



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño y simulación de un sistema de ventilación mecánica  
longitudinal para su implementación como elemento de  
contención de incendios en túneles de tránsito vehicular”

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Proyecto De Graduación

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Miguel Angel Flores Monard

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2015

## AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres, a mis profesores y amigos, porque ellos han contribuido y motivado la realización de este trabajo final.

## DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres.

A Jenny Ramos.

A mis amigos.

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

M.Sc. Jorge Duque R.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

M.Sc. Francisco Andrade S.  
DIRECTOR DEL TFG

---

M.Sc. Jorge Duque R.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Miguel Angel Flores Monard

## RESUMEN

En el presente trabajo se estableció como objetivo el diseño y simulación de un sistema de ventilación mecánica de emergencia para un túnel de tránsito vehicular, el cual sea capaz de actuar durante un incendio controlando los humos generados. El diseño se realizó para implementarse en uno de los túneles que se tiene previsto realizar en el cerro Zhizhio, localizado en el sector de la Josefina (Provincia del Azuay).

Primero se seleccionó que tipo de sistema de ventilación mecánica es el adecuado de acuerdo a las características del túnel. Luego se diseñó el incendio y se determinó la velocidad crítica necesaria para eliminar el reflujos de humo dentro del túnel.

Posteriormente se calculó la caída de presión del sistema y a partir de ésta se determinó el empuje necesario de los ventiladores. Este empuje se corrigió debido a las condiciones de operación, a la eficiencia de la instalación y la eficiencia de los ventiladores y con esto se determinó el empuje real con el cual debe seleccionarse los equipos del catálogo. Se estableció también la ubicación de los ventiladores y el costo total del proyecto.

Finalmente se evaluó la efectividad del sistema por medio de una simulación de dinámica de fluidos computacional, en la cual se comparó el funcionamiento de la ventilación a velocidad menor que la crítica con el funcionamiento a velocidad crítica, y se establecieron las diferencias en el comportamiento del humo para ambas condiciones analizadas.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....</b>	<b>3</b>
1.1. Descripción del Proyecto.....	3
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Condiciones ambientales.....	7
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES.....</b>	<b>9</b>
2.1. Tipos de túneles.....	9



2.2.	Métodos de construcción de túneles.....	14
2.3.	Tipos de secciones transversales.....	18
2.4.	Elementos típicos presentes en los túneles de tránsito vehicular.....	21
2.5.	Ventilación en túneles.....	23
2.6.	Control de incendios en túneles.....	24

### **CAPÍTULO 3**

<b>3.</b>	<b>SISTEMAS DE VENTILACIÓN PARA CONTROL DE INCENDIOS EN TÚNELES DE TRÁNSITO VEHICULAR.....</b>	<b>41</b>
3.1.	Principios físicos de incendios en túneles.....	41
3.2.	Parámetros que influyen en el comportamiento del humo en túneles.....	54
3.3.	Sistema de ventilación natural en túneles.....	58
3.4.	Sistemas de ventilación mecánica en túneles.....	61
3.5.	Equipos y accesorios del sistema de ventilación.....	73

### **CAPÍTULO 4**

<b>4.</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE EMERGENCIA.....</b>	<b>80</b>
4.1.	Selección del sistema de ventilación.....	80
4.2.	Dimensionamiento del incendio.....	83

4.3.	Cálculo de velocidad crítica.....	86
4.4.	Cálculo del caudal.....	90
4.5.	Cálculo del empuje.....	91
4.6.	Selección del equipo de ventilación.....	108
4.7.	Distribución de los equipos dentro del túnel.....	111
4.8.	Análisis de costos.....	114

## **CAPÍTULO 5**

### **5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE EMERGENCIA..... 120**

5.1.	Aspectos generales de la dinámica de fluidos computacional aplicada a sistemas de ventilación de emergencia.....	120
5.2.	Geometría del problema.....	125
5.3.	Mallado.....	126
5.4.	Condiciones de frontera.....	128
5.5.	Resolución del problema.....	131
5.6.	Análisis de resultados.....	136

## **CAPÍTULO 6**

### **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 155**

6.1.	Conclusiones.....	155
------	-------------------	-----

6.2. Recomendaciones..... 156

**APÉNDICES**

**BIBLIOGRAFÍA**

## ABREVIATURAS

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ASHRAE	American Society of Heating Ventilation and Air Conditioning Engineers
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CMR	Requerimiento condicionado (Conditionally mandatory requirement)
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DMRB	Design Manual for Roads and Bridges
°	Grado sexagesimal
°C	Grado Celsius
ft <sup>2</sup>	Pies cuadrados
HRR	Tasa de liberación de calor (Heat Release Rate)
INAHMI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
K	Grado Kelvin
kg	Kilogramo
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatt
km	Kilómetro
km/h	Kilómetro por hora
lb	Libra
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
min	Minuto
msnm	Metros sobre el nivel del mar
MR	Requerimiento obligatorio (Mandatory requirement)
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
MW	Megawatt
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NFPA	National Fire Protection Association
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program

NMR	Requerimiento no obligatorio (Nonmandatory requirement)
PHRR	Tasa pico de liberación de calor (Peak Heat Release Rate)
%	Porcentaje
PIARC	World Road Association
PVC	Cloruro de polivinilo
RABT	Directrices para el equipo y la operación de los túneles de carretera (Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln)
s	Segundo
SEM	Método Secuencial de Excavación (Sequential Excavation Method)
TBM	Tunnel Bored Machine
W	Watt

## SIMBOLOGÍA

$\alpha$	Atenuación
$A$	Área frontal de un vehículo
$A_T$	Área de la sección transversal del túnel
$A_V$	Área de la sección transversal del ventilador
$C_w$	Coefficiente de arrastre de un vehículo
$d$	Pendiente del túnel
$D_H$	Diámetro hidráulico
$\Delta P_{\text{Chim}}$	Caída o aumento de presión debido al efecto chimenea
$\Delta P_{\text{entrada}}$	Caída de presión debido a la fricción con la entrada
$\Delta P_{\text{MT}}$	Caída de presión debido a los fenómenos meteorológicos
$\Delta P_{\text{pared}}$	Caída de presión debido a la fricción con las paredes
$\Delta P_{\text{salida}}$	Caída de presión debido a la fricción con la salida
$\Delta P_{\text{tu}}$	Caída de presión generada por la fricción con el túnel
$\Delta P_{\text{veh}}$	Caída de presión generada por tráfico paralizado
$\varepsilon$	Rugosidad equivalente
$\varepsilon_r$	Emisividad resultante
$f$ :	Factor de fricción
$Fr$	Número de Froude
$g$	Aceleración de la gravedad
$H$	Altura del túnel
$I_0$	Intensidad inicial
$I_x$	Intensidad final
$K_1$	Factor del número de Froude
$K_2$	Factor por pendiente del túnel
$L$	Longitud del túnel
$\mu$	Viscosidad cinemática
$N$	Número de vehículos paralizados
$P_T$	Perímetro del túnel
$q$	Calor total liberado
$q_{\text{automóvil}}$	Calor liberado por un automóvil
$q_{\text{bus}}$	Calor liberado por un bus

$q_{\text{camión}}$	Calor liberado por un camión
$Q_T$	Caudal de aire en el túnel
$Q_V$	Caudal del ventilador
$\rho_{\infty}$	Densidad del aire en el ambiente
$Re$	Número de Reynolds
$\sigma$	Constante de Stefan – Boltzman
$T$	Temperatura
$T_{\infty}$	Temperatura ambiental
$T_F$	Temperatura media de los gases en el sitio del incendio
$T_S$	Temperatura media de los gases que salen del túnel
$T_L$	Transmitancia
$V$	Velocidad del aire
$V_c$	Velocidad crítica
$V_{\text{veh}}$	Velocidad de los vehículos
$V_{\text{Vent}}$	Velocidad de ventilador
$x$	Distancia recorrida
$\zeta$	Coefficiente de fricción para la entrada del túnel

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Detalle del mapa vial de la provincia del Azuay.....	4
Figura 1.2. Sección transversal del túnel.....	6
Figura 2.1. Túnel Cerro El Carmen.....	10
Figura 2.2. Esquema del Eurotúnel.....	12
Figura 2.3. Túnel sin revestir.....	13
Figura 2.4. Túnel revestido.....	14
Figura 2.5. Vista de la construcción de un túnel Cut and Cover.....	15
Figura 2.6. Esquema de un túnel sumergido.....	16
Figura 2.7. Tuneladora empleada en el proyecto hidroeléctrico Coca – Codo – Sinclair.....	17
Figura 2.8. Perforación y voladura de un túnel.....	18
Figura 2.9. Sección circular.....	19
Figura 2.10. Sección rectangular.....	20
Figura 2.11. Sección de herradura y curvilínea.....	20
Figura 2.12. Elementos típicos de un túnel.....	22
Figura 2.13. Espacio mínimo y recomendado por la AASHTO para un túnel de dos carriles [3].....	23
Figura 2.14. Incendio en túnel de San Eduardo.....	27
Figura 2.15. Salida de emergencia.....	34



Figura 2.16. Vista de un túnel transversal .....	35
Figura 3.1. Triángulo del fuego.....	42
Figura 3.2. Tetraedro del fuego.....	42
Figura 3.3. Elementos de extinción para las diferentes clases de fuego.....	45
Figura 3.4. Tiempo tolerable al calor por convección [7].....	46
Figura 3.5. Tolerancia del cuerpo humano a diferentes niveles de flujo de Radiación [7].....	48
Figura 3.6. Diagrama de un medidor de humos [8].....	50
Figura 3.7. Reflujo de humo o backlayering.....	54
Figura 3.8. Desarrollo del humo en un túnel sin velocidad longitudinal del aire.....	55
Figura 3.9. Influencia de la velocidad longitudinal [8].....	56
Figura 3.10. Ventilación natural: (A) Portal a portal y (B) Portal a pozo [9]....	60
Figura 3.11. Ventilación longitudinal: (A), (B), (C) Por inyección de aire y (D) por jet fans [9].....	64
Figura 3.12. Ventilación longitudinal en túnel unidireccional.....	66
Figura 3.13. Ventilación semitransversal: (A) Por inyección, (B) Por extracción y (C) Por inyección y extracción [9].....	68
Figura 3.14. Ventilación completamente transversal [9].....	70
Figura 3.15. Sistema de extracción localizada [5].....	72
Figura 3.16. Ventiladores axiales: (A) Tuboaxial, (B) Vaneaxial y (C) Jet fan.....	75
Figura 3.17. Ventilador centrífugo.....	76
Figura 3.18. Ventilador acoplado a un atenuador rectangular.....	78
Figura 3.19. Damper de hojas paralelas.....	79
Figura 4.1. Factor de pendiente vs % de pendiente [8].....	88

Figura 4.2.	Diagrama de Moody.....	99
Figura 4.3.	Detalle de batería de ventilación.....	112
Figura 5.1.	Geometría del túnel.....	125
Figura 5.2.	Mallado del túnel.....	126
Figura 5.3.	Modelos físicos seleccionados.....	132
Figura 5.4.	Propiedades del aire.....	133
Figura 5.5.	Condiciones de operación.....	134
Figura 5.6.	Residuos del Caso 1.....	135
Figura 5.7.	Residuos del Caso 2.....	135
Figura 5.8.	Contorno de temperatura longitudinal Caso 1 (Tiempo= 20 s).....	137
Figura 5.9.	Contorno de temperatura transversal Caso 1 (Tiempo= 20 s).....	137
Figura 5.10.	Contorno de temperatura longitudinal Caso 1 (Tiempo= 40 s).....	138
Figura 5.11.	Contorno de temperatura transversal Caso 1 (Tiempo= 40 s).....	138
Figura 5.12.	Contorno de temperatura longitudinal Caso 1 (Tiempo= 60 s).....	139
Figura 5.13.	Contorno de temperatura transversal Caso 1 (Tiempo= 60 s).....	139
Figura 5.14.	Contorno de temperatura longitudinal Caso 1 (Tiempo= 80 s).....	140
Figura 5.15.	Contorno de temperatura transversal Caso 1 (Tiempo= 80 s).....	140
Figura 5.16.	Contorno de temperatura longitudinal Caso 1 (Tiempo= 100 s).....	141

Figura 5.17. Contorno de temperatura transversal Caso 1 (Tiempo= 100 s).....	141
Figura 5.18. Contorno de temperatura longitudinal Caso 1 (Tiempo= 120 s).....	142
Figura 5.19. Contorno de temperatura transversal Caso 1 (Tiempo= 120 s).....	142
Figura 5.20. Distribución de temperatura tridimensional Caso 1 (Tiempo= 120 s).....	143
Figura 5.21. Distribución de velocidad Caso 1 (Tiempo= 120 s).....	144
Figura 5.22. Vectores de velocidad Caso 1 (Tiempo= 120 s).....	144
Figura 5.23. Contorno de temperatura longitudinal Caso 2 (Tiempo= 20 s).....	146
Figura 5.24. Contorno de temperatura transversal Caso 2 (Tiempo= 20 s).....	146
Figura 5.25. Contorno de temperatura longitudinal Caso 2 (Tiempo= 40 s).....	147
Figura 5.26. Contorno de temperatura transversal Caso 2 (Tiempo= 40 s).....	147
Figura 5.27. Contorno de temperatura longitudinal Caso 2 (Tiempo= 60 s).....	148
Figura 5.28. Contorno de temperatura transversal Caso 2 (Tiempo= 60 s).....	148
Figura 5.29. Contorno de temperatura longitudinal Caso 2 (Tiempo= 80 s).....	149
Figura 5.30. Contorno de temperatura transversal Caso 2 (Tiempo= 80 s).....	149
Figura 5.31. Contorno de temperatura longitudinal Caso 2 (Tiempo= 100 s).....	150

Figura 5.32. Contorno de temperatura transversal Caso 2 (Tiempo= 100 s).....	150
Figura 5.33. Contorno de temperatura longitudinal Caso 2 (Tiempo= 120 s).....	151
Figura 5.34. Contorno de temperatura transversal Caso 2 (Tiempo= 120 s).....	151
Figura 5.35. Distribución de temperatura tridimensional Caso 2 (Tiempo= 120 s).....	152
Figura 5.36. Distribución de velocidad Caso 2 (Tiempo= 120 s).....	153
Figura 5.37. Vectores de velocidad Caso 2 (Tiempo= 120 s).....	153

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Características del túnel..... 5
Tabla 2	Incendios registrados en túneles (1999-2010) [4]..... 26
Tabla 3	Requerimientos de protección contra incendios en túneles de carretera (I) [5]..... 31
Tabla 4	Requerimientos de protección contra incendios en túneles de carretera (II) [5]..... 32
Tabla 5	Efectos en el ser humano por la disminución de la concentración de oxígeno en el aire..... 52
Tabla 6	Ventajas y desventajas de la ventilación longitudinal..... 81
Tabla 7	Ventajas y desventajas de la ventilación transversal y semitransversal..... 82
Tabla 8	Tasa pico de liberación de calor para vehículos típicos [5]..... 84
Tabla 9	Resultados de la velocidad crítica y la temperatura promedio de gases..... 89
Tabla 10	Cantidad de vehículos bloqueados..... 94
Tabla 11	Caída de presión debido a los vehículos paralizados..... 95
Tabla 12	Rugosidad equivalente $\epsilon$ [13]..... 98
Tabla 13	Caída de presión debido a la fricción con las paredes del túnel..... 100
Tabla 14	Valor total de la caída de presión debido a la fricción con el túnel..... 102
Tabla 15	Caída de presión debido a la pendiente del túnel..... 104
Tabla 16	Valor total de la caída de presión en el túnel..... 107
Tabla 17	Características del ventilador [14]..... 110

Tabla 18	Distancia a la cual se consideran destruidos los ventiladores [15].....	113
Tabla 19	Costo de los equipos.....	114
Tabla 20	Costo de materiales.....	115
Tabla 21	Costo de mano de obra.....	116
Tabla 22	Costos directos.....	117
Tabla 23	Costos indirectos.....	118
Tabla 24	Costos totales.....	119
Tabla 25	Características de la geometría.....	126

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas viales son importantes para el desarrollo de todo país ya que a través de ellos se realiza la movilización de personas, bienes y servicios, los cuales dinamizan la economía del país. Parte de estos sistemas viales está compuesto por túneles de tránsito vehicular que permiten unir dos puntos geográficos que generalmente se encuentran separados por una elevación o por algún otro tipo de accidente geográfico que impide el paso a través de ellos.

Los proyectos de construcción de túneles de tránsito vehicular deben contemplar, desde su inicio, la implementación de un sistema de ventilación el cual no solo disperse los contaminantes generados por los vehículos dentro del túnel sino que también provea un ambiente adecuado en las situaciones de emergencia, como es el caso de un incendio. Un correcto diseño y selección de los equipos para las situaciones de emergencia ayudará a la evacuación de las personas que se encuentran en el interior del túnel, reducirá la expansión del fuego a otras secciones y ayudará a mitigar los daños a la estructura.

Por esto, durante el diseño, instalación y puesta en marcha del sistema de ventilación de emergencia se deben cumplir con ciertas recomendaciones técnicas y estándares que son elaboradas por los entes internacionales especializados en ventilación y en control de incendios (ASHRAE, NFPA, PIARC), para de esta forma garantizar la efectividad de estos sistemas en el caso de un incidente. También es muy importante el predecir y analizar el comportamiento de estos sistemas de ventilación, para este propósito se han desarrollado algunos métodos de análisis, entre estos tenemos la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) que a través de sus modelos permiten elaborar simulaciones de los escenarios propuestos y así obtener una descripción sobre su funcionamiento.



# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

### 1.1. Descripción del proyecto

El presente proyecto desarrollará el análisis y diseño de un sistema de ventilación mecánica de emergencia requerido para uno de los dos túneles unidireccionales de tránsito vehicular que se tienen previsto a construir en el cerro Zhizhio durante los trabajos de ampliación de la vía Guangarcucho-Lumagpamba–Paute–Gualaceo, que forman parte de la carretera Transversal Austral E40 y la vía colectora Gualaceo-Gualaquiza E594. La importancia de esta vía radica en que ésta interconecta la Sierra con las provincias orientales a través de Troncal Amazónica, además de mejorar la vialidad hacia las centrales hidroeléctricas de Paute y Mazar. A través de estas vías circulan actualmente alrededor de 11000 vehículos diarios, entre vehículos livianos y pesados [1].



FIGURA 1.1. DETALLE DEL MAPA VIAL DE LA PROVINCIA DEL AZUAY

Para el análisis del proyecto se deben establecer las características geométricas y constructivas recomendadas del túnel, las cuales se detallan en la Tabla 1.

**TABLA 1**  
**CARACTERÍSTICAS DEL TÚNEL**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Números de túneles	1
Número de carriles	2
Tipo de tráfico	Unidireccional
Longitud del túnel (L)	1.8 km
Pendiente del túnel (d)	1% ascendente
Área de la sección transversal ( $A_T$ )	70.2 m <sup>2</sup>
Perímetro de la sección transversal ( $P_T$ )	32.62 m
Revestimiento	Concreto
Altura del túnel (H)	7.19 m

La sección del túnel será de tipo herradura con un gálibo de 4.7 m de altura y 9.9 m de ancho.

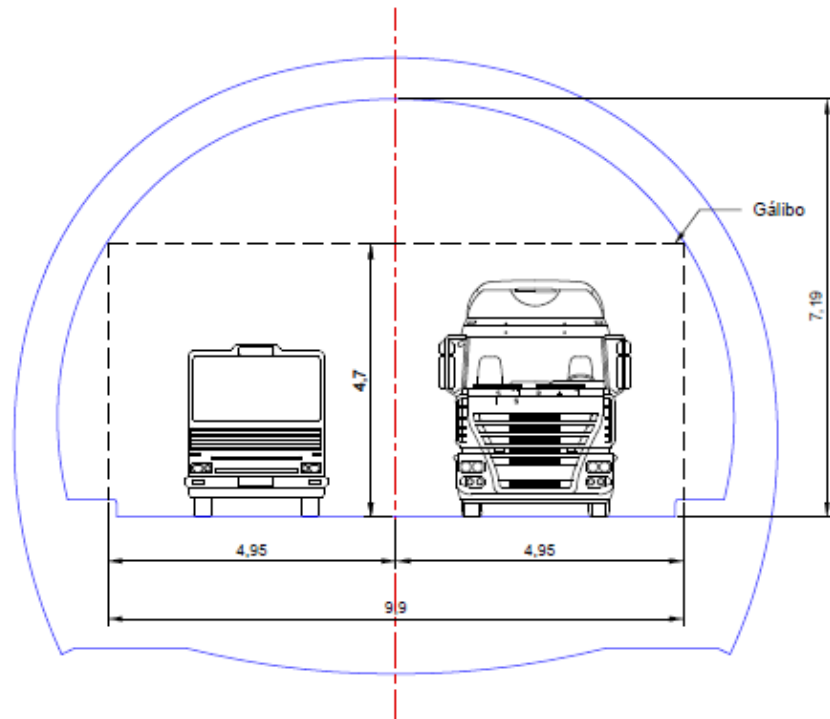


FIGURA 1.2. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TÚNEL

## 1.2. Objetivos

### Objetivo General

Diseñar un sistema de ventilación longitudinal de emergencia para un túnel de tránsito vehicular unidireccional.

### Objetivos Específicos

- Seleccionar el sistema de ventilación mecánica que satisfice las condiciones del proyecto

- Calcular la velocidad crítica requerida para evitar el reflujo de humo.
- Calcular el empuje requerido por el sistema de ventilación.
- Seleccionar los equipos de ventilación mecánica.
- Simular el sistema de ventilación para comprobar su efectividad ante un evento de emergencia.

### **1.3. Condiciones ambientales**

El túnel para el cual se diseñará el sistema de ventilación estará ubicado en el sector de la Josefina, situado aproximadamente a 2200 msnm, que goza de un clima templado con precipitaciones todo el año.

De acuerdo al Anuario Meteorológico del 2011 elaborado por el INAHMI [2], en la estación más cercana de Gualaceo las condiciones ambientales son las siguientes:

- Temperatura ambiente media: 18 °C
- Temperatura ambiente máxima: 28.8 °C
- Temperatura ambiente mínima: 2.8 °C
- Humedad relativa media: 70%

- Velocidad media del viento: 27 km/h con una dirección predominante hacia el suroeste durante la mayor parte del año
- Presión atmosférica aproximada: 78.23 kPa durante todo el año

# **CAPÍTULO 2**

## **2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES**

### **2.1. Tipos de túneles**

#### **Túneles urbanos y de carretera**

Los túneles ubicados dentro de las circunscripciones de las ciudades se denominan túneles urbanos mientras que aquellos que están fuera de las ciudades son conocidos túneles de carretera. Debido a sus características y capacidad de tránsito, las exigencias de seguridad y ventilación son mayores en los túneles urbanos que en los de carretera.



FIGURA 2.1. TÚNEL CERRO EL CARMEN (GUAYAQUIL)

En nuestro país hay túneles urbanos como los de los cerros Santa Ana, del Carmen y San Eduardo en Guayaquil, y los de San Roque, San Diego, San Juan, Guayasamín en Quito. También es posible encontrar túneles de carretera como los de Agoyán, Chaguarpata, San Jorge, Río Blanco, Río Verde, Cadenillas, entre otros.

### **Túneles de tránsito vehicular y ferroviario**

En los túneles de tránsito vehicular circulan automotores livianos y pesados mientras que a través de los túneles ferroviarios solo hay circulación trenes. Generalmente las medidas de seguridad



de los túneles ferroviarios son muy inferiores a las de los túneles de tránsito vehicular ya que presentan una menor siniestralidad.

### **Túneles terrestres, fluviales y marinos**

Los túneles terrestres atraviesan el terreno de forma subterránea o a través del relieve montañoso, un ejemplo es el túnel de Lærdal, que con sus 24.5 km es el túnel de carretera más largo del mundo.

Por su parte, los túneles fluviales atraviesan lagos o ríos, y los túneles marinos atraviesan el mar. Estos tipos de túneles pueden ser excavados por debajo del lecho impermeable o elaborados de secciones prefabricados. Ejemplos de túneles fluviales se tienen al túnel del río Elba en Hamburgo y el del río Paraná en Paraguay, mientras que entre los túneles marinos están el Eurotúnel en el Canal de La Mancha y el túnel Seikan en Japón.



FIGURA 2.2. ESQUEMA DEL EUROTÚNEL

### Túneles con tráfico bidireccional y unidireccional

Los túneles bidireccionales, son aquellos en los que se ha construido un solo túnel y la carretera que lo transita tiene tráfico en ambos sentidos de circulación; mientras que los túneles unidireccionales se caracterizan porque cada sentido de circulación, transita por un túnel diferente; es decir hay dos túneles, uno para cada sentido de circulación.

Los túneles unidireccionales son mucho más seguros que los bidireccionales. Además, en caso de incendio, este tipo de túneles ofrecen menores dificultades para las actividades de extinción y el rescate.

### **Túneles revestidos y sin revestir**

Los túneles sin revestir son aquellos en los que el terreno queda a la vista a lo largo de toda su trayectoria. Suelen ser más usuales en terrenos duros y rocosos, donde es difícil que se produzcan desprendimientos.



**FIGURA 2.3. TÚNEL SIN REVESTIR**

Los túneles revestidos son los que tienen algún material que los aísla de la visión directa del terreno excavado. Este material puede ser láminas impermeabilizantes de chapa metálica u hormigón. Los túneles revestidos con hormigón ofrecen una protección adicional frente a los desprendimientos, una mayor resistencia estructural frente al fuego y un comportamiento del

régimen de ventilación más laminar, con menores pérdidas de carga debido a la fricción con las paredes.



FIGURA 2.4. TÚNEL REVESTIDO

## 2.2. Métodos de construcción de túneles

La selección del método de construcción define el tipo de sección transversal que poseerá el túnel y es un proceso que considera múltiples factores, entre ellos la profundidad del túnel, el número de carriles, tipo de terreno atravesado y las tecnologías disponibles.

Los principales métodos de construcción de túneles son:

- **Cut and cover:** Se elaboran excavando una zanja, luego se construye la estructura de concreto dentro de la zanja y

posteriormente se la cubre con tierra. Los túneles pueden construirse en sitio o se pueden emplear secciones prefabricadas.



FIGURA 2.5. VISTA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL CUT AND COVER

- **Túnel sumergido:** Se emplean en túneles submarinos, son elaborados con grandes secciones de túnel prefabricadas de concreto o de acero vaciadas con concreto, realizadas en tierra y que luego son llevadas al sitio donde se colocan en las zanjas preparadas bajo el mar conectándose a las secciones previamente instaladas y finalmente son cubiertos con el material de relleno.

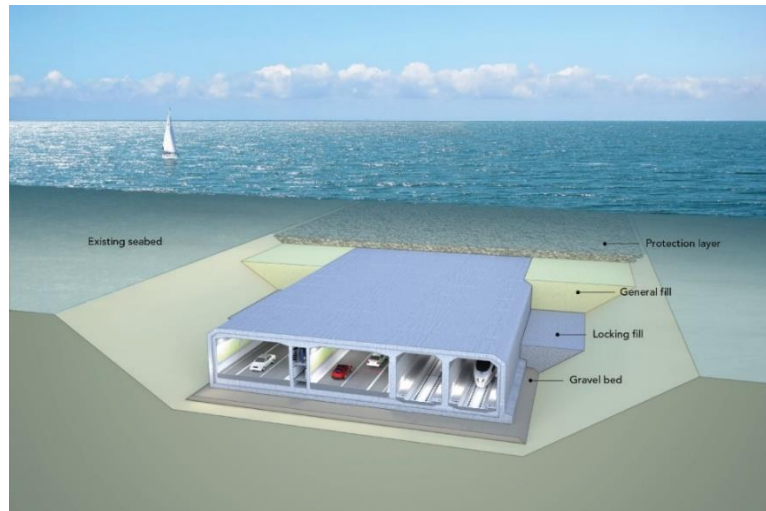


FIGURA 2.6. ESQUEMA DE UN TÚNEL SUMERGIDO

- **Método de Excavación Secuencial (SEM):** Conocido también como el Nuevo Método Austriaco. Consiste en una excavación secuencial de la sección transversal de un túnel, luego de la cual se instala un revestimiento primario temporal que combina el uso de hormigón proyectado reforzado con mallas y pernos de anclaje. Una vez alcanzado el punto equilibrio del esfuerzo de este primer sostenimiento, se coloca el revestimiento definitivo.
- **Túnel TBM:** Son túneles perforados por tuneladoras o TBM's (Tunnel Bored Machine), las cuales son máquinas que excavan por medio de rotación y trituración aplicando altas

presiones y grandes fuerzas cortantes con los discos cortantes localizados en la cabeza de corte.



FIGURA 2.7. TUNELADORA EMPLEADA EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA - CODO SINCLAIR

- **Perforación y voladura:** Es uno de los métodos más comunes para túneles largos a través de roca dura y muy empleado antes del uso extendido de las tuneladoras. Consiste en la perforación de varios agujeros en la roca, en los cuales luego se colocan explosivos que harán que la roca colapse. Posteriormente se retiran los escombros y se refuerzan las paredes del túnel.





FIGURA 2.8. PERFORACIÓN Y VOLADURA DE UN TÚNEL

- **Túnel hincado:** Son estructuras prefabricadas que son hincadas horizontalmente por medio de gatos hidráulicos a través del terreno empleando métodos para reducir la fricción superficial. Se emplean en túneles poco profundos en donde la superficie del terreno no debe perturbarse por los trabajos.

### 2.3. Tipos de secciones transversales

Aunque muchos túneles por dentro tengan una apariencia rectangular, debido a sus paredes y techo recubiertos, la sección transversal real no necesariamente lo es. Existen tres tipos de secciones transversales más comunes: circular, rectangular y de



herradura o curvilíneo. El empleo de una determinada sección transversal depende mucho del método de construcción así como de las condiciones del terreno.

Los túneles de sección circular se construyen con el uso de tuneladoras y también a través de la técnica de perforación y voladura.

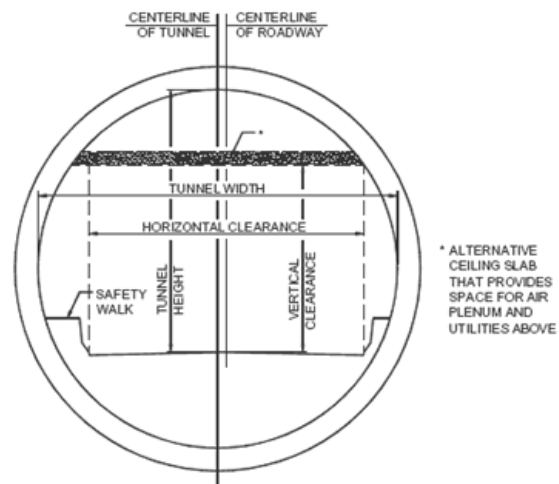


FIGURA 2.9. SECCIÓN CIRCULAR

Los túneles de sección rectangular, generalmente se construyen mediante las técnicas de cut and cover, de túnel sumergido y de túnel hincado.

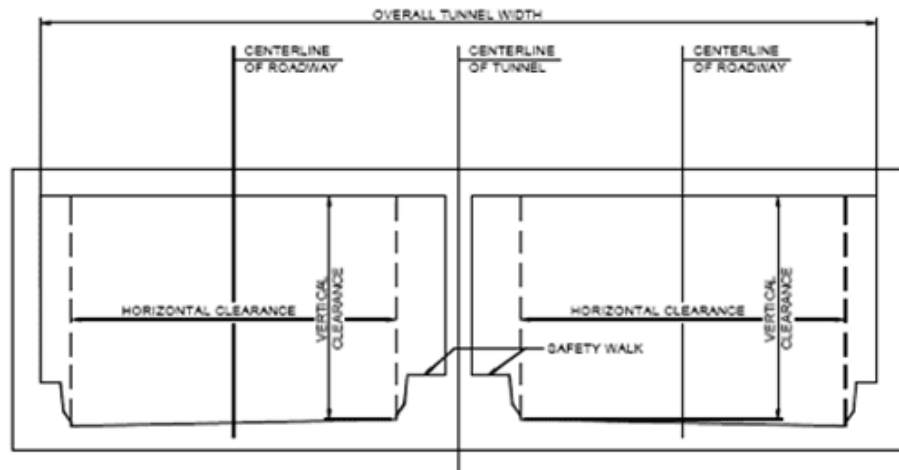


FIGURA 2.10. SECCIÓN RECTANGULAR

Los túneles de sección de herradura o curvilíneas (ovales) comúnmente se construyen usando la técnica de perforación y voladura y el Método Secuencial de Excavación [3].

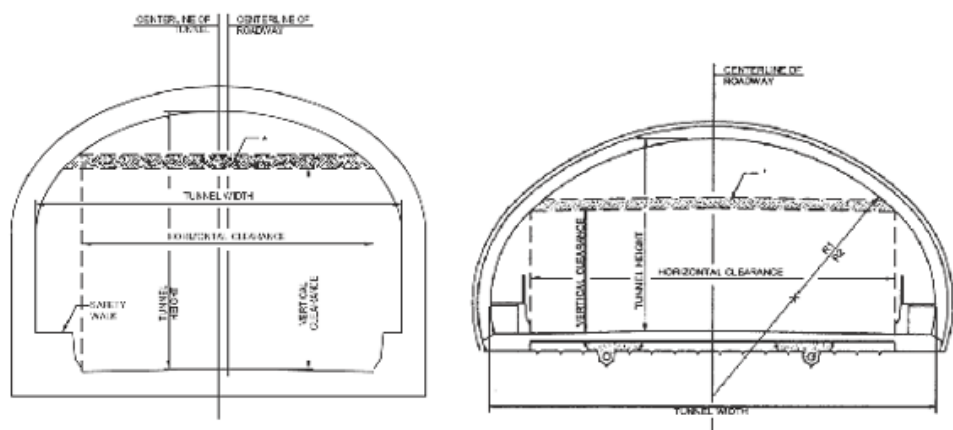


FIGURA 2.11. SECCIÓN DE HERRADURA Y CURVILÍNEA

## **2.4. Elementos típicos presentes en los túneles de tránsito vehicular**

Sin importar cuál es la geometría de la sección transversal del túnel, existen elementos que siempre están presentes. Entre estos elementos típicos tenemos:

- Carriles de circulación vehicular
- Andenes
- Aceras y bordillos
- Drenajes
- Ventilación
- Iluminación
- Sistema de alimentación de energía
- Tuberías de suministro de agua del sistema contraincendios
- Gabinetes contraincendios
- Señalética
- Cámaras de seguridad y control
- Teléfonos y estaciones de emergencia
- Sensores para monitoreo de emisiones nocivas y visibilidad

Otros elementos adicionales pueden necesitarse de acuerdo a los requerimientos del diseño y se deben tomar en consideración al momento de determinar la geometría del túnel.

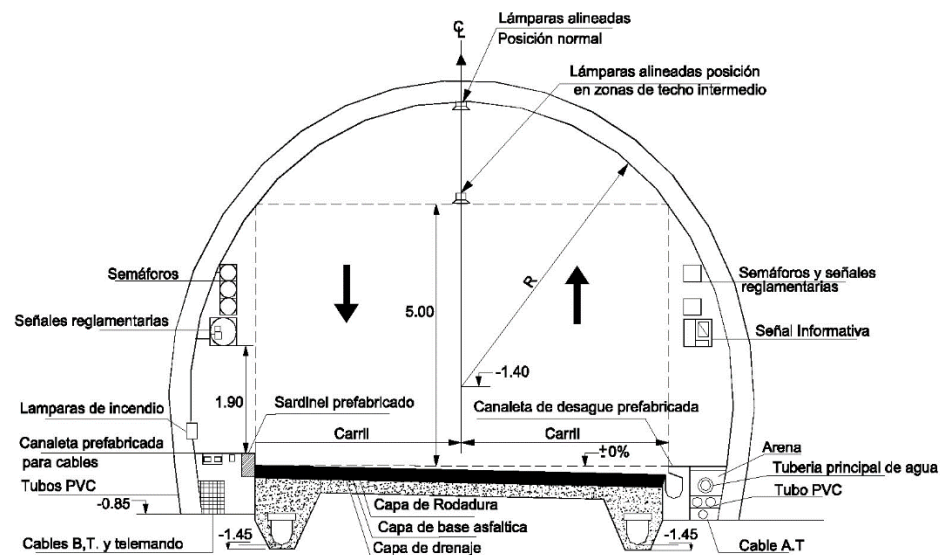


FIGURA 2.12. ELEMENTOS TÍPICOS DE UN TÚNEL

El gálibo del túnel define los límites máximos del movimiento vertical y lateral de los vehículos que viajan en el túnel a la velocidad de diseño. El gálibo se determina de acuerdo a la envolvente dinámica de los vehículos, la cual toma en cuenta a la envolvente estática del vehículo y también a otros factores como el movimiento lateral, fallas de la amortiguación, rebotes, proyecciones en curvas, repavimentación, etc. El diagrama del espacio libre debe considerar alturas potenciales de vehículos futuros, tolerancias de

construcción, entre otros, de tal manera que los equipos de ventilación, iluminación y señales no invadan el espacio ocupado por el gálibo.

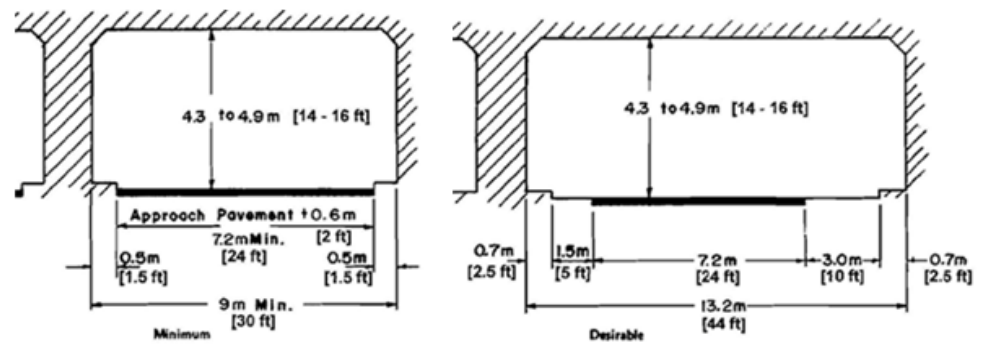


FIGURA 2.13. ESPACIO MÍNIMO Y RECOMENDADO POR LA AASHTO PARA UN TÚNEL DE DOS CARRILES [3]

## 2.5. Ventilación en túneles

El sistema ventilación es el conjunto de ventiladores y conductos que permiten tanto la inyección de aire fresco a través del túnel así como la extracción de los humos generados. La calidad del aire y los correspondientes requisitos de flujo de aire del sistema de ventilación están determinadas principalmente por el tipo y la cantidad de contaminantes que se generan o se inducen en el túnel. También deben considerarse las cantidades de aire necesarias para limitar las altas temperaturas de aire y las concentraciones de

estos contaminantes a niveles aceptables para tiempo específicos de exposición.

La ventilación en túneles puede ser de tres tipos: normal, de emergencia y temporal. La ventilación normal es aquella que se requiere durante la operación normal del túnel y se emplea para controlar la temperatura y el nivel de contaminación. La ventilación de emergencia es la requerida en situaciones catastróficas dentro del túnel, generalmente incendios, donde se requiere un control más riguroso de los contaminantes que se generan en el interior. La ventilación temporal se emplea durante la etapa de construcción o en las tareas de mantenimiento que se realizan fuera de las horas de funcionamiento del túnel. Lo más común es que la ventilación temporal se remueva posteriormente a las labores realizadas.

## **2.6. Control de incendios en túneles**

La seguridad durante un incendio es de gran importancia dentro del diseño de túneles. Los incendios en túneles de carretera que han sucedido no solo han provocado pérdidas humanas y costosos daños materiales sino que sentaron los precedentes sobre la necesidad de implementar medidas de seguridad. Como

consecuencia se han implementado sistemas de control de incendios, que con sus diversos elementos, contribuyen a la prevención, detección, contención y extinción de incendios.

Los principales objetivos de los sistemas de control de incendios en túneles son:

- Disminuir la pérdida de vidas al hacer posible la evacuación de los usuarios
- Permitir las operaciones de rescate y de combate de incendios
- Evitar explosiones en el interior del túnel.
- Limitar el daño a la estructura del túnel y a los equipos, así como también a las construcciones aledañas.

TABLA 2

## INCENDIOS REGISTRADOS EN TÚNELES (1999 – 2010) [4]

Año	Túnel	País	Daños		
			Personas	Vehículos	Estructura
1999	Mont Blanc	Francia - Italia	39 muertes	23 camiones 10 autos 1 motocicleta 2 camiones de bomberos	Serios
1999	Tauern	Austria	12 muertes 49 heridos	14 camiones 26 autos	Serios
2000	Seljestad	Noruega	6 heridos	1 camión 4 autos 1 motocicleta	-
2001	Praponti	Italia	19 heridos	-	Serios
2001	Gleinalm	Austria	5 muertos 4 heridos	-	-
2001	Propontin	Italia	14 heridos	1 auto	-
2001	Guldborgsung	Dinamarca	5 muertos 6 heridos	-	-
2001	St. Gotthard	Suiza	11 muertos	2 camiones	-
2002	Ostwaldiberg	Austria	1 muerto	-	-
2003	44-France	Francia	2 muertos	1 auto 1 motocicleta	-
2003	Baregg	Suiza	2 muertos 21 heridos	4 camiones 3 camiones de bomberos	Serios
2004	Baregg	Suiza	1 muerte 1 herido	1 camión 1 auto	-
2005	Frejus	Francia - Italia	2 muertes	4 camiones 1 auto	-
2006	Viamala	Suiza	9 muertes 6 heridos	-	-
2007	Burnley	Australia	3 muertes	4 camiones 7 autos	Leves
2007	Santa Clarita	EE. UU.	3 muertos 23 heridos	33 camiones 1 auto	
2009	Gubrist	Suiza	4 heridos	2 autos	
2010	Trojane	Eslovenia	5 heridos	1 camión	
2010	Wuxi Lihu	China	24 muertos 19 heridos	1 autobús	





FIGURA 2.14. INCENDIO EN TÚNEL DE SAN EDUARDO  
(GUAYAQUIL)

En general, los incendios en túneles son eventos que raramente suceden. De acuerdo a estadísticas del PIARC, los incendios de mayor magnitud se producen con frecuencia en túneles urbanos. En el 95% de casos, los incendios son generados por el tránsito vehicular dentro del túnel (ya sea por colisiones, desperfectos eléctricos, sobrecalentamientos) y no por daños de los equipos del túnel o por tareas de mantenimiento. En nuestro país han ocurrido

este tipo de siniestros como el registrado en uno de los túneles del cerro San Eduardo en Guayaquil el 23 de abril del 2013, en el cual un vehículo repartidor de cerveza se incendió a consecuencia de un desperfecto eléctrico. Este evento no registro heridos pero sí daños materiales.

Durante un incendio varias amenazas ponen en riesgo la vida de las personas, tales como la inhalación de productos de combustión, exposición a altas temperaturas y flujos de calor. Además la evacuación se dificulta por la reducción de la visibilidad, fallas en el sistema eléctrico, vías de escape obstruidas por los vehículos colisionados, obstrucción del túnel debido a explosiones y colapso del túnel. Estas amenazas constituyen un desafío especialmente cuando los primeros 10 a 15 minutos luego del incidente son cruciales para la evacuación de las personas y para limitar los daños materiales.

En la planificación y el diseño del sistema de protección contra incendios es importante comprender los problemas de seguridad que se producen en los incendios de túneles de carretera y considerar su impacto. La *National Fire Protection Association*

(NFPA) por medio de su “Norma para los túneles de carretera, puentes y otras carreteras de acceso limitado (NFPA 502)” proporciona los requerimientos de protección contra incendios para los túneles de carretera [5]:

- Protección de los elementos estructurales
- Sistemas de detección de incendios
- Sistemas de comunicación
- Sistemas de control de tráfico
- Protección contra incendios (es decir, suministro de agua, extintor de fuego portátil, sistemas de extinción de incendios fijos a base de agua, etc.)
- Sistema de ventilación de emergencia
- Sistema de drenaje del túnel
- Salidas de emergencia
- Protección del sistema eléctrico
- Plan de respuesta a emergencias.

Según la NFPA 502, el nivel de seguridad de los túneles de acuerdo a su longitud puede clasificarse conforme a lo siguiente:

- Categoría X: Túneles con longitud menor a 90 m.
- Categoría A: Cuando la longitud del túnel es de 90 m o más.
- Categoría B: Cuando la longitud del túnel es igual o excede los 240 m y donde la máxima distancia desde cualquier punto hasta un punto de seguridad excede los 120 m.
- Categoría C: Cuando la longitud del túnel es igual o mayor a los 300 m.
- Categoría D: Cuando la longitud del túnel excede los 1000 m.

A partir de esta clasificación se enlistan, en las Tablas 3 y 4, los requerimientos de seguridad que corresponde a cada categoría. En ella se indican aquellos requerimientos que son obligatorios (MR), los requerimientos condicionados (CMR) y los requerimientos no obligatorios (NMR).

**TABLA 3**  
**REQUERIMIENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS**  
**EN TÚNELES DE CARRETERA (I) [5]**

SISTEMA DE PROTECCIÓN	CATEGORÍA DEL TÚNEL				
	X	A	B	C	D
<b>Sistemas de Detección</b>					
Detección, identificación y localización de incendios en el túnel	CMR	CMR	MR	MR	MR
Alarmas manuales contra incendios	CMR	CMR	MR	MR	MR
Circuito cerrado de cámaras	CMR	CMR	CMR	CMR	CMR
Sistema automático de detección de incendios	CMR	CMR	CMR	CMR	CMR
Control central de detección de incendios	CMR	CMR	MR	MR	MR
<b>Control de Tráfico</b>					
Señal de detención del tráfico que se aproxima al túnel	MR	MR	MR	MR	MR
Señal de detención del tráfico que entra al túnel	-	-	MR	MR	MR
<b>Protección contra incendio</b>					
Camión de bomberos	NMR	NMR	NMR	NMR	NMR
Sistema de tubo vertical	CMR	MR	MR	MR	MR
Suministro de agua	CMR	MR	MR	MR	MR
Siamesas	CMR	MR	MR	MR	MR
Conexiones de mangueras	CMR	MR	MR	MR	MR
Bombas de agua del sistema contra incendios	CMR	CMR	CMR	CMR	CMR
Extintores portátiles	CMR	CMR	MR	MR	MR
Sistema de extinción de incendios a base de agua	NMR	NMR	NMR	NMR	CMR
Sistema de ventilación de emergencia	CMR	CMR	CMR	CMR	MR
Sistema de drenaje	CMR	CMR	MR	MR	MR
Detectores de hidrocarburos	CMR	CMR	MR	MR	MR

**TABLA 4**  
**REQUERIMIENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS**  
**EN TÚNELES DE CARRETERA (II) [5]**

SISTEMA DE PROTECCIÓN	CATEGORÍA DEL TÚNEL				
	X	A	B	C	D
<b>Salidas de Emergencia</b>					
Salida de emergencia	CMR	CMR	MR	MR	MR
Señales de identificación de las salidas de emergencia	CMR	CMR	MR	MR	MR
Ambiente sostenible	CMR	CMR	MR	MR	MR
Salidas de emergencia (incluyendo túneles transversales)	CMR	CMR	CMR	MR	MR
<b>Sistemas de Comunicación</b>					
Radio	CMR	CMR	MR	MR	MR
Teléfono	CMR	CMR	MR	MR	MR
<b>Sistema Eléctrico</b>					
General	CMR	CMR	MR	MR	MR
Energía de emergencia	CMR	CMR	MR	MR	MR
Iluminación de emergencia	CMR	CMR	MR	MR	MR
Señales de salida	CMR	CMR	MR	MR	MR
Plan de seguridad	CMR	CMR	MR	MR	MR
<b>Plan de Emergencias</b>					
Plan de emergencias	MR	MR	MR	MR	MR

Algunas de las características de los requerimientos de protección contra incendios se detallan a continuación:

- **Salidas de emergencia**

Los túneles de carretera deben disponer de salidas de emergencias claramente identificadas y ubicadas a intervalos regulares. Su objetivo es el de minimizar la exposición de los ocupantes de los vehículos a un ambiente adverso generado por la presencia de humos en el túnel.

El espacio entre las salidas de emergencia no será superior a 300 m, y está determinado por factores como el tipo de túnel, los resultados del diseño de incendios, el nivel de tráfico en el túnel, el plan de emergencia y las consideraciones del comportamiento humano en respuesta a situaciones de emergencia.

Las puertas deberán estar protegidas del tránsito vehicular y contar con un ancho mínimo de 1.1 m. La señalización que indica la dirección y la distancia hacia una salida de emergencia más cercana estará montada sobre las

pasarelas de emergencias a intervalos de no más de 25 m. Estas rutas de escape tienen que estar provistas de iluminación adecuada y estar conectadas al sistema de energía de emergencia



FIGURA 2.15. SALIDA DE EMERGENCIA

En los túneles en el que el tráfico circula por varios tubos, los túneles transversales que los interconectan se pueden emplear como refugio, para esto su construcción debe resistir el fuego por al menos 2 horas y estar equipados con puertas con sistema de cierre automático. En estos casos la distancia entre refugios no será mayor a 200 m y se requiere construir un andén de seguridad de mínimo 1.12 m de ancho a ambos lados de donde se encuentran estos refugios.



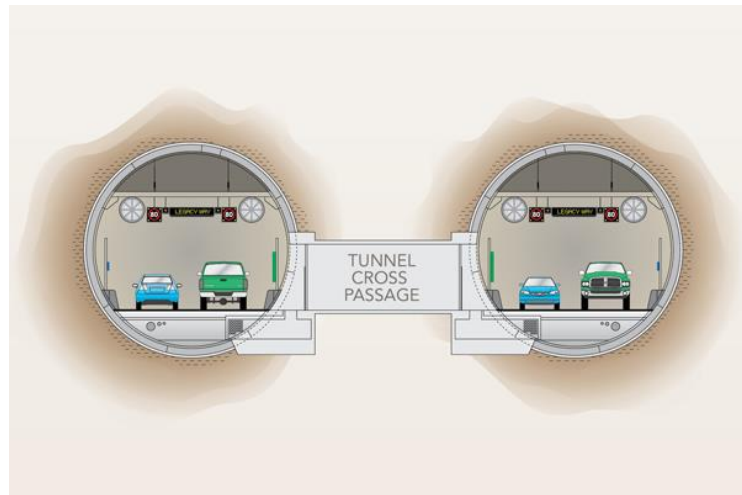


FIGURA 2.16. VISTA DE UN TÚNEL TRANSVERSAL

En túneles de grandes longitudes se construyen galerías de emergencia para el parqueo de vehículos en lugares cercanos a las salidas de emergencia.

- **Ventilación de emergencia**

En los túneles se debe implementar un sistema de ventilación de emergencia el cual sea capaz de controlar los humos generados a la vez de proveer de aire fresco para permitir la evacuación de conductores y ser soporte para el personal de respuesta de emergencias. A menudo el sistema de ventilación de emergencias es el mismo sistema de ventilación normal operado a velocidades altas.

Para el diseño de este sistema se estudian diversos escenarios, de tal forma que la operación de los ventiladores debe estar basado en la ubicación del fuego y la dirección de evacuación del túnel. Se recomienda que los ventiladores estén conectados al sistema de energía de emergencia en caso de fallas en el sistema primario de energía.

- **Sistemas de detección, iluminación y comunicación**

El túnel debe estar provisto de un sistema de iluminación de emergencia y de un sistema de detección de incendios conectados a los sistemas de extinción de incendios. Estos sistemas deben dar una alarma rápida y confiable cuando se presentan condiciones de operación inusuales o situaciones de emergencia.

El riesgo de propagación de incendios a través de los conductos de cable de alimentación de electricidad se elimina mediante el uso de conductos a prueba de fuego y cables ignífugos. Se requiere que las instalaciones vitales

sean suministradas con cables resistentes al fuego, además de que los materiales utilizados no liberen gases tóxicos o agresivos como el cloro.

Se deben instalar teléfonos de emergencia dentro de los túneles los cuales estarán conectados a la fuente de alimentación de emergencia. Cuando se utiliza estos teléfonos, la localización de la persona que llama debe identificarse en el centro de control y también en el sitio por medio de una señal lumínica visible para el personal de rescate. Estos teléfonos se ubicaran en las salidas de emergencia y refugios. Los sistemas de comunicación deben dar a los usuarios del túnel la posibilidad de pedir ayuda y recibir instrucciones, para poder realizar un rescate organizado.

La cobertura de radio para el personal de policía, bomberos y otros servicios de emergencia debe extenderse a lo largo del túnel. Es muy importante que ellos puedan utilizar sus radios móviles dentro de túneles y pasajes transversales. Los sistemas de radio no deben interferir entre sí y deben estar

conectados a la fuente de alimentación de emergencia. También es recomendable proporcionar la cobertura de telefonía móvil.

- **Sistemas de extinción de incendios**

A lo largo del túnel se deben disponer de varios sistemas de supresión de incendios, tales como extintores y sistemas a base de agua. En algunas instalaciones también se han empleado sistemas de espuma y sistemas de rociadores o *fire sprinklers*.

Extintores portátiles con una categorización de 2-A:20-B:C deben ser dispuestos en gabinetes a lo largo del túnel en intervalos de no más de 90 m. Para facilitar su uso, el máximo peso de cada extintor será 9 kg (20 lb).

Por su parte los sistemas de extinción de incendios a base de agua se emplean para ralentizar, detener o revertir la tasa de crecimiento del fuego y mitigar el impacto del fuego en los ocupantes del túnel durante una condición de incendio.

También contribuyen a mejorar la capacidad de respuesta de los elementos de socorro durante la evacuación y las tareas de lucha contra el fuego, adicionalmente permiten proteger los principales elementos estructurales de un túnel.

Se recomienda que los sistemas secos e inundados estén conectados a una fuente de suministro de agua con capacidad de abastecer la demanda por al menos 1 hora.

- **Sistemas de drenaje**

El diseño debe anticiparse a las necesidades de drenaje que se generan en el túnel incluso durante las situaciones de emergencia. El sistema de recolección de drenaje se diseña de modo que los derrames de líquidos peligrosos o inflamables no puedan difundirse y causar la propagación de la llama. Se requiere que los componentes del sistema de recolección y drenaje sean incombustibles, por lo que se recomienda emplear materiales como acero, hierro dúctil, o de hormigón en lugar de PVC u otro material combustible.

Por lo general, los sistemas de bombas de sumidero están dispuestos en los portales y en los puntos bajos. El drenaje vial a lo largo del túnel debe ser diseñado para hacer frente al drenaje de la superficie, así como cualquier infiltración de agua subterránea en el túnel. Otras áreas de los túneles, como los conductos de ventilación y las ubicaciones potenciales de filtraciones, deberán poseer drenajes.

# **CAPÍTULO 3**

## **3. SISTEMAS DE VENTILACIÓN PARA CONTROL DE INCENDIOS EN TÚNELES DE TRÁNSITO VEHICULAR**

### **3.1. Principios físicos de incendios en túneles**

#### **Teoría del fuego**

El fuego es un proceso de oxidación rápida de una sustancia combustible en la cual se generan luz y calor. La súbita liberación de energía ocasiona que las temperaturas aumenten miles de grados generándose también la liberación de humos y gases tóxicos.

Los componentes necesarios para que se produzca el fuego, se describen por medio del triángulo del fuego y el tetraedro de fuego.

El triángulo del fuego identifica los 3 componentes necesarios para tener un fuego: el combustible, el comburente (oxígeno presente en el aire) y la fuente de calor.



FIGURA 3.1. TRIÁNGULO DEL FUEGO

En los últimos años, un cuarto componente, la reacción en cadena, se ha añadido para explicar el proceso del fuego. Esta reacción en cadena es la retroalimentación de calor al combustible para producir el combustible gaseoso utilizado en la llama, es decir, la reacción en cadena proporciona el calor necesario para mantener el fuego.

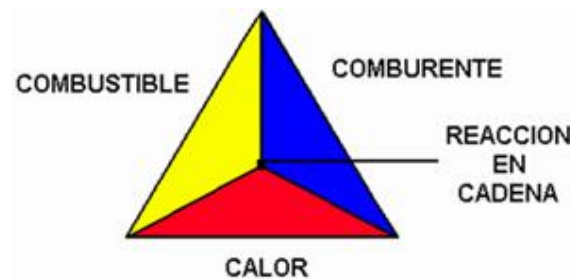


FIGURA 3.2. TETRAEDRO DEL FUEGO



El fuego se puede extinguir eliminando uno de los elementos del tetraedro de fuego, ya sea:

1. Enfriando el material que se encuentra en llamas
2. Suprimiendo la presencia de oxígeno
3. Eliminando el elemento combustible
4. Rompiendo la reacción en cadena

Los fuegos se clasifican en base al tipo de combustible que es consumido. De acuerdo a la NFPA existen 5 clases que son [6]:

- **Clase A:** materiales combustibles ordinarios tales como madera, tela, papel, caucho y muchos plásticos. Se queman con una llama y dejan ceniza. Se extinguen por enfriamiento del combustible a una temperatura que está por debajo de la temperatura de ignición. El agua y otros agentes extintores son eficaces.
- **Clase B:** Líquidos inflamables y líquidos combustibles, tales como las grasas de petróleo, alquitranes, aceites, pinturas a base de aceite, solventes, lacas, alcoholes y gases inflamables, los cuales son un gran peligro de incendio. El

agua no puede apagarlos y se deben extinguir creando una barrera entre el combustible y el oxígeno, un agente comúnmente usado es la espuma sintética.

- **Clase C:** Son los combustibles de las clases A y B, con la condición adicional de que involucran equipo eléctrico energizado. Se emplean agentes especiales para extinguirlos, comúnmente el dióxido de carbono o agentes químicos secos. El uso del agua es muy peligroso porque el agua conduce la electricidad.
- **Clase D:** Metales combustibles, tales como magnesio, titanio, circonio, sodio, litio y potasio. La mayoría de los autos contienen muchos de estos metales. Debido a las temperaturas extremadamente altas de las llamas, el agua puede descomponerse en hidrógeno y oxígeno, mejorando la combustión e incrementando el riesgo de explosión. Se extinguen con polvos especiales a base de cloruro de sodio u otras sales así como también con arena limpia y seca.












	 Agua	 Espuma Sintética AFFF	 Polvo Seco	 Anhídrido Carbonico	 Haloclean	 Acetato de Potasio
 <b>A</b> Sólidos	SI	SI	SI	NO	SI	NO
 <b>B</b> Líquidos	NO	SI	SI	SI	SI	NO
 <b>C</b> Eléctricos	NO	NO	SI	SI	SI	NO
 <b>D</b> Metales	NO	NO	SI	NO	NO	NO
 <b>K</b> Grasas	NO	NO	NO	NO	NO	SI

FIGURA 3.3. ELEMENTOS DE EXTINCIÓN PARA LAS DIFERENTES CLASES DE FUEGO

- Clase K:** Incendios de aparatos de cocina que involucran medios de cocción combustibles (aceites y grasas vegetales o animales).

## Convección

La convección es el flujo de fluido o gas desde las zonas calientes hacia las zonas más frías. La convección está íntimamente relacionada con la sensación térmica de las personas. El tiempo tolerable al que puede someterse una persona a la exposición a una fuente de calor por convección, está determinado por el dolor y la hipertermia. La exposición a temperaturas mayores a 121 °C produce dolor y quemaduras, mientras que las temperaturas por debajo de ese valor producen choques térmicos [7].

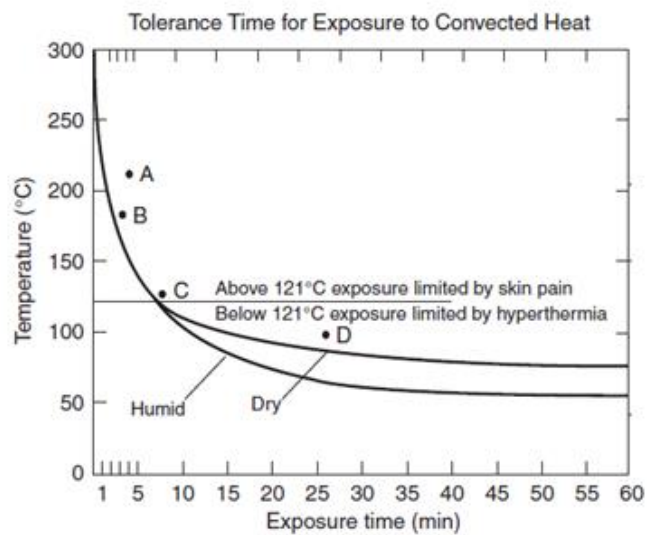


FIGURA 3.4. TIEMPO TOLERABLE AL CALOR POR CONVECCIÓN [7]

## Radiación

La radiación es el calor que viaja a través de ondas electromagnéticas, sin necesidad de objetos o gases que lo transporten. El calor irradiado sale en todas direcciones de forma inadvertida hasta que golpea un objeto. En un incendio, la radiación es producto del fuego y de la capa de humo caliente.

La radiación está en función de la temperatura y puede ser expresada como una capa infinita de humo que mantiene una temperatura constante, a través de la ecuación de Stefan – Boltzman [7]:

$$E_f = \sigma \epsilon_r T^4$$

Donde:

$E_f$ : Potencia emisiva, W/m<sup>2</sup>

$\sigma$ : Constante de Stefan – Boltzman,  $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>

$\epsilon_r$ : Emisividad resultante

T: Temperatura de la capa de humo, K

El nivel de radiación depende de la temperatura y de la emisividad de los humos. Cuando la temperatura de los humos no es

constante, el procedimiento para el cálculo del nivel de radiación se vuelve complejo.

En la figura 3.5 se muestra la tolerancia del cuerpo humano a diferentes niveles de flujo de radiación en función del tiempo de exposición.

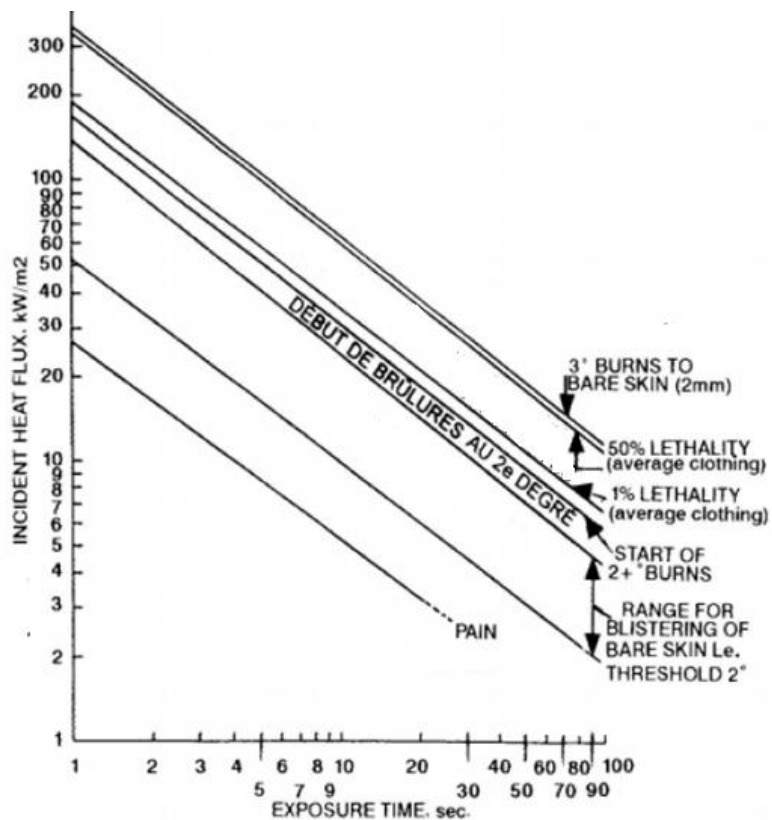


FIGURA 3.5. TOLERANCIA DEL CUERPO HUMANO A DIFERENTES NIVELES DE FLUJO DE RADIACIÓN [7]

## Visibilidad

La reducción de la visibilidad tiene un impacto en la velocidad con que las personas caminan durante un incendio, la cual disminuye por la densidad del humo y por la irritación que produce éste en los ojos de los individuos siendo más drástica la disminución de la velocidad en humos irritantes que en humos no irritantes. Esto es debido a que las personas no pueden mantener los ojos abiertos y caminan en zigzag o van paso a paso mientras se sostienen de una pared.

Las propiedades de visibilidad a través del humo son generalmente expresadas en términos de su transmitancia, definida como la fracción de luz transmitida a través de cierta distancia recorrida.

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de un medidor de opacidad, en él, un haz de luz pasa a través de una distancia  $x$ , denominada la distancia recorrida. Una fuente emite el haz de luz a una determinada intensidad patrón  $I_0$  y es receptada por una fotocelda con una intensidad  $I_x$ . En pruebas a gran escala la distancia recorrida que se emplea es generalmente 1 m.

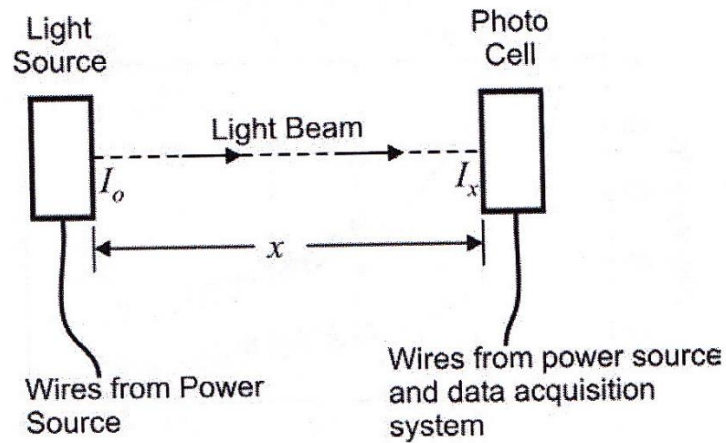


FIGURA 3.6. DIAGRAMA DE UN MEDIDOR DE HUMOS [8]

La transmitancia está expresada por [8]:

$$T_l = \frac{I_x}{I_o}$$

Donde:

$T_l$ : Transmitancia, adimensional

$I_o$ : Intensidad de luz al inicio de la trayectoria

$I_x$ : Intensidad de la luz al final de la trayectoria

Otros términos relacionados que permiten expresar la visibilidad son la densidad óptica, la densidad de la atenuación (también llamado coeficiente de extinción) y la densidad óptica específica.



## **Toxicidad**

Los efectos de la exposición a los gases son directamente proporcionales a la concentración y al tiempo de exposición, esto se conoce como la ley de Haber. Esta ley considera una tasa constante de inhalación de toxinas, pero con concentraciones de gases tóxicos que varían con el tiempo. Aunque no todos los gases siguen esta ley, la concentración y el tiempo de exposición son factores importantes para analizar los efectos a la exposición a gases tóxicos [8].

La exposición al monóxido de carbono (CO) es la mayor causa de muertes debido a incendios. La exposición a CO produce carboxihemoglobina en la sangre, la cual disminuye el acarreamiento de oxígeno en la sangre, esto deriva en hipoxia, luego cianosis y finalmente la muerte. La mortalidad se incrementa con la exposición al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ya que éste produce hiperventilación lo cual aumenta la tasa de aspiración del CO.

**TABLA 5**  
**EFFECTOS EN EL SER HUMANO POR LA DISMINUCIÓN DE LA**  
**CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO EN EL AIRE**

<b>NIVEL DE OXÍGENO</b>	<b>EFFECTOS</b>
21%	Oxígeno a niveles normales. Sin consecuencias
17%	Disminución del juicio y coordinación
12%	Dolor de cabeza, mareo, náuseas y fatiga
9%	Inconsciencia
6%	Paro respiratorio, paro cardíaco, muerte

### **Tasa de liberación de calor**

La tasa de liberación de calor (HRR) es la tasa a la cual se libera calor durante de la combustión de un material. Es un parámetro determinado experimentalmente y se considera muy importante para la definir el comportamiento del fuego durante su fase de crecimiento.

### **Propagación estratificada del humo y reflujo de humo**

Un incendio en un área abierta produce un penacho o columna de gas caliente y humo, pero dentro de un recinto estos gases ascendentes se encuentran con una barrera, el techo. Debido a esto se desplazan horizontalmente a lo largo del techo formando una gruesa capa de aire caliente que uniformemente desciende del techo, es decir se propaga de forma estratificada.

Dentro de un túnel, la capa de humo desciende de manera estratificada tanto en la porción anterior como posterior al incendio. Al fenómeno en el cual la capa de humo se mueve en sentido contrario al flujo de la ventilación dentro de un túnel se conoce como reflujo de humo o *backlayering*; esto crea un ambiente peligroso para los conductores y para el personal de rescate.

El *backlayering* puede ser prevenido y controlado por medio del sistema de ventilación. Si el flujo de aire tiene una velocidad lo suficientemente alta, el flujo longitudinal empujará el humo a favor de la corriente de aire y reducirá el desarrollo del fuego en el sentido contracorriente. Al incrementar la velocidad hasta la denominada

velocidad crítica  $V_c$ , se suprime por completo el *backlayering* y se reduce la concentración y la estratificación del humo.

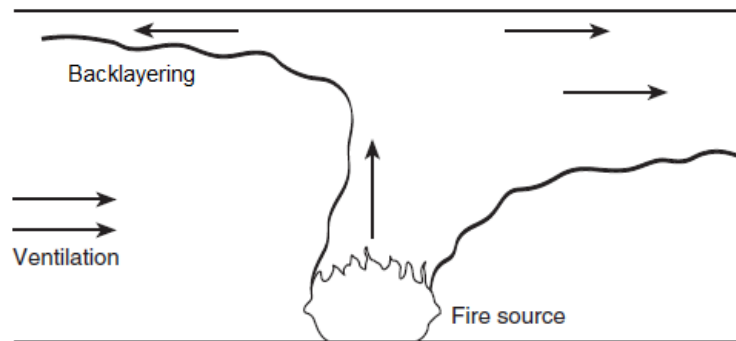


FIGURA 3.7. REFLUJO DE HUMO O *BACKLAYERING*

### 3.2. Parámetros que influyen en el comportamiento del humo en túneles

En ausencia de elementos que lo afecten, el humo está sujeto a sus propiedades de flotabilidad y se eleva hasta el techo donde se comienza a propagar en el recinto a través de una capa estratificada y simétrica. La velocidad de propagación del humo depende mucho del tamaño del fuego, en incendios severos esta velocidad es de alrededor de 2 m/s. Conforme el humo se propaga, éste transfiere calor al techo, a las paredes y al aire circundante; mientras que la capa de aire frío disminuye.

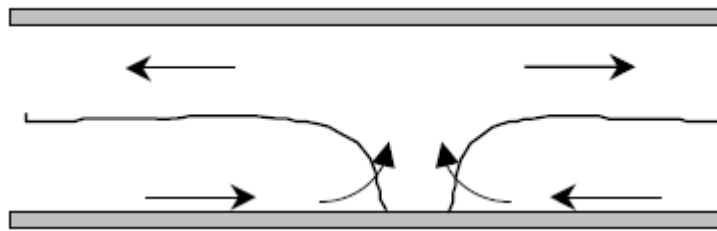


FIGURA 3.8. DESARROLLO DEL HUMO EN UN TÚNEL SIN VELOCIDAD LONGITUDINAL DEL AIRE

El comportamiento ideal del humo se ve afectado en la realidad por factores como el sentido del tráfico, la ventilación y efectos meteorológicos que generan un movimiento longitudinal del aire dentro del túnel. Estas influencias se describen a continuación:

- **Influencia de la velocidad longitudinal del aire**

El *backlayering* y la propagación estratificada del humo son dos fenómenos que dependen mucho de la velocidad longitudinal con que el aire circula a través del túnel.

Si la velocidad longitudinal es menor que la velocidad crítica, el humo se propaga formando *backlayering* en la porción anterior a la fuente del fuego y se propaga de forma

estratificada en la porción posterior al fuego, con un desarrollo casi simétrico a ambos lados del fuego, muy similar al comportamiento ideal que se presenta en ausencia de perturbaciones. Esto tiene 2 ventajas que permiten el escape de las personas dentro del túnel:

1. Se forma una zona libre de humo debajo de la capa estratificada de humo
2. La propagación del humo es lenta

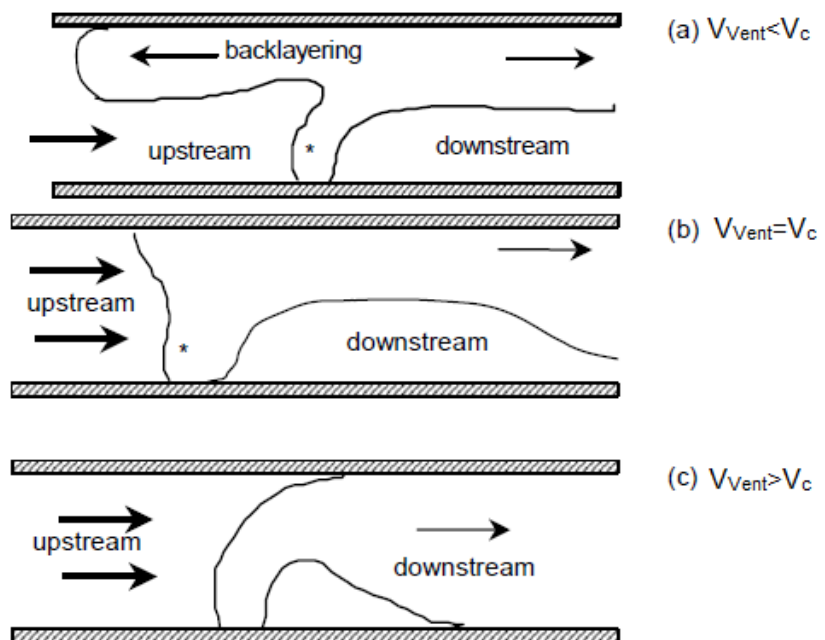


FIGURA 3.9. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD LONGITUDINAL [8]

Se tiene así que para velocidades menores o iguales a la crítica, dependiendo de la tasa de liberación de calor, el humo se mantiene estratificado. Para velocidades mayores a la crítica se aumenta el riesgo de que se perturbe la estratificación. La velocidad a la cual sucede esto es difícil de determinar debido a la naturaleza turbulenta del flujo y a la continua mezcla de la capa humo con la capa de aire fresco.

- **Influencia de la tasa de liberación de calor**

El flujo del humo producido por el fuego es aproximadamente proporcional a su tasa de liberación de calor. El penacho de fuego arrastra aire fresco desde la parte inferior del túnel y a medida que se desarrolla el fuego, se convierte en una resistencia adicional al flujo de aire longitudinal.

- **Influencia de la pendiente del túnel**

La pendiente del túnel produce una aceleración de la propagación del humo en la dirección ascendente debido a la flotabilidad. Este efecto chimenea es función de la temperatura de los humos y de la pendiente; tenemos así que un fuego plenamente desarrollado en un túnel con pendiente

empinada da como resultado altas velocidades longitudinales y muy poco o nada de humo en la dirección descendente.

- **Influencia del tráfico**

Durante los primeros minutos luego del inicio del fuego el modelo del tráfico vehicular se ve modificado. Primero, el fuego obstaculiza el tráfico y los vehículos que se movilizan hacia el fuego deben detenerse. De inmediato, las barreras y señales en la entrada del túnel detienen el tráfico que se dispone a ingresar. Por último, los vehículos que se encuentran delante de la fuente del incendio, pueden salir normalmente del túnel lo que incrementa el efecto pistón en esa sección del túnel. La combinación de estos cambios en el tráfico afecta la resistencia al flujo de aire longitudinal.

### **3.3. Sistema de ventilación natural en túneles**

La ventilación natural es aquella en la que la renovación del aire se produce exclusivamente por la acción del viento o por la existencia de un gradiente de temperatura o presión entre el punto de entrada y el de salida del aire. La ventilación natural está tomando



importancia en el diseño de nuevos túneles de tránsito, debido a la tendencia actual de construir infraestructuras autosustentables. La ventilación natural en túneles es inducida principalmente por la temperatura del aire, las condiciones meteorológicas, la pendiente del túnel y el tráfico.

Un túnel puede estar lo suficientemente ventilado por la acción del viento, debido a la diferencia de presión y temperatura entre los portales que dan como resultado un flujo de aire. La pendiente del túnel genera adicionalmente un efecto de chimenea, el cual, según el valor de la pendiente, puede ser considerable.

Los vehículos en movimiento dentro del túnel producen un diferencial de presión que induce el flujo de aire a través del túnel. Esto se conoce como efecto pistón y se emplea para ventilar túneles con tránsito en un solo sentido. A pesar de que la velocidad del aire inducido es menor en túneles de tránsito vehicular que en túneles ferroviarios, al aumentar el diámetro del túnel, la ganancia de volumen de aire es marginalmente mayor que la reducción de la velocidad de aire inducido; por lo tanto, la dilución de los contaminantes aumenta ligeramente con el tamaño del túnel.

La ventilación natural en túneles tiene 2 configuraciones comúnmente empleadas, portal a portal y de portal a pozo. La configuración portal a portal funciona mejor en túneles unidireccionales, en este caso el flujo de aire se mantiene uniforme y la concentración de contaminante es mayor en el portal de salida, y bajo condiciones meteorológicas adversas esta concentración aumenta. Por otro lado, los túneles con ventilación natural que tienen un pozo intermedio, son mejores para tránsito bidireccional, sin embargo el flujo a través del pozo se puede ver afectado por las condiciones meteorológicas adversas. El añadir más pozos presenta una desventaja debido a que se forman bolsas de aire contaminado en los espacios entre pozos.

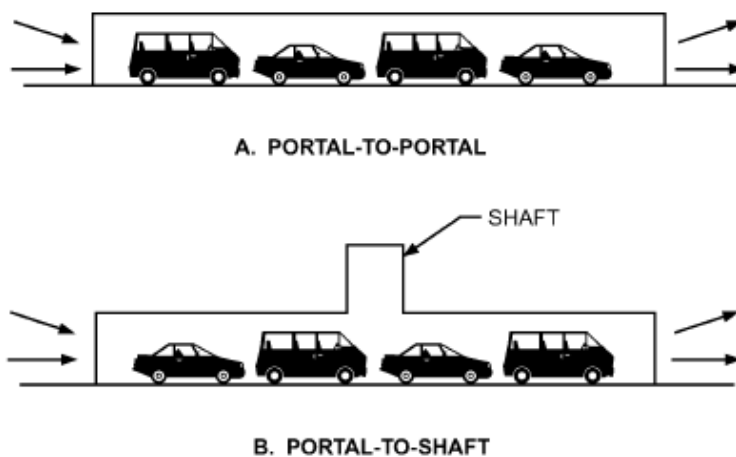


FIGURA 3.10. VENTILACIÓN NATURAL: (A) PORTAL A PORTAL  
Y (B) PORTAL A POZO [9]

La ventilación natural es adecuada para túneles de corta longitud y para túneles con baja densidad de tráfico, caso contrario el uso de ventilación natural debe ser estudiado antes de implementarse, para de esta forma asegurar su confiabilidad. Los túneles con longitud mayor a 305 m que poseen ventilación natural deben disponer de un sistema de ventilación de emergencia para la extracción de humos y gases calientes.

#### **3.4. Sistemas de ventilación mecánica en túneles**

La ventilación mecánica es aquella que emplea equipos electromecánicos para la inyección y extracción del aire. Esta ventilación se ve complementada por la acción de la ventilación natural, la cual está presente en todos los túneles.

Los sistemas de ventilación mecánica se clasifican de acuerdo a la dirección del flujo de aire generado, los principales sistemas son el longitudinal, el semitransversal y el completamente transversal. La selección del sistema de ventilación mecánica depende de múltiples parámetros entre los que se incluyen la longitud del túnel, la sección transversal, la pendiente del túnel, viento predominante, temperatura ambiental, tipo de tránsito, dirección del tránsito,

densidad de vehículos circulando, diseño de la magnitud del fuego y costos de construcción. A continuación se describen las características de los diferentes tipos de ventilación mecánica.

- **Ventilación longitudinal**

La ventilación longitudinal produce un flujo de aire en la misma dirección axial del túnel. Este sistema es la forma más efectiva para controlar los humos dentro de un túnel con tráfico en sentido unidireccional.

La ventilación longitudinal puede darse por inyección de aire, por *jet fans*, o por una combinación de inyección y extracción de aire en puntos específicos.

En la ventilación longitudinal por inyección de aire se utiliza ventiladores centralizados, los cuales inyectan aire a través de toberas de alta velocidad, por ejemplo las toberas Saccardo. Éstas funcionan bajo el principio de que un chorro de aire inyectado a alta velocidad, en un ángulo extremadamente pequeño respecto al eje del túnel, puede inducir un flujo de aire longitudinal de gran volumen. Son

generalmente usados en túneles ferroviarios. El uso de toberas Saccardo produce la reducción de la altura del túnel, menores niveles de ruido, aumento de eficiencia y menor exposición de los equipos al fuego y gases calientes durante una emergencia.

Otra forma de inyección de aire es a través de pozos. Cuando se emplea un solo pozo, su funcionamiento es similar a la ventilación natural, con la ventaja de que se produce un efecto chimenea en el pozo. Esta configuración presenta ventajas para túneles bidireccionales ya que concentra los contaminantes en el centro del túnel, al contrario de los túneles unidireccionales en donde la concentración de contaminantes se desbalancea.

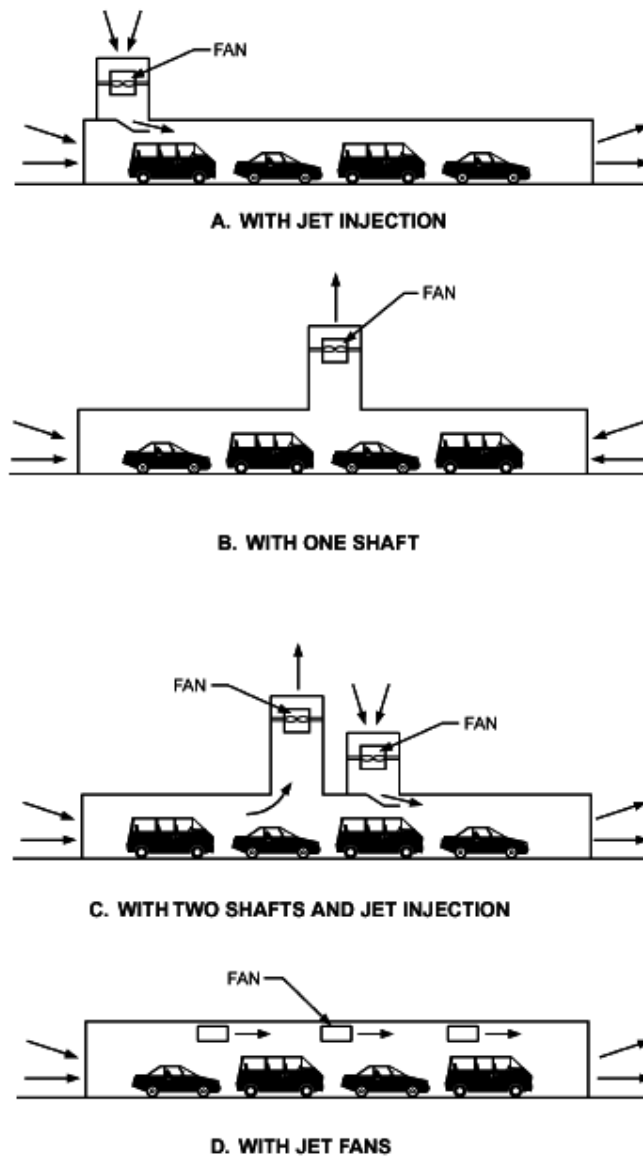


FIGURA 3.11. VENTILACIÓN LONGITUDINAL: (A), (B), (C)  
 POR INYECCIÓN DE AIRE Y (D) POR JET FANS [9]

La ventilación por *jet fans* emplea un tipo especial de ventilador axial, el cual se monta en el techo del túnel. Esta configuración elimina la necesidad de ductos y también de una estructura separada para la ubicación de los ventiladores; sin embargo puede demandar mayor altura o ancho en los túneles para así adaptarse al chorro de los ventiladores de manera que éste se encuentre fuera de gálibo dinámico del túnel. Una desventaja son los altos niveles de ruido que pueden resultar de su funcionamiento, esto limita la comunicación entre las personas evacuadas y el personal de rescate durante una emergencia.

Si un incendio se produce en un túnel unidireccional, se asume que el tráfico situado delante del fuego continuará hasta salir del túnel, mientras que el tráfico situado detrás del fuego tendrá que detenerse. En este caso el sistema de ventilación longitudinal forzará al humo y gases calientes a moverse hacia la sección vacía eliminando el *backlayering*, proporcionando un ambiente seguro en la sección anterior al fuego para el personal evacuado y el de rescate.

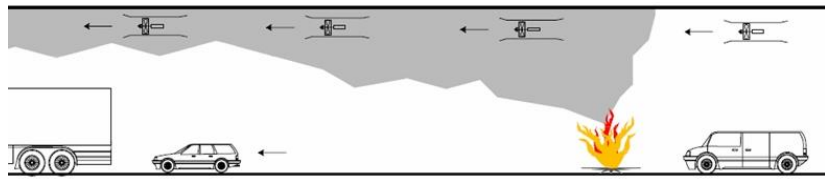


FIGURA 3.12. VENTILACIÓN LONGITUDINAL EN UN TÚNEL UNIDIRECCIONAL

Sin embargo, si un incendio se produce en un túnel unidireccional con tráfico congestionado o en un túnel bidireccional, el comportamiento descrito anteriormente no es posible alcanzar y esto limita la capacidad del sistema de ventilación longitudinal. En estos casos es importante limitar su uso durante la fase inicial de evacuación para mantener de esta forma la estratificación del humo dentro del túnel.

- **Ventilación semitransversal**

La ventilación semitransversal es un tipo de ventilación mecánica en el cual por medio de ductos o plenum añadidos arriba o abajo del túnel, se permite la distribución uniforme de los flujos de inyección o extracción de aire por medio de aberturas espaciadas. Este tipo de ventilación es usualmente empleada en túneles de longitudes hasta los 2000 m ya que



a longitudes mayores la velocidad del aire dentro del túnel se acelera cerca de los portales. Este tipo de ventilación tiene la ventaja de que es menos afectada por las condiciones atmosféricas.

En los sistemas semitransversales de inyección de aire la concentración de contaminantes se mantiene constante a lo largo del túnel para el caso de los bidireccionales, mientras que tiene una ligera reducción de su concentración en el portal de entrada para el caso de los unidireccionales.

Por su parte, en los sistemas semitransversales de extracción de aire la mayor concentración de contaminantes se da en la región central para el caso de los túneles bidireccionales, mientras que en unidireccionales se da en el portal de salida.

Un caso especial se da en los túneles unidireccionales al combinar extracción e inyección, en donde el aire que ingresa por el portal de entrada se extrae durante la primera

mitad del túnel, y el aire que se inyecta en la segunda mitad del túnel, sale por el portal de salida (ver Figura 3.13 C).

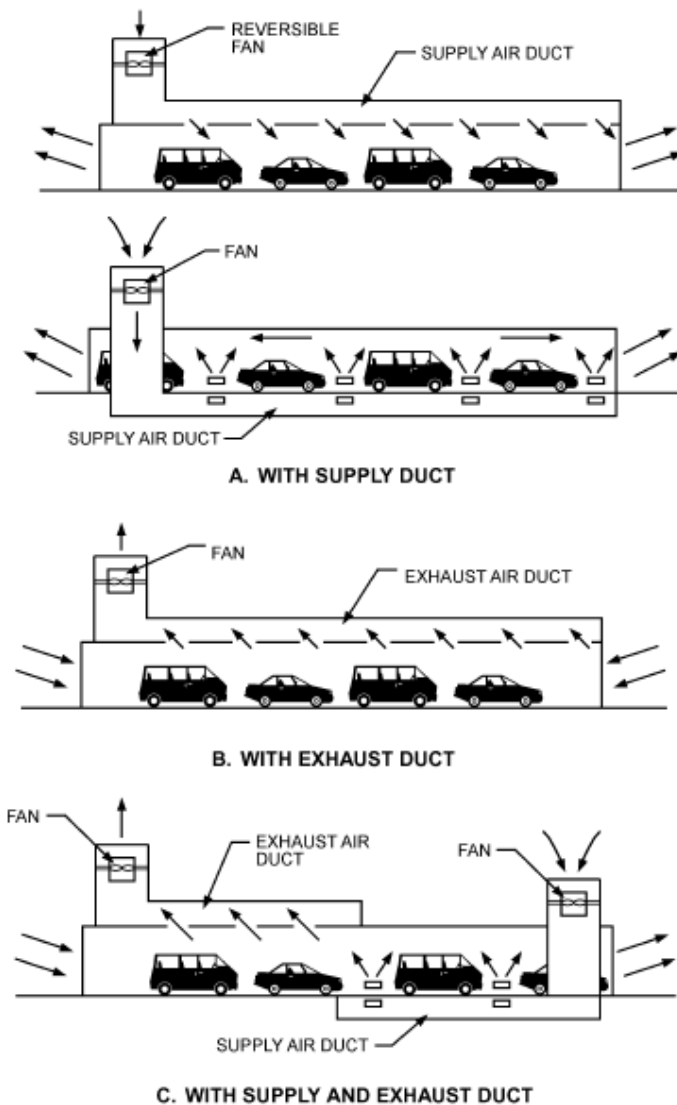


FIGURA 3.13. VENTILACIÓN SEMITRANSVERSAL: (A) POR INYECCIÓN, (B) POR EXTRACCIÓN Y (C) POR INYECCIÓN Y EXTRACCIÓN [9]

Durante el funcionamiento normal del sistema semitransversal, el aire fresco es introducido o el aire viciado es extraído, en este caso se debe mantener un adecuado diferencial de presión entre el ducto y la vía, para contrarrestar el efecto pistón y los vientos adversos. En situaciones de emergencia, inicialmente el sistema de suministro diluye el humo en la fase de evacuación, mientras que en la fase de combate del fuego el aire fresco entra a través de los portales y el humo se extrae a través del sistema de ventilación. Para que esto sea posible, las aberturas de ventilación deben localizarse en el techo y los ventiladores deben ser reversibles.

- **Ventilación completamente transversal**

La ventilación completamente transversal es un sistema balanceado que consta de inyección y extracción de aire simultánea lo largo del túnel, logrando una distribución uniforme tanto de inyección de aire fresco como de extracción de aire viciado. Como consecuencia de esto, se produce una presión uniforme a lo largo del túnel sin que se genere un flujo longitudinal de aire excepto el creado por el efecto pistón de los automóviles.

Este sistema es empleado en túneles con longitudes mayores a los 2000 m y en túneles con altos niveles de tráfico. Debido a esto, generalmente está configurado en zonas de ventilación o cantones, cada una atendida por un conjunto dedicado ventiladores. Cada zona es operada en forma independiente de las zonas adyacentes, por lo que el operador del túnel puede cambiar la dirección de flujo de aire en el túnel mediante la variación del funcionamiento de los ventiladores. Esta característica es importante en casos de emergencia de incendio.

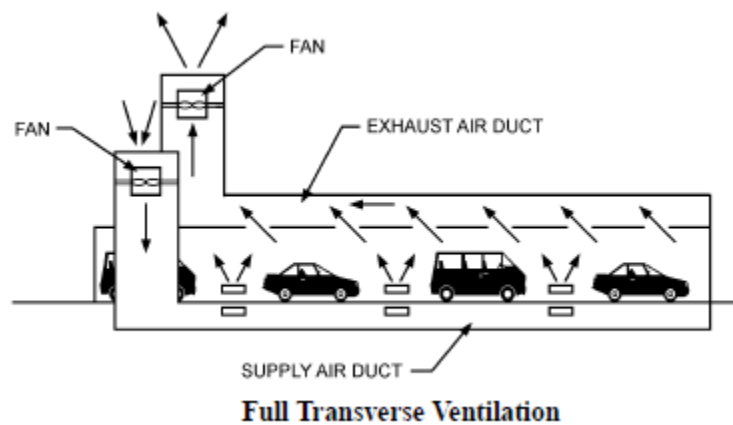


FIGURA 3.14. VENTILACIÓN COMPLETAMENTE  
TRANSVERSAL [9]

En este sistema, durante una situación de emergencia, los ventiladores de extracción deberán trabajar al máximo posible, mientras que los de inyección se mantendrán a baja capacidad. Este modo de operación asegura que la capa de humo se mantenga estratificada en el techo del túnel sin mezclarse con el aire fresco, proveyendo de esta forma un ambiente seguro para el personal de rescate y el personal evacuado.

Otra estrategia muy común es la de extraer el humo solo en la zona del incendio, esto tiene por objetivo limitar la propagación del humo a otras zonas y facilitar de este modo la evacuación. La zona de extracción debe ser lo más pequeña posible, para maximizar el flujo de aire de la zona afectada, en estos casos la tasa de extracción de aire debe ser estimada como el 150% de la tasa de producción de humo a una distancia de 100 m. Se debe extraer suficiente aire para controlar el flujo del humo y maximizar la eficiencia de extracción. Esta estrategia es muy utilizada en túneles bidireccionales o con mucho tráfico. Muchos de estos sistemas emplean *dampers* controlados remotamente que

permiten la extracción localizada del humo alrededor del fuego.

- **Otros tipos de ventilación mecánica**

Existen otros tipos de ventilación mecánica que resultan de la combinación de los tres principales y que se han desarrollado para resolver problemas específicos o para mejorar el rendimiento de esos sistemas.

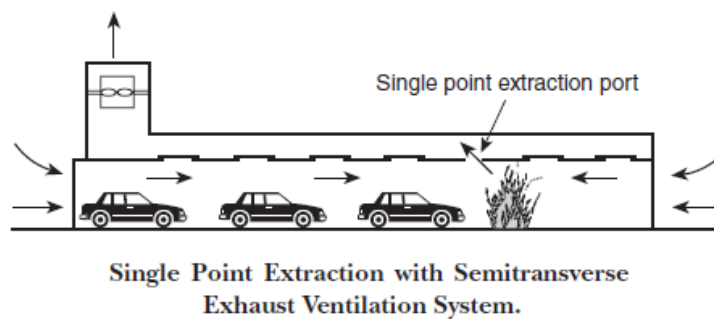


FIGURA 3.15. SISTEMA DE EXTRACCIÓN LOCALIZADA

[5]

El sistema de extracción localizada o *single point extraction* es una modificación a los sistemas transversales en el cual se añaden grandes aberturas en el ducto de extracción, las cuales generalmente son de 9.3 a 27.9 m<sup>2</sup> (100 a 300 ft<sup>2</sup>) y están equipadas con *dampers* de control. La extracción del

humo es lograda mediante la activación de los *dampers*, los cuales se mantienen abiertos en la zona del incendio mientras que en el resto de aberturas se mantienen cerrados lo cual maximiza el volumen del humo extraído en la zona del cercana a la fuente del fuego, logrando que este método sea efectivo en lograr la reducción de la temperatura y del humo.

Por otro lado, el sistema de *oversized exhaust ports* consiste en una modificación de las aberturas de extracción que poseen los sistemas de ventilación semitransversal y completamente transversal. Se utilizan dos métodos para crear esta configuración, una de ellas es la instalación de un *damper* con un eslabón fusible; mientras que la otra utiliza un material que, cuando se calienta a una temperatura específica, se funde abriendo el *damper* de control, permitiendo la extracción de los humos.

### **3.5. Equipos y accesorios del sistema de ventilación**

#### **Ventiladores**

Los ventiladores empleados en los sistemas de ventilación mecánica pueden ser de 2 tipos: axiales y centrífugos.

Los ventiladores axiales impulsan el aire paralelamente al eje impulsor. En la ventilación de túneles se utilizan los ventiladores de tipo tuboaxial, vaneaxial y de chorro.

Los vaneaxiales adicionan paletas guías en uno o ambos lados de la carcasa. Estas paletas permiten a los vaneaxiales desarrollar presiones hasta 4 veces mayor que los tuboaxiales, incrementan la eficiencia y reducen el ruido.

Los de chorro o *jet fan* están basados en el principio de la transmisión de cantidad de movimiento, esto es que una parte pequeña, del total del aire que circula por la sección del túnel es aspirada por los ventiladores de chorro e impulsada a continuación con una energía cinemática elevada. Esta porción comunica un impulso al resto del aire, que se desplaza también en dirección longitudinal hacia el portal de salida del túnel.

Los ventiladores axiales generalmente se emplean de 2 formas, montados horizontalmente en el techo del túnel a intervalos



determinados a lo largo del túnel o montados de forma vertical dentro de un conducto de ventilación que sale a la superficie.

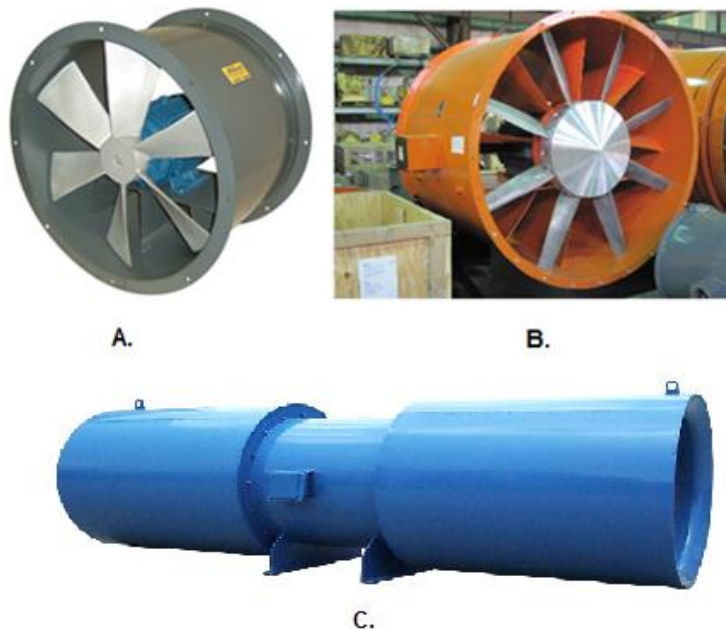


FIGURA 3.16. VENTILADORES AXIALES: (A) TUBOAXIAL, (B) VANEAXIAL Y (C) JET FAN

Los ventiladores centrífugos expulsan el aire  $90^\circ$  respecto a la dirección de entrada del aire, en ellos el flujo de aire entra paralelo al eje de las aspas y salen perpendiculares a ellas. Para su uso en túneles, las aspas de los ventiladores centrífugos deben ser curvadas hacia atrás o de perfil aerodinámico. Los ventiladores centrífugos se prefieren por sobre los ventiladores axiales debido a su mayor eficiencia con menos potencia requerida, razón por lo cual son más baratos de operar.

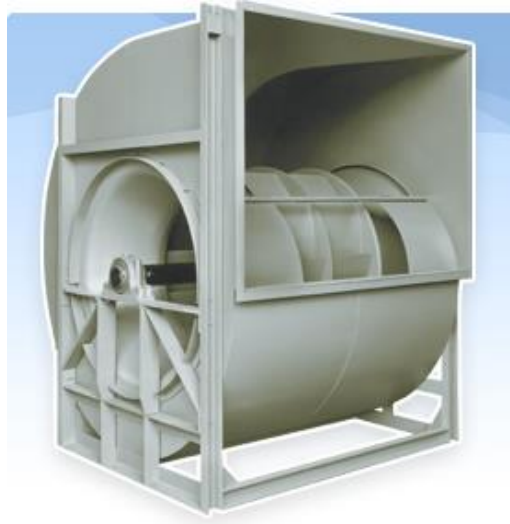


FIGURA 3.17. VENTILADOR CENTRÍFUGO

Los motores eléctricos empleados en ventiladores pueden ser operados tanto a velocidad constante como a velocidades variables, según el tipo de motor. De acuerdo con la NEMA, los motores deben ser capaces de soportar un ajuste de la tensión y la frecuencia de  $\pm 10\%$ . Un motor puede estar conectado al ventilador ya sea directamente o indirectamente. Los acoples directos son aquellos en los cuales el ventilador está en el mismo eje que el motor. Los acoples indirectos permiten flexibilidad en la ubicación del motor y están conectados al eje impulsor por medio de correas, cadenas o engranajes. El tipo de acople empleado también puede inducir la variabilidad de velocidad para el sistema de ventilación.

Los ventiladores que serán empleados para emergencias de incendios se exponen a temperaturas elevadas, por lo cual sus motores, y todos los componentes relacionados que están expuestos al flujo de aire deberán estar diseñados para permanecer en funcionamiento durante un mínimo de 1 hora a una corriente de aire de 250 °C.

### **Accesorios**

Entre los accesorios más comunes que requieren los equipos de ventilación ubicados en túneles tenemos a los atenuadores y los *dampers*.

Algunos sistemas de extracción se encuentran en áreas que requieren que el ruido generado por los ventiladores se reduzca. Esto se puede lograr mediante la instalación de atenuadores cilíndricos o rectangulares, ya sea montado directamente en el ventilador o dentro de los conductos a lo largo del sistema.



FIGURA 3.18. VENTILADOR ACOPLADO A UN ATENUADOR RECTANGULAR

Los atenuadores que estén expuestos al flujo de aire caliente, tanto en sistemas longitudinales como en transversales, deberán estar diseñados para que cada uno de sus componentes sean capaces de soportar una corriente de aire de 250 °C y mantenerse estructuralmente intactos aun después 1 hora de funcionamiento. Además los materiales aislantes empleados en los deflectores o *baffles* no deben ser inflamables ni tóxicos.

Los *dampers* o compuertas son elementos que permiten controlar el flujo de aire dentro de los ductos. En túneles, generalmente se emplean en las posiciones completamente abierto o completamente cerrado, aunque también pueden puede ser operados en alguna

posición intermedia para regular el flujo o la presión dentro del sistema. Al igual que los otros elementos expuestos al humo, los *dampers* y sus actuadores deberán ser capaces de permanecer en funcionamiento durante un mínimo de 1 hora a una corriente de aire de 250 °C. Los elementos móviles y componentes críticos del *dampers* deben diseñarse para permitir la contracción y dilatación producidas por el amplio rango de temperaturas previstas.



FIGURA 3.19. DAMPER DE HOJAS PARALELAS

# **CAPÍTULO 4**

## **4. DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE EMERGENCIA**

### **4.1. Selección del sistema de ventilación**

Según la norma NFPA 502 (ver Tabla 3) todo túnel con una longitud mayor a 1000 m tiene la obligación de implementar un sistema de ventilación de emergencia. Por esta razón, en este proyecto se debe seleccionar qué tipo de sistema de ventilación de emergencia se diseñará, para lo cual se analizarán las ventajas y desventajas de los sistemas de ventilación longitudinal y de los sistemas transversales y semitransversales, las cuales se muestran en las Tablas 6 y 7, respectivamente.

**TABLA 6**  
**VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA VENTILACIÓN**  
**LONGITUDINAL**

<b>Ventilación longitudinal</b>	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente efectiva en túneles unidireccionales.</li> <li>• No requiere de un sistema de ductos.</li> <li>• Baja inversión inicial.</li> <li>• Menores requisitos de mantenimiento</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es efectiva en túneles bidireccionales y en túneles de gran longitud.</li> <li>• Se complica el control de las condiciones interiores en el caso de congestión vehicular.</li> <li>• Puede perderse la estratificación del humo si los ventiladores no se accionan adecuadamente.</li> <li>• Excesivo ruido.</li> </ul>

**TABLA 7**  
**VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA VENTILACIÓN**  
**TRANSVERSAL Y SEMITRANSVERSAL**

<b>Ventilación Transversal y Semitransversal</b>	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente efectiva en túneles tanto unidireccionales como bidireccionales.</li> <li>• Máxima capacidad de extracción de humo.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta inversión inicial y altos costos de operación.</li> <li>• Requerimientos de mantenimiento implican altos costos y tiempos mayores de inspección.</li> </ul>

Los parámetros de evaluación serán la funcionalidad del sistema y su costo global en función de las características del túnel. De acuerdo a las Tablas 7 y 8, tanto la ventilación longitudinal como la ventilación transversal y semitransversal son efectivas para los túneles unidireccionales como el de este proyecto, sin embargo los costos de implementación de un sistema longitudinal son menores que los de un sistema transversal o semitransversal debido a la ausencia de un sistema de ductos que deba construirse dentro del túnel. A pesar de que la estratificación del humo puede verse afectada por el uso de la ventilación longitudinal, esto puede evitarse encendiendo los equipos varios minutos después del inicio



del flagelo, permitiendo que los vehículos situados delante del incendio puedan avanzar hasta la salida del túnel. El largo del túnel no es limitante, ya que varias normas europeas referidas por el PIARC permiten el uso de ventilación longitudinal en túneles rurales de hasta 4 km sin la necesidad de instalar pozos de ventilación [7].

En base a este análisis se selecciona el sistema de ventilación longitudinal con jet fans debido a que con bajos costos nos permite una efectividad similar a la de los sistemas transversal y semitransversal.

#### **4.2. Dimensionamiento del incendio**

El dimensionamiento del incendio es un análisis a través del cual se determina cuantitativamente la magnitud de un incendio dentro de un túnel y generalmente se lo define en términos de la tasa de liberación de calor (HRR) o de su valor pico (PHRR). Estos valores varían de acuerdo a las regulaciones de cada país, siendo los resultados de la NFPA los más ampliamente usados. A pesar de que durante el proceso de diseño se contemplan las posibles situaciones de emergencia, se debe considerar que cada siniestro es un evento único por lo cual el valor obtenido no necesariamente

corresponde al incendio de mayor magnitud que pueda ocurrir en un determinado momento.

**TABLA 8**  
**TASA PICO DE LIBERACIÓN DE CALOR PARA VEHÍCULOS**  
**TÍPICOS [5]**

<b>Vehículo</b>	<b>PHRR (MW)</b>	<b>Tiempo hasta el valor pico (min)</b>
Autos	5-10	0-30
Múltiples autos (2 – 4 vehículos)	10-20	13-55
Bus	20-30	7-10
Camiones de carga pesada	70-200	10-18
Camión cisterna	200-300	-

El uso de los valores de la Tabla 8 supone ciertas condiciones:

- El diseñador deberá considerar el desarrollo pleno del incendio (generalmente dentro de 10 minutos), el número de vehículos involucrados y el potencial de propagación a otros vehículos.

- Las temperaturas esperadas directamente encima del fuego van desde 1000 a 1400 °C.
- El PHRR puede ser mayor que el de la tabla si más de un vehículo está involucrado.
- El diseño de incendios de camiones cisterna con líquidos inflamables y combustibles considera que existe un adecuado drenaje que impide la formación de piscinas de combustible ardiendo.

Las condiciones de diseño del incendio que emplearemos son las siguientes:

- A través del túnel sólo circularán automóviles, buses y vehículos pesados de hasta 5 toneladas.
- El paso de vehículos con cargas peligrosas, combustibles o inflamables estará prohibido.
- El mayor siniestro dentro del túnel será el incendio de 3 vehículos simultáneamente, estos son 1 automóvil, 1 autobús, y 1 camión de mercancías.

Con los PHRR tomados de la Tabla 8 ( $q_{\text{automóvil}}=5 \text{ MW}$ ,  $q_{\text{bus}}=20 \text{ MW}$  y  $q_{\text{camión}}=70 \text{ MW}$ ) y con las consideraciones de diseño, se obtiene que el calor total liberado por el incendio es:

$$q = q_{\text{automóvil}} + q_{\text{bus}} + q_{\text{camión}}$$

$$q = 5 \text{ MW} + 20 \text{ MW} + 70 \text{ MW}$$

$$q = 95 \text{ MW}$$

#### 4.3. Cálculo de velocidad crítica

El determinar el valor de la velocidad crítica permite elaborar un diseño que impida el reflujos del humo dentro del túnel. La velocidad crítica depende de la magnitud del incendio para el cual se está diseñando, de la pendiente del túnel y la sección transversal; y se calcula por la resolución simultánea de las siguientes ecuaciones [8]:

$$V_C = K_1 K_2 \left( \frac{g H q}{\rho_{\infty} c_p A_T T_F} \right)^{1/3}$$

$$T_F = \left( \frac{q}{\rho_{\infty} c_p A_T V_C} \right) + T_{\infty}$$

Donde:

$V_c$ : Velocidad crítica, m/s

$g$ : Aceleración de la gravedad,  $m/s^2$

$H$ : Altura del túnel, m

$q$ : Calor liberado, kW

$A_T$ : Área de la sección transversal,  $m^2$

$C_p$ : Calor específico del aire,  $kJ/kg \cdot K$

$\rho_\infty$ : densidad del aire en el ambiente,  $kg/m^3$

$T_\infty$ : Temperatura del aire en el ambiente, K

$T_F$ : Temperatura media de los gases en el sitio del incendio, K

$K_1$ : Factor del número de Froude

$K_2$ : Factor por pendiente del túnel

Se tiene que  $g=9.81 m/s^2$ ,  $H=7.19 m$ ,  $q=95000 kW$ ,  $A_T=70.2 m^2$ ,  $C_p=1.004 kJ/kg \cdot K$ ,  $T_\infty=291.15 K$ . La densidad del aire a temperatura ambiente la definimos a partir de la ecuación de estado del gas ideal, conociendo que la presión atmosférica a 2200 msnm es  $P_\infty=78.23 kPa$  y que la constante universal de los gases ideales  $R=287 J/kg \cdot K$ :

$$P_\infty = \rho_\infty RT_\infty$$

$$\rho_\infty = \frac{P_\infty}{RT_\infty} = 0.9362 \text{ kg}/m^3$$

El factor del número de Froude corresponde al efecto de las fuerzas de inercia y la fuerzas de gravedad de un flujo de aire ventilando un incendio ( $Fr=4.5$ ) y se obtiene por medio de [8]:

$$K_1 = Fr^{1/3} = 0.606$$

El factor de pendiente es el factor de corrección debido al efecto de la pendiente  $d$  del túnel en el flujo de ventilación [8]:

$$K_2 = 1 + 0.0374 (d)^{0.8}$$

Para pendientes negativas su valor se obtiene gráficamente de la Figura 4.1.

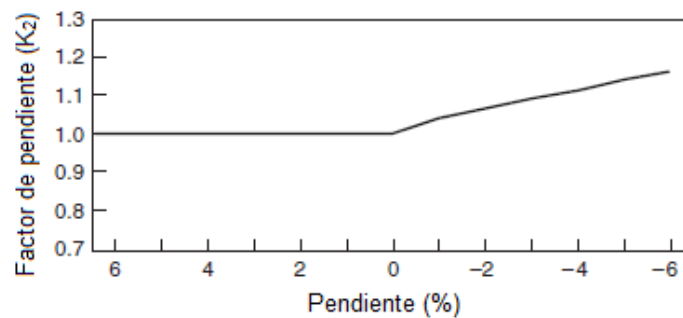


FIGURA 4.1. FACTOR DE PENDIENTE VS % DE PENDIENTE [5]

Para resolver estas ecuaciones simultáneas se realizó un algoritmo en el software numérico MATLAB. Éste permite, luego de varias iteraciones, hallar el valor de la temperatura de los gases en el sitio

del incendio y la velocidad crítica para las condiciones definidas. El algoritmo y sus resultados se muestran en el Apéndice D.

Para empezar las iteraciones se debe definir el valor inicial de la velocidad crítica con el cual el algoritmo arrancará. El PIARC recomienda de manera general que la velocidad longitudinal del aire dentro del túnel esté entre 3 a 6 m/s, de acuerdo a la magnitud del incendio [7]. Siguiendo estas recomendaciones, se tomara el valor de 4.5 m/s, como valor inicial del algoritmo.

**TABLA 9**  
**RESULTADOS DE LA VELOCIDAD CRÍTICA Y LA**  
**TEMPERATURA PROMEDIO DE GASES**

<b>Número de iteración</b>	<b>Temperatura media de los gases <math>T_F</math> (K)</b>	<b>Velocidad crítica <math>V_c</math> (m/s)</b>
1	611.09	3.3348
2	722.87	3.1532
3	747.74	3.1179
4	752.92	3.1107
5	753.98	3.1092
6	754.20	3.1089

En la última iteración, se ha alcanzado un error absoluto menor a una milésima en el cálculo de la velocidad crítica, por lo cual éste es el valor obtenido de la velocidad crítica. Conociendo el valor de la velocidad crítica, se establece entonces que la velocidad del aire dentro del túnel será de 3.11 m/s para prevenir el reflujos de humo.

#### 4.4. Cálculo del caudal

El caudal de aire requerido dentro del túnel se calcula por medio de la ecuación de continuidad:

$$Q_T = A_T V$$

Donde:

$Q_T$ : Caudal de aire,  $m^3/h$

$A_T$ : Área transversal del túnel,  $m^2$

$V$ : Velocidad del aire en el túnel,  $m/s$

Por lo tanto:

$$Q_T = (70.2 \text{ m}^2) \times \left(3.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 218 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$



#### 4.5. Cálculo del empuje

Para calcular el empuje de los equipos de ventilación se debe determinar la caída de presión desarrollada por elementos como los vehículos paralizados, la geometría del túnel, efectos meteorológicos, entre otros. La influencia de algunos de estos elementos depende de la localización del incendio en el túnel, por lo cual se calculan en varios puntos del túnel. En el análisis del sistema, estos cálculos se elaborarán cada 300 m.

Se debe considerar también que la temperatura del aire dentro del túnel influye en el empuje del sistema. Las altas temperaturas disminuyen el empuje que desarrolla el ventilador, además en los túneles unidireccionales con ventilación longitudinal, la velocidad del humo que sale del túnel es mayor que la velocidad del aire fresco que ingresa. Para representar esta influencia se establece un factor de corrección por temperatura para el cálculo de la caída de presión en la sección del túnel por la cual sale el humo. Este factor está definido como la relación entre la temperatura promedio de los gases calientes que salen del túnel  $T_s$  y la temperatura del aire fresco  $T_\infty$  [10].

$$\frac{T_s}{T_\infty}$$

Donde  $T_S$  está definida de forma muy similar a  $T_F$ :

$$T_S = \left( \frac{2/3 q}{\rho_\infty c_p A_T V_c} \right) + T_\infty$$

$$T_S = 596.76 \text{ K}$$

Por lo tanto:

$$\frac{T_S}{T_\infty} = \frac{596.76}{291.15} = 2.05$$

Para la sección por la cual ingresa el aire fresco la influencia de la temperatura de los gases es nula por lo tanto  $T_S/T_\infty = 1$ .

### **Caída de presión generada por el tráfico paralizado**

En un túnel unidireccional se asume que sólo los vehículos que están antes del fuego bloquean el flujo de aire, por lo cual la temperatura de los gases que salen no afecta al cálculo en la caída de presión producida por el tráfico paralizado y que está definida en función del arrastre de los vehículos [10]:

$$\Delta P_{veh} = N \frac{(C_W A)_{veh}}{A_T} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot (V - V_{veh})^2$$

Donde:

$\Delta P_{veh}$ : Caída de presión debido al tráfico paralizado, Pa

N: Número de vehículos paralizados

$C_w$ : Coeficiente de arrastre de un vehículo

A: Área frontal de un vehículo,  $m^2$

$A_T$ : Área transversal del túnel,  $m^2$

$\rho_\infty$ : Densidad del aire en el ambiente,  $kg/m^3$

V: Velocidad del aire en el túnel, m/s

$V_{veh}$ : Velocidad de los vehículos, m/s

El límite de velocidad establecido dentro del túnel es de 50 km/h tanto para vehículos livianos como pesados. Debido a que los vehículos antes del incendio se detienen mientras que los otros salen, la velocidad de los vehículos en el túnel es cero ( $V_{veh}=0$ ).

El flujo de vehículos en el túnel está determinado por la recomendación del RABT (2006) [11] que indica un flujo de 30 automóviles/km por cada carril para túneles interurbanos. Se considerará que el 40% de los vehículos que pasan por el túnel son de transporte pesado además de que 1 camión = 2 automóviles. El

número de vehículos bloqueados en función de la posición del incendio se muestra en la Tabla 10.

**TABLA 10**  
**CANTIDAD DE VEHÍCULOS BLOQUEADOS**

<b>Ubicación del incendio</b>	<b>Cantidad de automóviles</b>	<b>Cantidad de camiones</b>
Entrada	0	0
A 300 m	11	4
A 600 m	22	8
A 900 m	33	12
A 1200 m	44	16
A 1500 m	55	20
Salida	66	24

El producto  $(C_w A)_{veh}$  es un valor característico de la aerodinámica de cada vehículo, de forma general se emplea  $(C_w A)_{veh}=0.9 \text{ m}^2$  para vehículos ligeros y  $(C_w A)_{veh}=4.5 \text{ m}^2$  para vehículos pesados [12].

En la Tabla 11 se muestran los resultados para la caída de presión producida por los vehículos paralizados en el túnel.

**TABLA 11**  
**CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A LOS VEHÍCULOS**  
**PARALIZADOS**

<b>Ubicación del incendio</b>	<b><math>\Delta P_{\text{livianos}}</math> [Pa]</b>	<b><math>\Delta P_{\text{pesados}}</math> [Pa]</b>	<b><math>\Delta P_{\text{veh}}</math> [Pa]</b>
Entrada	0	0	0
A 300 m	0.64	1.16	1.80
A 600 m	1.28	2.32	3.60
A 900 m	1.92	3.48	5.40
A 1200 m	2.55	4.64	7.19
A 1500 m	3.19	5.80	8.99
Salida	3.83	6.97	10.80

### **Caída de presión generada por la fricción con el túnel**

La caída de presión producida por la fricción con el túnel  $\Delta P_{\text{tu}}$  está compuesta por la fricción con la entrada  $\Delta P_{\text{entrada}}$ , la fricción con las paredes del túnel  $\Delta P_{\text{pared}}$  y la fricción con la salida  $\Delta P_{\text{salida}}$  [10].

$$\Delta P_{\text{tu}} = \Delta P_{\text{pared}} + \Delta P_{\text{entrada}} + \Delta P_{\text{salida}}$$

La caída de presión por fricción con las paredes del túnel se calcula por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach modificada con el factor de corrección por temperatura [10].

$$\Delta P_{\text{pared}} = f \frac{L}{D_H} \frac{1}{2} \rho_{\infty} V^2 \left( \frac{T_S}{T_{\infty}} \right)$$

Donde:

$\Delta P_{\text{pared}}$ : Caída de presión debido a la fricción con las paredes, Pa

f: Factor de fricción

L: Longitud del túnel, m

$D_H$ : Diámetro hidráulico, m

$\rho_{\infty}$ : Densidad del aire en el ambiente, kg/m<sup>3</sup>

V: Velocidad del aire en el túnel, m/s

$T_S/T_{\infty}$ : Factor de corrección por temperatura

El diámetro hidráulico del túnel se calcula a partir de la sección transversal del túnel  $A_T$  y el perímetro mojado de dicha sección  $P_T$ :

$$D_H = \frac{4A_T}{P_T}$$

$$D_H = \frac{4(70.2)}{32.62} = 8.61 \text{ m}$$

Para establecer el valor del factor de fricción  $f$  primero se deben obtener el número de Reynolds y la rugosidad relativa  $\varepsilon/D_H$ .

El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho_{\infty} V D_H}{\mu}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

$\rho_{\infty}$ : Densidad del aire en el ambiente,  $\text{kg/m}^3$

V: Velocidad en el túnel,  $\text{m/s}$

$\mu$ : Viscosidad cinemática del aire,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

$D_H$ : Diámetro hidráulico,  $\text{m}$

Para las condiciones dadas, la densidad es  $0.9362 \text{ kg/m}^3$  y la viscosidad cinemática  $1.85 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Entonces se tiene que:

$$Re = \frac{(0.9362)(3.11)(8.61)}{1.85 \times 10^{-6}} = 1.4 \times 10^6$$

**TABLA 12**  
**RUGOSIDAD EQUIVALENTE  $\epsilon$  [13]**

Material	$\epsilon$ ( $\mu\text{m}$ )
Tubería plástica y no ferrosas	1-5
Tubería de asbesto - cemento	13
Tubería de acero negro	46
Ductos de aluminio	50
Ductos de acero galvanizado	150
Tuberías de hierro fundido	200
Ductos soldados y pintados	500
Ladrillos o concreto caravista	1300
Ladrillos o concreto áspero	5000
Túneles de diseñados para flujo longitudinal	1400 – 2000

En la Tabla 12 se muestran los valores de la rugosidad equivalente  $\epsilon$  para un túnel con flujo longitudinal, de estos se empleará el valor medio  $\epsilon=1700 \mu\text{m}$  para calcular la rugosidad relativa.

$$\frac{\epsilon}{D_H} = \frac{1700}{8.61} = 197.44 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$



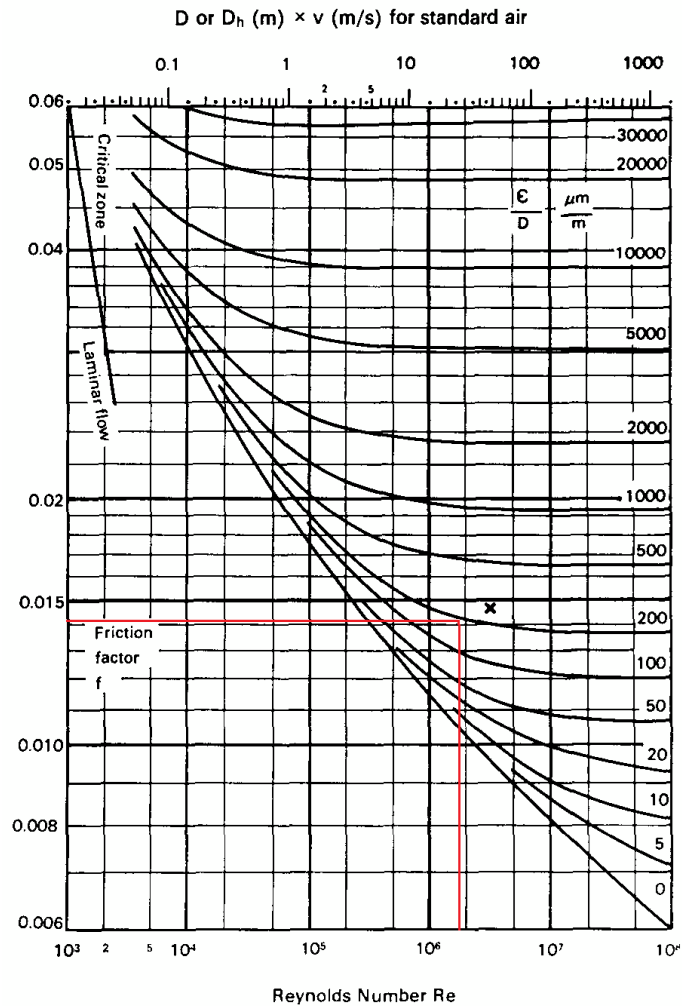


FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE MOODY

Con estos valores y el diagrama de Moody (Figura 4.2), se obtiene gráficamente el valor del factor de fricción  $f=0.0141$ .

La caída presión debido a la fricción con las paredes depende de la localización del incendio ya que la temperatura de los gases influyen

en su cálculo y por lo tanto en cada punto analizado, se tendrá valores distintos para la caída de presión tanto para barlovento y sotavento del flujo de aire.

**TABLA 13**  
**CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A LA FRICCIÓN CON LAS**  
**PAREDES DEL TÚNEL**

<b>Ubicación del incendio</b>	<b><math>\Delta P_{\text{Pared}}</math> (Barlovento) [Pa]</b>	<b><math>\Delta P_{\text{Pared}}</math> (Sotavento) [Pa]</b>	<b><math>\Delta P_{\text{Pared}}</math> (Total) [Pa]</b>
Entrada	0	27.36	27.36
A 300 m	2.22	22.80	25.02
A 600 m	4.45	18.24	22.69
A 900 m	6.67	13.68	20.35
A 1200 m	8.90	9.12	18.02
A 1500 m	11.12	4.56	15.68
Salida	13.35	0	13.35

La caída de fricción en la entrada del túnel depende exclusivamente de la forma del portal, y está definida como [10]:

$$\Delta P_{\text{entrada}} = \zeta \frac{1}{2} \rho_{\infty} V^2$$

Para un portal con boca acampanada  $\zeta=0.1$ , mientras que para un portal con bordes normales afilados  $\zeta=0.5$  [10]. En nuestro proyecto se asumirá una condición de entrada al túnel con bordes normales afilados. Entonces:

$$\Delta P_{\text{entrada}}=2.26 \text{ Pa}$$

La caída de presión por fricción a la salida del túnel está definida por [10]:

$$\Delta P_{\text{salida}}=\frac{1}{2} \rho_{\infty} V^2 \left( \frac{T_s}{T_{\infty}} \right)$$

$$\Delta P_{\text{salida}}=9.28 \text{ Pa}$$

En la Tabla 14 se muestran los valores totales de  $\Delta P_{\text{tu}}$  para cada uno de los puntos analizados dentro del túnel.

**TABLA 14**  
**VALOR TOTAL DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A**  
**LA FRICCIÓN CON EL TÚNEL**

<b>Ubicación del incendio</b>	<b><math>\Delta P_{tu}</math> [Pa]</b>
Entrada	38.90
A 300 m	36.56
A 600 m	34.23
A 900 m	31.89
A 1200 m	29.56
A 1500 m	27.22
Salida	24.89

#### **Caída de presión debido a los fenómenos meteorológicos**

Los fenómenos meteorológicos, como el viento y diferencias barométricas, son una influencia aleatoria en la caída de presión del sistema de ventilación. Estos valores son difíciles de determinar sin el uso de modelos a escala o de pruebas en sitio, por lo cual de manera preliminar se estiman como caídas de presión que debe vencer el sistema [10].

Para el sistema de ventilación se considerará que los efectos meteorológicos generan una contrapresión de 50 Pa.

$$\Delta P_{MT}=50 \text{ Pa}$$

### **Caída o aumento de presión debido al efecto chimenea**

El efecto chimenea se produce porque existe una pendiente entre la entrada y salida del túnel la cual genera una caída o aumento de presión de acuerdo a la inclinación de la pendiente. Se determina por medio de [10]:

$$\Delta P_{Chim} = -(\rho_{\infty} - \rho) \cdot g \cdot d \cdot L$$

Donde:

$\Delta P_{Chim}$ : Caída o aumento de presión debido al efecto chimenea, Pa

$\rho_{\infty}$ : Densidad del aire en el ambiente,  $\text{kg/m}^3$

$\rho$ : Densidad del aire caliente a la salida del túnel,  $\text{kg/m}^3$

$g$ : Aceleración de la gravedad,  $\text{m/s}^2$

$d$ : Porcentaje de pendiente

$L$ : Longitud del túnel, m

Si la pendiente es ascendente entonces es positiva, por el contrario si la pendiente es descendente entonces es negativa. En este caso la pendiente positiva favorece el flujo del humo hacia la salida del túnel, por lo cual se produce un aumento de presión.

**TABLA 15**  
**CAIDA DE PRESIÓN DEBIDO A LA PENDIENTE DEL TÚNEL**

<b>Ubicación del incendio</b>	<b><math>\Delta P_{\text{Total}}</math> [Pa]</b>
Entrada	-86.38
A 300 m	-71.98
A 600 m	-57.89
A 900 m	-43.19
A 1200 m	-28.79
A 1500 m	-14.40
Salida	0

### **Caída de presión debido al fuego**

La liberación de calor durante el incendio genera a su alrededor turbulencias y aceleraciones del flujo de aire y humo, las cuales causan una caída de presión. Cuando la velocidad del aire esta

entre 1.5 y 3.5 m/s, estas pérdidas pueden calcularse aproximadamente por [12]:

$$\Delta P_{\text{Fuego}} = c \times \frac{2/3 q}{V D_H^2}$$

Donde:

$\Delta P_{\text{fuego}}$ : Caída de presión debido al fuego, Pa

c: Constante de proporcionalidad,  $c=9 \times 10^{-5}$

q: Calor liberado, W

V: Velocidad del aire, m/s

DH: Diámetro hidráulico, m

Por lo tanto:

$$\Delta P_{\text{Fuego}} = 30.8 \text{ Pa}$$

### Valor total del empuje

Una vez calculados los elementos que conforman la caída de presión del sistema, se tiene que el valor total de la caída de presión que deben vencer los ventiladores está dado por la ecuación de balance de diferencia de presión de los ventiladores [10].

$$\eta_j \times \Delta P_j = \Delta P_{\text{Total}} = \Delta P_{\text{veh}} + \Delta P_{\text{tu}} + \Delta P_{\text{MT}} + \Delta P_{\text{Chim}} + \Delta P_{\text{Fuego}}$$

Donde:

$n_j$ : Número ventiladores

$\Delta P_j$ : Presión generada por el ventilador

$\Delta P_{Total}$ : Caída de presión en total

$\Delta P_{veh}$ : Caída de presión debido al tráfico paralizado

$\Delta P_{tu}$ : Caída de presión causada por la fricción con el túnel

$\Delta P_{MT}$ : Caída de presión causada por efectos

Meteorológicos

$\Delta P_{Chim}$ : Caída de presión debido al efecto chimenea

$\Delta P_{fuego}$ : Caída de presión debido al fuego

En la Tabla 16 se muestran los resultados de la caída de presión total para cada uno de los puntos analizados.



**TABLA 16**  
**VALOR TOTAL DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN EL TÚNEL**

<b>Ubicación del incendio</b>	<b><math>\Delta P_{Total}</math> [Pa]</b>
Entrada	27.01
A 300 m	40.87
A 600 m	54.73
A 900 m	68.59
A 1200 m	82.46
A 1500 m	96.32
Salida	110.18

Seleccionando el mayor valor de caída de presión y considerando que se colocarán 11 baterías de 2 ventiladores cada una ( $n_j=22$ ), se calcula la caída de presión que tiene que vencer cada ventilador [12]:

$$\Delta P_j = \frac{\Delta P_{Total}}{n_j} = \frac{110.18}{22} = 5.01 \text{ Pa}$$

Por lo que el empuje que debe desarrollar cada ventilador es:

$$F_j = \Delta P_j A_T = 5.01 \times 70.2 = 351.70 \text{ N}$$

#### **4.6. Selección del equipo de ventilación**

Los ventiladores a utilizar son del tipo jet fan y de acuerdo a los cálculos realizados, cada uno desarrollará un empuje de 351.70 N.

Los jet fans se seleccionarán del catálogo de la marca Zitron tomando en consideración el espacio disponible para los ventiladores fuera del gálibo. Los valores presentados en las tablas de los catálogos son evaluados a condiciones estándar NTP (101.3 kPa, 20 °C, 1.2 kg/m<sup>3</sup>) por lo cual se debe realizar una corrección de los mismos. El flujo de aire no requiere de corrección ya que un ventilador mueve la misma cantidad de aire independientemente de la densidad del aire, no obstante conforme la temperatura de operación aumenta, el peso del aire disminuye ocasionando que el ventilador requiera menor potencia y también que el empuje desarrollado sea menor que el de las especificaciones, por lo que se deberá realizar la corrección del empuje y la potencia según las condiciones del proyecto.

El factor de corrección está determinado como la razón entre la densidad a condiciones estándar y la densidad a temperatura de operación.

$$\frac{\rho_{NTP}}{\rho} = \frac{1.2}{0.447} = 2.68$$

Además de este factor por las condiciones de operación se debe tener en cuenta la eficiencia del ventilador y la eficiencia de la instalación. La eficiencia del ventilador es de alrededor del 90% ( $\eta_1=0.9$ ) para la velocidad requerida en el aire y la eficiencia de la instalación es de 87% ( $\eta_2=0.87$ ) cuando el ventilador está a 0.95 diámetros del techo y paredes (ver Apéndice H). El empuje requerido para los ventiladores es  $F_j=351.70$  N, entonces el empuje corregido es [12]:

$$F_{\text{corregido}} = \frac{F_j}{\eta_1 \eta_2} \times \frac{\rho_{NTP}}{\rho} = \frac{351.70 \times 2.68}{0.9 \times 0.87} = 1203.78 \text{ N}$$

Con el empuje corregido se escoge del catálogo el modelo JZ-12-34/4. El empuje corregido es menor que el empuje nominal desarrollado de 1342 N, por lo que el ventilador si se encuentra dentro del rango de operación necesario. Este jet fan es de tipo asimétrico o no reversible, capaz de soportar temperaturas de hasta 400 °C por 2 horas. Más características de los ventiladores se muestran en la Tabla 17.

**TABLA 17**  
**CARACTERÍSTICAS DEL VENTILADOR [14]**

<b>Marca</b>	Zitrón
<b>Modelo</b>	JZ-12-34/4
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	36.2
<b>Velocidad chorro (m/s)</b>	32
<b>Empuje teórico (N)</b>	1391
<b>Empuje nominal (N)</b>	1342
<b>Potencia consumida (kW)</b>	31.8
<b>Potencia instalada (kW)</b>	34.0
<b>Nivel sonoro a 10 m (dBA)</b>	69

Una vez seleccionado el ventilador se determina la potencia corregida de operación, conociendo que la potencia consumida bajo condiciones NTP es de 34 kW, entonces la potencia corregida es:

$$Pot_{Corregida} = \frac{Pot_{Consumida}}{2.68} = \frac{34.0}{2.68} = 12.68 \text{ kW}$$

Sin embargo, debido a que los ventiladores se seleccionan para trabajar en altas temperaturas, se debe escoger el motor de mayor capacidad entre el corregido y el nominal y de esta forma asegurar que el ventilador pueda manejar el aumento de la carga a cualquier

temperatura de funcionamiento más baja donde el aire es más denso.

Una vez realizado este análisis se determina que el modelo de ventilador seleccionado cumple con los requerimientos del sistema de ventilación.

#### **4.7. Distribución de los equipos dentro del túnel**

Los ventiladores se distribuirán por baterías, cada una de las cuales tendrán 2 ventiladores. Estos ventiladores se colocarán con una separación entre ejes de mínimo 2 veces el diámetro del ventilador para asegurar una apropiada succión y evitar la interferencia entre los flujos.

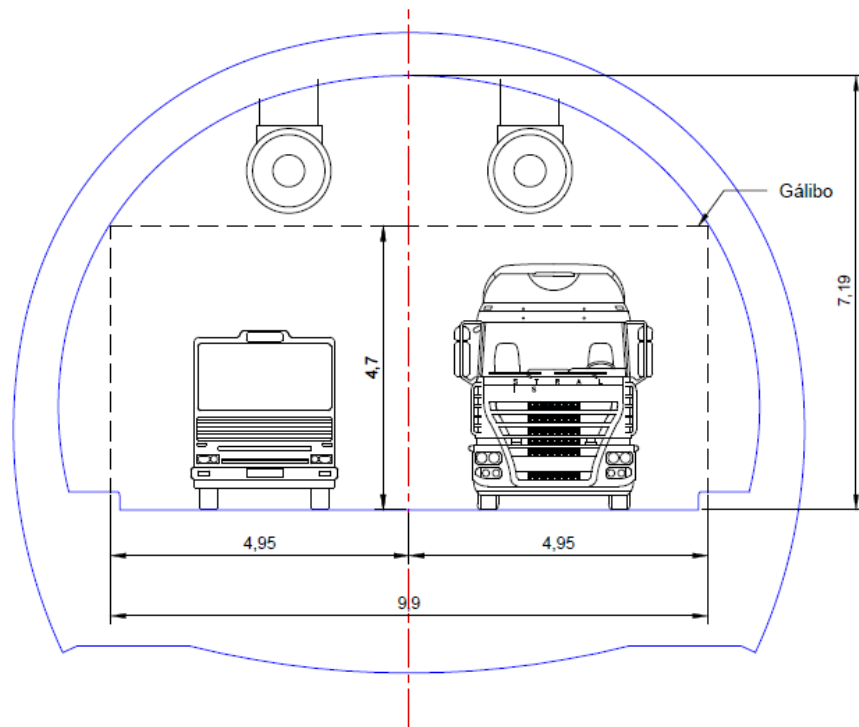


FIGURA 4.3. DETALLE DE BATERÍA DE VENTILACIÓN

En los cálculos previos, se ha obtenido que se necesitan 11 baterías de ventilación, pero esto no toma en consideración que si un incendio ocurre cerca de una batería de ventilación, las altas temperaturas destruirían los ventiladores y sus instalaciones en pocos minutos, dejándolos completamente inservibles. En la Tabla 19 se muestran las distancias a las cuales bajo norma se considera que los ventiladores se han destruido por el fuego.

**TABLA 18**  
**DISTANCIA A LA CUAL SE CONSIDERAN DESTRUIDOS LOS**  
**VENTILADORES [15]**

<b>Tamaño de incendio (MW)</b>	<b>Distancia a barlovento (m)</b>	<b>Distancia a sotavento (m)</b>
5	-	-
20	10	40
50	20	80
100	30	120

Considerando los valores de la Tabla 18 y además que el diseño del sistema es para un incendio de 95 MW se tiene entonces que en caso de incendio los ventiladores situados a 30 m antes del incendio (a barlovento) y 120 m después (a sotavento) del incidente se destruirán. Es por esto que se adiciona una batería y se distribuyen simétricamente en el túnel con la finalidad de asegurar que a pesar de que una batería se destruya, el sistema de ventilación de emergencia continúe funcionando. La disposición final de los *jet fans* dentro del túnel se muestra en el Apéndice C.

#### 4.8. Análisis de costos

El costo del proyecto consiste en el valor total de los recursos necesarios para la ejecución del mismo. Este costo está conformado por 2 componentes, los costos directos y los costos indirectos.

Los costos directos son todos aquellos que están directamente relacionados con el proyecto, tales como el precio de los equipos, de los materiales y de la mano de obra del personal contratado específicamente para el proyecto.

**TABLA 19**  
**COSTO DE LOS EQUIPOS**

Descripción	Cantidad	Precio Unitario \$	Precio Total \$
Ventilador jetfan marca Zitron modelo JZ-12-34/4	24	47523.84	1140572.16
<b>Costo Total de Equipos \$</b>			1140572.16



**TABLA 20**  
**COSTO DE MATERIALES**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario \$	Precio Total \$
Anclaje tipo cápsula química HILTI HVU-TZ M16	Caja (10 unidades)	15	137.53	2062.95
Varilla de anclaje de acero inoxidable A4 HILTI HAS-RTZ M16-125/60	Caja (5 unidades)	30	493.57	14807.1
Set dinámico HILTI M16	Caja (2 unidades)	75	29.23	2192.25
Sellante antifuego	Lata	24	9.76	234.24
Broca M16 para concreto	Un	24	58.00	1392.00
Bases metálicas de acero galvanizado	Un	24	616.00	14784.00
<b>Costo Total de Materiales \$</b>				<b>35472.54</b>

Los pernos de sujeción de los ventiladores a la base metálica son provistas por el vendedor de jet fans, así como también las cadenas de sujeción.

El tiempo de trabajo considerado es de 2 meses a partir de que la obra gris se encuentre completada y los sistemas eléctricos se encuentren instalados en los lugares en los que se ubicarán los equipos. Se adiciona un mes más para la realización de las pruebas al sistema.

**TABLA 21**  
**COSTO DE MANO DE OBRA**

<b>Descripción</b>	<b>Costo mensual \$</b>	<b>Tiempo de trabajo (mes)</b>	<b>Precio Total \$</b>
Trabajos civiles	1147.78	1	1147.78
Trabajos eléctricos	779.33	2.5	1948.33
Trabajos mecánicos	1190.48	2.5	2976.20
Supervisor de seguridad	800.00	3	2400.00
Supervisor mecánico	800.00	3	2400.00
Elevador personal	3600.00	3	10800.00
Oficina contenedor	2500.00	3	7500.00
Grúa (2 unidades)	9000.00	1	9000.00
<b>Costo total de mano de obra \$</b>			<b>38172.31</b>

**TABLA 22**  
**COSTOS DIRECTOS**

<b>Descripción</b>	<b>Precio Total \$</b>
Equipos	1045524.48
Materiales	35472.54
Mano de obra	38172.31
<b>Total de costos directos \$</b>	<b>1214217.01</b>

Los costos indirectos son aquellos que no son directamente parte del proyecto pero que son esenciales para su administración y ejecución. A estos costos se adicionan también los costos por seguros y la utilidad del proyecto. Este último rubro se considerará como el 10% de los costos totales.

**TABLA 23**  
**COSTO DE INDIRECTOS**

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario \$</b>	<b>Precio Total \$</b>
Bodega	Mes	2	500.00	1000.00
Herramientas	U	3500	3500.00	3500.00
Alquiler de oficinas centrales	Mes	3	250.00	750.00
Gastos servicios básicos (agua, luz, teléfono)	Mes	3	105.00	315.00
Internet	Mes	3	20.00	60.00
Sueldos administrativos	Mes	3	800.00	2400.00
Seguro	Un	1	9277.15	9277.15
Utilidad	Un	1	134913.00	134619.88
<b>Total costos indirectos \$</b>				151922.03

Por lo tanto los costos totales del proyecto son la suma de costos directos e indirectos.

**TABLA 24**  
**COSTOS TOTALES**

<b>Descripción</b>	<b>Precio Total \$</b>
Costos directos	1214217.01
Costos indirectos	151922.03
<b>Total de costos \$</b>	<b>1366139.04</b>

# CAPÍTULO 5

## 5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE EMERGENCIA

### 5.1. Aspectos generales de la dinámica de fluidos computacional aplicada a sistemas de ventilación de emergencia

Para estudiar el comportamiento de los incendios en túneles y analizar el funcionamiento del sistema de ventilación de emergencia, se emplean métodos experimentales y numéricos. Entre los métodos experimentales están las pruebas a escala real y a pequeña escala; mientras que los métodos numéricos consisten en simulaciones computacionales. Los métodos experimentales tienen limitaciones y dificultades debido a su costo y condiciones bajo las cuales pueden realizarse, por lo cual las simulaciones computacionales son preferidas, especialmente durante la etapa de diseño. Estas simulaciones pueden realizarse de acuerdo a 3 tipos de modelos numéricos: unidimensionales, zonales y de dinámica de

fluidos computacional. Actualmente los modelos de la dinámica de fluidos computacional son los más sofisticados y adecuados para el análisis de incendios en túneles.

La dinámica de fluidos computacional o CFD es la rama de la dinámica de fluidos que permite la simulación de flujos reales por medio de la solución numérica de las ecuaciones fundamentales de la continuidad, del momentum y de la energía. Los modelos numéricos CFD se basan en dividir el sistema bajo análisis en volúmenes de control más pequeños interconectados, que constituyen el mallado, y determinar los parámetros del fluido para cada uno de ellos.

Para el análisis de túneles, generalmente se emplean modelos CFD tridimensionales (3D), debido a que los bidimensionales (2D) no describen apropiadamente la estratificación del humo y requieren la introducción de parámetros adicionales. Adicionalmente se debe comprobar que  $q/A_T$  sean iguales en 2D y 3D.

Las simulaciones CFD se realizan en paquetes computacionales especializados como Solvent, Fire Dynamics Simulator, Flow3D y

Ansys. La mayoría de estos programas están estructurados en 3 etapas:

- Preprocesamiento:
- Procesamiento
- Posprocesamiento

El preprocesamiento corresponde a la configuración del problema, es decir, se establecen la geometría del problema, el mallado, las propiedades de los materiales, las condiciones iniciales, condiciones de borde y demás parámetros necesarios para la resolución del problema. En esta etapa es necesario definir parámetros como:

- **Fuente del incendio:** Esto se puede modelar de varias formas: como un proceso de combustión, como un flujo de calor fijo a través de un volumen, como un flujo de calor fijo a través de una superficie horizontal o como una temperatura fija en un volumen. El segundo método es preferido debido a que requiere menos tiempo de cómputo y presenta menos complicaciones que los otros [16].



- **Radiación:** En el lugar del incendio la transferencia de calor local se debe en mayor parte por la acción de la radiación que por la convección, esto debido a las altas temperaturas alcanzadas. Para tomar en cuenta la radiación se emplean varios métodos como establecer un modelo de transferencia de calor por radiación, establecer un coeficiente que represente el flujo de calor hacia las paredes o reduciendo la tasa de liberación de calor [7].
- **Condiciones de frontera en las paredes:** Generalmente las paredes se consideran como superficies lisas. Para representar la transferencia de calor a través de las paredes el método más utilizado es el de establecer una temperatura o un flujo de calor constantes [7].
- **Condiciones de frontera en los portales:** Estas condiciones influyen ampliamente en los resultados obtenidos. Puede emplearse un modelo con presiones fijas en ambos portales o un modelo con propiedades fijas del fluido en un portal y presión fija en el otro portal. Este último, es empleado cuando se conocen los efectos del sistema de

ventilación aunque limita el análisis de las condiciones a sotavento [7].

Durante el procesamiento, se inicializa el problema y el programa monitorea la solución obtenida luego de los cálculos con el objetivo de determinar la convergencia de la solución. En caso de no converger la solución, se deberán replantear los parámetros ingresados en el preprocesamiento.

Finalmente, el posprocesamiento consiste en la presentación de los resultados y de las gráficas correspondientes.

En la evaluación del sistema de ventilación de emergencia del presente proyecto, se empleará el software Ansys y a través de su módulo Fluent se establecerá si la velocidad crítica determinada analíticamente es realmente eficaz para eliminar el reflujo de humo y permitir condiciones favorables para la evacuación de las personas localizadas a barlovento del incendio. Por lo tanto se evaluará el sistema para el Caso 1 en el cual la velocidad es menor a la crítica y para el Caso 2 en cual la velocidad es igual a la crítica.

## 5.2. Geometría del problema

Para la elaboración de la geometría del túnel se utilizó el software AutoCAD, en el cual a partir de la sección transversal se generó un modelo tridimensional del túnel y el vehículo incendiado. Este modelo se exportó posteriormente a Ansys. Es necesario configurar el DesignModeler para que soporte modelos a gran escala.

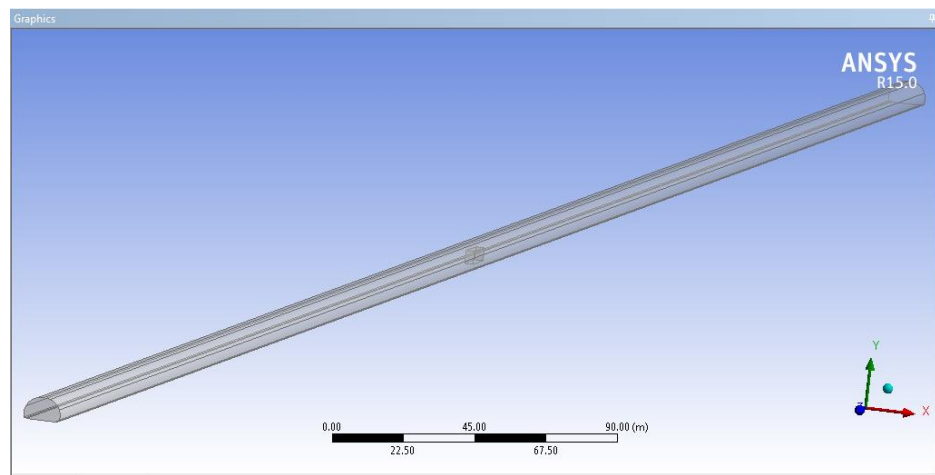


FIGURA 5.1. GEOMETRÍA DEL TÚNEL

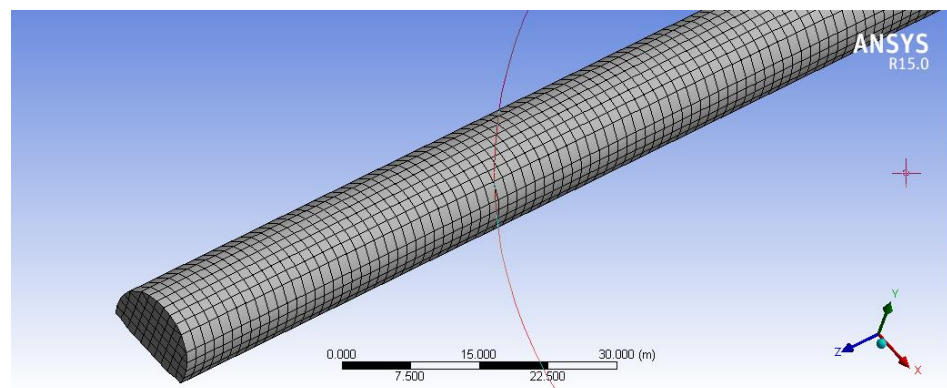
Algunas características de la geometría importada se muestran en la siguiente tabla.

**TABLA 25**  
**CARACTERÍSTICAS DE LA GEOMETRÍA**

<b>Volumen</b>	1.2613x10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup>
<b>Superficie</b>	59122 m <sup>2</sup>
<b>Caras</b>	18
<b>Bordes</b>	45
<b>Vértices</b>	30

### 5.3. Mallado

A través del mallado se discretiza el dominio de la geometría previamente cargada, y para esto Ansys tiene su módulo generador de mallado conocido como Meshing. Este módulo se ha configurado para la elaboración de un mallado con celdas hexaédricas y con tamaño de celda medio.



**FIGURA 5.2. MALLADO DEL TÚNEL**

Este mallado está compuesto de 86730 nodos y de 71490 elementos. Una vez realizado el mallado es importante conocer su calidad, y así establecer si es aceptable para mantener la estabilidad del sistema y brindar resultados precisos. Esta calidad se mide principalmente a través de:

- **Calidad ortogonal:** 0 para la peor calidad y 1 para la mejor. La calidad ortogonal del mallado realizado oscila entre 0.81 y 1.
- **Relación de aspecto:** Deber ser menor a 40. La relación de aspecto del mallado realizado está entre 1.16 y 3.17
- **Oblicuidad:** Debe ser menor a 0.9 en mallados tetraédricos y menor a 0.8 en mallados hexaédricos. El mallado realizado es de tipo hexaédrico y los valores de la oblicuidad se encuentran entre 0.13 y 0.49.

Comparando los valores obtenidos de calidad ortogonal, relación de aspecto y oblicuidad, con respecto a los valores recomendados, se concluye que el mallado realizado es aceptable para la simulación.

En esta etapa del mallado también se establecen los elementos de referencia del problema que son:

- INLET: Portal de ingreso
- OUTLET: Portal de salida
- WALLTUNNEL: Paredes y vías del túnel
- TRUCK: Paredes laterales del camión
- FIRESOURCE: Fuente del incendio situada en la parte superior del camión

#### **5.4. Condiciones de frontera**

A continuación se definen las condiciones de frontera dentro del módulo de Fluent.

Las condiciones de frontera se establecerán en:

- Portales
- Paredes y vías del túnel
- Paredes laterales del camión
- Fuente del incendio

## **Portales**

En los portales se ha considerado las condiciones de frontera de acuerdo al modelo de propiedades fijas en un portal y presión fija en el otro, debido a que se conocen cuáles son los efectos que debería tener el sistema de ventilación de emergencia.

Para el portal de entrada se estimó que se desarrolla una velocidad constante del flujo de aire. Esta velocidad para el Caso 1 será de 0.7 m/s y para el Caso 2 será la velocidad crítica de 3.11 m/s. Por lo tanto en Fluent se define que la referencia INLET es del tipo *velocity-inlet* con las velocidades respectivas a cada caso.

En el portal de salida se tiene entonces una presión fija, por esto se define que la referencia OUTLET es del tipo *pressure-outlet* con una presión igual a la presión atmosférica, por lo cual el valor de la presión manométrica ingresada es de 0 Pa.

## **Paredes y vías del túnel**

En las paredes y vías del túnel, definidas por la referencia WALLTUNNEL, la condición de frontera es del tipo *wall*, sin deslizamiento y estacionaria con respecto al sistema de referencia.

La rugosidad del túnel se considera constante con un valor de 0.015. Debido a que las paredes del túnel se encuentran rodeadas por la montaña, se consideran como un sumidero.

### **Paredes laterales del camión**

Las paredes laterales del camión están definidas como una pared con temperatura fija, por lo tanto la referencia TRUCK es del tipo Wall, sin deslizamiento y estacionaria con respecto al sistema de referencia. La temperatura fijada inicialmente es la ambiente.

### **Fuente del incendio**

La fuente del incendio, no se modelará como un proceso de combustión debido a que esto aumenta la complejidad del problema. Para simplificar la resolución, se modelará como un flujo de aire caliente a temperatura constante, el cual representará al humo.

La referencia TRUCK es definida del tipo *mass-flow-inlet*. El flujo másico con el que se propaga el humo se obtiene a partir de estudios publicados por el PIARC que indican que para incendios de camiones de mercancías es de 14 kg/s a temperaturas de



combustión de 1000 °C (1273 K), por lo cual se ingresa este valor dentro de las propiedades térmicas de esta referencia.

## **5.5. Resolución del problema**

Para la resolución del problema, en el módulo de Fluent es necesario introducir definir los modelos físicos, las propiedades de los materiales, inicializar el sistema y evaluar la convergencia de la resolución numérica.

### **Modelos físicos**

El método de resolución escogido se basa en la presión, ya que este fue desarrollado específicamente para fluidos a baja velocidad e incompresibles como es el caso del aire en este proyecto. Además este análisis será en estado transiente debido a que el pico del incendio no ocurre inmediatamente sino que se requiere de un tiempo hasta que se desarrolle completamente

Los modelos físicos que se resolverán, además de la ecuación de continuidad, son:

- **Modelo de turbulencia k-ε:** Sirve para describir el efecto de la turbulencia en el flujo de aire.
- **Ecuación de la energía:** Permite obtener la distribución de temperatura en el túnel.
- **Modelo de radiación P1:** Se empleó para analizar el efecto de la radiación sobre la temperatura del humo.

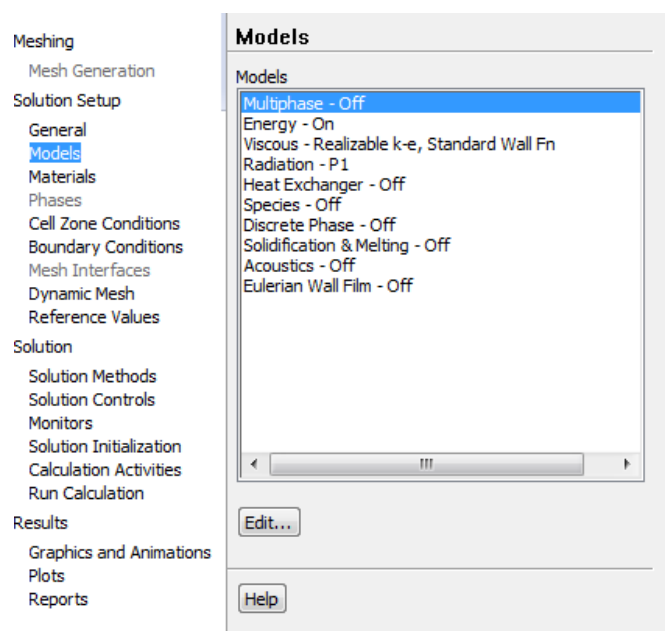


FIGURA 5.3. MODELOS FÍSICOS SELECCIONADOS

### Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales son tomadas de la librería de Fluent. Para el aire, se considera que la densidad debe ser calculada como gas ideal incompresible mientras que el calor

específico, conductividad térmica y viscosidad se toman como constantes.

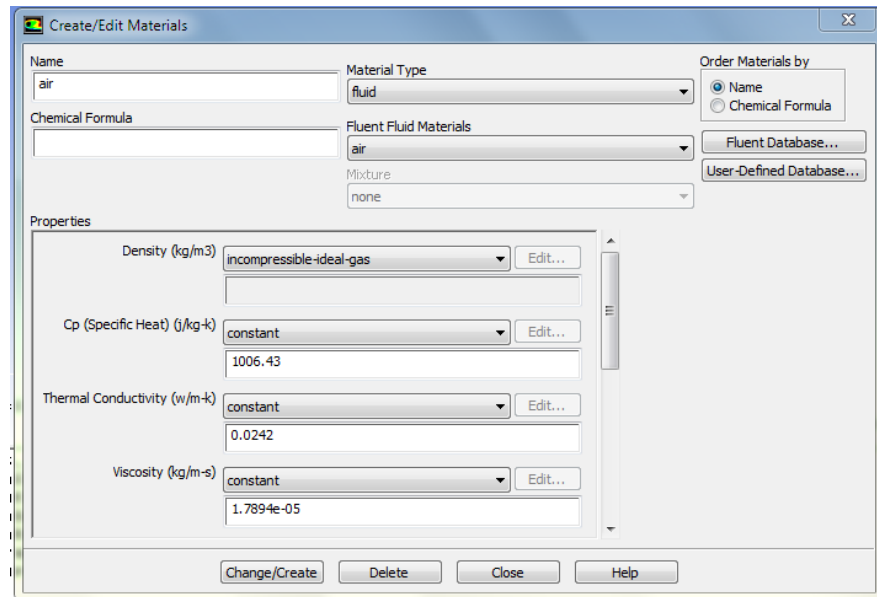


FIGURA 5.4. PROPIEDADES DEL AIRE

### Condiciones de operación

Se debe definir la presión atmosférica y aceleración de la gravedad existente en el lugar. La presión atmosférica se configura con el valor de 78230 Pa mientras que los efectos de la gravedad se desprecian para el cálculo de las propiedades

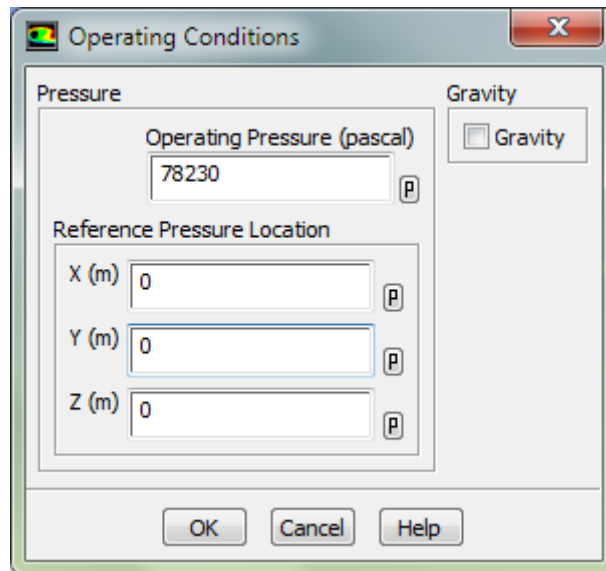


FIGURA 5.5. CONDICIONES DE OPERACIÓN

### **Inicialización del sistema**

La inicialización del sistema permite definir valores iniciales para las variables de flujo e inicializar el campo de flujo. Se escoge la inicialización estándar a partir de las propiedades ingresadas para el portal de ingreso.

### **Convergencia de la solución**

Para el estudio transiente se definirá que el rango de tiempo analizado será de 6 intervalos de 20 s cada uno y se establece que cada intervalo será de 100 iteraciones para asegurar una mayor precisión de la solución. Una vez realizado esto se procede a

calcular la solución del problema y al finalizar las iteraciones para cada uno de los intervalos se muestran los gráficos de los residuos.

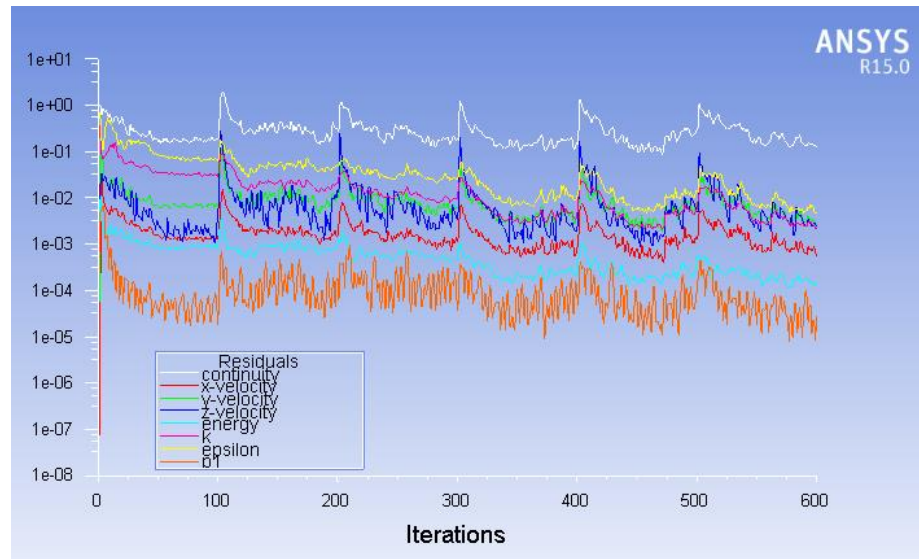


FIGURA 5.6. RESIDUOS DEL CASO 1

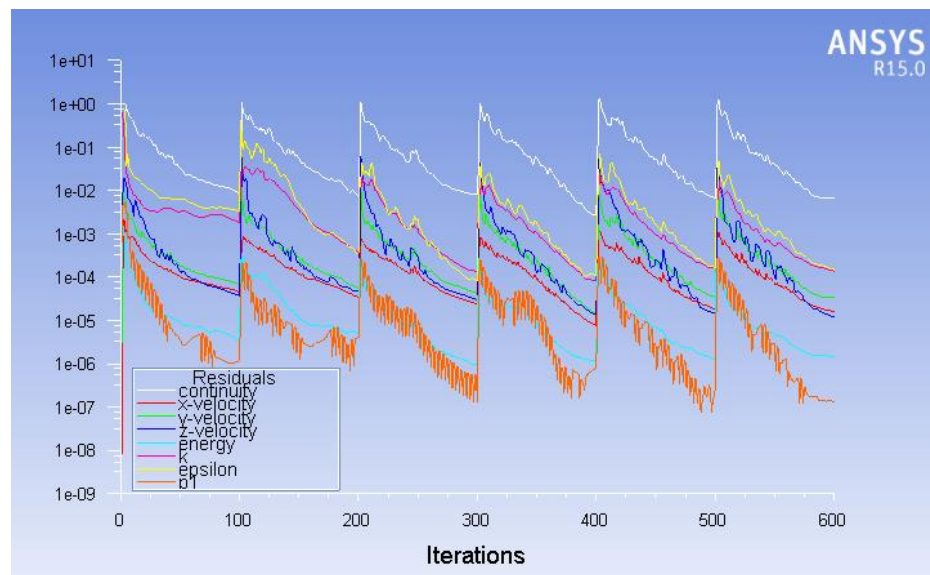


FIGURA 5.7. RESIDUOS DEL CASO 2

De los gráficos de los residuos es posible determinar que el Caso 1 la converge más lento que el Caso 2, sin embargo en ambos casos los residuos disminuyen lo cual indica la convergencia.

## 5.6. Análisis de resultados

### Caso 1

El Caso 1 representa el incendio en un túnel con un flujo de ventilación con velocidad inferior a la crítica ( $V=0.7$  m/s). Los resultados son los siguientes:

- **Temperatura**

Conforme el incendio crece, la temperatura dentro del túnel aumenta rápidamente debido a la propagación del humo. En las gráficas de contorno del plano longitudinal del túnel se observa que a esta velocidad existe un reflujo de humo que está representado por el aumento de temperatura que afecta a la porción a barlovento del flujo de aire.

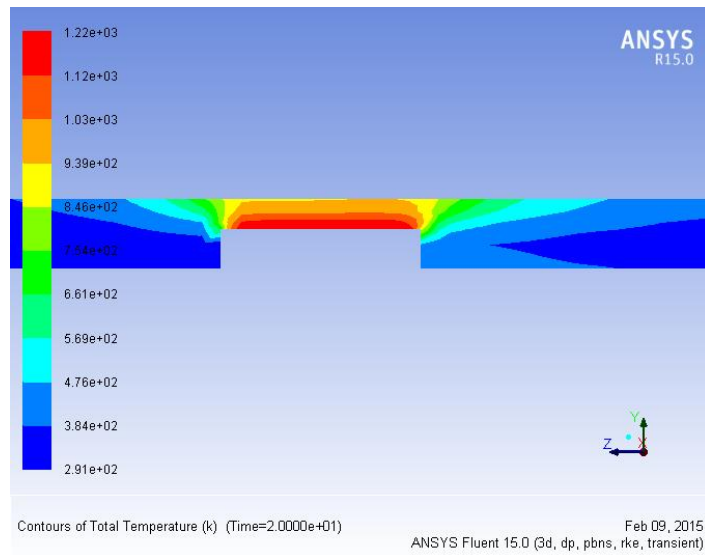


FIGURA 5.8. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 1 (TIEMPO=20 S)

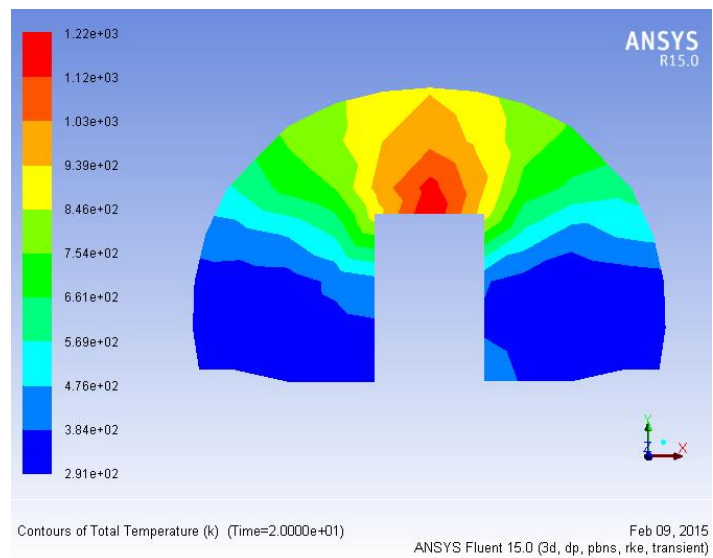


FIGURA 5.9. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 1 (TIEMPO=20 S)

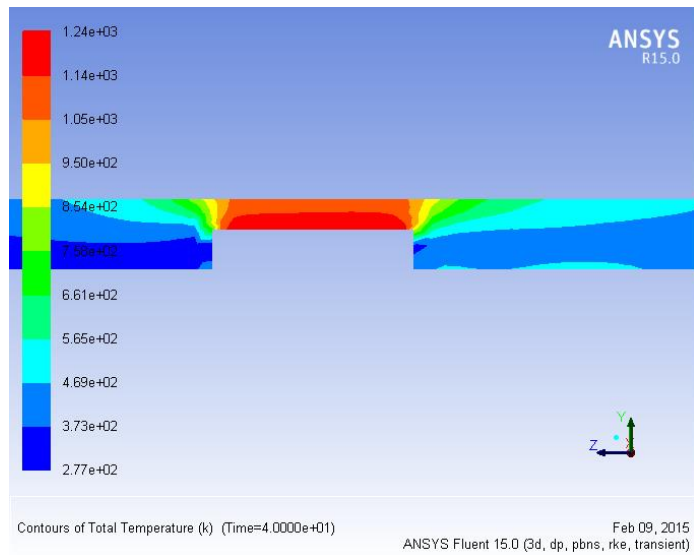


FIGURA 5.10. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 1 (TIEMPO=40 S)

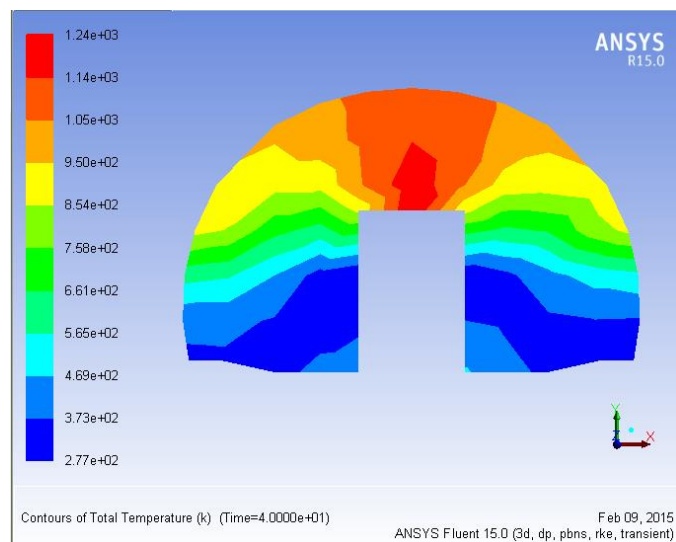


FIGURA 5.11. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 1 (TIEMPO=40 S)



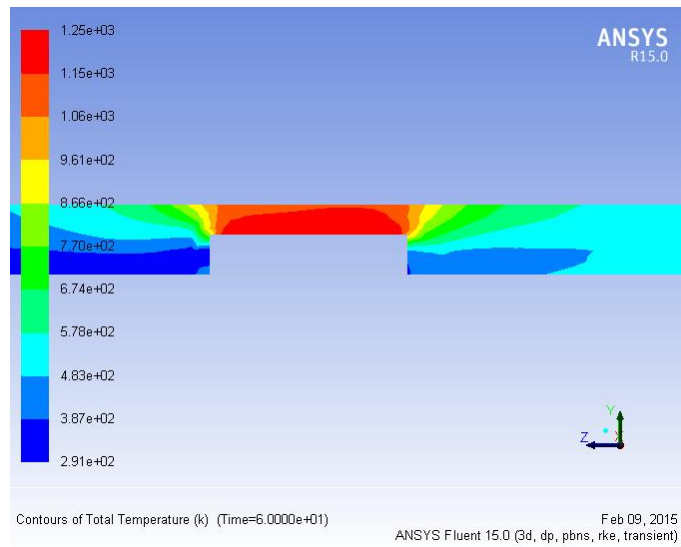


FIGURA 5.12. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 1 (TIEMPO=60 S)

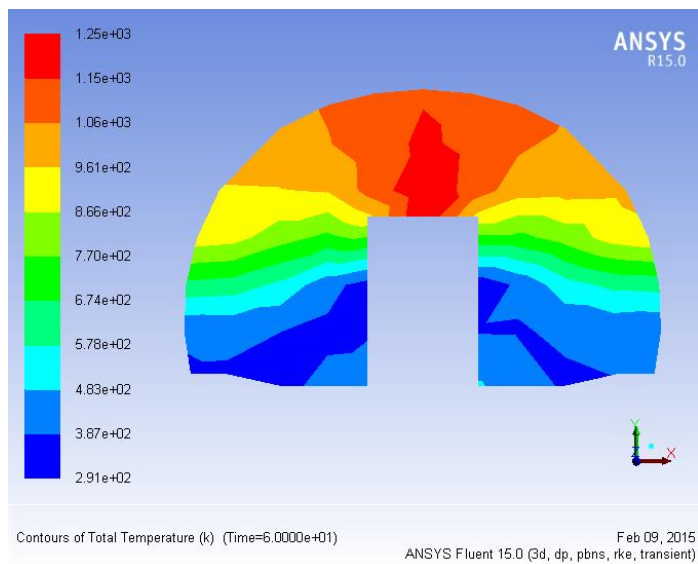


FIGURA 5.13. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 1 (TIEMPO=60 S)

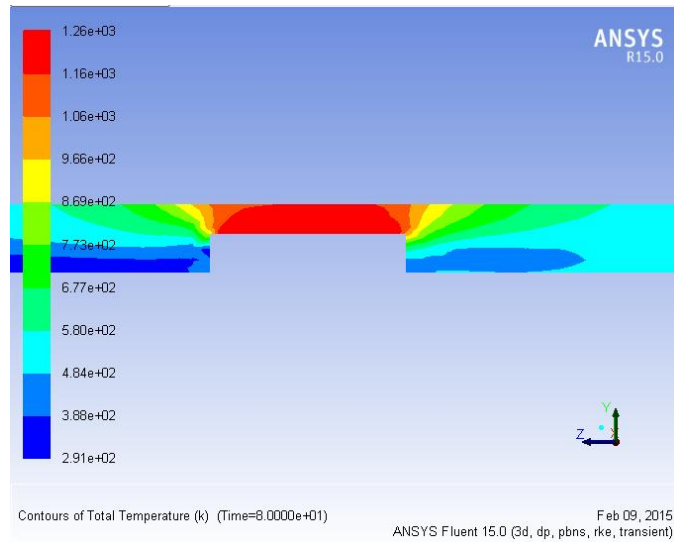


FIGURA 5.14. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 1 (TIEMPO=80 S)

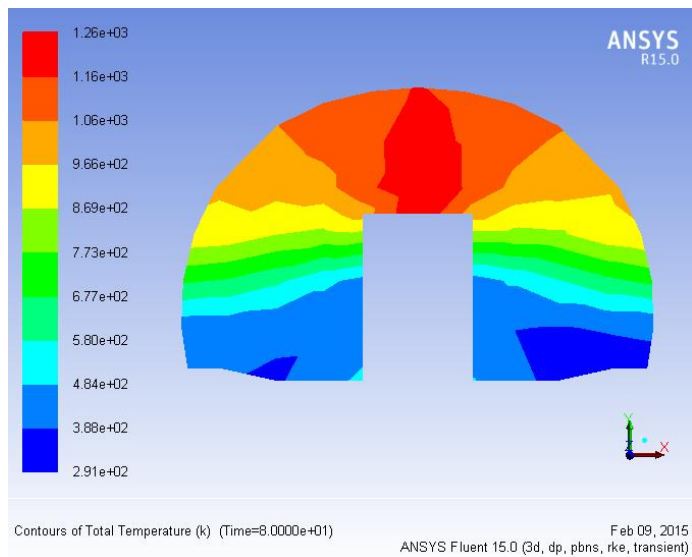


FIGURA 5.15. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 1 (TIEMPO=80 S)

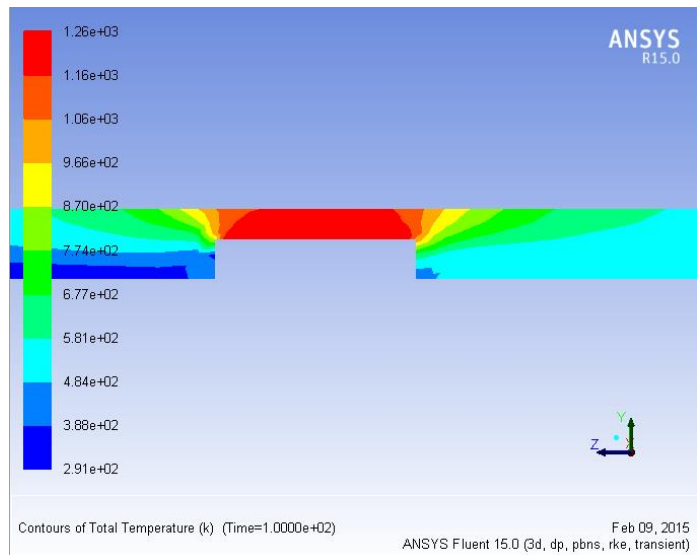


FIGURA 5.16. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 1 (TIEMPO=100 S)

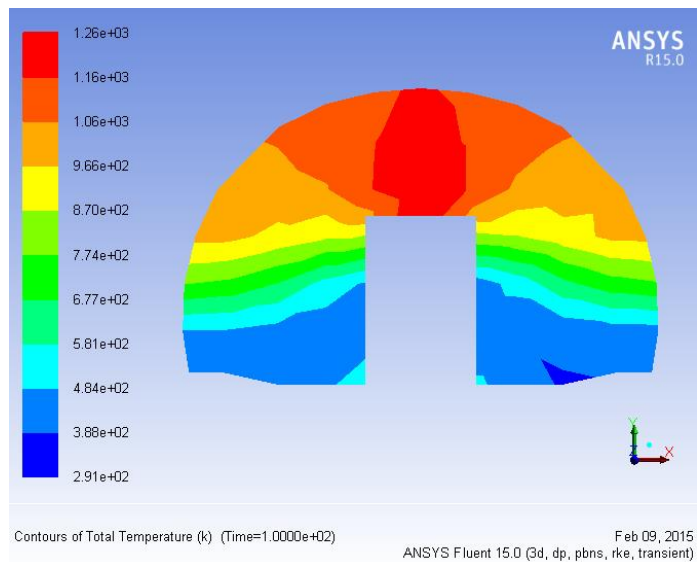


FIGURA 5.17. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 1 (TIEMPO=100 S)

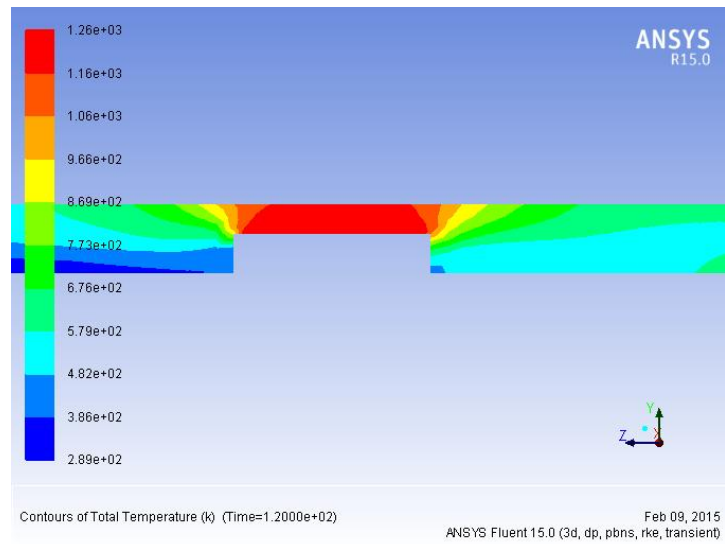


FIGURA 5.18. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 1 (TIEMPO=120 S)

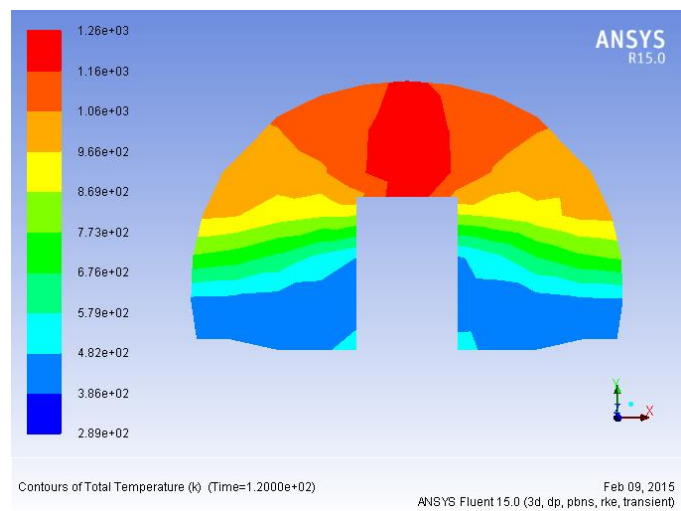


FIGURA 5.19. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 1 (TIEMPO=120 S)

En las gráficas de contorno de temperatura de la sección longitudinal y transversal se observa como la distribución del humo no se ve perturbada por el flujo de aire y por lo tanto su propagación se mantiene estratificada.

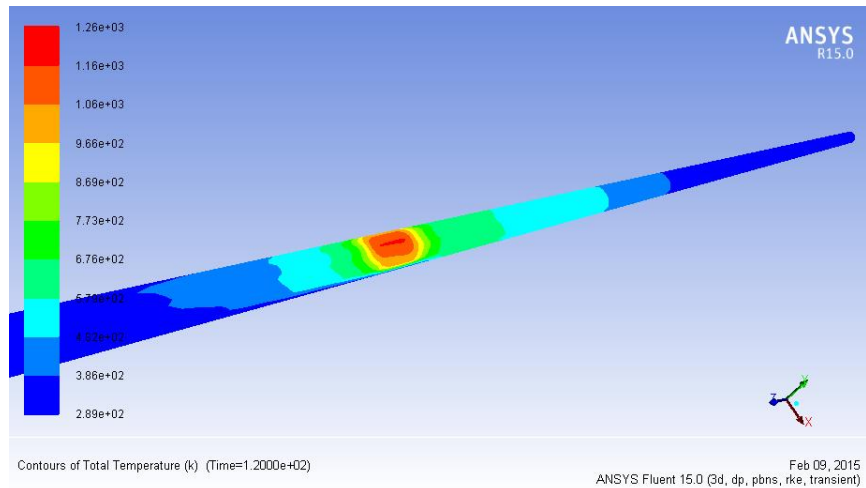


FIGURA 5.20. DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA CASO 1 (TIEMPO=120 S)

- **Velocidad**

El incremento de la temperatura disminuye la densidad del aire lo cual provoca que se acelere el flujo de aire a través del túnel. La velocidad en los nodos alcanza un valor máximo de 7.48 m/s y el valor máximo de velocidad en las celdas es de 10.87 m/s.

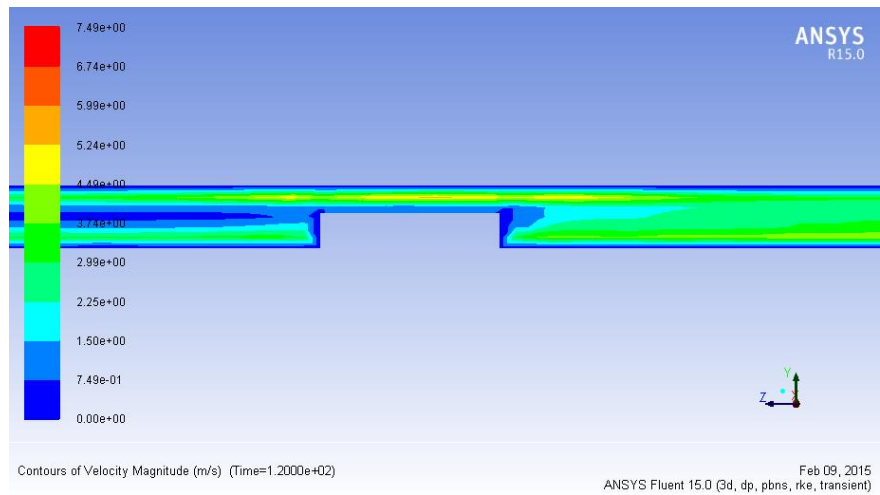


FIGURA 5.21. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD CASO 1  
(TIEMPO=120 S)

En el gráfico de vectores de velocidad se observa una velocidad contraria al flujo de aire, que es la del reflujos de aire.

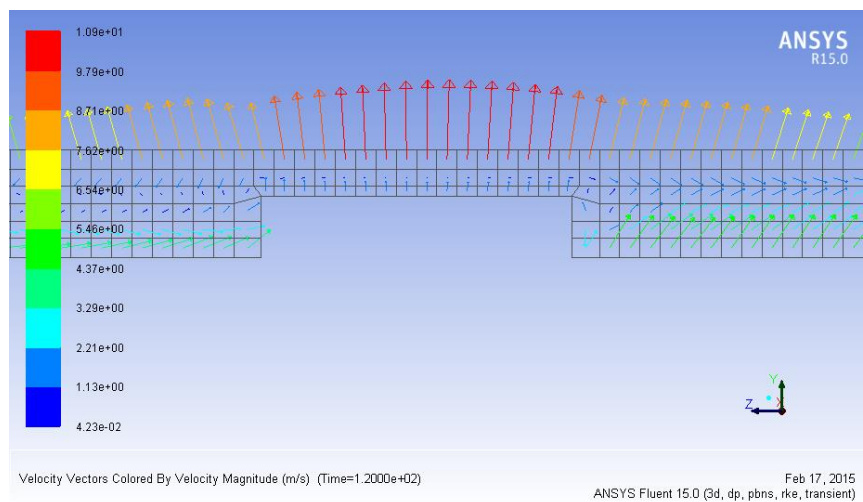


FIGURA 5.22. VECTORES DE VELOCIDAD CASO 1  
(TIEMPO=120 S)

- **Radiación**

De acuerdo a los resultados presentados por el software, la radiación dentro del túnel a los 120 s alcanza un valor máximo de 105.4 kW/m<sup>2</sup> en el lugar del incendio y un mínimo 1.6 kW/m<sup>2</sup>.

## **Caso 2**

El Caso 2 representa el incendio en el túnel con un flujo de ventilación a velocidad crítica.

- **Temperatura**

En este caso, la propagación del incendio es menos estratificada debido a que el aire empuja los humos hacia la salida del túnel. El incremento de temperatura debido a la etapa de crecimiento del incendio es desacelerado en comparación al Caso 1.

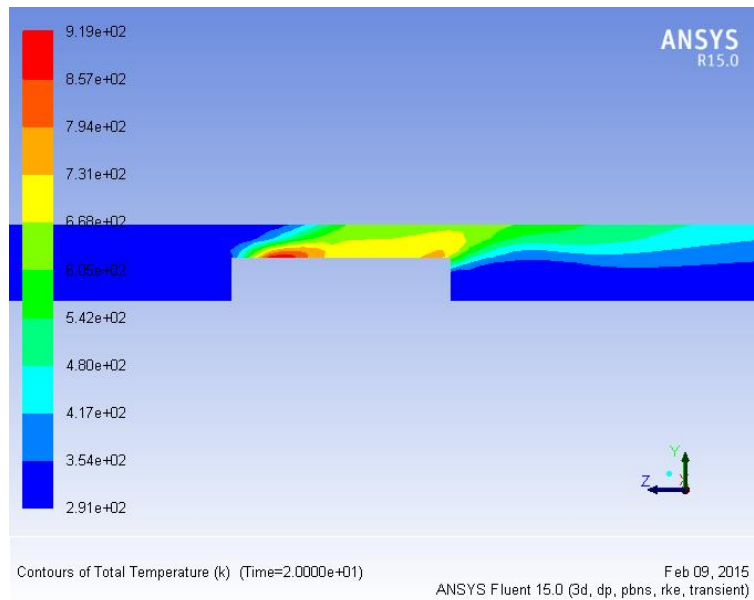


FIGURA 5.23. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 2 (TIEMPO=20 S)

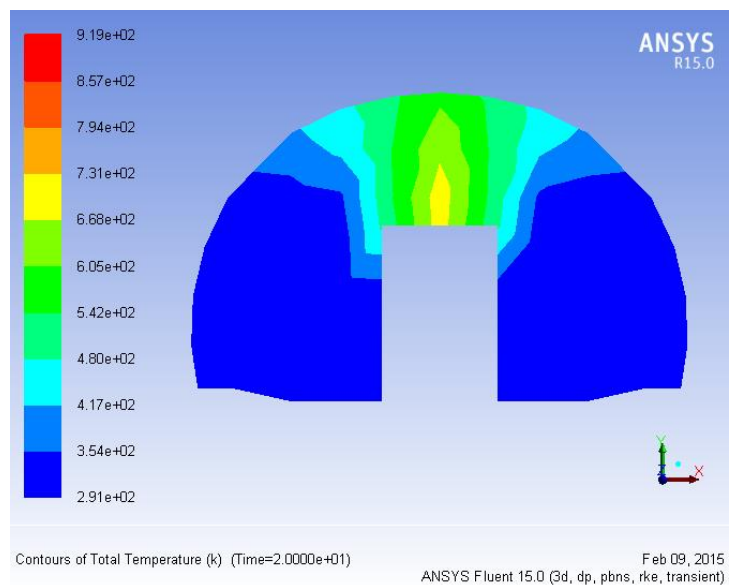


FIGURA 5.24. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 2 (TIEMPO=20 S)



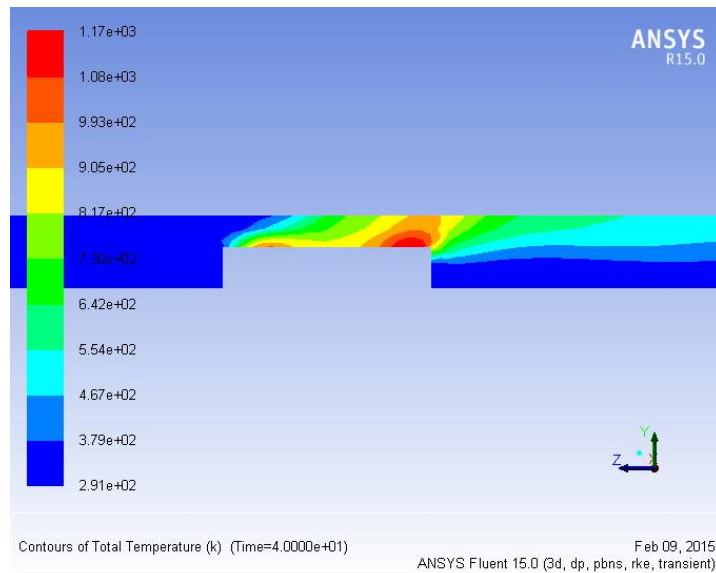


FIGURA 5.25. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 2 (TIEMPO=40 S)

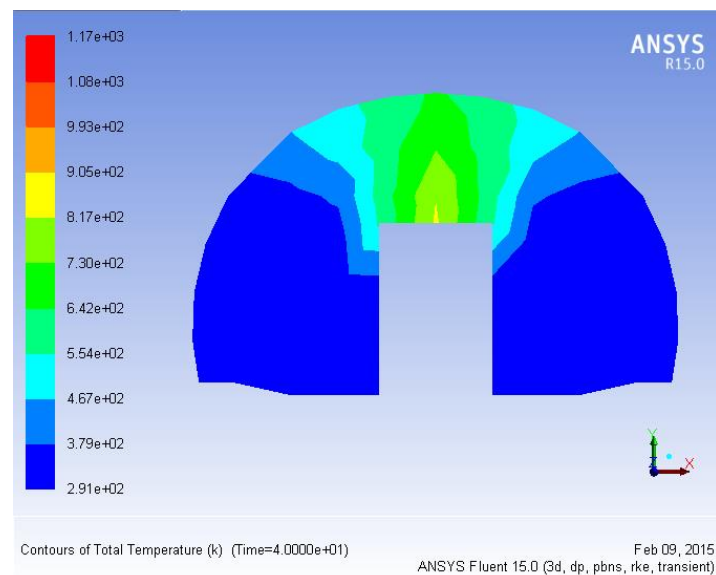


FIGURA 5.26. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 2 (TIEMPO=40 S)

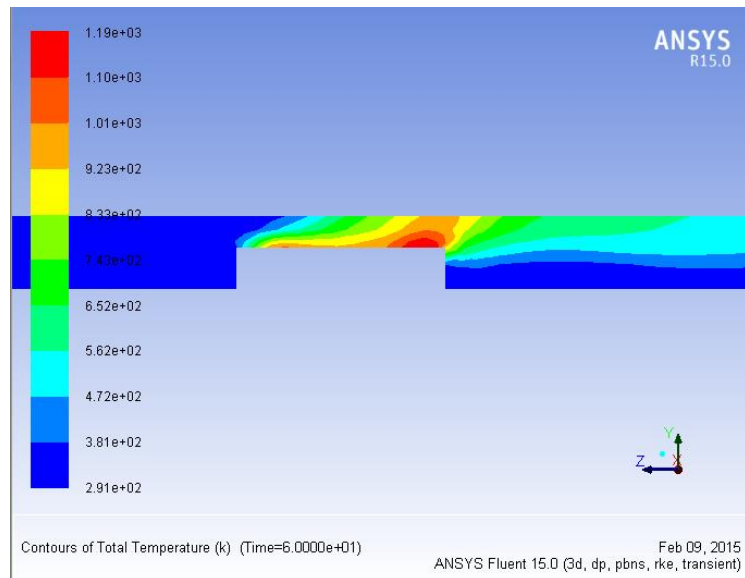


FIGURA 5.27. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 2 (TIEMPO=60 S)

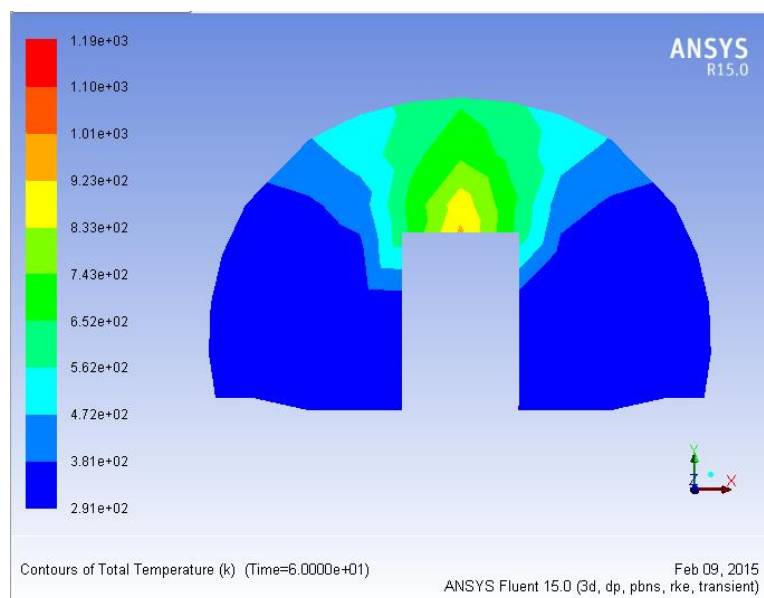


FIGURA 5.28. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 2 (TIEMPO=60 S)

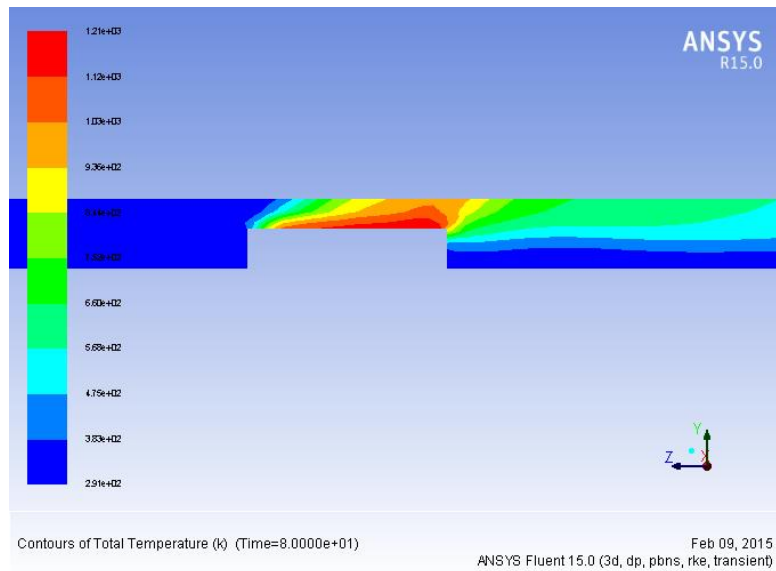


FIGURA 5.29. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 2 (TIEMPO=80 S)

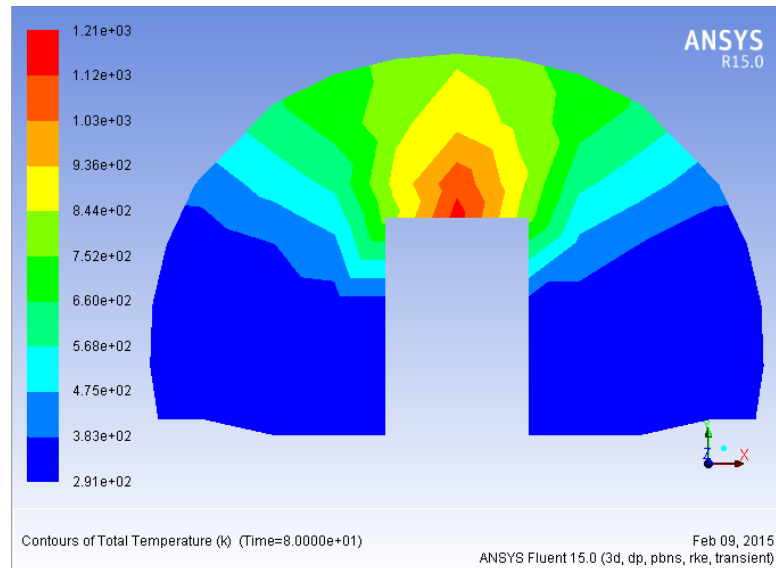


FIGURA 5.30. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 2 (TIEMPO=80 S)

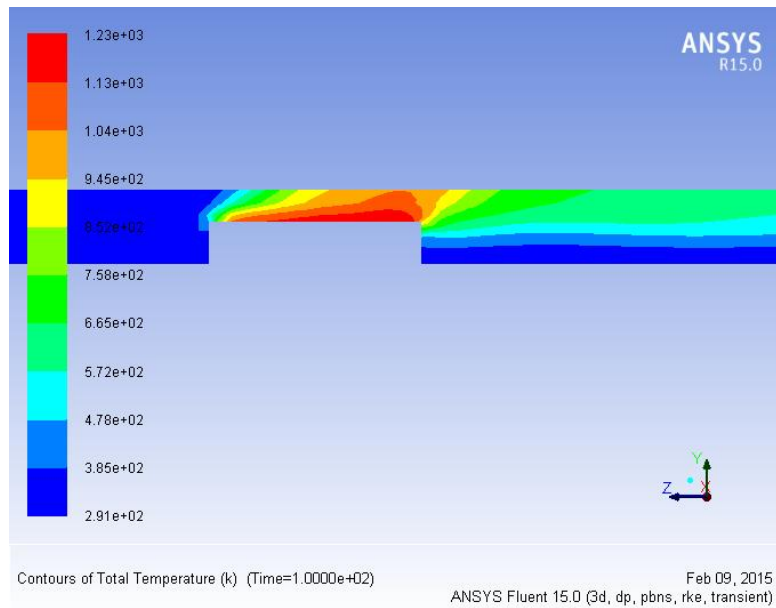


FIGURA 5.31. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 2 (TIEMPO=100 S)

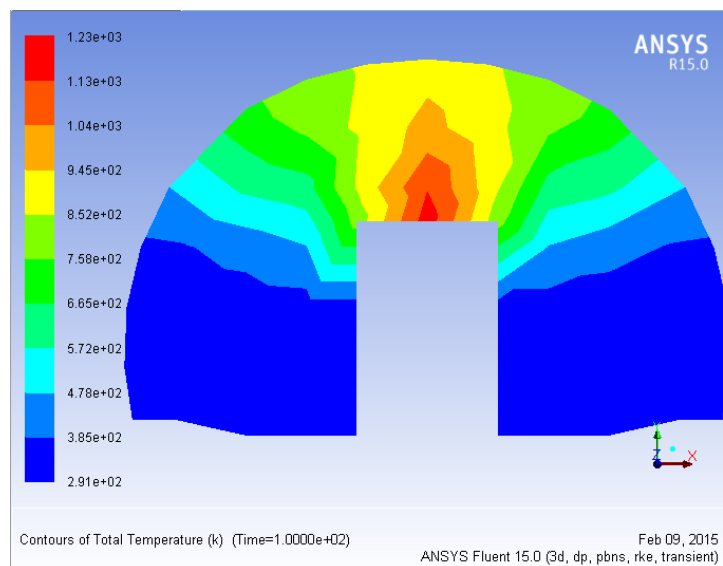


FIGURA 5.32. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 2 (TIEMPO=100 S)

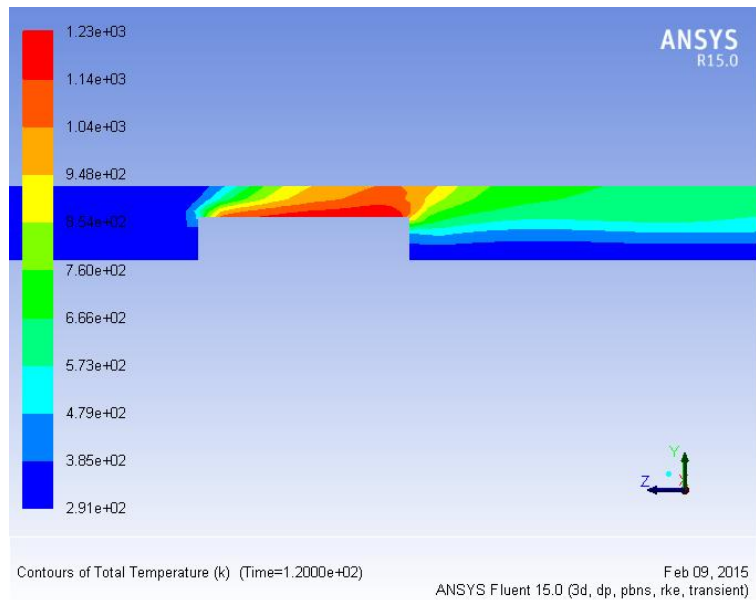


FIGURA 5.33. CONTORNO DE TEMPERATURA  
LONGITUDINAL CASO 2 (TIEMPO=120 S)

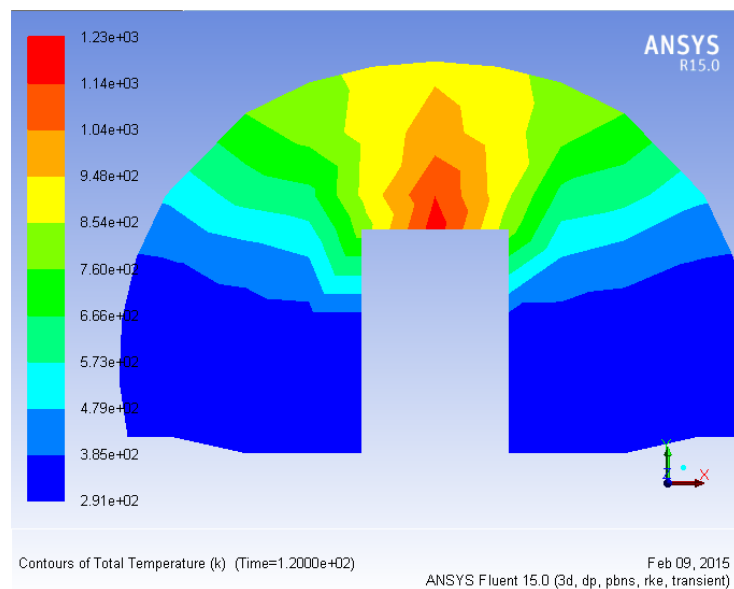


FIGURA 5.34. CONTORNO DE TEMPERATURA  
TRANSVERSAL CASO 2 (TIEMPO=120 S)

En este caso la temperatura de los gases en el sitio del incendio están entre 760 K y 666 K en el área del incendio mientras para los gases que se mueven hacia la salida del túnel están entre 666 K y 385 K.

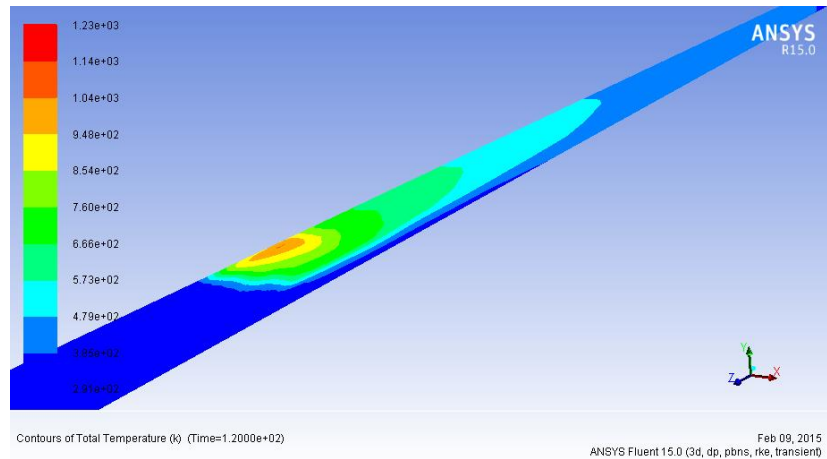


FIGURA 5.35. DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA CASO 2 (TIEMPO=120 S)

- **Velocidad**

En toda la porción anterior al incendio la velocidad del aire se mantiene constante con un valor de 3.11 m/s, sin embargo para la porción posterior, el incremento de la temperatura provoca que el flujo de aire se acelere de forma similar al Caso 1.

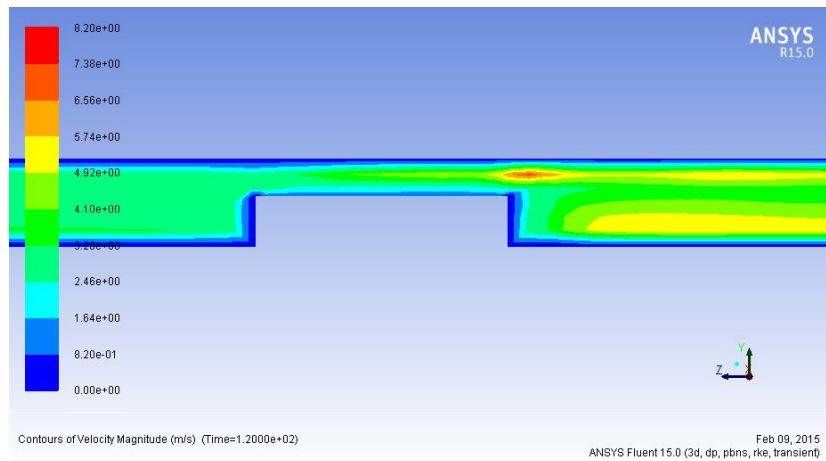


FIGURA 5.36. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD CASO 2  
(TIEMPO=120 S)

La velocidad en los nodos alcanza un valor máximo de 8.19 m/s y el valor máximo de velocidad en las celdas es de 11.95 m/s. No se presenta reflujos de aire en este sistema.

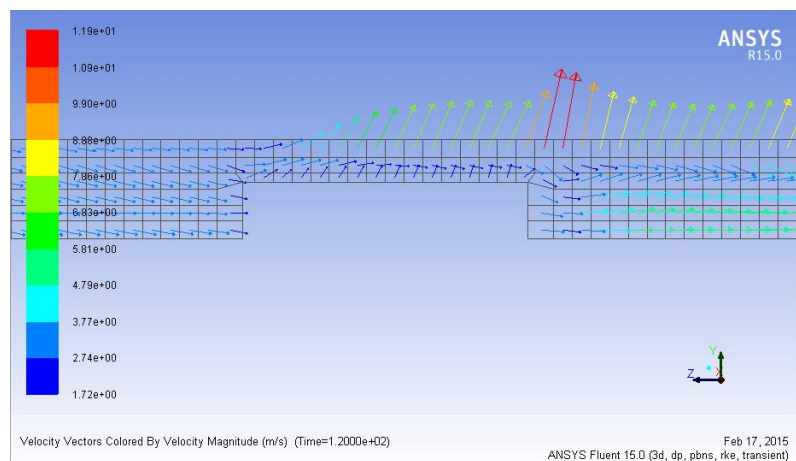


FIGURA 5.36. VECTORES DE VELOCIDAD CASO 2  
(TIEMPO=120 S)

- **Radiación**

De acuerdo a la información presentada por el software, el flujo de radiación dentro del túnel a los 120 s alcanza un valor máximo de  $81.2 \text{ kW/m}^2$  en el lugar del incendio y un mínimo  $1.6 \text{ kW/m}^2$



# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas del presente trabajo son las siguientes:

- La selección del sistema de ventilación de emergencia de tipo longitudinal se basó en el menor costo y similar efectividad que este posee, en comparación a los sistemas semitransversal y completamente transversal, tomando en cuenta las características del túnel.
- La velocidad crítica calculada para las condiciones analizadas es de 3.11 m/s. Esta velocidad crítica calculada analíticamente es suficiente para evitar el reflujó de humo, lo cual se pudo comprobar a través de la simulación numérica del incendio.

- La velocidad crítica permite limitar la temperatura de los humos dentro del túnel.
- El flujo de calor por radiación en el túnel se reduce de un máximo de  $105.4 \text{ kW/m}^2$  a  $81.2 \text{ kW/m}^2$  entre el Caso 1 y el Caso 2.
- La estratificación del humo aún se mantiene a sotavento del incendio cuando la velocidad del aire es igual a la velocidad crítica.
- A través de la simulación numérica es posible introducir el efecto de la radiación en el cálculo de la temperatura del humo que sale del túnel. El resultado analítico de la temperatura media del humo a sotavento se encuentran dentro del rango de temperatura determinado numéricamente.
- El empuje requerido por los equipos de ventilación es de mínimo  $1203.78 \text{ N}$  por cada ventilador y se requieren 12 baterías de ventilación con 2 ventiladores cada una.

## 6.2. Recomendaciones

- El sistema de ventilación de emergencia no debe activarse al instante en que se presenta el incendio, ya que esto empuja los humos generados directamente hacia los vehículos que

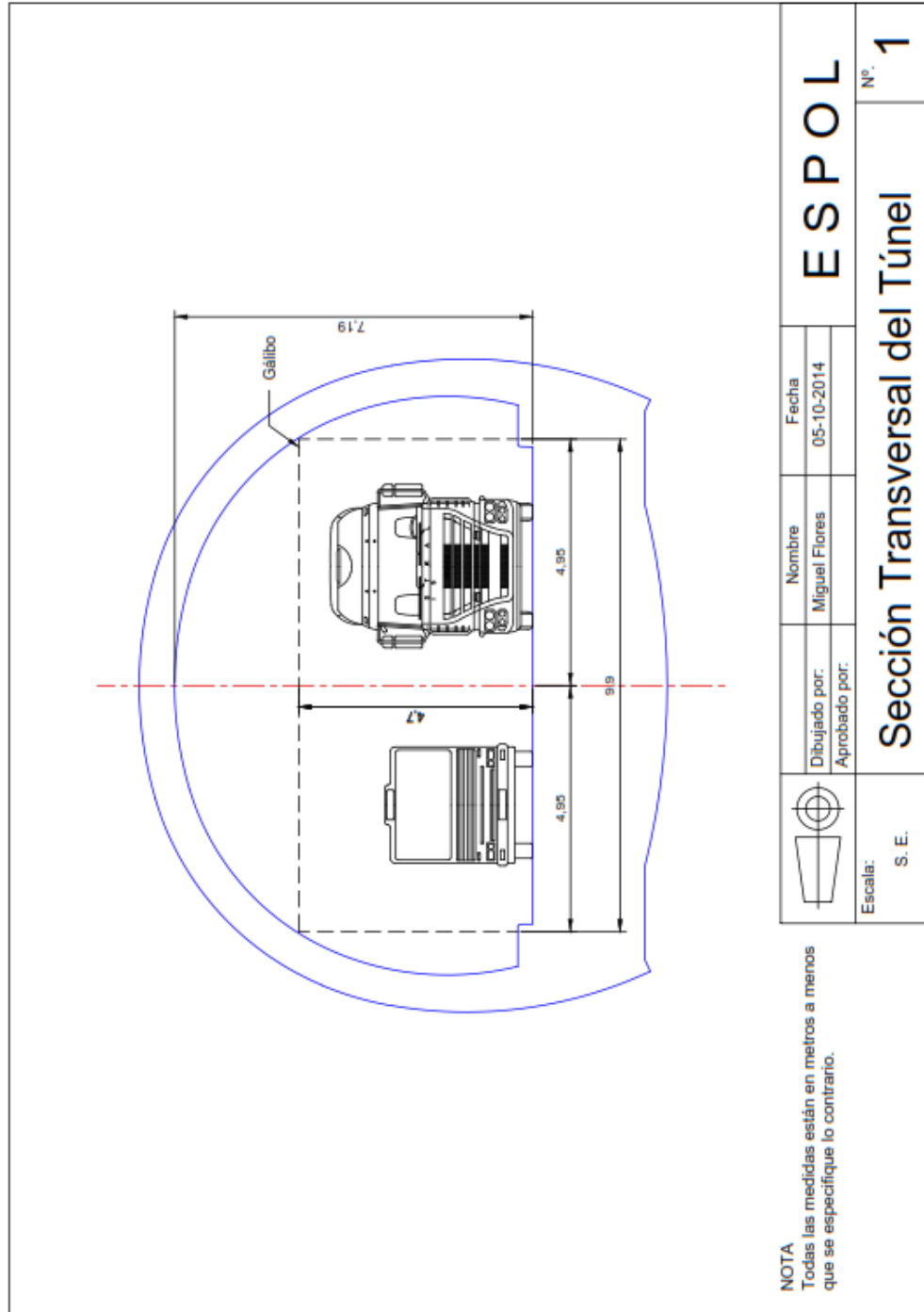
continúan la marcha hasta salir del túnel. Es prudencial esperar hasta que salgan dentro de los primeros 2-3 minutos de iniciado el siniestro.

- El sistema de ventilación de emergencia debe estar soportado por un sistema de control y vigilancia dentro del túnel. Este sistema deberá estar compuesto por cámaras de video, detectores de humo y de calor.
- El sistema de ventilación de emergencia debe complementarse con la apropiada gestión del personal de control y de emergencias para desarrollar las tareas de rescate y evacuación dentro del menor tiempo posible, generalmente entre los primeros 5-15 minutos.

# **APÉNDICES**

# APÉNDICE A

## SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TÚNEL

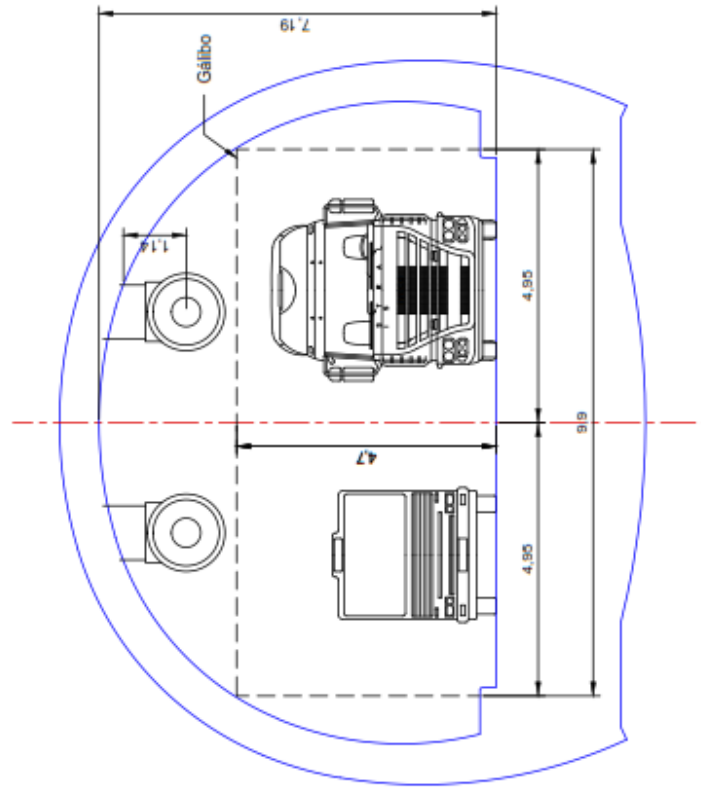


**NOTA**  
 Todas las medidas están en metros a menos que se especifique lo contrario.

	Dibujado por:	Nombre	Fecha
	Aprobado por:	Miguel Flores	05-10-2014
Escala: S. E.	<b>Sección Transversal del Túnel</b>		N.º <b>1</b>

# APÉNDICE B

## DETALLE DE BATERÍA DE VENTILACIÓN



**NOTA**  
 Todas las medidas están en metros a menos que se especifique lo contrario.



Escala:  
 S. E.

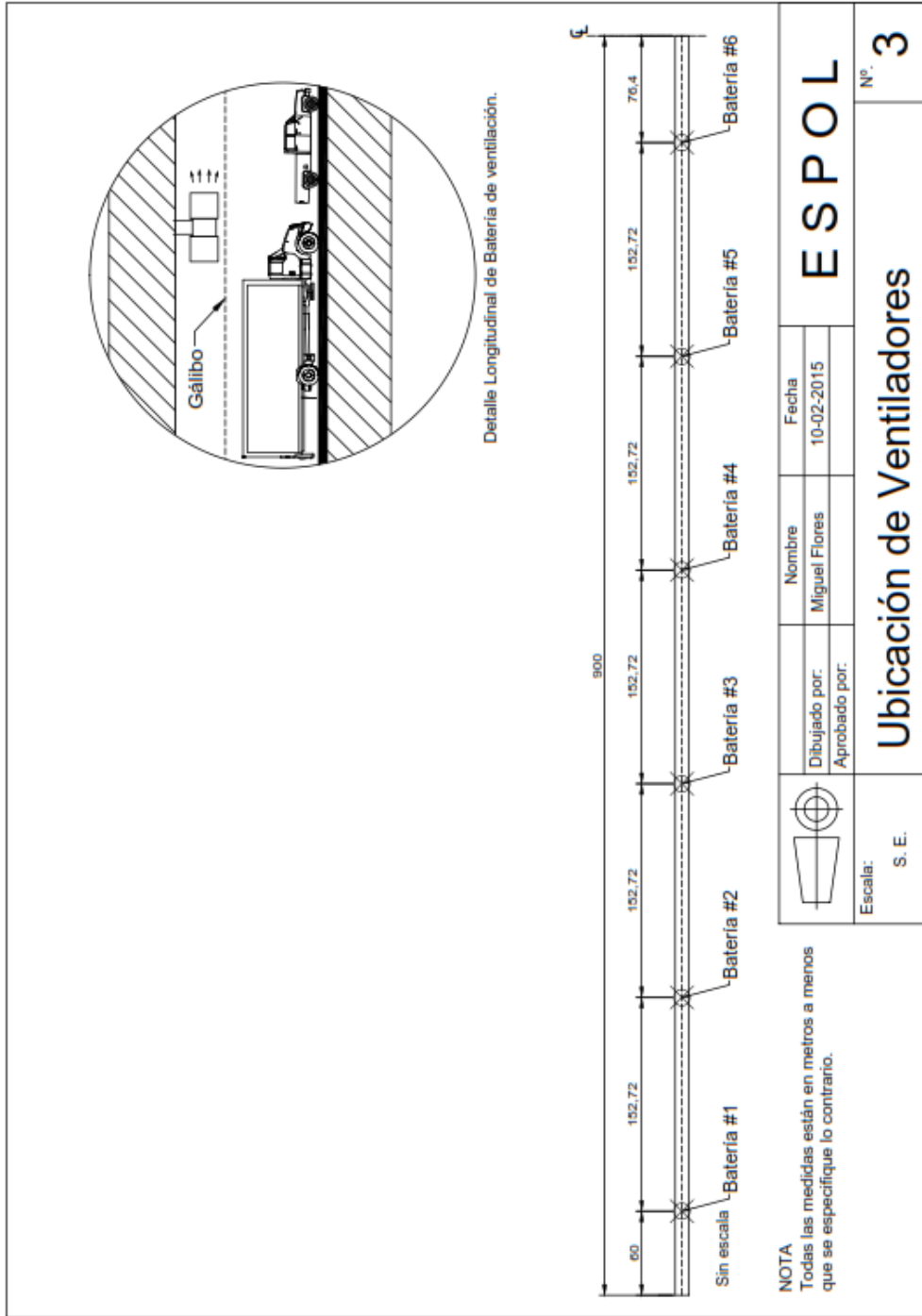
Dibujado por:	Nombre	Fecha
Aprobado por:	Miguel Flores	06-01-2015

**ESPOL**

**Detalle de Batería de Ventilación** N.º **2**

# APÉNDICE C

## SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TÚNEL



# APÉNDICE D

## ALGORITMO Y RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA

08/03/15 10:19 AM C:\Users\Miguel Flores\Documents\MATLAB\VelocidadCritica.m 1 of 1

```
clc
clear
Grade=0.01;%Pendiente
A=70.2;%Area transversal del túnel[m2]
H=7.19;%Perimetro del tunel[m]
g=9.81;%Aceleración de la gravedad
R=287;
Pinf=78230;%Presión atmosférica [Pa]
Q=95000; %Calor liberado [kW]
Tinf=291.15;%Temperatura ambiental [k]
K1=0.606;%Factor del número de Froude
cp=1.004;%Calor específico del aire

V(1)=0;
V(2)=4.5;
n=1;
rho=Pinf/(R*Tinf);
while abs(V(2)-V(1))>0.001
Vc(n)=V(2);
K2=1+0.0374*(Grade)^0.8;
TF(n)=(Q/(rho*cp*A*Vc(n)))+Tinf;
TDS(n)=(.66*Q/(rho*cp*A*Vc(n)))+Tinf;
Vc(n)=K1*K2*((g*H*Q)/(rho*cp*A*TF(n)))^(1/3);
V(1)=V(2);
V(2)=Vc(n);
n=n+1;
end
disp('Temperatura promedio de los gases en el sitio del incendio')
disp(TF)
disp('Velocidad crítica')
disp(Vc)
disp('Temperatura promedio de los gases a la salida del túnel')
disp(TDS)
```



---

Temperatura promedio de los gases en el sitio del incendio  
611.0879 722.8747 747.7403 752.9167 753.9798 754.1976

Velocidad crítica  
3.3348 3.1532 3.1179 3.1107 3.1092 3.1089

Temperatura promedio de los gases a la salida del túnel  
502.3090 576.0883 592.4996 595.9160 596.6177 596.7614

>>

# APÉNDICE E

## ALGORITMO Y RESULTADOS DE CÁLCULO DEL EMPUJE TOTAL

08/03/15 10:17 AM C:\Users\Miguel Flores\Documents\MATLAB\DeltaP.m

1 of 2

```
clc
clear
L=1800; %Longitud del túnel
A=70.2; %Área transversal del túnel
P=32.62;
DH=4*A/P; %Diámetro hidráulico
TsTinf=2.05; %Factor de corrección por temperatura
rho=0.9362; %Densidad del aire a temperatura ambiental;
V=3.11; %Velocidad del aire en el túnel
g=9.81;
grade=0.01;

%Caída de presión debido a vehículos paralizados
Nlivianos=[0 11 22 33 44 55 66];
Npesados=[0 4 8 12 16 20 24];
CA1=0.9;
CAp=4.5;
for n=1:7
    DPpistonliv(n)=Nlivianos(n)*(0.5*rho*CA1*V^2)/A;
    DPpistonpes(n)=Npesados(n)*(0.5*rho*CAp*V^2)/A;
end
DPpiston=DPpistonliv+DPpistonpes;
disp('CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A VEHÍCULOS PARALIZADOS')
disp('Valor de deltaP debido a los vehículos livianos paralizados')
disp(DPpistonliv)
disp('Valor de deltaP debido a los vehículos pesados paralizados')
disp(DPpistonpes)
disp('Valor de deltaP total debido a los vehículos paralizados')
disp(DPpiston)

%Caída de presión debido a la fricción con el túnel
k=0.5; %Coeficiente de pérdida en la entrada del túnel
f=0.0141; %Factor de fricción en las paredes
x=L/6;
n=1;
DPEntrada=k*0.5*rho*V^2;
DPSalida=0.5*rho*V^2*(TsTinf);
for Long=0:x:L
    DPAntes(n)=0.5*f*(Long/DH)*rho*V^2;
    DPDespues(n)=0.5*f*((L-Long)/DH)*rho*V^2*(TsTinf);
    n=n+1;
end
DPTunel=DPAntes+DPDespues+DPEntrada+DPSalida;
disp('CAIDA DE PRESIÓN DEBIDO A LA FRICCIÓN CON EL TÚNEL')
disp('Valor de deltaP a barlovento:')
disp(DPAntes)
disp('Valor de deltaP a sotavento:')
disp(DPDespues)
disp('Valor de deltaP a la entrada del túnel:')
disp(DPEntrada)
disp('Valor de deltaP a la salida del túnel:')
disp(DPSalida)
disp('Valor de deltaP total debido a la fricción con el túnel')
disp(DPTunel)
```

```
%Caída de presión debido a fenómenos meteorológicos
DPmeteo=50;
disp('CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A FENÓMENOS METEOROLÓGICOS')
disp('Valor de deltaP debido a fenómenos meteorológicos')
disp(DPmeteo)

%Caída de presión debido al efecto chimenea
rhoout=0.447;
n=1;
for Long=0:x:L
    DPchimenea(n)=- (rho-rhoout)*g*grade*(L-Long);
    n=n+1;
end
disp('CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO AL EFECTO CHIMENEA')
disp('Valor de deltaP debido al efecto chimenea')
disp(DPchimenea)

%Caída de presión debido al fuego/
c=9e-5;
q=95e6;
V=3.11;
DPfuego=c*0.66*q/(V*DH^2);
disp('CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO AL FUEGO')
disp('Valor de deltaP debido al fuego')
disp(DPfuego)

DP=DPpiston+DPTunel+DPmeteo+DPchimenea+DPfuego
F=DP*A
```

## CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A VEHÍCULOS PARALIZADOS

Valor de deltaP debido a los vehiculos livianos paralizados  
0 0.6385 1.2770 1.9155 2.5540 3.1925 3.8310

Valor de deltaP debido a los vehiculos pesados paralizados  
0 1.1609 2.3218 3.4827 4.6436 5.8045 6.9654

Valor de deltaP total debido a los vehiculos paralizados  
0 1.7994 3.5988 5.3982 7.1976 8.9970 10.7964

## CAIDA DE PRESIÓN DEBIDO A LA FRICCIÓN CON EL TÚNEL

Valor de deltaP a barlovento:  
0 2.2248 4.4496 6.6743 8.8991 11.1239 13.3487

Valor de deltaP a sotavento:  
27.3648 22.8040 18.2432 13.6824 9.1216 4.5608 0

Valor de deltaP a la entrada del túnel:  
2.2638

Valor de deltaP a la salida del túnel:  
9.2814

Valor de deltaP total debido a la fricción con el túnel  
38.9099 36.5739 34.2379 31.9019 29.5659 27.2298 24.8938

## CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

Valor de deltaP debido a fenómenos meteorológicos  
50

## CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO AL EFECTO CHIMENEA

Valor de deltaP debido al efecto chimenea  
-86.3829 -71.9858 -57.5886 -43.1915 -28.7943 -14.3972 0

## CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO AL FUEGO

Valor de deltaP debido al fuego  
24.4863

DP =

27.0133 40.8738 54.7344 68.5949 82.4554 96.3160 110.1765

F =

1.0e+003 \*

1.8963 2.8693 3.8424 4.8154 5.7884 6.7614 7.7344

>>

# APÉNDICE F

## CATÁLOGO DE LOS EQUIPOS JET FAN ZITRÓN



### GAMA DE FABRICACION

Los ventiladores de chorro ZITRON, se fabrican en dos gamas, ya sean ventiladores con un sólo sentido de soplado, para túneles unidireccionales, y reversibles, para túneles bidireccionales.

JZ - Ventiladores unidireccionales.  
JZR - Ventiladores reversibles.

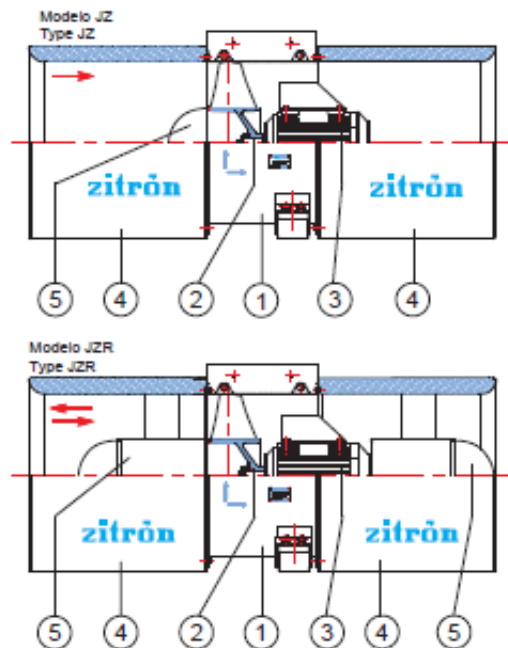
### MANUFACTURING RANGE

ZITRON, jet fans are manufactured in two ranges: fans with one jet stream direction recommended for one-way tunnels, and reversible fans for two-way tunnels.

JZ - One-way fans.  
JZR - Reversible fans.

### CONSTRUCCION

### CONSTRUCTION



#### Modelo JZ

- 1 - Carcasa ventilador.
- 2 - Rodete.
- 3 - Motor.
- 4 - Amortiguador de ruido.
- 5 - Cazoleta de admisión.

#### Modelo JZR

- 1 - Carcasa ventilador.
- 2 - Rodete.
- 3 - Motor.
- 4 - Amortiguador de ruido.
- 5 - Carenado interior.

#### Type JZ

- 1 - Fan housing.
- 2 - Impeller.
- 3 - Motor.
- 4 - Silencer.
- 5 - Semi-spherical inlet casing.

#### Type JZR

- 1 - Fan housing.
- 2 - Impeller.
- 3 - Motor.
- 4 - Silencer.
- 5 - Inner cowling.

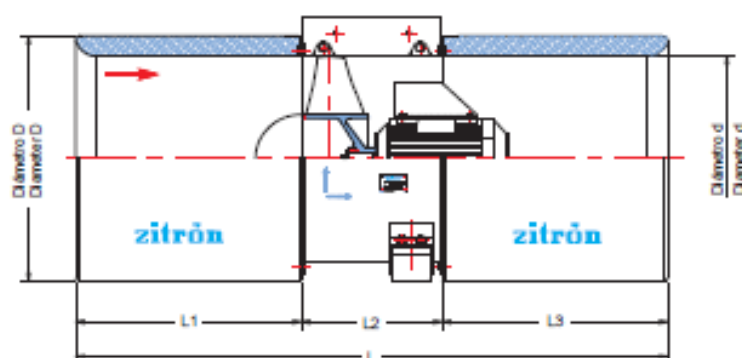


**VENTILADORES UNIDIRECCIONALES "JZ"**

Dimensiones y pesos.

**ONE - WAY FANS "JZ"**

Dimensions and weights.



MODELO TYPE	Diam. Diam. D mm.	Diam. Diam. d mm.	Longit. Length L mm.	Longit. Length L1 mm.	Longit. Length L2 mm.	Longit. Length L3 mm.	Peso Weight (Kg)*
JZ 5	700	500	1600	600	400	600	250
JZ 6	800	600	2700	1025	650	1025	450
JZ 7	900	700	2700	1025	650	1025	600
JZ 9	1100	900	2700	1025	650	1025	675
JZ 10	1200	1000	2700	1025	650	1025	775
JZ 12	1400	1200	3450	1275	900	1275	1200
JZ 14	1600	1400	3450	1275	900	1275	1400
JZ 16	1800	1600	3450	1275	900	1275	1675

\* ESTE PESO CORRESPONDE AL MODELO DEL VENTILADOR CON MOTOR DE MAYOR POTENCIA.

\* IT IS CONSIDERED THE WEIGHT OF THE MODEL WITH THE MOST POWERFUL MOTOR.



**VENTILADORES UNIDIRECCIONALES "JZ"**

**ONE - WAY FANS "JZ"**

**Características técnicas**

DENSIDAD DEL AIRE = 1.2 Kg./m<sup>3</sup>  
 FRECUENCIA DE RED = 60 Hz

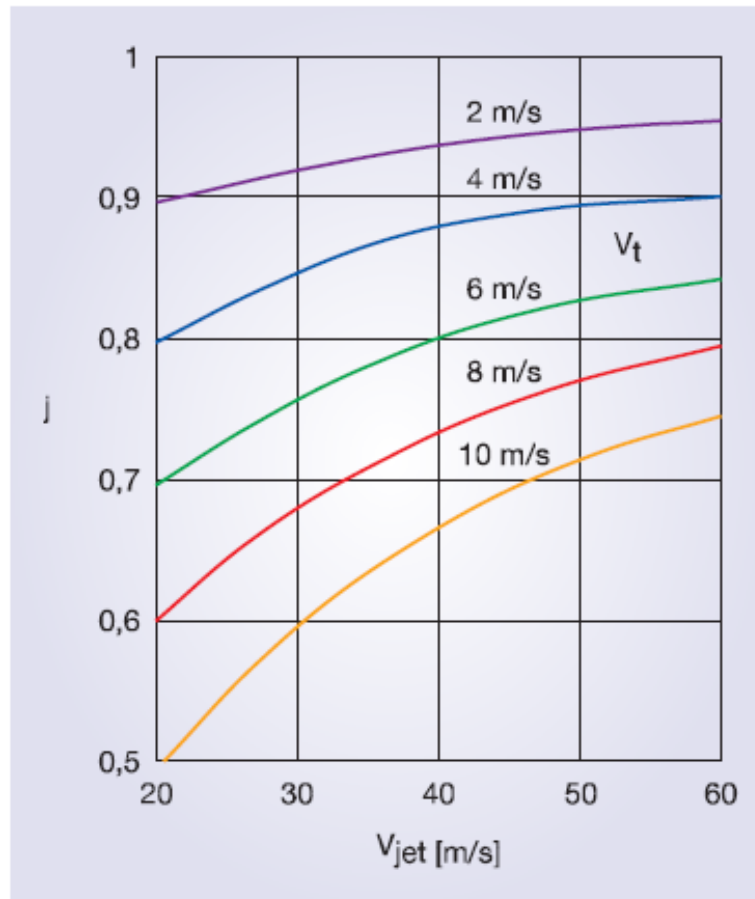
**Technical data**

AIR DENSITY = 1.2 Kg./m<sup>3</sup>  
 FREQUENCY = 60 Hz

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)
JZ 5-6.3/2	6.1	31.1	228	214	5.3	6.3	64
JZ 5-9/2	7.2	36.7	317	292	8.7	9.0	68
JZ 6-9/2	9.0	31.8	344	327	8.2	9.0	62
JZ 6-13/2	10.4	36.9	463	440	12.7	13.0	65
JZ 6-17/2	11.3	40.0	542	515	16.2	17.0	66
JZ 7-13/2	12.7	33.0	503	484	12.0	13.0	64
JZ 7-17/2	14.0	36.4	611	588	16.1	17.0	66
JZ 7-21/2	14.9	38.5	683	657	19.0	21.0	67
JZ 7-25/2	16.3	42.4	829	797	25.4	25.0	69
JZ 9-17/4	19.5	30.7	718	690	15.9	17.0	62
JZ 9-21/4	21.2	33.3	848	816	20.5	21.0	64
JZ 9-25/4	22.3	35.1	939	903	23.8	25.0	65
JZ 10-17/4	22.5	28.7	774	744	15.8	17.0	62
JZ 10-21/4	24.0	30.6	881	845	19.2	21.0	63
JZ 10-25/4	25.9	33.0	1025	979	24.2	25.0	65
JZ 10-34/4	29.2	37.2	1303	1245	33.6	34.0	67
JZ 12-25/4	32.7	28.9	1135	1095	23.4	25.0	66
JZ 12-34/4	36.2	32.0	1391	1342	31.8	34.0	69
JZ 12-41/4	38.0	33.6	1533	1479	36.8	41.0	70
JZ 12-52/4	42.0	37.2	1873	1807	49.7	52.0	73
JZ 12-63/4	45.0	39.8	2150	2074	61.1	63.0	74
JZ 14-34/6	44.5	28.9	1544	1483	31.9	34.0	69
JZ 14-41/6	47.5	30.9	1760	1689	38.8	41.0	70
JZ 14-52/6	50.4	32.8	1981	1902	46.3	52.0	72
JZ 14-63/6	53.4	34.7	2224	2135	55.1	63.0	73
JZ 14-86/6	59.3	38.5	2743	2633	75.5	86.0	76
JZ 16-52/6	61.3	30.5	2244	2143	48.9	52.0	71
JZ 16-63/6	65.5	32.6	2562	2447	59.6	63.0	72
JZ 16-86/6	73.1	36.4	3191	3047	82.9	86.0	75
JZ 16-103/6	77.5	38.6	3587	3425	98.8	103.0	76

## APÉNDICE G

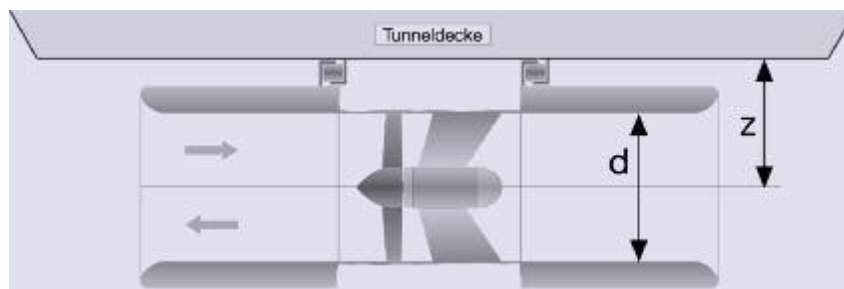
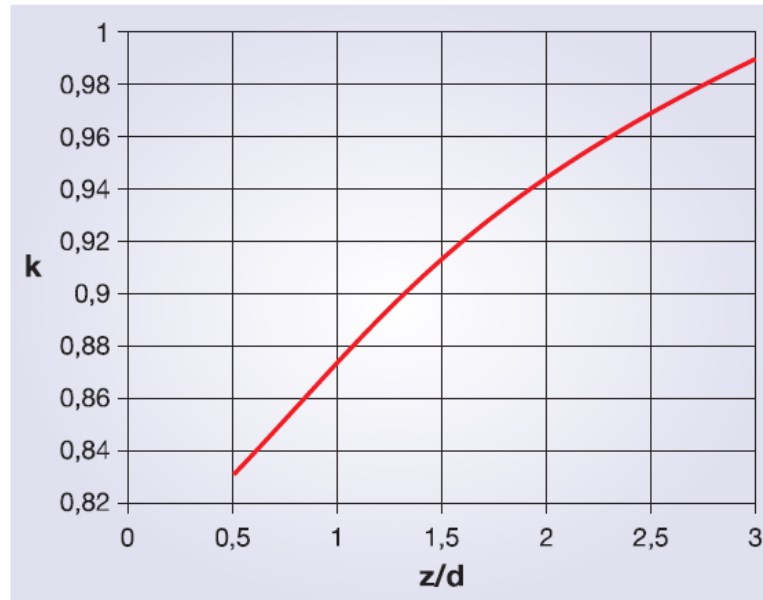
### DIAGRAMA DE EFICIENCIA POR VELOCIDAD DEL AIRE $\eta_1$





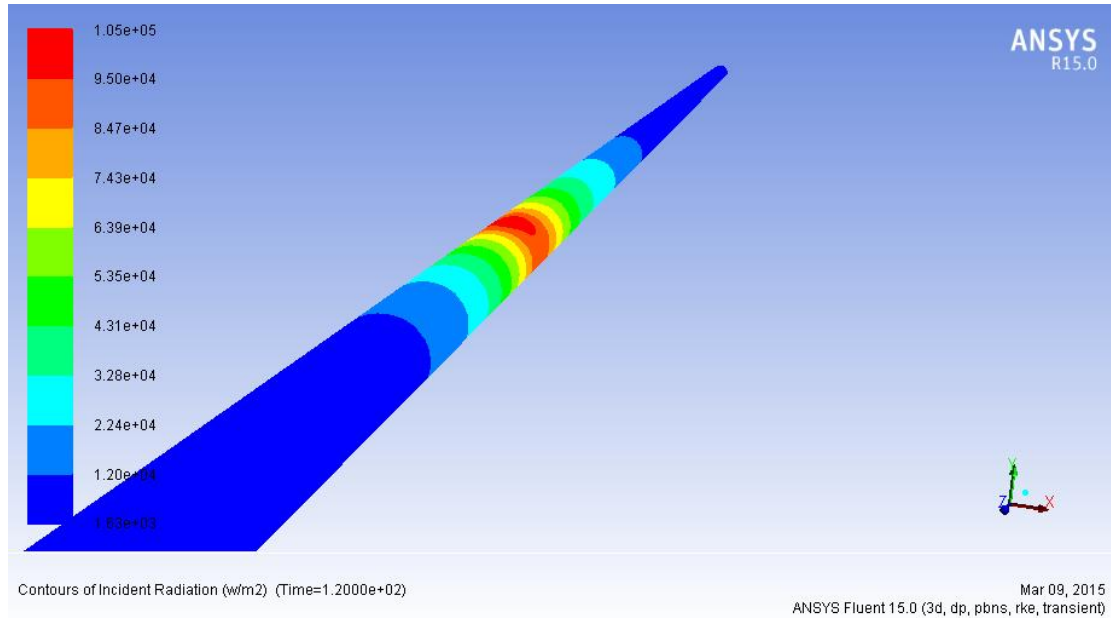
## APÉNDICE H

### DIAGRAMA DE EFICIENCIA POR INSTALACIÓN $\eta_2$



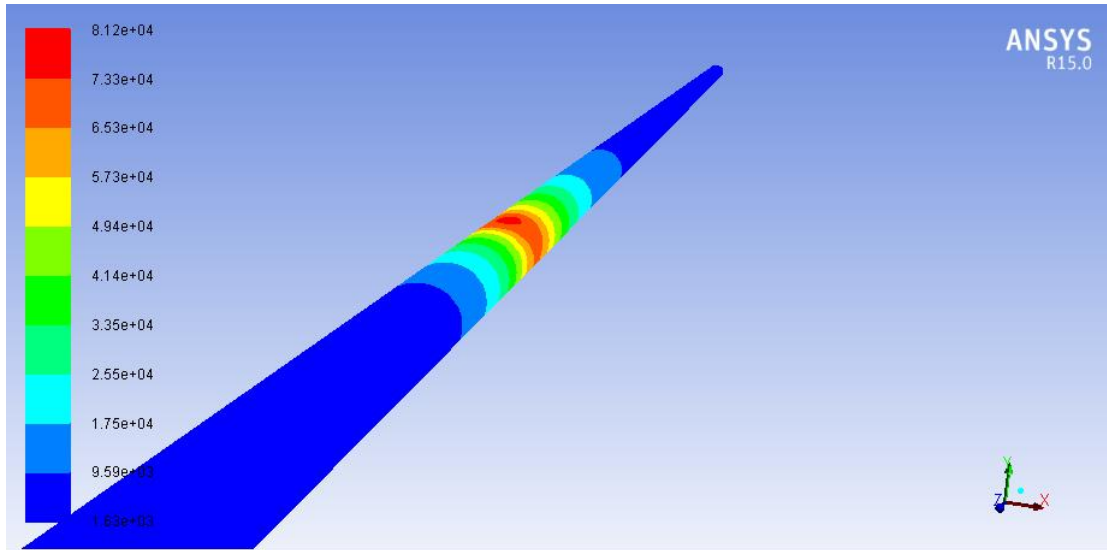
# APÉNDICE I

## RADIACIÓN INCIDENTE CASO 1 [T=120 S]



# APÉNDICE J

## RADIACIÓN INCIDENTE CASO 2 [T=120 S]



Contours of Incident Radiation (w/m<sup>2</sup>) (Time=1.2000e+02)

Mar 09, 2015  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, rke, transient)

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ministerio de Transporte y Obras Públicas, <http://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-ampliara-a-4-carriles-el-intercambiador-guagarcucho-lumagpamba-puente-europa-paute-gualaceo-2/>
2. INAHMI, “Anuario Meteorológico 2011”, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inahmi), 2013
3. NHI, “Technical manual for design and construction of road tunnels – Civil elements”, National Highway Institute (NHI), 2009
4. NCHRP, “Design fires in road tunnels”, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2011
5. NFPA, “NFPA 502: Standard for roads tunnels, bridges, and other limited access highways 2011”, National Fire Protection Association (NFPA), 2011
6. NFPA, <http://www.nfpa.org/press-room/reporters-guide-to-fire-and-nfpa/all-about-fire>

7. PIARC, "Fire and smoke control in road tunnels", World Road Association (PIARC), 1999
  
8. KLOTE JOHN, MILKE JAMES, TURNBULL PAUL, KASHEF AHMED, FERREIRA MICHAEL, "Handbook of smoke control engineering", American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 2012
  
9. ASHRAE, "ASHRAE Handbook – HVAC Applications (IP)", American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 2007
  
10. PIARC, "Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels", World Road Association (PIARC), 2007
  
11. ROAD AND TRANSPORTATION RESEARCH ASSOCIATION, "Regulations for the equipment and operation on road tunnels RABT 2006", 2006
  
12. CETU, "Dossier pilote des tunnels équipements - Ventilation", Centre D'études Des Tunnels (CETU), 2003
  
13. FLÄKT WOODS LIMITED, "Woods practical guide to fan engineering", Fläkt Woods Limited, 1992
  
14. ZITRÓN, "Catálogo de ventiladores de chorro", <http://www.zitron.cl/catalogos/Ventiladores%20de%20chorro.pdf>

15. THE HIGHWAYS AGENCY, "Design Manuals for Roads and Bridges – Volumen 2, Section 2, Part 9 (DMRB-BD 78/99)", The Highways Agency, 1999

16. KARAASLAN S., HEPKAYA E., YUCEL N., "CFD Simulation of Longitudinal Ventilation Systems in a Scaled Short Tunnel", TIBTD