
	30	5,51	0,06
	40	4,96	0,06
	50	4,25	0,05
NOx	0	14,58	0,17
	10	49,78	0,57
	20	47,31	0,54
	30	36,43	0,42
	40	30,90	0,36
	50	27,07	0,31
PM	0	5,57	0,06
	10	50,81	0,58
	20	65,65	0,75
	30	61,58	0,71
	40	59,50	0,68
	50	58,04	0,67

Tabla 11: Caudales de ventilación requeridos para límites en interior del túnel

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar las necesidades de ventilación en hora punta son las habituales de un túnel de carretera con rangos en el entorno de 0,5 m/s a lo largo del túnel y predominando la dilución de las partículas en suspensión a velocidades ≥ 20 km/h y en un rango similar al NOx a bajas velocidades.

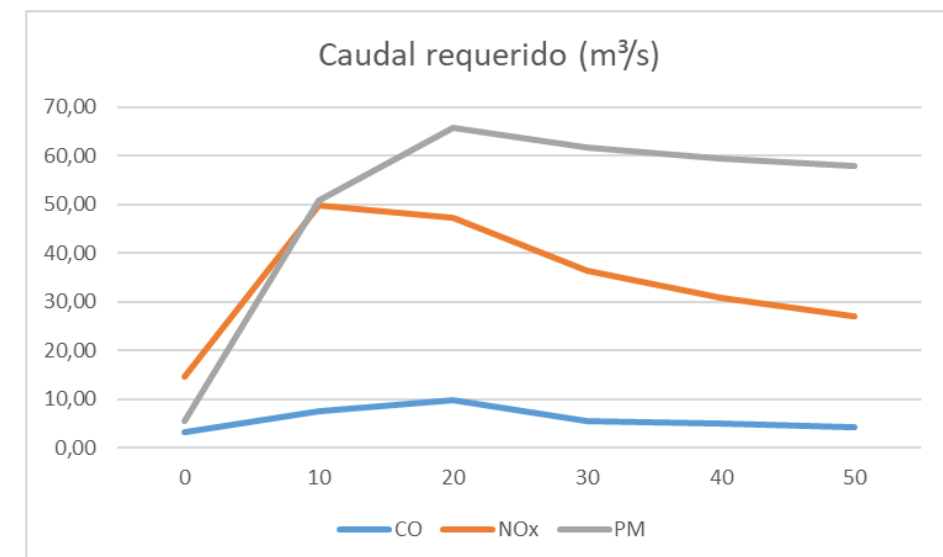


Figura 11: Caudales de ventilación requeridos para límites en interior del túnel

Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

Para no superar en la boca del túnel los valores límite de NO₂ fijados en entornos urbanos, tendremos que el límite en hora punta no puede superar los 200 µg/m³, por lo que los caudales requeridos de ventilación serán:

Contaminantes	Velocidad del tráfico (km/h)	Caudal del aire requerido (m3/s)	Velocidad del aire (m/s)
NO ₂	0	139,02	1,60
	10	474,55	5,45
	20	451,08	5,18
	30	347,33	3,99
	40	294,55	3,39
	50	258,11	2,97

Tabla 12: Caudales de ventilación requeridos para límites NO2 en boca considerando límite urbano

Fuente: Elaboración propia

Para no superar en la boca del túnel los valores límite de CO fijados en entornos urbanos, tendremos que el límite en 8 horas es de 10 mg/m³, por lo que los caudales requeridos de ventilación serán:

Contaminantes	Velocidad del tráfico (km/h)	Caudal del aire requerido (m3/s)	Velocidad del aire (m/s)
CO	0	26,19	0,30
	10	62,05	0,71
	20	80,52	0,93
	30	44,80	0,51
	40	40,35	0,46
	50	34,53	0,40

Tabla 13: Caudales de ventilación requeridos para límites CO en boca considerando límite urbano

Fuente: Elaboración propia

Para no superar en la boca del túnel los valores límite de partículas fijados en entornos urbanos, tendremos que el límite en 24 horas de PM10 es de 50 µg/m³. Considerando sólo las partículas emitidas por los vehículos que indica PIARC (del lado de la seguridad) y sin contar las que levantan los vehículos en su movimiento y que el propio documento de PIARC indica que es un valor muy variable y dependiente de las condiciones de operación y explotación del túnel, obtenemos que los caudales requeridos de ventilación serán:

Contaminantes	Velocidad del tráfico (km/h)	Caudal del aire requerido (m3/s)	Velocidad del aire (m/s)
PM	0	117,26	1,35
	10	392,37	4,51
	20	230,17	2,65
	30	173,53	1,99
	40	154,41	1,77
	50	140,45	1,61

Tabla 14: Caudales de ventilación requeridos para límites PM en boca considerando límite urbano

Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, se observa que con la ventilación mecánica se podrán limitar las concentraciones de los gases en bocas a valores inferiores a los establecidos para entornos urbanos. Esta ventilación será del orden de unas 10 veces la ventilación sanitaria requerida por el propio túnel. Los gases que condicionarán el diseño serán el NO₂ y las partículas en suspensión.

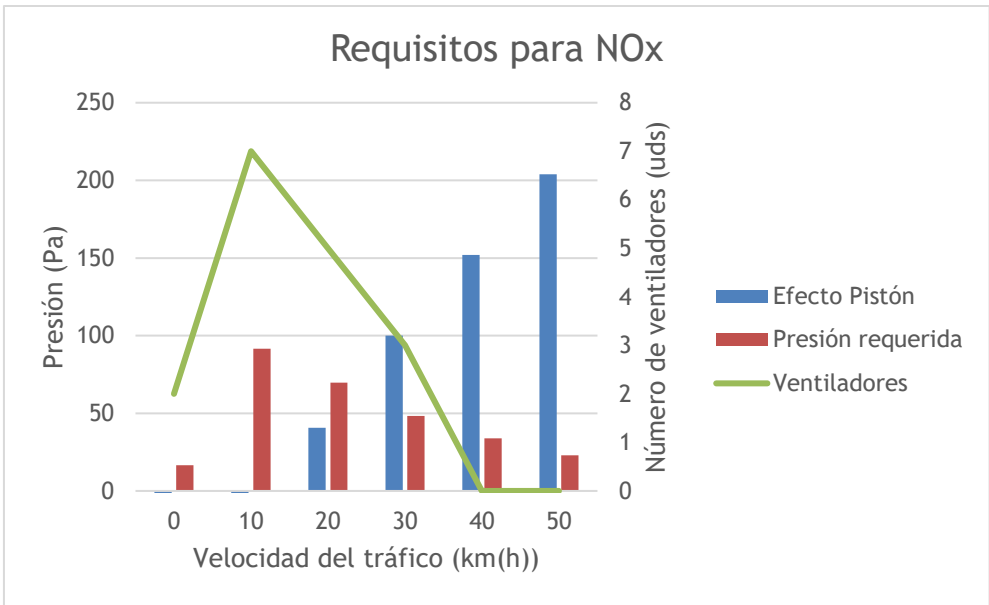


Figura 12: Requisitos de efecto pistón, presión requerida y nº de ventiladores para el NOx

Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

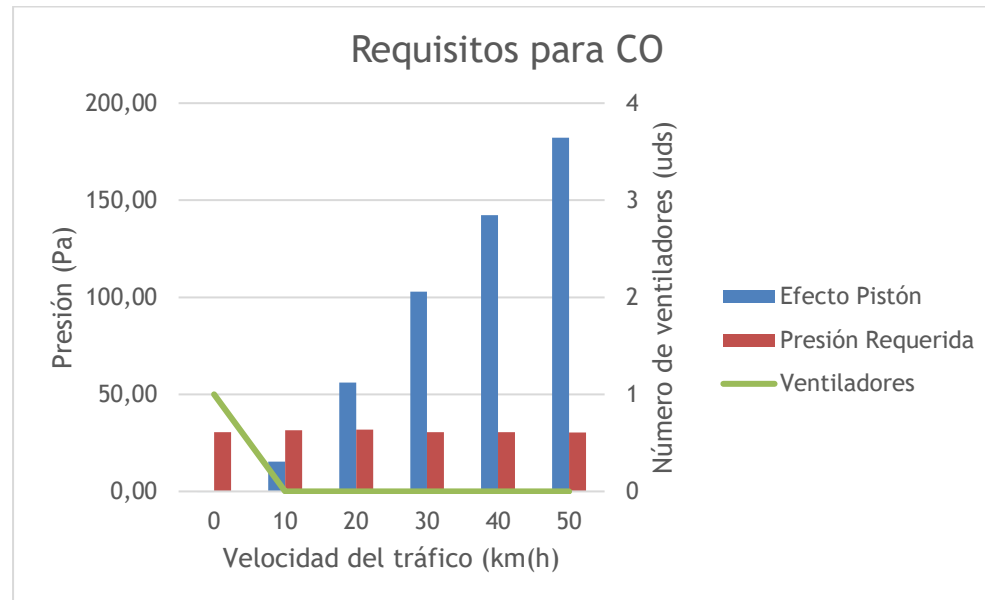


Figura 13: Requisitos de efecto pistón, presión requerida y nº de ventiladores para el CO

Fuente: Elaboración propia

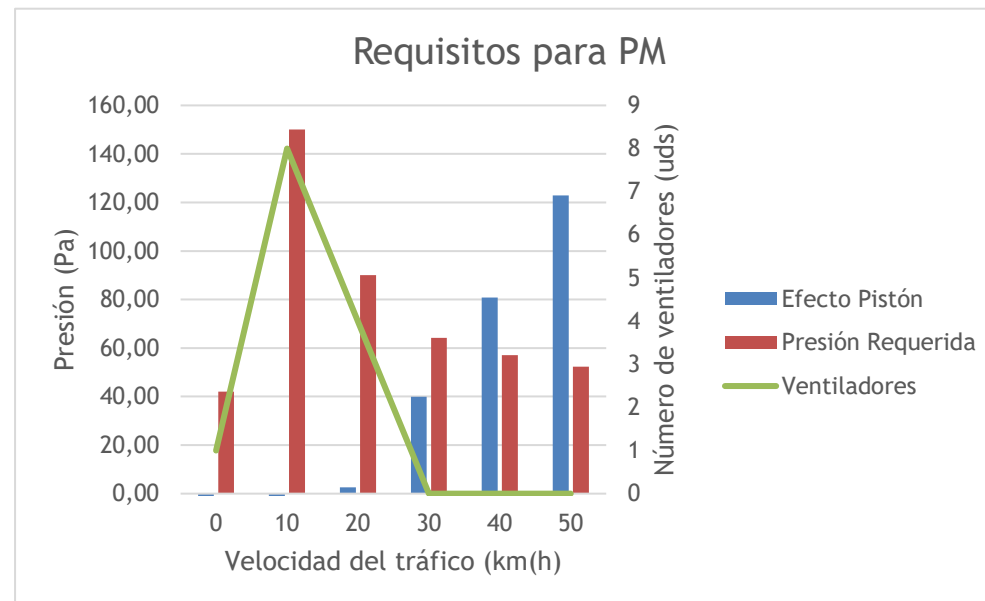


Figura 14: Requisitos de efecto pistón, presión requerida y nº de ventiladores para PM

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver, no existe ningún requisito para disponer de ventilación sanitaria mecánica en situaciones de tráfico de flujo libre (> 30 km/h). Por lo tanto, la demanda de ventiladores tipo jet fans solo será necesaria en casos de tráfico de vehículos congestionado o parado. A partir de estas consideraciones, la cantidad total que se ha calculado es de 8 ventiladores para las necesidades de ventilación sanitaria en el túnel La Avanzada.

2.7 Cálculo unidimensional para la ventilación en caso de un incendio

2.7.1 Conceptos generales

La utilización de cálculos unidimensionales en el diseño permite realizar un dimensionado de los equipos de ventilación necesarios para alcanzar el criterio de diseño establecido. Con este tipo de cálculos se obtiene la posición crítica de incendio basado en la búsqueda del escenario más desfavorable mediante la realización de todos los cálculos necesarios de forma iterativa, considerando múltiples posiciones de incendio a lo largo del túnel.

Para la realización de estos cálculos se han utilizado las fórmulas proporcionadas por PIARC y CETU, las cuales realizan la suposición de que el sistema llega a un estado estacionario analizando todas las pérdidas de carga del sistema para la velocidad de diseño y bajo el incendio de diseño. Las variables implicadas en el cálculo son unidimensionales (características constantes en cada sección) bajo la hipótesis de un gas ideal.

Para cada disposición de ventiladores estudiada (número y posición) se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se sitúa el incendio en un punto. La posición del incendio se determina relativa a la boca de entrada, en cada iteración se traslada la posición del incendio recorriendo todo el tramo estudiado en pasos de 0,5% de la longitud del túnel.
2. Se calculan todos los términos de pérdidas de carga explicados con detalle en el Apéndice correspondiente, teniendo en cuenta la densidad y temperatura del aire en cada punto del túnel provocado por el incendio en cada posición estudiada.
3. Se calcula el empuje proporcionado por cada ventilador teniendo en cuenta la densidad del aire en su posición.
4. Se compara, en términos de presión, el empuje proporcionado por los ventiladores y las pérdidas creadas por una corriente de aire a la velocidad de diseño. Si el primero es mayor, el sistema tiene fuerza suficiente y la velocidad conseguida será mayor que la velocidad de diseño, si es menor, se considera no válido.
5. El cálculo se repite cambiando la posición del incendio y recorriendo así todo el túnel. Si el sistema se muestra insuficiente en una sola posición de incendio, la disposición estudiada es desechada.

El número final de ventiladores de cada tramo, como se ha mencionado anteriormente, será el necesario para hacer frente a todas las posiciones de incendio, considerando simultáneamente las pérdidas de carga generadas y el rendimiento de cada uno de los equipos, el cual varía según la densidad del aire.

Los cálculos se realizan mediante la programación de todas las fórmulas mostradas en los puntos anteriores en Visual Basic for Applications (VBA) de Microsoft Excel. Este entorno permite la introducción de los datos del túnel y de los equipos de forma sencilla y, al mismo tiempo, realizar iterativamente cientos de cálculos que sería imposible realizar sin una herramienta informática. Asimismo, facilita la representación e interpretación de los resultados mediante gráficas.

Los parámetros utilizados para modelar el problema de forma unidimensional (coeficiente de fricción de las paredes del túnel, pérdidas de carga provocadas por el incendio, perfil de temperatura a lo largo del túnel, rendimiento de los ventiladores, etc.) están en concordancia con las recomendaciones dadas por el CETU y PIARC (ver Apéndice correspondiente); así como con las indicaciones dadas por el Decreto Foral 91/2012 y posteriores de Seguridad de Túneles de Carreteras y las Instrucción Técnica de Seguridad en Túneles.

2.7.2 Potencia de incendio

Como se ha descrito en el apartado de criterios de diseño de la ventilación de túnel, el incendio de referencia es el de un vehículo capaz de provocar un incendio de gran magnitud y otro vehículo, con una potencia de incendio de referencia de hasta 100 MW.

Las diferentes fases de crecimiento, pico y descomposición se han utilizado de acuerdo con el diseño de incendio más grande propuesto en la MARTBI como se muestra a continuación.

Anejo 08. Ventilación

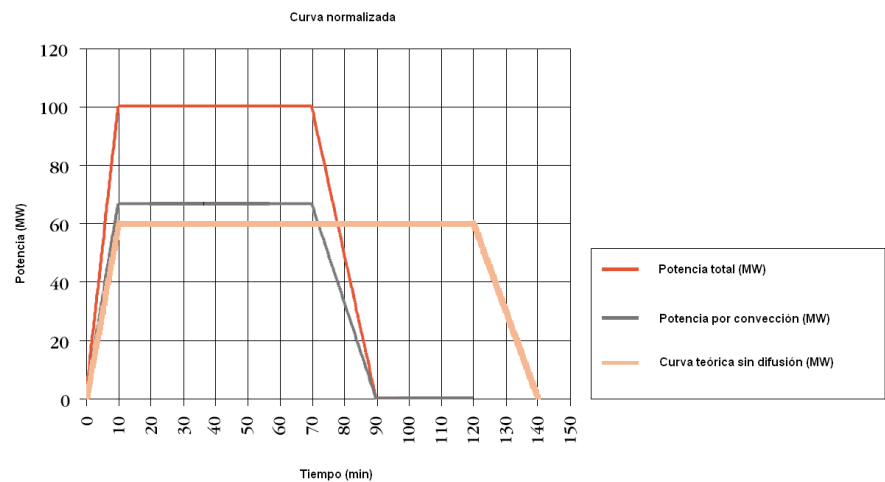


Figura 15: Potencia de incendio

Fuente: MARTBI

2.7.3 Velocidad crítica

La velocidad crítica es identificada como la velocidad de aire a la cual todo el humo es desplazado en la dirección de aire y por tanto previene el retroceso de los humos (backlayering) asegurando un camino de evacuación aguas arriba del incendio libre de humo.

El primer concepto de velocidad crítica parte de Thomas en 1968 quien comparó la cabeza de flotación del flujo de humo y la velocidad del flujo de aire fresco. Bajo esta comparación definió el número crítico de Froude.

$$Fr_c = \frac{\Delta \rho g H}{\rho_0 V_c^2}$$

Kennedy en 1996, basándose en una teoría similar propuso la siguiente ecuación para su aplicación en túneles considerando un número crítico de Froude de 4.5 e introduciendo el concepto de túnel con pendiente.

$$V_c = 0.606 \cdot K_g \left(\frac{g Q_c H}{\rho_0 C_p T_f A} \right)^{1/3}$$

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 C_p A V_c} + T_0$$

Donde:

g : gravedad igual a 9.81 m/s²

Q_c : Potencia de incendio convectiva (W) estimada en 2/3 de la potencia total.

H : Altura del túnel (m)

ρ_0 : Densidad del aire limpio (kg/m³)

C_p : Calor Específico (kJ/kgK)

T_f : Temperatura de las llamas (K)

A : Área del túnel (m²)

K_g : coeficiente dependiente de la pendiente e igual a 1+0.0374·i·0.8 siendo i la pendiente del túnel cuando se ventila en sentido contrario a la pendiente.

V_c : Velocidad crítica (m/s)

T_0 : Temperatura ambiente (K)

Paralelamente han ido apareciendo estudios alternativos que determinaban que la fórmula de Kennedy no prevenía completamente el Backlayering, como puede ser Oka and Atkinson, Wu and Bakar y posteriormente Li o las fórmulas previstas en la NFPA 502. Sin embargo, la fórmula de Kennedy es la más conservadora en cuanto a la velocidad crítica, se utiliza la fórmula de Kennedy para el dimensionamiento preliminar de la ventilación de emergencia.

2.7.4 Resultados de los cálculos preliminares

2.7.4.1 Posición de los ventiladores

El número final de ventiladores de cada tramo es el necesario para hacer frente a todas las posiciones de incendio, considerando simultáneamente las pérdidas de carga generadas y el rendimiento de cada uno de los equipos, el cual varía según la densidad del aire. A partir de estas consideraciones, la cantidad total que se ha calculado es de 8 ventiladores para las necesidades de ventilación de emergencia en el túnel La Avanzada, 4 jet fans en la boca de Getxo y otros 4 en la boca de Bilbao.

Posición (m)	Nº de ventilador (uds)	Diámetro Ø (m)	Velocidad del aire (m/s)
0	Boca de Bilbao		
60	4	1,4	32,30
760	4	1,4	32,30
824	Boca de Getxo		

Tabla 15: Posición de los ventiladores

Fuente: Elaboración propia

2.7.4.2 Interpretación de los resultados

Para el túnel de La Avanzada, se han analizado los dos sentidos de ventilación que se presentan en un gráfico que representa para cada posición de incendio (eje en abscisas) la presión requerida para obtener el criterio de velocidad establecido (línea roja) junto con la presión proporcionada por el sistema de ventilación instalado (línea azul), considerando aquellos ventiladores destruidos por incendio y aquellos fuera de servicio.

En principio, el sentido de los ventiladores para el diseño de la ventilación vendrá determinado por la localización del incendio del túnel, ya que el tráfico dentro del túnel es bidireccional. Sin embargo, otros variables tienen que tenerse en cuenta a la hora de operar la ventilación: número de vehículos en cada lado del incendio, viento en boca, etc. Por lo tanto, la ventilación del túnel que se ha diseñado tiene que ser capaz de controlar completamente un incendio y poder ventilar, por lo menos, hacia la boca más cercana, teniendo viento en contra de 5 m/s.

Sentido de ventilación desde boca de Bilbao hasta la boca de Getxo:

Se analiza en la gráfica siguiente la capacidad de la ventilación cuando ocurre un incendio en cualquier punto del trazado del túnel para mover los humos del incendio desde la boca de Bilbao hasta la boca de Getxo. En este caso, la ventilación es capaz de proporcionar la presión suficiente para superar la presión requerida en cualquier punto del túnel. Por lo tanto, aunque el sentido de ventilación hacia la boca de Getxo es más indicado cuando el incendio se produce a partir de la mitad de la longitud, se podría controlar completamente el humo de un incendio de 100 MW y ventilar hacia la boca de Getxo incluso si el incendio se produce cerca

Anejo 08. Ventilación

de la boca de Bilbao, en caso de que otros condicionantes como el flujo de tráfico o el sentido del viento en boca sean más favorables.

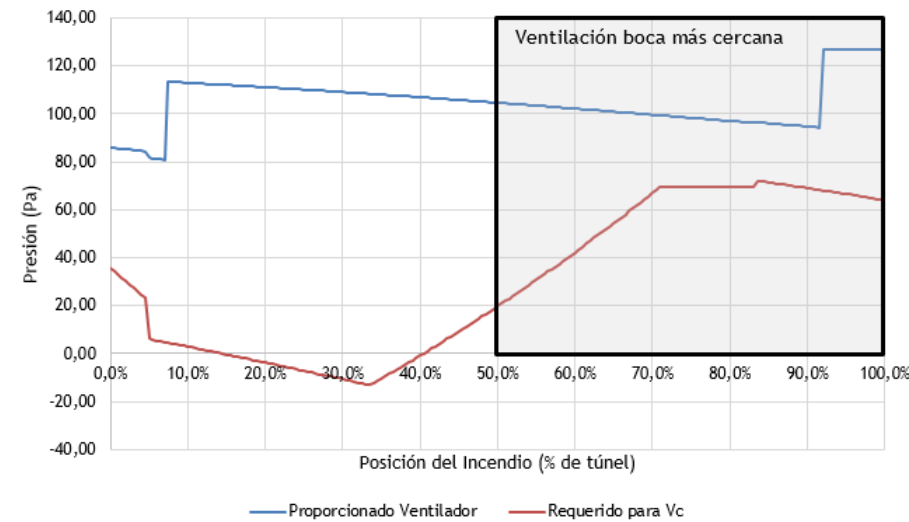


Figura 16: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Bilbao hasta la boca de Getxo (I)

Fuente: Elaboración propia

Sentido de ventilación desde boca de Getxo hasta la boca de Bilbao:

En este caso, se analiza la capacidad de la ventilación cuando ocurre un incendio en cualquier punto del trazado del túnel para mover los humos del incendio desde la boca de Getxo hasta la boca de Bilbao. Como se puede ver en la figura siguiente, dado el perfil longitudinal del túnel que induce un efecto chimenea, el sistema de ventilación es capaz de controlar completamente el humo de un incendio de 100 MW y ventilar hacia la boca de Bilbao una vez que el incendio se produzca más cerca de esa boca que la de Getxo.

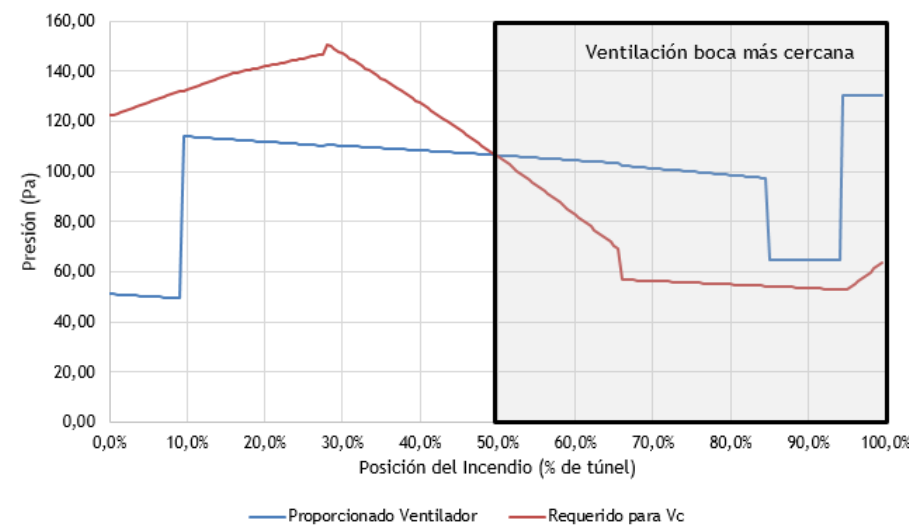


Figura 17: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Getxo hasta la boca de Bilbao (I)

Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

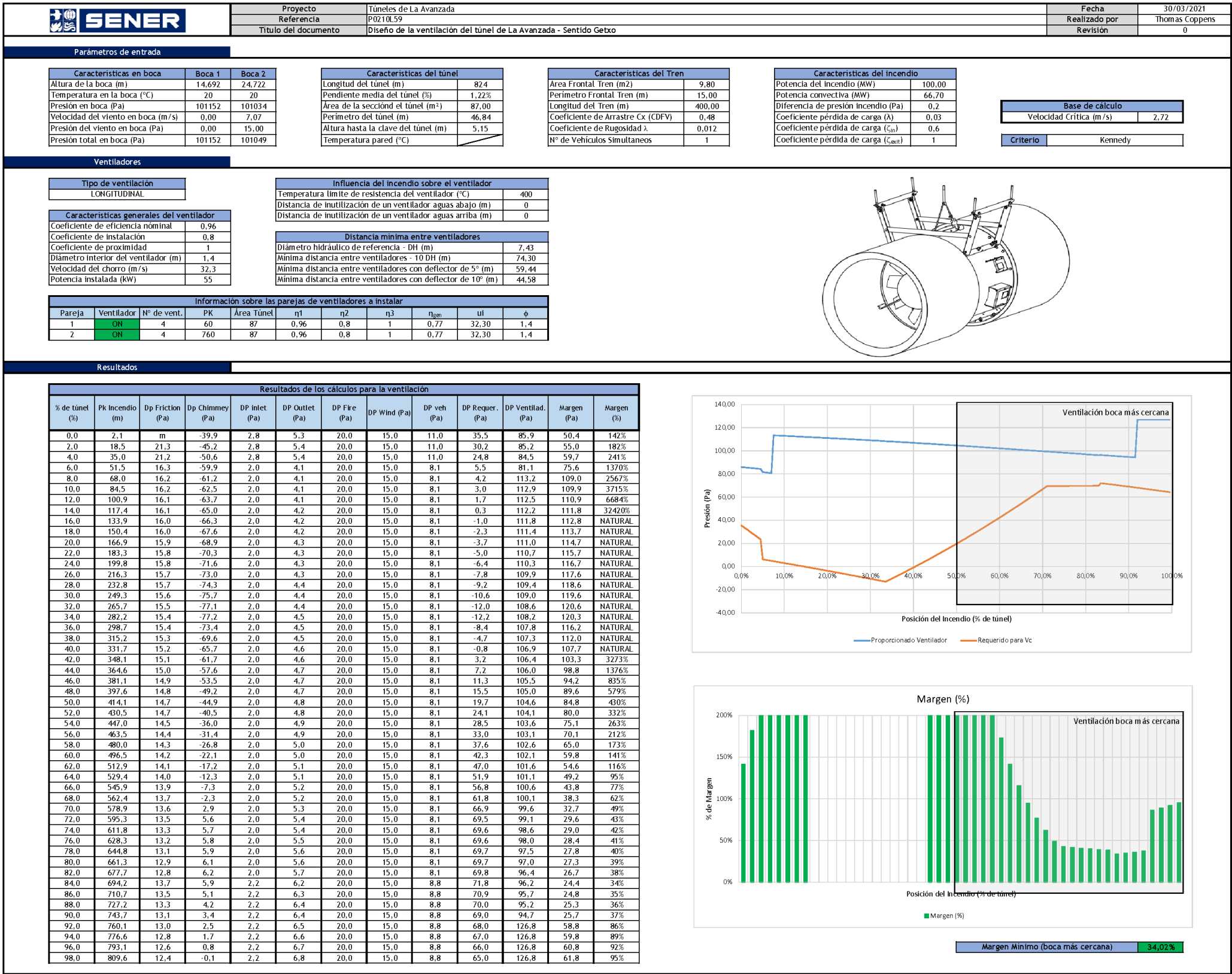


Figura 18: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Bilbao hasta la boca de Getxo (II)

Anejo 08. Ventilación

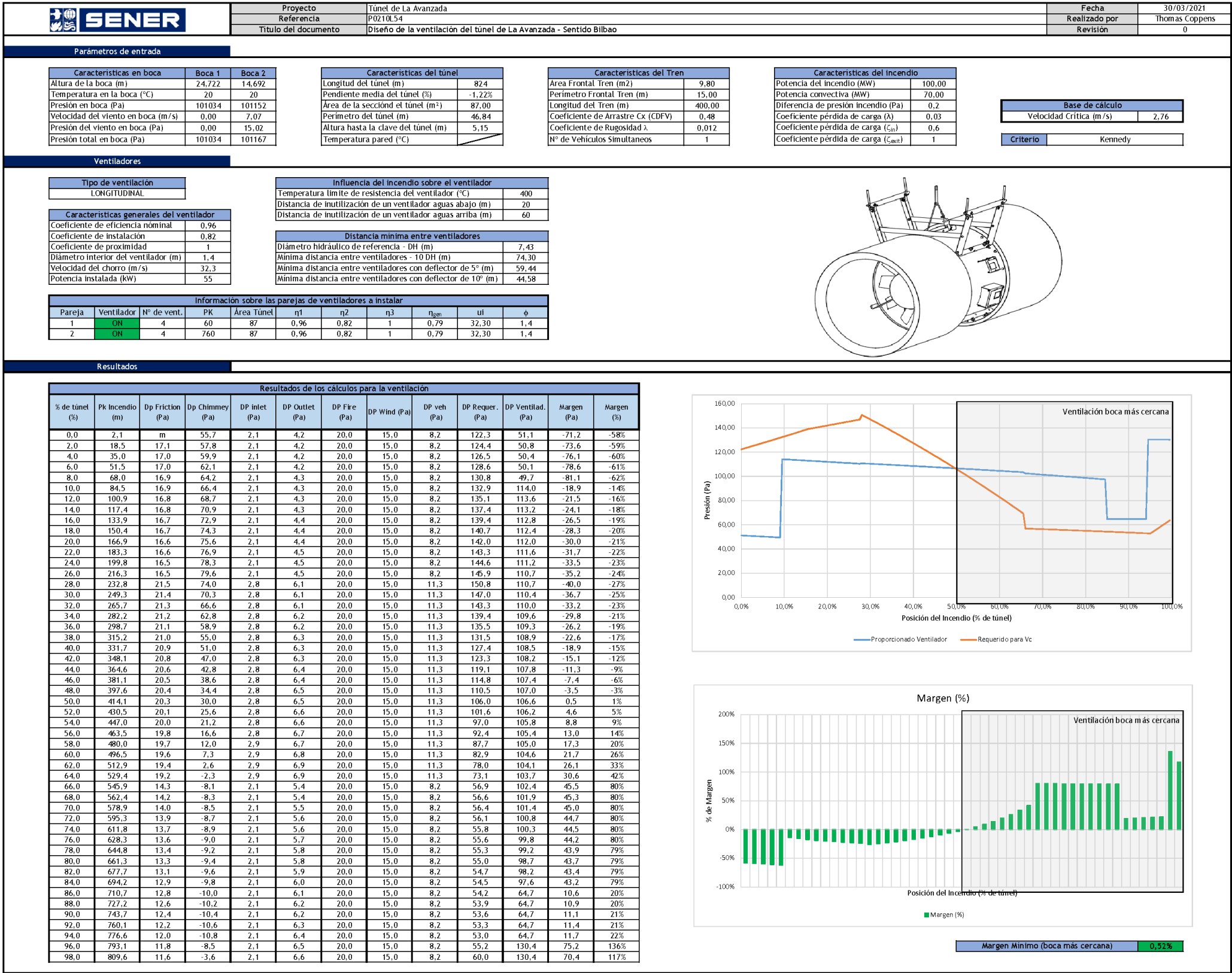


Figura 19: Resultados para el sistema de ventilación desde boca de Bilbao hasta la boca de Getxo (II)

Anejo 08. Ventilación

2.8 Modelo y simulación de ventilación unidimensional

Para la realización de las simulaciones unidimensional se ha utilizado el software IDA-Tunnel. Este software discretiza el túnel en segmentos de diversa longitud y computa las pérdidas de carga de todo el sistema en su conjunto y determina los valores de temperatura, humedad, presión, densidad, velocidad de aire, presencia de humo, etc. para cada uno de los segmentos discretizados.

IDA-Tunnel es una aplicación para el cálculo de la ventilación en redes subterráneas basada en el software SES y proporciona herramientas para dimensionar y posicionar los pozos de ventilación, evaluar la geometría del túnel y el dimensionamiento de los ventiladores, estudiar el comportamiento térmico de la red, modelar los efectos del calor y del humo generados en un incendio o analizar el comportamiento del humo en situaciones de emergencia.

El programa construye un modelo unidimensional (1-D) a partir de las características de la red, dimensiones geométricas, climatología del lugar y propiedades del terreno, la información sobre los elementos de ventilación, circulación y tipos de trenes, cargas térmicas asociadas a equipamientos o personas, entre otros aspectos. También permite incluir incendios para analizar diferentes escenarios de emergencia y ayudar a la determinación de los algoritmos de ventilación.

Se ha analizado con las simulaciones unidimensionales la posición de incendio más desfavorable determinada en la fase de dimensionamiento donde se analizan todas las posiciones de incendio posibles dentro del túnel con el fin detectar el punto más vulnerable del túnel.

2.8.1 Descripción del túnel de la Avanzada

El túnel de la Avanzada localizado en Leioa (Bizkaia) forma parte de la carretera BI-637 ubicado entre los PK12+663 y PK11+839 está integrado dentro de la Red Básica de la Diputación Foral de Bizkaia y constituye parte del eje fundamental de carreteras, por el cual fluyen aproximadamente 100.000 veh/día, relaciona todas las poblaciones de la comarca de Uribe-Kosta (Berango, Sopelana, Urdúliz y Barrika), Getxo y Leioa, entre sí y con Bilbao.

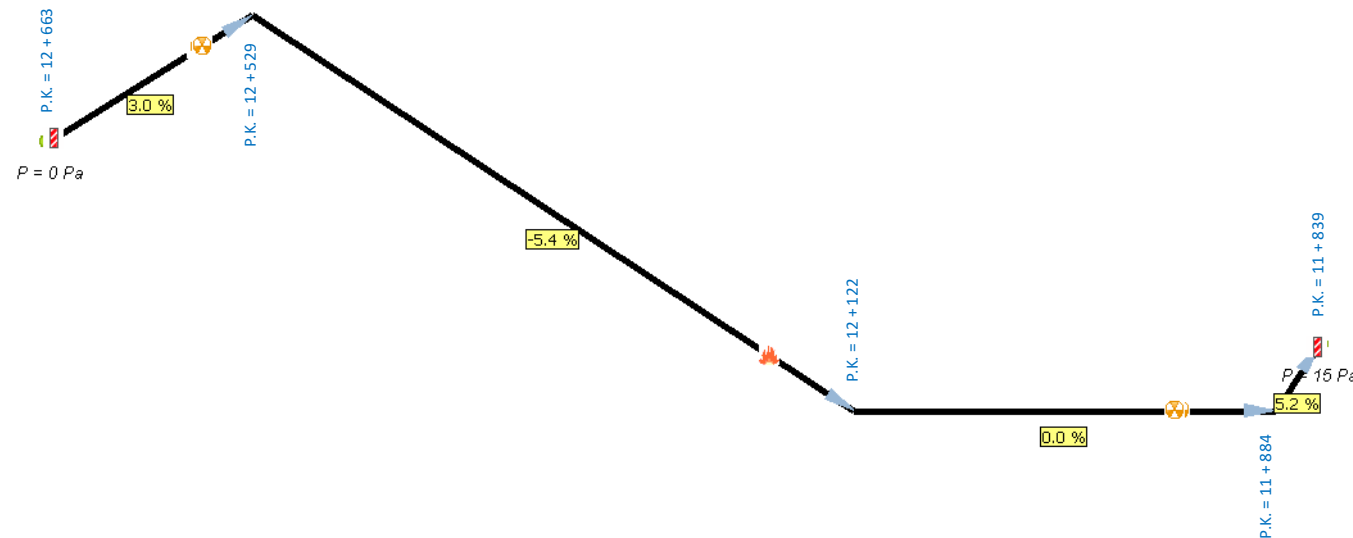


Figura 20: Representación de tramos y pendientes para el túnel de La Avanzada

Fuente: Elaboración propia

2.8.2 Posicionamiento del incendio en el túnel

La posición del incendio más desfavorable que se analiza en la simulación unidimensional es la que se ha establecido en el Análisis de Riesgo del túnel.

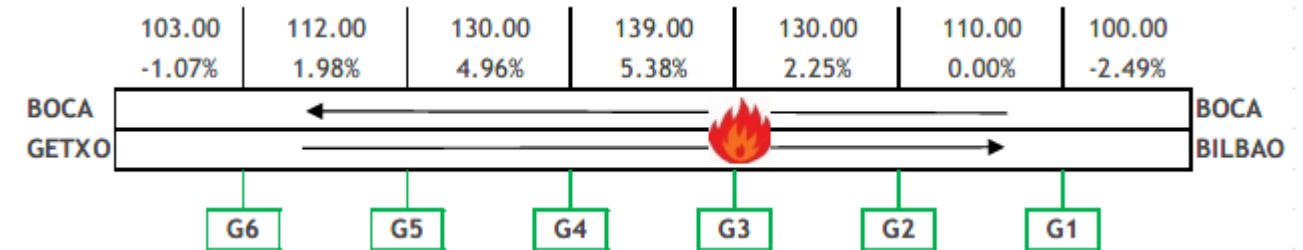


Figura 21: Posicionamiento del incendio en el túnel de La Avanzada

Fuente: Elaboración propia

2.8.3 Modelo de ventilación

Para verificar el dimensionamiento realizado y proporcionar los niveles de seguridad de la infraestructura se ha realizado un modelo de simulación computacional con el software IDA-Tunnel.

Los modelos tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- La simulación abarca 3 horas de 09:00 a 12:00. El incendio se produce a las 10:00 y se modelan dos horas con la curva de incendio prevista.
- Se ha modelado un incendio de 100 MW.
- Se considera 2/3 de la potencia total del incendio como potencia convectiva.
- Nº de ventiladores: 4 ventiladores a 60 metros de la entrada de la boca de Getxo y otros 4 ventiladores a 60 metros de la entrada de la boca de Bilbao.
- Ventilador de 1,4 m de diámetro y 32,3 m/s de velocidad de chorro.
- Diferencia de presión en bocas de 15,73 Pa en dirección Bilbao-Getxo.
- Condiciones ambientales: Temperatura exterior y de pared de 20°C a presión atmosférica 101 kPa (presión atmosférica correspondiente a una altitud de 50 metros).
- Paredes: Se han considerado las paredes como hormigón con una rugosidad igual a 0.025.

2.8.4 Resultados

- Velocidad crítica

En las simulaciones unidimensionales se obtiene un cálculo más preciso y en este se representa a lo largo del tiempo la velocidad alcanzada en el túnel a lo largo del túnel. Particularmente se estudia la velocidad justo en la posición anterior al incendio y se compara con la velocidad crítica tanto de la nueva formulación de la NFPA 502 de 2017 como la formulación original de la NFPA 502 de 2011.

Se simulan 3 horas de 09:00 a 12:00 considerando el inicio del incendio a las 10:00.

En la siguiente gráfica, se muestra el resultado para un incendio de un vehículo capaz de provocar un incendio de gran magnitud y otro vehículo, con una potencia de incendio de referencia de hasta 100 MW.

Anejo 08. Ventilación

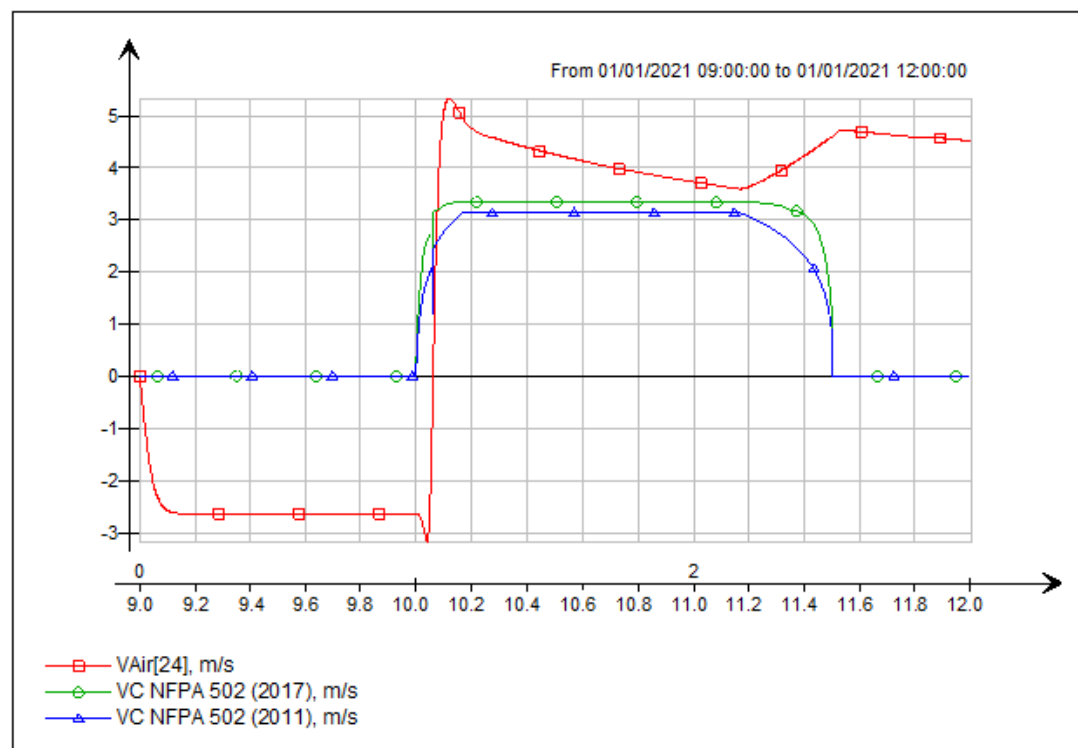


Figura 22: Resultados para el sistema de ventilación en IDA Tunnel

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la imagen anterior las condiciones climáticas inducen un tiro natural en el interior del túnel en sentido contrario a la ventilación de un poco más de 2,5 m/s. Una vez que se produce el incendio y se arranca la ventilación se consigue cambiar el sentido de la corriente de aire con una velocidad de aire superior a 3,5 m/s tanto en el tubo incendiado. En cualquier caso, la velocidad es superior en cualquier momento al criterio de velocidad crítica según NFPA 502 (2011) o NFPA 502 (2017).

- Visibilidad

Se evalúa la propagación del humo en el túnel a lo largo del tiempo y delimita las posibles zonas de riesgo para los usuarios durante el proceso de evacuación. Se considera el coeficiente de extinción (k) de $0,4 \text{ m}^{-1}$ como valor de opacidad en el aire a partir del cual la visibilidad en la sección del túnel se verá ampliamente comprometida. Ese coeficiente no tiene en cuenta el posible tiempo adicional de evacuación que se ha considerado en cada escenario a partir del cual una persona se considera víctima de los humos desestratificado.

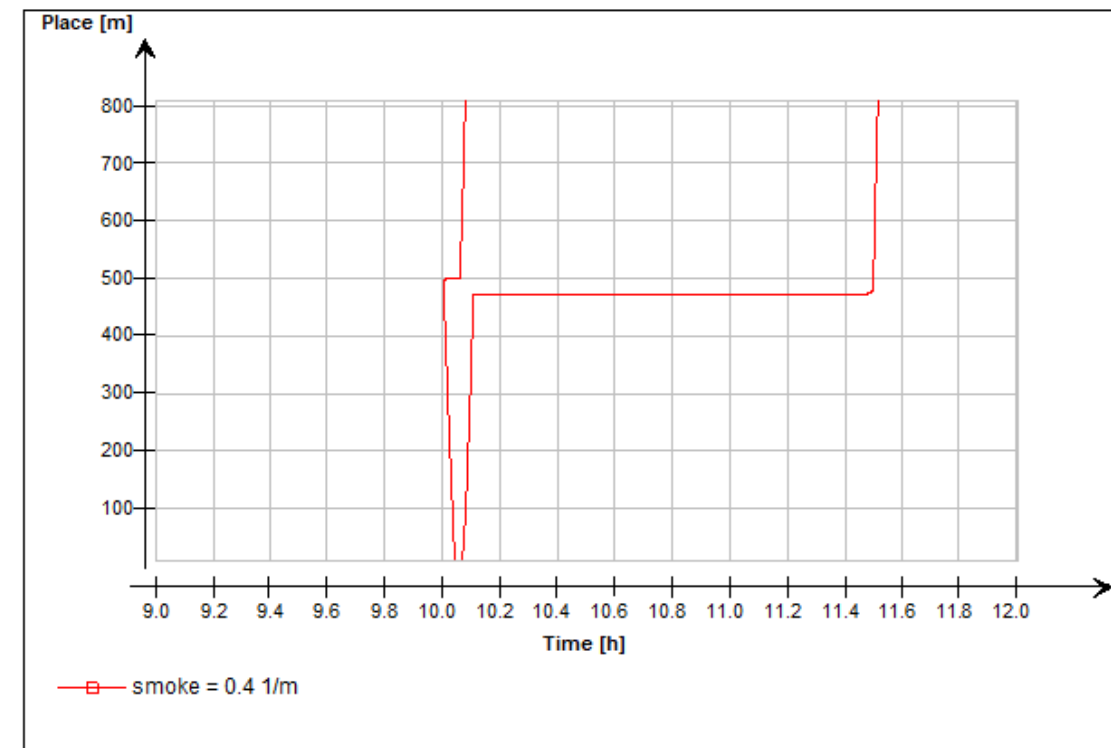


Figura 23: Coeficiente de extinción en el túnel de La Avanzada en IDA Tunnel

Fuente: Elaboración propia

El gráfico anterior representa el coeficiente de extinción a lo largo del tiempo y del túnel. Aguas abajo del incendio se encuentra toda la sección del túnel llena de humo y con visibilidad muy comprometida, pero la zona aguas arriba del incendio está libre de humo gracias a la ventilación del túnel.

Esta simulación permite comprobar que, frente al escenario más desfavorable, la ventilación del túnel es capaz de revertir el sentido del aire (tiro natural) y controlar los humos hacia un lado del incendio de tal manera que se favorezca la ventilación en ese lado del incendio o para que los bomberos puedan acceder al incendio.

2.9 Cálculo tridimensional para la ventilación en caso de incendio

2.9.1 Conceptos Generales

Mediante la técnica de la dinámica de fluidos computacional (CFD) es posible predecir el comportamiento del humo frente a diferentes casos de incendio, que posteriormente servirán de base para la interpretación de resultados en una fase de evacuación de personas.

El presente estudio corresponde a un incendio de un vehículo capaz de provocar un incendio de gran magnitud con otro vehículo, caso análogo al establecido en la metodología MARTBI como escenario 5 (E5). Se ha comprobado en el AARR Método General como el caso más crítico desde el punto de vista del número de personas afectadas por el incendio. Se considera una potencia de 100MW.

En este apartado se han analizado dos escenarios de incendio distintos, con el objetivo de comprobar la variabilidad y la influencia de las condiciones ambientales exteriores. Ambos escenarios están ubicados en la peor posición desde el punto de vista de la evacuación de los usuarios, bloqueando la salida de emergencia inmediata en la posición del incendio.

Anejo 08. Ventilación

2.9.2 Descripción del Software empleado

El software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) empleado para realizar las simulaciones tridimensionales ha sido Fire Dynamics Simulator (FDS), desarrollado por el Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology - NIST (USA) con la colaboración del VTT Building and Transport in Finland. Éste es un modelo de dinámica de fluidos computacional concebido de manera específica para reproducir los fenómenos relacionados con los incendios.

Se trata del software CFD con mayor número de trabajos de verificación y validación en cálculo de incendios a nivel mundial, disponibles muchos de ellos en la web del programa (<https://pages.nist.gov/fds-smv/>). Ha sido utilizado además con éxito en numerosas ocasiones en el campo de la ingeniería de protección contra incendios.

FDS es un modelo computacional de dinámica de fluidos (CFD - Computational Fluid Dynamics). Este software está enfocado específicamente a la simulación del fenómeno del incendio en recintos cerrados. FDS resuelve numéricamente, empleando el método LES (Large Eddy Simulation), un tipo de ecuaciones de Navier-Stokes adaptadas para baja velocidad y flujo considerado desde un punto de vista térmico con énfasis en el transporte de humo y calor derivado del incendio.

FDS calcula los valores de densidad, velocidad, temperatura, presión y concentración de especies en cada celda mediante las ecuaciones de conservación de la masa, del momento y de la energía en función de las condiciones iniciales y de contorno definidas. Además, utiliza las propiedades de los materiales de los muros, paredes, suelo, techo, etc. para simular el desarrollo del incendio.

Con FDS se pueden crear además modelos de detección de incendios y también simular el crecimiento del fuego y los daños ocasionados por este durante el periodo transcurrido desde la alarma hasta el inicio de la reacción al incendio. También permite la introducción de rociadores en la simulación. Los modelos de rociadores (de diluvio, agua nebulizada, etc.) simulan unas gotas que se esparcen por todo el ámbito y producen efectos realistas como la interacción del arrastre entre las gotas y la columna de fuego. Dichas gotas también simulan los efectos del enfriamiento por evaporación, y esas temperaturas predicen de forma real la activación de múltiples rociadores.

FDS además permite analizar las corrientes de aire en casos donde no existe incendio, dando una idea en condiciones de confort de la homogeneidad de las condiciones ambientales en la infraestructura. Además, este análisis permite comprobar los modelos de incendio con pruebas de campo, comparando los datos medidos con los resultados obtenidos con el software.

El entorno de trabajo de FDS está formado por ficheros de texto, por lo que es necesario un preprocesador para el desarrollo de simulaciones con geometrías complejas. SENER trabaja con la herramienta Pyrosim para las labores de preproceso de FDS.

Adicionalmente, FDS dispone de una herramienta de visualización de resultados bastante potente, SmokeView, que permite realizar el postprocesado de la simulación y mostrar los parámetros escogidos en un entorno tridimensional.

El software FDS realiza el cálculo de las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas, haciendo uso del modelo VLES de turbulencia para la resolución de los remolinos. Información más detallada sobre el modelo y las diferentes aproximaciones que emplea el software para la resolución del problema (reacción de combustión, transporte de especies, modelado del humo, etc.) pueden observarse la documentación del propio software [6].

2.9.3 Descripción del túnel de la Avanzada

El túnel de la Avanzada localizado en Leioa (Bizkaia) forma parte de la carretera BI-637 ubicado entre los PK12+663 y PK11+839 está integrado dentro de la Red Básica de la Diputación Foral de Bizkaia y constituye parte del eje fundamental de carreteras, por el cual fluyen aproximadamente 100.000 veh/día, relaciona todas las poblaciones de la comarca de Uribe-Kosta (Berango, Sopelana, Urdúliz y Barrika), Getxo y Leioa, entre sí y con Bilbao.



Figura 24. Localización del Túnel de la Avanzada, carretera BI-637

Fuente: Diputación Foral de Bizkaia

Dentro del proyecto constructivo se ha definido una longitud total del túnel igual a 824m con pendientes variables iguales a: 134m (+3.0%), 407m (-5.4%), 238m (0.0%), 45m (+5.2%)

Longitud (m)	Pendiente (%), sentido Bilbao
+134	+3.0%
+407	-5.4%
+238	0.0%
+45	+5.2%

Tabla 16: Pendientes del Túnel de la Avanzada

Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

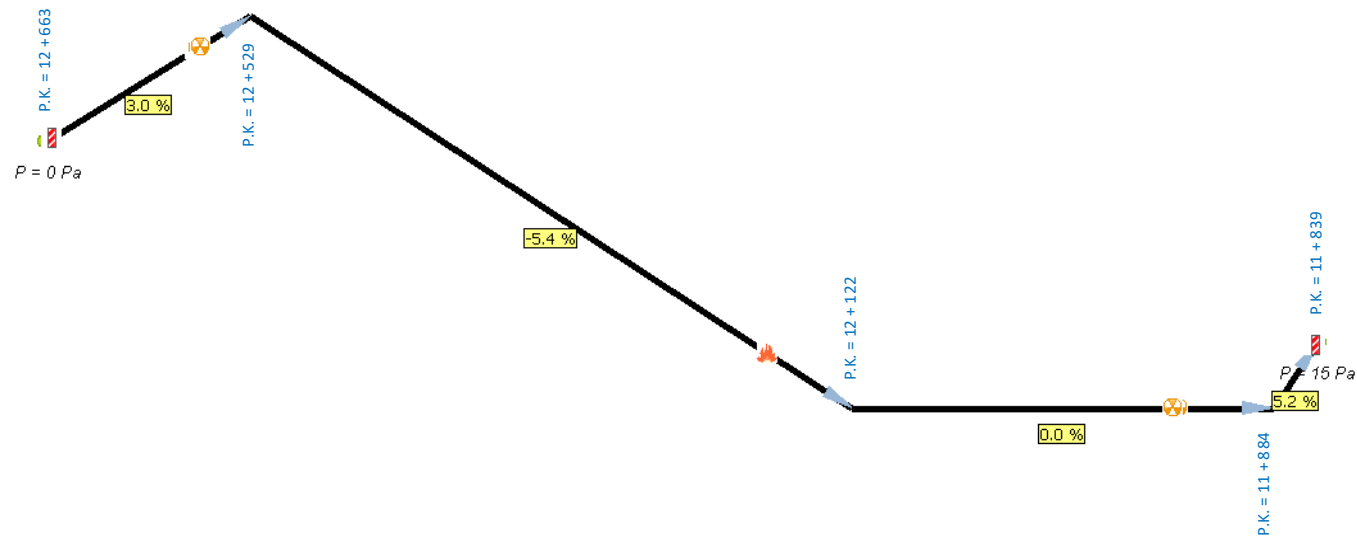


Figura 25: Representación de tramos y pendientes para el túnel de la Avanzada

Fuente: Elaboración propia

Se asume una sección transversal continua a lo largo de todo el túnel igual a 87.00 m².

Las siguientes figuras muestran un esquema en planta de la localización del túnel y la sección transversal propuesta para los PK12+256 a PK12+386 y PK12+433 a PK12+511.

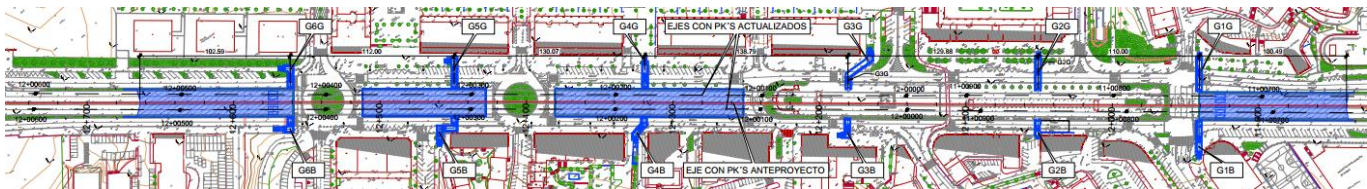


Figura 26. Plano de planta del túnel de la Avanzada

Fuente: Elaboración propia

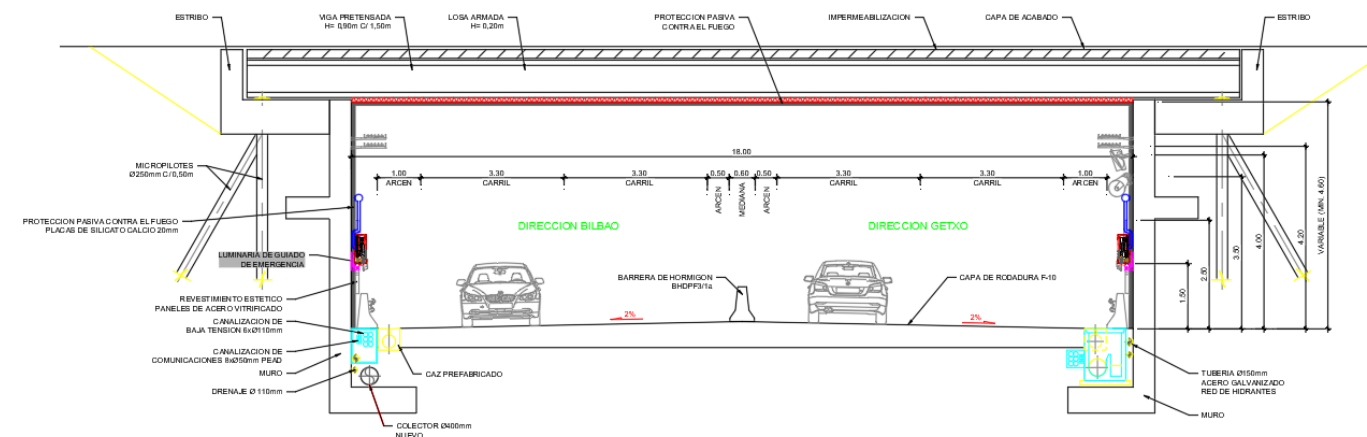


Figura 27. Detalle sección transversal propuesta del túnel de la Avanzada (P.K. 12+256)

Fuente: Elaboración propia

2.9.3.1 Posición de los ventiladores

El número final de ventiladores de cada tramo es el necesario para hacer frente a todas las posiciones de incendio, considerando simultáneamente las pérdidas de carga generadas y el rendimiento de cada uno de los equipos, el cual varía según la densidad del aire. A partir de estas consideraciones, la cantidad total que se ha calculado es de 8 ventiladores para las necesidades de ventilación de emergencia en el túnel La Avanzada, 4 jet fans en la boca de Getxo y otros 4 en la boca de Bilbao.

Posición (m)	Nº de ventilador (uds)	Diámetro Ø (m)	Velocidad del aire (m/s)
0	Boca de Bilbao		
60	4	1,4	32,30
760	4	1,4	32,30
824	Boca de Getxo		

Tabla 17: Posición de los ventiladores

Fuente: Elaboración propia

2.9.4 Modelo Computacional

2.9.4.1 Geometría

Se ha modelado la geometría del túnel de la avanzada a partir de los planos de secciones disponibles. Las siguientes figuras muestran la geometría empleada en el modelo tridimensional:

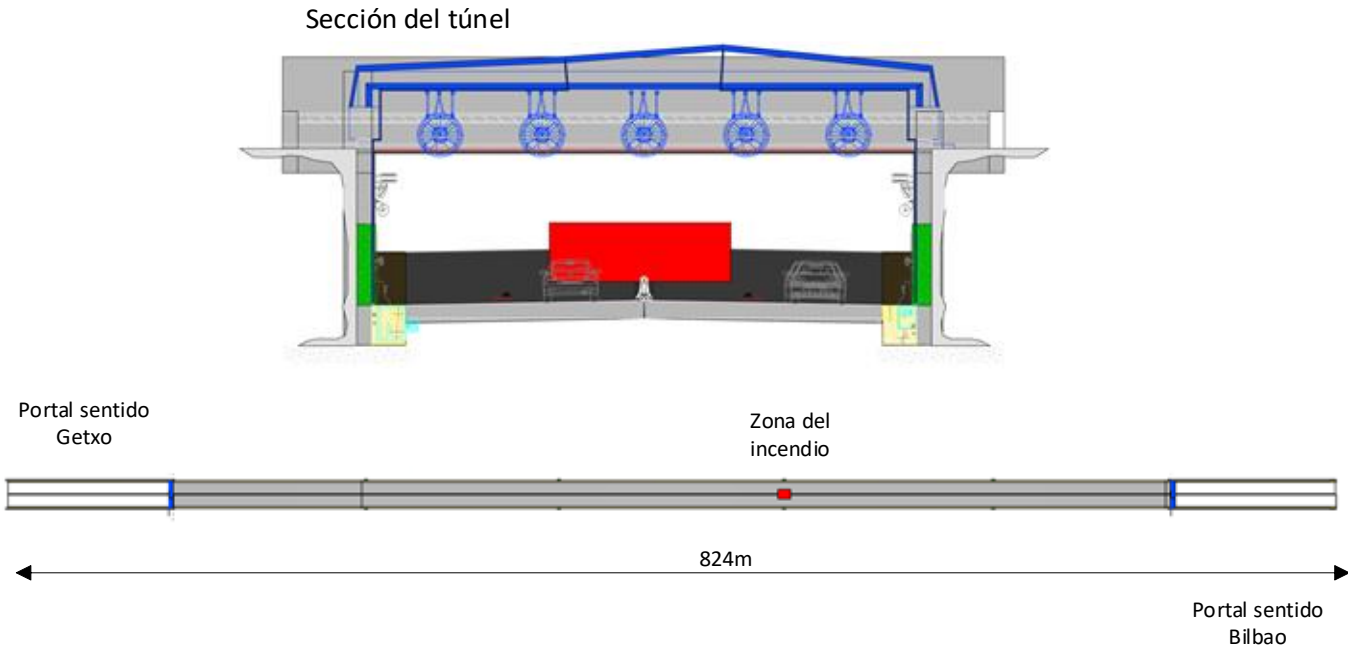


Figura 28. Vista tipo sección y planta del modelo realizado.

Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

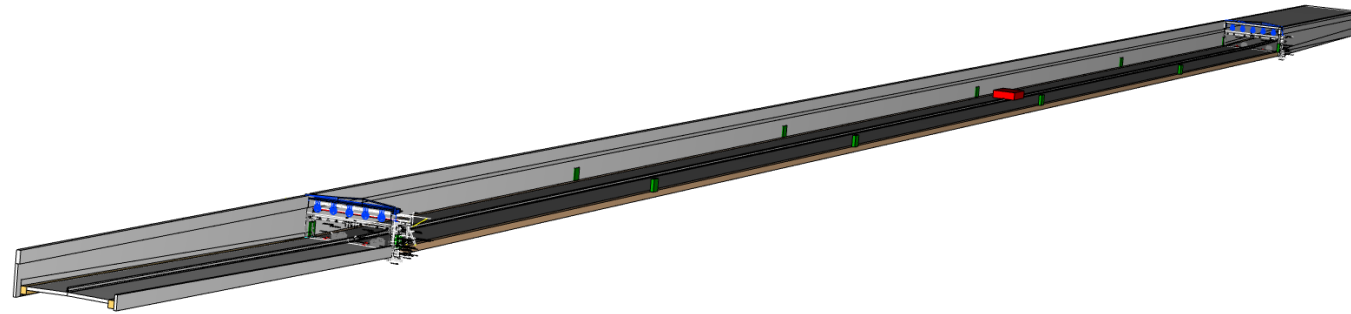


Figura 29. Vista 3D del modelo geométrico del túnel de la Avanzada.

Fuente: Elaboración propia

Si bien el túnel consta de varias pendientes a lo largo del trazado tanto ascendentes como descendentes, estas no se modelan dentro de la geometría 3D, sino que, se modifican los vectores en el eje vertical correspondiente al efecto de la gravedad.

Esta forma de modelar se considera más precisa que generar la pendiente en el modelo geométrico dado las particularidades de FDS al modelar el mallado [6]. Sí se ha modelado la pendiente de forma geométrica en la derivación, el cambio de gravedad no afectaría a este tramo de túnel.

2.9.4.2 Mallado

El dominio empleado para la simulación se ha discretizado en volúmenes finitos, con un tamaño adecuado para la posterior resolución eficiente del problema, adaptándose a la malla seleccionada.

Se ha empleado una malla hexaédrica formada por cubos de 0,4 m de lado, estando estos valores de acuerdo con el cálculo del diámetro característico D^* según las referencias técnicas de referencia para la correcta resolución de la zona del incendio.

Esta zona tal como se indica en “Fire Dynamics Simulator: User’s Guide” [5] es la más crítica desde el punto de vista del modelado:

“For simulations involving buoyant plumes, a measure of how well the flow field is resolved is given by the non-dimensional expression D^*/δ_x , where D^* is a characteristic fire diameter:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Dónde:

 $\dot{Q}$ = Tasa de liberación total de calor del fuego (kW) ρ_{∞} =Densidad del aire (Kg/m3) c_p =Calor específico del aire (kJ/ kg K) T_{∞} = Temperatura ambiente (K) g =Constante de gravedad (m/s2)

And δ_x is the nominal size of a mesh cell. The quantity D^*/δ_x can be thought of as the number of computational cells spanning the characteristic (not necessarily the physical) diameter of the fire. The more cells spanning the fire, the better the resolution of the calculation. It is better to assess the quality of the mesh in terms of this non-dimensional parameter, rather than an absolute mesh cell size. For example, a cell size of 10 cm

may be “adequate,” in some sense, for evaluating the spread of smoke and heat through a building from a sizable fire, but may not be appropriate to study a very small, smoldering source. “

A continuación, se muestran los cálculos de mallado realizados:

Datos de entrada		
Q (Potencia de incendio)	100000	kW
Densidad del aire	1.204	kg/m3
Calor específico	1	kJ/ kg K
Temperatura ambiente	293	K
Gravedad	9.81	m/s2
D* (diámetro de fuego característico)	6.051	m

D*/dx (Tipo de malla)	Valor sugerido	Tamaño (m)
Fina	16	0.378
Media	10	0.605

Tabla 18. Cálculos Mallado.

Fuente: Elaboración propia

Para el escenario de incendio de 100 MW de potencia se ha considerado un mallado fino, lo que se consigue con un D^*/δ_x de 16, el tamaño escogido es de 0,40m (ligeramente superior a los 0,378 pero lo bastante cercano a un nivel elevado de detalle) es coherente con los trabajos de verificación y validación del software [7-8] y se considera adecuado para la evaluación de las condiciones de sostenibilidad en el interior de la infraestructura.

La elección del tamaño de malla se asume como compromiso entre precisión y tiempos de computación.

La discretización realizada da lugar a escenarios con celdas superiores al 1.000.000. La malla global del modelo se ha dividido en mallas más pequeñas, todas ellas aproximadas al mismo número de celdas para así, poder realizar el cálculo en paralelo sobre varias CPU y reducir así los tiempos de cálculo. La división de la malla global en mallas más pequeñas se ha realizado respetando que el incendio se mantenga en una única malla y suficientemente alejado de los extremos de la malla, para así evitar problemas numéricos.

Anejo 08. Ventilación

A continuación, se muestra el mallado empleado:

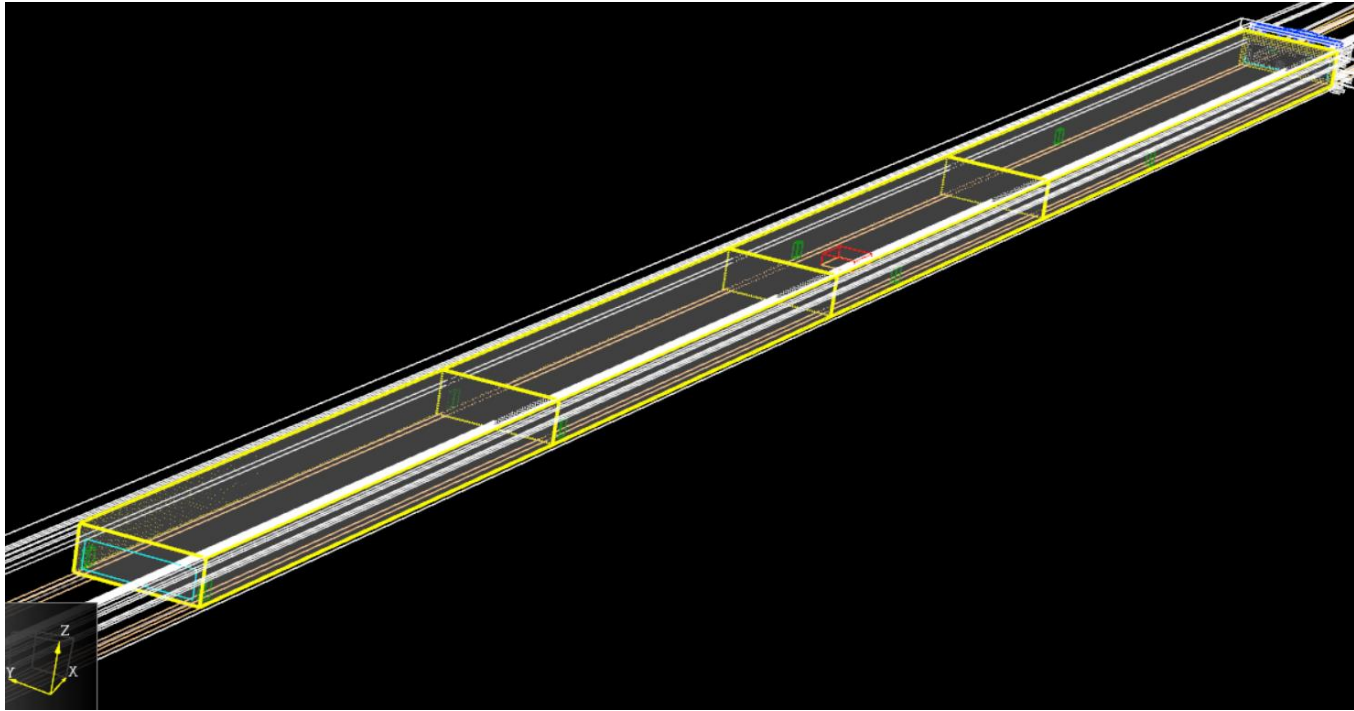


Figura 30. Mallado del modelo computacional.

Fuente: Elaboración propia

2.9.5 Escenarios de Incendio

Se han analizado dos escenarios de incendio distintos con el fin de contrastar los resultados obtenidos dentro del análisis de riesgos, ello permitirá entender mejor el comportamiento de los humos bajo una situación climática muy desfavorable y poder así, extraer conclusiones que permitan determinar posibles mejoras en materia de seguridad contra incendios para el túnel de la avanzada que favorezcan la evacuación de los usuarios.

Se analizan por tanto dos escenarios:

- **Escenario 1. Viento en contra y encendido de ventiladores a máxima potencia.**

Como premisa se busca inicialmente comprobar la capacidad del sistema de ventilación, corresponde a un escenario que permita verificar el movimiento de los humos frente a varias condiciones desfavorables al tener una contrapresión de 15Pa (2.2m/s velocidad de aire dentro de túnel) y un mayor efecto chimenea de acuerdo con la posición del incendio.

En este escenario, el encendido de TODOS los ventiladores inicia a los 120seg (+60seg empuje máximo) luego de detectarse el incendio, se busca cambiar la dirección de los humos expulsándolos hacia una de las bocas.

- **Escenario 2. Viento en contra y encendido de ventiladores al 1 m/s.**

Bajo esta hipótesis se busca demostrar que, bajo un correcto control de la ventilación es posible mejorar las condiciones de evacuación, corresponde a un escenario ideal en el que se busca mediante un buen control de la ventilación, favorecer la evacuación de las personas al mantener la nube de humos el mayor tiempo posible estratificado, para ello, se encienden y apagan ventiladores en función de la velocidad del aire dentro del túnel, la misma que estará en el rango de 1m/s a 1.5m/s (desplazándose en igual sentido que el viento en contra inicial).

El escenario 2 es muy similar a la condición idónea de ventilación recomendada en muchos estudios internacionales para la etapa inicial de auto evacuación (como PIARC) durante la que se procura mantener

corrientes de aire bajas, evitando la formación de turbulencias. Estas corrientes de aire bajas garantizan una adecuada combustión de los gases (en caso contrario se formaría una gran cantidad de CO) y evita la propagación del incendio a otros vehículos (lo que implicaría un incremento de su potencia), así como unas condiciones de estratificación de los humos elevadas.

La elección del valor de 15Pa como valor de contrapresión para ambos escenarios no se debe entender como un valor de diseño, sino un valor de referencia, dado que el objetivo de la realización de las simulaciones computacionales es analizar cómo se comporta el humo bajo dos situaciones distintas y poder así extraer conclusiones que sirvan para mejorar la seguridad del túnel en caso de incendio.

En ambos escenarios se asume que el incendio se produce en el mismo punto del interior del túnel concretamente a los 484m desde la boca sentido Getxo

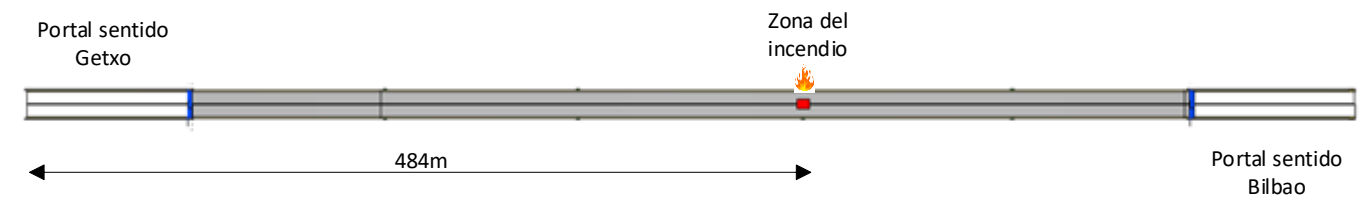


Figura 31. Ubicación del incendio.

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de simulación realizado en ambos casos es de 20 minutos, con la curva definida en el Apartado 2.6 del presente documento. Se estima que a partir de los 20 minutos la dinámica del incendio podría verse afectada por la actuación de la brigada de emergencia y por tanto la simulación a partir de este instante no sería válida. Se analizan solamente los 20 primeros minutos del incendio, periodo donde se producirá la auto evacuación de las personas.

El comportamiento de los humos dependerá de las condiciones meteorológicas existentes en el momento del incendio. La información de estaciones meteorológicas indica un viento mayoritario proveniente del lado Bilbao en torno a los 15Pa de presión.

La siguiente tabla muestra los escenarios analizados:

Caso	Incendio	Contrapresión en bocas	Malla (X , Y , Z)	Número de celdas
Escenario 1	484m	15Pa (-2,2 m/s)	0,4m x 0,4m x 0,4m	1'125.000
Escenario 2	484m	15Pa (-2,2 m/s)	0,4m x 0,4m x 0,4m	1'010.700

Tabla 19. Escenarios analizados.

Fuente: Elaboración propia

2.9.6 Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno consideradas en el modelo son las indicadas a continuación:

- Condiciones ambientales: Presión atmosférica de 101.325Pa, presión equivalente a la altura donde se encuentra localizado el túnel.
- Las paredes del túnel se consideran de hormigón de forma que se observen los fenómenos de transferencia de calor y enfriamiento de los humos a lo largo del túnel.
- La temperatura inicial considerada en el interior del túnel es de 20°C.
- El vector de gravedad se altera para representar las pendientes del túnel.

Las salidas al exterior del túnel que forman parte del contorno del dominio se han considerado como abiertas al ambiente exterior con presión atmosférica.

Anejo 08. Ventilación

2.9.7 Resultados de Escenario 1

La siguiente figura muestra a modo de verificación la tasa de liberación de calor real considerada durante todo el tiempo de la simulación para el Escenario 1 estudiado:

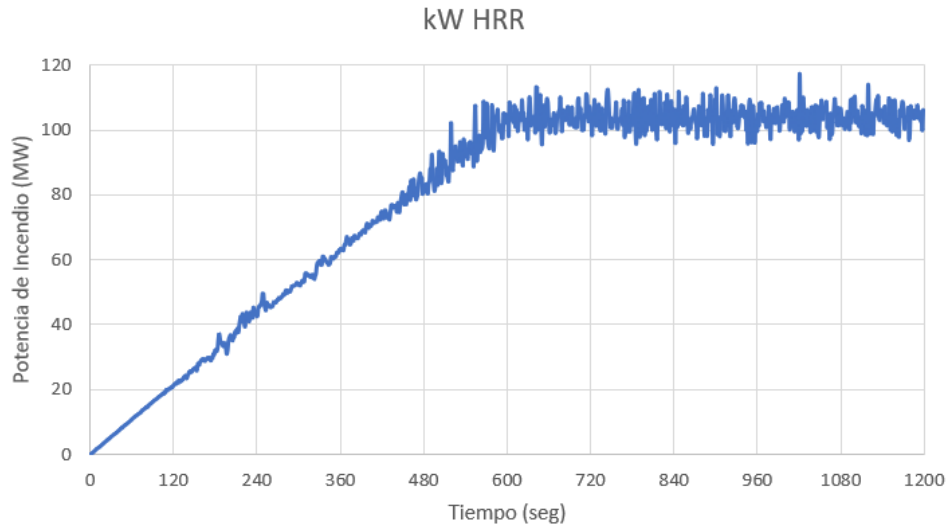


Figura 32. Tasa de liberación de calor obtenida en la simulación

Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la figura, la potencia del incendio sigue la curva de incendio E5 de la Metodología MARTBI. Las pequeñas fluctuaciones son debidas a la entrada de aire al perímetro del incendio.

2.9.7.1 Evolución de la velocidad del aire en el interior del Túnel. Escenario 1

Las condiciones atmosféricas indican que existe un viento predominante en sentido Getxo, de acuerdo a los datos recogidos existe una contrapresión entre bocas de túnel de 15Pa equivalente a un tiro natural dentro de túnel entorno a los 2,2m/s.

A fin de establecer escenarios de estudio similares a la realidad, se incluye de igual forma la intensidad hora punta de los vehículos que circulan dentro del túnel hacia ambos sentidos.

LA AVANZADA TÚNEL REAL	
Longitud	824.00 m
Tipo de vía a la que pertenece	Autovía o Autopista
IMD Laborable	100,238 veh/día
Calzada 1: Sentido Getxo	48.26%
Calzada 2: Sentido Bilbao	51.74%
% Pesados diarios	3.50%
% Hora punta - Hora 15	7.93%
Calzada 1: Sentido Getxo	45.56%
Calzada 2: Sentido Bilbao	54.44%
Intensidad hora punta - Sentido Getxo	3,621 veh/hora
Intensidad hora punta - Sentido Bilbao	4,327 veh/hora

Tabla 20. Datos de tráfico de túnel de La Avanzada

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta la suma de efectos atmosféricos, más el efecto pistón de los vehículos y el posterior encendido de los ventiladores, la curva de velocidad de aire dentro de túnel es la siguiente:

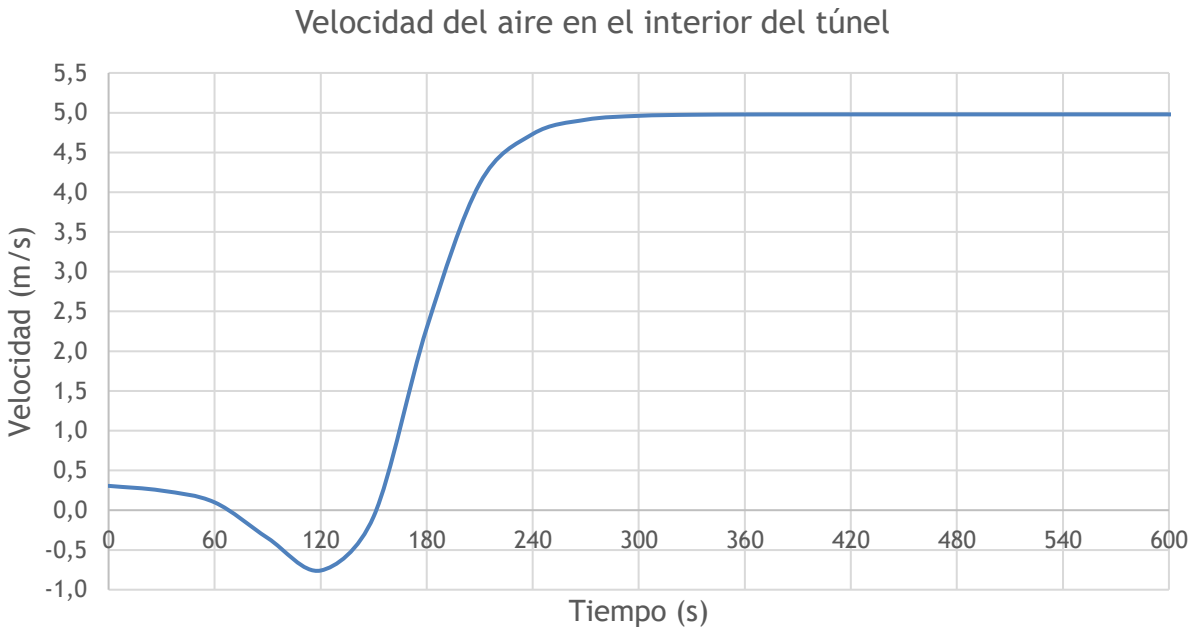


Figura 33. Velocidad del aire en el interior del túnel. Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la anterior gráfica, en el instante inicial (t = 0seg) se corta el tráfico como consecuencia del accidente (incendio) lo que provoca una caída gradual de la velocidad del aire que inicialmente se encontraba soplando aproximadamente a 0.3m/s en sentido Bilbao debido a la alta intensidad de tráfico (superior al tráfico en el sentido Getxo más el efecto atmosférico).

Al cortarse el tráfico, dicho efecto pistón predominante disminuye gradualmente, hasta imponerse el tiro natural (efecto atmosférico) lo que provoca un ligero cambio en la dirección del viento, correspondiente a la curva descendente en los primeros instantes, este efecto dura pocos segundos ya que a los 120 segundos con el rápido encendido de los ventiladores provoca un cambio en la dirección del viento y por consiguiente de los humos hasta alcanzar cotas de 5 m/s.

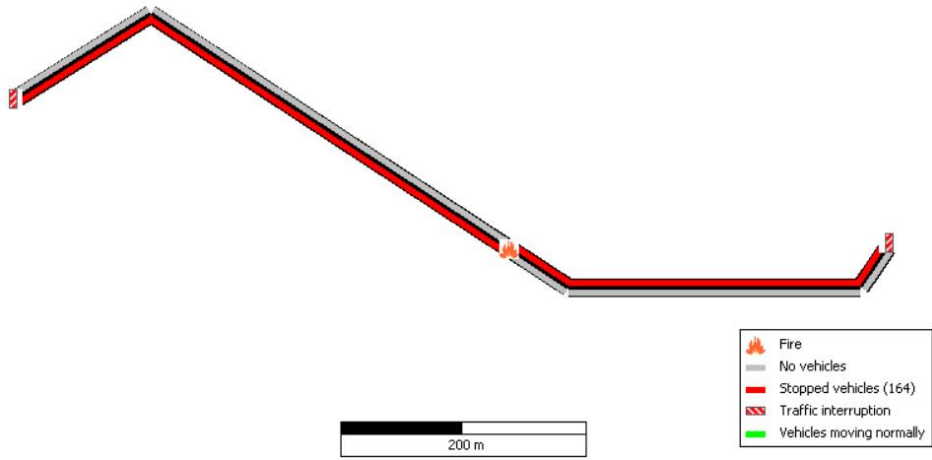


Figura 34. Interrupción del tráfico debido al incendio

Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

La siguiente serie de imágenes tiene correspondencia con la curva de velocidad anteriormente presentada, inicialmente se observan valores de velocidades en el rango de 1,0 m/s a 0,5m/s (ya que sumamos ahora el efecto chimenea como producto del incendio), al llegar al instante de 180 segundos cuyos ventiladores ya han alcanzado su potencia máxima de operación, es evidente que, la capacidad del sistema logra mantener una velocidad positiva hacia la boca en sentido Bilbao de 5 m/s.

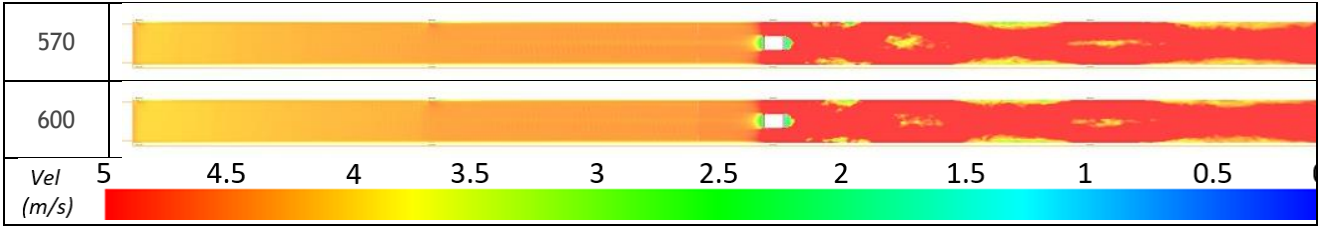
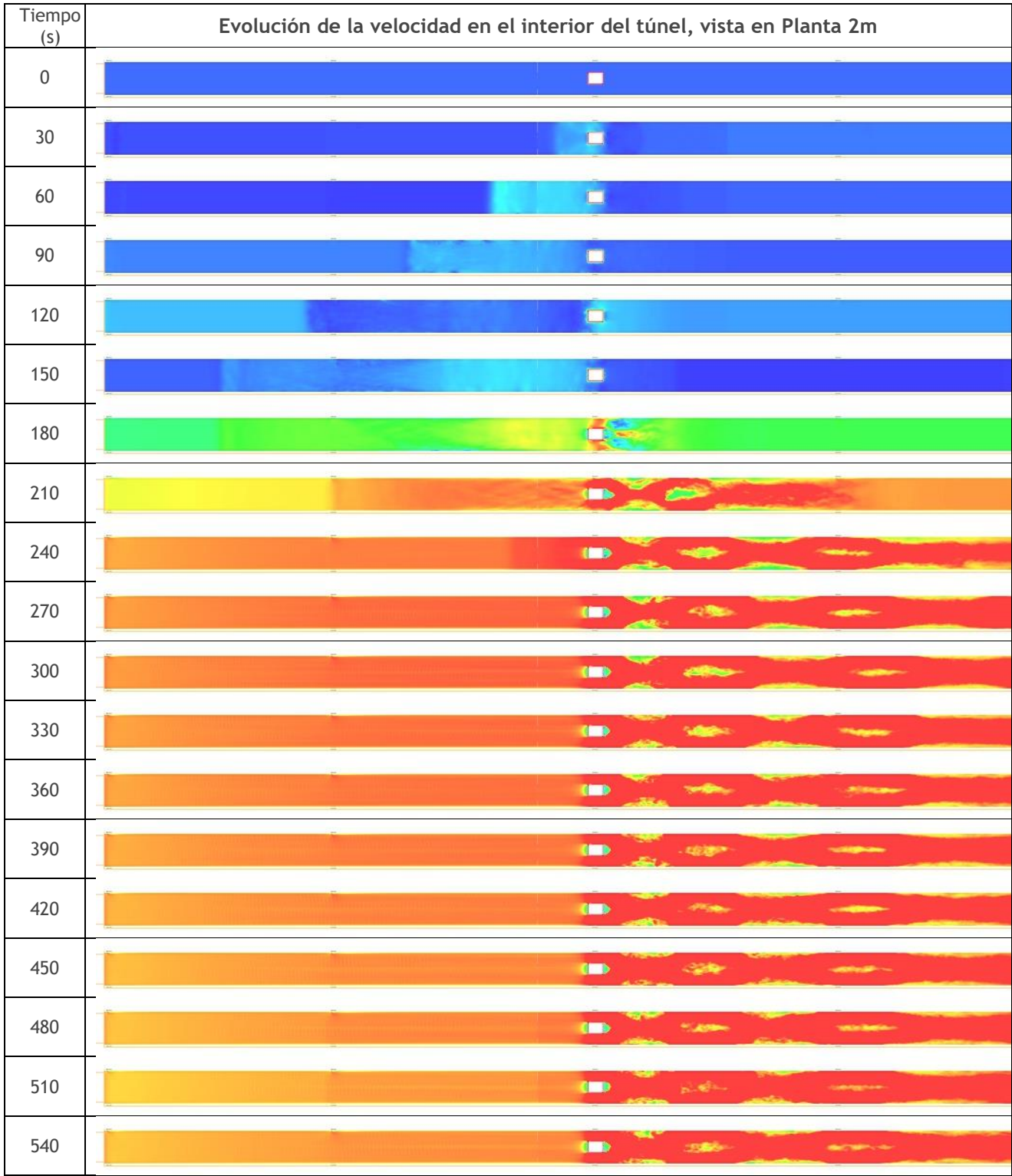
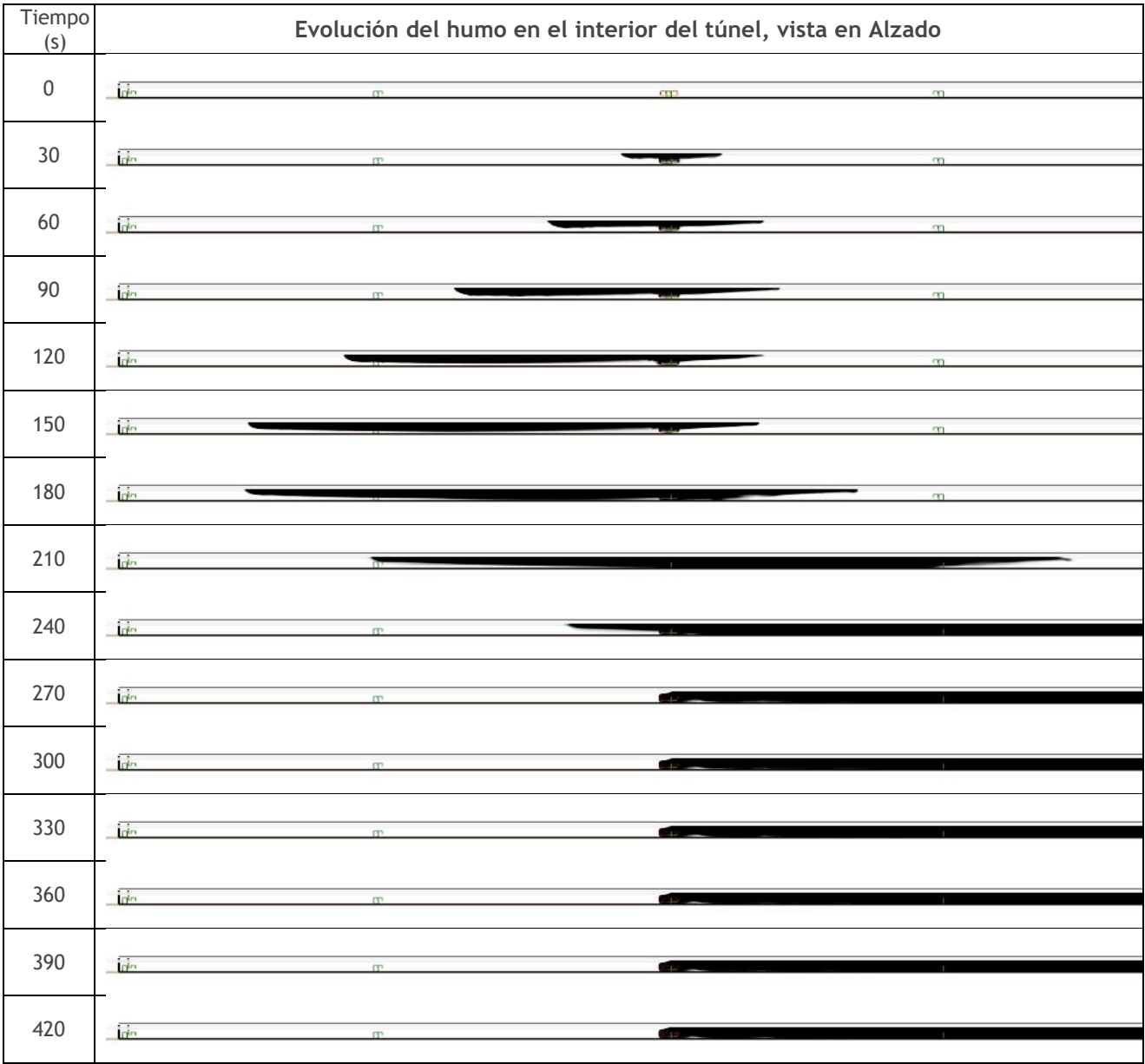


Tabla 21. Evolución de la velocidad del aire, Planta 2m. Escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

2.9.7.2 Propagación del Humo

A continuación, se presenta la evolución del humo a lo largo del tiempo desde una vista longitudinal:



Anejo 08. Ventilación



Tabla 22. Evolución del humo, Alzado. Escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en las anteriores imágenes, el primer objetivo planteado en modificar la dirección inicial del avance de los humos (para verificar la capacidad total del sistema de ventilación) se logra pasado el primer minuto desde el encendido de los ventiladores, de donde, los humos empiezan a frenarse para aproximadamente 2 minutos después de iniciar la ventilación se consigue cambiar la dirección del avance de los humos.

Cabe señalar que, bajo este tipo de control se generan amplias turbulencias inmediatamente a las cercanías del incendio que, sumado al brusco movimiento del aire como producto del empuje de los ventiladores, el humo se enfría y cae rápidamente al nivel de las personas provocando que este tipo de estrategia de ventilación bajo estas hipótesis para un túnel bidireccional no sea la más recomendable.

2.9.7.3 Visibilidad

En las siguientes imágenes se muestra la evolución de la visibilidad a la altura de las personas, considerándose esta aproximada en 2,0 metros.

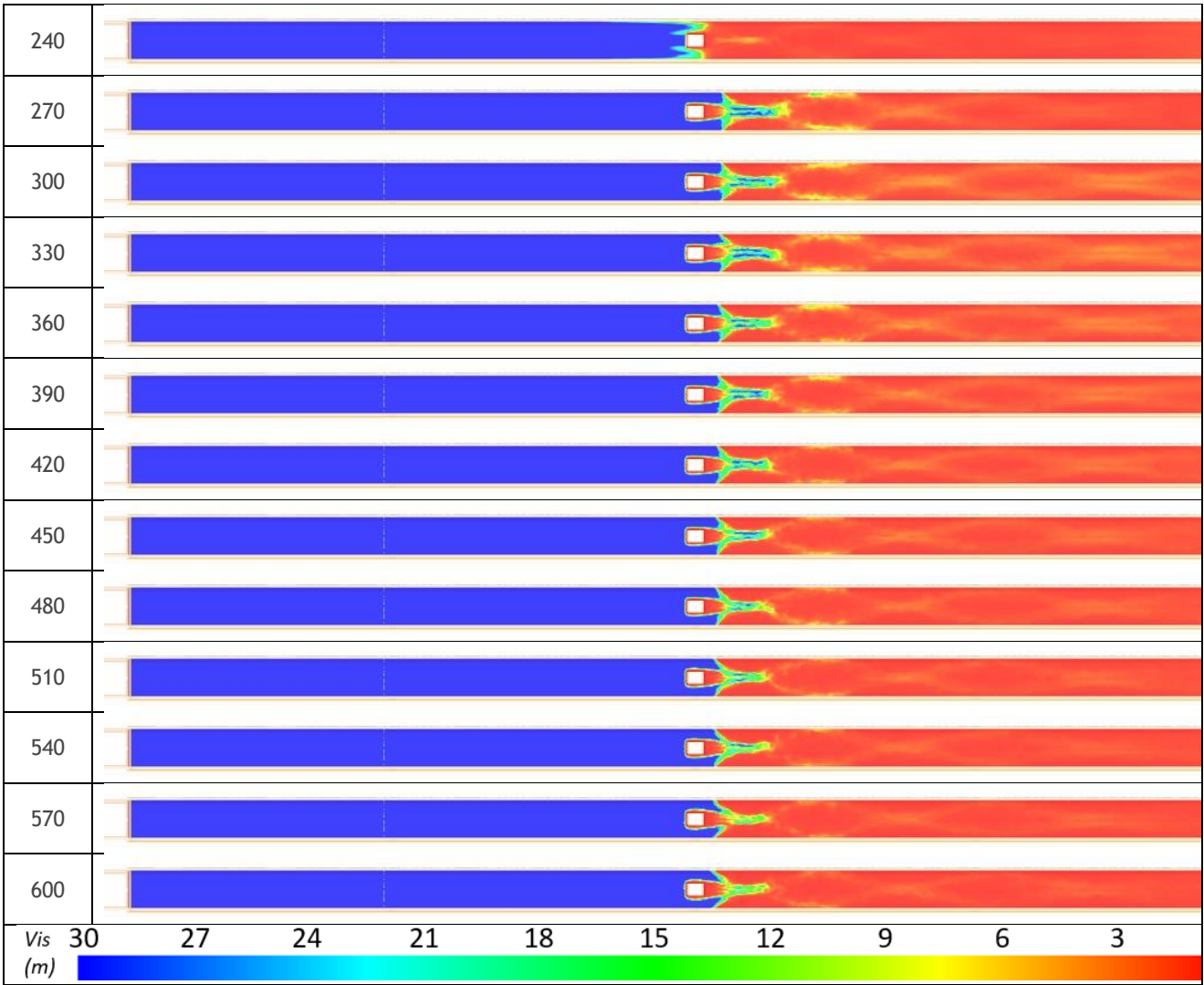
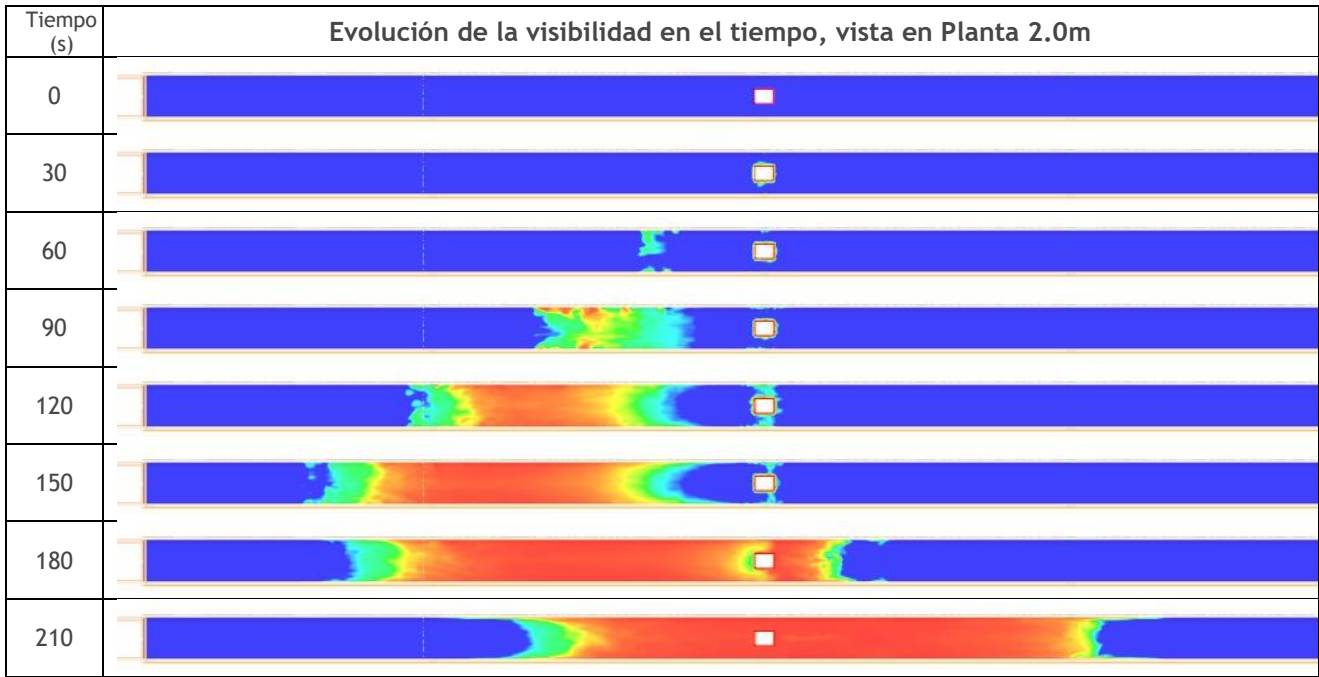


Tabla 23. Evolución de la visibilidad en el tiempo, Planta 2m. Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en las imágenes anteriores, el humo comienza a desestratificarse rápidamente al entrar en contacto con la masa de aire frío como producto del encendido de los ventiladores (más el tiro natural), iniciando a los 120 segundos, es evidente que, al considerar una potencia de incendio lo suficientemente elevada (100MW), el tiempo de actuación ante una situación de emergencia del sistema de ventilación y el tiempo de reacción de las personas que se encuentren dentro del túnel es crítico para su supervivencia.

2.9.8 Resultados de Escenario 2

La siguiente figura muestra a modo de verificación la tasa de liberación de calor real considerada durante todo el tiempo de la simulación para el Escenario 2 estudiado:

Anejo 08. Ventilación

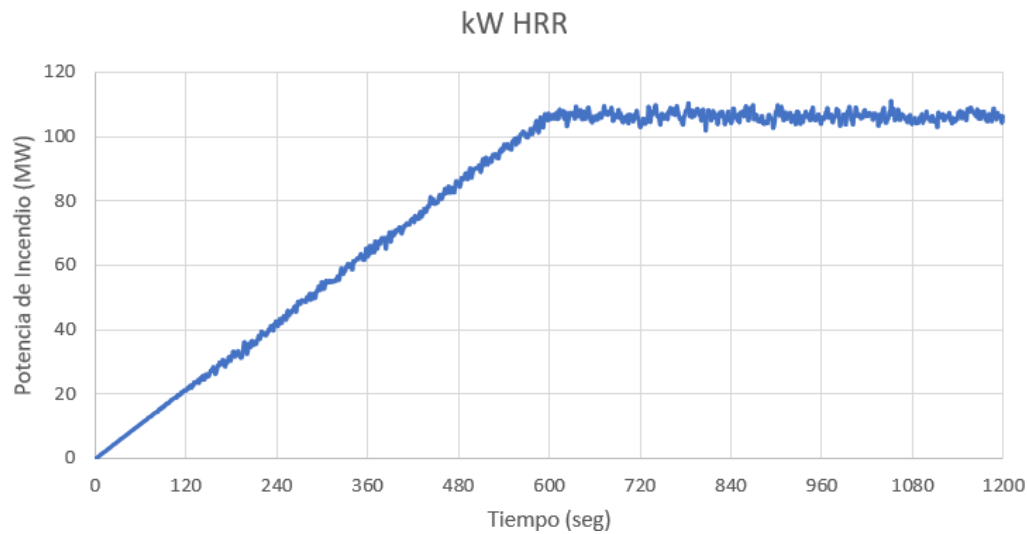


Figura 35. Tasa de liberación de calor obtenida en la simulación

Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la figura, la potencia del incendio sigue la curva de incendio E5 de la Metodología MARTBI. Las pequeñas fluctuaciones son debidas a la entrada de aire al perímetro del incendio.

2.9.8.1 Evolución de la velocidad del aire en el interior del Túnel. Escenario 2

Para este escenario se sigue la metodología descrita previamente en el escenario 1 con la diferencia que, en este caso de simulación el encendido de los ventiladores queda fijo a una velocidad dentro del túnel de -1m/s, de tal forma que el sentido no cambia, pero evitamos que esta velocidad siga aumentando al tenerla controlada en dicho valor.

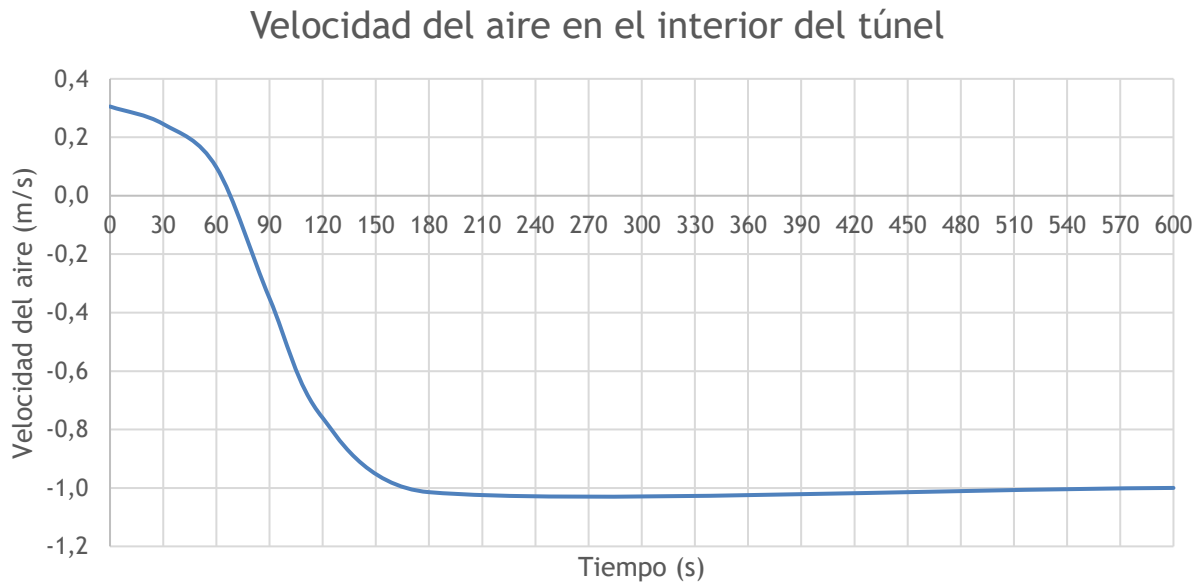


Figura 36. Velocidad del aire en el interior del túnel. Escenario 2

Fuente: Elaboración propia

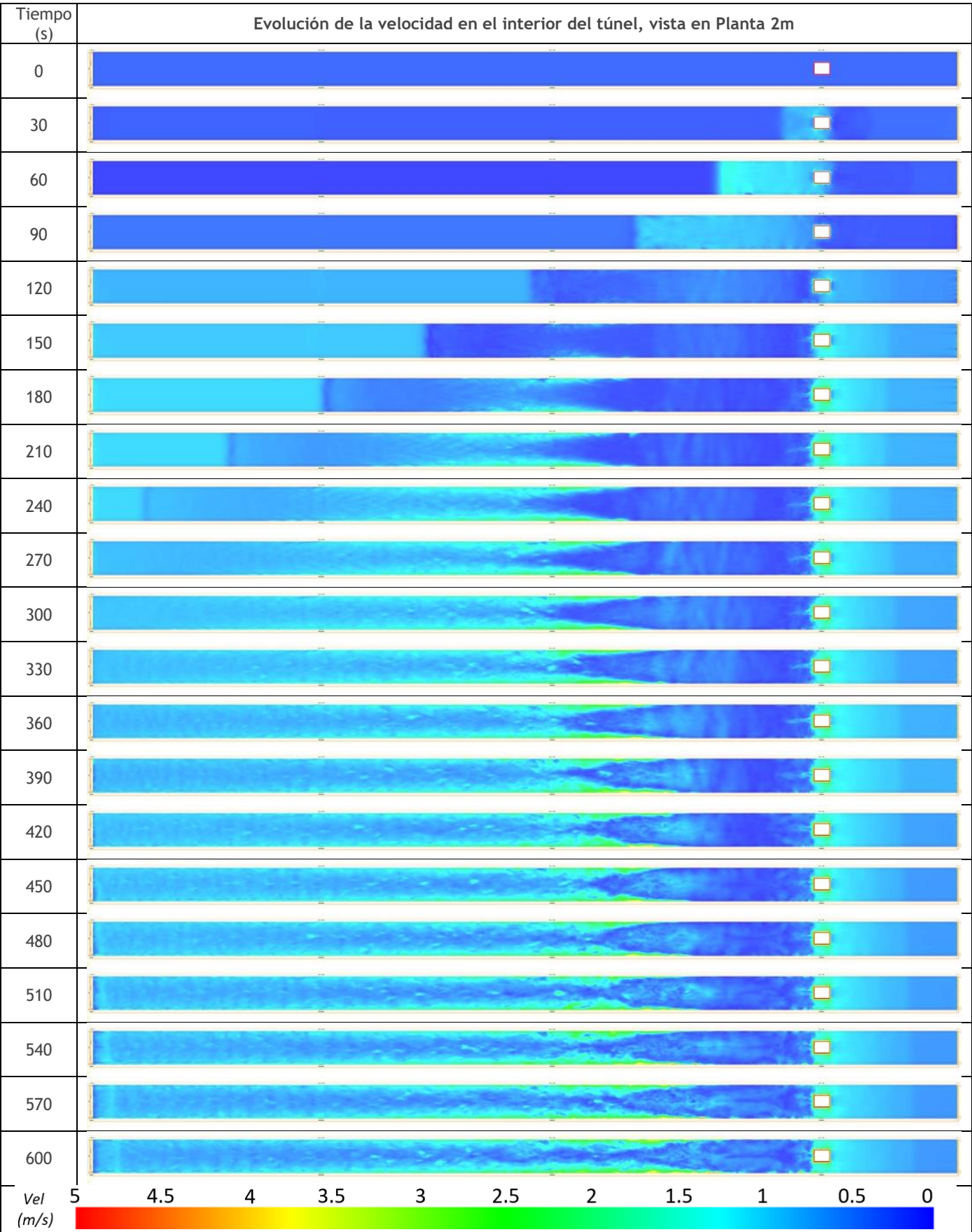


Tabla 24. Evolución de la velocidad del aire, Planta 2m. Escenario 2. - Fuente: Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

2.9.8.2 Propagación del Humo

A continuación, se presenta la evolución del humo a lo largo del tiempo desde una vista longitudinal:

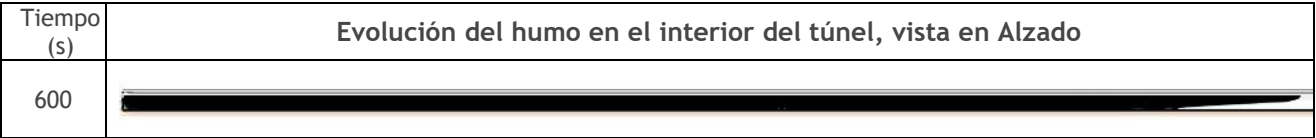
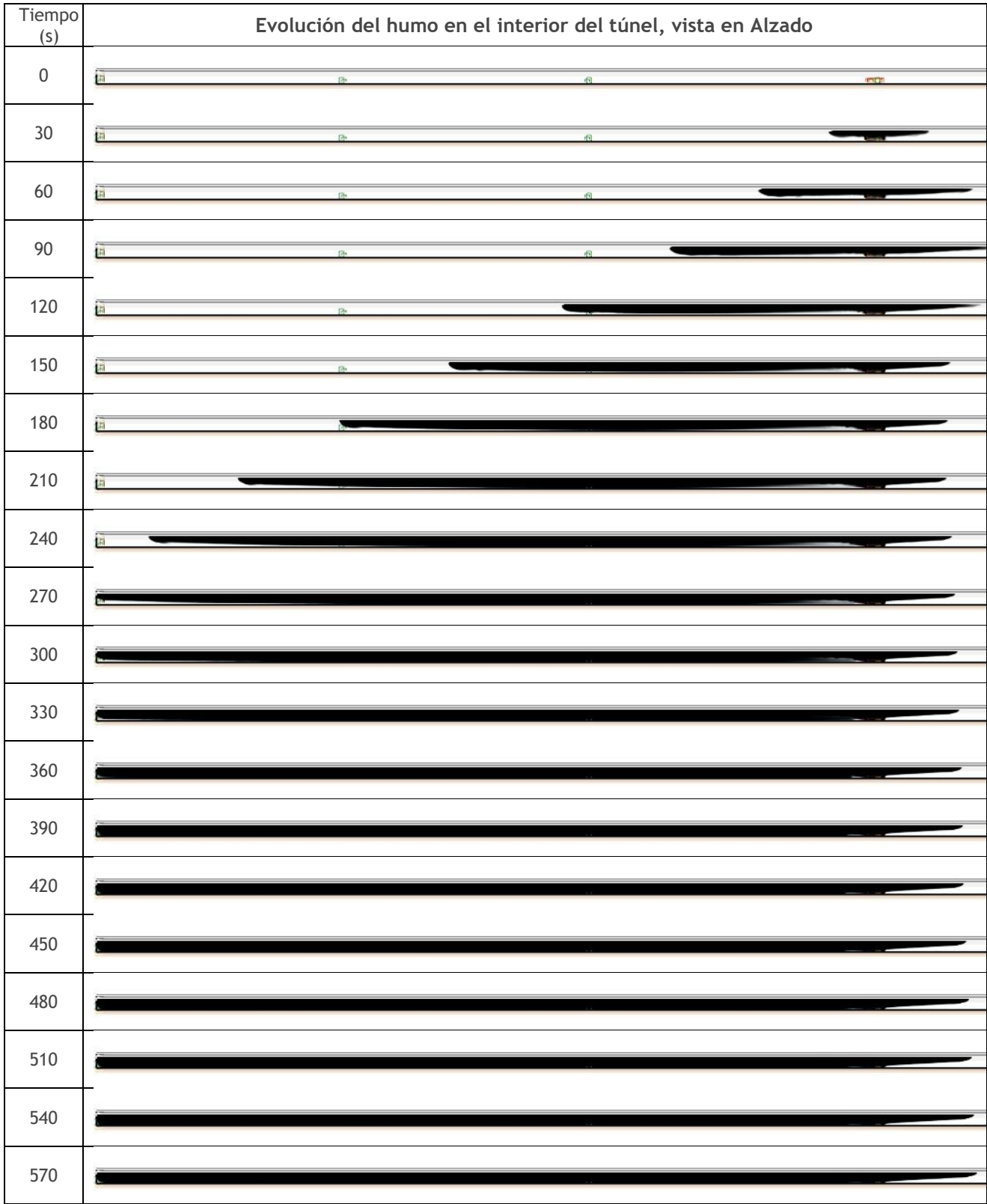


Tabla 25. Evolución del humo, Alzado. Escenario 2

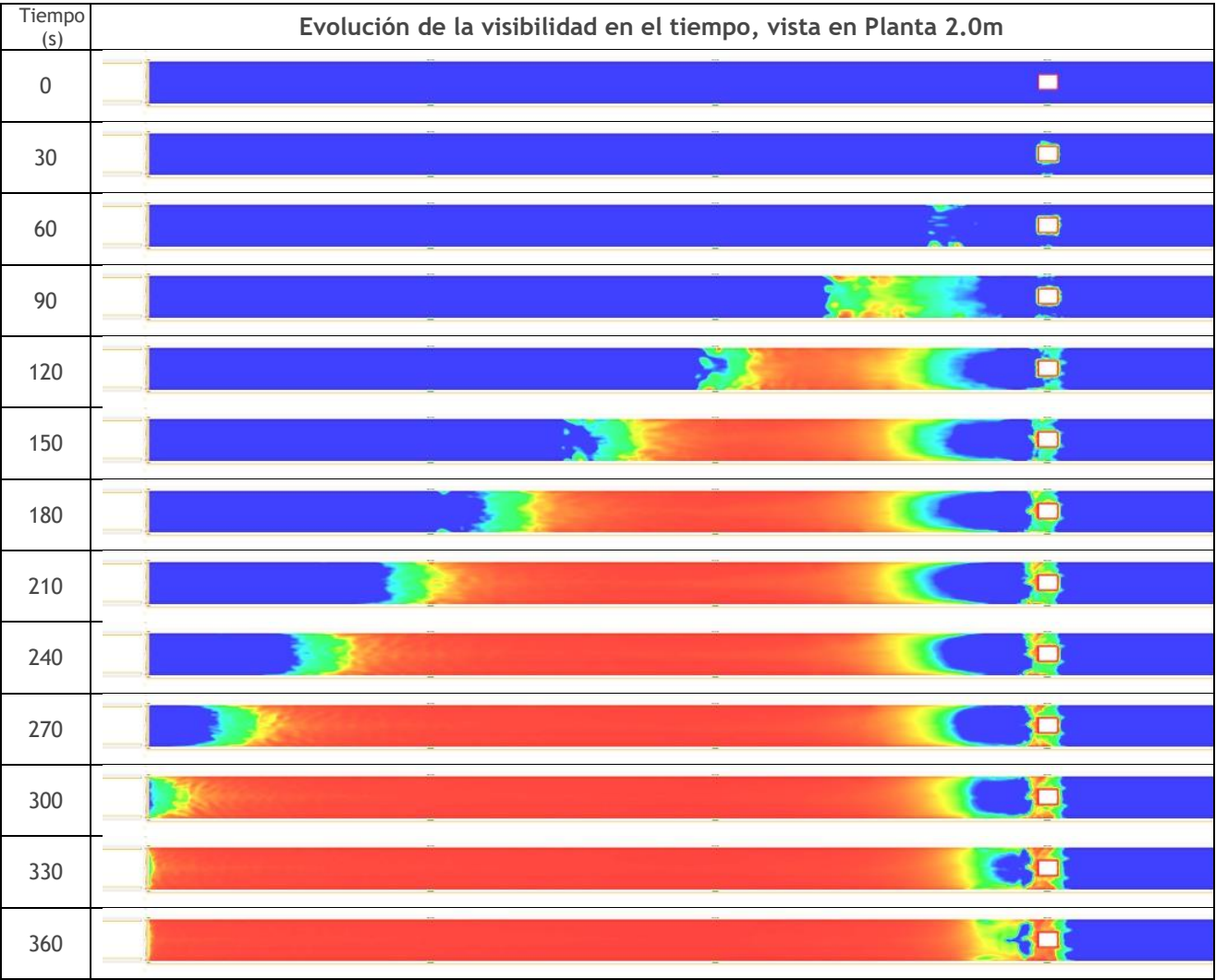
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las imágenes anteriores mediante el control del sistema de ventilación, en este escenario se busca disminuir la velocidad de avance de la nube de humos (no se intenta cambiar su dirección), esta velocidad se mantiene controlada dentro del rango de 1m/s a 1,5m/s.

Al tener un encendido de ventiladores paulatino y controlado en función de la velocidad del aire alcanzado dentro del túnel permite disminuir las turbulencias generadas, de manera que el humo se mantenga estratificado el mayor tiempo posible, aumentando así el tiempo en el que los usuarios puedan evacuar satisfactoriamente el túnel.

2.9.8.3 Visibilidad

En las siguientes imágenes se muestra la evolución de la visibilidad a la altura de las personas, considerándose esta aproximada en 2.0 metros.



Anejo 08. Ventilación



Tabla 26. Evolución de la visibilidad en el tiempo. Vista planta 2.0m. Escenario 2

Fuente: Elaboración propia

Bajo este escenario se evidencia la pérdida de visibilidad en la inmediatez del fuego hacia la salida en sentido Getxo, es necesario evaluar la concentración de los gases contaminantes durante la fase inicial de evacuación o los primeros instantes cuando la nube de humos estaría desplazándose sobre las personas a fin de comprobar y asegurar la correcta evacuación del túnel.

2.10 Solución propuesta

El resultado de los cálculos se presenta a continuación para los dos túneles estudiados.

2.10.1 Ventiladores

Se han escogido los ventiladores reversibles que mejor se adaptan al túnel y a los criterios de diseño impuestos para poder obtener el mayor rendimiento posible del conjunto de la ventilación. Los ventiladores se instalarán en filas de 4 en ambas bocas y tendrán una potencia de 55 kW

Todos los ventiladores escogidos que se tendrán que instalar en el túnel tendrán las siguientes características:

- Diámetro interior: 1.400 mm
- Diámetro exterior: 1.600 mm
- Longitud total: 3.450 mm
- Peso máximo: 1475 kg
- Reversibilidad: Sí
- Caudal de aire: 49,7 m³/s
- Velocidad de chorro: 32,3 m/s
- Empuje teórico: 1.926 N
- Empuje nominal: 1.840 N
- Potencia absorbida: 50,2 kW
- Potencia instalada: 55 kW
- Resistencia a temperatura: 400°C durante 2 horas.

2.10.2 Elementos auxiliares

Además de los ventiladores, el sistema de ventilación del túnel contará con los siguientes elementos

- Anclaje: 4 anclajes en los extremos y uno en el centro de cada ventilador (pernos de sujeción)
- Sensor de vibración: medirá el grado de vibración del ventilador para detectar pérdida de efectividad o deterioro de los anclajes del ventilador.
- Sondeas de temperatura: integradas en el ventilador y permitirán realizar esta medición en dos elementos distintos: elementos de rodadura (rodamientos) y bobinado del motor

2.10.3 Localización de los ventiladores

La disposición de los ventiladores en los túneles será la siguiente:

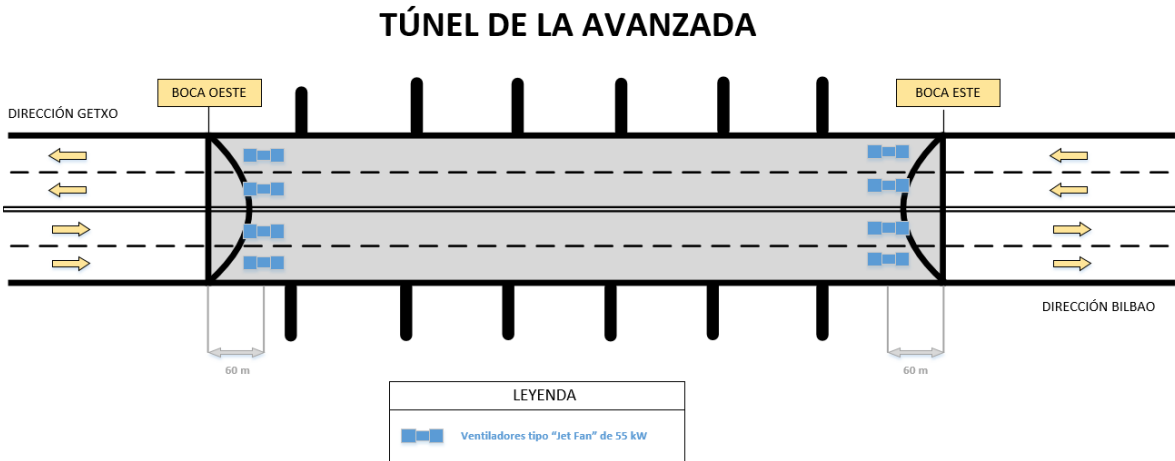


Figura 37: Posición de los ventiladores en el túnel de La Avanzada.

Fuente: Elaboración propia

2.11 Control de la ventilación

El objetivo fundamental de la incorporación de un sistema informático de control de la ventilación es lograr la reducción de los tiempos de actuación y aportar una mayor flexibilidad a las pautas de actuación, tanto manuales como automáticas. Además, mediante un algoritmo de control, se pretende controlar el número de horas de funcionamiento de los ventiladores para maximizar su ciclo de vida.

2.11.1 Condiciones normales:

En situación normal, el control de la ventilación dependerá fundamentalmente de los detectores repartidos por el túnel (concentraciones de CO, NO, visibilidad y velocidad en el interior del túnel) que mediante un algoritmo de control encenderá progresivamente los ventiladores de forma automática para evitar que estos valores suban y se acerquen a los valores máximos recomendados. En todo momento el sistema de control tratará de mantener una corriente uniforme mínima de aire (bien por efecto pistón de los vehículos o de las condiciones del entorno). En caso de que el aire no se mueva en periodos largos de tiempo (del orden de una hora) el sistema activará parte de la ventilación para mantener corrientes de aire de 0,5-1 m/s. Con el objetivo de plantear las directrices básicas de este control pero sin realizar un análisis exhaustivo que sólo puede desarrollarse mediante pruebas y ensayos reales de caracterización del sistema, se establecen las ideas generales que deben seguirse en la elaboración de los algoritmos de control del sistema y que deberán ser incluidas en el sistema informático de control integral de los túneles.

2.11.2 Condiciones de un incendio:

En situación de emergencia por culpa de un incendio, el control de la ventilación será automático con confirmación del operador debido a la complejidad de la situación, ya que cada caso requiere una actuación específica. La detección de un incendio dependerá de muchos factores (detectores de incendio, detectores ambientales, detección mediante DAI, aviso por los puestos de emergencia, etc.). El operador será el responsable de gestionar las diferentes pre-alarmas y alarmas de los diferentes sistemas. Con el objetivo de plantear las directrices básicas de este control, pero sin realizar un análisis exhaustivo que sólo puede desarrollarse mediante pruebas y ensayos reales de caracterización del sistema, se establecen a continuación las ideas generales que deben seguirse en la elaboración de los algoritmos de control. Estas deberán ser incluidas en el sistema informático de control integral de los túneles.

En todo momento, el algoritmo deberá presentar al operario las diferentes actuaciones posibles y previstas, así como aconsejarle la acción que mejor convenga en cada momento.

El protocolo de ventilación tendrá que tener en cuenta las siguientes condiciones:

- El sentido de los ventiladores vendrá determinado por la localización del incendio del túnel, ya que el tráfico dentro del túnel es bidireccional. La corriente de aire debería mantenerse en el sentido natural de tiro o hacia la boca más cercana.
- La velocidad longitudinal de aire en el túnel durante la evacuación tendrá que ser baja y lo más próxima posible a la velocidad recomendada (1-1,5 m/s).
- Evitar los arranques o paros repetidos de los ventiladores durante el plan.
- Dar prioridad de arranque a los ventiladores situados lo más alejados posibles del incendio.
- Este control se debe mantener durante todo el proceso de autoevacuación y siempre hasta la llegada de los bomberos. Los bomberos podrán solicitar modificar este sistema de control para mejorar las condiciones de su intervención.
- El protocolo definitivo tiene que ser establecido por ensayos de humos calientes y pruebas con el instalador de los ventiladores y autoridades competentes.

3 CONTROL DE LA CALIDAD AMBIENTAL

Para el control de la calidad ambiental y el régimen de trabajo de los ventiladores, se proyecta disponer de un sistema de detección y control en tiempo real. En particular, datos de los contaminantes durante el modo de servicio y de la velocidad del aire tanto en funcionamiento normal como, muy especialmente, en caso de incendio.

Por lo tanto, se van a colocar a lo largo del túnel de La Avanzada varios equipos de medición ambiental que proporcionen al sistema de gestión información sobre los siguientes parámetros:

- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Visibilidad, mediante la medición de la opacidad
- Velocidad y dirección del aire

3.1 Detector de CO

Para la detección del gas contaminante de monóxido de carbono (CO), se instalarán varios sensores electroquímicos a lo largo del túnel.

3.1.1 Arquitectura del sistema

Es un sistema basado en la medición de la concentración de esos gases mediante la comparación interna del aire del túnel que lo examina en una cámara analizadora que da como salida una señal eléctrica 4-20mA proporcional a la concentración de CO del gas presente. Dentro de la cámara que tiene dos electrodos se produce reacciones electroquímicas. La concentración de los gases influye sobre la corriente eléctrica entre los electrodos variando la corriente. Mediante la red de control del túnel, el valor de la corriente se transmite al Centro de Control activando los protocolos de ventilación o los planes de actuación según los criterios de funcionamiento. El rango estándar para el gas será de 0 a 300 ppm.

3.1.2 Ubicación de los detectores

Se colocarán los detectores cada 150-200 metros aproximadamente y a una distancia aproximada de 1,50 m del suelo. Teniendo en cuenta la longitud del túnel de La Avanzada, se dispondrán 4 detectores de CO de tipo electroquímico, 2 en cada hastial, ubicándose coincidiendo con la ubicación de los nichos SOS en los siguientes puntos:

DETECTOR CO	Hastial	Galería cercana	Distancia desde boca de Bilbao
CO-01	Hastial Getxo	G2G	200 m
CO-02	Hastial Getxo	G3G	350 m
CO-03	Hastial Bilbao	G4B	500 m
CO-04	Hastial Bilbao	G5B	650 m

Tabla 27: Ubicación de los detectores de CO en el túnel de La Avanzada

Fuente: Elaboración propia

3.2 Detector de NO₂

Para la detección del gas contaminante de dióxido de nitrógeno (NO₂), se instalarán varios sensores electroquímicos a lo largo del túnel.

Anejo 08. Ventilación

3.2.1 Arquitectura del sistema

Es un sistema basado en la medición de la concentración de esos gases mediante la comparación interna del aire del túnel que lo examina en una cámara analizadora que da como salida una señal eléctrica 4-20mA proporcional a la concentración de NO₂ del gas presente. Dentro de la cámara que tiene dos electrodos se produce reacciones electroquímicas. La concentración de los gases influye sobre la corriente eléctrica entre los electrodos variando la corriente. Mediante la red de control del túnel, el valor de la corriente se transmite al Centro de Control activando los protocolos de ventilación o los planes de actuación según los criterios de funcionamiento. El rango estándar para el gas será de 0 a 5 ppm.

3.2.2 Ubicación de los detectores

Se colocarán los detectores cada 150-200 metros aproximadamente y a una distancia aproximada de 1,00-1,50 m del suelo.

DETECTOR NO ₂	Hastial	Galería cercana	Distancia desde boca de Bilbao
NO-01	Hastial Getxo	G2G	200 m
NO-02	Hastial Bilbao	G3B	350 m
NO-03	Hastial Getxo	G4G	500 m
NO-04	Hastial Bilbao	G5B	650 m

Tabla 28: Ubicación de los detectores de NO₂ en el túnel de La Avanzada

Fuente: Elaboración propia

3.3 Opacímetro

Para la medición de la opacidad, se instalarán varios dispositivos óptico-electrónicos a lo largo del túnel de La Avanzada.

3.3.1 Arquitectura del sistema

Es el equipo que permitirá disponer de una medida permanente del nivel de visibilidad en el interior del túnel.

El sensor funciona emitiendo un haz luminoso entre un transmisor y un receptor. El transmisor emite un potente rayo óptico infrarrojo hacia el receptor que convierte la radiación luminosa recibida en una señal eléctrica analógica proporcional a la intensidad de la radiación de 4-20 mA.

Estos equipos presentan una serie de ventajas frente a los sistemas extractivos. Son las siguientes:

- No necesitan cofre para su ubicación, pues se montan directamente en las paredes del túnel con una mínima instalación de cableado.
- Los equipos efectúan la medición directa (no extractiva) controlando los parámetros reales.
- Al estar basados en principios opto-electrónicos tiene un fácil ajuste y un número menor de averías (sin acondicionamientos de la muestra, sin reactivos, etc.).
- El equipo se autochequea activándose alarmas en caso de una excesiva medición de polución, esto implica una seguridad de buen funcionamiento.
- El mantenimiento de los equipos puede realizarse semestralmente.

Los opacímetros serán de lectura directa.

3.3.2 Ubicación de los detectores

Se prevé la instalación de dos opacímetros, uno en cada hastial, a una distancia no mayor a 400 metros, en los siguientes puntos:

OPACÍMETRO	Hastial	Galería cercana	Distancia desde boca de Bilbao
OP-01	Hastial Getxo	G2G	200 m
OP-02	Hastial Bilbao	G4G	500 m

Tabla 29: Ubicación de los opacímetros en el túnel de La Avanzada

Fuente: Elaboración propia

3.4 Anemómetro

Para la medición de la velocidad y la dirección del aire, se instalarán tres anemómetros de ultrasonidos a lo largo del túnel.

3.4.1 Arquitectura del sistema

La medida de la velocidad del aire y dirección del aire es de gran importancia a la hora de controlar la nube de humos en caso de incendio y permite realizar una utilización más eficiente del sistema de ventilación en situación normal de funcionamiento.

Los anemómetros serán de haz ultrasónico que costa de hasta 4 transductores que se instalan en un mismo dispositivo autoportante. Los transductores transmiten y reciben señales ultrasónicas alternamente. El tiempo de recorrido varía en función de la velocidad y dirección del aire que pasa por el túnel. De tal manera que se puede detectar la velocidad de manera muy precisa y con mucha estabilidad de lectura, ya que se realiza un promedio entre la velocidad medida instantáneamente y la velocidad media de los últimos segundos. Se obtendrá a la salida una señal eléctrica de 4-20 mA proporcional a la velocidad del aire. El rango de medida será, como mínimo, de entre -20 m/s y 20 m/s.

3.4.2 Ubicación de los detectores

Se colocarán los anemómetros aproximadamente cada 200-300 metros en la clave del túnel, lo más cerca posible del centro del tubo, y no podrán estar ubicados a menos de 50 metros de ventiladores o de las bocas del túnel.

ANEMÓMETRO INTERIOR	Hastial	Galería cercana	Distancia desde boca de Bilbao
AN-01	Hastial Getxo	G2G	200 m
AN-02	Hastial Bilbao	G4G	500 m

Tabla 30: Ubicación de los anemómetros interiores en el túnel de La Avanzada

Fuente: Elaboración propia

4 VENTILACIÓN DE SOBREPRESIÓN

4.1 Introducción

De acuerdo con lo establecido por el Código Técnico de la Edificación (CTE), las vías de evacuación podrán protegerse mediante uno de los siguientes sistemas:

- Ventilación natural mediante ventanas practicables o huecos abiertos al exterior
- Ventilación mediante conductos independientes de entrada y de salida de aire
- Sistema de presión diferencial

Para asegurar la presurización de las galerías de emergencia se emplea el sistema de prevestíbulo o vestíbulo independiente con doble puerta y tabique.

4.2 Alcance del sistema

El sistema de ventilación para las salidas de emergencia tiene como objeto mantenerlas libres de humo en caso de incendio, de modo que los usuarios puedan evacuar el túnel a través de un espacio seguro. Por lo tanto, se compone de un conjunto de medidas preventivas que elevan la seguridad del túnel frente a los efectos nefasto que podrían ocasionar un incendio, como puede por ejemplo la inhalación de humos por parte de las personas que evacuan.

Por lo tanto, el sistema de presurización de las galerías de emergencia tiene varios propósitos:

- Impedir el avance de humo desde el túnel hacia la galería de emergencia, vestíbulo intermedio, escaleras u otras áreas similares.
- Mantener un ambiente sostenible en las vías de evacuación durante el tiempo necesario para la evacuación completa.
- Facilitar las operaciones de rescate y de extinción de incendio, mejorando la visibilidad en las galerías de evacuación para los bomberos y equipos de rescate.
- Proteger la estructura y reducir los daños que pueden ser muy perjudicial para los habitantes del municipio donde se encuentra el túnel.

4.3 Problema asociado la entrada del humo

El sistema de presurización de las galerías de emergencia permitirá evitar la entrada de humo o gases tóxicos en la vía de evacuación. Se tiene que evitar por todos los medios la entrada de humo en las galerías de evacuación de tal manera que se pueda facilitar la evacuación, mantener un ambiente sostenible, facilitar las operaciones de rescate y proteger la estructura.

Tres de los grandes problemas asociados con la entrada de humo se detallan a continuación:

4.3.1 Inhalación de gases tóxicos

El humo de un incendio puede contener muchos productos químicos diferentes, incluidos aldehídos, gases ácidos, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), benceno, tolueno, estireno, metales y dioxinas. El tipo y la cantidad de partículas y sustancias químicas en el humo varían según lo que se esté quemando, así como la cantidad de oxígeno disponible y la temperatura de combustión.

Debe evitarse la exposición a altos niveles de humo. La inhalación de humo durante un período breve puede provocar efectos inmediatos y agudos. El humo irrita rápidamente los ojos, la nariz y la garganta. Los estudios han demostrado que las personas expuestas al humo denso pronto tienen dificultad para respirar. Dos de los principales agentes presentes en el humo que pueden causar efectos sobre la salud son el gas monóxido de carbono y las partículas muy pequeñas (partículas finas o PM2.5).

La inhalación de monóxido de carbono disminuye el suministro de oxígeno del cuerpo. Esto puede causar dolores de cabeza, reducir el estado de alerta y agravar una afección cardíaca conocida como angina. Las partículas finas pueden viajar profundamente en el tracto respiratorio y llegar a los pulmones. La inhalación de partículas finas puede causar una variedad de efectos sobre la salud, como irritación respiratoria y

dificultad para respirar, y puede empeorar afecciones médicas como el asma y las enfermedades cardíacas. Durante un mayor esfuerzo físico, los efectos cardiovasculares pueden empeorar por la exposición al monóxido de carbono y a las partículas finas. Todas estas causas afectan las capacidades de las personas para poder salir de la zona afectada por sus propios medios.

Evitar situaciones de humo es la mejor manera de evitar la exposición que puede resultar letales en muchos casos por la concentración elevada de gases tóxicos y la presencia de partículas muy finas en proporciones demasiado grandes.

4.3.2 Altas temperaturas

La exposición al calor puede provocar la incapacidad o la muerte de las víctimas de incendios de tres formas:

- Hipertermia o golpe de calor
- Quemaduras en la superficie del cuerpo
- Quemaduras del aparato respiratorio

La hipertermia ocurre durante la exposición prolongada (aproximadamente 15 minutos o más) a ambientes calientes, aunque demasiado bajos como para causar quemaduras. En estas condiciones, cuando la temperatura del aire es inferior a aproximadamente 120 °C (aire seco) o 80 °C (aire saturado), el efecto principal es un aumento gradual de la temperatura de todo el cuerpo. Por encima de esta temperatura, la aparición de un dolor muy agudo seguido de la producción de quemaduras corporales es un problema mucho más grave. Las correspondientes quemaduras en el aparato respiratorio por inhalación de aire que contenga menos de 10% del volumen de vapor de agua ocurren cuando ya han aparecido quemaduras en la piel o la cara. Por lo tanto, los límites de resistencia con respecto a las quemaduras de la piel son normalmente más bajos que para las quemaduras del aparato respiratorio. Sin embargo, pueden ocurrir quemaduras en el aparato respiratorio por inhalación de aire por encima de 60 °C que está saturado con vapor de agua.

Evitar situaciones de humo es la mejor manera de evitar la exposición a altas temperaturas que pueden resultar letales en muchos casos por las temperaturas elevadas y por culpa de la gran sensibilidad de nuestro cuerpo a cambio importante de temperatura.

4.3.3 Baja visibilidad

Por norma general y, salvo excepciones particulares, el parámetro de sostenibilidad más crítico suele ser la visibilidad, ya que es el criterio de sostenibilidad que se incumple primero. La visibilidad de los caminos de evacuación con el fin de garantizar la autoevacuación de los usuarios debe ser de 10-30 metros dependiendo de las señales de evacuación que se usen (señales retroiluminadas o señales fotoluminiscentes).

La caída de la agudeza visual a través del humo se debe principalmente a dos factores:

- Efecto físico de las partículas del humo que interceptan los objetos
- Efecto irritante fisiológico del humo.

Si bien la temperatura y los gases tóxicos son las causas finales de muerte en los incendios, muchos usuarios quedan atrapados en una etapa temprana del incendio por un humo relativamente delgado que hace que no puedan ubicar una salida segura. La presencia de humo en un recinto ocupado oscurece la iluminación y otras fuentes de luz, lo que a menudo hace que los ocupantes que se escapan se encuentren en condiciones de iluminación tenue. Además, el humo afecta directamente la capacidad del sujeto para ver a través de él los objetos circundantes y la señalización.

Mantener una vía de evacuación libre de humos a la altura de los ocupantes es prioritario para evitar los dos problemas más graves que derivan de una disminución de la visibilidad.

4.4 Descripción de la ventilación de sobrepresión

4.4.1 Descripción del sistema

Durante una evacuación, los usuarios del túnel afectado accederían a la galería de evacuación a través de una puerta de doble hoja que conecta el túnel con un vestíbulo de la galería. En este caso, tanto al detectar una alarma de incendio, como al abrir la puerta de acceso a la galería, el sistema de ventilación se encenderá activando el ventilador helicoidal y aspirando el aire del exterior que se impulsará dentro del vestíbulo de la galería hacia el túnel afectado. Por lo tanto, el objetivo de la ventilación es aumentar la presión en el vestíbulo de la galería para evitar la entrada del humo del túnel afectado a la galería de evacuación y permitir que los usuarios evacúen a través de la misma sin humo.

4.4.2 Características y descripción del sistema

El sistema de presurización de galería de emergencia es un sistema de ventilación mecánica. Por lo tanto, es necesario instalar una serie de ventiladores que succionen aire hacia el hueco que se denomina zona segura. El objetivo principal, como se ha comentado antes, es evitar la infiltración de humo en caso de incendio. En modo normal, la ventilación se garantiza por la infiltración debida a las aberturas de las compuertas cortafuego y ventiladores.

4.4.2.1 Ventilador

Los ventiladores de impulsión de aire para la presurización pueden ser de los siguientes tipos:

- Centrífugo: Los ventiladores generan un flujo de aire en dirección radial hacia el impulsor
- Axial. Los ventiladores proporcionan flujos de aire paralelos al impulsor.

Se recomienda el uso de ventilador axial de tipo helicoidal o mural por las siguientes razones:

- Tienen una curva de presión relativamente plana con respecto a flujos de aire variables, muy importante con la apertura y cierre frecuente de las puertas que generan cambios de flujo de aire importante sin grandes fluctuaciones de presión.
- Suelen ser más baratos y tienen menores costes de montaje y mantenimiento.

El ventilador se encenderá de manera remota por el sistema de control en caso de detectar un incendio en el túnel. En el resto de los casos, tendrá que mantener una ligera sobrepresión respecto al túnel para evitar entradas de humos procedentes del incendio.

Además, el ventilador deberá renovar al menos 1 vez al día el aire dentro de las galerías de evacuación para evitar acumulaciones de gas y condensaciones de humedad, y contribuir a que la temperatura máxima de la galería sea compatible con los servicios que contenga.

En caso de que lo requiera el gestor del túnel, el ventilador también podrá activarse al abrir la puerta entre el túnel y el vestíbulo.

4.4.2.2 Conducto

Para llevar el aire desde el ventilador hasta el punto de descarga, se puede utilizar unos conductos de suministro de aire, similares a los usados para los conductos convencionales de ventilación de HVAC, o a través de un pequeño pozo situado entre el revestimiento de la galería y el terreno.

Para facilitar el sistema de distribución de aire y evitar incrementar de manera desproporcionada la obra civil y estructura de las galerías de emergencia, se recomienda utilizar conductos de acero galvanizado convencionales desde el ventilador hasta el punto de descarga en el vestíbulo.

4.4.2.3 Rejilla de aire

La rejilla de admisión es una rejilla de simple horizontal para la admisión de aire, asegurando que el flujo del aire circule desde la superficie hacia la galería de evacuación para suministrar aire a la galería. Por lo tanto, se instalarán las rejillas entre el exterior de la galería y la entrada del sistema. Debido a la peculiaridad de las galerías de emergencia del túnel donde la salida se realizará a través de una trampilla por debajo del nivel de la calle, la rejilla podrá ser un tramex transitable o no transitable dispuesto al ras del suelo.

La rejilla de difusión es una rejilla de simple deflexión horizontal para la impulsión de aire con aletas horizontales orientables individualmente. Las rejillas serán ligeramente inclinadas para evitar la dirección directa de aire a las personas. Se instalarán las rejillas en la zona de descarga de aire en la zona presurizada.

4.4.2.4 Compuerta cortafuego

Una compuerta cortafuego encima de la puerta de acceso a la galería desde el túnel para mantener la compartimentación de la galería asegurando una resistencia al fuego (EI-120). La pared de conexión entre galería y túnel deberá también tener una resistencia al fuego mínima EI-120. Cada compuerta cortafuego está dotada de un interruptor térmico que regule el cierre automático de sus lamas. El interruptor se accionará mediante el uso de un actuador electrónico.

Además, el ventilador tendrá una compuerta cortafuego motorizada que se abrirá una vez que se active el ventilador. En caso contrario, se mantendrá cerrada.

4.4.2.5 Compuerta de sobrepresión

Una compuerta de sobrepresión encima de la puerta de acceso a la galería desde el túnel para evitar una presión más alta en comparación con el túnel afectado mediante el movimiento de sus lamas, sin exceder un nivel determinado que podría dificultar la apertura de la puerta de evacuación (diferencia de presión entre la galería y el túnel inferior a 50 Pa). Se regularán manualmente las lamas para asegurar que la diferencia de presión entre la galería y el túnel sea mayor de 50 Pa pero no supere los 100 Pa.

La compuerta sirve como alivio para las presiones excesivas en el vestíbulo para reducir las fuerzas de apertura de la puerta. Se tara la compuerta de sobrepresión para empezar a abrir a 60 Pa y abrir por completo a 100 Pa.

Control de presión diferencial

Un sistema de control de presión diferencial, el cual se compone de una sonda de presión diferencial que mide la diferencia de presión entre la vía de evacuación presurizada y la zona no presurizada, cuya lectura se remite a un variador de frecuencia que hace girar el ventilador de impulsión de aire a la velocidad necesaria para mantener el nivel de presión mínima deseada de 50 Pa, con lo que se controla el citado nivel de presión en la situación de puertas de la vía de evacuación cerradas.

En caso de apertura de una puerta de la vía de evacuación, el nivel de presión en la galería disminuye drásticamente, con lo que el sistema de regulación de velocidad de giro del ventilador pasa a controlar el mismo en su máximo régimen y por tanto aportando el caudal máximo de diseño de la instalación.

El sistema de ventilación se compone de varios elementos:

Anejo 08. Ventilación

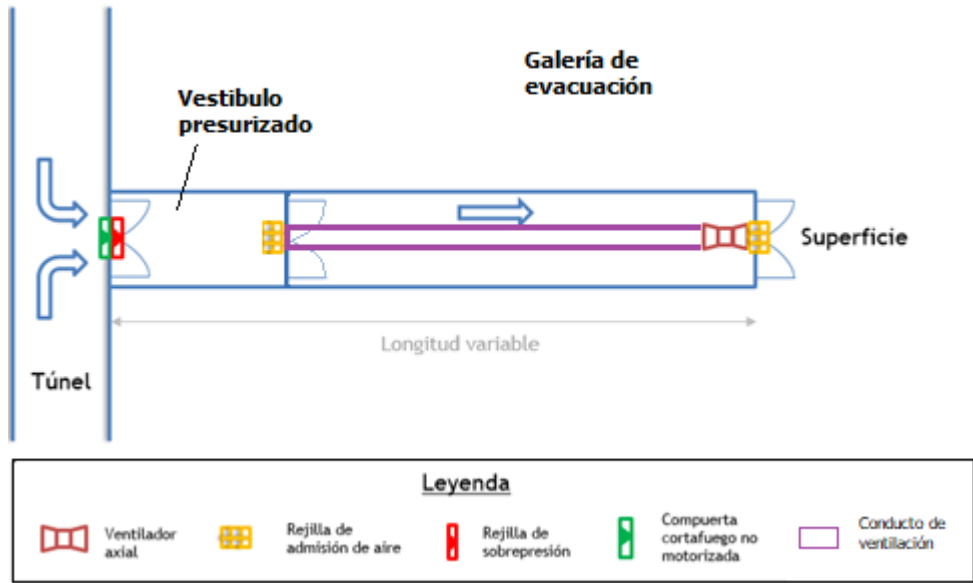


Figura 38: Esquema de la ventilación en la galería de evacuación.

Fuente. Elaboración propia

4.4.3 Clasificación del sistema

Según la normativa “UNE-EN 12101-6:2006 Sistema para el control e humo y de calor. Parte 6: Especificaciones para los sistemas de diferencial de presión. Equipos.”, la presión dentro del recinto debe ser de 50 Pa (±10 %). Además, el sistema de ventilación tiene que ser capaz de proporcionar una velocidad mínima de aire por la puerta abierta de 0,75 m/s (clase E). Sin embargo, en caso de que los bomberos utilicen esta galería para acceder al túnel, la velocidad mínima de aire por una hoja abierta de la puerta será 2 m/s (clase F). La salida a la superficie de la galería desemboca en la avenida que atraviesa el municipio, por lo que los bomberos podrán acceder fácilmente con sus equipos a esa zona. Por lo tanto, se ha considerado que los bomberos puedan utilizar la galería para entrar en el interior del túnel. De acuerdo con el tipo de actuación se ha considerado que se aproxima a un sistema de clase F.

4.4.4 Criterio de diferencia de presión

El valor mínimo de presión diferencial a mantener entre el vestíbulo y el túnel será de 50 Pa, tal como lo recoge la UNE-EN 12101-6.

4.4.5 Criterio de flujo de aire

El caudal de aire a aportar debe ser suficiente para mantener un flujo de aire de 2,00 m/s a través de una hoja abierta de la doble puerta entre el vestíbulo y el túnel

4.5 Cálculos de ventilación de sobrepresión

A continuación, se muestran los cálculos realizados para obtener el punto de trabajo del ventilador de las galerías de evacuación en función de dos situaciones distintas: cuando se tiene que renovar el aire de la galería (con la puerta cerrada) y cuando se procede a una evacuación por la galería (con la puerta abierta).

CLASE F					
Dimensiones	Puerta		Prestaciones	Caudal con puerta abierta	
	Alto puerta	2.1 m		Velocidad 1 hoja	2 m/s
	Ancho puerta	1.8 m		Caudal por 1 hoja	3.78 m³/s
	Área doble hoja	3.78 m²		Caudal necesario	13.608.0 m³/h
	Vestíbulo			Caudal con puerta cerrada	
	Sección	14.00 m²		Renovación aire	6 veces/h
	Longitud	3.0 m		Sobrepresión	50 Pa
	Volumen	42.0 m³		Caudal mínimo	252.0 m³/h

Tabla 31: Características de la ventilación de la galería

Fuente. Elaboración propia

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA DE LA VENTILACIÓN DE SOBREPRESIÓN CON LA PUERTA ABIERTA										
Orden	Sección	Área entrada (m²)	Área salida (m²)	Longitud (m)	Diámetro hidráulico (m)	Flujo de aire Qven (m³/s)	Velocidad v(m/s)	Presión P (Pa)	Coefficiente K	Caida presión ΔPd (Pa)
1	Entrada de aire	1.00	-	-	-	3.78	3.78	8.57	0.50	4.29
2	Rejilla de entrada	1.00	-	-	-	3.78	3.78	8.57	0.32	2.74
3	Tobera convergente	1.00	0.322	-	-	3.78	3.78	8.57	0.11	0.92
4	Ventilador	Ø0.64m								
5	Tobera convergente	0.63	0.322	-	-	3.78	6.05	21.95	0.55	12.07
6	4 Codos 45°	0.63	0.60	-	-	3.78	6.05	21.95	0.69	60.57
7	Fricción en conducto	0.63	3.20	0.781	10	3.78	6.05	5.62	-	5.62
8	Rejilla de salida	0.63	-	-	-	3.78	6.05	21.95	0.32	7.02
9	Salida de aire	0.63	-	-	-	3.78	6.05	21.95	1.00	21.95
Presión total										115.18
Presión + margen (10%)										126.70

Tabla 32: Cálculos de pérdidas de carga de la ventilación de sobrepresión con la puerta abierta

Fuente. Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA DE LA VENTILACIÓN DE SOBREPRESIÓN CON LA PUERTA CERRADA										
Orden	Sección	Área entrada (m²)	Área salida (m²)	Longitud (m)	Diámetro hidráulico (m)	Flujo de aire Q _{ven} (m³/s)	Velocidad v(m/s)	Presión P (Pa)	Coefficiente K	Caida presión ΔPd (Pa)
1	Entrada de aire	1.00	-	-	-	0.07	0.07	0.00	0.50	0.00
2	Rejilla de entrada	1.00	-	-	-	0.07	0.07	0.00	0.32	0.00
3	Tobera convergente	1.00	0.322	-	-	0.07	0.07	0.00	1.14	0.00
4	Ventilador	Ø0.64m								
5	Tobera convergente	0.63	0.322	-	-	0.07	0.11	0.01	0.55	0.00
6	4 Codos 45°	0.63	0.60	-	-	0.07	0.11	0.01	0.69	0.02
7	Fricción en conducto	0.63	3.20	0.781	10	0.07	0.11	0.00	-	0.00
8	Rejilla de salida	0.63	-	-	-	0.07	0.11	0.01	0.32	0.00
9	Salida de aire	0.63	-	-	-	0.07	0.11	0.01	1.00	0.01
10	Sobrepresión galería	-	-	-	-	-	-	-	-	50.00
									Presión total	50.04
									Presión + margen (10%)	55.05

Tabla 33: Cálculos de pérdidas de carga de la ventilación de sobrepresión con la puerta cerrada

Fuente. Elaboración propia

4.6 Resultados

Los resultados de los cálculos realizados son los siguientes:

PUNTO DE TRABAJO DEL VENTILADOR (PUERTA ABIERTA)		PUNTO DE TRABAJO DEL VENTILADOR (PUERTA CERRADA)	
Caudal	13.608 m³/h	Caudal	252 m³/h
Presión total	126,70 Pa	Presión total	55,05 Pa

Tabla 34: Punto de trabajo del ventilador en la galería

Fuente. Elaboración propia

Por lo tanto, los ventiladores tendrán las siguientes características:

- Caudal máximo: 13.608 m³/h
- Presión total: 126,70 Pa
- Diámetro interior: 640 mm
- Potencia instalada: 7,5 kW
- Rendimiento: > 70 %

5 VENTILACIÓN Y CLIMATIZACIÓN DE LOS CUARTOS TÉCNICOS

5.1 Introducción

Este apartado comprende la instalación de ventilación y climatización para las salas técnicas del túnel de manera que se garantice la salubridad y el confort en condiciones normales de explotación y la seguridad para el personal que acude a estas zonas.

Aquellas áreas, donde tenga lugar una estancia corta de trabajadores, tendrán que disponer de ventilación mediante impulsión/extracción o sólo extracción para la renovación del aire. Algunos cuartos requieren además control de la temperatura y/o la humedad. Aquellos locales cuyo aire de impulsión no puede estar contaminado, como por ejemplo las salas de comunicaciones, se tendrá que instalar filtros en las rejillas de impulsión o extracción, evitando de este modo la propagación de las partículas a las dependencias del túnel.

De acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes, así como el buen diseño de ingeniería, los centros de transformación y de baja tensión deberán mantenerse dentro de un límite de temperatura, que generalmente suele ser 40 °C. La razón es que los transformadores y resto de componentes eléctricos trabajen dentro de las condiciones ambientales adecuadas para evitar problemas de suministro de energía por saltar sus protecciones por exceso de calor.

En la sala donde estén ubicados el SAI, los variadores de motores y racks de comunicaciones, se deberá disponer de un equipo de aire acondicionado, con el fin de que se mantenga una temperatura del orden de 25 °C ya que estos equipos son muy sensibles a los cambios de temperatura.

5.2 Requisitos de la norma

De acuerdo al Decreto Foral de Seguridad de Túneles de Carretera de la Diputación Foral de Bizkaia, los cuartos técnicos tienen que contar con ventilación forzada en todas sus salas. Asimismo, el cuarto del SAI contará con un sistema de refrigeración.

Las salas telemáticas tendrán una temperatura máxima de 27°C.

Los Cuartos técnicos contarán con un sistema de monitorización de temperatura interior y exterior, con el objetivo de regularla con la ventilación de modo que en el interior se mantenga la menor de las dos.

5.3 Ventilación de salas y cuartos técnicos

5.3.1 Descripción del sistema

Todos los cuartos y salas del túnel de La Avanzada requerirán un sistema de ventilación. Los cuartos técnicos, todos exteriores, tendrán los siguientes elementos para ventilación:

- Rejilla de impulsión
- Rejilla de extracción
- Ventilador axial mural
- Sonda de temperatura

Este sistema funcionará tanto en condiciones normales como en emergencia.

Las rejillas de toma y salida de aire suponen una fuga en el caso del disparo de extinción por agente limpio, por lo que se acompañan con compuertas motorizadas en los locales con agente limpio.

5.3.2 Criterio de diseño

En el diseño y dimensionamiento de la ventilación de los cuartos técnicos, se deben de tener en cuenta los siguientes requisitos y criterios.

- Temperatura del aire exterior: 30 °C (verano)
- Humedad relativa: 50 %
- Velocidad máxima del aire: 2 m/s

Anejo 08. Ventilación

- Velocidad máxima por rejilla: 3,5 m/s
- Temperatura máxima en el local: 40 °C

5.3.3 Cálculos preliminares

Se han realizado varios análisis para determinar las necesidades de ventilación forzada en cada uno de los cuartos técnicos. Por lo tanto, se presentan los siguientes cálculos:

- Cálculo de necesidades de ventilación por disipación térmica
- Cálculo de necesidades de ventilación por tasa de renovación horaria del aire
- Cálculo de necesidades de ventilación por tasa de aire exterior por superficie
- Cálculo de necesidades de ventilación por dilución de H₂ en las salas de baterías
- Cálculo de necesidades de ventilación por extracción del gas NOVEC 1230

5.3.3.1 Cálculo de necesidades de ventilación por disipación térmica

En el caso de los cuartos con equipos que tengan una disipación térmica considerable, se realizará una ventilación forzada para impulsar el aire necesario para lograr un salto de temperatura determinado en la sala. Para ello, se va a emplear la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{q}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T}$$

Donde:

- Q : Caudal de ventilación (m³/s)
- q : Disipación térmica de los equipos (kW)
- ρ : densidad del aire (kg/m³), en función de la temperatura y de la presión ambiente.
- C_p : calor específico del aire (1 kJ/kg/K)
- ΔT : Diferencia de temperatura (exterior - interior)

5.3.3.2 Cálculo de necesidades de ventilación por tasa de renovación horaria del aire

Para ventilar o renovar el aire de un local, se puede realizar el cálculo de necesidades de ventilación dependiendo de la actividad o uso que se hace del local. En este caso, las alteraciones que sufre el aire y el calor que se expulsa según la actividad.

En función de los factores que afectan la aportación de aire, se podrá determinar el número de renovaciones por hora que requiere un local determinado y calcular el caudal de ventilación necesario:

$$Q = V \cdot N$$

Donde:

- Q : Caudal de ventilación (m³/s)
- V : Volumen que ocupa el local (m³)
- N : número de renovaciones por hora, según la norma DIN 1946 para el uso y tipo de local (renovaciones/h)

5.3.3.3 Cálculo de necesidades de ventilación por tasa de aire exterior por superficie

Otros procedimientos que pueden ser utilizados para el cálculo de los caudales mínimos necesarios de aire exterior de ventilación son los expuestos en el R.I.T.E. Al ser todas salas que no van a tener una ocupación de personas permanente, se puede utilizar el "*Método indirecto de caudal de aire por unidad de superficie*" que permite calcular las necesidades para espacios no dedicados a ocupación humana permanente en función de la superficie de la sala.

En este caso, se tiene que clasificar primero la calidad del aire interior (IDA) del local en función de la actividad que se desarrolle en su interior, sabiendo que se clasifica en 4 categorías:

- **IDA 1 (aire de calidad alta):** hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.
- **IDA 2 (aire de calidad media):** oficinas, residencias (locales comunes de hoteles y similares, residencias de ancianos y de estudiantes), salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y asimilables y piscinas.
- **IDA 3 (aire de calidad moderada):** edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes, cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte (excepto piscinas) y salas de ordenadores.
- **IDA 4 (aire de calidad baja):** Nunca se empleará, salvo casos especiales que deberán ser justificados

Por lo tanto, las salas de los cuartos técnicos de los túneles se ajustan a la categoría de IDA 3 (aire de calidad moderada), lo que corresponde a un caudal de aire exterior de 0,55 L/s·m².

En función del área de cada uno de los locales, se podrá determinar el caudal de ventilación necesario:

$$Q = F_{IDA-3} \cdot A$$

Donde:

- Q : Caudal de ventilación (m³/s)
- F_{IDA-3} : Caudal de aire exterior (L/s·m²)
- A : Superficie de la sala (m²)

5.3.3.4 Cálculo de necesidades de ventilación por dilución de H₂ en las salas de baterías

La ventilación en un cuarto técnico donde se localizan baterías debe ser suficiente para mantener la concentración de hidrógeno por debajo del límite del 1% del total del volumen de la sala durante el peor escenario posible en el que las baterías estén operando simultáneamente, según se indica en la NFPA 1 2018: 52.2.2.6.

Los lugares o salas de baterías se consideran seguros cuando, ya sea por medio de la ventilación natural o artificial, la concentración de hidrógeno se mantiene por debajo del límite de seguridad (<1%).

Se debe prestar una atención especial si dentro de la misma zona se sitúan distintas baterías.

Se debe proporcionar ventilación continua a una ratio de no menos de 5,1 L/seg/m² de superficie del suelo de la sala.

5.3.3.5 Cálculo de necesidades de ventilación por extracción del gas NOVEC 1230

El efecto de extinción del fluido Novec 1230 se basa únicamente en el enfriamiento y no, como ocurre con el CO₂ y los gases inertes, en el principio del desplazamiento del aire y la reducción de oxígeno. Si el fluido Novec 1230 entra en contacto con el fuego, elimina el calor, por lo que las reacciones de combustión dejan de producirse.

Gracias al amplio margen de seguridad que tiene para las personas, los estándares del sector no exigen que disponga de un proceso mecánico diseñado para eliminar el fluido/gas Novec 1230 del espacio protegido. Una vez dicho esto, no obstante, el objetivo de la ventilación será el de extraer el humo tras un posible incendio.

Todas las salas con este sistema de extinción deberán estar equipadas con ventiladores que sean capaces de extraer los humos.

Pese a no haber exigencias en los estándares del sector para esta ventilación, se establecen 6 renovaciones hora en la sala como criterio para dimensionar este tipo de sistemas. Lo que proporcionara una limpieza de humos en la sala en 10 minutos.

Anejo 08. Ventilación

5.3.4 Resultados

A continuación, se muestran los resultados de los diferentes cálculos realizados para el dimensionamiento de la ventilación de los cuartos técnicos. Se concluye que, al disponer de muchos equipos eléctricos que desprenden calor al estar funcionando, el dimensionamiento de la ventilación de las pequeñas salas de los cuartos técnicos se realizará en su totalidad por el criterio de disipación térmica.

Sin embargo, en la mayoría de las salas, le ventilación necesaria en operación normal del túnel será menor, ya que todos los equipos no estarán funcionando intensivamente al mismo tiempo, disminuido el calor expulsado y, por consiguiente, la necesidad de ventilación en los cuartos técnicos.

CÁLCULO DE NECESIDADES DE VENTILACIÓN PARA LOS CUARTOS TÉCNICOS DEL TÚNEL DE LA AVANZADA							Caudal de aire por renovación horaria según DIN 1946		Caudal de aire requerido según RITE		Caudal de aire por disipación de calor				Caudal de ventilación por concentración de H2		Caudal para extracción de agente limpio	
Ref. Espacio	Denominación	Superficie (m²)	Altura media (m)	Volumen (m³)	Extracción por Renovaciones hora	Ratio de aporte de aire de ventilación	Renovaciones hora resultantes	Aporte de aire	Aporte de aire	Renovaciones hora resultantes	Calor estimado emitido por los equipos de la sala	Caudal de aire calculado		Renovaciones hora resultantes	Ratio extracción por hidrógeno	Caudal de extracción por hidrógeno	Ratio extracción por agente limpio	Caudal de extracción por agente limpio
		(m2)	(m)	(m³)	ren/h	(l/s)/m²	ren/h	m³/h	l/s	ren/h	kW	l/s	m³/h	ren/h	(l/s)/m²	l/s	ren/h	l/s
G.01	Sala telecomunicaciones	33.9	3.5	118.8	-	0.55	10.0	1187.6	18.7	0.6	17.2	1423.0	5125.0	43.2	-	-	6.0	197.9
G.02	Sala Cuadros Baja	36.79	3.5	128.8	-	0.55	10.0	1287.7	20.2	0.6	11.1	921.0	3315.0	25.7	5.1	187.6	6.0	214.6
G.03	Sala Generador	38.1	3.5	133.5	-	0.55	20.0	2669.8	21.0	0.6	24.5	2025.0	7300.0	54.7	-	-	6.0	222.5
G.04	Sala transformador	28.7	3.5	100.4	-	0.6	10.0	1004.2	15.8	0.6	26.0	2150.0	7750.0	77.2	-	-	6.0	167.4
G.05	Sala grupo PCI	14.2	3.5	49.6	-	0.55	20.0	992.6	7.8	0.6	25.5	2110.0	7600.0	153.1	-	-	-	-
B.01	Sala telecomunicaciones	34.0	3.5	119.0	-	0.6	10.0	1190.0	18.7	0.6	17.2	1423.0	5125.0	43.1	-	-	6.0	198.3
B.02	Sala Cuadros Baja	32.8	3.5	114.6	-	0.55	10.0	1146.3	18.0	0.6	11.1	921.0	3315.0	28.9	5.1	167.0	6.0	191.0
B.03	Sala Generador	48.9	3.5	171.0	-	0.6	20.0	3420.9	26.9	0.6	24.5	2025.0	7300.0	42.7	-	-	6.0	285.1
B.04	Sala transformador	41.4	3.5	144.9	-	0.55	10.0	1449.4	22.8	0.6	26.0	2150.0	7750.0	53.5	-	-	6.0	241.6

Tabla 35: Resultados del cálculo de necesidades de ventilación para los cuartos técnicos

Fuente. Elaboración propia

En los cálculos, se han analizado todos los casos mencionados para comprobar cuál es el más restrictivo, siendo el criterio de caudal de aire por disipación de calor el más restrictivo en todos los casos.

Por lo tanto, los ventiladores tendrán las siguientes características:

- Caudal máximo: 7.800 m³/h
- Presión total: 40,00 Pa (teniendo en cuenta las pérdidas de las rejillas y compuertas)
- Diámetro interior: 640 mm
- Potencia instalada: 1,1 kW
- Rendimiento: > 50 %

5.4 Climatización de salas y cuartos técnicos

5.4.1 Descripción del sistema

Algunas salas deberán ser climatizadas con el objeto de garantizar la fiabilidad de los equipos electrónicos. Por lo tanto, las salas donde se dispondrán baterías y los racks de los sistemas de comunicaciones y control tendrán que tener climatización mediante fan coils de mural visto, además de la ventilación correspondiente.

Existen cuartos técnicos que por la peculiaridad de las instalaciones que albergan requerirán de climatización (refrigeración) para mantener unas condiciones de temperatura y humedad por motivos operativos y de seguridad, tal sea el caso de los cuartos que alojan los cuadros generales de baja tensión (CGBT), equipos de SAI, cuartos de comunicaciones, etc. Estos cuartos dispondrán de equipos autónomos, para mantener su independencia horaria y de modo de funcionamiento respecto a los otros equipos. Las unidades condensadoras de ubicarán lo más próximo posible a las salas a climatizar respetando criterios estéticos, de confort y de normativa.

5.4.2 Criterio de diseño

En el diseño y dimensionamiento de la ventilación de los cuartos técnicos, se deben de tener en cuenta los siguientes requisitos y criterios.

- Temperatura del aire exterior: 30 °C (correspondiendo con verano)
- Temperatura máxima en el local: 26 °C (verano) y 20°C (invierno)
- Humedad relativa en el local: 45-60%

Si bien es cierto que las necesidades de calefacción son mínimas (debido a las cargas internas de los equipos), en determinados casos puede ser más ventajoso económicamente el disponer equipos con bomba de calor que equipos de sólo frío.

Inicialmente, el fan coil arrancará con la velocidad más baja. Si transcurrido un tiempo prefijado, no se alcanza la temperatura de consigna, parará la velocidad 1 y arrancará la velocidad 2. Si todavía no se alcanza la consigna, parará la velocidad 2 y arrancará la 3. Una vez alcanzada la temperatura de consigna, el sistema de gestión irá descendiendo o aumentando de velocidad, siempre intentando mantener la temperatura de consigna con la velocidad más baja posible. Los fan-coils trabajarán con la consigna de temperatura fijada por el operador del sistema de control. En cada una de las zonas, habrá un termostato que permitirá el ajuste final de la consigna en el rango +/-3°C. Los fan coils podrán arrancar por orden del operador del sistema, automáticamente por programa de gestión horaria o localmente si está habilitado el permiso desde el sistema de gestión.

5.4.3 Cálculos preliminares

Se calculan las potencias de refrigeración del equipo de aire acondicionado mediante fórmulas simplificadas, al considerarlo un apoyo a la ventilación en los cuartos donde están instalados los SAIs y rack de comunicaciones y control, y no un sistema principal, ya que los locales no tendrán ocupación permanentemente.

- Capacidad de refrigeración, en función de la conductividad de las superficies, temperatura exterior, etc.
- Capacidad de calefacción, en función de la orientación, el aislamiento de las paredes, la zona climática, etc.

5.4.4 Resultados

A continuación, se muestran los resultados de los diferentes cálculos realizados para el dimensionamiento de la ventilación de los cuartos técnicos, teniendo en cuenta las necesidades de refrigeración y de calefacción de los cuartos técnicos.

CLIMATIZACIÓN PARA LOS CUARTOS TÉCNICOS DEL TÚNEL DE LA AVANZADA									
Ref. Espacio	Denominación	Superficie (m²)	Altura media (m)	Volumen (m³)	Potencia de refrigeración (pared)	Potencia de refrigeración (techo)	Potencia de refrigeración (suelo)	Potencia de refrigeración (total)	Potencia de calefacción (total)
		(m2)	(m)	(m³)	W	W	W	kW	kW
G.01	Sala telecomunicaciones	33.9	3.5	118.8	915.6	369.8	234.8	3.04	2.57
G.02	Sala Cuadros Baja	36.79	3.5	128.8	1068.2	401.0	254.6	3.45	2.78
B.01	Sala telecomunicaciones	34.0	3.5	119.0	915.6	370.6	235.3	3.04	2.57
B.02	Sala Cuadros Baja	32.75	3.5	114.6	1068.2	357.0	226.6	3.30	2.48

Tabla 36: Resultados del cálculo de necesidades de climatización para los cuartos técnicos

Fuente. Elaboración propia

Anejo 08. Ventilación

Por lo tanto, los climatizadores tendrán las siguientes características:

- Capacidad de refrigeración: 3,45 kW
- Capacidad de calefacción: 2,80 kW
- Tipo de unidad: Unidad fan coil de pared
- Dimensiones aproximadas: 400 x1.000 x 300 mm

En las fases posteriores, se realizarán cálculos más detallados de las necesidades de frío y calor de las salas a través de un software específico de cálculo.