

GRADO EN INGENIERIA Y TECNOLOGIA DE  
MINAS

# TRABAJO FIN DE GRADO

*TUNEL CARRETERO EN LA N-625.  
(CORIGOS-ASTURIAS)*

*ANEJO 7- VENTILACIÓN*

**Alumno/Alumna:** MILAGROS, LOPEZ, ENRIQUE

**Director/Directora (1):** GALLO, LAYA, JAVIER

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** 15-02-2018

## Anejo Ventilación Túnel

**Contenido:**

1	Objeto del Presente Anejo.....	7
2	Hipótesis de cálculo .....	8
3	Ventilación Principal .....	10
3.1	Categorización del tráfico .....	10
3.2	Determinación de las necesidades de aire fresco .....	12
3.2.1	Producción de gases y humos nocivos dentro del tunel.Fase Explotación .....	12
3.2.1.1	Producción de Monóxido de Carbono (CO) .....	12
3.2.1.2	Producción de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	15
3.2.1.3	Producción de Partículas Sólidas en Suspensión .....	16
3.2.2	Conclusión.....	17
3.3	Potencia Necesaria para la ventilación del túnel en explotación .....	17
3.3.1	Perdidas de carga.....	18
3.3.1.1	Pérdida de carga en el túnel .....	18
3.3.1.2	Pérdidas de carga en las singularidades .....	20
3.3.1.3	Efecto Pistón de los vehículos .....	21
3.4	Ventilación contra Incendios.....	23
3.4.1	Velocidad critica.....	24
3.5	Solución de Ventilación tomada.....	26
3.5.1	Numero de Ventiladores.....	28
4	Ventilación Secundaria .....	30
4.1	Determinación del caudal de aire necesario .....	30
4.1.1	Gases producidos en la voladura .....	30
4.1.2	Caudal de aire necesario para el personal .....	32
4.1.3	Caudal para dilución de los gases producidos por la maquinaria .....	32



4.1.3.1	Maquinaria con motores de combustión Interna.....	32
4.1.3.2	Maquinaria con motores eléctricos .....	33
4.1.3.3	Caudal de retorno necesario.....	33
4.2	Conclusiones .....	34
5	Selección del sistema de ventilación.....	35



**Índice de Ilustraciones:**

ILUSTRACIÓN 1 EFECTOS DE LA EXPOSICIÓN AL CO.P.I.A.R.C .....	8
ILUSTRACIÓN 2 MAPA DE TRÁFICO 2016.DIRECCION GENERAL DE TRAFICO .....	11
ILUSTRACIÓN 3 VALORES PARA EL COEFICIENTE $\lambda$ P.DISEÑO, INSTALACIONES Y ELEMENTOS DE SEGURIDAD TUNELES.UPM.....	19
ILUSTRACIÓN 4 ARRASTRE DE HUMOS EN CASO DE INCENDIO CON VENTILACIÓN LONGITUDINAL.SEGURIDADENTUNELES.COM .....	23
ILUSTRACIÓN 5 ESQUEMA DE RETROCESO DE HUMOS EN UN INCENDIO CON BACKLAYER.HWAN05.....	24
ILUSTRACIÓN 6 CARACTERÍSTICAS MEDIAS DE LOS INCENDIOS SEGÚN EL TIPO DE VEHÍCULO AFECTADO.INGASSON 2001 Y SIPP 2002	26
ILUSTRACIÓN 7 CARACTERISTICAS TÉCNICAS VENTILADORES ZITRON.ZITRON .....	28



**Índice de Tablas:**

TABLA 3-1 EMISIONES DE CO Y NOx PARA VEHICULOS.TODO MANUAL DE TÚNELES.....	13
TABLA 3-2 FACTOR DE CORRECCIÓN POR ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR.ELABORACION PROPIA BASADA EN P.I.A.R.C.....	13
TABLA 3-3 FACTOR DE CORRECCIÓN POR PENDIENTE. ELABORACIÓN PROPIA .....	14
TABLA 3-4 FACTOR DE CORRECCIÓN POR CONDUCCIÓN A VELOCIDAD REDUCIDA. ELABORACIÓN PROPIA .....	14
TABLA 3-5 LIMITES ADMISIBLES DE CO.TODO MANUAL DE TÚNELES.....	15
TABLA 3-6 FACTOR DE CORRECCIÓN PARA VEHÍCULOS PESADOS. ELABORACIÓN PROPIA, EXTRAÍDO DE PIARC. ....	15
TABLA 3-7 RESUMEN DE LOS CAUDALES DE PRODUCCIÓN Y DILUCIÓN DE GASES. ELABORACIÓN PROPIA .....	17
TABLA 3-8 VALORES PARA EL COEFICIENTE CARGA DEL SUELO. DISEÑO, INSTALACIONES Y ELEMENTOS DE SEGURIDAD.UPM.....	19
TABLA 3-9 VALORES DE $\xi$ .ELABORACIÓN PROPIA .....	20
TABLA 3-10 COEFICIENTES DE INSTALACIÓN DE LOS VENTILADORES.INGESA GEOCONSULT. ....	29
TABLA 4-1 COMPOSICIÓN DE LOS GASES PRODUCIDOS POR LA VOLADURA. ELABORACIÓN PROPIA BASADA EN ZITRON.....	32
TABLA 4-2 RESUMEN DE LAS NECESIDADES DE CAUDAL DE AIRE LIMPIO. ELABORACIÓN PROPIA .....	34





## **1 Objeto del Presente Anejo**

Con el presente “*Anejo Ventilación del Túnel*” se pretende estudiar y calcular el sistema de ventilación necesario que permita renovar el aire dentro del túnel , impidiendo que los gases y humos generados por los vehículos alcancen las concentraciones límites dispuestas por la ley que puedan poner en riesgo la salud de los usuarios.

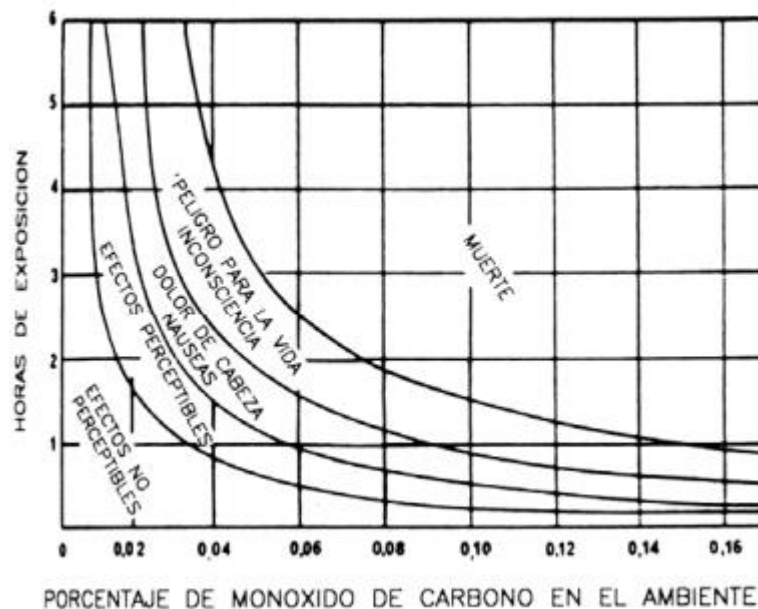


## 2 Hipótesis de cálculo

Las hipótesis tomadas para el cálculo del dimensionamiento de la ventilación del presente anejo siguen los criterios marcados por la P.I.A.R.C (Permanent International Association Of Road Congresses) y por el C.E.T.U (Centre d'Etudes des Tunnels).

Según estos organismos, el caudal de aire a mover viene determinado por tres factores:

- Emisión de CO: Se suele considerar una concentración volumétrica máxima de monóxido de carbono de  $C_{co}=150$  ppm para condiciones de tráfico normales y de 250 ppm para condiciones de tráfico denso. Si bien este parámetro no queda fijado por reglamentación alguna<sup>1</sup> y varía según los casos, estando normalmente comprendido entre las 50 y 250 ppm.



*Ilustración 1 Efectos de la exposición al CO.P.I.A.R.C*

- Opacidad: El coeficiente de Opacidad, K, varía entre  $0.0075 \text{ m}^{-1}$  en condiciones normales de circulación, hasta los  $0.009 \text{ m}^{-1}$  en casos de tráfico congestionado, no debiendo en ningún caso exceder los  $0.012 \text{ m}^{-1}$ , valor que condicionaría el cierre del túnel.

<sup>1</sup> En España no existe actualmente una normativa que regule las concentraciones máximas que pueden existir en la atmosfera de los túneles, aunque si existe para aparcamientos subterráneos por ejemplo.



- Incendio: En túneles de carretera con circulación de vehículos ligeros o semipesados se estima suficiente una velocidad de aire en el interior de la galería de entre 3 y 4 m/s para una perfecta evacuación de humos en caso de incendio. Una velocidad inferior permitiría que los humos invadiesen la sección del túnel y una velocidad excesiva facilitaría la aparición de turbulencias y la propagación del humo por todo el túnel, además de generar un sobredimensionamiento en la instalación.  
En el caso particular de transporte de mercancías peligrosas, esta velocidad puede verse incrementada hasta los 5 m/s.



### **3 Ventilación Principal**

En los túneles de carretera se emplean habitualmente cuatro sistemas distintos de ventilación:

- Ventilación Natural.
- Ventilación Longitudinal.
- Ventilación Semi-Transversal.
- Ventilación Transversal.

A parte de la ventilación natural, los sistemas de ventilación longitudinal son los más económicos y el que se debe utilizar siempre que sea posible.

#### **3.1 Categorización del tráfico**

En primer lugar para poder realizar los cálculos correctamente será imprescindible establecer una categorización del tráfico, distribuyendo los vehículos en ligeros y pesados.

Atendiendo a los datos facilitados por la Dirección General de Tráfico la intensidad media diaria de vehículos en la carretera afectada por la obra , la N-625 es de 1000 vehículos día como máximo , tal y como muestra la siguiente ilustración.

En la ilustración se puede observar en números rojos la intensidad media diaria. Además en la simbología del plano utilizado la N-625 aparece como una carretera con una intensidad media diaria máxima de 1000 vehículos día.

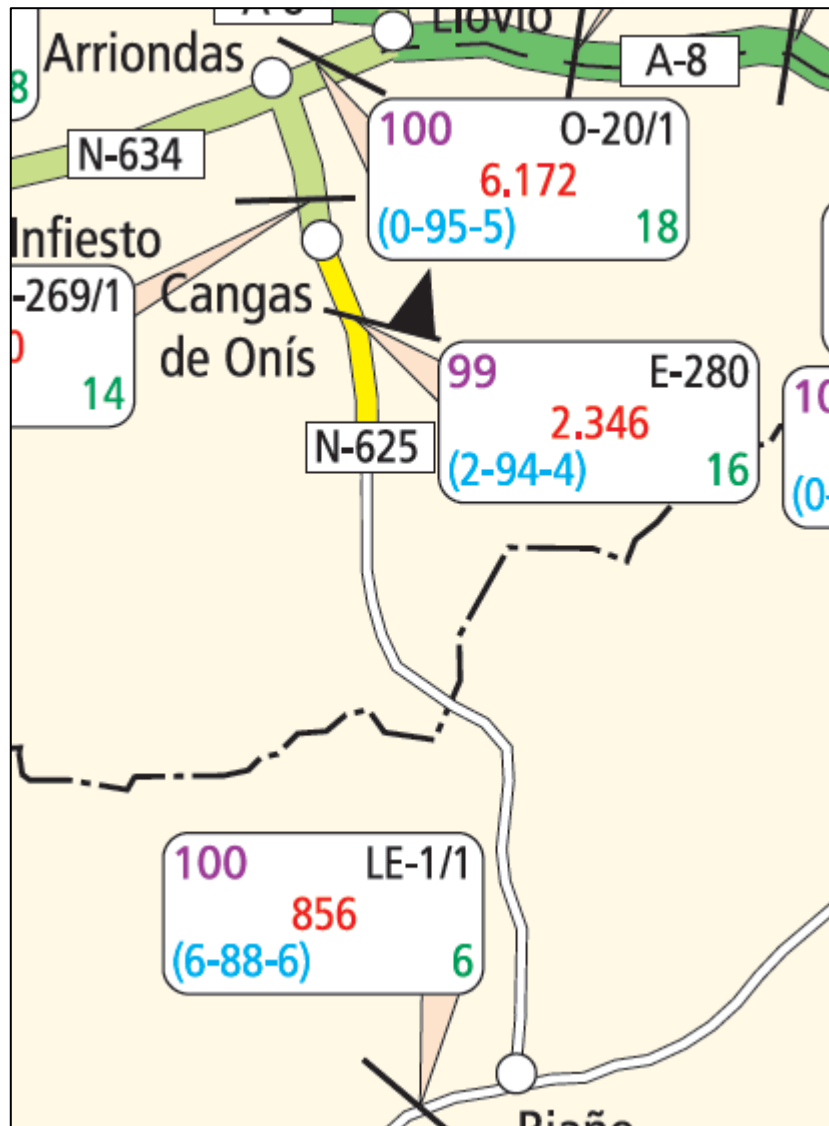


Ilustración 2 Mapa de tráfico 2016. Dirección General de Tráfico

La composición de estos vehículos, en términos de vehículos ligeros, pesados o motocicletas es la siguiente<sup>2</sup>.

- 2%, Motocicletas.
- 94%, Vehículos Ligeros.
- 4% Vehículos Pesados.

<sup>2</sup> Esta composición de los vehículos, viene indicada en números azules en el plano como 2-94-4 en la localidad de Cangas de Onís, localidad más cercana a Corigos con datos disponibles.

Por lo que el tráfico diario en la carretera N-625, estará compuesto por:

- 20 motocicletas día.
- 940 Vehículos Ligeros/día.
- 40, Vehículos Pesados/día.

Una vez determinada la intensidad de tráfico y su composición podremos calcular la cantidad de gases nocivos que esta intensidad de tráfico creara dentro del túnel.

### **3.2 Determinación de las necesidades de aire fresco**

Para dimensionar correctamente el sistema de ventilación para la fase de explotación del túnel es imprescindible conocer el caudal de aire que se deberá suministrar al túnel. Este caudal vendrá determinado por la cantidad de gases y humos que deberán ser evacuados por arrastre de la corriente de aire, lo cual inevitablemente dependerá de las emisiones que se produzcan dentro del túnel y de las concentraciones límite que se adopten.

Se propondrán cuatro criterios diferentes, debiéndose adoptar el más exigente de ellos:

1. Dilución del Monóxido de Carbono (CO).
2. Dilución de los Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
3. Dilución del humo.

#### **3.2.1 Producción de gases y humos nocivos dentro del túnel.Fase Explotación**

##### **3.2.1.1 Producción de Monóxido de Carbono (CO)**

El cálculo de la producción de CO se realiza partiendo de un valor base de producción por vehículo al que se le aplican una serie de coeficientes cuyo valor dependerá de las condiciones de tráfico y del propio túnel, teniendo que la cantidad horaria total de CO producida en el túnel será:

$$Q_{0CO} = q_{0CO} * M * K_{hh} * K_s * K_f * L$$

Siendo:

- Q<sub>0CO</sub>, Cantidad horaria total de CO producida en el túnel (m<sup>3</sup>/h).
- q<sub>0co</sub>, Valor base de producción de CO (m<sup>3</sup>/km vehículo).A.I.P.C.R , estima según el grupo de País unas emisiones medias de:

Grupo País	qCO (m <sup>3</sup> /Veh.)	Qno <sub>x</sub> (g/Veh.)
A	0,12	40
B	0,16	60
C	0,7	120
D	1-1,5	120
Motor Diésel	0,08	40

Tabla 3-1 Emisiones de CO y NO<sub>x</sub> para vehículos. Todo Manual de Túneles.

Siendo:

- Grupo A, Donde se aplica la norma Norteamericana FTP75 para vehículos ligeros y la norma US Transient 91 para camiones (EE.UU, Austria, Canadá).
- Grupo B, Donde se aplica la norma Europea CEE 89/458 para vehículos ligeros y la norma CEE 88/77 para vehículos pesados.
- Grupo C, Donde se aplican las normas Europeas, pero no se controlan los niveles de emisión.
- Grupo D, Donde no existe normativa ni control sobre las emisiones de los vehículos.

En España, actualmente, nos encontramos en el grupo B.

- Teniendo en cuenta los datos facilitados por la Dirección General de Carreteras, en la N-625 a la altura de Cangas de Onís la intensidad media diaria es aproximadamente de 1000 vehículos máximo, lo que nos da un volumen de tráfico a la hora de 41.66 vehículos.
- $K_{hh}$ , Factor de corrección por altura sobre el nivel del mar. Cuanto mayor sea la altura sobre el nivel del mar más pobre será el aire en oxígeno, por lo que la combustión interna se realizara más deficientemente y se producirá una mayor cantidad de CO.

Los valores que toma este valor se muestran en la siguiente tabla:

Altura sobre el nivel del mar (m)	400	800	1000
Factor de corrección, $K_{hh}$	1,25	1,6	2

Tabla 3-2 Factor de Corrección por altura sobre el nivel del mar. Elaboración Propia basada en P.I.A.R.C

Corigos se encuentra a 370 m.s.n.m, por lo que se aplicara un factor de 1.25.

- $K_s$ , Factor de corrección por conducción en pendiente. Cuanto más adversa sea la pendiente mayor será el consumo de combustible y mayor la emisión de CO.

Los valores que toma este parámetro son:

Pendiente (%)	-4	-2	0	2	4	6
$K_s$	0,85	0,95	1	1,1	1,2	1,3

Tabla 3-3 Factor de corrección por pendiente. Elaboración Propia

- $K_f$ , Factor de corrección por conducción a velocidad reducida. Sus valores son los siguientes:

Velocidad (km/h)	5	10	20	30	40	50	60	70-80
$K_f$	6,3	3,5	2	1,5	1,2	1,1	1	0,9

Tabla 3-4 Factor de corrección por conducción a velocidad reducida. Elaboración Propia

- L, Longitud del túnel (km).

Por lo que atendiendo a los factores presentados en los párrafos anteriores obtenemos que la producción de CO será de:

$$Q_{0CO} = 0.16 * 41.66 * 1.25 * 1.2 * 0.9 * 0.567 = 5.10 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con este dato podemos calcular la cantidad de aire fresco necesaria para diluir el CO producido, esto se determina a partir de este último valor y de la concentración de CO permitida en el túnel, mediante la expresión:

$$Q_{0Aire} = \frac{Q_{0CO} * 10^6}{C_{CO}}$$

Donde:

- $C_{CO}$ , Limite admisible de CO (ppm). Este límite varía en función del tipo de tráfico, situación del túnel y grupo de país tal y como se ve en la siguiente tabla:

Tipo de túnel	$CO_{lim}$ con tráfico de pico (ppm)			
	Tráfico Fluido		Tráfico Congestionado	
Urbano, Congestionado a diario	100	150	100	150
Urbano, raramente congestionado	100	150	150	250
Interurbano, de Autopista o de Montaña	100	150	150	200
Grupo de País	AB	CD	AB	CD

Tabla 3-5 Limites Admisibles de CO. Todo Manual de Túneles.

Obteniéndose:

$$Q_{\text{Aire}} = \frac{5.10 * 10^6}{100} = 51021.8352 \frac{m^3}{h} * \frac{1h}{3600 s} = 14.172 m^3/s$$

### 3.2.1.2 Producción de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Entre los gases de escape de los automóviles se encuentra el monóxido de nitrógeno, NO, el cual en contacto con el oxígeno del aire se oxida formando dióxido de Nitrógeno, gas de color marrón rojizo, mal oliente, fuertemente oxidante y altamente toxico.

La producción de gases nitrosos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_{NOX} = q_{NOX} * (M_l + K_t * M_p) * K_s * L$$

Donde:

- Q<sub>NOX</sub>, es el volumen de NO<sub>x</sub> producido dentro del túnel (m<sup>3</sup>/h).
- q<sub>NOX</sub>, Valor base de producción de NO<sub>x</sub>, se toma el valor de 1.3x10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/km. Vehículo.
- M<sub>l</sub>, Tráfico de vehículos ligeros (vehículos/hora).
- M<sub>p</sub>, Tráfico de vehículos pesados (vehículos/hora).
- K<sub>f</sub>, Factor de corrección por conducción en pendiente.
- K<sub>s</sub>, Factor de corrección para los vehículos pesados. Estos vehículos producen una mayor cantidad de óxidos de nitrógeno que los vehículos ligeros.

El valor de este factor de corrección se muestra en la siguiente tabla:

Pendiente (%)	<0	0	2	4	6	8	10	12
K <sub>s</sub>	0,5	1	1,7	2,2	2,8	3,4	4	4,6

Tabla 3-6 Factor de Corrección para vehículos pesados. Elaboración Propia, extraído de PIARC.

Como concentración limite se considera el valor C<sub>NO<sub>x</sub></sub> = 15 ppm o C<sub>NO<sub>2</sub></sub>=1.5 ppm. Esta es la concentración máxima que podrá alcanzarse en el punto del túnel donde se alcance l mayor concentración.

Teniendo en cuenta los valores anteriores obtenemos una producción de dióxido de nitrógeno dentro del túnel de:



$$Q_{NOX} = 1.3 * 10^{-3} * (91.885 + 2.5 * 3.91) * 1.7 * 0.567 = 0.1273 \text{ m}^3/\text{h}$$

Al igual que en el apartado anterior calcularemos la cantidad de aire fresco necesaria para diluir esta cantidad de Dióxido de Nitrógeno mediante la siguiente formula:

$$Q_{\text{Aire}} = \frac{Q_{\text{CO}} * 10^6}{C_{\text{NOx}}}$$

Obteniéndose:

$$Q_{\text{Aire}} = \frac{0.1273 * 10^6}{15} = 8486.66 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 2.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

### **3.2.1.3 Producción de Partículas Sólidas en Suspensión**

La cantidad de Partículas sólidas en suspensión, que son las que forman los humos y dificultan la visibilidad, producidas en un túnel, vienen dadas por la siguiente expresión:

$$P_{v/s} = p_{v/s} * (M_p + 0.08 * M_l) * K_{hh} * K_s * L$$

Donde:

- $P_{v/s}$ , Cantidad de humo producido en el túnel (mg/h).
- $p_{v/s}$ , Valor base de producción de humo por parte de vehículos pesados 750 mg/vehículo km.
- $M_p$ , Tráfico de Vehículos pesados (Veh./h)
- $M_l$ , Tráfico de vehículos ligeros (Veh./h). Se asume que los vehículos ligeros producen únicamente el 8% del humo que producen los vehículos pesados.
- $K_{hh}$ , Factor de corrección por altura sobre el nivel del mar. (Ver Tabla 3.1).
- $K_s$ , Factor de corrección por conducción en pendiente. (Ver tabla 3.2)
- $L$ , longitud del túnel en km.

Desarrollando la ecuación obtenemos una cantidad de humo producido en el túnel de:

$$P_{v/s} = 750 * (3.91 + 0.08 * 91.88) * 1.25 * 1.2 * 0.567 = 7182.727 \frac{\text{mg}}{\text{h}} = 1.99 \text{ mg/s}$$

El límite superior de concentración de partículas sólidas en el aire a partir del cual se considera que la visibilidad disminuye en exceso suele tomarse como  $C_{v/s} = 1.5 \text{ mg/m}^3$ . Por lo

tanto la cantidad de aire fresco necesaria para mantener la concentración por debajo de los límites marcados será:

$$Q_{0Aire} = \frac{P_v(mg/h)}{C_{v/s}(mg/m^3)}$$

Obteniéndose un valor de:

$$Q_{0Aire} = \frac{7182.727}{1.5} = 4788.484 \frac{m^3}{h} = 1.33 m^3/s$$

### 3.2.2 Conclusión

De los caudales de gases y humos nocivos que se han calculado en los apartados anteriores necesarios para diluirlos, consideraremos el caudal mayor, ya que será el que asegurara una suficiente dilución de todas las sustancias contaminantes o peligrosas:

Gas	Producción (m <sup>3</sup> /h)	Caudal necesario para Dilución	
		m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s
Monóxido de Carbono (CO)	5.10	51021.83	14.172
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0,1273	8486,66	2,357
Partículas Sólidas en Suspensión	7182,727 (mg/h)	4788,484	1,33

*Tabla 3-7 Resumen de los caudales de producción y dilución de gases. Elaboración Propia*

Por lo tanto el caudal limitante para el diseño del sistema de ventilación será el de dilución del Monóxido de Carbono, que necesitara un caudal de aire fresco para conseguir su dilución de:

$$14.172 m^3/s$$

### 3.3 Potencia Necesaria para la ventilación del túnel en explotación

La potencia que deberán suministrar los ventiladores al flujo de aire viene dada principalmente por tres factores:

1. Pérdidas de carga del caudal necesario al circular por el túnel por rozamiento con las paredes y por pérdidas en el emboquille y en las singularidades.
2. Fuerza aeromotriz de la ventilación natural.
3. El efecto pistón de los vehículos.

La presión que han de generar los ventiladores para provocar el movimiento del aire deberá vencer estos tres elementos que ocasionaran pérdidas de carga.

### **3.3.1 Pérdidas de carga.**

#### **3.3.1.1 Pérdida de carga en el túnel**

Las pérdidas en el tramo seleccionado se establecerán en base a la resistencia aerodinámica del mismo, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$R = 153.03 * \frac{\lambda * P * L}{S^3}$$

Donde:

- $\lambda$  , Coeficiente de pérdida de carga.
- $P$  , Perímetro del conducto en el tramo considerado (m).
- $L$  , Longitud del tramo considerado (m).
- $s$  , Sección del conducto en el tramo considerado (m<sup>2</sup>).

A su vez el coeficiente de pérdida de carga del túnel se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = 0.7 * \lambda_p + 0.3 * \lambda_s$$

Siendo:

- $\lambda_p$  , Coeficiente de pérdida de carga en las paredes.

<b>SOSTENIMIENTO</b>		$\lambda_p$	
<b>ROCA DESNUDA</b>	Pared bien recortada	0,058	
	Pared con acabado medio	0,084	
	Pared irregular	0,108	
<b>ROCA BULONADA</b>	Pared bien recortada	0,058	
	Pared con acabado medio	0,084	
	Pared irregular	0,108	
	Pared con tela metálica	0,130	
<b>ROCA REVESTIDA</b>	Hormigón liso	0,022	
	Albañilería	Buen estado	0,025
		Estado medio	0,030
		Irregular	0,040

Ilustración 3 Valores para el coeficiente  $\lambda_p$ . Diseño, instalaciones y elementos de seguridad tuneles. UPM

–  $\lambda_s$ , Coeficiente de pérdida de carga del suelo.

<b>CARACTERÍSTICAS DEL SUELO</b>	$\lambda_s$
Suelo hormigonado o asfaltado	0.03
$i = 5$ cms	0.06
$i = 15$ cms	0.08
$i = 30$ cms	0.108

Tabla 3-8 Valores para el coeficiente carga del suelo. Diseño, instalaciones y elementos de seguridad. UPM

Por lo que el valor del coeficiente de pérdida de carga del túnel será:

$$\lambda = 0.7 * 0.108 + 0.3 * 0.03 = 0.0846$$

Con este coeficiente calculamos las pérdidas en el túnel:

$$R = 153.03 * \frac{0.0846 * 22.66 * 567}{22.66^3} = 14.29 \frac{N s^2}{m^8}$$

Una vez conocida la resistencia del tramo del circuito de ventilación podemos calcular la pérdida de carga a partir del caudal de aire mediante la siguiente expresión:

$$\Delta x = R * Q^2$$

$$\Delta x = 14.29 * 14.172^2 = 2870.08 Pa$$

### 3.3.1.2 Pérdidas de carga en las singularidades

La pérdida de carga en las singularidades hace referencia a aquellas perdidas de carga que sufre el flujo de aire a su paso por singularidades tales como entrada o salida de pozos de ventilación, emboquille del túnel, trampillas...etc.

En este caso el valor de la resistencia aerodinámica viene dado por la siguiente expresión:

$$R_s = \xi * \frac{Y}{2 * g * S^2} = \xi * \frac{0.61}{S^2}$$

Siendo:

- $R_s$  , Resistencia aerodinámica de la singularidad ( $Ns^2/m^3$ )
- $\xi$  , Coeficiente de fricción de la singularidad.

Tipo de Singularidad		E
Cambio de dirección en ángulo recto de aristas vivas		1,4
Cambio de dirección en ángulo recto sin aristas	Radio interior=1/4 radio exterior	0,6
	Radio interior=2/5 radio exterior	0,3
Emboquille		0,6
Trampilla		3,6
Enlace con pozo con aristas vivas		2
Enlace con pozo sin aristas		1

Tabla 3-9 Valores de  $\xi$  .Elaboración Propia

- $Y$  , Peso específico del aire.
- $g$  , Aceleración de la gravedad.
- $S$  , Sección de la singularidad ( $m^2$ ).

En este caso se calculará la singularidad producida por el emboquille del túnel, ya que no existen otras singularidades dentro del túnel que puedan causar pérdidas de carga significativas.

Aplicando la ecuación obtenemos:

$$R_s = 0.6 * \frac{12.01}{2 * 9.81 * 22.66^2} = 7.15 \times 10^{-4} \frac{N s^2}{m^3}$$

Una vez obtenida la resistencia aerodinámica de la singularidad podemos calcular la pérdida de carga producida por esta mediante la siguiente expresión:

$$\Delta X_s = R_s * Q^2$$

Siendo.

- $\Delta X_s$ , Pérdida de carga en la singularidad (Pa).
- $R_s$ , Resistencia aerodinámica de la singularidad ( $Ns^2/m^8$ ).
- $Q$ , Caudal de aire que atraviesa la singularidad ( $m^3/s$ )

Con lo que obtenemos una pérdida de carga debido a la singularidad de:

$$\Delta X_s = 7.15 \times 10^{-4} * 14.172^2 = 0.1436 \text{ Pa}$$

### **3.3.1.3 Efecto Pistón de los vehículos**

El efecto Pistón es producido por los vehículos al circular por el túnel, sobre todo en los túneles unidireccionales.

Para calcular la fuerza del efecto pistón creada por los vehículos deberemos considerar por separado la incidencia de los vehículos ligeros y de los pesados, para posteriormente sumar las fuerzas asociadas a los efectos pistón, y dividiéndolas por la sección del túnel obtener la presión en Pascales. Para ello emplearemos la formulación siguiente:

$$F_p = \frac{\rho}{2} * \frac{i_F * A_v}{\left(1 - \frac{A_v}{S}\right)^2} * |N' * (V_t - V)^2 - N * (V_t + V)^2|$$

Siendo:

- $F_p$ , Fuerza de efecto pistón (N).
- $\rho$ , Densidad del aire ( $1.23 \text{ kg/m}^3$ )
- $S$ , Sección recta del túnel ( $m^2$ ).
- $A_v$ , Sección recta de los vehículos.
  - $2 \text{ m}^2$  para turismos.
  - $6 \text{ m}^2$ , para camiones y autobuses.
- $I_f$ , Factor de forma para determinar la superficie resistente efectiva.



- 0.5 para turismos.
- 1.0-1.7 para camiones y autobuses.
- N', N, Numero de vehículos que en un momento dado, el que se considere para realizar el diseño de la ventilación, se desplazan dentro del túnel a la velocidad de diseño, categorizándolos si lo hacen en la dirección del flujo de aire o en contra de esta.
- V<sub>t</sub>, Velocidad del tráfico (m/s).
- V, Velocidad del aire (m/s).

Como puede observarse en la formula, las expresiones dependen de los términos N' y N, que aluden a la presencia de vehículos en un determinado momento en el túnel. Para poder determinar dicho parámetro, se deberá multiplicar la intensidad vehicular horaria por el tiempo que tarda un determinado vehículo a la velocidad de régimen en cruzar el túnel. Tal y como observamos a continuación:

$$T. de recorrido del tunel = \frac{0.567 \text{ km}}{80 \text{ km/h}} = 7.0875 \times 10^{-3} \text{ h.}$$

Por lo que en un determinado momento en el túnel nos encontraremos con el siguiente número de vehículos tanto vehículos ligeros como pesados:

$$N. ligeros = 40.83 \frac{\text{vehiculos}}{\text{h}} * 7.0875 \times 10^{-3} = 0.289 \text{ vehiculos ligeros}$$

$$N. pesados = 1.66 \frac{\text{vehiculos}}{\text{h}} * 7.0875 \times 10^{-3} = 0.011 \text{ vehiculos pesados}$$

Sustituyendo los valores en la expresión del efecto pistón obtenemos que:

$$F_{p \text{ ligeros}} = \frac{1.23}{2} * \frac{0.5 * 2}{\left(1 - \frac{2}{22.66}\right)^2} * |0.289 * (22.22 + 1.79)^2| = 123.258 \text{ Pa.}$$

$$F_{p \text{ pesados}} = \frac{1.23}{2} * \frac{1.35 * 6}{\left(1 - \frac{6}{22.66}\right)^2} * |0.011 * (22.22 + 1.79)^2| = 58.4395 \text{ Pa.}$$

Con lo que la presión asociada al efecto pistón será:

$$P_v = \frac{F_{p.Ligeros} + F_{p.Pesados}}{Seccion}$$

$$P_v = \frac{123.258 + 58.4395}{22.66} = 8.01 Pa.$$

Por lo tanto podemos determinar que la pérdida total será la suma de todas ellas:

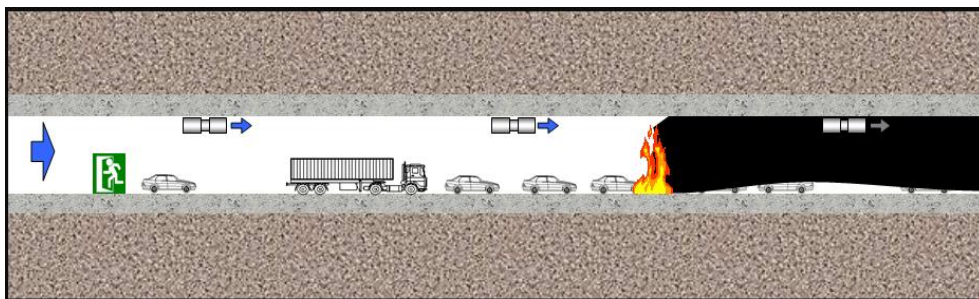
$$\Delta H total = 8.01 + 0.1436 + 2870.08 = 2878.233 Pa$$

El ventilador que debe usarse será aquel cuya curva característica corte a la del túnel en el punto más cercano posible a los valores de caudal y pérdida de carga calculados, si bien siempre por exceso.

### **3.4 Ventilación contra Incendios**

Aunque según datos estadísticos los incendios en túneles son sucesos poco frecuentes, no se supera la media de 25 incendios por cada  $10^8$  veh.Km. Se ha creído conveniente incluir un estudio de las necesidades o características que deberá cumplir el sistema de ventilación ante tal situación.

Al adoptar un sistema de ventilación longitudinal, la corriente de aire tendera a arrastrar los humos en la dirección del flujo de aire, produciéndose la situación que se muestra en la siguiente ilustración:



*Ilustración 4 Arrastre de humos en caso de incendio con ventilación longitudinal.seguridadentuneles.com*

En la dirección del caudal de aire generado por los ventiladores los humos se desestratificaran rápidamente por la turbulencia y el enfriamiento provocado por el aire de ventilación, mientras que en la zona de entrada del aire se mantendrá libre de humos.



Para que se de esta situación la velocidad del aire tiene que ser suficientemente alta para que no se produzca un fenómeno de retroceso conocido como backlayer , consistente en que los humos avanzan en el sentido contrario al de la ventilación , debido al incremento de presión por la temperatura en la zona de incendio.

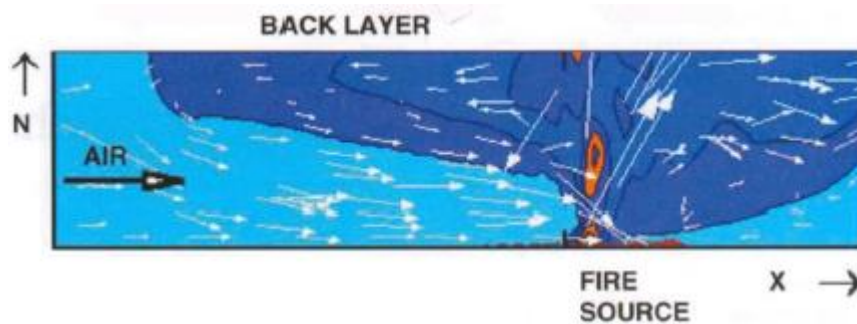


Ilustración 5 Esquema de retroceso de humos en un incendio con Backlayer.HWAN05

La velocidad de aire necesaria para evitar este fenómeno se denomina velocidad crítica. Existen diversas expresiones para calcular esta velocidad crítica, usaremos la propuesta por Kennedy et al. , definida en la normativa Americana NFPA08.

### 3.4.1 Velocidad crítica

Como ya se ha comentado en párrafos anteriores, en el ámbito Nacional más concretamente en el Real Decreto 635/2006, de 26 de Mayo, sobre Requisitos Mínimos de Seguridad en los túneles de Carreteras del Estado. No se establecen pautas sobre los sistemas de ventilación a utilizar según las características del túnel.

Sin embargo en otros países existen normativas o recomendaciones sobre la ventilación en túneles, que son utilizadas frecuentemente es España.

Para el cálculo de la velocidad crítica acudiremos a la normativa Americana para el cálculo de la velocidad crítica definida en la norma NFPA08 como se muestra a continuación:

$$V_c = k_1 * k_2 * \left[ \frac{g * H * Q}{\rho * C_p * A * \left( \frac{Q}{\rho * C_p * A * V_c} + T \right)} \right]^{1/3}$$

Donde:



- $V_c$ , Velocidad Crítica (m/s).
- $K_1$ , 0.61 ( constante adimensional).Determinado a partir del número de Froude
- $K_2$ , Constante de corrección por la pendiente del túnel según la expresión:

$$K_2 = 1 + 0.0374 * S^{0.8}$$

Siendo S la pendiente del túnel en %.

- g, Aceleración gravitacional (m/s<sup>2</sup>).
- H, Altura desde la base del fuego hasta la parte más alta del túnel.
  - Para un fuego sobre la calzada es igual a la altura máxima del túnel.
  - Para un fuego en un camión algunos autores proponen que este se produce a un metro de altura sobre la calzada.
- Q, Potencia del fuego según HRR (Heat Release Rate) (W).
- $\rho$ , Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).
- $C_p$ , Calor específico del aire (J/kg.K).
- A, Sección del túnel (m<sup>2</sup>).
- T, Temperatura ambiente (K).La temperatura ambiente la calcularemos mediante la siguiente expresión:

$$T = t_{nivel\ del\ mar} - \left( \frac{H_{m.s.n.m}}{\Delta t_{fresco}} \right) = 20 - \frac{H_{m.s.n.m}}{200}$$

$$T = 20 - \frac{370}{200} = 18.15\ C^o$$

Como vemos en los parámetros anteriores para poder aplicar la fórmula de Kennedy necesitamos conocer la potencia del fuego según el Heat Release Rate o HRR.

Como aproximación a este valor tomaremos los facilitados por Ingasson 2001 y Sipp 2002, mostrados en la siguiente ilustración:

Tipo de vehículo	Potencia (HRR) MW	Max. temp. en paredes del túnel (°C)	Producción de humo (m3/s)
Turismo	2,5 - 5	400	20
2-3 turismos	8	-	30
Furgoneta	15	-	50
Autobús	20	800	60-90
Camión de mercancías	20-30	1000	60-90
Vagón de metro	35	-	-
Camión cisterna	100-300	1200-1400	> 100

*Ilustración 6 Características medias de los incendios según el tipo de vehículo afectado. Ingasson 2001 y Sipp 2002*

Como hemos visto en el punto 3.1 del presente anejo “*Categorización del Tráfico*” el 94% por ciento de los vehículos que discurrirán por el túnel serán vehículos ligeros, por lo que la mayor probabilidad de incendio será la producida por uno de estos. Dicho esto tomaremos como valor del HRR el mayor disponible para los turismos, es decir 5 MW.

Obtenemos una velocidad crítica para evitar el backlayering de:

$$V_c = 0.61 * 1.065 * \left[ \frac{9.81 * 7.85 * 5000000}{1.225 * 1012 * 75.74 * \left( \frac{5}{1.225 * 1012 * 75.74 * V_c} + 18.15 \right)} \right]^{1/3}$$

$$10.3984 * \sqrt[3]{\frac{1}{18.15 + \frac{0.000053251}{V_c}}} = V_c$$

$$V_c = 3.95679 \text{ m/s}$$

Por lo que en caso de incendio para que los humos sean evacuados correctamente por una de las bocas habrá que proporcionar una velocidad de 3.95679 m/s.

### **3.5 Solución de Ventilación tomada**

Dentro de los sistemas de ventilación existentes:

- Natural.



- Longitudinal.
- Transversal.
- Semitransversal.
- Mixto.

Se ha seleccionado como sistema de ventilación para la ventilación primaria el sistema longitudinal que es el sistema de ventilación más utilizado debido a su efectividad y bajo coste.

Como se ha calculado en los apartados anteriores el caudal más desfavorable a tener en cuenta nos obliga a seleccionar unos ventiladores capaces de administrar un caudal de  $14.172 \text{ m}^3/\text{s}$  al túnel.

Para ello se seleccionan los siguientes ventiladores:

- Ventilador Reversible “JZR”, Marca Zitron. Modelo JZR 9-15/4.

Las características técnicas de estos ventiladores se pueden observar en la siguiente ilustración:

MODELO TYPE	Caudal Air Flow m <sup>3</sup> /s	Velocidad del chorro Jet Velocity m/s	Empuje Teórico Theoretical Thrust N.	Empuje Nominal Nominal Thrust N.	Potencia Absorbida Input Power Kw.	Potencia Instalada Installed Power Kw.	Niv. Sonoro a 10 mts. Noise level at 10 mts. dB(A)
JZR 5-5.5/2	5.5	28.0	185	168	4.9	5.5	67
JZR 5-7.5/2	6.3	32.1	243	221	7.3	7.5	71
JZR 6-7.5/2	8.0	28.3	272	258	6.6	7.5	67
JZR 6-11/2	9.3	32.9	367	349	10.4	11.0	70
JZR 6-15/2	10.3	36.4	450	428	14.1	15.0	72
JZR 7-11/2	11.3	29.4	398	380	9.9	11.0	68
JZR 7-15/2	12.7	33.0	503	481	14.1	15.0	70
JZR 7-18.5/2	13.5	35.1	569	543	16.9	18.5	71
JZR 7-22/2	14.5	37.7	656	626	20.9	22.0	73
JZR 9-15/4	17.6	27.7	585	558	13.7	15.0	71
JZR 9-18.5/4	19.0	29.9	681	647	17.2	18.5	72
JZR 9-22/4	20.4	32.1	785	746	21.3	22.0	74
JZR 10-15/4	20.7	26.4	655	626	14.4	15.0	70
JZR 10-22/4	23.0	29.3	809	768	19.7	22.0	72
JZR 10-30/4	26.3	33.5	1057	1004	29.5	30.0	74
JZR 10-37/4	28.0	35.7	1198	1139	35.6	37.0	75
JZR 12-18.5/4	28.5	25.2	862	819	18.1	18.5	72
JZR 12-22/4	30.6	27.1	994	954	21.3	22.0	73
JZR 12-30/4	33.3	29.5	1177	1130	28.4	30.0	74
JZR 12-37/4	35.6	31.5	1345	1292	34.7	37.0	75
JZR 12-45/4	38.2	33.8	1549	1487	42.9	45.0	76
JZR 12-55/4	40.4	35.7	1733	1663	50.7	55.0	77
JZR 14-30/6	42.0	27.3	1376	1314	29.8	30.0	69
JZR 14-37/6	43.7	28.4	1489	1422	34.1	37.0	70
JZR 14-45/6	46.3	30.1	1672	1597	40.6	45.0	71
JZR 14-55/6	49.7	32.3	1926	1840	50.2	55.0	74
JZR 14-75/6	54.7	35.6	2334	2229	68.0	75.0	75
JZR 16-45/6	57.1	28.4	1947	1859	43.9	45.0	72
JZR 16-55/6	61.2	30.5	2237	2136	54.0	55.0	73
JZR 16-75/6	66.0	32.8	2601	2484	67.8	75.0	75
JZR 16-90/6	70.2	34.9	2943	2810	81.6	90.0	77

Ilustración 7 Características Técnicas Ventiladores Zitron.Zitron

### 3.5.1 Numero de Ventiladores

El número de ventiladores teórico necesario viene dado por la expresión:

$$N_v = \frac{E_t}{E_u * \Phi_i}$$

Donde:

- $E_t$ , Empuje total a proporcionar por los ventiladores (N).
- $E_u$ , Empuje unitario por ventilador (N).
- $\Phi_i$ , Factor de Instalacion.Indicados en la siguiente tabla.

Instalación	Coeficiente
Ventilador montado esquinado en túnel	0,7
Montado a 1 diámetro de pared o techo	0,8
Montado a 1,5 diámetros de pared o techo	0,9
Nicho	0,8
Varios JET en nichos	0,7

*Tabla 3-10 Coeficientes de instalación de los ventiladores.Ingesa Geoconsult.*

Con lo que obtenemos un número de ventiladores de:

$$N_v = \frac{2878.233}{558 * 0.7} = 7.36 = 8 \text{ Ventiladores}$$

Con lo que se dispondrán de cuatro parejas de ventiladores separadas 100 metros cada una y respetando una distancia de 25 metros a ambas bocas del túnel , tal y como se puede observar en el plano adjunto de ventilación.

## **4 Ventilación Secundaria**

En las obras de ejecución de túneles, que no son ventiladas por la corriente principal (fondos de saco), será necesaria una ventilación específica para asegurar que tenemos en el frente de trabajo el aire necesario para remover los gases emitidos por la maquinaria, voladura...etc.

Una instalación de ventilación secundaria está formada principalmente por un ventilador y una tubería, así como dependiendo de la situación serán imprescindibles también otros elementos como captadores de polvo...etc.

### **4.1 Determinación del caudal de aire necesario**

La determinación del caudal de aire necesario para la ventilación secundaria se deberá fijar en base al mayor caudal requerido por las siguientes necesidades:

1. Respiración del personal.
2. Dilución de los gases de explosivos.
3. Dilución de los gases de escape de motores diésel.

#### **4.1.1 Gases producidos en la voladura**

Cuando tiene lugar una voladura los gases y vapores de esta se expanden en la galería hasta, llegado un momento, se detienen bruscamente formando un tapón, cuya longitud inicial es importante estimar para determinar la concentración que en él tienen los gases. La concentración máxima del tapón se presentara en el frente del mismo.

Con el paso del tiempo, al desplazarse el tapón por el túnel o la galería su longitud aumenta y su concentración de gases nocivos disminuye.

Para determinar el tiempo de dilución de los gases de la voladura, deberemos tener en cuenta dos conceptos:

1. Una vez formado el tapón de humos, puesto que la instalación de ventilación está aportando aire limpio, se empieza a desplazar el tapón de humos a medida que se va mezclando con el aire limpio. Tendremos, por tanto dos concentraciones de gases distintas, una concentración de gases tóxicos inicial en el tapón de humos y otra final

en el momento en el que el tapón llegue a la salida del túnel. Supondremos la composición de la mezcla de los gases constante.

2. Cuando el tapón llegue finalmente a la salida del túnel, la mezcla tendrá una concentración de gases tóxicos que puede ser superior a la concentración admisible de gases tóxicos. Por consiguiente al seguir aportando aire la concentración de la mezcla seguirá disminuyendo por lo que tendremos un tiempo de dilución adicional que hemos de tener en cuenta.

Una vez aclarados estos dos conceptos, podemos continuar calculando la longitud del tapón de humos, que viene dada por la expresión:

$$L = \frac{K * M}{F_A * D * \sqrt{A}}$$

Donde:

- L, Longitud del tapón de humos (m).
- K, Constante de dispersión para los avances en túneles, su valor es 25.
- M, Masa de explosivo (kg).
- F<sub>a</sub>, Avance por ciclo (m).
- D, Densidad de la roca (t/m<sup>3</sup>).
- A, Área del frente de avance.

Realizaremos el cálculo para todo el conjunto de la voladura, sin distinción entre la voladura de avance y la de destroza, obteniendo una longitud de tapón de:

$$L = \frac{25 * 347.745}{4 * 2.72 * \sqrt{260.59}} = 49.49 \text{ m}$$

Este tapón de humos tendrá una composición de gases nocivos que dependerá del tipo de explosivo utilizado. Para el tipo de explosivo utilizado tenemos una composición de gases nocivos de:



Gas	Gas producido/Kg de explosivo (kg/kg)	Densidad del gas (g/m <sup>3</sup> )	Volumen de gas producido/kg de explosivo (m <sup>3</sup> )
CO	0,0163	1,25	0,01304
CO <sub>2</sub>	0,1639	1,977	0,082903
NO <sub>2</sub>	0,0035	1,36	0,002574

Tabla 4-1 Composición de los gases producidos por la voladura. Elaboración Propia basada en ZITRON

Por lo tanto los gases producidos en la voladura serán aproximadamente:

- 5.66 Kg. de CO.
- 56.99 kg. de CO<sub>2</sub>.
- 1.21 kg. de NO<sub>2</sub>

Para la dilución de estos gases será necesario proporcionar un caudal de aire fresco de:

$$Q = 0.166 * 347.745 = 57.72 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### **4.1.2 Caudal de aire necesario para el personal**

Para calcular la necesidad del caudal de aire exigido por el personal recurriremos a la siguiente ecuación:

$$Q = 3 * N$$

Siendo N, el número de operarios en el frente.

Tomando como referencia, por exceso, diez operarios que permanezcan simultáneamente en el frente de excavación obtenemos:

$$Q = 3 * 10 = 30 \text{ m}^3/\text{min} = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### **4.1.3 Caudal para dilución de los gases producidos por la maquinaria**

##### **4.1.3.1 Maquinaria con motores de combustión Interna**

Este caudal se calculara en función del instante en el que mayor número de maquinaria con motores diésel esté trabajando simultáneamente dentro del túnel.

La normativa existente para túneles establece que el cálculo del caudal necesario para diluir los gases producidos por la maquinaria en el frente se rige por la siguiente expresión:

$$Q = 0.066 * PKW$$

Siendo:

- PKW, la suma de las potencias en kilovatios de los motores diésel de las maquinas que pueden trabajar simultáneamente.

El momento donde más maquinaria, es decir el más desfavorable, se producirá durante las labores de desescombro del túnel. Durante estas labores coincidirán dentro del túnel:

- 2 Camiones de extracción del material.365 kW cada uno
- 1 Pala cargadora.215 kW

Con lo que el caudal necesario será de:

$$Q = 0.066 * 945 = 62.37 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### **4.1.3.2 Maquinaria con motores eléctricos**

El caudal necesario para diluir los gases producidos por los motores eléctricos viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = 0.016 * Pkw$$

La maquinaria eléctrica utilizada durante las labores es:

- Perforadora de 293 kW
- Gunitadora de 136.6 kW.

Con lo que obtenemos un caudal para la dilución de los gases producidos por estas de:

$$Q = 0.016 * 429.6 = 6.87 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### **4.1.3.3 Caudal de retorno necesario**

La velocidad mínima de retorno de ventilación es un valor de referencia bastante usado por simplicidad.

Como referencia en todo tipo de túneles y galerías, una velocidad mínima de retorno de 0.5 m/s es suficiente.

Esta velocidad de retorno definirá un caudal en el frente de trabajo de:

$$Q = 0.5 * S$$

Donde:

- S, es la sección del túnel en m<sup>2</sup>.

Los caudales de retorno que obtendremos serán dos, uno para el avance y otro para la destroza, siendo estos:

$$Q_{Avance} = 0.5 * 44.8361 = 22.41805 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{Destroza} = 0.5 * 30.9071 = 15.45355 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 4.2 Conclusiones

Al igual que en la ventilación primaria el caudal que se utilizara para determinar los ventiladores que se usaran será aquel que de una situación más desfavorable.

Motivo		Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Gases Voladura		57,72
Personal		0,5
Maquinaria	Combustión Interna	62,37
	Motores Eléctricos	6,87

Tabla 4-2 Resumen de las necesidades de Caudal de aire limpio. Elaboración Propia

Como podemos observar en la tabla anterior el caudal mayor, es decir el más restrictivo, será el necesario para diluir los gases de la maquinaria de combustión interna. Sera para este caudal para el que calcularemos las necesidades de los ventiladores.

Por lo tanto el caudal necesario para mantener la corriente de aire será:

$$Q = 0.4 * 62.37 = 24.948 \text{ m}^3/\text{s}$$



## 5 Selección del sistema de ventilación

Para el dimensionamiento de la instalación se utilizara el caudal más restrictivo es decir, el caudal mayor necesario.

Consideraremos unas pérdidas de carga del 1,5 % por cada cien metros de túnel, por lo que el caudal necesario será:

$$Q = 24.948 + \left(1.5 * \frac{567}{100}\right) = 33.453 \text{ m}^3/\text{s}$$

El diámetro del tubo de ventilación viene definido por la siguiente expresión:

$$D = 0.29 * \sqrt{Q}$$

Obteniéndose un diámetro de:

$$D = 0.29 * \sqrt{33.453} = 1.67 \text{ m}$$

El ventilador AVH125 de la Atlas Copco, garantiza el suministro de este caudal con un rango de caudales de suministro de entre 14-42 m<sup>3</sup>/s.

La tubería utilizada será una tubería Tipo soplante lisa, como las que fabrica la empresa Fatuve S.A con diámetros desde los 100 hasta los 2500 mm, con lo que podremos escoger la adecuada para nuestra ventilación de 1670 mm.