



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA ESCUELA
POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y
ENERGÍA



Trabajo Fin de Grado

INFLUENCIA DEL PARQUE VEHICULAR EN LOS REQUISITOS DE VENTILACIÓN DE TÚNELES

**Influence of the vehicle park in the ventilation
requirements of tunnels**

Para acceder al título de:
Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros

Autor: Inés Álvarez del Campo
Director: Rubén Pérez Álvarez
Convocatoria: Septiembre 2019



ÍNDICE

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA.....	0
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
1. INTRODUCCIÓN	6
2. ALCANCE Y OBJETIVOS	8
3. ESTADO DEL ARTE	9
3.2. VENTILACIÓN	9
3.1.1. <i>Sistemas de ventilación en túneles carreteros</i>	9
3.1.2. <i>Idoneidad del sistema de ventilación longitudinal</i>	11
3.2. CONTAMINANTES A CONSIDERAR EN LA ATMÓSFERA DE UN TÚNEL.....	12
3.2.1. <i>El Monóxido de Carbono</i>	13
3.2.2. <i>NOx</i>	14
3.2.3. <i>Humos u opacidad</i>	14
3.3. EVOLUCIÓN DEL PARQUE VEHICULAR. FUENTES PARA EL ANÁLISIS.....	14
3.3.1. <i>Evolución del parque vehicular nacional en los últimos años</i>	18
3.4. EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN EN SERVICIO DE TÚNELES CARRETEROS.....	19
3.4.1. <i>Método 1: Manual de Túneles y Obras Subterráneas de C. López Jimeno (2000)</i>	19
3.4.2. <i>Método 2: Centro de Estudio de Túneles CETU (2002)</i>	25
4. METODOLOGIA	30
4.1. PRIMER MÉTODO: MANUAL DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS	30
4.1.1. <i>P.I.A.R.C, Fuente de datos de emisiones</i>	30
4.1.2. <i>Principio de cálculo de emisiones</i>	39
4.1.3. <i>Caudal de aire necesario para la dilución de gases</i>	41
4.2. SEGUNDO MÉTODO: CENTRO DE ESTUDIO DE TÚNELES (C.E.T.U)	42
4.2.1. <i>Clasificación de vehículos</i>	42
4.2.2. <i>Reglamentación europea sobre emisiones</i>	43
4.2.3. <i>Principio de cálculo</i>	43
4.2.4. <i>Coefficientes para vehículos ligeros</i>	44
4.2.5. <i>Coefficientes para vehículos pesados</i>	48
4.2.6. <i>Factor de paso de la Norma 4 a otras normas</i>	51
4.3. CÁLCULO DE PERDIDAS DE CARGA Y POTENCIA	53
4.3.1. <i>Pérdidas de carga</i>	53
4.3.2. <i>Potencia</i>	56
5. RESULTADOS.....	58
5.1. ÁMBITO DE ESTUDIO: TÚNEL DEL FABAR	58
5.1. CARACTERÍSTICAS DEL SUPUESTO BASE.....	61
5.2. VARIABLES CONSIDERADAS.....	63
5.3. ANÁLISIS DE LAS INFLUENCIAS DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS	64
5.1.1. <i>Influencia de la evolución del parque vehicular</i>	64
5.1.2. <i>Influencia de la pendiente</i>	69
5.1.3. <i>Influencia de la velocidad de circulación</i>	64



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



5.1.4. <i>Influencia de la longitud del túnel</i>	72
5.2 ANÁLISIS DE LAS INFLUENCIAS DEL TIPO DE MOTOR	79
5.2.1. <i>Influencia de los vehículos híbridos en la concentración de gases contaminantes de un túnel en el parque vehicular actual de España</i>	79
5.2.2. <i>Análisis de la concentración de gases contaminantes en túneles considerando un hipotético parque vehicular, en el que los vehículos ligeros son híbridos</i>	82
6. CONCLUSIONES	85
7. BIBLIOGRAFÍA	87
7.1. LIBROS	87
7.2. INFORMES	87
7.3. CONTENIDO WEB	88



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Longitudes de aplicación de los sistemas de ventilación (CETU). Modificado de López Jimeno (1997).	12
Tabla 3.2. Distribución parque vehicular nacional. Fuente DGT.	16
Tabla 3.3. Distribución parque vehicular desde 2014 hasta 2018. Fuente DGT.	18
Tabla 3.4. Factor de corrección por altura sobre el nivel del mar. López Jimeno (2000).	20
Tabla 3.5. Factor de corrección por pendiente. López Jimeno (2000).	20
Tabla 3.6. factor de corrección por velocidad distinta a la de diseño. López Jimeno (2000).	20
Tabla 3.7. Factor de corrección por pendiente para NOx. López Jimeno (2000).	22
Tabla 3.8. Factor de corrección por velocidad para NOx. López Jimeno (2000).	22
Tabla 3.9. Factor de corrección por altura para humos. López Jimeno (2000).	24
Tabla 3.10. Factor de corrección Ks.	24
Tabla 3.11. Coeficientes de emisión Euro: f2, f3 y f4. Marsault y Carlotti (2002).	27
Tabla 3.12. Coeficientes de altitud para vehículos ligeros. Marsault y Carlotti (2002). ..	28
Tabla 3.13. Partículas finas puestas en suspensión por el tráfico ligero. (C.E.T.U 2002).	28
Tabla 3.14. Coeficientes de emisión Euro. Marsault y Carlotti (2002).	28
Tabla 3.15. Coeficientes de peso y potencia para vehículos pesados. Marsault y Carlotti (2002).	28
Tabla 3.16. Coeficiente de corrección por altitud. Marsault y Carlotti (2002).	28
Tabla 3.17. Partículas finas puestas en suspensión por los vehículos pesados. Marsault y Carlotti.	29
Tabla 3.18. Coeficientes de seguridad. C.E.T.U.	29
Tabla 4.1. Emisiones base de CO para turismos gasolina en g/h. PIARC	31
Tabla 4.2. Emisiones base de NOx para turismos gasolina. PIARC.	31
Tabla 4.3. Emisiones base de humos para turismos gasolina. PIARC.	32
Tabla 4.4. Emisiones base de CO para turismos diésel. PIARC.	32
Tabla 4.5. Emisiones base de NOx para turismos diésel. PIARC	33
Tabla 4.6. Emisiones base de humos para turismos diésel. PIARC.	33
Tabla 4.7. Emisiones base de CO para vehículos comerciales ligeros gasolina. PIARC. .	34
Tabla 4.8. Emisiones base de NOx para vehículos comerciales ligeros gasolina. PIARC.	34
Tabla 4.9. Emisiones base de humos para vehículos comerciales ligeros gasolina. PIARC.	35
Tabla 4.10. Emisiones base de CO para vehículos comerciales ligeros diésel. PIARC.	35



Tabla 4.0.11. Emisiones base de NO _x para vehículos comerciales ligeros diésel. PIARC.	36
Tabla 4.12. Emisiones base de humos para vehículos comerciales ligeros diésel. PIARC.	36
Tabla 4.13. Emisiones base de CO para vehículos pesados diésel. PIARC.	37
Tabla 4.14. Emisiones base de NO _x para vehículos pesados diésel. PIARC.	38
Tabla 4.15. Emisiones base de humos para vehículos pesados diésel. PIARC.	38
Tabla 4.16. Factores de masa (fm). PIARC	39
Tabla 4.17. Emisiones de monóxido de carbono en l/h de un vehículo ligero de gasolina perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS.	45
Tabla 4.18. Emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NO _x) en l/h de un vehículo ligero de gasolina perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS.....	45
Tabla 4.19. Emisiones de monóxido de carbono en l/h de un vehículo ligero diésel perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS	46
Tabla 4.20. Emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NO _x) en l/h de un vehículo ligero diésel perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS)	46
Tabla 4.21. Emisiones de Humos en m ² /h de un vehículo ligero diésel perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS)	47
Tabla 4.22. influencia del peso en las emisiones de los vehículos pesados. (Copert IV).	48
Tabla 4.23. Emisiones de monóxido de carbono en l/h de un vehículo pesado diésel de peso superior a 34 toneladas perteneciente a la norma euro 4, en función de los valores de pendiente y velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS).	49
Tabla 4.24. Emisiones de óxidos de nitrógeno en l/h de un vehículo diésel de peso superior a 34 toneladas perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS).....	49
Tabla 4.25. Emisiones de óxidos de nitrógeno en l/h de un vehículo diésel de peso superior a 34 toneladas perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS).....	50
Tabla 4.26. Factores de paso de emisiones de la norma 4 a otras normas para vehículos ligeros diésel y gasolina (C.E.T.U 2012).....	51
Tabla 4.27. Factores de paso de emisiones de vehículos pesados de la norma euro 4 a las normas PRE-euro, euro 1 y euro 2. (Copert IV).	52



Tabla 4.28. factores de paso de las emisiones de un vehiculo pesado de la norma euro 4 a la norma euro 6.....	52
Tabla 4.29, Factores de paso de emisiones de vehículos pesados de la norma euro 4 a la norma euro 5.	52
Tabla 4.30. Factores de paso de emisiones de vehículos pesados de la norma euro 4 a la norma euro 3.	53
Tabla 4.31. coeficiente de acabado superficial de las paredes. López Jimeno. 2000.	55
Tabla 4.32. coeficiente del suelo. López Jimeno. 2000.....	55
Tabla 5.1. Características del túnel considerado.	61
Tabla 5.2. Características ambientales en el túnel.	61
Tabla 5.3. Características del parque vehicular considerado.....	61
Tabla 5.4. Coeficientes límite de los gases contaminantes.....	62
Tabla 5.5. Influencia de la evolución del parque vehicular. Método CETU (2012).	64
Tabla 5.6. Influencia del parque vehicular. Método López Jimeno (2011).	66
Tabla 5.7. Influencia de la pendiente. Método CETU (2014).	62
Tabla 5.8. Influencia de la pendiente. Método de López Jimeno (2011).....	62
Tabla 5.9. Influencia de la velocidad. Método CETU (2014).	66
Tabla 5.10. Influencia de la velocidad. Método López Jimeno (2011).....	68
Tabla 5.11. Influencia de la longitud del túnel. Método CETU (2014).	74
Tabla 5.12. Influencia de la longitud del túnel. Método López Jimeno (2014).....	75
Tabla 5.13. Influencia tipo de motor y pendiente. Método López Jimeno (2011).....	81
Tabla 5.14. Influencia vehículos híbridos. Método López Jimeno (2011).	84



1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se ha realizado para la obtención del Título de Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros.

El túnel es la solución que nuestra sociedad inventó para solventar la comunicación entre dos espacios, normalmente separados por un curso de agua, un macizo montañoso u otro obstáculo similar, abriendo un paso de forma artificial.

En función de las necesidades que dan lugar a cada tipo de túnel se define su utilidad. Los más habituales son aquellos destinados al paso de medios de transporte, vehículos, líneas de ferrocarril o metros. Pero también existen túneles destinados al abastecimiento de agua o saneamiento.

Hoy en día los túneles representan también una forma de adentrarse en la historia y cultura de pueblos y zonas rurales, ya que sus creencias y religión quedan estampadas en el enfoque empleado para adentrarse en la tierra. En una primera asimilación al espacio subterráneo natural, las cuevas, puede afirmarse que en su interior era donde inicialmente se refugiaban, y así proyectaban en estos sus vivencias. Esto convierte a los túneles y todas sus variantes en una piza fundamental de nuestra historia.

A medida que se avanza en la historia, se produce una evolución en las técnicas con las que se logran perforaciones que, en un principio, no se valían de nada más que rudimentarias herramientas y la fuerza del hombre. Apareció mas adelante la técnica del fuego, que consistía en crear incendios sofocados con agua fría, para que este contraste provocase la rotura de la roca.

El primer túnel del que se tiene constancia sobre el ingeniero que lo llevó a cabo es el túnel de Samos, el cual, mide un kilómetro de longitud y se sabe que su objetivo fue el abastecimiento de agua.

Aunque en durante la Edad media, este tipo de construcciones dejan en gran medida de realizarse, la importancia de los túneles resurge durante El Renacimiento, gracias a que Leonardo Da Vinci concibe estas obras de ingeniería como parte de sus proyectos. Con posterioridad llegaría la Era de los Canales, la cual, promueve el desarrollo de lo túneles dando paso a la Era de los Túneles para canales, durante la que fue construido el Túnel de Malpas, perforado utilizando la pólvora por primera vez.

La Era de los Ferrocarriles, ya en el siglo XX, supone un gran aumento de estas construcciones. La maquinaria y conocimientos acerca de estos permite la mecanización del proceso. Es en esta época cuando se construye el primer túnel bajo un río, el Támesis



(inicialmente para el tránsito de carretas, posteriormente para ferrocarril), seguido de otros bajo el río de Chicago o el túnel de Hoosac en EEUU.

En 1863, la utilidad de los túneles se ve marcada con el nacimiento del ferrocarril Metropolitano, más conocido hoy en día como metro. Gracias a este tipo de construcción, las ciudades adquieren una nueva dimensión suponiendo para el hombre una forma más rápida segura y eficaz de desplazarse.

Se alcanza la Era de las Carreteras en el siglo XX, en la que se perforan grandes túneles comenzando por zonas como los Alpes.

Hoy en día, además de todas las necesidades comentadas hasta ahora, se encuentran utilidades orientadas al arte y al ocio. Ejemplos notables de esto se localizan en ciudades como Toronto o Estocolmo, donde también se encuentran túneles con funciones como depósito de alimentos, residuos, plantas eléctricas...

La construcción de túneles nunca ha sido un trabajo seguro ni fácil, y es en este punto, donde entra en juego la ventilación.

La ventilación consiste en el paso de una corriente de aire a través de un ducto o espacio subterráneo. Su importancia radica en la necesidad de mantener, en todo momento, una atmósfera respirable, para lo cual habrá que aportar la cantidad de aire suficiente como para que los gases procedentes de las emisiones de los vehículos que circulan a través, del mismo, sean disipados, o al menos se mantengan sus concentraciones por debajo de unos límites que no supongan un riesgo para la salud.

Si bien no siempre se han tomado medidas adecuadas de ventilación, y por este y otros riesgos asociados, en la antigüedad la construcción era realizada por esclavos. En la actualidad se ha tomado mucha conciencia. Incluso se planifica con antelación dos tipos de ventilaciones, una con el objetivo de mantener el aire del frente limpio durante la ejecución y otra definitiva para mantener una atmósfera respirable durante el servicio. Como se referirá en posteriores apartados, el presente Trabajo Fin de Grado se centrará en esta segunda modalidad: la ventilación en servicio o en explotación.



2. ALCANCE Y OBJETIVOS

El objeto del presente Trabajo Fin de Grado reside en la realización de un análisis de sensibilidad, considerando la influencia de aspectos relacionados esencialmente con la variación en la distribución del parque vehicular, sobre los requisitos de ventilación de túneles carreteros.

Para poder realizar esta determinación, se considerará aceptable la extrapolación de los datos del Parque Vehicular Nacional a los de un supuesto túnel adoptado como base, sin entrar a establecer diferencias entre las tasas de renovación vehicular de las distintas comunidades autónomas. Dicho supuesto base, será el Túnel del Fabar (o del Ordovícico), situado en el Principado de Asturias.

De lo anterior se deduce que las variables consideradas no dependerán intrínsecamente de los aspectos constructivos del túnel, salvo en aquellos que condicionen las emisiones (es decir, la pendiente del túnel). Es por ello que otros factores, como puedan ser la sección, o los revestimientos, quedan fuera del alcance del presente estudio. Por otro lado, los parámetros derivados de la aplicación de la formulación (caudales, sobrepresiones y potencias), aludirán a los valores teóricos derivados de la aplicación de las metodologías adoptadas para su determinación. No se procederá a la selección de los ventiladores, sino que las ventajas o desventajas que puedan deducirse de la modificación en la distribución del parque vehicular durante el periodo considerado (2014-2018), se basará en dichos valores teóricos.

Los criterios de dimensionamiento se basarán en el cálculo de la ventilación en servicio, no considerando aspectos relativos a la requerida para la ejecución del mismo.

Debe tenerse igualmente en cuenta que, dentro de los criterios del servicio, existen los de utilización ordinaria (destinados a proporcionar el caudal requerido para mantener contaminantes y humos dentro de unos umbrales aceptables), y de eventualidad (accidente o incendio). Los supuestos aquí estudiados se centrarán en la ventilación de servicio bajo condiciones ordinarias de uso.



3. ESTADO DEL ARTE

3.2. VENTILACIÓN

3.1.1. Sistemas de ventilación en túneles carreteros

Como ya se ha mencionado en la introducción, planificar la ventilación es muy importante. Es necesario evaluar todos los requerimientos expuestos también anteriormente, y en base a las necesidades elegir el tipo de ventilación que más se adecúe a túnel de diseño. En este apartado se definen los diferentes sistemas de ventilación existentes para un túnel carretero [1] (López Jimeno, 2011), procediendo además a analizar cuáles serán los principales contaminantes a los que la ventilación debe enfrentarse.

3.1.1.1. Ventilación natural

En túneles de reducida longitud puede darse el caso de que los niveles de gases contaminantes se mantengan por debajo de sus respectivos límites sin necesidad de añadir un sistema de ventilación. Esto puede ocurrir debido a cambios de temperatura entre las bocas del túnel, al viento, o a los propios vehículos que lo atraviesan.

3.1.1.2. Ventilación transversal pura

La ventilación transversal es la más recomendada en caso de túneles con tráfico bidireccional, así como la más segura en caso de incendio y la más eficiente. Pero también es la que supone unos mayores costes de mantenimiento. Estas ventajas e inconvenientes se deben a varios factores relacionados con la forma particular de extraer el aire. En este sistema, el aire crea un circuito que va de suelo a techo gracias a un conducto para el aire fresco situado en el suelo, por el que el aire sale hacia el techo en el que se encuentra otro conducto por el que se recoge el aire contaminado.

Las salidas de aire desde el conducto de aire fresco equidistan unas de otras a lo largo del túnel, de igual manera se distribuye el conducto de extracción y ambos tienen su entrada y salida, respectivamente en la boca del túnel.

Para generar este circuito de aire se necesita, por tanto, ventiladores extractores y de inyección de aire fresco, cada uno con su circuito independiente.



Se debe tener en cuenta, a la hora de dimensionar este sistema, la ventilación longitudinal producida por el tiro natural, lo que en algunos casos obligará a la instalación de ventiladores de chorro.

3.1.1.3. Ventilación semitransversal

El sistema de ventilación semitransversal sigue el mismo circuito de aire de suelo a techo. Sin embargo, se diferencia del anterior en que este únicamente consta de un conducto, puede ser el de inyección de aire fresco (saliendo el aire contaminado por la boca de salida del túnel) o el conducto de extracción, en cuyo caso el aire fresco entra por las bocas del túnel y sale por dicho conducto.

El hecho de disponer de uno de los conductos supone un gran ahorro en coste de ventilador y construcción del conducto.

En el caso de que el túnel conste sólo del conducto de inyección, los ventiladores suelen ser unidireccionales y el conducto puede estar situado en el suelo o en el techo.

En el otro caso, en el que los ventiladores sean de extracción, los ventiladores serán también unidireccionales pero el conducto estará en falso techo.

Esta forma de proceder es la más común, pero también existen variantes que al utilizar ventiladores reversibles permiten la inyección de aire y la extracción a través de un mismo conducto.

3.1.1.4. Ventilación longitudinal

La ventilación longitudinal, la elegida en este estudio, se recomienda principalmente en túneles con un sentido único de circulación de aire, incluso en túneles de gran longitud. En este sistema la circulación del aire va de boca a boca del túnel, es decir, lo atraviesa longitudinalmente. Por esta razón los niveles de contaminación son mas bajos a la entrada y van aumentando a medida que avanza el aire hacia la salida, lugar en el que la concentración es mayor. En este caso se diferencian dos sistemas según la manera que el ventilador obtiene el aire fresco: uno que utiliza ventiladores de chorro o "Jet Fans" y un segundo que utiliza ventiladores axiales.



3.1.1.4.1. Ventilación Jet Fans

Este sistema es el mas sencillo de todos, además de ser el que requiere menores coste de inversión y de mantenimiento.

Este sistema consiste en la colocación de unos jets o aceleradores que mantienen la circulación longitudinal del aire. Estos ventiladores suelen colocados en el techo aunque eso depende de las características de espacio del túnel, ya que en caso de tener límite de gálibo, estos se puede colocar en los hastiales, o en algún caso se pueden hacer variaciones de la sección, nichos, que los alberguen.

Con la finalidad de incrementar la seguridad en caso de incendio, se recomienda que los ventiladores sean bidireccionales para poder así disponer de un mayor control de la salida de humos.

3.1.1.4.2. Ventilación con toberas Saccardo

En este sistema, se utilizan ventiladores axiales que introducen el aire en el túnel a través de una tobera denominada "Saccardo". Estos ventiladores introducen el aire a gran velocidad. Generan una gran fuerza de empuje que dependerá del ángulo de la tobera, cuanto mayor sea el ángulo mayor será el empuje pero mayor será también la complejidad de construcción de la tobera.

A diferencia del sistema anterior, en caso de incendio, estos trabajando a la inversa no generan empuje con lo que no solucionarían el problema de control de humos. La solución que se propone sería añadir un sistema de compuertas motorizadas que permitan que el aire sea motorizado en ambos sentidos. La mayor ventaja que supone este método frente al anterior es que en túneles con problema de gálibo, este sistema no supone pérdida de espacio y además, por esta misma razón, que el sistema este fuera del túnel es una ventaja al no necesitar cortes de tráfico para realizar labores de mantenimiento en las instalaciones.

3.1.2. Idoneidad del sistema de ventilación longitudinal

Este tipo de sistema de ventilación cumple una serie requisitos que le hacen ser el más utilizado. Autores como el Profesor Dr. Carlos López Jimeno en un libro *Manual de túneles y obras subterráneas* (1997) recomiendan este tipo de ventilación siempre y cuando no se den circunstancias que lo impidan, y esto es debido a su sencillez de instalación, o a los bajos costes de inversión y de mantenimiento con respecto a las alternativas de ventilación existentes.

Es cierto que, en caso de túneles muy largos o de doble sentido se prefiere el uso del sistema de ventilación transversal por ofrecer una mayor eficacia y rapidez a la hora de



evitar la expansión de los gases de combustión. Es por esta razón que, los ventiladores en este sistema de ventilación deben ser reversibles y llevar instalados frenos.

En la siguiente tabla se recogen las longitudes para las que se recomienda un método u otro en función del tipo de vía, y el sentido y densidad del tráfico.

Tabla 3.1. Longitudes de aplicación de los sistemas de ventilación (CETU). Modificado de López Jimeno (1997).

TIPO DE VÍA	SENTIDO DE TRÁFICO	DENSIDAD DE TRÁFICO	SISTEMA DE VENTILACIÓN	
			Longitudinal (natural o forzada)	Transversal (Total o parcialmente)
Vía Urbana	Único	Fluido	Hasta 2000 m	Desde 1500 m
	Doble	Escaso	Hasta 3000 m	Desde 2000 m
	Doble	Fluido	Hasta 1000 m	Desde 800 m
Vía interurbana	Único	Fluido, raramente denso	Hasta 2000 m	A partir de 1500 m
	Único	Habitualmente denso	Hasta 1500 m	A partir de 800 m
	Doble	Fluido o denso	Hasta 400 m	A partir de 250 m

A partir de lo establecido en la tabla anterior, para el túnel base escogido, situado en una vía interurbana, de 1500 m de longitud y un único sentido de circulación con una densidad de media de tráfico, se acepta el sistema de ventilación longitudinal.

3.2. CONTAMINANTES A CONSIDERAR EN LA ATMÓSFERA DE UN TÚNEL

El desarrollo de la actividad antrópica tiene como consecuencia un impacto en el medio circundante. Dicho impacto en gran medida estará condicionado por el grado de automatización de la actividad que se esté considerando, dado que el empleo de maquinaria requiere el consiguiente suministro de energía. El origen de dicha energía implicará un grado inherente de contaminación, ya sea química o física, si bien el punto en el que se localice dicha emisión puede afectar en mayor o menor medida al usuario final. Un ejemplo destacable de los efectos de dicha contaminación es el caso de los túneles, espacio subterráneo en el que se plantea la convivencia de los equipos automóviles y los usuarios, presentando cada uno unas demandas propias en materia de caudal y calidad del aire, para hacer un adecuado uso de la infraestructura. Al hablar de focos cercanos o lejanos de las emisiones, cabría comparar los casos de vehículos



basados en el uso de combustibles fósiles, que producen una serie de sustancias contaminantes de obligada dilución, con vehículos eléctricos enchufables, carentes de estos tipos de emisión en el propio túnel (pudiendo presentar de otra contaminación de otra índole, como térmica), si bien podrán ser susceptibles de haberlas generado como consecuencia de la obtención de la energía por ellos consumida.

A la hora de considerar la realización de una clasificación de los gases contaminantes que pueden presentarse como consecuencia de la presencia de motores, puede hablarse de dos modalidades fundamentales: tóxicos y asfixiantes. La primera de ellas es aquella que comprende gases que por la interacción directa con el organismo pueden derivarse en daños sobre el mismo dadas sus propiedades intrínsecas, y los efectos de, las mismas, sobre aquel. En el segundo caso, la acción lesiva sobre el organismo no es debida a las propiedades químicas del compuesto y la susceptible interacción con el organismo, sino al desplazamiento del porcentaje de oxígeno que su incremento en el cómputo global de una determinada atmósfera puede experimentarse, alejándose del 21-18% deseable. Como consecuencia de las diversas especies que puedan presentarse en una determinada atmósfera podrá hablarse de conceptos tales como “aire limpio”, “aire respirable”, pasando a “aire contaminado o “aire tóxico”.

Si se tiene en cuenta la calidad atmosférica exigible a un túnel, tres son los parámetros fundamentales que tradicionalmente se han venido considerando: porcentaje de CO, porcentaje de NOx, y grado de opacidad debida a la presencia de humos, condicionando estos últimos el grado de visibilidad en el túnel, y pudiendo conllevar accidentes si se superan ciertos límites admisibles.

A continuación, se describen los principales contaminantes definidos por [2] López Jimeno (1997).

3.2.1. El Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono es un gas altamente tóxico que, en el caso de un túnel, aparece por la combustión incompleta de los combustibles de los vehículos. Al inhalar este gas, el CO se une a la hemoglobina presente en la sangre, formando una proteína denominada Carboxihemoglobina, que impide que la hemoglobina transporte el oxígeno a través de la sangre, de modo que puede producirse un efecto fisiológico similar a una insuficiencia de O₂.

Los daños de una intoxicación por CO en el organismo dependerán del tiempo de exposición, la concentración en la que este se encuentre y de la ventilación alveolar, pudiendo llegar a producir la muerte.

Lo recomendado es garantizar la no superación de una concentración volumétrica de CO máxima de 150 ppm, aunque este valor puede variar según el sistema de ventilación. Por ejemplo, en el caso de la ventilación longitudinal, la concentración de CO aumenta



linealmente hasta llegar a la boca de salida. A diferencia de los túneles en los que se utilice un sistema de ventilación transversal, en los que la concentración se mantendrá constante en todos los puntos del túnel.

Para el presente estudio, se adoptarán los límites de CO recomendados por la PIARC de 30 ppm, que está calculado para un usuario en reposo durante 60 minutos con un nivel del Carboxi-hemoglobina en sangre de un 0,5%.

3.2.2. NO_x

La mayor parte las emisiones producidas por los vehículos son de NO, el cual no tiene ningún efecto adverso sobre la salud. Este gas supone un problema al entrar en contacto con el oxígeno, que lo oxida, formando NO₂ que si tiene efectos perjudiciales para la salud. De la mezcla de óxidos nitrosos, se estima que el NO₂ supone un 10 %.

En el caso de la ventilación longitudinal, ocurre lo mismo con el NO_x que con el CO, su concentración aumenta a medida que se profundiza en el túnel. El túnel deberá ser cerrado al tráfico en caso de que se detecte una concentración 0,75 ppm prolongada durante 15 minutos.

En este estudio, se ha adoptado el valor recomendado por la PIARC, que acepta una relación de NO₂/NO del 10 % y limita la concentración de NO₂ a 1ppm. Por lo que al considerar un valor límite de 0,5 ppm de NO₂, el valor límite de NO_x adoptado será de 5 ppm.

3.2.3. Humos u opacidad

El problema que plantea la presencia de humos en el túnel es la reducción de visibilidad debido a las partículas en suspensión. Para este contaminante, la PIARC recomienda un coeficiente límite de 0,005 m⁻¹, en unas condiciones de tráfico fluido desde 50 km/h a 100 km/h.

3.3. EVOLUCIÓN DEL PARQUE VEHICULAR. FUENTES PARA EL ANÁLISIS.

La premisa fundamental de análisis sobre la que se basa el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado, es la influencia de los experimentados por el Parque Vehicular Nacional en los requisitos de ventilación de servicio de los túneles carreteros, tomando como ejemplo un supuesto particular.

En la actualidad la fuente fundamental a partir de la cual poder obtener datos relativos a la antigüedad de los vehículos circulantes en España son las estadísticas publicadas anualmente por la [7] Dirección General de Tráfico en su página web (<https://www.dgt.es>).



Dicho informe se presenta en formato de memoria anual, y al margen de dicho documento, la Dirección General de Tráfico pone a disposición de los usuarios igualmente una colección de tablas en las que procede a la subdivisión de los vehículos constituyentes del parque en base a diferentes criterios, como puedan ser tanto la antigüedad de los mismos (en función de su año de matriculación), como tipo de carburante (considerando los conceptos “Diésel”, “Gasolina” y otros), en el caso de los vehículos pesados masa del vehículo, o número de plazas al considerar autobuses, entre otros.

Es conveniente tener en cuenta que dichos criterios no se han mantenido constantes a lo largo de los años, existiendo un periodo de tiempo en el que se prescindió de la consideración simultánea de año de matriculación y tipo de carburante. Esta circunstancia hace que el estudio se centre fundamentalmente en el periodo 2014-2018, por ser el que proporciona una uniformidad suficiente en el modo de desglose de la información, como para poder garantizar su adecuado manejo.

Una fuente complementaria de datos que se ha tenido en cuenta para el desarrollo del estudio, dada la imposibilidad de poder realizar un desglose mejor en el concepto “Otros Carburantes” por la limitación intrínseca de los datos proporcionados por la DGT, ha sido la relación vehicular publicada por ANFAC (Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones), si bien la importancia relativa con respecto al uso dado a los datos proporcionados por la Dirección General de Tráfico es mucho menor.

Se recogen a continuación, como ejemplo inicial, los datos relativos al Parque Vehicular Nacional de 2018, que constituyen los más recientes de que se dispone. Debe tenerse en cuenta que, a partir de la consideración de los valores anuales, para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado se han obtenido porcentajes relativos a vehículos ligeros, pesados, y tipo de categoría conforme a su clasificación EURO. Dichos porcentajes se han aplicado a la densidad máxima horaria circulante por el túnel adoptado como objeto de estudio, con el fin de determinar las emisiones.

Atendiendo a la ya mencionada división del Parque Vehicular recogido en la siguiente tabla, correspondiente al año 2018, puede observarse la distribución según tipo de combustible, tipo de vehículo y año de matriculación, agrupadas estas últimas en sus normativas europeas correspondientes.



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 3.2. Distribución parque vehicular nacional. Fuente DGT.

TIPO DE VEHÍCULO	COMBUSTIBLE/ EURO	Nº VEHÍCULOS
vehículos pesados	gasolina PRE-EURO	235496
	gasolina Euro 1	57261
	gasolina Euro 2	43544
	gasolina Euro 3	63334
	gasolina Euro 4	42180
	gasolina Euro 5	15763
	gasolina Euro 6	31636
	gas-oil PRE-EURO	456103
	gas-oil Euro 1	213780
	gas-oil Euro 2	482014
	gas-oil Euro 3	997223
	gas-oil Euro 4	1088341
	gas-oil Euro 5	518975
	gas-oil Euro 6	783298
	otros PRE-EURO	63
	otros Euro 1	48
	otros Euro 2	116
	otros Euro 3	563
	otros Euro 4	1493
	otros Euro 5	2981
otros Euro 6	11604	
vehículos ligeros	gasolina PRE-EURO	2032968
	gasolina Euro 1	470112
	gasolina Euro 2	887759
	gasolina Euro 3	1989839
	gasolina Euro 4	1569050
	gasolina Euro 5	1093940
	gasolina Euro 6	2463982
	gas-oil PRE-EURO	182965
	gas-oil Euro 1	168427
	gas-oil Euro 2	859573
	gas-oil Euro 3	3012522



	gas-oil Euro 4	3653063
	gas-oil Euro 5	2629679
	gas-oil Euro 6	2995311
	otros PRE-EURO	699
	otros Euro 1	766
	otros Euro 2	142
	otros Euro 3	1094
	otros Euro 4	1261
	otros Euro 5	4840
	otros Euro 6	56159



3.3.1. Evolución del parque vehicular nacional en los últimos años

La Tabla siguiente recoge la evolución del Parque Vehicular en el periodo comprendido entre el año 2014 hasta 2018. Cabe resaltar el importante aumento en la presencia de vehículos ligeros que funcionan con combustibles alternativos como gas licuado de petróleo o gas natural entre otros, que es de un 1111 %. Los vehículos diésel han disminuido un 6 % aproximadamente en dicho periodo, lo que puede deberse a la preocupación actual por las emisiones de CO₂, siendo este tipo de vehículos los que mas contribuyen a la emisión de dicho contaminante a la atmósfera. Si bien es cierto, que este descenso en la matriculación de los vehículos diésel se aprecia desde 2017 alcanzando el mayor valor de descenso en 2018, ya que hasta 2017 la tendencia era creciente.

Por su parte, los vehículos pesados alimentados con combustibles alternativos también han experimentado un importante aumento a lo largo de este periodo. Si bien en este caso los que funcionan con diésel no han disminuido en el periodo analizado, el aumento de matriculaciones, cada año, es menor.

En cuanto a los vehículos pesados de gasolina, que nunca han tenido gran representación, suponiendo un % de los vehículos pesados total, han aumentado sus matriculaciones significativamente desde 2017, lo que puede deberse a la preocupación por las emisiones de CO₂ mencionadas anteriormente.

Tabla 3.3. Distribución parque vehicular desde 2014 hasta 2018. Fuente DGT.

nº de VEHICULOS		2014	2015	2016	2017	2018	crecimiento total (14-18) (%)
vehículos pesados	gasolina	2527	4419	5122	6814	13457	432,53
	incremento (%)		74,87	15,91	33,03	97,49	
	gasoil	119203	154879	163316	178332	192311	61,33
	incremento (%)		29,93	5,45	9,19	7,84	
	otros combustibles	675	1131	1952	2769	4975	637,04
	incremento (%)		67,56	72,59	41,85	79,67	
vehículos ligeros	gasolina	283534	379562	496676	627499	795580	180,59
	incremento (%)		33,87	30,86	26,34	26,79	
	gasoil	567944	666429	678496	649082	531583	-6,40
	incremento (%)		17,34	1,81	-4,34	-18,10	
	otros combustibles	2562	4910	5221	12356	31036	1111,40
	incremento (%)		91,65	6,33	136,66	151,18	



3.4. EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN EN SERVICIO DE TÚNELES CARRETEROS.

A lo largo de la historia, las técnicas para calcular los parámetros que definen la correcta ventilación de túneles han ido evolucionando.

Al igual que los túneles han ido evolucionando con el tiempo, la manera de calcular los parámetros que definen su correcta ventilación también. Si bien es cierto que no existe un método universal, puesto que en cada país tienen sus métodos y limitaciones propias en materia de emisión, todos los consultados en este estudio convergen o se apoyan.

Además, cada método va renovándose a medida que evolucionan los aspectos de los que depende, pudiendo citarse, entre otros, el parque vehicular, o la normativa sobre los límites de la presencia de contaminantes.

En el presente estudio se han contemplado dos métodos, que se detallarán más adelante, en el capítulo dedicado a la metodología, y que se corresponden con las actualizaciones correspondientes de los métodos detallados en este capítulo.

3.4.1. Método 1: Manual de Túneles y Obras Subterráneas de C. López Jimeno (2000)

3.4.1.1. Caudal necesario para dilución de emisiones de CO

En esta edición del libro del Profesor Dr. Carlos [2] López Jimeno (1997), al igual que la utilizada posteriormente en los cálculos de este estudio, para calcular el caudal de emisiones de monóxido de carbono que se concentran en un túnel en un momento dado, se parte de unas emisiones base calculadas para cada tipo de vehículo, según la normativa Euro a la que pertenezcan, el tamaño y el carburante, en este último caso se distingue entre gasolina y diésel. A dichas emisiones se las debe aplicar unos coeficientes correctores, quedando para ello la siguiente expresión:

$$Q_{0CO} = q_{0CO} \cdot M \cdot K_{HH} \cdot K_S \cdot K_f \cdot$$

Donde

Q_{0CO} cantidad total de CO que se produce en el túnel (m³/s).

q_{0CO} valor base de la emisión de CO (m³/km vehículo). Se puede considerar de 0,013 para una velocidad de 60 km/h en carretera horizontal.

M volumen de tráfico (veh/hora)

K_{HH} factor de corrección por altura sobre el nivel del mar.



Tabla 3.4. Factor de corrección por altura sobre el nivel del mar. López Jimeno (2000).

Altura sobre el nivel del mar (m)	Factor de corrección K_{HH}
400	1,25
800	1,60
1000	2,00

K_S factor de corrección por pendiente. El consumo de combustible y las emisiones aumentan a medida que aumenta la pendiente.

Tabla 3.5. Factor de corrección por pendiente. López Jimeno (2000).

Pendiente (%)	Factor de corrección K_S
-4	0,85
-2	0,95
0	1
2	1,1
4	1,2
6	1,3

K_f factor por conducción a una velocidad distinta a la de diseño

Tabla 3.6. factor de corrección por velocidad distinta a la de diseño. López Jimeno (2000).

Velocidad (km/h)	Factor de corrección K_f
5	6,5
10	3,5
20	2
30	1,5
40	1,2
50	1,1
60	1
70 y 80	0,9

L longitud del túnel



En dicha expresión, cambiando las unidades de Q_{0CO} y q_{0CO} a $(m^3/(hKm))$ y dividiendo por la velocidad del tráfico en (Km/h) , se obtendrá la emisión horaria de CO por kilómetro de túnel.

Una vez se ha calculado la emisión de CO, el caudal de aire (Q_{aireCO}) necesario para su dilución se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{0aire} = \frac{Q_{0CO}}{C_{co}} \cdot 10^6$$

Donde

Q_{0aire} Caudal de aire total en (m^3/h)

Q_{0CO} Emisión horaria de CO (m^3/h)

C_{co} concentración permitida en el túnel (ppm)

De esta expresión se obtiene el caudal de aire para unas condiciones de presión y temperatura establecidas: 760 mm Hg de presión y 0° de temperatura. Por lo tanto, será necesario realizar un ajuste a las condiciones de presión y temperatura existentes en el túnel que se hará a través de la siguiente expresión:

$$Q_{aire} = Q_{0aire} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T_t}{T_0}$$

Donde

Q_{aire} caudal de aire total (m^3/h) para las condiciones existentes en el túnel.

Q_{0aire} Caudal de aire total (m^3/h) para las condiciones de presión y temperatura estándar del túnel.

P_0 Presión estándar (760 mm Hg).

P Presión real en el túnel (mmHg).

T_t Temperatura real en el túnel (K).

T_0 Temperatura media en el interior del túnel (273 K).

3.4.1.2. Cálculo del caudal necesario para la dilución de emisiones de NOx.

Para el caso del cálculo del caudal necesario para la dilución de NOx se parte de los mismos datos de emisiones y se les aplica la siguiente expresión:

$$Q_{NOx} = q_{NOx} \cdot (M_l + K_t \cdot M_p) \cdot K_s \cdot L$$

Donde

Q_{NOx} Cantidad total de NOx existente en el túnel.



q_{NOx} Valor base de producción de NOx. Se considera de $1,3 \cdot 10^{-3}$ m³/Km vehículo.

M_l Tráfico de vehículos ligeros (Vehículos/ hora).

K_s Factor de corrección por pendiente.

Tabla 3.7. Factor de corrección por pendiente para NOx. López Jimeno (2000).

Pendiente (%)	Factor de corrección K_s
<0	0,5
0	1
2	1,7
4	2,2
6	2,8
8	3,4
10	4,0
12	4,6

M_p Intensidad horaria de vehículos pesados (Vehículos/ hora).

K_t Factor de corrección que es necesario aplicar a los vehículos pesados.

Tabla 3.8. Factor de corrección por velocidad para NOx. López Jimeno (2000).

Velocidad del tráfico (km/h)	Factor de corrección K_t
20	8
30	7
40	5
50	3,5
60	2,5
>60	2,5

L Longitud del túnel.

El caudal de aire necesario para diluir el NOx existente se calculará de la siguiente manera:

$$Q_{0\text{aire}} = \frac{Q_{NOx}}{C_{NOx}} \cdot 10^6$$



En la cual, C_{NOx} es la concentración límite de NOx expresada en ppm. De la misma forma que se ha ajustado el caudal de CO a las condiciones de presión y temperatura reales, se procede con el caudal de NOx.

$$Q_{aire} = Q_{0\ aire} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T_t}{T_0}$$

Donde

Q_{aire} caudal de aire total (m³/h) para las condiciones existentes en el túnel.

$Q_{0\ aire}$ Caudal de aire total (m³/h) para las condiciones de presión y temperatura estándar del túnel.

P_0 Presión estándar (760 mm Hg).

P Presión real en el túnel (mmHg).

T_t Temperatura real en el túnel (K).

T_0 Temperatura media en el interior del túnel (273 K).

3.4.1.3. Caudal de aire necesario para la dilución de humos

La cantidad de humos emitida se determina a través de la siguiente expresión:

$$P_{vis} = p_{vis} \cdot (M_p + 0,08 \cdot M_l) \cdot K_{hh} \cdot K_s \cdot L$$

Donde

P_{vis} Cantidad de humo producida en el túnel.

p_{vis} Valor de emisión base de humo de vehículos pesados, 750 mg/Km vehículo.

M_p Intensidad horaria de vehículos pesados (veh/hora).

M_l Tráfico de vehículos ligeros. Se ha considerado que los vehículos ligeros producen el 8% del producido por los vehículos pesados.

K_{hh} Factor de corrección por altura con respecto al nivel del mar.



Tabla 3.9. Factor de corrección por altura para humos. López Jimeno (2000).

Altura sobre el nivel del mar (m)	Factor de corrección K_{hh}
<400	1
500	1,12
600	1,24
700	1,35
800	1,47
900	1,58
1000	1,69
1100	1,81
1500	1,93

K_s Factor de corrección por conducción en pendiente.

Tabla 3.10. Factor de corrección K_s . (López Jimeno (2000).

Pendiente (%)	Factor de corrección K_s
<0	1
0	1,12
2	1,24
4	1,35
6	1,47
8	1,58
10	1,69
12	1,81

L Longitud del túnel.

El caudal del aire necesario se determinará de la siguiente manera:

$$Q_{\text{aire}} = \frac{P_{\text{vis}} \left(\frac{mg}{h} \right)}{C_{\text{vis}} \left(\frac{mg}{m^3} \right)}$$



De los tres caudales de aire obtenidos, el necesario para la dilución de CO, para la dilución de NOx y para el de humos se deberá elegir el mayor, puesto que se considera que dicho caudal es suficiente para la dilución de los demás.

3.4.2. Método 2: Centro de Estudio de Túneles CETU (2002)

Una versión anterior del segundo método aplicado, el recogido en el documento [6] “Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel” de Marsault y Carlotti (2002).

Este estudio se basó en el parque vehicular francés comprendido entre 1970 y 2020, recogido en el documento “Evolución del parque automovilístico francés entre 1970 y 2020” I.N.R.E.T.S (1998).

Mientras el documento actual recoge hasta la normativa Euro 6, el detallado a continuación recoge sólo hasta la Euro 4, debido a la antigüedad, y es por esta razón y por la real evolución del parque vehicular, por la que es necesaria la actualización del documento.

3.4.2.1. Clasificación de vehículos

En esta edición, se considera una distribución del parque vehicular similar a la empleada en la subdivisión de actual, compuesta por:

- Vehículos de dos ruedas, los cuales no se tienen en cuenta por su escasa presencia, ni en dicho estudio ni en el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado.
- Vehículos ligeros: que se compone de turismos y similares.
- Vehículos pesados: que son en este caso, considerados como tal a partir de 3,5 toneladas.

3.4.2.2. Reglamentación europea

Es conveniente tener en cuenta la clasificación y las limitaciones asociadas a la Normativa Europea en materia de emisiones. Estas normas, aplicadas a los vehículos, tienen como objetivo limitar la cantidad de gases contaminantes que se emiten a la atmósfera, lo que obliga a las empresas de automóviles a buscar métodos para reducir las emisiones de gases, principalmente monóxido de Carbono, óxidos Nitrosos y humos. Estas normas, cada una más restrictiva que la anterior, se exponen a continuación¹:

¹ Solo se describen la Norma PRE-Euro y la Norma Euro 1, dado que su distinción supone una mayor diferencia respecto a lo anterior; el resto de normas, van, puntualmente, reduciendo el número de emisiones.



- Norma PRE-Euro: compuesta por las restricciones introducidas hasta 1992, año a partir del cual se endurecen drásticamente y comienzan las normas “Euro”.
- Norma Euro 1 (1992-1996): esta norma favoreció, por ejemplo, la aparición de catalizadores para vehículos particulares de gasolina.
- Norma Euro 2 (1996-2000)
- Norma Euro 3 (2000-2005)
- Norma Euro 4 (2005-2008)

3.4.2.3. Principio de cálculo

El principio de cálculo propuesto en esta edición del documento es similar al aplicado al presente Trabajo Fin de Grado. En primer lugar, se calculan las emisiones producidas de CO, NOx y humos, tanto para vehículos ligeros como para vehículos pesados, diferenciando si son de gasolina o diésel para, en segundo lugar, calcular el caudal de aire necesario para su dilución. A diferencia del método anterior, que proponía una fórmula para cada tipo de contaminante, este ofrece una misma fórmula para los tres, y unos factores correctores para ajustarlos.

Otra diferencia, es que, en este caso, se diferencian los vehículos según tamaño y carburante, debido a que no se consideran los vehículos pesados de gasolina.

3.4.2.3.1. Cálculo de las emisiones para vehículos ligeros

La emisión unitaria para vehículos ligeros viene expresada a continuación como:

$$e_{VL} = \sigma_{VL} \cdot \sum_i (h_i \cdot \alpha_i \cdot e_i)$$

Donde

e_{VL} Emisión unitaria de vehículos ligeros, diferenciando diésel de gasolina.

σ_{VL} Coeficiente de seguridad para vehículos ligeros.

h_i Coeficiente de altitud.

α_i Vector de reparto de los vehículos según la normativa Euro a la que pertenezcan.

e_i Vector de emisión unitaria para vehículos ligeros diferenciando gasolina de diésel.

Para el vehículo ligero medio se propone la siguiente expresión:

$$e_{VL} = (100 - a_{VLD}) \cdot \frac{e_{VLE}}{100} \cdot \frac{e_{VLD}}{100}$$



3.4.2.3.2. Cálculo de las emisiones para vehículos pesados

La expresión para calcular las emisiones de los vehículos pesados se define de la siguiente manera:

$$e_{VP} = \sum_i \sigma_i \cdot g \cdot h \cdot \beta_i \cdot e_i$$

Donde

e_{VP} Emisión unitaria establecida para el vehículo ligero medio.

σ_i Coeficiente de seguridad para vehículos pesados

g Coeficiente de masa o potencia

h Coeficiente de altitud

β_i Vector de reparto del parque vehicular compuesto por vehículos pesados

e_i Vector de emisión unitaria para vehículos pesados de 10 toneladas.

3.4.2.5. Coeficientes correctores

3.4.2.5.1. Coeficientes de corrección para vehículos ligeros

Los coeficientes de corrección propuestos por esta edición del documento son los siguientes:

Tabla 3.11. Coeficientes de emisión Euro: f2,f3y f4. Marsault y Carlotti (2002).

		Euro 1 (f1)	Euro 2 (f2)	Euro 3 (f3)	Euro 4 (f4)
CO	V.L Gasolina	1	0,8	0,8	0,4
	V.L Diésel	1	1	0,8	0,65
Nox	V.L Gasolina	1	0,7	0,55	0,35
	V.L Diésel	1	1	0,8	0,4
Humos	V.L Diésel	1	1	0,6	0,3



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 3.12. Coeficientes de altitud para vehículos ligeros. Marsault y Carlotti (2002).

		0 m	700 m	1000 m	2000 m
CO	V.L.G PRE-Euro ()	1	1,55	1,78	2,48
	V.L.G Euro ()	1	1	2,6	11,4
	V.L Diésel	1	1,15	1,2	1,5
Nox	V.L.G PRE-Euro ()	1	0,8	0,74	0,54
	V.L.G Euro ()	1	1	1	1
	V.L Diésel	1	1	1	1
Humos	V.L Diésel	1	1	1	1,25

Tabla 3.13. Partículas finas puestas en suspensión por el tráfico ligero. (C.E.T.U 2002).

Velocidad (Km/h) 0	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
e _{PM-VL} (m ² /h vehiculo)	0,5	0,5	0,52	0,56	0,64	0,75	1	1,3	1,6	2	2,4	2,8

3.4.2.5.2. Coeficientes para vehículos pesados

Los coeficientes concernientes a los vehículos pesados, en este caso, son los deducidos en el estudio COPERT III, mientras que en el documento actual propuesto por el C.E.T.U, se basan en el estudio COPERT IV. Los valores de dichos coeficientes se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.14. Coeficientes de emisión Euro. Marsault y Carlotti (2002).

	PRE-Euro	Euro 1 (f1)	Euro 2 (f2)	Euro 3 (f3)	Euro 4 (f4)
CO	1	0,65	0,45	0,45	0,23
Nox	1	0,55	0,31	0,31	0,22
Humos	1	0,65	0,18	0,18	0,03

Tabla 3.15. Coeficientes de peso y potencia para vehículos pesados. Marsault y Carlotti (2002).

PESO	10T	20T	30T	40T
POTENCIA	120 c.v	260 c.v	340 c.v	420 c.v
COEFICIENTE	1	1,6	2	2,2

Tabla 3.16. Coeficiente de corrección por altitud. Marsault y Carlotti (2002).

ALTITUD	0	1000 m	2000 m
COEFICIENTE h	1	1,1	1,2



Tabla 3.17. Partículas finas puestas en suspensión por los vehículos pesados. Marsault y Carlotti.

Velocidad (Km/h) 0	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80
e _{PM-VP} (m ² /h vehículo)	5	5	5,2	5,6	6,4	7,5	10	13	16	20

Cabe destacar que, en el caso de los vehículos pesados, se adoptaron coeficientes insuficientemente contrastados, por lo que el C.E.T.U propuso la tabla que se expone a continuación con unos coeficientes de seguridad, para evitar posibles desajustes:

Tabla 3.18. Coeficientes de seguridad. C.E.T.U.

CO	Nox	HUMOS
1	1	1
1	1	1
1	1,2	1,4
1,2	1,4	1,4
1,4	1,5	1,5



4. METODOLOGIA

Para realizar el análisis de los requerimientos de ventilación del túnel propuesto en los distintos escenarios considerados es necesario calcular, por un lado, los valores de gases contaminantes presentes en el túnel y, por otro, el caudal de aire necesario para mantener las concentraciones de dichos gases por debajo de un umbral (coeficientes límite admisibles) que no suponga un riesgo para la salud. Para llevar a cabo dicho cálculo se han utilizado dos métodos con distintas fuentes de información: el primero es el método de cálculo de ventilación definitiva de un túnel recogido en el *Manual de túneles y obras subterráneas* de López Jimeno (2011) y el segundo, el propuesto en el documento *“Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel”* publicado por el Centre d’Études des Tunnels (CETU) en su edición de 2014.

Por otro lado, se ha considerado interesante el cálculo de las pérdidas de carga o sobrepresiones y la potencia final requerida por el sistema de ventilación escogido, ventilación longitudinal mediante ventiladores de chorro (*Jet Fans*). Para ello, se ha utilizado el método propuesto por López Jimeno (2011), de modo que se pueda realizar el cálculo en ambos casos.

4.1. PRIMER MÉTODO: MANUAL DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

Como ya se ha indicado anteriormente, el primer método utilizado para el cálculo de emisiones procedente de los vehículos y el caudal de aire requerido para su dilución es el propuesto por López Jimeno en su libro [1] *Manual de túneles y obras subterráneas* (2011).

Asimismo, los datos correspondientes a emisiones, así como los coeficientes correctores, son los publicados por la Asociación Mundial de Carreteras (P.I.A.R.C) en el documento [5] *“Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation”* (2014). La Asociación Mundial de Carreteras establece también un método para calcular las emisiones y el caudal de aire requerido para la dilución de dichas emisiones.

4.1.1. P.I.A.R.C, Fuente de datos de emisiones

4.1.1.1. Valores de emisiones base

Los datos de emisiones están referidos al año 2018 para un parque vehicular distribuido de la siguiente manera:

- Tipo de vehículo: Turismo, vehículo comercial ligero y vehículo pesado.
- Año de matriculación, agrupados según la normativa euro correspondiente.
- Tipo de carburante: gasolina o gasoil.



4.1.1.1.1. Valores de emisiones base para vehículos ligeros

Las tablas presentadas a continuación obtenidas del documento de la [5] PIARC (2019) muestran los valores de emisiones de cada contaminante analizado para cada tipo de vehículos según los distintos valores de pendiente y velocidad

Tabla 4.1. Emisiones base de CO para turismos gasolina en g/h. PIARC

Emisiones de CO [g/h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
10	7,7	8,8	9,7	11,0	12,0	14,1	16,6
20	8,4	10,2	12,6	15,5	22,7	35,4	50,2
30	7,7	9,3	11,1	13,7	17,3	22,8	31,1
40	8,3	10,3	12,9	16,4	22,3	33,2	48,9
50	8,9	11,8	14,0	18,2	23,8	33,1	46,7
60	8,5	11,4	13,3	18,2	25,3	37,8	59,2
70	9,9	13,3	17,9	25,6	36,4	60,4	109,0
80	12,5	16,2	21,1	31,0	49,8	89,1	166,2
90	11,7	15,7	22,7	35,6	67,5	146,1	264,3
100	15,5	20,9	31,6	50,4	85,9	209,4	415,7
110	26,7	33,2	47,4	78,1	148,6	326,2	791,2
120	47,2	54,9	74,1	130,7	259,8	604,4	1506,2
130	85,3	106,2	142,2	236,6	504,3	1318,7	2568,7

Tabla 4.2. Emisiones base de NOx para turismos gasolina. PIARC.

Emisiones de NOX [g/h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
10	1,2	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6
20	1,3	1,6	2,0	2,4	2,9	3,4	4,2
30	1,3	1,6	2,1	2,7	3,4	4,3	5,4
40	1,4	1,8	2,4	3,1	4,1	5,1	6,2
50	1,3	1,7	2,3	3,2	4,3	5,5	7,1
60	1,3	1,8	2,5	3,6	5,1	6,9	8,6
70	1,3	1,9	2,7	4,0	5,9	8,3	10,1
80	1,4	2,1	3,2	5,2	7,4	9,8	12,3
90	1,6	2,4	3,7	6,4	9,9	11,8	14,6
100	1,9	3,0	4,4	7,7	12,1	15,3	17,8
110	2,6	3,8	6,0	9,2	13,9	18,3	22,5
120	3,4	5,0	8,2	12,2	16,3	21,7	26,4
130	4,4	7,2	13,0	17,9	19,8	24,7	29,7



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 4.3. Emisiones base de humos para turismos gasolina. PIARC.

Humos [m ² /h] 2018							
v [km/h]	Pendiente [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
20	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
30	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4
40	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6
60	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9
70	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,9	1,5
80	0,2	0,3	0,3	0,5	0,8	1,3	2,4
90	0,3	0,3	0,3	0,6	1,2	2,1	3,8
100	0,5	0,3	0,4	0,7	1,5	2,9	4,9
110	0,7	0,6	0,7	1,1	2,0	3,7	6,2
120	1,0	0,9	1,3	2,0	3,3	5,0	8,0
130	1,3	1,6	2,3	3,7	5,8	7,9	10,4

Tabla 4.4. Emisiones base de CO para turismos diésel. PIARC.

Emisiones base de CO [g/h] 2018							
v [km/h]	Pendiente [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
10	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0
20	0,9	1,0	1,3	2,8	3,3	3,6	4,1
30	0,9	1,2	1,4	2,4	3,0	3,5	3,9
40	0,9	1,2	1,4	2,0	2,7	3,2	3,7
50	1,0	1,1	1,4	1,8	2,6	3,1	3,6
60	1,0	1,1	1,2	1,6	2,4	3,0	3,6
70	1,0	1,1	1,2	1,6	2,1	2,8	3,4
80	0,9	1,1	1,2	1,6	2,1	2,4	3,2
90	0,9	1,0	1,2	1,5	1,9	2,1	2,9
100	1,0	1,1	1,2	1,3	1,6	1,9	2,7
110	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,7	2,5
120	1,3	1,3	1,2	1,4	1,8	2,0	2,8
130	1,4	1,4	1,2	1,4	2,0	2,4	2,9



Tabla 4.5. Emisiones base de NOx para turismos diésel. PIARC

Emisiones base de NOx [g/h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
10	7,7	9,0	10,3	12,2	14,5	16,9	19,9
20	7,9	9,5	11,6	14,7	18,4	23,1	28,4
30	8,0	10,1	12,8	17,3	22,4	29,3	36,9
40	8,0	10,2	13,5	19,0	25,8	34,8	45,8
50	8,0	10,4	14,2	20,6	29,2	40,2	54,7
60	8,4	11,3	16,2	23,9	35,2	51,0	71,6
70	8,7	12,4	18,7	28,9	43,6	63,0	87,8
80	7,6	11,9	20,0	34,0	56,7	88,8	126,6
90	8,3	13,3	24,5	43,9	70,0	108,6	171,6
100	9,6	14,2	27,0	50,9	86,7	131,1	204,2
110	13,3	21,9	37,9	68,5	114,3	178,8	247,4
120	19,3	32,4	53,2	86,2	142,7	239,2	316,1
130	25,4	47,9	77,1	120,9	191,6	291,5	373,4

Tabla 4.6. Emisiones base de humos para turismos diésel. PIARC.

Emisiones base de humos [m ² /h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0
20	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,7
30	1,1	1,4	1,6	2,0	2,3	2,7	3,1
40	1,2	1,4	1,8	2,3	2,8	3,4	4,0
50	1,2	1,5	2,0	2,7	3,4	4,2	4,8
60	1,3	1,6	2,1	2,8	3,8	4,9	6,0
70	1,3	1,8	2,5	3,2	4,3	5,3	7,0
80	1,3	1,9	2,8	3,8	5,3	6,6	8,6
90	1,5	2,2	3,2	4,6	6,5	8,2	9,7
100	2,0	2,6	3,8	5,6	7,6	9,4	10,6
110	2,7	3,5	4,7	6,6	8,9	10,5	11,7
120	3,4	4,6	6,3	7,9	9,6	11,2	12,5
130	4,3	6,2	8,1	9,9	11,1	12,6	14,1

4.1.1.1.2. Valores de emisiones base para vehículos comerciales ligeros



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 4.7. Emisiones base de CO para vehículos comerciales ligeros gasolina. PIARC.

Emisiones base de CO [g/h] 2018							
v [km/h]	Pendiente [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
10	35,3	38,1	41,7	45,5	50,2	55,9	61,8
20	35,9	40,1	46,8	51,7	58,3	67,8	83,4
30	36,5	42,2	51,9	57,9	66,5	79,7	105,1
40	37,8	43,2	57,4	67,8	86,2	116,5	123,2
50	39,5	44,2	57,6	70,0	90,0	124,0	141,3
60	40,8	47,1	61,2	69,3	93,8	131,6	204,7
70	44,0	51,8	71,9	90,8	126,5	193,5	381,1
80	52,1	61,6	81,3	98,3	164,5	272,5	645,7
90	52,3	67,8	99,1	118,4	237,1	581,9	1380,3
100	68,8	94,8	137,0	148,0	329,6	953,7	2194,7
110	108,9	150,0	203,1	238,1	609,9	1709,1	3479,0
120	174,1	240,8	323,1	468,3	1164,6	2709,5	4329,6
130	246,5	329,6	514,5	1073,3	2406,5	3959,4	4641,6

Tabla 4.8. Emisiones base de NOx para vehículos comerciales ligeros gasolina. PIARC.

Emisiones base de NOx [g/h] 2018							
v [km/h]	Pendiente [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	1,7	2,1	2,7	3,4	4,3	5,4	6,4
20	1,8	2,2	3,0	4,7	6,2	8,8	10,4
30	1,9	2,1	3,1	5,7	8,0	10,7	13,1
40	1,8	2,0	3,3	6,0	9,1	12,7	16,1
50	1,4	1,6	3,6	6,0	9,9	14,2	18,7
60	0,9	1,7	3,9	7,5	12,3	14,7	21,2
70	0,8	1,9	4,7	9,1	14,6	18,1	24,3
80	0,7	2,0	5,7	12,3	19,1	21,6	25,5
90	1,1	2,7	7,8	15,2	23,6	24,7	26,8
100	2,0	3,9	10,1	19,2	27,9	27,8	27,9
110	3,4	6,7	15,2	26,8	33,0	30,9	28,9
120	4,5	9,8	21,6	33,8	36,1	32,1	29,8
130	5,9	13,5	26,6	36,2	36,7	32,7	30,8



Tabla 4.9. Emisiones base de humos para vehículos comerciales ligeros gasolina. PIARC.

Emisiones base de humos [m ² /h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5
30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,8
40	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,9	1,1
50	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,8	1,5
60	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	1,2	2,4
70	0,2	0,2	0,3	0,6	1,2	2,4	5,1
80	0,5	0,5	0,7	0,9	2,0	4,3	9,6
90	0,8	0,9	1,0	1,2	3,1	7,1	13,6
100	1,1	1,2	1,4	2,0	5,2	9,5	18,8
110	1,4	1,8	2,2	3,9	7,3	14,6	26,1
120	1,7	2,3	3,0	5,2	9,4	22,0	32,7
130	2,3	2,9	3,9	6,5	13,8	30,2	40,4

Tabla 4.10. Emisiones base de CO para vehículos comerciales ligeros diésel. PIARC.

Emisiones base de CO [g/h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	0,9	1,0	1,2	1,5	1,6	1,8	2,1
20	1,0	1,2	1,5	1,8	1,9	2,1	2,3
30	1,0	1,3	1,6	2,0	2,2	2,4	2,6
40	1,1	1,3	1,7	2,0	2,3	2,5	2,9
50	1,1	1,4	1,7	2,1	2,5	2,8	3,0
60	1,0	1,4	1,7	2,1	2,7	3,0	3,4
70	1,1	1,6	1,8	2,3	3,0	3,3	3,8
80	1,4	1,7	1,9	2,5	3,3	3,6	4,2
90	1,7	2,0	2,1	2,6	3,5	3,9	5,1
100	2,0	2,3	2,2	2,8	3,9	4,6	5,7
110	2,4	2,6	2,5	3,0	4,4	5,4	6,2
120	2,8	3,0	3,4	4,2	5,4	6,0	6,6
130	2,9	3,6	4,2	5,1	6,0	6,4	6,8



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 4.0.11. Emisiones base de NOx para vehículos comerciales ligeros diésel. PIARC.

Emisiones base de NOx [g/h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
10	5,2	6,0	7,3	9,0	11,3	13,7	16,0
20	5,3	6,6	8,7	11,7	15,9	27,7	34,9
30	5,4	7,2	10,1	14,4	20,4	34,0	44,6
40	4,9	6,9	10,2	15,7	23,8	40,2	54,3
50	4,5	6,5	10,4	17,1	27,2	41,4	58,6
60	4,0	7,7	10,7	18,5	37,9	57,5	81,5
70	4,5	9,0	16,6	29,6	48,6	73,6	104,4
80	4,9	9,4	20,0	43,2	75,6	108,6	146,2
90	8,5	15,8	30,4	58,0	102,4	144,9	181,8
100	12,2	23,8	43,1	76,3	122,2	169,6	210,5
110	20,1	40,2	68,9	110,5	156,2	199,6	235,1
120	32,8	62,3	101,1	147,1	192,1	227,7	252,9
130	54,7	92,5	136,9	183,3	224,2	245,3	258,7

Tabla 4.12. Emisiones base de humos para vehículos comerciales ligeros diésel. PIARC.

Emisiones base de humos [m ² /h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
10	1,8	2,0	2,2	2,6	2,9	3,3	3,6
20	2,0	2,3	2,8	3,3	3,8	4,6	5,5
30	2,0	2,3	2,9	3,5	4,7	5,9	7,0
40	2,1	2,8	3,3	4,2	5,4	7,2	8,5
50	2,0	2,7	3,7	4,8	6,1	8,8	9,4
60	2,3	3,0	4,2	5,9	7,2	10,5	11,9
70	2,5	3,3	4,6	6,9	9,8	12,2	14,3
80	3,9	4,6	6,4	9,1	12,3	14,8	17,3
90	5,7	6,7	8,3	11,3	14,6	17,4	20,4
100	7,7	9,1	11,0	13,3	16,5	19,8	22,7
110	9,2	11,1	13,2	16,0	19,0	22,3	25,1
120	10,8	13,2	15,5	18,0	21,5	24,8	26,9
130	12,0	14,7	17,2	20,5	24,2	26,7	27,6



4.1.1.1.3. Valores de emisiones base para vehículos pesados

La Asociación Mundial de Carreteras no proporciona valores para las emisiones de vehículos pesados de gasolina por su escasa presencia en el parque vehicular, por lo que en este apartado sólo se muestran los valores de emisiones base para vehículos pesados diésel. [5] PIARC (2019).

Tabla 4.13. Emisiones base de CO para vehículos pesados diésel. PIARC.

Emisiones base de CO [g/h] 2018							
	Pendiente[%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
10	11,7	14,1	17,3	21,0	24,3	28,0	31,3
20	10,0	11,4	17,8	22,3	26,2	30,6	35,2
30	8,7	10,1	18,3	23,9	30,6	37,8	42,3
40	5,8	8,7	18,8	26,9	37,3	48,1	55,1
50	4,1	6,2	19,3	29,4	43,2	56,8	64,8
60	3,5	6,1	19,8	34,9	53,3	62,3	67,7
70	3,6	6,1	20,3	40,3	63,1	67,8	70,6
80	3,6	6,1	20,7	45,8	73,3	77,2	76,6
90	3,6	6,1	22,2	47,0	75,7	83,1	82,4
100	3,6	6,1	22,3	49,6	78,1	88,6	88,0



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 4.14. Emisiones base de NOx para vehículos pesados diésel. PIARC.

Emisiones base de NOx [g/h] 2018							
	Pendiente[%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
10	54,2	65,7	77,2	86,5	92,7	98,4	103,8
20	41,0	55,3	76,2	88,7	98,8	104,1	111,7
30	32,4	48,5	75,2	92,7	103,1	111,0	127,6
40	23,9	41,6	69,3	105,3	119,2	141,2	174,9
50	20,0	33,1	64,2	111,8	129,8	167,1	211,7
60	16,2	24,5	62,2	122,9	182,0	247,5	301,9
70	12,3	16,3	57,5	134,0	234,2	328,0	392,1
80	12,3	16,3	57,5	145,1	286,5	408,4	482,3
90	12,3	16,3	57,5	146,6	294,6	419,5	485,4
100	12,3	16,3	57,5	151,7	304,6	428,6	488,5

Tabla 4.15. Emisiones base de humos para vehículos pesados diésel. PIARC.

Emisiones base de humos [m ² /h] 2018							
	Pendiente [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
10	4,3	4,9	5,6	6,3	7,1	7,9	8,6
20	3,7	4,3	5,6	6,5	7,4	8,5	9,6
30	3,5	4,1	5,6	6,8	8,4	9,9	11,3
40	3,3	3,9	5,8	8,0	10,5	12,9	15,0
50	3,1	3,7	5,8	8,6	11,9	14,9	17,5
60	3,1	3,7	6,0	9,3	14,3	19,3	22,6
70	3,1	3,8	6,3	10,1	16,7	23,6	27,7
80	3,3	3,7	6,6	12,3	19,4	28,0	32,8
90	3,5	3,9	6,6	14,4	21,7	28,5	33,1
100	3,5	3,9	6,8	15,0	23,0	29,4	33,3



4.1.1.2. coeficientes correctores

De igual manera que la [5] PIARC (2019) propone unos valores de emisiones base para cada contaminante. Propone también unos coeficientes correctores con los que ajusta dichos valores a las condiciones que los rodean.

- Factor de tiempo:

El factor temporal ajusta los valores de emisiones base a la renovación que el parque de vehículos experimenta con el tiempo. De esta forma, establece los valores para turismos y vehículos comerciales, tanto ligeros como pesados. Para el año 2018, estos ajustes ya se han tenido en cuenta en el cálculo, por lo que el valor del coeficiente es 1.

- Factor de altitud:

Tanto la [5] PIARC (2019) como el CETU establecen, actualmente, que la influencia de la altitud por debajo de 2000 metros de altura es despreciable, escenario en el que se encuentra el túnel objeto de estudio.

- Factor de masa:

Este factor, aplicado exclusivamente a los vehículos pesados, ajusta el valor de las emisiones según los siguientes pesos de vehículos: 15, 23 y 32 toneladas. Los coeficientes se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 4.16. Factores de masa (fm). PIARC

TIPO	CO	NOx	Opacidad
15 T	0,9	0,9	0,9
23 T	1	1	1
32 T	1,2	1,2	1,2

4.1.2. Principio de cálculo de emisiones

El cálculo de las emisiones equivalentes de los vehículos se basa en los datos de emisiones base recogidos por la [5] PIARC y mencionados en el apartado anterior, los cuales dependerán de la pendiente y de la velocidad de diseño. Una vez elegidos, y habiéndoles aplicado los correspondientes coeficientes correctores, la forma de calcular las emisiones equivalentes para vehículos ligeros y vehículos pesados será la siguiente:



4.1.2.1. Emisiones equivalentes vehículos ligeros

La formulación para vehículos ligeros es la misma que se aplicará para calcular las emisiones equivalentes de los vehículos pesados; la diferencia está en los coeficientes correctores, así, la fórmula sugerida en el [1] *Manual de túneles y obras subterráneas* (2011) de López Jimeno para el cálculo de dichas ecuaciones será:

$$Q = q(v, i) \times f_h \times fa$$

Donde:

Q emisión equivalente de CO, NOx (g/h) u opacidad (m²/h) de cada vehículo

$q(v, i)$ emisión de base de CO, NOx (g/h) y opacidad (m²/h)

f_h factor de altitud

fa factor de envejecimiento del catalizador

Esta expresión se aplicará para cada tipo de emisión contaminante, CO, NOx y opacidad, independientemente. De dicho cálculo resultarán tres valores de emisiones, uno por cada contaminante, y se multiplicará por el número de vehículos en la distribución considerada, obteniendo así las emisiones totales de cada contaminante.

4.1.2.2. Emisiones equivalentes vehículos pesados

$$Q = q(v, i) \times f_m \times f_h$$

Q emisión equivalente de CO, NOx (g/h) u opacidad (m²/h) de cada vehículo

$q(v, i)$ emisión de base de CO, NOx (g/h) y opacidad (m²/h)

f_m factor de masa

f_h factor de altitud

Para obtener las emisiones totales procedentes del tráfico considerado se procederá a operar de igual manera que en el apartado anterior.



4.1.3. Caudal de aire necesario para la dilución de gases

Para el cálculo del caudal de aire fresco necesario para la dilución de las emisiones calculadas, el [1] *Manual de túneles y obras subterráneas* (2011) de López Jimeno propone la siguiente expresión para cada uno de los contaminantes analizados:

4.1.3.1. Caudal de aire necesario para la dilución de CO

$$Q_{CO} = \frac{Q_{et_CO}}{3600 \times CO_{admisible} \times 10^{-6}}$$

Donde

Q_{CO} caudal de aire total necesario para la dilución de CO

Q_{et_CO} caudal de emisiones de CO totales, calculadas en el apartado anterior

$CO_{admisible}$ valor máximo admisible de CO, se recomienda 30 ppm.

Para esta ecuación se ha pasado el valor límite de CO expresado en ppm a g/m^3 según la recomendación de conversión del CETU, por tanto, quedaría de la siguiente manera:

$$Q(m^3/s) = \frac{Q_{CO}(g/h)}{3600 \times CO_{admisible}(g/m^3)}$$

Siendo entonces el valor de $CO_{admisible} = 0,0345$

4.1.3.2. Caudal de aire necesario para la dilución de NOx

$$Q_{NOx} = \frac{Q_{et_NOx}}{3600 \times NOx_{admisible} \times 10^{-6}}$$

Donde

$NOx_{admisible}$ valor máximo admisible de NOx, se recomienda 5 ppm.

De la misma forma que para el CO, se ha procedido en el cálculo del caudal necesario para la dilución de NOx, quedando la expresión de la siguiente manera:

$$Q_{NOx}(m^3/s) = \frac{Q_{NOx}(g/h)}{3600 \times NOx_{admisible}(g/m^3)}$$

Siendo el valor de NOx admisible = 0,0645.



4.1.3.3. Caudal de aire necesario para la dilución de humos

$$Q_{opacidad} = \frac{Q_{et_opacidad}}{3600 \times opacidad_{admisible}}$$

Donde

$opacidad_{admisible}$ valor máximo de la opacidad, se recomienda $0,005 \text{ m}^{-1}$.

4.2. SEGUNDO MÉTODO: CENTRO DE ESTUDIO DE TÚNELES (C.E.T.U)

El segundo método adoptado para el cálculo de las emisiones contaminantes procedentes de vehículos en un túnel en servicio es el propuesto por el Centro de Estudio de Túneles francés en el documento [6] “*Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel*” (noviembre de 2012). Del mismo se ha detallado una versión anterior en el Capítulo 3: “Estado del arte”, del presente estudio.

El citado documento supone una actualización del anterior, publicado con el mismo nombre y fechado en abril de 2002, debido a la necesidad de incluir los cambios de normativa europea con respecto a las emisiones, norma Euro 5 y Euro 6 y a la actualización del parque vehicular.

4.2.1. Clasificación de vehículos

Para llevar a cabo un cálculo preciso de las emisiones, el Centro de Estudio de Túneles propone la clasificación de los vehículos según:

- El tipo de vehículo: vehículos pesados (VP), vehículos ligeros (VL) diferenciando en este último grupo los vehículos comerciales de los particulares.
- El tipo de combustible: gasolina, gasoil y otros combustibles.
- La edad: clasificando los vehículos según la fecha de matriculación en la norma europea a la que pertenecen.

Este estudio no tiene en cuenta los vehículos de dos ruedas por su escasa presencia en el conjunto total del parque vehicular.



4.2.2. Reglamentación europea sobre emisiones

Las normas PRE-EURO, Euro 1, Euro 2, Euro 3 y Euro 4 ya han sido citadas anteriormente en el capítulo: Estado del arte.

- Norma PRE-Euro
- Norma Euro 1 (1992-1996)
- Norma Euro 2 (1996-2000)
- Norma Euro 3 (2000-2005)
- Norma Euro 4 (2005-2008)
- Norma Euro 5 (2009-2013)
- Norma Euro 6 (2014-2019)

4.2.3. Principio de cálculo

4.2.3.1 principio de cálculo para vehículos ligeros

El principio de cálculo para determinar la emisión unitaria de un vehículo diésel o gasolina para un año dado consiste en la siguiente fórmula:

$$e_{VL} = \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cdot e_i$$

Donde:

e_{VL} es la emisión unitaria de un vehículo de gasolina o diésel en un año dado; este valor dependerá de la velocidad y la pendiente.

α_i es el porcentaje de vehículos de gasolina o diésel perteneciente al parque vehicular considerado; este valor dependerá además del tipo de vehículo y la norma Euro a la que pertenezca.

e_i es el valor unitario de la emisión de un vehículo de gasolina o diésel según la cilindrada y la norma Euro; este valor dependerá también de la pendiente y la velocidad consideradas.

Para simplificar este último valor se establecen unos factores para pasar de la Norma 4 a las demás normas. Los factores para pasar a las normas Euro 5 y Euro 6 se basan en una simulación desarrollada a partir de la evolución prevista de estas normas con relación a la norma Euro 4, mientras que el factor para pasar a las normas anteriores a esta, como la Norma Euro 3, la Euro 2..., se basa en la comparación de las emisiones entre vehículos pertenecientes a estas normativas y las pertenecientes a la Euro 4.



De esta forma se obtiene la siguiente expresión:

$$e_{VL} = e_4 \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cdot f_i$$

Donde:

e_4 será el valor de la emisión de un vehículo de gasolina o diésel según la norma Euro 4 para unas condiciones de pendiente y velocidad.

f_i será el valor del factor para pasar de la norma Euro 4 a la norma Euro 1. Este factor dependerá de las condiciones de velocidad y pendiente consideradas.

4.2.3.2. Principio de cálculo para vehículos pesados

El principio de cálculo para vehículos pesados es el mismo que para vehículos ligeros, añadiendo una consideración, el peso de los vehículos. Así, establece una división del parque vehicular según el peso, 10, 20 30 y >34 toneladas. Las tablas están diseñadas para vehículos con pesos mayores a 34 toneladas, asignando unos factores para determinar las emisiones correspondientes a los demás pesos. De la misma manera que en el apartado anterior, la ecuación para calcular las emisiones unitarias se basa en la norma Euro 4 y se aplican unos coeficientes para obtener el valor de las emisiones correspondientes a las demás normas.

$$e_{VP} = g \cdot e_4 \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cdot f_i$$

e_{VP} será la emisión unitaria de un vehículo pesado para un año dado en las condiciones de pendiente y velocidad consideradas.

g será el factor que traduce la influencia del peso calculada para vehículos mayores a 34 toneladas al peso de los restantes vehículos pesados, recogido en la Tabla 4.22.

e_4 será la emisión unitaria de un vehículo pesado, de tonelaje mayor a 34 toneladas, perteneciente a la Norma 4. Para las condiciones de pendiente y velocidad consideradas.
Tabla (...)

Los demás parámetros se han establecido en el apartado anterior.

4.2.4. Coeficientes para vehículos ligeros

- Emisiones unitarias de vehículos ligeros



En las tablas siguientes se recogen los valores de las emisiones unitarias de los vehículos ligeros.

Tabla 4.17. Emisiones de monóxido de carbono en l/h de un vehículo ligero de gasolina perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV Copert IV e INRETS.

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10	1,39	1,39	1,39	1,39	1,61	1,83	2,16
20	3,02	3,02	3,02	3,02	3,63	4,23	5,14
30	4,23	4,23	4,55	4,9	5,95	6,35	11,6
40	3,97	4,24	5,42	7,13	8,93	13,83	22,17
50	5,25	6,25	7,5	9,82	13,62	21,34	38,83
60	8,86	9,77	10,8	13,18	20,34	30,55	75,47
70	11,16	12,43	14,53	17,68	27,2	43,52	106,76
80	10,79	14,07	18,73	23,9	34,29	63,01	124,24
90	12,41	18	25,23	32,82	46,48	96,62	204,03
100	22,89	28,79	36,47	46,55	73,41	162,13	360,82
110	48,05	50	54,79	69,93	129,32	282,63	928,01

Tabla 4.18. Emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) en l/h de un vehículo ligero de gasolina perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV Copert IV e INRETS

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10	0,64	0,64	0,64	0,76	0,82	0,88	0,92
20	0,99	0,99	1,01	1,28	1,42	2	2,77
30	1,14	1,14	1,26	1,59	2,36	3,43	4,06
40	1,14	1,14	1,31	1,75	3,1	4,02	4,73
50	0,97	0,97	1,14	1,78	3,1	3,87	4,54
60	0,74	0,74	0,92	1,73	2,68	3,34	4,01
70	0,54	0,54	0,73	1,65	2,24	2,76	3,4
80	0,45	0,45	0,68	1,56	2,06	2,62	3,2
90	0,37	0,37	0,84	1,49	1,96	2,5	3,03



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



100	0,33	0,38	1,01	1,48	1,98	2,48	2,97
110	0,3	0,42	1,11	1,55	2,07	2,55	3,01

Tabla 4.19. Emisiones de monóxido de carbono en l/h de un vehículo ligero diésel perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS)

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10	1,13	1,13	1,13	2,96	4,91	6,93	9,3
20	0,88	0,88	1,11	4,14	7,01	2,7	1,45
30	0,65	0,65	1,23	4,42	1,88	1,07	1,08
40	0,51	0,35	1,07	4,32	0,84	0,85	0,86
50	0,73	0,73	1,31	4,19	1,21	1,23	1,23
60	1,48	1,48	3,49	4,29	2,47	2,5	2,73
70	2,93	2,93	10,84	4,82	4,92	4,98	6,64
80	3,6	3,6	21,77	5,95	6,07	7,19	9,79
90	4,72	4,72	34,95	7,86	8,02	11,32	15,14
100	6,38	6,38	12,05	10,71	12,76	18,29	24,11
110	8,68	12,44	14,37	14,66	21,02	29,51	38,19

Tabla 4.20. Emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) en l/h de un vehículo ligero diésel perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS)

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10	4,43	4,43	4,43	7,64	10,25	12,51	14,85
20	5,29	5,29	5,95	12,8	17,37	21,59	29,24
30	5,38	5,38	7,68	16,17	22,28	31,68	44,2
40	5,42	5,42	8,21	18,47	28,23	42,73	62,15
50	5,58	5,58	7,72	20,41	34,67	56,54	81,58
60	5,49	5,49	8,91	22,69	43,6	71,92	101,44
70	5	5	10,53	26,03	51,6	82,62	111,99
80	4,7	4,7	13,19	31,13	61,67	94,06	125,3



90	4,47	4,47	15,73	38,7	73,02	106,06	139,48
100	4,3	4,3	19,92	49,46	85,64	120,55	156,24
110	4,27	5,19	27,27	64,1	102,17	140,31	179,23

Tabla 4.21. Emisiones de Humos en m²/h de un vehículo ligero diésel perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS)

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10	1,11	1,11	1,11	2,01	2,76	3,41	4,09
20	1,32	1,32	1,53	3,44	4,71	5,9	7,68
30	1,37	1,37	2,03	4,46	6,23	8,43	11,21
40	1,4	1,13	2,22	5,26	7,79	11,1	15,27
50	1,49	1,49	2,16	6	9,6	14,6	19,88
60	1,51	1,51	2,59	6,88	12,05	18,39	24,2
70	1,45	1,45	3,28	8,06	14,44	21,51	26,15
80	1,42	1,42	4,31	9,73	17,3	23,86	28,5
90	1,41	1,41	5,44	12,06	20,58	26,2	31,01
100	1,4	1,4	7,03	15,23	23,38	28,88	33,88
110	1,42	1,79	9,41	19,41	26,66	32,4	37,68

Para la conversión de los resultados que el método Copert expresa en g/km se ha hecho uso de las siguientes relaciones:

- Humos:

$$1 \text{ g/h} = 4,7 \text{ m}^2/\text{h de humos}$$

(factor propuesto por la PIARC)

- A una temperatura de 25 °C y una presión de 1 atm se han considerado las siguientes densidades para CO, NO y NO₂ respectivamente; 28/24,5 kg/m³, 30/24,5 kg/m³ y 46/24,5.
- Se ha considerado también una relación entre NO y NO₂ de 10 en volumen.

- Corrección por altitud



Así como en el estudio anterior, el CETU establece coeficientes diferenciando alturas de 0, 1000 y 2000 metros. Actualmente considera despreciable la influencia de la altitud por debajo de los 2000 metros. Basándose en el estudio de la PIARC establecen un coeficiente a nivel del mar de 1 y un coeficiente de valor 2 para una altitud igual o superior a 2000m.

4.2.5. Coeficientes para vehículos pesados

En las siguientes tablas se muestran los coeficientes requeridos para las correcciones correspondientes a los vehículos pesados.

- Corrección por peso del vehículo diferente a 34 toneladas:

Estos coeficientes se han calculado mediante la observación de la relación entre las emisiones de vehículos pesados de distintos tonelajes y los vehículos pesados de tonelaje mayor a 34 toneladas. Las proporciones se han determinado mediante la metodología Copert IV.

Tabla 4.22. influencia del peso en las emisiones de los vehículos pesados. (Copert IV).

Tonelaje	10 t	20 t	30 t	> 34 t
Factor de corrección	0,45	0,73	0,91	1



- Emisiones unitarias de vehículos pesados:
En las tablas siguientes se recogen los valores de las emisiones unitarias de los vehículos pesados de tonelaje superior a 34 toneladas.

Tabla 4.23. Emisiones de monóxido de carbono en l/h de un vehículo pesado diésel de peso superior a 34 toneladas perteneciente a la norma euro 4, en función de los valores de pendiente y velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS).

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	13,25	15,97	20,58	27,47	32,84	33,23	39,28
20 km/h	11,3	14,83	20,63	29,94	39,4	49,71	57,92
30 km/h	7,65	11,93	19,32	33,64	48,03	60,72	77,89
40 km/h	5,17	9,27	17,59	37,18	55,69	72,21	97,89
50 km/h	3,48	6,94	15,77	40,49	62,56	84,76	117,68
60 km/h	2,24	4,87	14,01	43,58	68,82	93,64	127,49
70 km/h	1,27	3	12,36	46,5	74,61	88,72	127,49
80 km/h	0,48	1,28	10,85	49,27	80,03	82,39	127,49
86 km/h	0,06	0,3	10,02	50,87	83,13	82,39	127,49

Tabla 4.24. Emisiones de óxidos de nitrógeno en l/h de un vehículo diésel de peso superior a 34 toneladas perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS).

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10	30,93	41,86	58,5	91,6	121,21	163,21	196,63
20	29,2	46,41	78,93	129,86	203,49	269,93	344,01
30	21,82	41,54	80,42	160,54	268,7	370,08	473,93
40	15,77	34,61	75,94	187,66	330,63	465,68	599,75
50	11,12	27,35	72,29	212,73	394,93	557,91	716,4
60	7,42	20,2	70,07	236,51	459,2	647,49	764,66
70	4,34	13,28	63,72	259,45	512,91	734,91	764,66
80	1,68	6,59	41,49	281,83	537,44	760,77	764,66
90	0,24	2,67	13,32	295,08	527,37	760,77	764,66



Tabla 4.25. Emisiones de óxidos de nitrógeno en l/h de un vehículo diésel de peso superior a 34 toneladas perteneciente a la norma euro 4, en función de la pendiente y la velocidad. (De acuerdo con los datos del parque Copert IV e INRETS).

V (km/h)	pendiente (%)						
	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10	2,62	3,19	3,65	4,85	5,93	7,21	8,57
20	2,76	3,48	4,83	6,61	9,46	11,75	12,97
30	2,69	3,43	4,85	7,72	11,91	14,76	15,67
40	2,56	3,26	4,61	8,62	14,1	16,93	17,74
50	2,43	3,02	4,54	9,44	16,38	18,51	18,86
60	2,31	2,76	4,65	10,27	18,63	19,33	18,57
70	2,19	2,5	4,51	11,14	20,24	18,75	18,57
80	2,08	2,25	3,22	12,08	20,15	18,16	18,57
86	2,02	2,11	1,38	12,69	18,64	18,16	18,57

El método Copert no calcula emisiones en los siguientes casos:

- Para una velocidad mayor a 86 km/h
- Para una velocidad de 86 km/h no calcula emisiones para pendientes de 4% y 6%.
- Para una velocidad superior 73 km/h no calcula emisiones para pendiente del 4%.
- Para una velocidad superior a 55 km/h no calcula emisiones para pendiente del 6%.

Por tanto, una vez que son alcanzadas dichas velocidades máximas, se suponen emisiones constantes. Además, el citado método no calcula emisiones a velocidades inferiores a 12 km/h, suponiendo entonces que las emisiones a 10 km/h son las mismas que a 12 km/h.



- Corrección por altitud:

De la misma forma que para los vehículos ligeros, no se considera relevante la influencia de la altitud por debajo de los 2000 metros.

4.2.6. Factor de paso de la Norma 4 a otras normas

- Factores de corrección para vehículos ligeros:

En la siguiente tabla se recogen los factores de corrección y ecuaciones necesarias para pasar de la Norma 4 a las restantes. Estos factores dependerán de la velocidad considerada.

En el caso de las emisiones de partículas de vehículos diésel, el uso del filtro de partículas permite establecer una relación de reducción mayor a la proporcionada por la normativa, por lo que el método Copert IV se basa en los resultados de varias pruebas realizadas con vehículos equipados con filtros de partículas.

Tabla 4.26. Factores de paso de emisiones de la norma 4 a otras normas para vehículos ligeros diésel y gasolina (C.E.T.U 2012).

	Euro 6	Euro 5	Euro 4	Euro 3	Euro 2	Euro1	PRE-Euro
CO VL Diésel	1	1	1	1,15	2,34	$-2,9 \cdot 10^{-4}v^2 + 3,3 \cdot 10^{-2} + 2$	$-1,24 \cdot 10^{-3}v^2 + 0,15v + 1,92$
CO VL Gasolina	1	1	1	$10,2v^{-0,34}$	$182v^{-0,91}$	$593v^{-0,97}$	$6820v^{-1,45}$
NOx VL Diésel	0,32	0,72	1	1,34	1,34	$-2,9 \cdot 10^{-6}v^3 + 5,2 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,025v + 1,6$	$8,6 \cdot 10^{-5}v^2 - 0,0145v + 1,84$
NOx VL Gasolina	0,75	0,75	1	$1,93 \cdot 10^{-2}v + 0,74$	$2 \cdot 10^{-3}v^2 - 9,8 \cdot 10^{-2}v + 6,5$	$8,05 \cdot 10^{-3}v^2 - 0,526v + 16,245$	$1,56 \cdot 10^{-2}v^2 - 0,21v + 16,4$
Humos VL Diésel	0,05	0,05	1	$1,2 \cdot 10^{-4}v^2 - 8,5 \cdot 10^{-3}v + 1,2$	$1,5 \cdot 10^{-4}v^2 - 1,5 \cdot 10^{-2}v + 1,95$	$2,9 \cdot 10^{-4}v^2 - 2,1 \cdot 10^{-2}v + 2,25$	$-1,6 \cdot 10^{-2}v + 7,2$

- Factores de corrección para vehículos pesados:

De la misma forma que en el apartado anterior, en las siguientes tablas se recogen los factores y ecuaciones necesarios para determinar las emisiones en su norma



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



correspondiente. En el caso de los vehículos pesados y las normas Euro 3, Euro 6 y Euro 5, esta corrección dependerá de los valores de pendiente y velocidad escogidos.

Tabla 4.27. Factores de paso de emisiones de vehículos pesados de la norma euro 4 a las normas PRE-euro, euro 1 y euro 2. (Copert IVCopert IV).

	CO	NOx	Humos
PRE-Euro	2,7	2,35	12
Euro 1	2,3	1,7	9,5
Euro 2	2	1,8	5
Euro 4	1	1	1

Tabla 4.28. factores de paso de las emisiones de un vehículo pesado de la norma euro 4 a la norma euro 6.

pendiente (%)	CO	NOx	PM
-6	1	0,58	0,1
-4	1	$3 \cdot 10^{-5}v^2 - 3,3 \cdot 10^3v + 0,62$	0,1
-2	1	0,4	0,1
0	1	$5,4 \cdot v^{1,12}$	0,1
2	1	$3 \cdot 10^{-4}v + 0,037$	0,1
4	1	$5 \cdot 10^{-9}v^4 - 1,1 \cdot 10^{-6}v^3 + 9,5 \cdot 10^{-5}v^2 - 3,2 \cdot 10^{-3}v + 0,085$	0,1
6	1	$7 \cdot 10^{-5}v^2 - 0,0037v + 0,09$	0,1

Tabla 4.29. Factores de paso de emisiones de vehículos pesados de la norma euro 4 a la norma euro 5.

pendiente (%)	CO	NOx	Humos
-6	1,5	1,5	$4,38 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,0573v + 2$
-4	$4,54 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,025v + 1,675$	$3 \cdot 10^{-6}v^3 - 0,0004v^2 + 0,0107v + 1,46$	$2,8 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,042v + 1,82$
-2	$-2,3 \cdot 10^{-4}v^2 + 0,023v + 1,19$	1,5	$2,7 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,04235v + 2$
0	$-4,65 \cdot 10^{-7}v^4 + 9,11 \cdot 10^{-5}v^3 - 0,0062v^2 + 0,173v + 0,1$	$-0,0154v + 1,57$	$-9,8 \cdot 10^{-6}v^3 + 0,0017v^2 - 0,0927v + 2,5$
2	$-4,98 \cdot 10^{-7}v^4 + 9,7 \cdot 10^{-5}v^3 - 0,0067v^2 + 0,195v - 0,012$	$9,8v^{0,808}$	$1,44 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,02v + 1,53$



4	1,95	$5,33 \cdot 10^{-7}v^4 - 1,135 \cdot 10^{-4}v^3 + 8,47 \cdot 10^{-3}v^2 - 0,2575v + 3$	$2,86 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,0325v + 1,67$
6	$-0,0107v + 1,9$	$4,463 \cdot 10^{-7}v^4 - 8,02 \cdot 10^{-5}v^3 + 5,2 \cdot 10^{-3}v^2 - 0,14v + 1,66$	$-0,0144v + 1,34$

Tabla 4.30. Factores de paso de emisiones de vehículos pesados de la norma euro 4 a la norma euro 3.

pendiente (%)	CO	NOx	Humos
-6	$0,1v^{1,305}$	$0,2045v^{0,895}$	$0,04v + 8,5$
-4	$0,3v^{0,863}$	$7,95 \cdot 10^{-5}v^3 - 0,0081v^2 + 0,22v + 0,78$	$0,05v + 6,8$
-2	$0,04v + 1,7$	$2,2 \cdot 10^{-6}v^4 - 0,000362v^3 + 0,01999v^2 - 0,411v + 4,2$	$0,00486v^2 - 0,365v + 11,8$
0	$0,0125v + 1,5$	$-0,0034v + 1,65$	$9v^{-0,1832}$
2	1,65	$-0,0045v + 1,7$	$1,2 \cdot 10^{-3}v^2 - 0,1283v + 6,5$
4	$0,955v^{0,184}$	1,45	$2 \cdot 10^{-3}v^2 - 0,1433v + 5,65$
6	$-0,0112v + 1,5$	$-1,05 \cdot 10^{-5}v^3 + 0,001v^2 - 0,029v + 1,7$	$0,046v + 2,74$

4.3. CÁLCULO DE PERDIDAS DE CARGA Y POTENCIA

El objetivo del cálculo de las pérdidas de carga producidas en el interior del túnel es el dimensionamiento de los equipos de ventilación necesarios. Este estudio no tiene como propósito fundamental dimensionar los equipos, puesto que se centra en la comparación de los caudales de aire necesarios, calculados por distintos métodos y en distintos escenarios. Esto queda satisfecho con el cálculo de la pérdida de carga y la potencia total.

Para llevar a cabo este cálculo se ha recurrido al método propuesto para tal fin por [1] Carlos López Jimeno en su *Manual de túneles y obras subterráneas* (2011), que se detalla a continuación:

4.3.1. Pérdidas de carga

En primer lugar, se diferencian, principalmente, dos tipos de pérdidas (lineales y singulares); aunque también es posible reconocer otro tipo de pérdidas que se describirán a continuación.



4.3.1.1. Pérdidas lineales

Las pérdidas de carga lineales son las producidas por la fricción del flujo de aire con las paredes y suelo del túnel, así se diferencian ambas:

- Pérdidas debidas a la fricción del flujo de aire con las paredes del túnel:

$$\Delta P = \frac{\lambda \cdot L(i) \cdot \rho(i) \cdot v(i)^2}{2 \cdot D_H(i)}$$

Donde

λ	Coefficiente de fricción del cantón, el cual se ha determinado en las tablas que se detallan al final de esta sección.
$L(i)$	Longitud del tramo.
$\rho(i)$	Densidad del aire.
$v(i)^2$	Velocidad del aire a la entrada del túnel.
$D_H(i)$	Diámetro hidráulico del cantón.

En este caso, no se ha dividido el túnel en tramos, por lo que la longitud del tramo se corresponderá con la total de túnel, la densidad del aire no varía tampoco y, para la velocidad del aire, se ha considerado la velocidad en la boca del túnel, así como el diámetro hidráulico que tampoco se ve afectado.

Coefficiente de fricción:

$$\lambda = 0,7 \lambda_p + 0,3 \lambda_s$$



Tabla 4.31. coeficiente de acabado superficial de las paredes. López Jimeno. 2000.

SOSTENIMIENTO		λ_p	
ROCA DESNUDA	Pared bien recortada	0,058	
	Pared con acabado medio	0,084	
	Pared irregular	0,108	
ROCA BULONADA	Pared bien recortada	0,058	
	Pared con acabado medio	0,084	
	Pared irregular	0,108	
	Pared con tela metálica	0,130	
ROCA REVESTIDA	Hormigón liso	0,022	
	Albañilería	Buen estado	0,025
		Estado medio	0,030
		Irregular	0,040

Tabla 4.32. coeficiente del suelo. López Jimeno. 2000.

CARACTERISTICAS DEL SUELO	λ_s
Suelo hormigonado o asfaltado	0,03
i= 5 cm	0,06
i=15 cm	0,08
i=30 cm	0,108

4.3.1.2. Pérdidas singulares

La expresión que define las pérdidas singulares de manera general es la siguiente:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Donde

ζ coeficiente de pérdida de carga.

En el caso de la ventilación longitudinal, objeto de este estudio, y debido a que no se ha dividido en tramos, y por lo tanto no se contempla ningún cambio de sección, se



considera que el coeficiente de pérdida de cara ζ toma el valor de 0,6 en la boca de entrada y 1 en la boca de salida.

4.3.1.3. Otro tipo de pérdidas

En este estudio, se considera que no se producen pérdidas por viento en contra con lo que las pérdidas por efecto pistón quedarían definidas de la siguiente manera:

$$F_p = \sum \left(\frac{C_x \cdot A' \cdot \rho(i) \cdot (U - v(i)) \cdot |U - v(i)|}{2 \cdot A} \cdot N_v \right) \cdot \frac{L(i)}{1000}$$

Donde:

A' área frontal de cada tipo de vehículos

A sección del túnel

C_x coeficiente aerodinámico para cada tipo de vehículos

U velocidad de los vehículos

N_v número de vehículos que se encuentran en el túnel para cada velocidad considerada

Otro tipo de pérdida de carga es el denominado efecto chimenea:

$$\Delta H = (\rho(i) - \rho_0) \cdot \gamma \cdot L(i) \cdot g$$

Donde

ρ_0 densidad del aire a temperatura ambiente

$\rho(i)$ densidad del aire en el túnel

γ pendiente del túnel

g aceleración de la gravedad

4.3.2. Potencia

La potencia requerida viene definida de la siguiente manera:

$$potencia \text{ (wattios)} = \frac{Q[m^3/s] \times Presion_{total}[Pa]}{\eta_{ventilador} [\%]}$$



Donde

$Q[m^3/s]$ Caudal de aire necesario para la disipación de los gases

$Presion_{total}[Pa]$ La suma de las pérdidas carga

$\eta_{ventilador} [\%]$ Rendimiento del ventilador, considerado 0,8.



5. RESULTADOS

5.1. ÁMBITO DE ESTUDIO: TÚNEL DEL FABAR

Con objeto de establecer un marco inicial para las hipótesis de cálculo del presente Trabajo Fin de Grado, se ha partido de un ejemplo real de túnel, en el que los caudales necesarios para el correcto servicio del túnel se proporcionen mediante ventilación longitudinal. El túnel seleccionado a tal fin es el denominado “Túnel del Fabar”, que en posteriores líneas se describirá, si bien se comenzará señalando cuáles han sido dos de los aspectos más destacados para su selección. En primer lugar, el ámbito en el que se ubica, una autovía y, en segundo lugar, su longitud, 1,5 km. Dicha longitud supone el máximo idóneo para la aplicación de la ventilación longitudinal en vías interurbanas densas conforme a las recomendaciones recogidas en la Tabla 3.1. Al margen de estos aspectos intrínsecamente relacionados con el objeto del presente Trabajo Fin de Grado, la infraestructura presenta otra particularidad que quedará puesta de manifiesto en los siguientes párrafos: el rico patrimonio geológico que el desarrollo de la obra contribuyó a poner de manifiesto, y que contribuyó a bautizar el túnel con su segundo sobrenombre, habitualmente empleado, “Túnel del Ordovícico”).

Se ha considerado los aspectos constructivos y de localización de “El Túnel del Fabar”, también conocido como túnel ordovícico del Fabar; como modelo base para los cálculos, varían, en cada escenario contemplado, ciertos aspectos, ya sean constructivos, como de intensidad y tipología del tráfico que lo atraviesa.

Dicho túnel se encuentra sobre la Autovía del Cantábrico A-8, en la localidad de Ribadesella, Asturias. Se ha elegido este túnel en particular debido a la gran cantidad de información que, dados los importantes hallazgos científicos descubiertos durante su ejecución, se ha publicado con respecto a sus aspectos constructivos y de localización.



Ilustración 1. Vista satélite de “Los túneles del Fabar”, Ribadesella, Asturias. Imagen obtenida de Google maps.

Dicho túnel, consta de dos tubos paralelos, uno para cada sentido de circulación, los cuales se llevaron a cabo mediante el denominado “Nuevo Método Austriaco” como se menciona en el libro [8] *Un Tesoro Geológico en la Autovía del Cantábrico*, Ministerio de Fomento (2002).

Cabe mencionar que, a efectos prácticos, se ha “simplificado” el diseño original del túnel, como se detallará más adelante cuando corresponda explicar las características base, ya que para el análisis que compete a este estudio no es necesario considerar los dos tubos que lo componen, sino que el cálculo teórico queda definido con solo uno de ellos.



Ilustración 2. Vista frontal de uno de los tubos que componen Los túneles del Fabar. Imagen obtenida de Google maps.

Para finalizar la contextualización del túnel objeto del presente estudio, es necesario mencionar la importancia que ha tenido para la historia y la ciencia. Durante la ejecución de las obras se realizó una exploración paleontológica que dio como resultado el descubrimiento de fósiles pertenecientes a alrededor de dos centenares de especies distintas, de las cuales 14 eran nuevas para la ciencia. Además, se encontró el petróleo más antiguo de Europa centro-meridional y capas de roca que evidencian dos sucesos acaecidos hace alrededor de 460 millones de años: un tsunami y una erupción volcánica, relevantes por su gran escala.



Ilustración 3. Fósiles encontrado en el Túnel Ordovícico del Fabar. Imagen obtenida de la página web del Ayuntamiento de Ribadesella.



5.1. CARACTERÍSTICAS DEL SUPUESTO BASE

A continuación, se detallan los principales aspectos considerados:

- Aspectos constructivos del túnel:

Tabla 5.1. Características del túnel considerado.

Sección (m ²)	89	
Longitud (Km)	1,5	
Perímetro (m)	10,6	
Pendiente (%)	0,2	
Altura sobre el nivel del mar (m)	70	
Revestimiento	Paredes	hormigón liso
	suelo	suelo hormigonado o asfaltado

- Aspectos ambientales:

Tabla 5.2. Características ambientales en el túnel.

Temperatura media en el túnel (K)	288
Diferencia de T respecto del medio (K)	4
Presión (mmHg)	760

- Características del parque vehicular en España

Tabla 5.3. Características del parque vehicular considerado.

Intensidad del tráfico punta (veh/h)	570
Velocidad de circulación (km/h)	90

COMPOSICIÓN DEL PARQUE VEHICULAR		
Distribución parque vehicular		
vehículos pesados (%)	Gas-oil PRE-EURO	1,5663
	Gas-oil EURO 1	0,7341
	Gas-oil EURO 2	1,6553
	Gas-oil EURO 3	3,4245
	Gas-oil EURO 4	3,7374
	Gas-oil EURO 5	1,7822
	Gas-oil EURO 6	2,6899
	Gasolina PRE-EURO	0,8087
	Gasolina EURO 1	0,1966
	Gasolina EURO 2	0,1495
	Gasolina EURO 3	0,2175



	Gasolina EURO 4	0,1448
	Gasolina EURO 5	0,0541
	Gasolina EURO 6	0,1086
	Otros PRE-EURO	0,0002
	Otros EURO 1	0,0002
	Otros EURO 2	0,0004
	Otros EURO 3	0,0019
	Otros EURO 4	0,0051
	Otros EURO 5	0,0102
	Otros EURO 6	0,0398
vehículos ligeros (%)	Gas-oil PRE-EURO	0,6283
	Gas-oil EURO 1	0,5784
	Gas-oil EURO 2	2,9518
	Gas-oil EURO 3	10,3452
	Gas-oil EURO 4	12,5449
	Gas-oil EURO 5	9,0305
	Gas-oil EURO 6	10,2861
	Gasolina PRE-EURO	6,9814
	Gasolina EURO 1	1,6144
	Gasolina EURO 2	3,0486
	Gasolina EURO 3	6,8332
	Gasolina EURO 4	5,3882
	Gasolina EURO 5	3,7567
	Gasolina EURO 6	8,4615
	Otros PRE-EURO	0,0024
	Otros EURO 1	0,0026
	Otros EURO 2	0,0005
	Otros EURO 3	0,0038
	Otros EURO 4	0,0043
	Otros EURO 5	0,0166
Otros EURO 6	0,1929	

- Coeficientes límites adoptados:

Los coeficientes límites adoptados son los sugeridos en el “Manual de Túneles y Obras Subterráneas” de Carlos López Jimeno (2014).

Tabla 5.4. Coeficientes límite de los gases contaminantes.

CO (p.p.m)	30
NOx (p.p.m)	5
Humos (m ⁻¹)	0,005



5.2. VARIABLES CONSIDERADAS

El presente estudio se ha basado en el diseño de un túnel real, al que se le han ido modificando ciertos parámetros constructivos y del tráfico que lo atraviesa para poder comparar y analizar la influencia que tienen dichos parámetros en el tipo de ventilación necesario y la potencia requerida. Las variables consideradas se agrupan de la siguiente manera:

- Aspectos constructivos:
 - Longitud
 - Pendiente
- Aspectos relacionados con los vehículos:
 - Evolución del parque vehicular
 - Tipo de motor
 - Velocidad de circulación



5.3. ANÁLISIS DE LAS INFLUENCIAS DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en este estudio, el cuál se ha basado en el estudio realizado para un periodo temporal anterior realizado por [3] Rubén Pérez Álvarez, “*Requerimientos de ventilación longitudinal en túneles carreteros unidireccionales en explotación*” (2010).

Dichos resultados se dividen en dos partes, la primera de las cuales, trata de la influencia tanto del parque vehicular dividido en vehículos según su tamaño, año de matriculación y carburante, como la influencia de los aspectos constructivos y de diseño del túnel objeto de este trabajo. Mientras la segunda parte aborda la influencia en la concentración de emisiones, en el túnel de diseño, sumando la presencia de los vehículos híbridos y un hipotético caso en el que todos los vehículos fuesen híbridos.

5.1.1. Influencia de la evolución del parque vehicular

En este apartado se ha procedido a analizar que influencia tiene la variación del parque vehicular a lo largo del periodo 2014-2018, según los métodos del CETU y de López Jimeno respectivamente.

En el caso calculado mediante el método propuesto por el CETU para el cálculo de emisiones, se puede apreciar cómo desde el inicio del periodo evaluado, el año 2014, hasta el final de dicho periodo, el año 2018, las emisiones de todos los contaminantes han sufrido una progresiva disminución, lo cual se debe tanto al intento por parte de los fabricantes de disminuir las emisiones de sus vehículos, gracias al avance de las tecnologías, como al rejuvenecimiento que el parque vehicular experimenta cada año, el cual se deshace de sus coches mas antiguos. Así es posible, también, que haya influido el reciente crecimiento en la fabricación de vehículos alimentados por combustibles alternativos o los que disponen de motores eléctricos.

Debido a que las emisiones han disminuido, también lo ha hecho el caudal de aire necesario para la dilución de dichos gases en el interior de los túneles y, por tanto, la potencia de ventilador necesaria para mantener dicho flujo de aire fresco.

Tabla 5.5. Influencia de la evolución del parque vehicular. Resultados obtenidos a partir de la aplicación del Método CETU (2012).

AÑOS	2018	2017	2016	2015	2014
EMISIÓN DE CO (m ³ /h)	494,88	507,72	528,48	550,72	574,23
EMISIÓN DE NO _x (m ³ /h)	536,02	539,88	566,28	592,42	617,32
EMISIÓN DE HUMOS (m ² /h)	81,94	81,28	86,05	90,85	96,49



CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	4,58	7,51	4,89	5,10	5,32
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	29,78	29,99	31,46	32,91	34,30
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ² /s)	4,55	4,52	4,78	5,05	5,36
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	29,78	29,99	31,46	32,91	34,30
INCREMENTO (%)	-0,71	-4,66	-4,41	-4,03	0,00
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,33	0,34	0,35	0,37	0,39
RESISTENCIA AERODINAMICA					
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,24	0,24	0,26	0,29	0,31
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,11	0,11	0,12	0,14	0,15
EFFECTO CHIMENEA (Pa)	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07
EFFECTO PISTÓN (Pa)	37,29	37,28	37,26	37,23	37,21
SOBREPRESIÓN (Pa)	37,63	37,63	37,64	37,66	37,67
INCREMENTO (%)	0,00	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
POTENCIA TOTAL (W)	1400,81	1410,94	1480,36	1549,17	1614,84
INCREMENTO (%)	-0,72	-4,69	-4,44	-4,07	0,00

Sin embargo, el mismo caso analizado por el método propuesto por López Jimeno en su libro [1] *Manual de túneles y obras subterráneas* (2011), no muestra tanta diferencia en la reducción de emisiones ni, por tanto, en el caudal de aire necesario o la potencia de ventilador necesaria.

Según los datos reflejados en la tabla siguiente, la correspondiente a los resultados obtenidos por dicho método, es a partir de 2017 cuando se aprecia una disminución en los valores de los ya mencionados parámetros, sin ser esta demasiado significativa.

En definitiva, según este método, entre los años 2015 y 2018 no se produce ningún cambio significativo que afecte al volumen de aire fresco necesario para la correcta ventilación del túnel. Esto puede deberse a que este método no considera la división del parque vehicular según el año de matriculación.



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 5.6. Influencia del parque vehicular. Método López Jimeno (2011).

AÑO	2018	2017	2016	2015	2014
EMISIÓN DE CO M3 (g/h)	155,48	153,99	152,84	153,91	143,22
EMISIÓN DE NOx (g/h)	312,51	315,52	315,57	315,79	224,52
EMISIÓN DE HUMOS (m ² /h)	39,55	39,95	40,10	40,27	24,00
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	1,25	1,24	1,23	1,24	1,15
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	13,46	13,59	13,59	13,60	9,67
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS	2,20	2,22	2,23	2,24	1,33
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	13,46	13,59	13,59	13,60	9,67
INCREMENTO (%)	-0,95	-0,02	-0,07	40,65	0,00
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,11
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
EFFECTO CHIMENEA (Pa)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
EFFECTO PISTÓN (Pa)	37,56	37,56	37,56	37,56	37,63
SOBREPRESIÓN (Pa)	37,65	37,65	37,65	37,65	37,67
INCREMENTO (%)	0,00	0,00	0,00	-0,05	0,00
POTENCIA TOTAL (W)	633,39	639,48	639,59	640,03	455,32
INCREMENTO (%)	-0,95	-0,02	-0,07	40,57	0,00

Para concluir este apartado, al analizar ambos métodos, se aprecia que los resultados obtenidos mediante el método propuesto por el CETU son significativamente más altos, lo cual lo convierte en un método más seguro, al menos, en este caso.

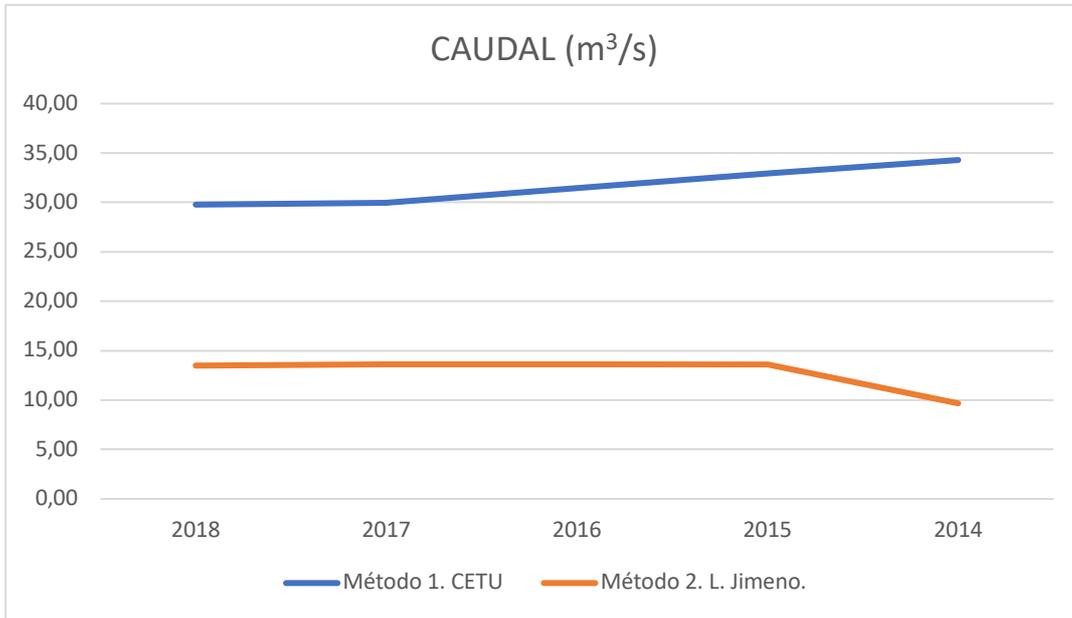


Ilustración 5.1. Influencia de la variación del parque vehicular, en el periodo comprendido entre los años 2014 y 2018, en el caudal de aire necesario para la dilución de contaminantes.

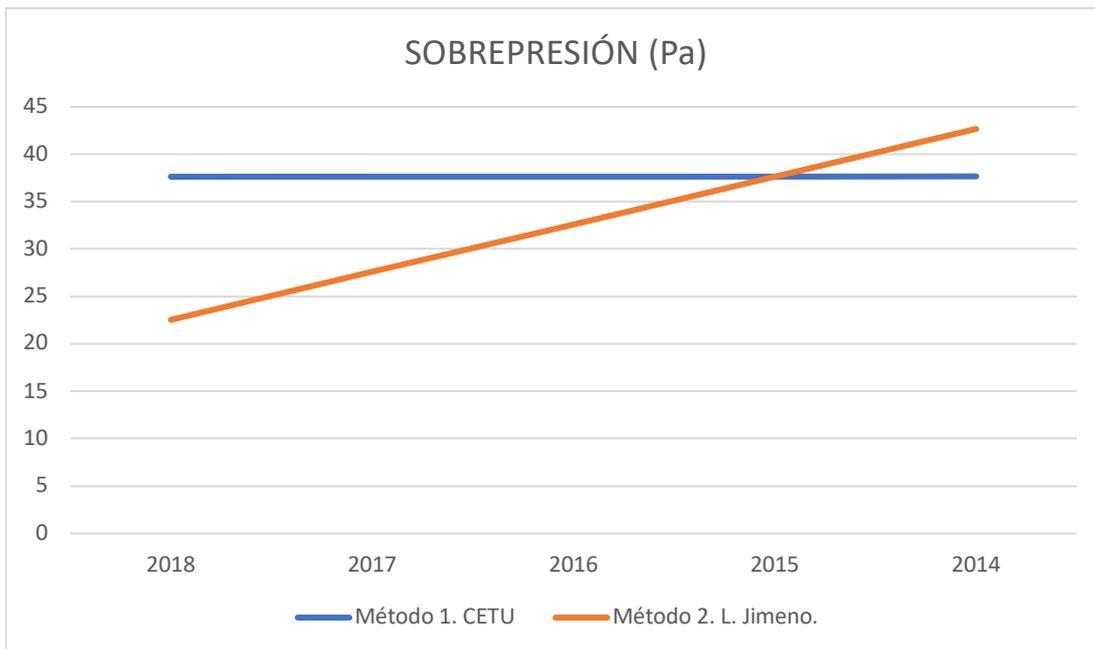


Gráfico 5.2. Influencia del rejuvenecimiento del parque vehicular en la sobrepresión.



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel

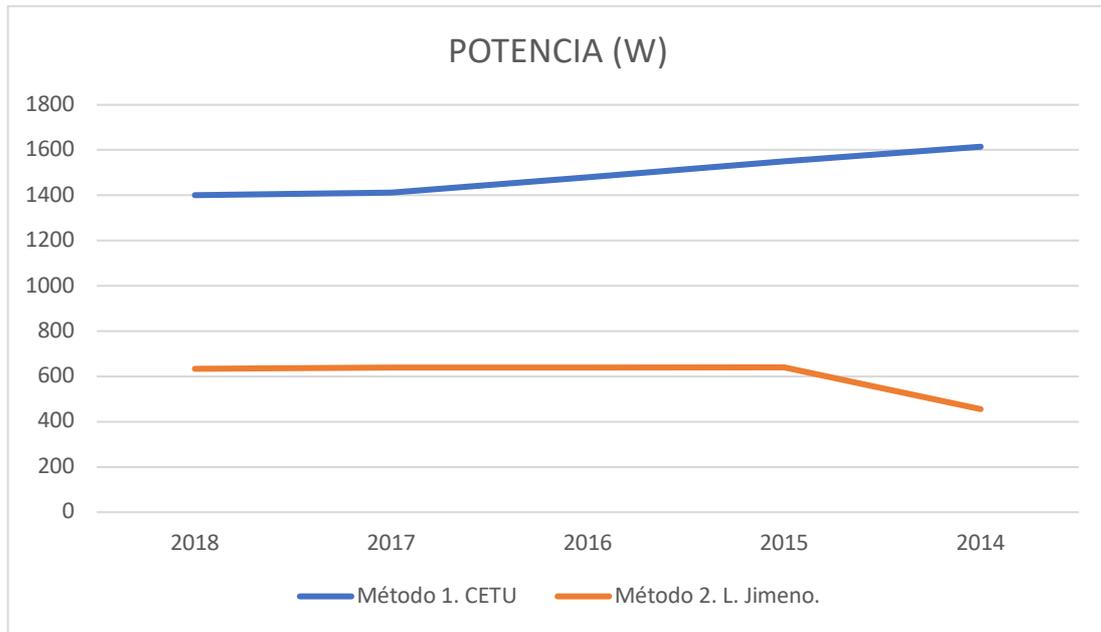


Gráfico 5.3. Influencia del rejuvenecimiento del parque vehicular en la potencia.



5.1.2. Influencia de la pendiente

En este apartado, se ha tratado de analizar, para el año 2018, la influencia que tiene el incremento de la pendiente en el aumento de emisiones y por tanto el incremento tanto de caudal de aire necesario como de potencia necesaria de ventilador para la disipación de dichos contaminantes. Para lo cual se han mantenido intactos los parámetros del túnel de diseño variando sólo la pendiente. Se ha evaluado este escenario desde una pendiente descendente del 6 % a una pendiente ascendente del mismo valor, mediante los dos métodos ya mencionados.

En la Tabla 5.5 se recogen los resultados obtenidos mediante el método del CETU. De dicha tabla puede deducirse que, si bien es cierto que, tanto los valores de las emisiones procedentes de los vehículos como los correspondientes al caudal de dilución y la potencia requerida aumentan a medida que aumenta la pendiente, no lo hacen de la misma manera según el tipo de pendiente: descendente o ascendente

La pendiente descendente comprende desde el valor -6% hasta 0%. En este tramo se puede apreciar como el aumento en las emisiones, el caudal de aire de dilución y la potencia de ventilador requerida aumentan, pero es a partir de la pendiente horizontal, cuando estos valores aumentan más drásticamente alcanzando el mayor valor para la pendiente ascendente de 6 %, la mayor de las evaluadas.

Puede apreciarse como la pendiente apenas influye en las pérdidas de carga que sufre el flujo de aire a su paso por el túnel. A excepción, de las pérdidas de carga debidas al denominado “efecto chimenea”, en las cuales interviene la pendiente y son mayores cuanto mayor es esta. Causando el aumento de la sobrepresión final.

De esta manera, también la potencia de ventilador requerida aumenta con la pendiente.



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 5.7. Influencia de la pendiente. Resultados obtenidos a partir de la aplicación del Método CETU (2014).

PENDIENTE (%)	-6	-4	-2	0	2	4	6
EMISIÓN DE CO (m ³ /s)	171,467	237,927	499,367	494,961	685,003	1301,651	2595,958
EMISIÓN DE NOx (m ³ /s)	51,922	58,115	161,124	380,595	881,913	1275,977	1309,078
EMISIÓN DE HUMOS (m ² /s)	13,747	13,797	26,941	79,993	149,879	178,953	174,781
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	1,588	2,203	4,624	4,583	6,343	12,052	24,037
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	2,885	3,229	8,951	21,144	48,995	70,888	72,727
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ² /s)	0,764	0,766	1,497	4,444	8,327	9,942	9,710
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	2,885	3,229	8,951	21,144	48,995	70,888	72,727
INCREMENTO (%)	0,00	11,93	177,25	136,21	131,72	44,68	2,59
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,032	0,036	0,101	0,238	0,551	0,796	0,817
RESISTENCIA AERODINAMICA							
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,002	0,003	0,021	0,119	0,638	1,336	1,406
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,001	0,001	0,010	0,056	0,301	0,630	0,664
EFEECTO CHIMENEA (Pa)	-5,074	-10,147	-15,221	0,000	5,074	10,147	15,221
EFEECTO PISTÓN (Pa)	37,742	37,736	37,639	37,432	36,959	36,587	36,556
SOBREPRESIÓN (Pa)	37,745	37,740	37,670	37,607	37,898	38,554	38,626
INCREMENTO (%)	0,00	18,40	22,91	-40,30	-12,48	-11,76	-9,556
POTENCIA TOTAL (W)	136,099	152,310	421,502	993,959	2321,045	3416,211	3511,391
INCREMENTO (%)	0,00	-5,47	125,57	295,69	164,78	63,97	13,43



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



El mismo caso, resuelto por el método propuesto por López Jimeno, refleja un aumento, también, de los parámetros, pero en general los valores aportados por el método del CETU, son mayores y por tanto garantiza estar del lado de la seguridad.



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 5.8. Influencia de la pendiente. Resultados obtenidos a partir de la aplicación del Método de López Jimeno (2011).

PENDIENTE (%)	-6	-4	-2	0	2	4	6
EMISIÓN DE CO M3 (g/h)	54,96	72,20	103,73	155,48	289,3	104,76	231,17
EMISIÓN DE NOx (g/h)	55,19	90,68	169,57	312,51	516,98	246,13	304,03
EMISIÓN DE HUMOS (m ² /h)	15,98	20,50	27,4	39,55	55,57	28,00	33,62
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	0,44	0,58	0,84	1,25	2,33	0,84	1,86
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	2,38	3,91	7,30	13,46	22,26	10,60	13,09
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	0,89	1,14	1,52	2,20	3,09	1,56	1,87
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	2,38	3,91	7,30	13,46	22,26	10,60	13,09
INCREMENTO (%)	3,26	5,35	10,00	18,44	30,50	14,52	17,94
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,03	0,04	0,08	0,15	0,25	0,12	0,15
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,00	0,00	0,01	0,05	0,13	0,03	0,05
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,00	0,00	0,01	0,02	0,06	0,01	0,02
EFEECTO CHIMENEA (Pa)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
EFEECTO PISTÓN (Pa)	37,75	37,72	37,67	37,56	37,41	37,61	37,57
SOBREPRESIÓN (Pa)	22,53	27,58	32,61	37,63	42,68	47,80	52,86
INCREMENTO (%)	8,54	10,46	12,37	14,27	16,19	18,13	20,04
POTENCIA TOTAL (W)	66,94	134,66	297,72	633,12	1187,82	633,38	865,09
INCREMENTO (%)	1,75	3,53	7,80	16,58	31,11	16,59	22,65

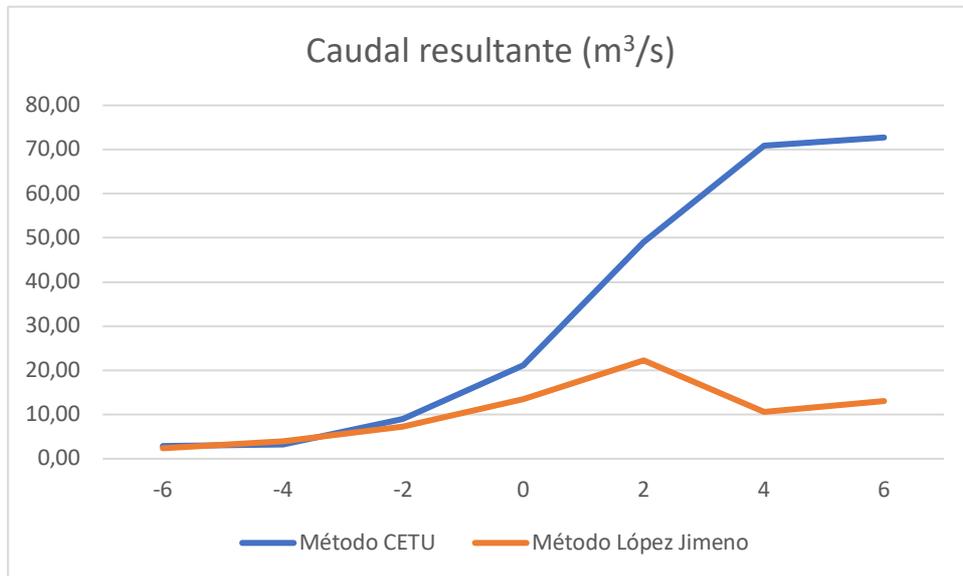


Ilustración 5.4. Influencia de la pendiente en el caudal de aire necesario para la dilución de contaminantes.

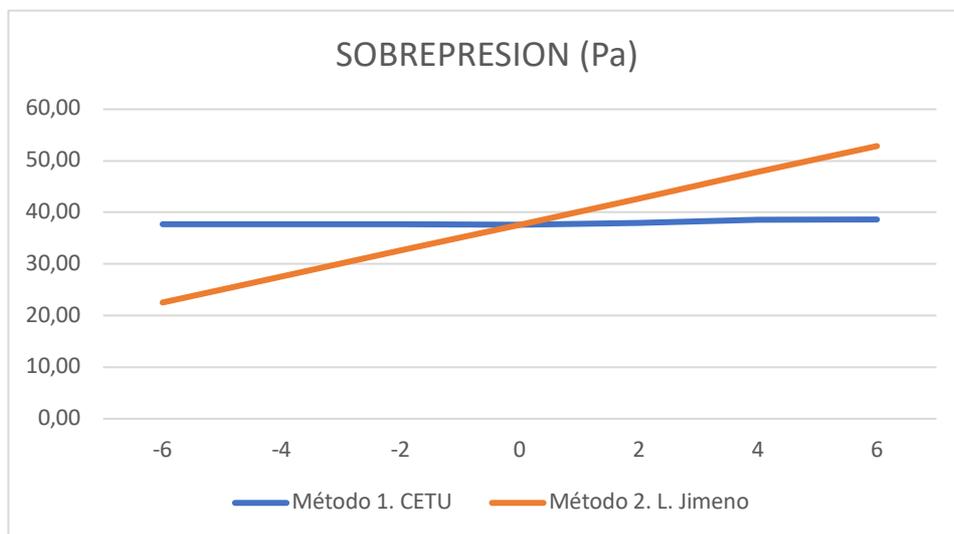


Gráfico 5.5. Influencia de la pendiente en la sobrepresión.

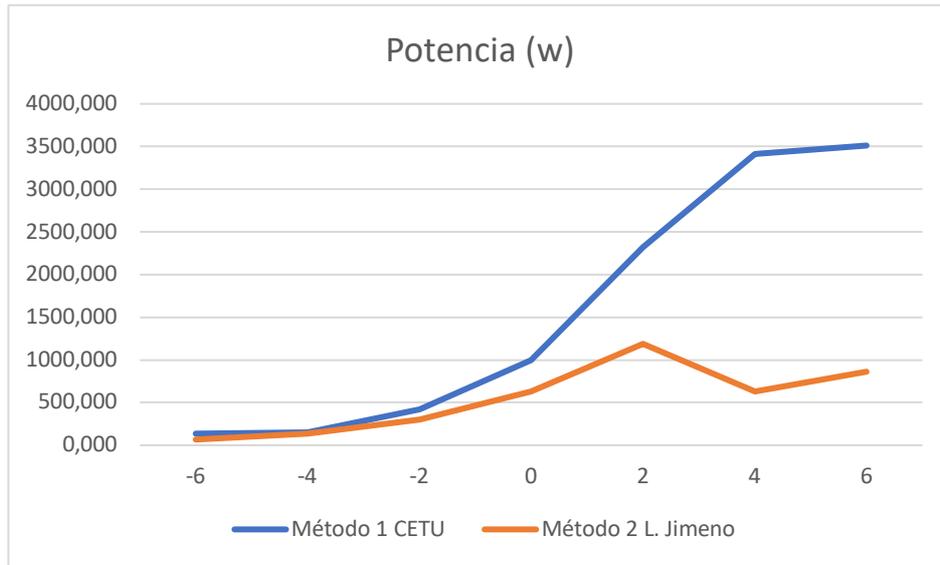


Gráfico 5.6. Influencia de la pendiente en la potencia.



5.1.3. Influencia de la velocidad de circulación

En los apartados anteriores, para el cálculo del caudal de emisiones, se ha utilizado una velocidad de 90 km/h a la hora de escoger las emisiones base. En este caso, al variar la velocidad varían también estas emisiones.

En las Tablas 5.9 y 5.10 se muestran los resultados obtenidos por los dos métodos empleados: el propuesto por el CETU y el propuesto por López Jimeno respectivamente.

En el caso calculado mediante el método propuesto por el CETU pueden apreciarse en la sobrepresión y la potencia un incremento drástico entre las velocidades de 80 y 110 km/h, mientras que en por el método propuesto por López Jimeno, la sobrepresión aumenta ligeramente al aumentar la velocidad y la potencia sufre ligeros aumentos y descensos a medida que aumenta la velocidad. Este hecho, se explica debido a que las emisiones sufren también incrementos y descensos sucesivamente.

En ambos casos la sobrepresión y la potencia muestran un comportamiento similar hasta 50 Km/h, donde ya empiezan a diferir.



Inés Álvarez del Campo





Tabla 5.9. Influencia de la velocidad. Método CETU (2014).

VELOCIDAD (Km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
EMISIÓN DE CO M3 (m ³ /s)	2687,74	1242,22	817,25	633,60	537,30	487,21	469,79	476,79	494,38	494,04	613,98
EMISIÓN DE NOx (m ³ /s)	1194,65	942,45	663,60	855,72	1000,23	1256,91	1675,62	2332,07	3106,01	4861,84	7961,22
EMISIÓN DE HUMOS (m ² /s)	203,45	224,50	112,99	95,38	84,52	78,49	76,10	76,99	79,99	52,85	64,77
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	24,89	11,50	7,57	5,87	4,98	4,51	4,35	4,41	4,58	4,57	5,69
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	66,37	52,36	36,87	47,54	55,57	69,83	93,09	129,56	172,56	270,10	442,29
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	11,30	12,47	6,28	5,30	4,70	4,36	4,23	4,28	4,44	2,94	3,60
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	66,37	52,36	36,87	47,54	55,57	69,83	93,09	129,56	172,56	270,10	442,29
INCREMENTO (%)	0,00	-21,11	-29,59	28,95	16,89	25,66	33,31	39,18	33,19	56,53	63,75
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,75	0,59	0,41	0,53	0,62	0,78	1,05	1,46	1,94	3,03	4,97
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	1,17	0,73	0,36	0,60	0,82	1,30	2,30	4,46	7,92	19,40	52,01
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,55	0,34	0,17	0,28	0,39	0,61	1,09	2,11	3,74	9,15	24,54
EFEECTO CHIMENEA (Pa)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
EFEECTO PISTÓN (Pa)	3,07	2,47	3,94	5,26	6,60	7,90	9,15	10,33	11,47	12,30	12,72
SOBREPRESIÓN (Pa)	4,80	3,54	4,47	6,14	7,80	9,81	12,54	16,89	23,12	40,85	89,27
INCREMENTO (%)	0,00	-26,12	26,16	37,46	27,02	25,64	27,89	34,73	36,84	76,7	118,53
POTENCIA TOTAL (W)	397,84	231,87	205,98	365,10	542,08	855,88	1459,17	2736,12	4986,70	13793,02	49356,40
INCREMENTO (%)	0,00	-41,72	-11,17	77,25	48,48	57,89	70,49	87,51	82,25	176,6	257,84



Inés Álvarez del Campo





Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 5.10. Influencia de la velocidad. Método López Jimeno (2011).

VELOCIDAD (Km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
EMISIÓN DE CO M3 (m ³ /s)	477,03	351,69	214,79	181,80	156,377	129,20	148,75	153,22	155,36	189,22	262,04	399,93	686,86
EMISIÓN DE NOx (m ³ /s)	514,21	415,84	440,62	530,87	638,01	187,61	1059,71	104,49	118,99	134,54	166,53	187,61	221,56
EMISIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	96,62	70,12	60,85	61,79	66,20	69,31	69,83	17,36	19,08	20,27	22,89	24,39	29,07
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	3,84	2,83	1,73	1,46	1,26	1,04	1,20	1,23	1,25	1,52	2,11	3,22	5,53
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	22,15	17,91	18,98	22,86	27,48	34,15	45,64	4,50	5,12	5,79	7,17	8,08	9,54
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	5,37	3,90	3,38	3,43	3,68	3,85	3,88	0,96	1,06	1,13	1,27	1,35	1,62
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	22,15	17,91	18,98	22,86	27,48	34,15	45,64	4,50	5,12	5,79	7,17	8,08	9,54
INCREMENTO (%)	0	-19,13	5,96	20,48	20,18	24,29	33,63	-90,14	13,88	13,06	23,78	12,66	18,09
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,25	0,20	0,21	0,26	0,31	0,38	0,51	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,13	0,09	0,10	0,14	0,20	0,31	0,55	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,06	0,04	0,05	0,07	0,09	0,15	0,26	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
EFECTO CHIMENEA (Pa)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,00	0,00	0,00
EFECTO PISTÓN (Pa)	3,82	4,17	4,43	4,64	4,84	5,00	5,08	6,06	6,32	6,59	6,84	7,10	7,35
SOBREPRESIÓN (Pa)	4,01	4,30	4,57	4,84	5,13	5,46	5,90	6,06	6,33	6,60	6,86	7,13	7,39
INCREMENTO (%)	0	7,02	6,37	5,99	5,96	6,31	8,06	2,85	4,42	4,23	3,94	3,88	3,67
POTENCIA TOTAL (W)	111,14	96,18	108,40	138,43	176,29	232,94	336,38	34,11	40,56	47,80	61,50	71,97	88,11
INCREMENTO (%)	0,00	-13,45	12,71	27,7	27,35	32,13	44,41	-89,86	18,91	17,84	28,65	17,03	22,43



Inés Álvarez del Campo



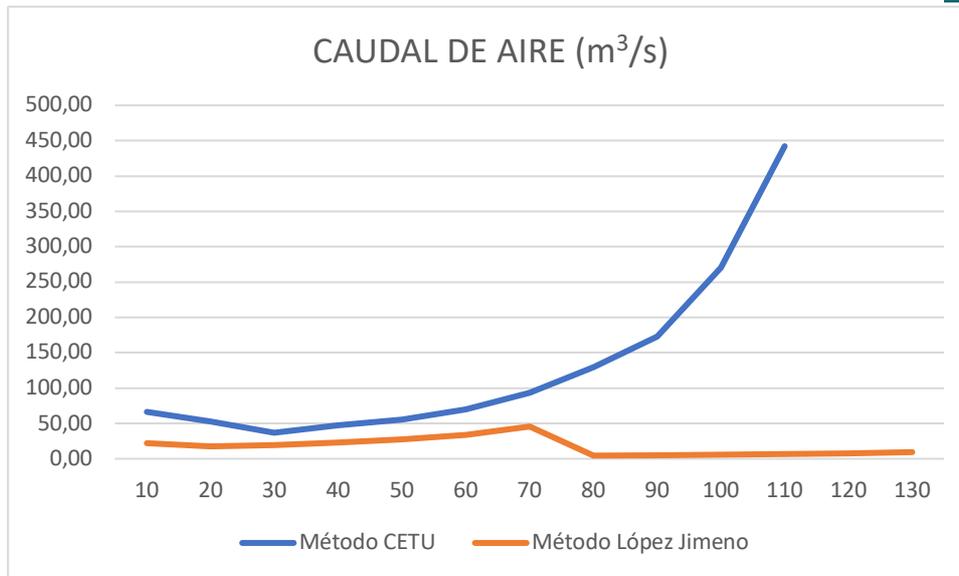


Ilustración 5.7. Influencia de la velocidad en el caudal de aire necesario para la dilución de contaminantes.

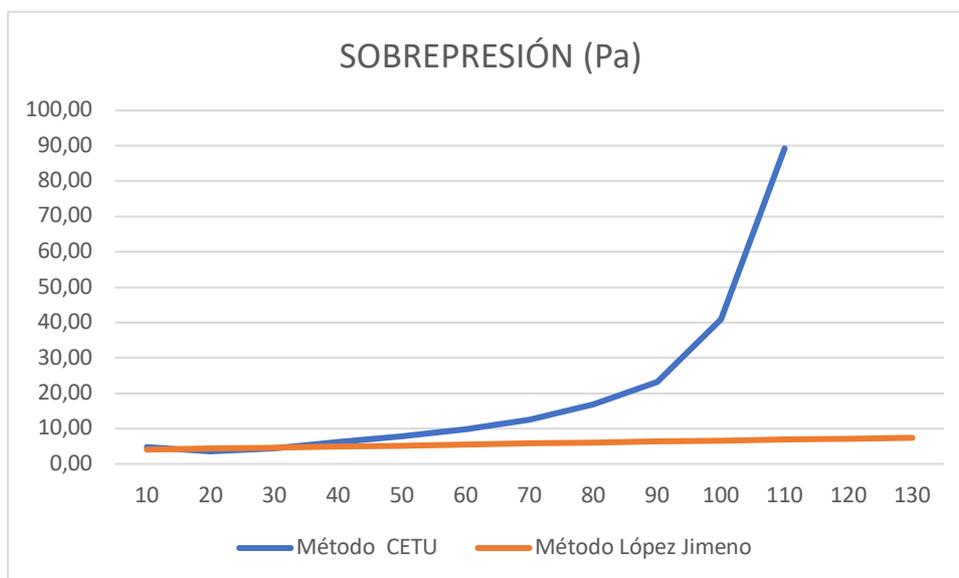


Gráfico 1.8. Influencia de la velocidad en la Sobrepresión.

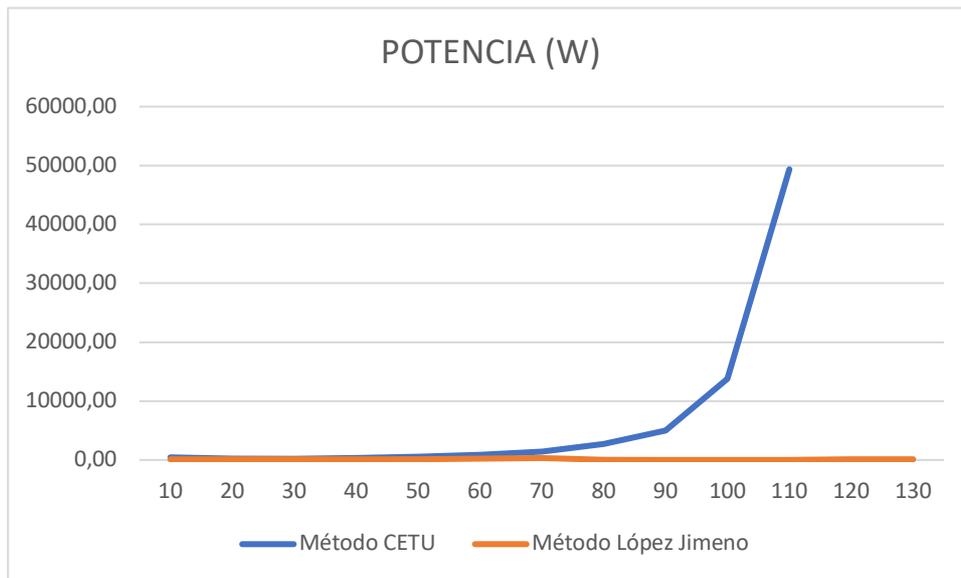


Gráfico 5.9 Influencia de la velocidad en la potencia de ventilador.



5.1.4. Influencia de la longitud del túnel

La longitud del túnel es el último aspecto constructivo del túnel del que se ha evaluado su influencia en la concentración de contaminantes en túneles.

Se ha evaluado dicha concentración desde una longitud de túnel de 100 m hasta otra de 1500 m, con aumentos sucesivos de 100 m.

Al calcular las pérdidas de carga lineales y singulares por ambos métodos, se puede observar cómo aun siendo mas elevadas por el método del CETU, en ambos crecen a medida que aumenta la longitud. No ocurre lo mismo, sin embargo, con las pérdidas de carga debidas al denominado efecto chimenea, las cuales se mantienen constantes, ni con las debidas al efecto pistón, que aumentan a medida que aumenta la longitud.

Debido a que las pérdidas causadas por el efecto pistón se reducen en mayor medida que las pérdidas lineales y singulares aumentan, la sobrepresión total disminuye a medida que aumenta la longitud.

Como cabe esperar, al aumentar la longitud del túnel, aumenta la concentración de contaminantes en el, y por tanto el caudal de aire necesario para la dilución de dichos contaminantes. Es por esto que, a igual rendimiento de ventilador, aun que la sobrepresión disminuya, se puede observar como la potencia aumenta.



Inés Álvarez del Campo





Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 5.11. Influencia de la longitud del túnel. Método CETU (2014).

LONGITUD (m)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
EMISIÓN DE CO (m ³ /s)	32,99	65,98	98,98	131,97	164,96	197,95	230,94	263,93	296,93	329,92	362,91	395,90	428,89	461,88	494,88
EMISIÓN DE NOx (m ³ /s)	35,73	71,47	107,20	142,94	178,67	214,41	250,14	285,88	321,61	357,34	393,08	428,81	464,55	500,28	536,02
EMISIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	5,46	10,93	16,39	21,85	27,31	32,78	38,24	43,70	49,17	54,63	60,09	65,55	71,02	76,48	81,94
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	0,31	0,61	0,92	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	2,75	3,05	3,36	3,67	3,97	4,28	4,58
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	1,99	3,97	5,96	7,94	9,93	11,91	13,90	15,88	17,87	19,85	21,84	23,82	25,81	27,79	29,78
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	0,30	0,61	0,91	1,21	1,52	1,82	2,12	2,43	2,73	3,03	3,34	3,64	3,95	4,25	4,55
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	1,99	3,97	5,96	7,94	9,93	11,91	13,90	15,88	17,87	19,85	21,84	23,82	25,81	27,79	29,78
INCREMENTO (%)	0,00	100	50	33,33	25	20	16,67	14,29	12,50	11,11	10	9,09	8,33	7,69	7,14
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,21	0,24
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,11
EFFECTO CHIMENEA (Pa)	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07
EFFECTO PISTÓN (Pa)	37,76	37,72	37,69	37,66	37,62	37,59	37,56	37,52	37,49	37,45	37,42	37,39	37,35	37,32	37,29
SOBREPRESIÓN (Pa)	37,76	37,73	37,70	37,68	37,66	37,64	37,63	37,62	37,61	37,61	37,61	37,61	37,61	37,62	37,63
INCREMENTO (%)	0,00	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
POTENCIA TOTAL (W)	93,70	187,26	280,69	374,03	467,29	560,50	653,68	746,85	840,04	933,27	1026,56	1119,94	1213,42	1307,04	1400,81
INCREMENTO (%)	0,00	1,52	1,52	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,52	1,52	1,52



Tabla 5.12. Influencia de la longitud del túnel. Método López Jimeno (2014)

LONGITUD (m)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
EMISIÓN DE CO (g/h)	10,37	20,73	31,10	41,16	51,83	62,19	72,56	82,93	93,29	103,66	114,02	124,39	134,75	145,12	155,48
EMISIÓN DE NOx (g/h)	20,83	41,67	62,50	83,34	104,17	125,00	145,84	166,67	187,51	208,34	229,17	250,01	270,84	291,68	312,51
EMISIÓN DE HUMOS (m ² /h)	2,64	5,27	7,91	10,55	13,18	15,82	18,46	21,10	23,72	26,37	29,01	31,64	34,28	36,92	39,55
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	0,08	0,17	0,25	0,33	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1,00	1,08	1,17	1,25
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	0,90	1,79	2,69	3,59	4,49	5,38	6,28	7,18	8,08	8,97	9,87	10,77	11,66	12,56	13,46
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	0,15	0,29	0,44	0,59	0,73	0,88	1,03	1,17	1,32	1,46	1,61	1,76	1,90	2,05	2,20
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	0,90	1,79	2,69	3,59	4,49	5,38	6,28	7,18	8,08	8,97	9,87	10,77	11,66	12,56	13,46
INCREMENTO (%)	1,10	2,20	3,30	4,40	5,49	6,59	7,69	8,79	9,89	10,99	12,09	13,19	14,29	15,38	16,48
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
EFFECTO CHIMENEA (Pa)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
EFFECTO PISTÓN (Pa)	37,78	37,76	37,75	37,73	37,71	37,70	37,68	37,67	37,65	37,64	37,62	37,61	37,59	37,58	37,56
SOBREPRESIÓN (Pa)	37,78	37,76	37,75	37,73	37,72	37,71	37,69	37,68	37,67	37,66	37,65	37,65	37,64	37,64	37,63
INCREMENTO (%)	7,71	7,70	7,70	7,70	7,70	7,69	7,69	7,69	7,69	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68
POTENCIA TOTAL (W)	42,37	84,70	127,00	169,28	211,52	253,74	295,93	338,11	380,27	422,41	464,55	506,68	548,82	590,96	633,12
INCREMENTO (%)	1,10	2,20	3,30	4,40	5,50	6,60	7,70	8,79	9,89	10,98	12,08	13,18	14,27	15,37	16,46

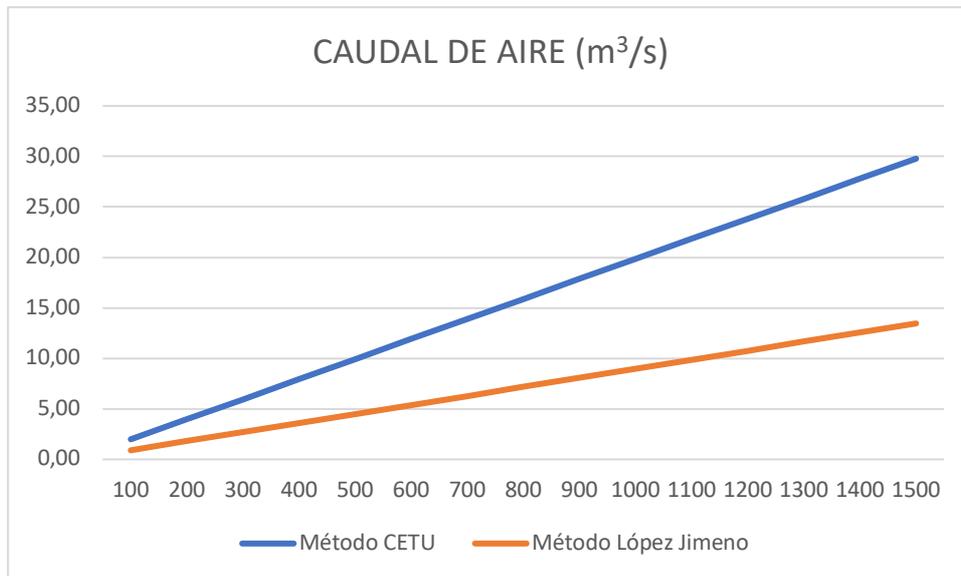


Ilustración 5.10. Influencia de la longitud en el caudal de aire necesario para la dilución de contaminantes.

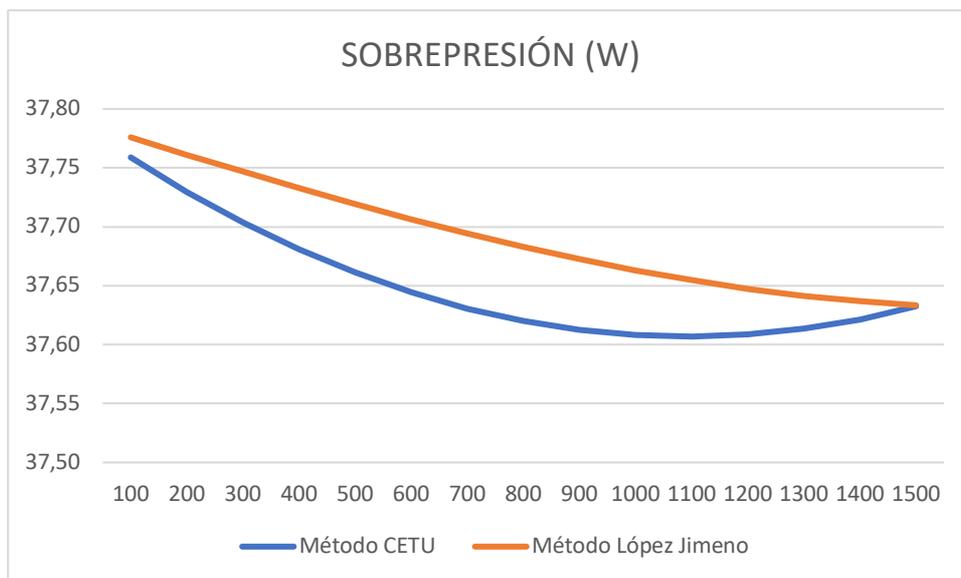


Gráfico 5.11 Influencia de la longitud en la Sobrepresión.

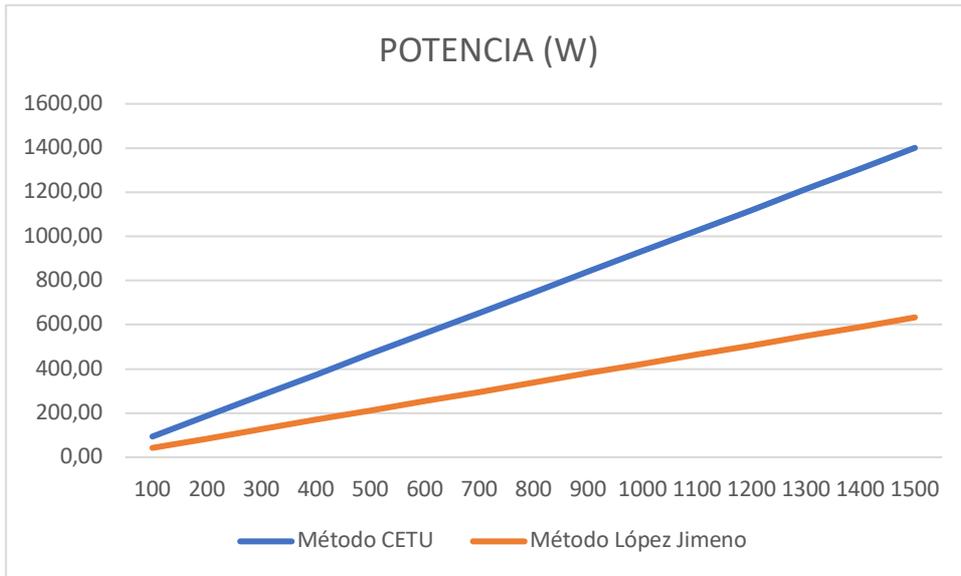


Gráfico 5.12. Influencia de la longitud en la potencia.



Inés Álvarez del Campo





5.2 ANÁLISIS DE LAS INFLUENCIAS DEL TIPO DE MOTOR

Para analizar la influencia de los vehículos híbridos, se ha acudido al *Informe anual* publicado por la ANFAC (2019) en el que se desglosan, para los años considerados, el número de vehículo de cada tipo, en función del carburante y el tipo de motor, térmico, híbrido o eléctrico.

Debido a la falta de información técnica sobre el funcionamiento de la combinación de motor térmico y motor eléctrico, en este supuesto se ha considerado la velocidad de diseño de 90 km/h, ya que, en principio, para velocidades en el entorno de los 100 km/h la contribución principal sería la del motor térmico. [10] TOYOTA, *como conducir vehículos híbridos*. El parámetro que se ha variado para los dos casos estudiados ha sido la pendiente, considerando las siguientes situaciones:

- Pendiente descendente: el motor eléctrico aprovecha para cargar la batería, funcionando exclusivamente el motor térmico gasolina o diésel. Si bien es cierto que la mayoría de los vehículos híbridos, según el informe de ANFAC, son gasolina. Por la tanto, para este caso se ha considerado que el volumen de emisiones de los vehículos híbridos es equivalente al de los vehículos de gasolina o diésel, según el motor térmico del vehículo sea de un tipo u otro.
- Pendiente horizontal: para un 0%, al ser la velocidad de 90 km/h, actúa exclusivamente el motor térmico por lo que las emisiones se corresponderán con las de los vehículos de gasolina o diésel, según corresponda.
- Pendiente ascendente: en este escenario, actúan conjuntamente el motor eléctrico y el térmico, el eléctrico ayuda al térmico de modo que las emisiones en este caso se consideraran como si la pendiente fuese horizontal.

Cabe mencionar que, para los siguientes casos se ha tenido en cuenta el total de vehículos que componen el parque vehicular, considerando el desglose de híbridos sólo para vehículos ligeros.

5.2.1. Influencia de los vehículos híbridos en la concentración de gases contaminantes de un túnel en el parque vehicular actual de España

En el parque vehicular actual, según los datos obtenidos del informe actual de ANFAC (2018), para el año 2018, los turismos híbridos suponen casi alrededor de un 6% de los turismos matriculado en dicho año. Es por esta razón por la que en este primer caso no parece haber una gran diferencia en cuanto a las emisiones generadas.

A la vista de la tabla, el caudal necesario para la dilución de contaminantes aumenta a medida que aumenta la pendiente. Y por lo tanto lo mismo sucede con la sobrepresión y la potencia.



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel





Tabla 5.13. Influencia tipo de motor y pendiente. Método CETU (2014).

PENDIENTE (%)	-6	-4	-2	0	2	4	6
EMISIÓN DE CO M3 (g/h)	54,69	72,20	103,73	155,48	287,31	607,96	1135,71
EMISIÓN DE NOx (g/h)	55,19	90,68	169,57	312,51	516,75	764,56	1109,34
EMISIÓN DE HUMOS (g/h)	15,98	20,50	27,40	39,55	55,53	71,22	89,17
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	0,444	0,730	1,365	2,516	4,161	6,156	8,932
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	2,377	3,905	7,303	13,459	22,254	32,927	47,775
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	0,888	1,139	1,522	2,197	3,085	3,957	4,954
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	2,377	3,905	7,303	13,459	22,254	32,927	47,775
INCREMENTO (%)	0,000	64,377	86,995	84,293	65,354	47,956	45,956
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,027	0,044	0,082	0,151	0,250	0,370	0,537
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,000	0,000	0,001	0,003	0,008	0,017	0,037
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,000	0,001	0,003	0,009	0,024	0,053	0,111
EFEECTO CHIMENEA (Pa)	-15,221	-10,147	-5,074	0,000	5,074	10,147	15,221
EFEECTO PISTÓN (Pa)	37,751	37,725	37,667	37,563	37,413	37,232	36,980
SOBREPRESIÓN (Pa)	22,531	27,579	32,597	37,574	42,519	47,449	52,348
INCREMENTO (%)	0,000	22,406	18,196	15,269	13,159	11,596	10,324
POTENCIA TOTAL (W)	66,936	134,631	297,564	632,121	1182,780	1952,918	3126,149
INCREMENTO (%)	0,000	101,134	121,021	112,432	87,113	65,113	60,076



5.2.2. Análisis de la concentración de gases contaminantes en túneles considerando un hipotético parque vehicular, en el que los vehículos ligeros son híbridos.

En este caso se ha considerado que el parque vehicular correspondiente a los vehículos ligeros está compuesto por turismos híbridos.

Teniendo en cuenta las consideraciones de funcionamiento detalladas al principio de este capítulo, se puede apreciar en la Tabla 5.14, como la potencia en la pendiente de 6 % se ha reducido más de la mitad.



Inés Álvarez del Campo





Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



Tabla 5.14. Influencia vehículos híbridos. CETU (2014).

PENDIENTE (%)	-6	-4	-2	0	2	4	6
EMISIÓN DE CO M3 (g/h)	54,23	71,22	102,32	153,27	175,96	231,19	357,59
EMISIÓN DE NOx (g/h)	55,08	90,53	169,33	312,08	389,59	461,01	518,91
EMISIÓN DE HUMOS (g/h)	15,96	20,48	27,38	39,51	45,10	50,28	55,90
CAUDAL DILUCIÓN CO (m ³ /s)	0,437	0,573	0,824	1,234	1,417	1,861	2,879
CAUDAL DILUCION NOx (m ³ /s)	2,336	3,067	4,407	6,601	7,578	9,956	15,400
CAUDAL DILUCIÓN DE HUMOS (m ³ /s)	3,060	5,029	9,407	17,338	21,644	25,612	28,828
CAUDAL RESULTANTE (m ³ /s)	2,336	3,067	4,407	6,601	7,578	9,956	15,400
INCREMENTO (%)	0,000	31,335	43,659	49,791	14,809	31,383	54,676
VELOCIDAD CIRCULACIÓN AIRE (m/s)	0,026	0,034	0,050	0,074	0,085	0,112	0,173
RESISTENCIA AERODINAMICA							
PÉRDIDAS LINEALES (Pa)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,004
PÉRDIDAS SINGULARES (Pa)	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,005	0,012
EFEECTO CHIMENEA (Pa)	-15,221	-10,147	-5,074	0,000	5,074	10,147	15,221
EFEECTO PISTÓN (Pa)	37,751	37,739	37,716	37,679	37,662	37,622	37,530
SOBREPRESIÓN (Pa)	22,531	27,593	32,644	37,682	42,740	47,775	52,765
INCREMENTO (%)	0,000	22,464	18,307	15,433	13,422	11,783	10,445
POTENCIA TOTAL (W)	65,778	105,796	179,810	310,905	404,859	594,587	1015,742
INCREMENTO (%)	0,000	60,838	69,959	72,907	30,220	56,863	70,831



6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, y la discusión de los mismos que se ha venido desarrollando en paralelo en los sucesivos subapartados, correspondientes a los distintos supuestos considerados, se ha llegado a una serie de conclusiones, que se articularán en sucesivas líneas.

Por un lado, en cuanto a la influencia de los aspectos constructivos, cabe destacar la manera en que la potencia, pérdidas de carga y emisiones aumentan a medida que aumenta la pendiente o la longitud. En el primer caso, En el segundo, por el mayor número de vehículos presentes en el túnel en un instante dado.

En el caso de la pendiente, las dos metodologías de cálculo aplicadas reflejan un crecimiento importante a medida que esta aumenta, siendo más pronunciado entre la pendiente horizontal y la pendiente ascendente del 6 %. Esto es debido a la mayor exigencia a la que los motores son sometidos, con respecto a una situación descendente, o incluso de pendiente horizontal.

En el caso de la longitud, se puede apreciar como a mayor sea la longitud de túnel, mayor es el número de vehículos presente en el túnel en un instante dado, y con ello la concentración de emisiones, el mayor caudal y potencia necesarios para su dilución, sin embargo, no ocurre lo mismo con las pérdidas de carga, que según revelan los cálculos en ambos métodos, estas decrecen con el aumento de la longitud.

El método propuesto por el CETU contempla, a la hora de asignar coeficientes correctores en el cálculo de emisiones generadas, la descomposición del parque vehicular no solo por tamaño y carburante si no también según la fecha de matriculación, agrupando según la normativa Euro a la que pertenezcan, lo cual es de gran interés a la hora de analizar como afecta a este caso el rejuvenecimiento del parque vehicular. Puede apreciarse como, en el periodo de tiempo estudiado (2014-2018), a pesar de lo reducido que aparentemente puede parecer dicho marco, tanto las emisiones generadas, como el caudal de aire fresco y la potencia de ventilador necesarios para su dilución sufren un descenso progresivo, pero importante. Esto pone de manifiesto la importancia que tiene la normativa Euro de control de emisiones en la fabricación de vehículos, siendo cada una más restrictiva que la anterior, obligando a las empresas de fabricación de automóviles a investigar y desarrollar tecnologías que permitan la adecuación de las emisiones de los vehículos a los requeridos por dicha normativa.

Un incremento en la presencia de vehículos de motor híbrido en el túnel supone un importante descenso en las emisiones concentradas en túneles. Aún siendo escasa su presencia en el parque vehicular actual, se aprecia un ligero descenso en la



Influencia del parque vehicular en los requisitos de ventilación de un túnel



concentración de contaminantes, máxime en el caso de pendientes ascendentes. Todo ello contribuye a que los requisitos de potencia del ventilador requerido resulten menores. En este aspecto, el análisis de la influencia en el supuesto hipotético de un parque vehicular formado exclusivamente por vehículos ligeros híbridos manifiesta un descenso de más del 50 % en las emisiones generadas, bajando de la misma forma el caudal necesario para su dilución y por tanto la potencia de ventilador necesaria. Como la tendencia actual en la fabricación y comercialización de automóviles apuesta cada vez más por este tipo de vehículos, sería muy interesante, en el futuro, estudiar la influencia real que este tipo de vehículos tiene en la generación de contaminantes.

Los métodos propuestos, además, presentan una gran diferencia en los resultados. A la vista de los resultados obtenidos, se considera que a priori el método propuesto por el CETU en su documento *“Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel”* resulta más conservador.



7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. Libros

- [1] LÓPEZ JIMENO, Carlos. *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: U.D. Proyectos E.T.S.I. Minas- Universidad politécnica de Madrid, 2011. 1891p. ISBN: 978-84-96-140-36-3.
- [2] LÓPEZ JIMENO, Carlos. *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico S.L, 1997. 1082 p. ISBN: 84-921708-1-6.
- [3] PÉREZ ÁLVAREZ, Rubén. *Requerimientos de ventilación longitudinal en túneles carreteros unidireccionales en explotación*. 2010.

7.2. Informes

- [4] ANFAC. *Informe anual 2018*. [consultado: 10 Julio 2019]. Disponible en:
www.anfac.es
- [5] THE WORLD ROAD ASSOCIATION (PIARC). 2019. *Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation*. CEDEX, FRANCIA. ISBN: 978-2-84060-500-3. Disponible en:
<http://www.piarc.org>
- [6] CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS (CETU). 2012. *Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel*. FRANCIA. Disponible en:
<http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr>
- [7] DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO (DGT). [Tablas estadísticas, parque de vehículos]. Disponible en:
<http://www.dgt.es>
- [8] MINISTERIO DE FOMENTO. 2003. *Un tesoro geológico en la autovía del Cantábrico*. Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo, Ministerio de Fomento. ISBN: 84-607-9268-4. Disponible en:
<http://www.igme.es>



7.3. Contenido web

[9] AYUNTAMIENTO DE RIBADESELLA.

<http://www.ayto-ribadesella.es>

[10] TOYOTA. *Como conducir vehículos híbridos*. Disponible en:

<https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/como-conducir-coche-hibrido-toyota>