

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**MODELO ZONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL
MOVIMIENTO DE HUMOS Y GASES CALIENTES
EN INCENDIOS: APLICACIÓN A TÚNELES DE
CARRETERA**

TESIS DOCTORAL

EMILIO MIGOYA VALOR

Ingeniero Industrial por la E.T.S.I. Industrial (U.P.M.)

2002

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**MODELO ZONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL
MOVIMIENTO DE HUMOS Y GASES CALIENTES
EN INCENDIOS: APLICACIÓN A TÚNELES DE
CARRETERA**

Autor: **EMILIO MIGOYA VALOR**

Ingeniero Industrial por la E.T.S.I. Industrial (U.P.M.)

Director: **ANTONIO CRESPO MARTÍNEZ**

Doctor Ingeniero Aeronáutico

2002

TRIBUNAL

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 22 de noviembre de 2002

Presidente:	D. Jesús Casanova Kindelán
Vocal:	D. Enrique Alarcón Álvarez
Vocal	D. Julio Hernández Rodríguez
Vocal	D. Francisco Castro Ruiz
Secretario:	D. Javier García García
Suplente:	D. Luis Manuel Mochón Castro
Suplente:	D. Pablo Gómez del Pino

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 10 de enero de 2003, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

CALIFICACIÓN: *Sobresaliente Cum Laude por Unanimidad.*

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Para mis padres, María y Eusebio, y toda la “Familia”

Para Jose y Sara-Alejandro

Para los que no están pero estuvieron o estarán

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todo el equipo del Laboratorio de Mecánica de Fluidos la acogida que me dieron hace 6 años cuando empecé con el proyecto fin de carrera en la cátedra. Entonces no me podía imaginar que después del tiempo transcurrido iba a continuar a su lado y con ganas de que dicha relación no finalizase. Sin usar orden de preferencia ninguno, gracias a Fernando, José Carlos, Javier J., Tomás, Salvador, Jorge y Agustín. M^a Jesús, con su control sobre los papeleos, su amistad y por ser la única mujer en este Laboratorio tan masculino, merece al menos un beso además del agradecimiento. Recordar también a los compañeros pre y post licenciados que han tenido que aguantar mis tardes sin hablar y malos humos leyendo artículos o pegado a la pantalla del ordenador: Arturo, Alberto, Fermín, Andrés, Antonio, Carlos, Alexander, Silvia y tantos otros “amigos” de ese gallinero que es la sala de ordenadores. No sólo dentro del departamento he tenido apoyos. Enrique Alarcón e Ignacio colaboraron en proyectos y trabajos conjuntos dentro de la Escuela. Carlos Fernández-Pello y José Torero me recibieron y enseñaron durante dos veranos en las Universidades de California en Berkeley y en la de Maryland en College Park respectivamente. Además, gracias al apoyo y confianza de empresas como INDRA, ELSAMEX y GEOCONSULT, se ha dispuesto de los medios para llevar a cabo los trabajos realizados. Especial mención merecen Javier G. y Julio sin cuya ayuda y trabajos esta tesis no podría haber finalizado. Pero sobre todo es a Antonio Crespo a quién debo mis mayores agradecimientos por marcar el camino que he seguido en estos años, por las ideas tan claras que me ha proporcionado y por su ayuda y disponibilidad en todo momento.

Sin duda alguna, todo lo logrado no habría sido posible si sólo hubiese contado con la gente de la universidad. Mi primera base y ayuda me ha llegado de la familia y amigos. La sobrevaloración en la que me tienen ha hecho que me esfuerce más si cabe para no defraudarles. Mis padres por sus desvelos, mis hermanos, María y Eusebio, con su compañía y apoyo, Jose, Ana, y Jacinto por estos años maravillosos desde que han entrado a formar parte de mi vida, mis abuelas, Isabel y Elisa, con su amor y ternura, tíos y primos, Angelita, Fernanda, Inés, Eduardo, Juan, Encarna, Juanita, Carmen, Elisa, Joaquín, Quique, Manolo, Luis, Pepe, Amaya, Nadia,... y así hasta unos 50 nombres que han estado a mi lado siempre que los he necesitado.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera**

Por último, pero no menos importante, todos aquellos que están a mi lado y con los que río y lloro por elección propia: Tere, Raquel, Consuelo, Mercedes, Cristina, Ana, Inés, Celia, Elena... Perdonarme si no os menciono a todos pero este agradecimiento está quedando muy pero que muy largo. Falta nombrar al más alejado físicamente pero no por ello anímicamente: Ángel y su deseo de huir no vencerá sobre nuestra amistad (por favor, no llores por estas palabras).

Gracias y besos a todos.

Si pudiéramos enumerar cuánto debemos a los demás, no nos quedaría mucho en propiedad

Goethe

Agradece a la llama su luz, pero no olvides el pie del candil que, constante y paciente, la sostiene en la sombra

Tagore

RESUMEN

El objetivo de la presente Tesis Doctoral es el desarrollo de un modelo que permita la simulación y análisis de situaciones accidentales con fuego dentro de túneles con ventilación longitudinal. Se trata de predecir las condiciones ambientales que se darán en el interior del túnel, principalmente desde el punto de vista de la seguridad de los usuarios y de los equipos de rescate y extinción, permitiendo tener un método del que se puedan extraer recomendaciones de actuación y planes de evacuación eficientes. Con él se puede conseguir mejorar el diseño del sistema de ventilación para que no sea insuficiente para garantizar la seguridad ni se sobredimensione. En este último caso, sería más caro pero sobre todo podría dar lugar a que se amplificase el efecto de la llama mediante una mayor aportación de oxígeno o a que se propague a obstáculos o vehículos detenidos aguas abajo. El modelo presentado permitirá controlar los humos de forma tal que se cumpla su contención aguas abajo del incendio y, ó, se preserven las rutas de escape en función de la concentración de sustancias nocivas, temperatura y visibilidad que permitan la huida. Un sistema como el que se propondrá permitiría realizar estudios paramétricos rápidos y con bajo costo para definir pautas de comportamiento que, en caso de accidente, podrían ser incorporadas al control automático o a los manuales de operación de los túneles.

El modelo presentado, sí bien esta dentro de los zonales, más simples y aplicables a casos particulares, refleja la realidad con mayor exactitud que los existentes hasta el momento. Se trata de un modelo aproximado basado en la división del túnel en dos zonas: el penacho, aguas arriba del punto en que los humos impactan con el techo, y una segunda zona de difusión, aguas abajo de dicho punto. La zona del penacho se trata, mediante un modelo unidimensional pero no unidireccional, resolviendo las ecuaciones de conservación para el caso turbulento con combustión y radiación. La difusión se estudia como un problema unidireccional incompresible, resolviendo la correspondiente ecuación de conservación de la energía. El problema así tratado puede incorporar ciertos fenómenos, como la radiación o la transmisión de calor a paredes, tratados solamente de forma indirecta por otros modelos. También, se propone un método de cálculo de la radiación incidente, desde la llama, humos y paredes, sobre una superficie que represente a una persona u objeto atrapado aguas abajo del incendio.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera

El programa zonal se ha validado con resultados experimentales procedentes de los ensayos del túnel de la carretera M-111 a su paso bajo el aeropuerto de Madrid-Barajas. Además, el modelo presentado se ha comparado con resultados numéricos obtenidos de simulaciones tridimensionales con los códigos FLUENT, PHOENICS y SOLVENT. Las comparaciones muestran una muy buena aproximación tanto con los valores experimentales como con los numéricos. No se llega a conseguir reproducir fenómenos locales pero si se alcanza una muy aceptable aproximación a los valores globales necesarios para los estudios de seguridad planteados.

En la actualidad, a la hora de realizar una simulación precisa sobre este campo, hay que acudir a códigos comerciales cerrados y usar diferentes modelos para simular flujos turbulentos con combustión, utilizando técnicas de dinámica de fluidos computacional. El empleo de estos programas puede precisar de potentes estaciones de trabajo, las cuales no están a disposición de ciertos usuarios, y consumir un gran tiempo de cálculo (varias semanas para alcanzar en un solo caso a estudio resultados aplicables). El modelo presentado se concreta en un programa que permite, con un coste computacional y de tiempo reducido, estudiar el régimen estacionario, y dar una aproximación para el transitorio, de las variables más importantes desde el punto de vista de la seguridad.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	V
ÍNDICE.....	VII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 TEMA DE LA TESIS.....	1
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	7
1.2.1 SEGURIDAD ANTE INCENDIOS EN TÚNELES.....	10
1.2.2 MODELOS DE INCENDIO.....	11
1.2.2.1 MODELOS DE CAMPO.....	12
1.2.2.1.1 MODELOS RANS.....	14
1.2.2.1.2 MODELOS LES.....	17
1.2.2.2 MODELOS ZONALES.....	19
1.2.3 INCENDIOS EN COMPARTIMENTOS.....	21
1.2.4 INCENDIOS EN TÚNELES.....	23
1.2.5 ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA.....	27
1.3 CRITERIOS DE PELIGROSIDAD.....	32
1.3.1 TEMPERATURA: CALOR TRANSMITIDO POR CONVECCIÓN.....	33
1.3.2 RADIACIÓN.....	35
1.3.3 VISIBILIDAD.....	39
1.3.4 TOXICIDAD DE CONTAMINANTES.....	42
1.3.5 TIEMPO DE ESCAPE.....	49
1.3.5.1 TIEMPO ANTES DEL COMIENZO DE LA EVACUACIÓN.....	49
1.3.5.2 VELOCIDAD DE ESCAPE.....	49
1.3.6 VELOCIDAD CRÍTICA.....	50
1.3.6.1 MODELOS BASADOS EN LA CONSERVACIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE.....	51
1.3.6.2 MODELOS BASADOS EN EL ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	53
1.4 RECOMENDACIONES.....	56
1.4.1 TEMPERATURA.....	57
1.4.2 RADIACIÓN.....	57
1.4.3 VISIBILIDAD.....	57

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera**

1.4.4 CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES.....	58
1.4.5 DAÑOS EN EL TÚNEL.....	58
1.4.6 NORMATIVA.....	58
2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	63
2.1 OBJETIVOS.....	63
2.2 HIPÓTESIS.....	65
3 MEMORIA.....	67
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	67
3.2 COMBUSTIÓN.....	71
3.2.1 COMBUSTIÓN LAMINAR.....	71
3.2.2 COMBUSTIÓN TURBULENTA.....	77
3.3 PENACHO.....	80
3.3.1 TÉRMINOS FUENTE.....	87
3.3.1.1 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO VERTICAL.....	88
3.3.1.2 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA.....	90
3.3.1.3 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA.....	93
3.3.1.4 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA VARIANZA DE LA FRACCIÓN DE MEZCLA.....	93
3.3.1.5 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.....	95
3.3.1.5.1 EMISIVIDAD TOTAL.....	95
3.3.1.5.2 EMISIVIDAD DE LA MEZCLA DE VAPOR DE AGUA CON DIÓXIDO DE CARBONO.....	97
3.3.1.5.3 EMISIVIDAD DEL HOLLÍN.....	98
3.3.1.6 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA FRACCIÓN MÁSCICA DE HOLLÍN.....	99
3.3.1.6.1 NUCLEACIÓN DEL HOLLÍN.....	100
3.3.1.6.2 CRECIMIENTO SUPERFICIAL DEL HOLLÍN.....	101
3.3.1.6.3 OXIDACIÓN DEL HOLLÍN.....	103
3.3.1.6.4 FORMACIÓN DEL ACETILENO.....	104
3.3.1.6.5 TÉRMINO FUENTE PARA LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA FRACCIÓN MÁSCICA DE HOLLÍN.....	105
3.3.1.7 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA DENSIDAD NÚMERO DE PARTÍCULAS.....	106

ÍNDICE

3.3.1.7.1 NUCLEACIÓN DE LAS PARTÍCULAS.....	106
3.3.1.7.2 CONDENSACIÓN DE LAS PARTÍCULAS.....	107
3.3.1.7.3 TÉRMINO FUENTE PARA LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA DENSIDAD NÚMERO DE PARTÍCULAS.....	107
3.3.1.8 CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES AUXILIARES.....	108
3.3.1.8.1 EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES PARA EL CHORRO NO DESARROLLADO.....	111
3.4 ZONA DE TRANSICIÓN.....	111
3.5 DIFUSIÓN.....	113
3.5.1 FLUJO PERMANENTE PARA LA DIFUSIÓN DE GASES.....	113
3.5.2 DIFUSIÓN NO ESTACIONARIA DE GASES CALIENTES.....	115
3.5.3 MALLADO EN LA DIFUSIÓN.....	119
3.6 FACTORES DE FORMA.....	120
4 PROGRAMA.....	145
4.1 INTRODUCCIÓN.....	145
4.2 ESTRUCTURA DEL UPMROTUFI (UPM ROAD TUNNEL FIRE).....	146
5 RESULTADOS PARA LA COMPARACIÓN.....	151
5.1 PROCEDIMIENTO.....	151
5.2 TÚNEL A ESTUDIO.....	152
5.3 ESTUDIO PREVIO SOBRE EL SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	160
5.4 ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	177
5.4.1 GENERALIDADES DEL EXPERIMENTO.....	177
5.4.2 SECCIONES DE MEDIDA.....	178
5.4.3 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS.....	184
5.4.4 REALIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	188
5.4.4.1 ENSAYO EN VACÍO.....	188
5.4.4.2 ENSAYO CON HUMOS.....	195
5.4.4.3 ENSAYO DE 5 MW.....	199
5.4.4.4 ENSAYO DE 10 MW.....	207
5.4.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	214
5.5 ESTUDIO NUMÉRICO.....	220
5.5.1 MODELOS MATEMÁTICOS.....	221
5.5.2 MODELOS NUMÉRICOS.....	221
5.5.2.1 PROGRAMA FLUENT.....	226
5.5.2.2 PROGRAMA PHOENICS.....	227
5.5.2.3 PROGRAMA SOLVENT.....	230

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera**

5.5.3 RESULTADOS NUMÉRICOS.....	231
5.5.3.1 PROGRAMA FLUENT.....	233
5.5.3.2 PROGRAMA PHOENICS.....	247
5.5.3.3 PROGRAMA SOLVENT.....	268
6. DISCUSIÓN.....	279
6.1 AJUSTES DEL MODELO.....	279
6.1.1 FLUENT: AJUSTES Y COMPARACIONES.....	279
6.2 COMPARACIONES.....	284
6.2.1 EXPERIMENTOS.....	284
6.2.2 PHOENICS.....	289
6.2.3 SOLVENT.....	294
6.3 OTROS RESULTADOS.....	299
6.3.1 RESULTADOS TÍPICOS DEL FRENTE DE AVANCE.....	299
6.3.2 RESULTADOS TÍPICOS DE VISIBILIDAD Y CONCENTRACIONES.....	300
6.3.3 COMPARACIÓN CON RESULTADOS OBTENIDOS EN OTRO TÚNEL..	305
7 CONCLUSIONES Y APLICACIONES.....	313
7.1 VALIDEZ DEL MODELO.....	313
7.2 ANÁLISIS DE LAS APLICACIONES.....	315
7.2.1 PLANES DE ACTUACIÓN.....	316
7.3 TRABAJOS FUTUROS.....	321
8. BIBLIOGRAFÍA.....	325
ANEXO I EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN UN TÚNEL AL CONECTARSE LA VENTILACIÓN.....	339
ANEXO II MODELOS MATEMÁTICOS GENERALES PARA ESTUDIOS NUMÉRICOS CON INCENDIOS.....	343
II.1 MODELO K-E-G.....	343
II.1.1 ESTRUCTURA DE LA LLAMA LAMINAR.....	343
II.1.2 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN.....	350
II.1.3 MODELO DE COMBUSTIÓN TURBULENTO.....	353
II.1.2 MODELO “EDDY BREAK-UP”.....	359
II.1.3 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO.....	360
ANEXO III CURRICULUM VITAE.....	363

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 – TEMA DE LA TESIS

La tesis que se presenta para su defensa versa sobre la generación y movimiento de gases y humos como consecuencia de un incendio dentro de un recinto con un tamaño y ventilación típicos de un túnel de carretera.

El tema a tratar está de la máxima actualidad ante los accidentes ocurridos en los últimos años en Europa:

- San Gotardo (sur de Suiza), 24 de octubre de 2001, 11 fallecidos, imagen 1.1. Era el túnel terrestre bidireccional más largo del mundo con 16'9 km hasta la inauguración del túnel de Laerdal (Noruega) en 2001.
- Gleinalm (sur de Alemania), 6 de agosto del 2001, 8 muertos.
- Tauern (Austria), 26 de mayo de 1999, 12 fallecidos, imagen 1.2.
- MontBlanc (entre Francia e Italia), 24 de Marzo de 1999, 39 fallecidos, imagen 1.3 y 1.4.

Los resultados de las investigaciones sobre los incendios de Tauern y MontBlanc se encuentran en los informes del *XXIst World Road Congress*, 3-9 Octubre 1999, Kuala Lumpur, Malasia.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



Imagen 1.1: Incendio de San Gotardo, 24 de octubre de 2001



Imagen 1.2: Incendio de Tauern, 26 de mayo de 1999



Imagen 1.3: Incendio de Mont Blanc, 24 de marzo de 1999



Imagen 1.4: Incendio de Mont Blanc, 24 de marzo de 1999

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

De los 120 muertos catalogados por Celada, 2001, durante la segunda mitad del siglo XX en los 38 incendios más importantes ocurridos en túneles de carretera, 70 han fallecido en los tres últimos años, tabla 1.1. Hay que hacer notar la falta de experiencia y acumulación de errores en los últimos accidentes graves. La normativa, el proyecto y la explotación son factores claves que necesitan ser revisados. Un resumen de todo ello se puede encontrar en Alarcón, 2002.

Los accidentes mencionados anteriormente son de carretera. Sin embargo, hay que hacer notar que el mayor número de muertos ocurre en túneles ferroviarios, metropolitanos o de funiculares. Los accidentes en estos tres tipos de túneles son menos frecuentes pero mucho más graves. Cabe mencionar los accidentes de Kaprun (Austria), el 13 de noviembre del 2000 con un balance de 159 muertos, imagen 1.5, el sucedido en el metro de Baku (Azerbaiján), el 28 de octubre de 1995 originando 289 fallecidos, o el ocurrido en la estación de metro londinense de Kings Cross, el 18 de noviembre de 1987 causando 31 muertos. Estos túneles pueden en general tratarse como los de carretera pero tienen características propias. Las principales diferencias, en el caso de los túneles metropolitanos, son su longitud y ramificaciones, con lo que las pautas de actuación en emergencia y sistemas de extracción de aire cambian drásticamente. Además, la ventilación no se diseña para evacuar contaminantes, ya que los vehículos que usarán el túnel no los producen al tener tracción eléctrica. En caso de accidente no quedarían atrapados otros trenes ya que al estar ocupada la vía no entraría en el túnel el siguiente convoy. Los incendios deberían ser más fáciles de definir, ya que si el accidente se produce en un convoy de pasajeros no habría carga para arder, salvo los equipajes, los cuales representan una cantidad pequeña en relación con el tren en su conjunto, mientras que si es un tren de mercancías no habría personas que pudiesen sufrir las consecuencias, exceptuando el o los conductores.

Año del accidente	Nombre del túnel	Longitud (m)	Número de tubos	Causa del incendio	Personas afectadas		
					Intoxicados	Heridos	Muertos
1949	Holland (N.Y., USA)	2,600	1	Camión con disulfuro de carbono	66		
1965	Blue Mountain (USA)	1,302	2	Camión con aceite de pescado			
1969	Moorflet (Alemania)	243	2	Rueda de un camión			
1974	Chesapeake Bay (USA)			Cisterna con gasolina	1		
1975	Guadarrama (España)	3,345	2	Camión con resina de pino			
1975	Por d'Italie (Francia)	425	2	Camión con fibras de poliéster	12		
1978	Velser (Holanda)	768	2	Camión con flores y bebidas		5	5
1979	Nihonzoka (Japón)	2,045	2	Colisión con camión con ether		3	7
1980	Kajiwara (Japón)	740	2	Camión que trasportaba pinturas			1
1980	Dakai (Japón)	459	2	Choque con un camión			5
1982	Caldecott (California, USA)	1,028	3	Colisión con cisterna de gasolina			7
1983	Precorile (Italia)	602	2	Camión con pescado			8
1983	Frejus (Francia)	12,870	1	Camión con plásticos	1		
1984	San Gotardo (Suiza)	16,321	1	Camión con plásticos			
1984	Felbertauern (Austria)	5,130	1	Avería de los frenos de un autobús			
1986	L'Armé (Francia)	1,105	1	Incendio de un coche			3
1987	Gumufens (Austria)	343	2	Camión			2
1988	Herzogber (Austria)	2,007	1	Camión			
1990	Mont Blanc (Francia/Italia)	11,600	1	Tráiler con algodón	2		
1990	Raldal (Noruega)	4,657	1	Calentamiento del motor de un camión	1		
1993	Serra Ripoli (Italia)	442		Camión con rollos de papel			4
1993	Hoden (Noruega)	1,283	1	Choque de un coche con un camión			
1994	Castellar (Francia)	570	2	Camión con residuos de papel			
1994	Huguenot (Sudáfrica)	3,914	1	Caja de cambios de un autobús	28		1
1994	San Gotardo (Suiza)	16,918	1	Rotura de una rueda de un camión			
1994	Kingsway (UK)	2,000	2	Incendio del motor de un autobús			
1995	Pfänder (Austria)	6,719	1	Camión con pan			3
1995	Hitra (noruega)	5,645	1	Incendio del motor de un camión grúa			
1996	Isola delle Femine (Italia)	148	1	Cisterna con gas		20	5
1996	Ekeberg (Noruega)	1,563	2	Autobús			
1997	San Gotardo (Suiza)	16,918	1	Incendio del motor de un autobús			
1997	San Gotardo (Suiza)	16,918	1	Incendio del motor de un camión	1		
1999	Mont Blanc (Francia/Italia)	11,600	1	Incendio de un camión con margarina			39
1999	Gleinalm (Austria)	8,320	1	Autobús			
1999	Tauern (Austria)	6,041	1	Camión con botes de pintura			12
2000	Frejus (Francia)	12,870	1	Camión con televisores			
2001	Gleinalm (Austria)	8,320	1	Colisión frontal coche-camión			8
2001	San Gotardo (Suiza)	16,322	1	Colisión frontal entre dos coches			11

Tabla 1.1: Incendios en túneles de carretera.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



Imagen 1.5: Incendio de Kaprun, 13 de noviembre del 2000

El cada vez mayor desarrollo de infraestructuras viarias y el incremento de uso del transporte por carretera y ferroviario ha hecho necesario un mayor estudio para el caso de los accidentes con fuego que pueden ocurrir en los túneles que atraviesan. Sin embargo hay que relativizar las cifras anteriores.

El incendio es el escenario más grave, con mayores consecuencias para usuarios y las instalaciones, y al mismo tiempo el menos conocido. Según la fuente consultada, existen diferencias de hasta un orden de magnitud en la frecuencia de estos sucesos. Según Haack, 1994, la relación relativa de incendios entre distintos tipos de vehículos tren/autobús/automóvil sería de 1/2'5/24. Cogiendo como ejemplo Alemania, se ha cuantificado que en la red de ferrocarril y en las carreteras se producen de 5 a 100 incendios respectivamente por cada 100 millones de kilómetros. Se ha estimado que la tasa media de este suceso está, medida en incendios por cada 100 millones de vehículos y Km, alrededor de 1-2 en vehículos ligeros, 2 en pesados con mercancías peligrosas y 8 en pesados sin mercancías peligrosas, PIARC 1999, **Permanent International Association of Road Congress**. En el 91'6 % de los incendios inventariados desde 1949 hasta el 2000, se han visto involucrados vehículos pesados que han causado el 97 % de las víctimas mortales. Las causas más frecuentes de inicio del incendio han sido choques y recalentamiento de los motores de los propios vehículos pesados.

Estadísticamente los tramos en túnel de una carretera ofrecen menos siniestralidad que los de cielo abierto. Según las estadísticas austriacas de carreteras de 1999, existen las siguientes probabilidades:

- 1 accidente por cada 1'1 millones de vehículos por kilómetro en carreteras principales.
- 1 accidente por cada 3 millones de vehículos por kilómetro en túneles bidireccionales.
- 1 accidente por cada 6 millones de vehículos por kilómetro en túneles monodireccionales.

Con estos datos, se puede afirmar que los túneles bidireccionales y monodireccionales son 3 y 6 veces más seguros respectivamente que un tramo de carretera principal a cielo abierto de igual longitud. El 34 % de las víctimas catalogadas de incendios en túneles desde 1949 hasta el 2000 han ocurrido en vías monodireccionales y el 62 % en bidireccionales, mientras que en el 4 % restante no se tiene datos suficientes. Además de la baja siniestralidad, tampoco hay que olvidar que los kilómetros totales de túneles son una ínfima parte con relación al kilometraje total de una carretera. A título de ejemplo cabe decir que ninguno de los 108 muertos en la operación Semana Santa del 2002 en España fue causado por un incendio en un túnel.

Las consecuencias dramáticas, repercusión pública en los medios de comunicación y la inquietud y sensación de inseguridad consiguientes, hacen que no se pueda soslayar el problema únicamente acudiendo a estas estadísticas.

1.2 - ESTADO DEL ARTE

La experiencia ante accidentes existente es relativamente reciente. Esto ha llevado a que existan grandes lagunas de conocimiento ante accidentes reales importantes. La PIARC, Bendelius 2002, es un ejemplo paradigmático de cómo se puede trabajar en esta materia desde un organismo independiente. Esta asociación está organizada en diferentes comités técnicos. Cuenta con uno específico dedicado al estudio de la operación de túneles de carretera, el C5. Dentro del C5 hay seis grupos de trabajo activos (WG):

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

- WG1 Operaciones. Se encarga de desarrollar manuales prácticos para la operación de túneles de carretera, incluyendo un capítulo dedicado a la seguridad y, dentro de él, apartados referentes a los incendios.
- WG2 Polución, ventilación y medio ambiente. Estudia los requerimientos de los equipos de ventilación para controlar la contaminación de los coches en situación normal de operación y los humos nocivos que surgen en situaciones accidentales de incendios.
- WG3 Factores humanos en la seguridad. Trabaja sobre medidas que puedan ayudar a corregir los defectos encontrados en la actuación de los usuarios de los túneles ante situaciones de riesgo.
- WG4 Sistemas de comunicación y seguridad. Analiza las necesidades de comunicaciones, apartaderos y nichos y salidas de emergencia.
- WG5 Mercancías peligrosas. Valora nuevos criterios que permitan a los operadores de los sistemas de transporte estimar el peligro de las mercancías transportadas.
- WG6, creado en 1992, se encarga de estudiar los problemas relacionados con el fuego y el control de los humos. Presta especial atención a estudiar accidentes ocurridos, conceptos de seguridad, resistencia de las estructuras, ventilación transversal, salidas de emergencia, equipos de seguridad específicos para incendios, gestión de la respuesta ante fuegos y la operación del sistema de ventilación en caso de emergencia.

Otros intentos para regular este campo se encuentran en las normas holandesas, 1991, con un enfoque probabilístico, normas alemanas, 1994, o las circulares francesas. En España somos tributarios de las recomendaciones internacionales. Las bases de todas las obligaciones y recomendaciones están en los comunicados de la PIARC y las normas francesas. En el apartado 1.4.6 se comenta someramente la normativa aplicable.

En cuanto a la fase de proyecto, se deja traslucir una elevada tendencia a subestimar el crecimiento del tráfico. Los túneles estrechos con circulación en doble sentido para tráfico elevado son los responsables de 86 de los 121 fallecidos reflejados en la tabla 1.1. La gravedad de las cifras y algunos errores en el diseño hacen muy importantes las labores de investigación. La solución de los refugios presurizados impuesta en Francia, se ha topado con la realidad de su fracaso en el incendio de Mont Blanc. Aquellas personas atrapadas por el incendio que decidieron usarlos sufrieron fatales consecuencias. Los refugios no fueron capaces de soportar las condiciones provocadas por el incendio y las temperaturas alcanzadas los convirtieron en

compartimentos mortales. Sin embargo, el salvamento de la gran parte de los usuarios afectados por el incendio de San Gotardo fue posible gracias a la existencia de galerías de evacuación cada 250 metros con capacidad para 70 personas. Las personas atrapadas consiguieron salir del túnel a través de ellas y llegar al de emergencia que transcurre en paralelo al principal.

El diseño de la ventilación también se ha visto influenciado por las últimas experiencias. El sistema transversal puro con boquillas de aspiración repartidas a distancias cortas del túnel de Tauern sólo fue capaz de mantener la estratificación de la capa de humos durante 15 minutos.

En la obra civil se ha comprobado como los revestimientos y techumbres no han aguantado las temperaturas alcanzadas, más de 1500 °C. Como se puede comprobar en múltiples accidentes, los proyectos no se han diseñado para soportar las dimensiones de un incendio. Un ejemplo de esto se puede observar en la imagen 1.6 correspondiente al incendio que tuvo lugar en Moorfleet (Hamburgo) en 1968.



Imagen 1.6: Moorfleet, Hamburgo, 1968.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

La explotación es otro aspecto con frecuentes fallos. Un ejemplo dramático se tuvo en el incendio de Mont Blanc. El primer fallo fue de diseño al no existir un centro de control para el túnel entero sino uno para cada tramo nacional, uno francés y otro italiano. Este último, contraviniendo el plan previsto para estas situaciones, inyectó aire fresco desde la boca italiana con lo que ayudaba a escapar a las personas atrapadas en su tramo pero dificultaba los trabajos en la parte francesa. Otro tema es si la toma de decisiones debiera ser manual o automática, pero eso es un campo que se sale del ámbito de aplicación de esta tesis. Lo que sí entra de lleno es poder predecir las condiciones que ocurrirán dentro del túnel para poder deducir cuál es el plan de actuación más idóneo.

Todo lo anterior conlleva la necesidad de disponer de herramientas que permitan dimensionar los equipos de los túneles. Se necesitan medios para calcular las condiciones alcanzadas, y así poder predecir posibles fallos en los equipamientos, estructuras y materiales, además de poder crear planes de actuación y salvamento. Para todo ello son necesarios modelos de incendio en túneles que ayuden en la solución de este problema.

1.2.1 - SEGURIDAD ANTE INCENDIOS EN TÚNELES

Resumiendo los principales puntos a tener en cuenta para la seguridad en túneles, cabe mencionar:

- Sistemas y equipamiento. Deben estar apropiadamente configurados para actuar en las adversas condiciones de un incendio dentro del túnel.
- Operación. Los operadores del túnel deben ser capaces de responder apropiadamente y a tiempo a todos los problemas que surgen ante un incendio.
- Preparación. Se deben crear planes de actuación y existir entrenamientos y ejercicios que faciliten su puesta en marcha.
- Comunicaciones. Debe existir una comunicación adecuada entre todas las personas que intervienen en una situación de emergencia.
- Comportamiento humano. Hay que entender mejor la reacción de los usuarios ante las situaciones accidentales e informar más adecuadamente sobre como deben comportarse para su seguridad y la del resto de personas.

- Ensayos, mejoras y aprendizaje. No se debe dejar de estudiar el comportamiento del fuego, sacar conclusiones de accidentes reales y experimentos, mejorar las guías reguladoras y examinar nuevas tecnologías para los túneles del futuro.

1.2.2 - MODELOS DE INCENDIO

Un incendio, definido habitualmente como la propagación incontrolada de llamas, es indiscutiblemente uno de los más complejos fenómenos que se pueden estudiar en la ciencia de la combustión. Está ligado a todos los efectos que aparecen en los flujos de reacciones químicas subsónicas. La fluidodinámica, combustión, cinética, radiación y flujo multifásico se unen para provocar un fenómeno físico y químico extremadamente complejo, ver Emmons 1971. Esta complejidad ha hecho que hasta los años 50 no se estudiase y desarrollase la investigación de los incendios como una ciencia. Quintiere, 1998, presenta una visión de cuál ha sido esta evolución. En Tieszen, 2001, se repasan las investigaciones relacionadas con la vertiente fluidomecánica del incendio, mediante técnicas experimentales y numéricas.

La seguridad ante los incendios ha crecido como ciencia especialmente en los últimos veinte años. La modelización matemática de los incendios es aún incipiente y se encuentra en un estado de rápido desarrollo dentro de la computación fluidodinámica. La complejidad de los fenómenos involucrados la convierte en un desafío desde el punto de vista matemático. Los problemas subyacentes en fluidodinámica, turbulencia y combustión no han sido aún completamente resueltos y representan un reto en si mismos. Incorporar todos esos procesos dentro de un mismo modelo es incluso un objetivo más ambicioso.

En cualquier proceso fluidodinámico, con fluido monofásico de composición fija, el sistema se puede simular con la resolución, en principio, de un sistema de cinco ecuaciones en derivadas parciales (conservación de masa, energía y las tres componentes de la cantidad de movimiento) acompañadas por las respectivas condiciones de contorno. Cuando el número de fases o componentes aumenta, el problema se hace más complejo y requiere la resolución de un mayor número de ecuaciones. En flujos turbulentos, como suele suceder en muchos casos de interés industrial, el aspecto es caótico. Las escalas espaciales y temporales, típicas de variación de las magnitudes fluidas, son mucho más pequeñas que las que impondrían las condiciones del problema. Existen además otros aspectos, como la combustión y radiación, que añaden mayor complejidad al estudio. El número de variables a almacenar y el de operaciones

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

a realizar no permiten obtener, con las herramientas disponibles, una solución directa de las ecuaciones antes mencionadas, por lo que se hace necesario buscar otras alternativas.

El modelo generalmente elegido para la modelización de flujos turbulentos de interés industrial, siendo además el más extendido hoy en día, es el llamado de dos ecuaciones. En él, al sistema de ecuaciones promediadas sólo se le añade otras dos ecuaciones que representan la evolución de dos magnitudes que caracterizan la turbulencia del fluido. A partir de estas dos magnitudes y de unos coeficientes obtenidos de la experimentación, se estima una viscosidad turbulenta o cualquier otro coeficiente de transporte turbulento. Para esas dos magnitudes, la elección más popular es la pareja denominada k - ϵ , en la que la k representa la energía cinética media de agitación turbulenta y ϵ el ritmo con que esa energía se disipa por viscosidad en las escalas más pequeñas de la turbulencia. Los resultados del método k - ϵ son bastante exactos en muchos casos, pero no funcionan bien cuando hay fuerte recirculación por ejemplo, y además no reflejan la anisotropía existente cuando se emplea la relación de proporcionalidad entre esfuerzos turbulentos y deformaciones. En estos casos, es necesario modelar cada uno de los términos de transporte turbulento por separado y es lo que habrá que utilizar en algunas partes de este proyecto, apartado 3.3.1. Para modelos matemáticos en la turbulencia Launder, B. E. y Spalding, D. B. (1972) son una de las mejores referencias, así como Patankar, S. V. (1980) para aquellas que describen la transferencia de calor con fluidos.

Existen dos aproximaciones fundamentales al problema: **modelos zonales** y **modelos de campo**.

1.2.2.1 - MODELOS DE CAMPO

Los **modelos de campo** o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) han sido los últimos en aparecer. Su desarrollo ha sido posible tanto por los avances en la física del problema como en los medios computacionales disponibles. El camino seguido por estos modelos se basa en encontrar la solución de las ecuaciones de conservación básicas que definen el fenómeno, tales como la masa, la cantidad de movimiento, la energía, la concentración de las especies y aquellas que surjan para cerrar el problema turbulento. Para ello se aplican al caso de la combustión y se estudia el campo fluido a analizar con las correspondientes condiciones de contorno. Estas ecuaciones se resuelven con la mayor resolución espacial y temporal posible para llegar a obtener las distribuciones de las variables de interés. La solución obtenida daría la

historia de la evolución del fuego incluyendo las características locales de cualquier punto del dominio.

En el estado actual de desarrollo de estos procedimientos, a la hora de realizar una simulación mediante CFD hay que desarrollar un programa propio, lo que suele ser complicado, o acudir a códigos, tales como *PHOENICS* o *FLUENT*, que emplean diferentes modelos para simular flujos turbulentos con combustión. En cualquier caso, se deben utilizar las técnicas apropiadas de dinámica de fluidos computacional. Todo ello puede hacer necesario el uso de potentes estaciones de trabajo, las cuales son caras, y consumir un gran tiempo de cálculo.

Los modelos de campo son clasificados habitualmente por la forma en que tratan la turbulencia. Este fenómeno es fundamental a la hora de intentar modelar el flujo del gas. El gas representa una unión espacial en términos de calor transferido entre áreas separadas, lo cual es crucial a la hora de la extensión del incendio. También esta fase es la encargada del transporte de los productos de combustión. Debido a la naturaleza altamente turbulenta de los flujos con flotabilidad, acoplados a las transformaciones químicas, la fase gaseosa es la parte más difícil en la modelización matemática. Los distintos modelos pueden ser clasificados en tres grandes grupos atendiendo a la turbulencia: **RANS** (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), **LES** (*Large Eddy Simulation*) y **DNS** (*Direct Numerical Simulation*). Los modelos RANS y LES son los que aparentemente pueden jugar un papel más importante en la resolución de los incendios.

Los modelos **Reynolds-stress** reemplazan las relaciones empleadas para modelar el tensor de Reynolds del método $k-\epsilon$ por ecuaciones dinámicas. Estas ecuaciones se derivan directamente de las ecuaciones de Navier-Stokes pero son bastante complicadas. En general, estos modelos deberían proporcionar un nivel más preciso de aproximación a la turbulencia que los de dos ecuaciones. Sin embargo, su éxito ha sido muy moderado y no existen muchos resultados en incendios. Este tipo de modelo se comenta con más detenimiento en el apartado 1.2.2.1.1.

Los modelos **LES**, apartado 1.2.2.1.2, se basan en que los flujos turbulentos contienen un amplio rango de escalas de longitud y tiempo. Las grandes escalas son más energéticas y originan mayor transporte de las propiedades. Por tanto, resuelven directamente esas escalas

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

grandes del movimiento y modelan las pequeñas. Estas últimas tienen un carácter más universal, por lo que su modelización debería ser más realistas

Los **DNS** son una modelización de la turbulencia que busca soluciones directas de las ecuaciones de Navier-Stokes sin necesidad de promedios o aproximaciones adicionales a las discretizaciones matemáticas. Excepto para flujos muy simples y bajos números de Reynolds, este método es prohibitivamente caro computacionalmente para ser aplicado a problemas de interés ingenieril. En el momento presente se pueden hacer simulaciones directas para flujos homogéneos con números de Reynolds del orden del millar. No se hace más hincapié en ellos ya que actualmente casi no se emplean en el campo de actuación de la presente tesis.

El acoplamiento entre la fase gas y el sólido (o líquido) combustible es un segundo nivel de clasificación. Para muchas situaciones importantes, el ritmo de quemado puede ser conocido y tratado como un dato de entrada. Obviamente, si esto no es así, ese ritmo debe ser encontrado como parte de la solución del problema. En este caso es necesario el acoplamiento entre el gas y la fase combustible.

Mayores dificultades surgen en el problema, específico de fuegos, de la extinción del incendio externamente al mismo. Un caso práctico importante se encuentra con la supresión mediante gotas de agua de las llamas de un combustible sólido. Este problema representa la resolución de las ecuaciones de conservación en las que participan tres fases: gas, líquido disperso y sólido.

1.2.2.1.1 - MODELOS RANS

En los modelos de campo tipo **RANS**, las ecuaciones básicas de Navier-Stokes son promediadas para obtener unos valores temporales medios. En flujos con grandes variaciones de densidad, tales como los de combustión, la forma más adecuada de proceder es con la media Favre (promedio con la masa). El problema del cierre de las ecuaciones promediadas implica que hay que introducir algún nuevo modelo para reproducir el tensor de Reynolds y las nuevas variables que surgen. Los cierres más comúnmente adaptados y con mayor rango de uso están basados en el concepto de viscosidad turbulenta empleando dos ecuaciones. El más representativo de todos ellos es el cierre k- ϵ . En este método aparecen dos nuevas ecuaciones

en derivadas parciales, una para la energía cinética turbulenta, k , y otra para la disipación de la energía cinética turbulenta, ϵ .

La idoneidad del modelo vendrá refrendada si consigue predecir los siguientes puntos:

- Velocidades y temperaturas.- Existen pocas dudas sobre las buenas predicciones alcanzadas en flujos asociados a llamas en escala de laboratorios con simetría axial, aunque permanecen ciertas discrepancias, Adiga 1989. Las velocidades inducidas por el fuego son razonablemente reproducidas, mientras que el campo de temperaturas es en general menos preciso. El ritmo de arrastre de gases frescos se ajusta a las mediciones, excepto para la zona del penacho en donde se sobreestima, Adiga 1990. Para el caso de incendios a gran escala la situación se complica. Las mayores discrepancias en el campo térmico se producen en la cercanía del foco de llama. Fletcher, 1994a, y Woodburn, 1996a, también han encontrado sobreestimaciones aguas abajo del fuego.
- Combustión, radiación y propagación de la llama.- Los modelos de combustión en llamas turbulentas están aún siendo desarrollados. Sin embargo grandes incertidumbres acompañan a la aplicación de estos modelos especialmente por el acoplamiento de los efectos de la turbulencia y la cinética química. La predicción de la radiación supone una dificultad adicional. Además, los experimentos de validación en este campo son aún menos numerosos que en los del campo de velocidades y temperatura o la combustión. Recientes estudios han demostrado que se puede, al menos en configuraciones básicas, predecir la propagación de la llama sobre un material sólido combustible, Jia 1997 y Yan 1996 y 1997.

Las limitaciones de estos métodos radican en:

- El más serio de los inconvenientes asociados a problemas de naturaleza turbulenta está asociado al comportamiento caótico que aparece en sistemas dinámicos complejos, tales como las ecuaciones de Navier-Stokes. Este carácter caótico surge en incendios implicando una muy fuerte sensibilidad a condiciones iniciales y de contorno. Esto representa que para dos conjuntos de situaciones diferentes, pero cercanas e indistinguibles en experimentos, la historia de propagación del incendio pueda ser

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

muy diferente. Tales situaciones pueden representar un serio obstáculo para predicciones determinísticas del incendio.

- Tratamiento simplificado de la turbulencia mediante el procedimiento de promediar en el tiempo. Tal procedimiento introduce significativos errores en la predicción del transporte turbulento en los torbellinos de las grandes escalas. Esto afecta, por ejemplo, al vértice de las llamas donde la presencia y dominio de los grandes remolinos es evidente. Por tanto, el transporte de humo por tales torbellinos puede no ser adecuadamente simulado.
- El cierre $k-\epsilon$ es pobre en ciertos tipos de flujos, por ejemplo remolinos de flujo o fuertes curvaturas. Las llamas asociadas a incendios generan normalmente turbulencia anisotrópica, lo cual está en contradicción con las suposiciones del método. Tanto las medidas como las simulaciones sugieren que la viscosidad turbulenta debe ser tratada como un tensor y no como una cantidad escalar. Por tanto las predicciones son peores en zonas de recirculación y esquinas. Se han propuesto tensores anisotrópicos, Craf 1995, pero aún no han sido suficientemente válidos.
- El promedio de Reynolds en submodelos tales como combustión, radiación y agua rociada dan problemas. Se precisan aproximaciones muy sofisticadas para la modelización de la combustión. La predicción directa de cantidades instantáneas en flujos turbulentos puede también ser importante para la estimación de la radiación ya que el calor transmitido por este método representa un fenómeno altamente no lineal. Bajo altos niveles de turbulencia, puede ser necesario tener en cuenta fluctuaciones en la temperatura y propiedades radiativas del medio. Similares problemas pueden surgir en las aplicaciones de flujos bifásicos cuando se pretende modelar el apagado mediante agua rociada. El movimiento de pequeñas partículas en el flujo está altamente influenciado por los remolinos turbulentos de distintas escalas.
- Incluso en ausencia de comportamiento caótico, la sensibilidad de ciertos parámetros puede imponer limitaciones de índole práctica en el uso de los modelos de campo. El deseo de exactitud puede requerir un gran conjunto de datos de entrada. Por ejemplo, el uso de variedad de materiales combustibles podría requerir un detallado conocimiento de sus propiedades termofísicas, al mismo tiempo que los parámetros cinéticos asociados a la pirólisis y a la combustión.
- Complejidad de validación por el gran número de medidas necesarias para conseguirlo. La mayoría de los experimentos no se producen con vista a validar este tipo de modelos por lo que los resultados obtenidos no son fácilmente aplicables.

Tampoco existen bases de datos públicas sistematizadas que consigan cubrir estas lagunas. Existen ciertas comparaciones con modelos zonales en recintos con múltiples habitaciones, Luo 1994 y 1997. Para ello se promediaron los resultados del CFD espacialmente. Las medidas y predicciones del modelo zonal y el CFD eran bastante cercanas en la capa superior de la habitación donde existía el incendio y en las adyacentes. Para las capas inferiores también se repetía esa concordancia excepto para la habitación del fuego donde ambos modelos discrepaban con las medidas. Se hizo también el análisis de las concentraciones de O_2 , CO y CO_2 . En la capa superior de la habitación de origen del incendio, los resultados de los dos modelos fueron correctos. Sin embargo, las concentraciones de CO y CO_2 fueron subestimadas. En las habitaciones colindantes los resultados fueron correctos. Hay que hacer notar que los datos experimentales en ellas eran muy limitados. De todo lo anterior se puede deducir que, para el caso estudiado y presumiblemente donde los modelos de campo y los CFD se pueden aplicar, existe un razonable parecido entre los resultados obtenidos por ambos. Sin embargo hay que indicar que los modelos zonales no pueden ser siempre aplicados y los CFD proporcionan un mayor nivel de exactitud de resultados.

1.2.2.1.2 - MODELOS LES

Los modelos de campo tipo **LES** representan un concepto relativamente nuevo en aplicaciones de ingeniería fluidodinámica. Comenzaron aproximadamente con los trabajos de Lilly, 1966, y Deardorff, 1970. Desde entonces ha habido un considerable éxito en su uso para flujos geofísicos y de ingeniería, destacando su aplicación en meteorología. En cuanto a su uso en los modelos de incendios, aunque se han llevado a cabo distintos intentos para su empleo durante los últimos 20 años, es aún necesaria una substancial investigación y validación de esta aproximación. Recientes estudios han demostrado unos prometedores resultados con lo que se prevén próximos trabajos en este campo. Consiguen niveles de exactitud cercanos a los buscados por los DNS resolviendo directamente las escalas grandes del movimiento mientras que se modelan las pequeñas. Esta forma de actuar se basa en que los flujos turbulentos contienen un amplio rango de escalas de longitudes y tiempos, todos las cuales no pueden ser resueltas en la mayoría de los casos prácticos importantes. LES hace uso del hecho de que las grandes escalas de torbellinos son generalmente más energéticas que las pequeñas y que ellas producen muchos mayores efectos de transporte en las propiedades. Por tanto se busca resolver exactamente estas escalas y encontrar un modelo para las pequeñas. Los pequeños remolinos

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

contienen sólo pequeñas porciones de la energía cinética turbulenta y por tanto se emplea en su resolución menos exactitud. Además las pequeñas escalas tienen un carácter más universal, con lo que su modelización debería ser más realista. Los distintos enfoques de los LES se diferencian en que método utilizan para modelar las pequeñas escalas. Entre los más ampliamente utilizados, se encuentra el propuesto por Smagorinsky, 1963, complementado con el método dinámico, Meneveau 2000.

Conforme los modelos de campo vayan penetrando en la práctica de seguridad de incendios, se espera que la atención de la investigación teórica cambie gradualmente de los RANS a los LES. Estos últimos progresivamente van siendo más abordables con la mejora continua en la capacidad computacional. Esto implica que probablemente no sea necesario introducir simplificaciones en las ecuaciones de los LES, solamente una ligera aproximación. Las mayores dificultades hasta el momento son:

- Modelos de combustión.- Ya se han incorporado preliminarmente (Baum, 1990, Mell 1996). Estos problemas surgen de la rapidez de las reacciones químicas y la caracterización de la llama en sí.
- Predicción de la radiación.- En vías de implementación. Una exacta predicción de la radiación es fundamental para el acoplamiento con la fase sólida, lo cual es esencial para el crecimiento de la llama ya que el calor del fuego retroalimenta la pirólisis del combustible sólido.
- Formación de hollín y contaminantes.- En fase de solución. En los estudios particulares de túneles es fundamental su conocimiento exacto para saber si se cumplen las condiciones necesarias que permitan la evacuación de las personas atrapadas.
- Incorporación de aplicaciones de dos fases, extinción.- Es necesario un modelo apropiado para el movimiento de partículas y evaporación dentro de la subescala del LES para simular los procesos de apagado mediante extintores, rociadores,...

Como ejemplo de código que emplea el LES se puede mencionar el FDS, *Fire Dynamics Simulator*, Se trata de un programa desarrollado por McGrattan, 2000, que emplea una forma aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para bajo número de Mach. La aproximación origina el filtrado de ondas acústicas pero permite altas variaciones en la temperatura y densidad. Esto da a las ecuaciones un carácter elíptico, consistente con bajas

velocidades, para los procesos convectivos térmicos. Las ecuaciones resueltas son la de conservación de la masa, especies, momento y de Poisson para la presión total. El término fuente de la ecuación de conservación de la energía ha sido incorporado dentro de la divergencia de la velocidad, apareciendo en la ecuación de conservación de la masa. La temperatura se deduce a partir de la densidad y las presiones calculadas vía ecuación de estado.

1.2.2.2 - MODELOS ZONALES.

El coste material y de tiempo hacen que aún no sean descartables otros procedimientos a la hora del estudio de incendios. En realidad, Los modelos matemáticos en esta rama comenzaron a través de soluciones empíricas y analíticas. Su evolución llevó al desarrollo de los **modelos zonales**, que representan la primera generación de modelos para incendios. Su ventaja radica en su simplicidad que lleva a poder introducir de forma relativamente fácil ciertos fenómenos y la disminución de requerimientos de hardware y en tiempo para la solución de las ecuaciones involucradas.

Estos modelos, como su propio nombre indica, intentan dividir la región de interés en diferentes zonas, cada una de las cuales puede ser descrita por un conjunto de parámetros y leyes semiempíricas. Los parámetros representan cantidades físicas, por ejemplo temperatura, concentraciones,..., promediadas sobre cada zona. Las condiciones de equilibrio en los contornos entre las diferentes regiones, junto con las leyes globales de conservación, permiten obtener un sistema de ecuaciones que determinan las magnitudes de interés. Los modelos zonales llevan un largo periodo de desarrollo y forman la base de multitud de cálculos sobre fuegos en el ámbito ingenieril.

Algunas características que diferencian el rango de validez y utilidad de los modelos zonales y de campo son:

- Por definición, los modelos zonales proporcionan información limitada sobre el escenario del incendio. Las variables de interés están promediadas sobre zonas con escalas espaciales significativas con lo cual la resolución espacial es pequeña e importantes efectos locales no pueden ser detectados. Por otra parte los modelos de campo alcanzan altas resoluciones espaciales y su capacidad para proporcionar tales resoluciones se incrementa constantemente.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

- Una gran desventaja de los modelos zonales es que necesitan a priori un conocimiento de la estructura del flujo. Este conocimiento debería ser obtenido o mediante experimentación o por consideraciones teóricas previas. Esto significa que la validez de las hipótesis de partida debería ser confirmada en cada caso particular. Por lo tanto habrá muchas situaciones en que no se pueda separar el modelo zonal correspondiente de estudios experimentales. En la aproximación de los modelos de campo, este problema es superado recurriendo a los principios fundamentales de la mecánica de fluidos y la termodinámica que son verdades universales independientes del sistema y caso que consideremos. Por tanto, los modelos de campo son teóricamente aplicables a cualquier situación, con el cambio de la estructura del flujo y las condiciones del incendio.
- Hay muchos problemas que no son tratables por los modelos zonales. Por ejemplo, durante el crecimiento rápido incontrolado del fuego no da tiempo a que las distintas zonas se reestructuren y desarrollen alcanzando nuevas condiciones en que se distingan unos volúmenes de otros. La diferenciación entre varias zonas puede ser borrosa lo que lleva a cuestionar el mismo concepto de modelo zonal.
- En la actualidad los modelos de campo deben incluir algunas suposiciones que cubran los huecos en la comprensión de la turbulencia, cinética, radiación y otros procesos físicos importantes. Un diseño y aplicación cuidadoso e inteligente del modelo de campo debería dar una información más completa que uno zonal equivalente. Esto es especialmente válido en geometrías complejas donde los CFD son la única aproximación posible.
- El gran inconveniente de los modelos de campo es su complejidad. Algunos puntos importantes a tener en cuenta en ellos serían:
 - Hipótesis supuestas.
 - Aproximación empleada de las ecuaciones de conservación.
 - Condiciones de contorno a imponer.
 - Configuración a representar.
 - Mallado a emplear.
 - Método de cálculo.
 - Interpretación de los resultados.
 - El usuario de estos métodos debe ser alguien con muchos conocimientos físicos que le permitan en cada caso las limitaciones de las hipótesis y aproximaciones empleadas.

En los modelos zonales la desventaja que significa no abordar la física del problema en toda su profundidad, se vuelve ventaja a la hora de acudir a principios sencillos y experimentales que permiten un manejo más simple y fiable. Las limitaciones se conocen desde el principio y difícilmente se verán incrementadas por un manejo incorrecto.

- El segundo gran inconveniente de los modelos de campo frente a los zonales es el tiempo de cálculo que conllevan y la potencia computacional que precisan. A la hora del empleo práctico de ellos hay que estudiar muy bien los casos a tratar porque si se eligen incorrectamente se puede perder semanas de trabajo. Se trata de una herramienta poco útil desde el punto de vista ingenieril práctico si no se encuentra particularizada a priori para la configuración que estemos tratando.

1.2.3 - INCENDIOS EN COMPARTIMENTOS

Con respecto a los incendios en compartimentos existen múltiples referencias en que se ofrece un amplio panorama de la situación actual (Bilger 1994, Di Blasi 1993, Cox 1995, Fernández Pello 1995, Moss 1995). Un clásico en la materia es el libro de Cox (1995) en que se revisan los modelos zonales y de campo. El rápido desarrollo de los CFD hace precisas frecuentes revisiones del estado del arte. Una visión centrada en los últimos avances en estos últimos modelos se encuentra en Novozhilov, 2001, donde se enfatiza especialmente en la incorporación de la combustión de la fase sólida en los CFD, la propagación de la llama, la modelización de la extinción y la incorporación de los modelos LES (*Large Eddy Simulations*) y RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) en los estudios de incendio.

Para los modelos zonales, existe una abundantísima literatura relacionada con edificios. Estos trabajos los inicio el profesor Emmons, H. (1978) de la Universidad de Harvard y fueron seguidos por Mitler, H. E. (1987) de la National Bureau Standards. En la actualidad más de 15 organismos de investigación de diferentes países disponen de códigos zonales, un resumen se puede encontrar en el capítulo sexto de *Combustion Fundamentals of Fire: Compartment Fire Modeling*, Cox, G. (1995). Uno de ellos, sobre incendios confinados en habitaciones, es el realizado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la E.T.S.I. Industriales para la fundación MAPFRE, Crespo y Hernández 1986 y 1988.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

A la hora de estudiar un incendio en un recinto sin medios para controlarlo, habría que considerar las siguientes etapas:

- **Ignición.**- Puede ser causada por un medio externo, como una llama o una chispa, o espontánea, debida a la acumulación de combustible caliente. Una vez que comienza a arder, parte del combustible sólido se pirolyza, liberando volátiles gaseosos que alimentan el incendio al mezclarse con el aire.
- **Crecimiento.**- El fuego crece a un ritmo dependiente del tipo de combustible, aporte de oxígeno, configuración del compartimiento y otros factores. El calentamiento de superficies sólidas contiguas puede incrementar la temperatura de estas y originar que ellas mismas ardan. Durante esta fase, los gases calientes producidos ascienden debido a la flotabilidad formándose el penacho del fuego y acumulándose debajo del techo creando una capa de humos calientes en la parte superior del recinto.
- **Flashover.**- Es una transición rápida desde la etapa de crecimiento a la de fuego totalmente desarrollado. Produce que la totalidad de la superficie del material combustible esté en llamas. Representa una inestabilidad térmica causada principalmente por la gran cantidad de calor por radiación que llega a una superficie combustible del recinto desde la capa de humos calientes o desde la llama.
- **Fuego completamente desarrollado.**- Durante esta etapa el ritmo de calor liberado es máximo y el desarrollo del fuego está limitado por el aporte de oxígeno. La temperatura media en el compartimiento será muy alta, en el rango de 700 a 1200 °C.
- **Decaimiento.**- Al irse quemando la fuente combustible se apaga, el ritmo de calor liberado va disminuyendo.

Desde un punto de vista práctico general los modelos de incendios en recintos cerrados intentan buscar las siguientes características principales del fenómeno:

- **Ignición y ritmo de quemado de diferentes materiales sólidos combustibles.**- Se trataría de simular la transmisión de calor y los procesos de pirólisis de los materiales sólidos susceptibles de arder.

En algunas situaciones hay que modelar el *smoldering* (incendio sin llama). Esta situación se observa frecuentemente en compartimentos cerrados donde existe falta de oxígeno. Debido a su baja intensidad puede durar un extenso periodo de tiempo. El

peligro de estos casos se debe a que si el recinto se ventila de forma brusca puede producirse una propagación violenta del incendio.

- **Crecimiento y propagación del incendio.**- El rápido e impredecible crecimiento del fuego lleva a un ritmo de acumulación de productos de combustión (humo y gases tóxicos) los cuales hacen imposibles las rutas de escape e impedirán las labores contraincendios.
- **Generación de humos, productos tóxicos y radiación.**- La producción de contaminantes es una de las mayores dificultades en la combustión de flujos en ambientes turbulentos, mientras que su transporte tiene que ver con la fluidomecánica del incendio. La radiación es importante cerca de la llama y la capa de humos caliente acumulada.
- **Extinción.**- El desarrollo de las estrategias de apagado del incendio es una parte importante de las investigaciones. Los modelos matemáticos pueden ayudar a un diseño inteligente de los medios de apagado: rociadores,... Estos modelos son difíciles ya que hay que conjugar las tradicionales dificultades de turbulencia y reacción química con condiciones de llama cerca de los límites de extinción y la presencia de una tercera fase, por ejemplo las gotas de agua.
- **Impacto del fuego en las estructuras.**- Bajo intensas condiciones de incendio, las estructuras sólidas pueden fallar. Valorar si una estructura puede aguantar un fuego es importante tanto desde el punto de vista de la seguridad de las personas como por el daño a las instalaciones. Por tanto, muchas investigaciones se han centrado en el cálculo del flujo de calor que llega a las estructuras sólidas desde el incendio. Con este dato se puede estudiar el comportamiento de los diferentes materiales ante las condiciones alcanzadas.

1.2.4 - INCENDIOS EN TÚNELES

En túneles, el número de estudios teóricos, métodos numéricos empleados para su modelización y experimentos realizados en instalaciones reales, va progresivamente aumentando. Un ejemplo sobre un estudio de un accidente real, ocurrido el 27 de Febrero de 1994 en el túnel Huguenot, el más largo (4 Km) de los existentes en la red vial sudafricana, y los problemas y deficiencias detectados se puede encontrar en Gray y Varkevisser, 1994, informe llevado a cabo por el *Department of Transport: Roads South Africa*. Para ejemplo de estudios sobre carreteras y análisis de tráfico en general, se puede acudir a Alarcón, 2002, Del

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Rey, 2000, Mannering, 1990, o a la documentación de la PIARC. El tema de la ventilación de túneles y la propagación de humos y gases en incendios también ha sido ampliamente estudiado. Del primero se puede mencionar Gillard, 1997, o Mochón, 1997, y del segundo Crespo y otros, 1998, y García y otros, 1999.

Si bien es cierto que los datos experimentales en túneles reales son escasos, está aumentando considerablemente el interés en este tema. Se han producido importantes series de ensayos con pruebas en diferentes condiciones en túneles fuera de servicio y acondicionados para las mismas. Además, actualmente existe la tendencia a ensayar in situ antes de poner en servicio nuevos túneles. Referencias sobre el tema se pueden encontrar en Mochón y otros, 1994, y Crespo y otros, 1999.

Se emplean dos tipos de ensayos: con humos fríos y con incendio. Los primeros pretenden, mediante botes de humo abiertos a un cierto ritmo, reproducir el comportamiento de los gases y ver como evolucionan según la ventilación existente. La falta de foco térmico similar a un incendio real, hace que sólo sirvan para ver la cinemática de los humos pero no predigan la estratificación real de los productos de combustión calientes, y por tanto menos densos, que intentarán ocupar las zonas superiores del túnel. Los fuegos reales dan una idea más exacta de lo que ocurre en un accidente. En diferentes países se han realizado estos ensayos. En España también se han realizado y ejemplos de ellos son los llevados a cabo en **El Padrún**, Hacar y otros 1993, o en **Lorca**, Crespo y otros 1998. En el primero de ellos se quemaron varios coches y en el segundo una bandeja de heptano que simulaba un incendio de 1'5 MW, similar a la potencia generada al arder una motocicleta. La presente tesis va a emplear a efectos de validación datos obtenidos en un nuevo ensayo llevado a cabo en la M-111, carretera que une Barajas y Paracuellos, a su paso por debajo del aeropuerto de Madrid-Barajas. Los informes solicitados por la empresa INDRA sobre estos trabajos se pueden encontrar en Crespo y otros 2002, y en futuras publicaciones.

A escala internacional existen dos series de ensayos destacables en el Memorial Túnel y en Repparfjord, además de distintos pruebas de menor escala. Una base de datos de estas últimas pruebas se puede encontrar en Steckler 1982a, 1982b y 1984.

El MTFVTP, **Memorial Túnel FIRE Ventilation Test Program**, fue una serie de ensayos a escala real realizados para conseguir datos que permitieran conocer y diseñar los

sistemas de ventilación. La idea original fue del comité técnico de ASHRAE, **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, encargado de las infraestructuras cerradas asociadas con vehículos. A principios de los 80 se vio claramente que existía una necesidad de comprender mejor las incertidumbres asociadas con los sistemas de ventilación para controlar de forma efectiva los humos y el calor generados durante incendios. A finales de los 80 se llevaron a cabo los ensayos en el Memorial Túnel, un túnel de carretera abandonado en West Virginia que fue modificado y reacondicionado con un nuevo equipo de ventilación e instrumentación para evaluar los sistemas desarrollados durante los ensayos. Un total de 98 experimentos fueron llevados a cabo con potencias comprendidas entre 10 y 100 MW. Los sistemas de ventilación ensayados incluyeron distintos tipos de ventilación transversal, longitudinal y natural. Además se calibraron expresiones para evitar la recirculación de humos y se estableció una base de datos que sirviese para contrastar los modelos numéricos, Bechtel 1995.

En Europa también se han realizado experimentos de este tipo. La Unión Europea promovió a través del programa EUREKA una serie de ensayos en un túnel noruego abandonado en Repparfjord a 47 km de Hammerfest. Se obtuvo una amplia variedad de datos que fueron la base para la realización de múltiples estudios de interés. Existían los inconvenientes de las condiciones extremas de temperatura y humedad en que se realizaron los experimentos y de las características muy particulares del túnel (con anterioridad a los ensayos, el túnel era una galería de una mina de cobre con la consiguiente rugosidad de las paredes). Se llevaron a cabo 20 experimentos a escala real entre los años 1990 y 1992. Se hicieron arder diversos vehículos, con energías caloríficas liberadas entre 5 y 100 GJ, y distintas velocidades de ventilación. Se estudiaron incendios con heptano, la propagación y desarrollo de las temperaturas, el cálculo y medición del calor liberado, los humos y gases calientes peligrosos, la capa libre de humos, el empleo de espacios seguros dentro de túneles,... Los resultados se pueden encontrar en los Proceedings que surgieron de International Conference on Fires in Tunnels, Borås Suecia, 10 y 11 de octubre de 1994, Ivarsson 1994

Como ya se indicó antes, los modelos unidimensionales son apropiados para realizar estudios en un ámbito global. Suponen que toda la sección transversal se encuentra en las mismas condiciones, lo que no es real en las proximidades del foco. Por otra parte, los resultados que dan son conservadores y su bajo coste operacional permite realizar multitud de estudios. Ejemplos de estos modelos se pueden encontrar en Retana, 1999 y Alarcón, 1997.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Los tridimensionales y los zonales permiten realizar estudios locales, consiguen describir los intercambios de masa y energía entre puntos o entre zonas. La diferencia entre ambos radica en que los primeros estudian todo el campo fluido punto a punto mientras que los segundos asumen que existen zonas más o menos extensas con propiedades iguales y que por tanto se pueden agrupar. Los tridimensionales consiguen mayor exactitud y análisis de variables, mientras que los zonales no requieren un elevado coste operacional con lo cual se amplían sus posibilidades de empleo. Dentro de los zonales se encuentran los trabajos de Daish, 1997, y Crespo, 1997.

Modelos matemáticos como el JASMINE (Kumar y Cox, 1985) han sido usados para el estudio de las condiciones alcanzadas ante una cierta ventilación existente, situación fundamental para saber las consecuencias del accidente. La modelización mediante computación fluidodinámica (CFD) es el camino seguido prioritariamente en los estudios realizados. Los CFD permiten analizar la sensibilidad de la simulación ante diferentes parámetros de entrada: potencia del incendio, ventilación, transferencia de calor por radiación o por convección natural, rugosidad de las paredes, modelos de turbulencia, situación de las condiciones de contorno aguas abajo del incendio,... Un ejemplo ha sido el FLOW3D, desarrollado por C.F.D.S., AEA Technology, Harwell Laboratory, UK (Woodburn y Britter 1996b). Estos trabajos han demostrado la validez de esta vía de aproximación al problema de la seguridad ante incendios. El papel que representa su uso en la investigación de incendios está aumentando significativamente conforme los modelos se hacen más robustos y sofisticados y a medida que la validación lleva a confiar más en ellos. Los CFD pueden ser considerados una herramienta fundamental en el desarrollo de los modelos de incendio y pueden proveer de las bases necesarias a la hora de buscar unas regulaciones que intenten prevenir los daños que ocasionan este fenómeno. Las bases del CFD se pueden encontrar en Fletcher (1991). Un ejemplo de su aplicación es García y otros, 2001, en el que se presentan los trabajos realizados para AENA sobre el estudio del túnel que unirá las nuevas terminales del aeropuerto de Madrid-Barajas.

Bandeis y Mergman (1983) han llevado a cabo simulaciones bidimensionales en túneles con ventilación forzada bajo distintos esquemas de ventilación. Simcox et al. (1989) investigaron el efecto de variaciones en la tasa de liberación del calor del incendio, del cambio en el tamaño del área del mismo y de las condiciones de contorno existentes: ventilación, temperatura exterior,... Kumar y Cox (1985) con un modelo tridimensional han analizado la

influencia de la rugosidad de la pared, la transmisión de calor a la misma y los efectos de la radiación. Apte, Green y Kent (1991) y Fletcher et al (1994b) estudiaron los efectos de variaciones de la velocidad de ventilación y distintos tamaños de bandejas de combustible. Muchos de estos trabajos incluyen experimentos para validar los distintos procedimientos empleados. Como se ve, el número de factores a tener en cuenta es considerable. Las limitaciones a que lleva consigo tal complejidad y las precauciones que se tienen que tener con los resultados se pueden encontrar en Casalé (1997).

A pesar de los estudios realizados existen muy pocos programas comerciales que intenten modelizar con carácter general los incendios en túneles. Uno de ellos se llama *Programme de Simulation Numerique d'un Incendie en Tunnel "TUFISI"* creado por BG Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA. Su objetivo prioritario es su aplicación en análisis de riesgo según las condiciones letales a que dé lugar un incendio. El SOLVENT es un programa basado en CFD que simula el flujo de fluidos y transporte de calor y humos en túneles. Fue creado especialmente para el análisis de la ventilación de túneles durante la aplicación de la fase IV de los trabajos llevados a cabo durante los experimentos del Memorial Túnel mencionado anteriormente. Se hablará de él más extensamente en el apartado 5.4.2.3.

Los modelos zonales han sido empleados en el diseño de la seguridad de incendios durante un largo periodo de tiempo con un éxito relativo en el ámbito de los túneles. Sin embargo, a pesar de los niveles de sofisticación alcanzados, en el momento presente estas aproximaciones sufren algunos inconvenientes. Con la presente tesis se presentará un programa alternativo que tenga en cuenta el mayor número de parámetros influyentes en las situaciones a estudio. Se pretenderá que sea compatible con los menores requerimientos informáticos y la mayor rapidez de cálculo posibles.

1.2.5 - ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA

En esta tesis se van a comparar los resultados del modelo con experimentos. Por tanto, es necesario dar algún método para poder predecir cual es la potencia del ensayo. Dado un tipo de combustible y unas condiciones ambientales, la potencia del incendio de una bandeja de un fuel líquido será función del tamaño de la superficie libre del carburante expuesto a la llama. Es decir, definiendo el diámetro de la bandeja se fija la potencia del experimento.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

MacCaffrey, 1988, ha estimado la relación entre la potencia adimensional, Q^* , con relación al tamaño de la combustión (diámetro del foco del incendio). En la ecuación 1.1 se define Q^* , siendo u_g y ρ_g la velocidad y densidad inicial del combustible vaporizado, ΔH el poder calorífico del combustible equivalente al incendio, D el diámetro del fuego y c_p , T_a y ρ_a el calor específico, la temperatura y la densidad del aire ambiente respectivamente. El número de Froude, Fr , ecuación 1.2, define el tipo de incendio. Un valor alto corresponde a los *jet fires*, en los cuales la velocidad impuesta es muy elevada, chorros de combustible, y la gravedad pierde importancia. Los incendios con Fr bajo se denominan *pool fires*. Este caso son llamas naturales donde la velocidad de combustible vaporizado esta dada por la temperatura de ebullición, por tanto la flotabilidad es el fenómeno fundamental.

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a c_p T_a \sqrt{g} D^5} = \frac{\Delta H \rho_g u_g \pi D^2 / 4}{\rho_a c_p T_a \sqrt{g} D^5} \quad (1.1)$$

$$Fr = \frac{u_g^2}{Dg} \quad (1.2)$$

El paso entre el tamaño del incendio y la potencia adimensional se puede hacer mediante relaciones empíricas y algebraicas. McCaffrey, 1988, sugiere la figura 1.1 para hacer esta conversión en el caso de *pool fires*. Dado el diámetro de la bandeja D , de la figura 1.1 se obtendría, para cada tipo de combustible, Q^* y empleando la ecuación 1.1 se calcularía \dot{Q} .

Otra posibilidad para conocer la relación entre el tamaño físico del incendio y su potencia se puede obtener directamente teniendo en cuenta que para *pool fires* el calor total liberado para la reacción completa del combustible se expresa mediante:

$$\dot{Q}_{teórica} = \rho_g u_g \Delta H \pi \frac{D^2}{4} = \dot{m} \Delta H \pi \frac{D^2}{4} \quad (1.3)$$

donde \dot{m} es el flujo másico superficial de combustible por unidad de tiempo, $\rho_g \cdot u_g$. En esta ecuación es preciso estimar el ritmo de quemado para evaluar el tiempo de combustión para una cantidad dada de combustible. Sobre la base de las relaciones empíricas propuestas por Burgess, 1961, se puede calcular dicho valor en función del diámetro de la bandeja de fuel:

$$m = m_{\infty} \left(1 - e^{-k\beta D} \right) \quad (1.4)$$

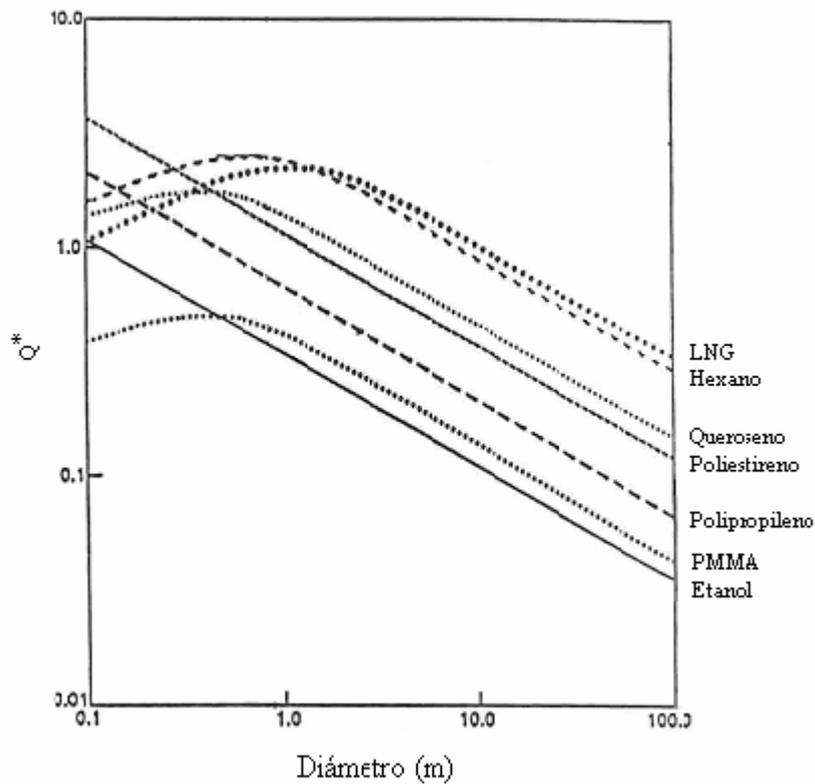


Figura 1.1: Estimación de Q^* para distintos combustibles en *pool fires*.

En la ecuación 1.4, m_{∞} es el ritmo de quemado para un fuego con bandeja de diámetro infinita, k es el coeficiente de emisión por radiación y β es la corrección de la longitud media del rayo.

A título de ejemplo y ver la idoneidad de estas teorías, se han empleado los dos procedimientos de cálculo anteriores, MacCaffrey, 1988, y Burgess, 1961, para los ensayos realizados en los Túneles de la Autovía del Mediterráneo a su paso por la localidad murciana de Lorca, Crespo y otros 1998. Se pretendía modelar un incendio de 1'5 MW empleando una

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

bandeja de heptano. El poder calorífico de dicho combustible es $4.5 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$ mientras que su densidad en fase líquida vale 680 kg/m^3 . El valor de m_∞ para heptano se puede obtener de Koseki, 1989. Se deduce analizando el comportamiento asintótico de sus datos, lo cual lleva a un valor de $0.0784 \text{ kg/m}^2\text{s}$. El término $k\beta$ vale 0.8 m^{-1} en comparación con el rango de datos obtenidos por Babrauskas, 1983, de $1.3 \pm 0.55 \text{ m}^{-1}$. Para poder llevar a cabo el experimento a la potencia deseada hay que estimar el diámetro del recipiente.

Empleando la adimensionalización de MacCaffrey, se trata de encontrar la intersección de la curva :

$$Q^* = \frac{1500000 W}{1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 1004.5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} 300\text{K} \sqrt{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} D(m)^5}} = \frac{1.3}{D(m)^{5/2}} \quad (1.5)$$

con la figura 1.1. En dicha gráfica no aparece el heptano, por lo que se usó la curva del hexano, el combustible más parecido al del experimento entre aquellos de los que se tienen datos. El resultado se puede observar en la figura 1.2. El valor solución es 0.77 m de diámetro para la bandeja de combustible.

Empleando la relación empírica de Burgess, deberíamos resolver la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = 1.5 \text{ MW} = 0.0784 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \left(1 - e^{-0.8 \text{ m}^{-1} D(m)}\right) \pi \frac{D(m)^2}{4} 45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (1.6)$$

$$1.5 = 2.771 \left(1 - e^{-0.8 D(m)}\right) D(m)^2 \quad (1.7)$$

La ecuación 1.7 es implícita para el diámetro y su solución vale 0.99 m .

Debido a que el método de MacCaffrey no dispone de curvas para el heptano y a la incertidumbre de los coeficientes de Burgess, se optó por un diámetro intermedio de 0.87 m .

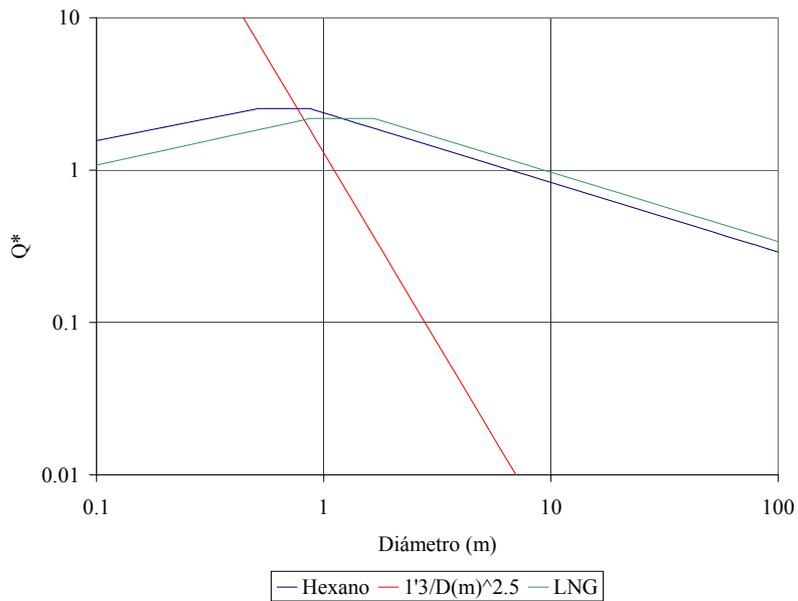


Figura 1.2: Búsqueda del diámetro mediante la Adimensionalización de MacCaffrey

Por tanto, para un ensayo a 300K que durase 20 minutos se precisarían 58'8 litros de heptano en una bandeja de 0'87m, la altura del líquido combustible sería 9'6 cm, para tener una potencia media de 1'5MW que consumiría el fuel líquido a 4'8 mm/min.

Estas previsiones se comprobaron con un ensayo de 25 litros de heptano que tardaron 8 minutos y 50 segundos en arder en una bandeja del tamaño previsto, lo cual representa una potencia real de:

$$Q_{real} = \frac{\Delta H \rho_{liquido} V_{liquido} \pi \frac{D^2}{4}}{tiempo consumo} = 1'44 MW \quad (1.8)$$

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

El hecho de resultar este dato menor que el calculado teóricamente se debe a que al inicio y al final la llama no está completamente desarrollada. Por tanto en esos instantes la potencia es menor que la media. Como se ve la predicción es muy próxima a la realidad.

1.3 - CRITERIOS DE PELIGROSIDAD

Los objetivos de las normas reguladoras se basan en distintos tipos de criterios que pretenden asegurar que los usuarios del túnel y los bomberos que intervienen en la extinción de un accidente con fuego puedan escapar con un margen de seguridad. Al mismo tiempo, se busca minimizar los daños en la estructura del túnel y sus equipamientos. A la hora de juzgar si las personas pueden escapar de forma segura se necesitarán datos sobre la velocidad de escape y el tiempo entre que el fuego empieza y el momento de inicio de la evacuación: tiempo de detección, alerta, reacción y abandono del vehículo. Por tanto, cuando se pretende evaluar los riesgos que aparecen a causa de un incendio hay que tener presente lo siguiente:

- Temperatura alcanzada.
- Calor transmitido por radiación.
- Visibilidad.
- Concentración de O_2 y de especies tóxicas y, o, corrosivas.
- Tiempos de escape.
- Velocidad crítica: aquella que contiene los humos en el sentido de la circulación.

Un ejemplo de la combinación de estos efectos lo podemos encontrar en la figura 1.3 (Babrauskas, 1979). Dicha figura representa la evolución con el tiempo de diversos parámetros y los niveles aceptables de radiación y visibilidad de los humos que se originan en una habitación de 29 m^3 cuando se quema una silla con estructura de poliestireno y asiento y recubrimiento de poliuretano. Alrededor de los 6 minutos desde que comienza el fuego, se alcanza el máximo de las variables. Sin embargo, los límites admisibles se producen mucho antes de ese momento.

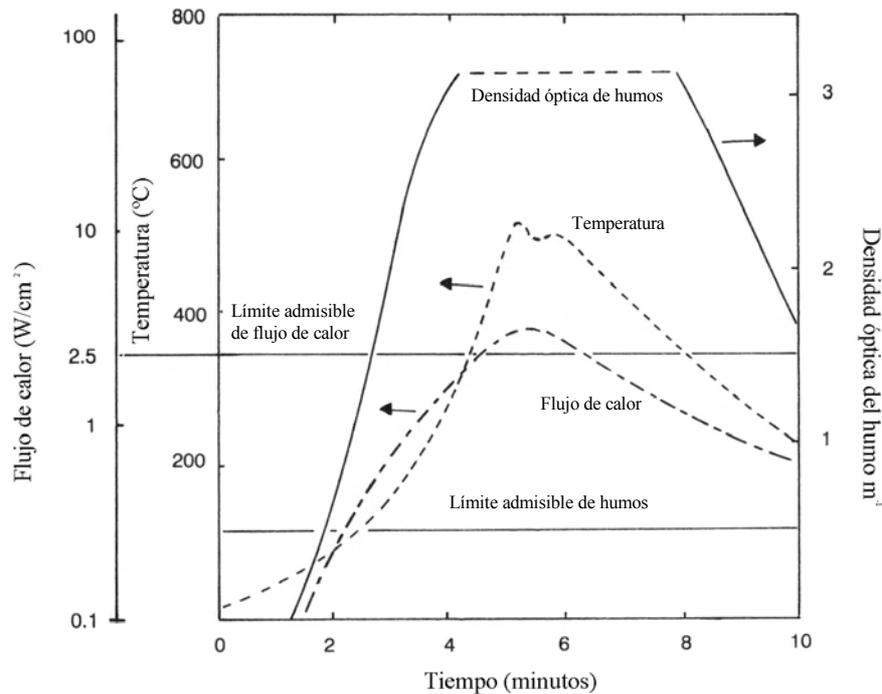


Figura 1.3: Ejemplo de evolución temporal de parámetros en un incendio.

1.3.1 - TEMPERATURA: CALOR TRANSMITIDO POR CONVECCIÓN

La figura 1.4 (Purser, 1993) muestra el tiempo que un hombre puede resistir cierta temperatura antes que se produzcan daños en la piel, quemaduras graves o hipertermia (temperatura corporal superior a 40 °C). Los puntos que aparecen indican resultados experimentales. Se puede observar la diferencia que aparece entre ambiente seco y húmedo. La presencia de humedad hace que los efectos del calor por convección aumenten debido a la dificultad que se añade a la transpiración. En condiciones de humedad ese tiempo se puede aproximar mediante:

$$t \text{ (minutos)} = \exp (5'1849 - 0'0273 (T-273)) \quad (1.9)$$

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

donde T es la temperatura en Kelvin.

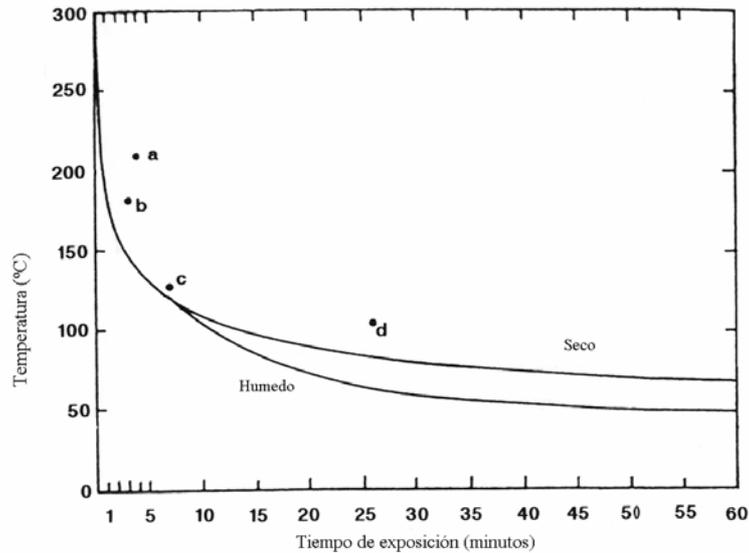


Figura 1.4: Tiempo de tolerancia al calor recibido por convección por la temperatura ambiente.

Si la temperatura no es constante, como ocurre en las situaciones reales, hay que acudir al concepto de “dosis” de calor por convección. Esto es debido al hecho de que el tiempo de tolerancia toma la forma de una curva exponencial. La fracción de dosis de calor incapacitadora durante un minuto representa el porcentaje recibido de la cantidad de calor que en 60 segundos lleva a una persona a no poder reaccionar, ecuación 1.10.

$$F_{th} = 1 / \exp (5'1849 - 0'0273 (T-273)) \quad (1.10)$$

Cuando la fracción de dosis acumulada excede la unidad se alcanzan condiciones vitales peligrosas produciéndose incapacidad debido a daños y quemaduras en la piel y en el tracto respiratorio.

1.3.2 - RADIACIÓN

La radiación dependerá de la temperatura y emisividad de la llama y de los humos calientes. Si se supone una capa de humos infinita a temperatura constante, la radiación creada será, en W/m^2 ;

$$E_r = 5'67 \times 10^{-8} \times \epsilon_r \times T^4 \quad (1.11)$$

donde ϵ_r es la emisividad y la T la temperatura de los humos en K. La figura 1.5 muestra la radiación que alcanza a las personas que escapan de una capa de humos de temperatura constante y su carácter potencial con la temperatura de los mismos. La línea continua representa una capa infinita, mientras que la de trazos es para el caso de un túnel de 8 metros de ancho, 6 de alto y 3 de altura de la capa caliente sobre el suelo.

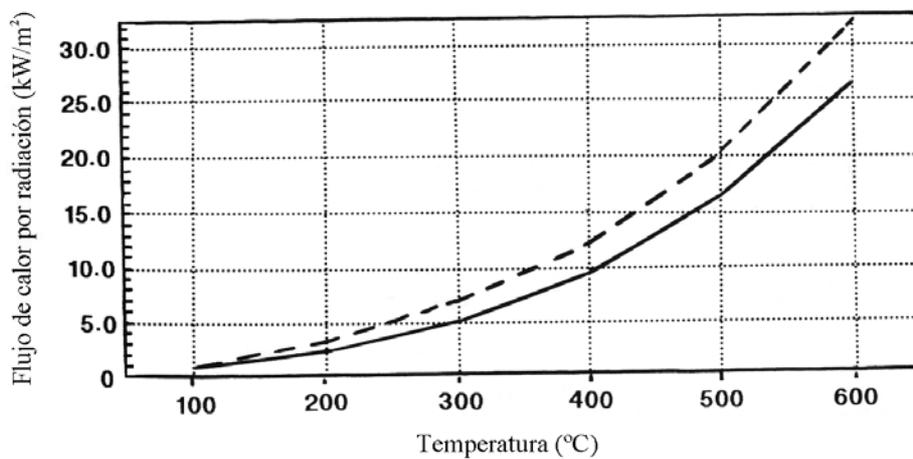


Figura 1.5: Radiación a nivel del suelo

En la figura 1.6, Hymes, 1993, muestra el tiempo de tolerancia ante distintos niveles de daño por quemaduras según el calor que llega a una persona. Aparece representada desde la situación sin daño a la piel, únicamente dolor y quemaduras de 1º orden, hasta el efecto mortal que comienza a existir para las de mas de 2º grado. Es importante tener en cuenta tanto el

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

efecto del tipo de ropa usada, como el tiempo de exposición. Lógicamente un mismo nivel de radiación causa daños más graves cuando el tiempo de exposición va aumentando. Si se sufren 20 kW/m^2 durante menos de 1 segundo, no existe ni tan siquiera sensación de dolor. Sin embargo, aumentando el tiempo de aplicación, se llegarán a quemaduras de 2º grado para tiempos del orden de 10 segundos y a 3º grado para tiempos superiores a 1 minuto. En este último caso el número de fallecidos es superior al 50% de las personas que lo sufren.

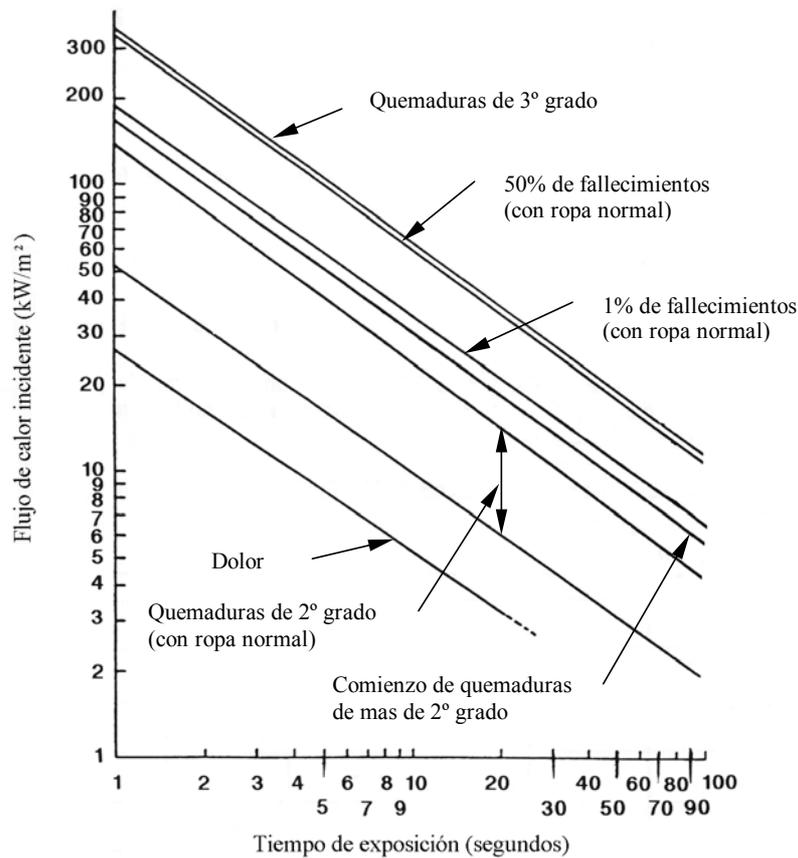


Figura 1.6: Tiempo de tolerancia a lesiones por quemaduras

Purser, 1993, figura 1.7, llega a la conclusión de que existe un límite de tolerancia alrededor de 2.5 kW/m^2 , para el cual, aunque aumente el tiempo de exposición, no se producen

daños significativos. En la figura, las letras entre la “a” y la “e” corresponden a diferentes valores aparecidos en la literatura científica e investigaciones. El tiempo necesario para que se produzca ese daño severo en la piel aumenta a medida que disminuimos la intensidad de la radiación aplicada.

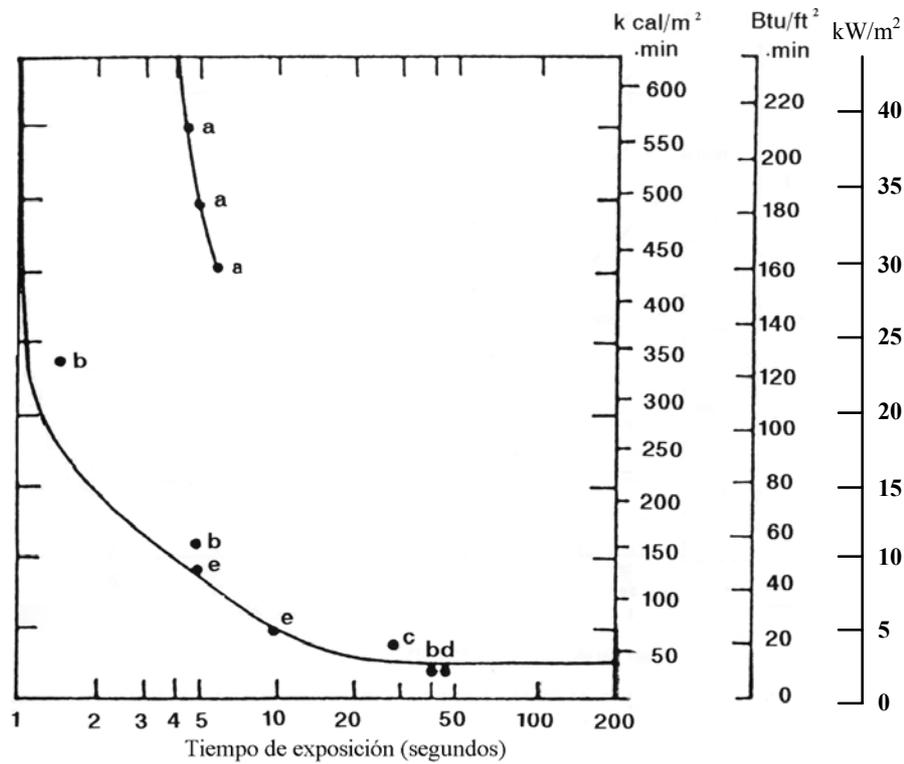


Figura 1.7: Tiempo para que se produzca daño severo en la piel a causa de radiación

En la figura 1.8, Danielsson, 1984, presenta el tiempo en que se empieza a sufrir dolor para diferentes niveles de radiación y distintos valores de factores de seguridad, P, función del tipo de ropa usada: P = 1 = piel desnuda y P = 26 = ropa ignífuga. Al igual que en la figura anterior, el tiempo de tolerancia antes de que produzca dolor aumenta conforme disminuye el flujo de calor por radiación incidente.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

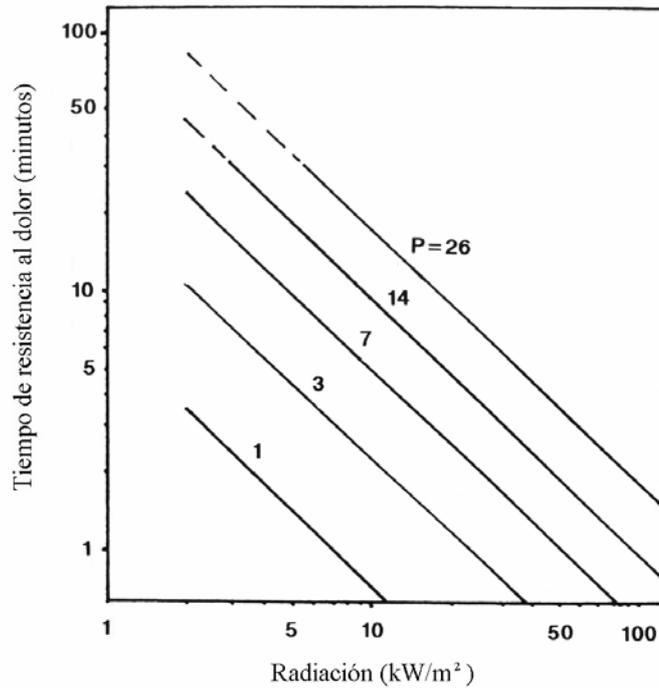


Figura 1.8: Tiempo hasta llegar al dolor por radiación

Otro aspecto a tener en cuenta es el peligro de extensión del incendio a objetos circundantes no directamente en contacto con la llama y que comienzan a arder por efecto de la radiación que le llega desde la llama existente o de la capa de humos acumulada. Waterman (1966) sugiere un límite de 20 kW/m^2 a nivel de suelo para que se produzca la ignición de un objeto que podría dar lugar a flashover. Este límite corresponde aproximadamente a un nivel que podría causar una rápida pirólisis de la celulosa de la materia y comenzar la ignición por la alta temperatura alcanzada. Referido a temperaturas estableció que podría producirse el flashover cuando se alcanzase entre 500 y $600 \text{ }^\circ\text{C}$ en la capa superior. Este límite es muy dependiente del tipo de material que se esté considerando.

La figura 1.3 muestra la temperatura y radiación correspondiente observada cuando arde una silla dentro de una habitación de 29 m³. El límite indicado anteriormente para que comience el flashover a causa de la radiación se alcanza poco después de 4 minutos.

1.3.3 - VISIBILIDAD

Las propiedades del humo son expresadas comúnmente en términos de transmitancia y otros coeficientes de densidad óptica y de atenuación, también llamados coeficientes de extinción.

La transmitancia del humo, T , se define como:

$$T = I_x / I_0 \quad (1.12)$$

donde I_0 es la intensidad de luz incidente y I_x la que sale de la capa de humos después de haber atravesado una cierta longitud.

La densidad óptica por unidad de longitud, δ , se relaciona con la transmitancia por la siguiente ecuación:

$$\delta = -(\log_{10} T) / x \quad (1.13)$$

donde x es la distancia atravesada por el rayo de luz.

El coeficiente de atenuación o extinción por unidad de longitud, K , se define igual que la densidad óptica sustituyendo el logaritmo decimal por el logaritmo neperiano:

$$K = -(\log_e T) / x \quad (1.14)$$

por lo que se relaciona con δ mediante:

$$K = \delta \ln 10 = 2.303 \delta \quad (1.15)$$

En ocasiones se usa el porcentaje de oscuridad, λ , definido como:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\lambda = 100 (1-T) \quad (1.16)$$

con lo que la transmitancia se puede expresar como:

$$\delta = - [\log_{10} (1 - \lambda/100)] / x \quad (1.17)$$

La distancia de visibilidad, D , puede estimarse usando el coeficiente de extinción de la mezcla aire-humo como:

$$D = A / K \quad (1.18)$$

donde A es una constante dependiente de que tipo de objeto es el que hay que ver; 2 si se trata de un objeto reflectante o 6 para un letrero luminoso.

Fujimura, 1988, indica que $K = 0.4 \text{ m}^{-1}$ es un valor crítico de coeficiente de extinción para el humo en un túnel de carretera. La figura 1.9 muestra la relación entre la visibilidad de señales luminosas y el coeficiente de extinción para humo irritante o no irritante. En dicha figura se indican los resultados experimentales con puntos y con líneas las ecuaciones empíricas. Para humo no irritante se cumple la ecuación 1.18, con $A = 6$ al tratarse de un objeto luminoso. En el caso de humo irritante, esa ecuación se modifica introduciendo un término independiente. En la figura 1.18, para señales luminosas, A valdría 6.5 y el nuevo término independiente -6.3 . Es decir, para un mismo coeficiente de extinción o su equivalente de densidad óptica, si el humo existente tiene un carácter irritante, se disminuye la visibilidad frente a un gas que no tuviese ese carácter. De esta forma se tiene en cuenta que la visibilidad tiene también un carácter dependiente de la situación del sujeto que la percibe.

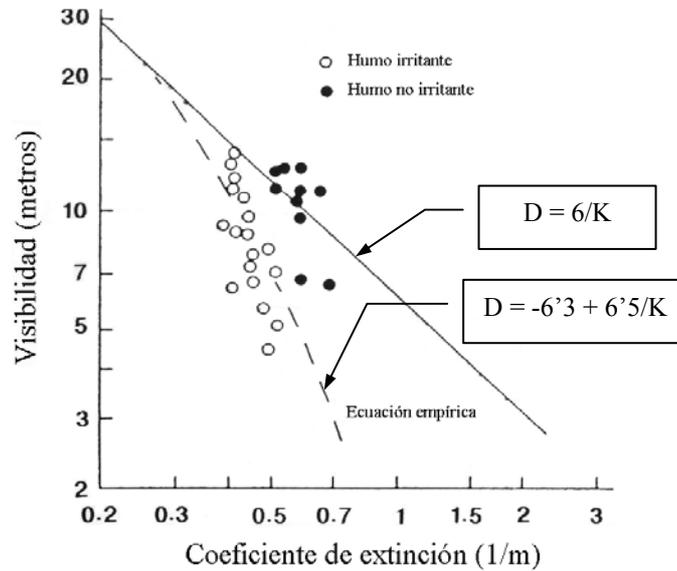


Figura 1.9: Visibilidad de señales luminosas

Rasbash (1975) sugiere que para escapar de un incendio es necesaria una visibilidad, D , de 10 m, lo cual es equivalente a una densidad óptica, δ , de 0.08 m^{-1} y a un coeficiente de extinción, K , de 0.18 m^{-1} cuando se trata de ver objetos reflectantes, $A = 2$. Jin (1981) sugiere que el límite admisible para la densidad óptica es 0.2 m^{-1} cuando el individuo está familiarizado con la ruta de escape, mientras que Babrauskas (1979) es aún más optimista y sugiere un valor límite de 0.5 m^{-1} . La figura 1.3 muestra como en el incendio de una silla dentro de una habitación de 29 m^3 la densidad óptica de los humos crece rápidamente y alcanza un límite de densidad óptica de 0.5 m^{-1} en poco menos de 2 minutos. La densidad óptica crece a 3 m^{-1} en 4 minutos, lo cual corresponde a una visibilidad de 0.3 m para objetos reflectantes, $A = 2$.

1.3.4 - TOXICIDAD DE CONTAMINANTES

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Los principales productos de combustión pueden ser divididos en dos categorías: asfixiantes e irritantes, los cuales pueden afectar a los sentidos o al sistema respiratorio.

Dentro del primer grupo sólo el monóxido de carbono, CO, y el ácido cianhídrico, HCN, han sido detectados en los productos de combustión de incendios en la suficiente proporción como para causar un efecto tóxico agudo (Hartzell, 1986). Hay ligeras dudas respecto al hecho de si el CO es el causante de una elevada porción de las muertes producidas en los fuegos accidentales (Anderson et al, 1981). Su combinación con la hemoglobina, Hb, de la sangre para producir la carboxihemoglobina, CoHb, es la responsable de la reducción de la cantidad de oxígeno suministrada a los diferentes órganos y tejidos del cuerpo. Esto es especialmente importante en el cerebro, llegándose a la inconsciencia. Los niveles de CoHb que producen estos efectos están presentes en las víctimas supervivientes expuestas a incendios. Actualmente se está estudiando el hecho de que la exposición al HCN tiene los mismos efectos que la del CO. Una diferencia importante entre sus efectos es que la acción del HCN es mucho más rápida que la del CO. El nivel de incapacitación por monóxido de carbono se alcanza de manera más gradual (Purser et al., 1984). También hay que tener en cuenta el hecho de que el efecto de la CoHb es distinto en personas activas que en sedentarias. Esto ocurre a causa de que la entrada de CO depende del ritmo respiratorio. Por tanto, cuando una persona comienza una actividad, como correr para huir de un incendio, el nivel de CoHb en la sangre se incrementa rápidamente originando niveles peligrosos para la consciencia (Von Leggenhager, 1974). Ese mismo nivel en una persona que no tratase de huir, o que lo hiciese más pausadamente, puede no originar efectos negativos o al menos tardar más tiempo en aparecer.

La figura 1.10 muestra el tiempo que tardan primates activos expuestos a ciertas concentraciones de CO en llegar a la incapacidad (Purser, 1988). Se observa como el producto de la concentración por el tiempo, Ct, la dosis, es cercano a una constante de valor 27.000 ppm min. Gráficas similares han sido obtenidas por Hartzell et al (1986) para la incapacidad y muerte de ratas ante la presencia de CO y HCN

Hartzell et al, 1985, definieron la fracción de dosis en un intervalo de tiempo dado t como:

$$c \Delta t / (ct)_{\text{critica}} \quad (1.19)$$

donde c es la concentración media en el intervalo Δt y $(ct)_{\text{critica}}$ es la dosis total requerida para producir cierto efecto. La suma de las fracciones de dosis que una persona sufre durante el tiempo que tarda en escapar será la que determine si logrará huir antes de sufrir daños.

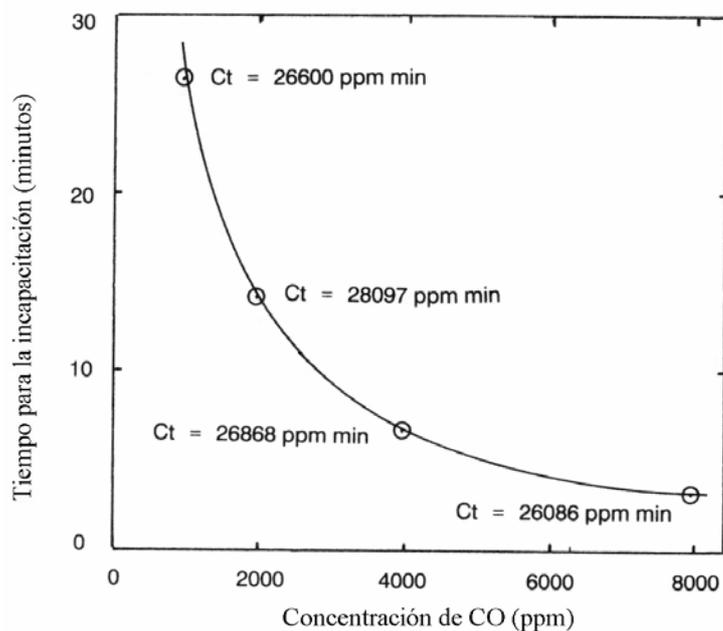


Figura 1.10: Tiempo para la incapacitación en primates activos.

Hay que resaltar que en un incendio las personas expuestas inhalan una combinación de compuestos tóxicos por lo que la combinación de sus efectos es más importante que sus efectos individuales. Por tanto la narcosis se produce tanto por el efecto combinado del CO y del HCN como por la falta de oxígeno (hipoxia hipóxica), altas concentraciones de CO₂ (hipercapnia),... Cuando un individuo se expone a una baja concentración de oxígeno y alta de CO₂, se precisan muy pocos minutos para alcanzar el nuevo equilibrio entre el aire en los pulmones y los gases en la corriente sanguínea. Una vez producido este hecho, la severidad de los efectos es independiente del tiempo de exposición y sólo depende de las concentraciones de ambos gases, Purser, 1984. Los efectos individuales de estas cuatro especies aparecen en la

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

tabla 1.2. Ésta proporciona las concentraciones a las cuales existe peligro de incapacidad o de muerte después de 5 y 30 minutos de exposición para una persona activa.

Producto	5 minutos		30 minutos	
	Incapacidad	Muerte	Incapacidad	Muerte
CO	6.000-8.000 ppm	12.000-16.000 ppm	1.400-1.700 ppm	2.500-4000 ppm
HCN	150-200 ppm	250-400 ppm	90-120 ppm	170-230 ppm
O ₂	10-13 %	< 5 %	< 12 %	6-7 %
CO ₂	7-8 %	> 10 %	6-7 %	> 9 %

Tabla 1.2: Límites para incapacidad y muerte en personas

Purser ha propuesto que la fracción de dosis total para llegar a la incapacidad (F_{IN}) a causa de narcosis se puede expresar mediante:

$$F_{IN} = [(F_{CO} + F_{HCN}) \times V_{CO_2} + F_O], \text{ ó, } F_{CO_2} \quad (1.20)$$

donde F_{CO} , F_{HCN} y F_O son las fracciones de dosis individuales para que se produzca la incapacidad mediante la existencia de CO y HCN y por la falta de oxígeno respectivamente. V_{CO_2} es un factor multiplicador a causa de la hiperventilación originada por el dióxido de carbono. Purser ha examinado los datos disponibles sobre toxicidad y ha sugerido las siguientes ecuaciones para un minuto de exposición a cada uno de esos componentes.

$$F_{CO} = 2'764 \times 10^{-5} \times \{ [CO] \text{ (ppm)} \}^{1'036} \quad (1.21)$$

$$F_{HCN} = 1 / (5'396 - 0.023 \times \{ [HCN] \text{ (ppm)} \}) \quad (1.22)$$

$$F_O = 1 / \exp (7'98 - 0'528 \times \{ 20'9 - [CO] \text{ (\%)} \}) \quad (1.23)$$

$$F_{CO_2} = 1 / \exp (6'162 - 0'519 \times \{ [CO_2] \text{ (\%)} \}) \quad (1.24)$$

$$V_{CO_2} = 0'147 \times \exp (0'250 \times \{ [CO] \text{ (\%)} \} + 1'909) \quad (1.25)$$

La aplicación de estas ecuaciones para el caso de un experimento típico con fuego se refleja en la figura 1.11. Los puntos negros son la dosis acumulada y los mitad negros y mitad blancos muestran el ritmo de hiperventilación causado por el dióxido de carbono. Las barras muestran la contribución del monóxido de carbono por minuto para una media hecha en un periodo de 10 minutos. Se observa el carácter exponencial de esas variables y la saturación que se produce para el efecto del CO.

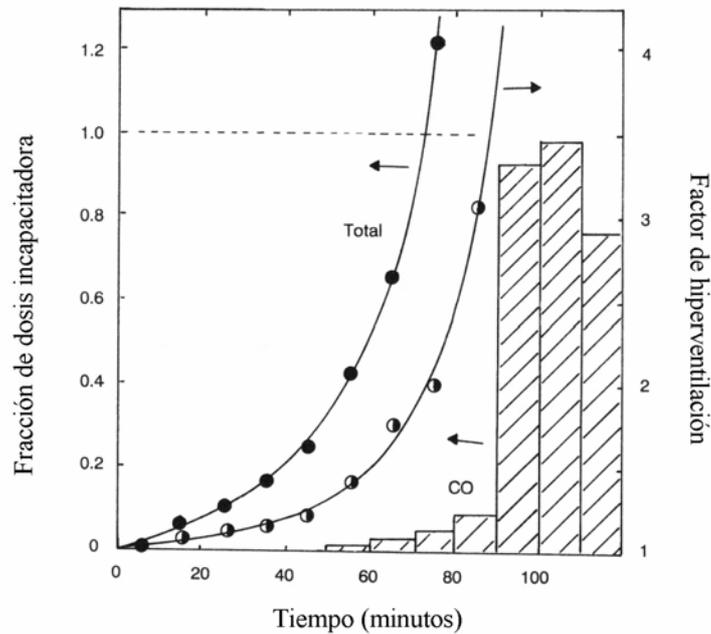


Figura 1.11: Tiempo para alcanzar dosis unitaria causante de incapacidad.

Otra forma propuesta para obtener la influencia combinada del CO y ácido cianhídrico (HCN) se puede representar mediante:

$$A = [\text{CO}]/\text{LC}_{50}\text{CO}_{30} + [\text{HCN}]/\text{LC}_{50}\text{HCN}_{30} \quad (1.26)$$

donde [] indica las concentraciones reales y $\text{LC}_{50}\text{X}_{30}$ es la concentración de especie X a la cual el 50% de las personas que la sufren mueren al cabo de 30 minutos. Este valor es de 4600 ppm para el CO y de 160 para el HCN. Si A es igual a 1, el 50% de las víctimas morirán. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será el número de muertos por contaminantes.

Una aproximación más sencilla al problema consiste en considerar únicamente el máximo de concentración permitido para un cierto incendio. Klote y Milke, 1993, han presentado una extensa gama de niveles letales de exposición durante 5 y 30 minutos, tabla 1.3. En dicha tabla, EC representa la concentración a la cual empieza a observarse efectos, LC0 la

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

concentración a la cual esos efectos empiezan a ser letales y $LC = LC50$ la concentración a la cual el 50% de quienes la sufren fallecen pasado un cierto tiempo.

En contraste con las consecuencias anteriores de este apartado, los efectos irritantes del humo sobre los ojos y el tracto respiratorio superior ocurren inmediatamente tras la exposición. Se producen severas inflamaciones de los ojos y esto está acompañado por dolor, lagrimeo y blefaroespasmos (cierre involuntario de los párpados). También se origina irritación y mucosidad en la nariz con sensación de quemadura en la nariz, boca y garganta junto a sensación de intenso malestar que a menudo lleva a violentos accesos de tos. Mientras que la severidad de los efectos depende de la concentración, el tiempo de exposición hace que disminuyan los efectos ya que permite al individuo adaptarse a los estímulos desagradables (Beswick et al, 1972), y por tanto estos inconvenientes no llevarán directamente a la muerte. Sin embargo esas irritaciones pueden llevar a desorientación, con el consiguiente aumento de probabilidad de muerte a causa de la inhalación de gases tóxicos presentes. Los gases irritantes también penetran en los pulmones y esto puede causar respuestas pulmonares irritantes agudas, consistentes en edemas, recubrimiento del pulmón por una capa mucosa, e inflamaciones, lo cual si puede llevar a la muerte con posterioridad.

Las partículas de sólidos y líquidos constituyentes de los humos pueden ser irritantes en sí mismos. Su efecto depende en gran medida de su tamaño dado que él controlará cuánto penetrarán y cómo y dónde se depositarán. Partículas de por debajo de $5 \mu\text{m}$ pueden penetrar profundamente en los pulmones y, en general, el humo procedente de combustiones sin llama tiene partículas de tamaño inferior a $1 \mu\text{m}$. Incendios con llamas suelen tener partículas más grandes que tienden a depositarse en las fosas nasales y en las vías respiratorias superiores, las cuales pueden físicamente atascarse si la concentración de partículas es suficientemente alta.

Gas	LC ₅₀ asumido para humanos		Referencia	Datos de referencia (espectk, minutos)
	5 m. humanos ppm	30 minutos ppm		
CO ₂	> 150.000	> 130.000	Lewis et al. (1987b) Sax (1984)	ham=ham, str, rbt=concep I
C ₂ H ₆ O		> 20.000		LC(m,240)=1.500 LC(r,240)=4.000, LC(ham,250)=17.000 LC(r,30)=20.000, LC(r,420)=16.000
C ₂ H ₅ O ₂		11.000	A.C.G.I.H. (1980)	
NH ₃	20.000	9.000	Lewis et al. (1987b)	LC(m,60)=5.620
HCL	16.000	3.700	Sahara (1988) Nishimaru (1985)	EC(m,5)=20.000, EC(m,30)=4.400 EC(r,5)=10.000, EC(r,30)=4.000
CO		3.000	Hartwell et al. (1985) Higgins et al. (1972)	r.p LC(r,5)=40.989
HBr		3.000	Lewis et al. (1987b)	LC(r,30)=4.600
NO		3.000	Kimura et al. (1974) Sax (1984)	LC(h,30)=3.000 LC(m,60)=814, LC(r,60)=2.858
COS	10.000	2.500	A.C.G.I.H. (1980)	5 veces más tóxico que el NO ₂ LC(h,1)=15.000
H ₂ S		2.000	Sax (1984)	LC(avarias,35-90)=1.000-4.000
HF	10.000	2.000	Sax (1984) Kimura et al. (1974) Sax (1984)	LC(m,60)=673, LC(h,30)=600 LC(ham,5)=800 LC(h,30)=2.000 LC(ppg,15)=4.327, LC(r,60)=1.774 LC(h,30)=50 LC(m,60)=456, LC(r,60)=1.276 LC(r,5)=18.200 LC(ppg,2)=300, LC(m,5)=6427 LC(5,5)=18.200

Tabla 1.3: Efecto de gases tóxicos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Gas	LC50 asumido para humeros		Referencia	Datos de referencia (espectro, minutos)
	5 minutos ppm	30 minutos ppm		
C ₂ H ₆ N				h=humano, r=rata, m=ratón p=mono, epg=cobaya ham=hamster, rbt=conejo
COF ₂		2.000	Sax (1984)	LC(gg,240)=56, LC(r,240)=500
		750	ACGIH (1980)	LC(r,30)=360
NO ₂	5.000	500	Sakurai (1988)	EC(m,5)=2.500, EC(m,30)=700
			Nishimaru (1985)	EC(r,5)=0.000, EC(r,30)=300
			Higgins (1972)	LC(m,5)=83.331, LC(r,5)=1.880
C ₂ H ₄ O	750	300	Sax (1984)	LC(m,360)=66, LC(r,10)=153
			Kaplan et al. (1984)	LC(r,5)= entre 505 y 1.025
			Sax (1984)	LC(r,240)=250
CH ₂ O		250	Kimmerle (1974)	LC(r,30)=250
			ACGIH (1980)	LC(gato,480)=700, LC(m,120)=700
SO ₂	500		Sax (1984)	LC(que pequeños roedores,300)=6.000
			Kimmerle (1974)	LC(varios 5)=entre 600 y 800
HCN	280	135	Levin et al. (1987b)	LC(r,5)=570, LC(r,30)=110
			Higgins et al. (1972)	LC(r,5)=503, LC(m,5)=323
			Kimmerle (1974)	LC(h,30)=135, LC(h,5)=280
C ₆ H ₆ O ₂ N ₂		100	Sax (1984)	LC(epg,240)=13, LC(rbt,150)=1.500
			Kimmerle (1974)	LC(r,360)=600, LC(m,240)=10
COCl ₂	50	90	Sax (1984)	LC(hair rbt, ep g, 240)=entre 97 y 1379
			Clayton & Clayton (1982)	EC(varios 4 exposición corta)=50
CaF ₂	28	6	Sax (1984)	LC(h,30)=90
				LC(r,10)=17, LC(r,5)=28

Tabla 1.3: Efecto de gases tóxicos (continuación).

1.3.5 - TIEMPO DE ESCAPE

1.3.5.1 - TIEMPO ANTES DEL COMIENZO DE LA EVACUACIÓN

Aquí se engloban junto con el tiempo necesario para detectar y alertar del comienzo del incendio, el tiempo que los usuarios del túnel emplean en reaccionar y abandonar los vehículos.

El tiempo que se tarda en saber de la existencia del incendio y comunicar a los usuarios el suceso, es muy dependiente del sistema de control del túnel. Cuando este sistema existe, puede variar entre 2 y 5 minutos, mientras que es mucho mayor para los casos de túneles sin control. Más difícil aún es estimar el tiempo que se tarda en evacuar los vehículos, función sobre todo del medio de transporte de que se trate. En coches ese tiempo se reduce apreciablemente comparándolo con autobuses.

1.3.5.2 - VELOCIDAD DE HUIDA

Hay mucha información acerca de la velocidad de escape en diferentes escenarios: edificios, estaciones de metro subterráneas,... Estos datos muestran que esta velocidad en condiciones libre de humo varía entre 1 y 2 m/s. En la figura 1.12 la velocidad de huida se muestra para ambientes con humo irritante y no irritante. Se puede observar como el aumento de coeficiente de extinción, o equivalentemente la visibilidad, afecta en gran medida a la capacidad de movimiento de las personas atrapadas en un incendio. Este efecto se acentúa en gran medida cuando el humo es irritante. Con humo no irritante y coeficientes de extinción superiores a $1'2 \text{ m}^{-1}$, visibilidad de $1'5 \text{ m}$ para objetos reflectantes, la velocidad de escape es inferior a $0'3 \text{ m/s}$, la cual corresponde a una persona con los ojos vendados. Sin embargo con humo irritante esto ocurre para coeficientes de extinción de $0'5 \text{ m}^{-1}$, visibilidad de 4 m también para objetos reflectantes. Es decir, se llega a una situación de ceguera virtual para una cantidad mucho menor de humos irritantes.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

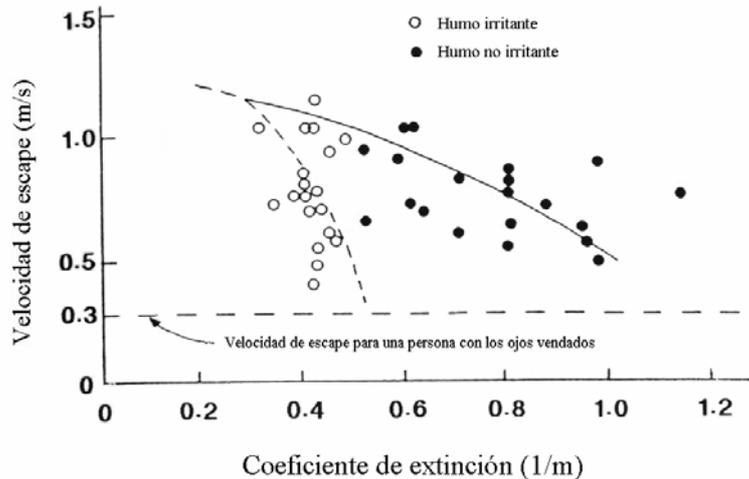


Figura 1.12: Velocidad de escape

No existen datos para velocidad de huida en túneles de carretera, pero una buena suposición es que se encuentra entre 0'5 y 1'5 m/s dependiendo, entre otras cosas, de la visibilidad, iluminación y diseño de las señales de salida.

Por tanto, el tiempo total transcurrido desde que se produce el incendio hasta que aquellos que se encuentran en sus inmediaciones consiguen llegar a un sitio seguro puede variar entre 30 segundos y 5 minutos.

1.3.6 - VELOCIDAD CRÍTICA

Ante un incendio dentro de un túnel de dirección única, frecuentemente existe un sistema de ventilación longitudinal. Este sistema entra en acción para crear una zona segura sin humos aguas arriba del fuego para posibilitar la evacuación y la lucha contra las llamas. Si la velocidad de ventilación es baja, el humo producido desde el fuego puede extenderse en la dirección aguas arriba contra el sentido de la ventilación. La velocidad crítica es la velocidad mínima requerida en el sistema de ventilación para eliminar el retroceso del humo y forzarle a moverse aguas abajo. Este valor se ha convertido en uno de los primeros criterios en los

diseños de los sistemas de ventilación de túneles. Los métodos actuales para su determinación se centran principalmente en dos aspectos del problema: influencia de la potencia del incendio y efecto de la geometría del túnel.

Las técnicas actuales para predecir la velocidad crítica están basadas en situaciones con semejanza parcial y datos experimentales, complementados con cálculos numéricos. Mediante el modelo cuasi-unidimensional presentado, se puede establecer un criterio equivalente a esta contención de humos. Para ello, se fija un ángulo de impacto máximo, entre la corriente ascendente y la horizontal, que asegure que los humos no retroceden. Calculando la velocidad con la que se obtiene ese ángulo máximo, se sabe la velocidad mínima necesaria para cumplir este criterio de diseño, ver apartado 7.2.1.

1.3.6.1 - MODELOS BASADOS EN LA CONSERVACIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE

El número de Froude se define como:

$$Fr = \frac{V^2}{gD} = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas gravitatorias}} \quad (1.27)$$

donde g es la gravedad y V y D son valores característicos de velocidad y longitud respectivamente del incendio. Este modelo se usa frecuentemente en situaciones donde el número de Reynolds es suficientemente grande para que prevalezcan condiciones turbulentas y las fuerzas de flotabilidad sean dominantes. A menudo se combina con el cociente de densidades del humo y ambiente ($\Delta\rho/\rho$) para incluir los efectos de estratificación. Entonces el número de Froude se transforma en el de Richardson o de Froude modificado:

$$Ri = \frac{gD}{V^2} \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{Fr} \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (1.28)$$

De la ecuación de conservación global de la energía, usando la ecuación de estado, despreciando la variación de presiones frente a la presión misma, y considerando la conservación del número de Richardson, la velocidad quedaría de la forma siguiente:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\text{constante} = \frac{|\Delta\rho|}{\rho} \approx \frac{|\Delta T|}{T} \approx \frac{Q}{\rho C_p D^2 V T} \Rightarrow V = \text{constante} \left(\frac{gQ}{\rho C_p D T} \right)^{1/3} \quad (1.29)$$

Los modelos más comúnmente empleados con esta teoría son los propuestos por Heselden, 1976, y Danzinger, 1982. El primero de ellos predice una velocidad crítica, U_c , de:

$$U_c = 0.8 \left(\frac{gQT}{C_p \rho_o T_o^2 W} \right)^{1/3} \quad (1.30)$$

donde Q es la potencia del incendio, ρ_o y T_o la densidad y temperatura del ambiente, T la temperatura de la capa de humos, C_p es el calor específico a presión constante y W la anchura del túnel. El 0.8 es una constante obtenida de un conjunto limitado de experimentos llevados a cabo en un túnel de ferrocarril en desuso.

El modelo de Danzinger, incorporado en el **Environment Simulation Program** del *US Department of Transport Subway*, predice una velocidad crítica de:

$$U_c = K_g k \left(\frac{gQ}{C_p \rho_o T H} \right)^{1/3} \quad (1.31)$$

donde:

$$T = \left(\frac{Q}{C_p \rho_o A U_c} \right) + T_o \quad (1.32)$$

siendo A el área de la sección transversal del túnel, H la altura del mismo y K_g un factor corrector dependiente de la pendiente del túnel. El valor de k lo fija en 0.61, calculo basado en un número de Froude igual a 4.5.

Se comprueba como estos modelos sugieren que la velocidad crítica para túneles horizontales varía con el tercio de la potencia liberada por el incendio. Recientes estudios, como los de Bettis, 1993 y 1994, sugieren que existen dos regímenes de variación de la velocidad crítica en relación con el calor liberado por el incendio. A bajas potencias la velocidad crítica efectivamente varía con el ritmo de liberación de calor elevado a un tercio como predicen los modelos basados en el número de Froude. Sin embargo al aumentar la potencia, la velocidad crítica se hace independiente de ella. La más completa serie de experimentos a gran escala llevada a cabo hasta el momento, el *Memorial Tunnel Ventilation Test Programme*, muestran que la teoría basada en conservar el número de Froude da lugar a un sobrevaloramiento de la velocidad de ventilación crítica en el rango de los 50-100 MW aproximadamente en un 5-15%. También se desprende de esos ensayos que existe una velocidad supercrítica para grandes tamaños de incendios. Por tanto los modelos basados en la conservación del número de Froude no son válidos para elevados ritmos de liberación de calor. Otra limitación de esta teoría es que se basa esencialmente en conceptos unidimensionales en los que las fuerzas de flotabilidad son función principalmente de la altura del túnel y por tanto es esta longitud la que se usa como parámetro característico. Aunque algunos de los modelos han tenido en cuenta la anchura del túnel, los efectos de la geometría de la sección transversal no han sido incorporados plenamente a estos modelos.

El efecto de la pendiente del túnel sobre el movimiento de los humos ha sido estudiado por Atkinson, 1996, recomendando unos factores de correlación de la velocidad crítica con dicha pendiente y la potencia liberada. Sin embargo este modelo se basa únicamente en una geometría de túnel y la altura del mismo es la empleada en las correlaciones como longitud característica en el análisis dimensional. Por tanto el efecto de la geometría del túnel permanece incierto y el modelo debe ser reexaminado antes de poder emplearlo en otras geometrías.

1.3.6.2 - MODELOS BASADOS EN EL ANÁLISIS DIMENSIONAL

Modelos más recientes para calcular la velocidad crítica se basan en resultados experimentales a pequeña escala. Oka, 1995, predice su valor mediante:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$V^* = \begin{cases} K_v \left(\frac{Q^*}{0'12} \right)^{1/3} & \text{para } Q^* \leq 0'12 \\ K_v & \text{para } Q^* > 0'12 \end{cases} \quad (1.33)$$

donde Q^* y V^* son respectivamente la potencia y velocidad crítica adimensionales definidas mediante:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_o T_o C_p \sqrt{gH^5}} \quad (1.34)$$

$$V^* = \frac{U_c}{\sqrt{gH}}$$

El valor de K_v varía entre 0'22 y 0'38 dependiendo del quemador usado en los modelos. Aquí se aprecia la independencia de la velocidad crítica a partir de un cierto valor de potencia de incendio.

Wu, 2000, ha experimentado con túneles con igual altura pero distinta sección transversal y comprobado como ésta tiene una clara influencia en los resultados. La figura 1.13 muestra la relación entre la potencia y velocidad adimensional de Oka, 1995, para experimentos en túneles con distinta sección. Cada símbolo representa un túnel para distintas condiciones. Se observa como esa formulación adimensional no permite formular la velocidad crítica en una única forma. Wu propone que la longitud característica usada para adimensionalizar la potencia y la velocidad crítica pase de ser la altura del túnel al diámetro hidráulico, \bar{H} , con lo que se tiene en cuenta la forma de la sección del túnel:

$$Q'' = \frac{Q}{\rho_o T_o C_p \sqrt{g\bar{H}^5}}$$

$$V'' = \frac{U_c}{\sqrt{g\bar{H}}} \quad (1.35)$$

$$\bar{H} = 4 \frac{\text{Area de paso}}{\text{Perímetro mojado}}$$

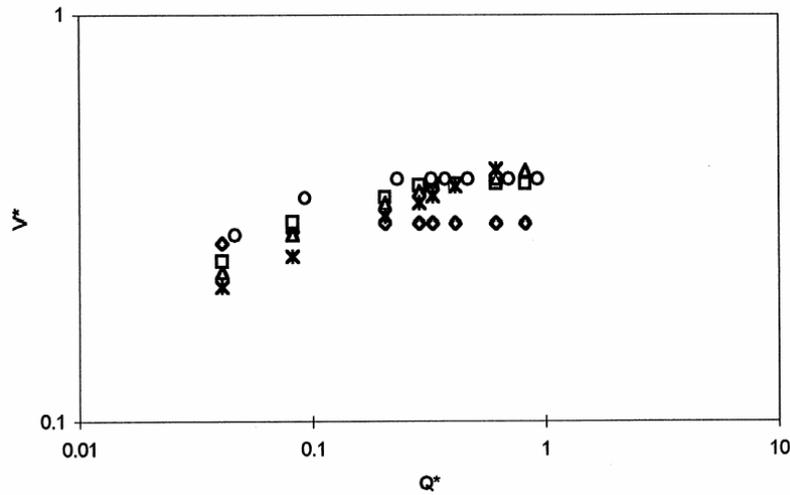


Figura 1.13: Relaciones experimentales entre la velocidad crítica adimensional de contención del incendio y la potencia adimensional usando como longitud característica la altura del túnel.

Con la adimensionalización de la ecuación 1.35 se obtiene la figura 1.14, en donde se comprueba como todos los resultados experimentales, cada símbolo representa una geometría de túnel distinta, se correlacionan en una única fórmula, recta quebrada de la figura. Esto sugiere que es posible derivar una correlación universal para la predicción de la velocidad de crítica de ventilación para túneles con secciones transversales variadas y de distinta forma.

Wu propone como velocidad crítica adimensional la siguiente:

$$V'' = \begin{cases} 0'40 \left(\frac{Q''}{0'20} \right)^{1/3} & \text{para } Q^* \leq 0'20 \\ 0'40 & \text{para } Q^* > 0'20 \end{cases} \quad (1.36)$$

En esta velocidad crítica se sigue manteniendo la dependencia con la potencia elevada a un tercio, para ritmos de producción de calor bajos, e independencia de la potencia cuando esta se eleva.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

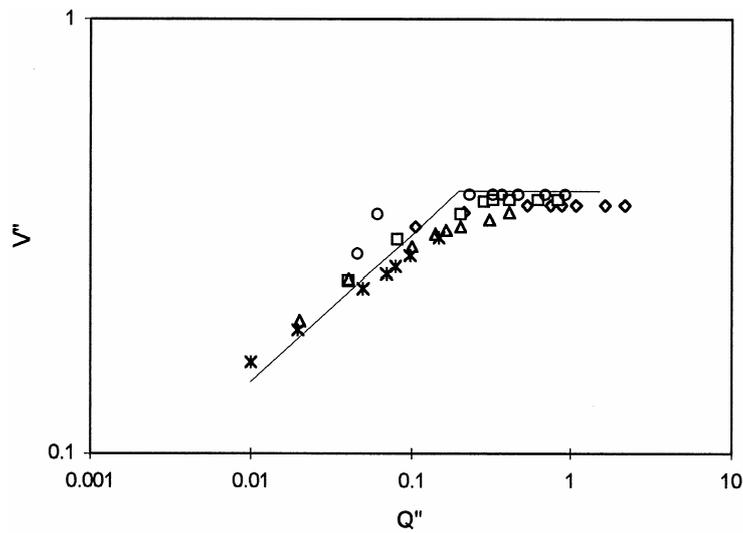


Figura 1.14: Relación entre la velocidad crítica adimensional de contención del incendio y la potencia adimensional usando como longitud característica el diámetro hidráulico. Experimentos y ecuación de Wu.

1.4 - RECOMENDACIONES

Los objetivos, en orden de importancia, de un sistema de control de ventilación en caso de incendios deben consistir en:

- Salvar vidas haciendo posible la evacuación de los usuarios.
- Permitir el rescate y las operaciones de lucha contra el incendio.
- Evitar explosiones.
- Limitar los daños a la estructura del túnel y su equipamiento y a las construcciones circundantes.

De acuerdo a las regulaciones de cada país, los tipos de túnel (urbanos, bajo agua, de montaña,...) y su modo de operación, existen diferentes caminos para conseguir los objetivos anteriores.

Es posible dar estimaciones de cuáles son las condiciones que se deben mantener para la evacuación y las operaciones de lucha contra el fuego. El tiempo de evacuación puede ser de varios minutos dependiendo de la distancia a las salidas y la velocidad de escape. Esta última puede ser del orden de 1'5 m/s pero puede verse reducida a 1 m/s, o incluso menos, por la presencia del humo

1.4.1 - TEMPERATURA

Para hacer la evacuación posible, la temperatura del aire no debería ser mayor de 80 °C, para que pueda ser tolerada durante 15 minutos

1.4.2 - RADIACIÓN

Cerca del incendio, la radiación procede del fuego en sí y de los humos calientes. Más lejos, únicamente la capa de humos origina calor a niveles peligrosos. Para permitir la huida de las personas atrapadas por el fuego en el interior del túnel, los niveles de radiación deben ser menores de aquellos que causan un daño severo sobre piel desnuda al estar aplicados durante varios minutos: el valor límite es aproximadamente entre 2 y 2'5 kW/m². Los bomberos pueden normalmente soportar niveles de radiación de 5 kW/m². El tiempo durante el que se encuentran trabajando no puede ser mayor de 30 minutos aún llevando equipos de respiración. Si lo que queremos es que no se produzca la extensión del incendio a objetos circundantes a causa de la radiación, los niveles de radiación permitidos aumentan hasta los 20 kW/m².

1.4.3 - VISIBILIDAD

Una distancia de al menos 7 m es necesaria para escapar fácilmente en un ambiente con humo. La distancia debe aumentar a 15 m para leer las señales. Por consiguiente una distancia de visibilidad mínima de entre 7 y 15 m debe ser existir durante la evacuación y las operaciones de extinción.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

1.4.4 - CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES

En muchos incendios en túneles se supone que, asegurando que se mantiene la visibilidad mínima, la concentración de contaminantes está bajo los límites tolerables para la evacuación. En el apartado 1.3.4 se hace referencia a la toxicidad de los contaminantes.

1.4.5 - DAÑOS EN EL TÚNEL

Se debe prevenir la caída del hormigón del túnel para permitir el escape y prevenir los daños a los usuarios y a los bomberos. Esto suele ocurrir pasados unos minutos, los suficientes para que se escapen las personas atrapadas inicialmente, pero los desprendimientos pueden afectar a las personas que forman parte de los equipos contraincendios. Una temperatura superficial de entre 150 y 200 °C puede causar este tipo de sucesos. En túneles sin revestimiento o con mampostería de piedra natural, este límite puede ser menor.

Las especificaciones comúnmente usadas indican que el equipo pesado de las instalaciones debe aguantar entre 400 y 450 °C durante el tiempo necesario para la extinción del incendio. En un túnel, esas temperaturas pueden producir unos niveles de radiación del orden de 5 kW/m², lo cual es el máximo tolerable para una persona equipada con la ropa adecuada para la lucha contra el fuego.

1.4.6 - NORMATIVA

La reglamentación sobre túneles no ha prestado la importancia que se merecía al caso de incendios. Ejemplos de la misma son la norma alemana RABT y la americana FPA 502 "para túneles viales, puentes y otros accesos limitados de carreteras" de 1998. Después de los accidentes en los túneles de los Alpes, ha comenzado un proceso que pretende aumentar la seguridad de los túneles y revisar las leyes existentes. Así han surgido en distintos países normativas y recomendaciones que pretenden ampliar el rango de seguridad. Como ejemplos de estos cambios se tienen el caso francés y español.

Francia, al verse directamente involucrada en alguno de esos accidentes, ha comenzado la revisión exhaustiva de la reglamentación aplicable a los túneles de carretera. De esta forma nos encontramos con la *Circulaire Interministérielle N° 2000-63 DU* del 25 de

agosto del 2000 en donde se define distintas medidas para reforzar el control y la seguridad. Las normas que permitan asegurar la evacuación de humos son de aplicación a partir de las siguientes longitudes de túnel:

- 300 metros para un túnel urbano.
- 500 metros para un túnel no urbano con tráfico no de baja intensidad. Este límite podría alcanzar 800 metros, a condición de compensar la ausencia de extracción de humos reforzando instalaciones de evacuación y de protección de los usuarios tales como nichos seguros, galerías de evacuación,...

El túnel de tráfico de baja intensidad se define como aquel cuyo tráfico previsible en cada sentido, diez años después de la puesta en servicio, es inferior tanto a los 2000 vehículos diarios de media anual como a los 400 vehículos en hora punta. Para la apreciación de esos criterios, los vehículos pesados se computan como 5 vehículos automóviles.

- 1000 metros para un túnel no urbano de baja intensidad de tráfico.

En esta normativa se define cuando usar y dimensionar, según el caso, los siguientes aspectos:

- Instalaciones para la evacuación y protección de los usuarios mientras llega la ayuda. Esto se puede conseguir, según el caso, con comunicación directa con el exterior, mediante acceso a otro tubo, galerías de servicio o, como última posibilidad, mediante zonas especialmente protegidas frente a incendios, siempre con algún tipo de acceso al exterior. Se establecen los criterios e indicaciones para elegir una u otra solución y como dimensionarlas y la separación de los accesos. Si los túneles son de más de 5000 m se obliga a que existan en las galerías de evacuación vehículos a motor para facilitar el escape. Se tiene que tener en cuenta a las personas con discapacidades para el acceso y uso de las instalaciones de emergencia.
- Acceso de los vehículos y equipos de emergencia mediante galerías adicionales, arcén derecho para permitir que se detengan los usuarios y pueda pasar la ayuda, apartaderos para vehículos cuando la longitud es de más de 1000m y no existe ancho que permita el paso,...
- Nichos de seguridad y de incendios para los equipos de emergencia, especialmente los teléfonos de aviso de emergencia, extintores y equipos contraincendios en general.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Estos nichos no se entienden simplemente como apartaderos, si no que se recomienda su separación física con puertas o mamparas.

- Zonas susceptibles de utilizarse como helipuertos en las entradas para el caso de túneles de más de 3000m.
- Medios para evitar que entre humo de un túnel a otro cuando existen dos tubos.
- Sistemas de seguridad de alimentación eléctrica en caso de funcionamiento normal o en caso de fallo de la alimentación externa para mantener los sistemas generales, de emergencia, de gestión del tráfico,...
- Elección del tipo de ventilación, sistemas de extracción de humos y criterios para su diseño, según el tipo y dimensiones del túnel, que consiga, en caso de incendio, extraer los humos y asegurar la evacuación de los usuarios y la entrada de los equipos de emergencia. Se fijan caudales de extracción de humos, separación de aparatos de extracción, velocidad máxima y mínima de extracción de humos.
- Requisitos mínimos de iluminación en caso de incendio.
- Medidas contra incendios: detección de incendios, extintores y abastecimiento de agua, con sus caudales y presiones.
- Señalización, avisos, explicación de los sistemas de seguridad, barreras, radiocomunicaciones, alarmas, circuitos de televisión, postes SOS,....
- Comportamiento temporal de los materiales, estructuras y equipos ante el fuego.
- Tipos y necesidades de explotación y centros de control. Hay que hacer notar como el gran fallo ocurrido en el MontBlanc entre el control francés y el italiano ha puesto de manifiesto la necesidad de un único control en cada instante sobre las acciones a realizar. Aquí también se engloban los aspectos relacionados con la gestión: certificados, documentación, información a los usuarios, normas de circulación, planes de actuación, planes de emergencia, ejercicios, ensayos, simulacros, aprendizaje, registro e información a las autoridades competentes de los incidentes y accidentes graves.
- Consideraciones especiales, según el tipo y dimensiones de los túneles o por causa de las mercancías peligrosas que los pudiesen atravesar.

Sobre los aspectos más directamente relacionados con la presente tesis, en la circular interministerial francesa se señala que la ventilación debe calcularse para:

- Controlar un incendio de 30 MW de potencia, equivalente a un camión medio.

- Asegurar que exista un caudal de aire de 110 m³/s que permita que la concentración de contaminantes sea tal que no constituya riesgo para la salud.
- Tener una velocidad aire de 3 m/s que permita asegurar estar por encima de la velocidad crítica de retorno de humos.

En España no existe normativa específica sobre la seguridad ante incendios en túneles. Antes de la IOS98 no existía ningún documento obligatorio en que se fijasen los conceptos fundamentales a tener en cuenta para conseguir una seguridad suficiente. La IOS98, *Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de Obras Subterráneas para el transporte terrestre*, orden del 19 noviembre de 1998 de la Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transporte, sólo hace vagas referencias a este tema y no fija criterios de ventilación, exigencias de extracción, sistemas de seguridad,... El apartado V está destinado a las disposiciones de seguridad. Concretamente, para incendios, dedica las siguientes líneas en el apartado específico V.2.2.6:

“V.2.2.6 Incendio. Detección y extinción.- El túnel deberá estar equipado con los sistemas de detección y extinción de incendios que mejor se adapten a sus características.

El proyecto deberá recoger esta eventualidad y analizarla con todo detalle para incorporar en el diseño de las instalaciones, especialmente en el de la ventilación, los medios necesarios para evitar o al menos reducir al máximo los efectos que pueda producir el incendio.

El Manual de Explotación recogerá de forma pormenorizada las sucesivas actuaciones que será necesario acometer en el caso de incendio y las medidas permanentes de mantenimiento y conservación para que el sistema en su conjunto (ventiladores, detectores de fuego, tuberías, sistemas de comunicación, etc.), esté siempre en condiciones de servicio.”

Sin embargo, no existe un desarrollo de estas guías. Las comunidades autónomas únicamente han adaptado su normativa para hacer cumplir dicha norma, por ejemplo la orden del 27 de julio del 2000 de la Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte de la Comunidad Autónoma de Madrid para la *Aplicación de la Instrucción para el proyecto, construcción y*

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS98) a las obras subterráneas promovidas por la Comunidad de Madrid.

No obstante, a raíz de los accidentes ocurridos en túneles europeos de los últimos años, han surgido recomendaciones como la de la Dirección General de Carreteras de noviembre de 2001 que indican, modificando ligeramente la normativa francesa, que se debe proyectar la ventilación para:

- Controlar un incendio tipo de 30 MW, igual que en la normativa francesa.
- Evacuar un caudal de humos más exigente: 120 m³/s.

Sin embargo, no se impone una velocidad crítica para controlar el retorno de humos como si ocurre en Francia.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 - OBJETIVOS

El objetivo de la presente tesis es el desarrollo de un modelo que permita la simulación y análisis de situaciones accidentales con fuego. Se trata de predecir las consecuencias que tendrán lugar en un túnel ante la existencia de un fuego en su interior. Se busca que los resultados puedan ser empleados fácilmente en cualquier escenario o situación, con aplicaciones prácticas en la toma de decisiones a fin de aumentar la seguridad de los viajeros, tema del mayor interés en vista del enorme desarrollo de las obras en medio urbano e interurbano. El programa buscado pretende disminuir las necesidades de hardware. Los resultados del trabajo son fácilmente transferibles, ya que la simulación numérica realizada se ha hecho en *FORTRAN*, con compatibilidad en cualquier PC.

Se ha buscado la creación de un modelo zonal capaz de calcular las magnitudes fluidas de una forma simplificada mediante suposiciones sobre su distribución. Con dichas suposiciones se busca no tener que acudir a métodos como el *DNS* o el *LES*. En la actualidad cuando se quiere hacer una simulación sobre flujos turbulentos con combustión se acude a técnicas de mecánica de fluidos computacional que emplean modelos de combustión tales como el *k-ε-g* o el *eddy break-up*, que son los habitualmente empleados en códigos comerciales: *PHOENICS*, *FLUENT*, *CFX*,..., con un alto coste computacional en recursos y tiempo.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

El código buscado pretende que, con las mínimas necesidades de hardware, se logren los valores más significativos de las principales magnitudes, consiguiendo dichos resultados en un tiempo razonable de cálculo. Tanto en túneles ya construidos como los que se encuentran en fase de proyectos, las autoridades responsables y las de protección civil tendrían una forma de poder evaluar los riesgos de las instalaciones y crear los planes de actuación. Esta información sería la base para dar recomendaciones previas a la puesta en marcha del túnel o indicar modificaciones necesarias con vista a aumentar la seguridad.

La aplicación del modelo en proyectos de redes de comunicación por carretera, ferroviaria o transporte suburbano puede permitir conocer cual es la ventilación necesaria para cada situación de emergencia, sin necesidad de sobredimensionar el equipo de ventilación. Una ventilación excesiva es más cara pero sobre todo puede dar lugar a que se amplifique el efecto de la llama mediante una mayor aportación de oxígeno o un anclado de la misma ante la presencia de obstáculos o vehículos detenidos. El control de humos es vital para preservar las rutas de escape seguras determinadas por la concentración de sustancias nocivas, temperatura alcanzada y visibilidad que permita la huida. También indicará las necesidades en cuanto a refugios de protección para el caso de que exista gente atrapada en situaciones no abordables por los ventiladores disponibles. Actualmente se está revisando la normativa de seguridad de túneles y es posible que, ante la experiencia acumulada, la utilización de dichos refugios sea restringida.

Un sistema como el propuesto permitiría realizar estudios paramétricos rápidos y con bajo costo para definir *pautas de actuación* en múltiples casos de accidente. Estos resultados podrían ser incorporados al control automático del túnel a estudio como medidas a tomar en los primeros momentos, los cuales son claves en la etapa de salvamento. Otro posible uso se obtiene de la capacidad de predecir el campo de temperaturas, ya que si existen equipos sensibles, tales como: redes de transmisión de datos, fibra óptica, cámaras de vídeo, ... se puede saber cual será el lugar idóneo para que no se vean dañados o para que no contribuyan a la propagación y aumento de la intensidad del incendio al quemarse ellos mismos.

La principal aportación original de esta Tesis radica en la creación de un modelo híbrido entre los existentes, zonales y de campo, que, si bien esta dentro de los primeros, más simples y aplicables a casos particulares, reflejará con mayor exactitud lo que sucede en un incendio. Todo ello se puede lograr sin perder el carácter tridimensional de los resultados y

conservando, en ciertos aspectos, el carácter unidimensional de los cálculos para el penacho. De esta forma se consiguen resultados aplicables que, teniendo en cuenta múltiples fenómenos que aparecen en estos procesos, se obtienen en un tiempo corto de cálculo.

2.2 - HIPÓTESIS

Las hipótesis fundamentales que serán usadas, explicadas posteriormente con detenimiento, son:

- División del incendio en dos zonas: aguas arriba y abajo del impacto del penacho con el techo del túnel, con una zona de transición intermedia.
- El modelo de combustión se basa en lo siguiente:
 - La reacción química global es en una sola etapa.
 - Formación de hollín en dos etapas.
 - La reacción es infinitamente rápida. Por tanto el ritmo de reacción química es mucho mayor que la difusión.
 - La variación del término de presión y disipación viscosa son despreciables en la ecuación de la energía.
 - La temperatura y difusividades de las especies químicas son iguales.
 - El número de Mach es mucho menor que uno (para despreciar el término de energía cinética de la ecuación de la energía).
 - El número de Lewis es igual a la unidad.

Con lo anterior se consigue que las variables más importantes que intervienen en el proceso de combustión sean función de un escalar que se conserva.

- Perfiles autosemejantes de las magnitudes estudiadas aguas arriba del impacto con el techo.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Corriente unidireccional incompresible en la zona de difusión, aguas abajo del impacto con el techo. En esta zona se considera despreciable la disipación viscosa y el calor intercambiado por radiación en la ecuación de conservación de la energía.

CAPÍTULO 3

MEMORIA

3.1 - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se ha dividido el túnel a estudio en dos zonas, aguas arriba y abajo del impacto del penacho con el techo, junto con una zona de transición, figura 3.1. Esto permite no tener que tratar todas las ecuaciones que rigen los modelos que tradicionalmente se emplean para la resolución de problemas como el planteado, por ejemplo en el *k-ε turbulento*, Hernández, J., Crespo, A. y Duijm, N. J. (1995). La zona de transición en el impacto con el techo es la más problemática de modelizar

Se emplea un modelo de combustión basado en la introducción de un escalar que se conserva. Estas variables de Shvab-Zeldovich se obtienen anulando el término de reacción química en las ecuaciones de conservación de las especies con lo que aparecen iguales ecuaciones para distintas variables que relacionan las incógnitas del problema. Todas ellas se agrupan en la llamada fracción de mezcla, con la cual podremos conocer la temperatura y concentraciones de las especies químicas que aparecen en la combustión.

La llama turbulenta se trata como una suma de llamas laminares fluctuantes sometidas a estiramientos debidos a las velocidades de deformación del flujo turbulento. Este fenómeno origina gradientes de concentración pronunciados con lo que aumenta el ritmo con que los reactantes se difunden hacia la zona de reacción.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

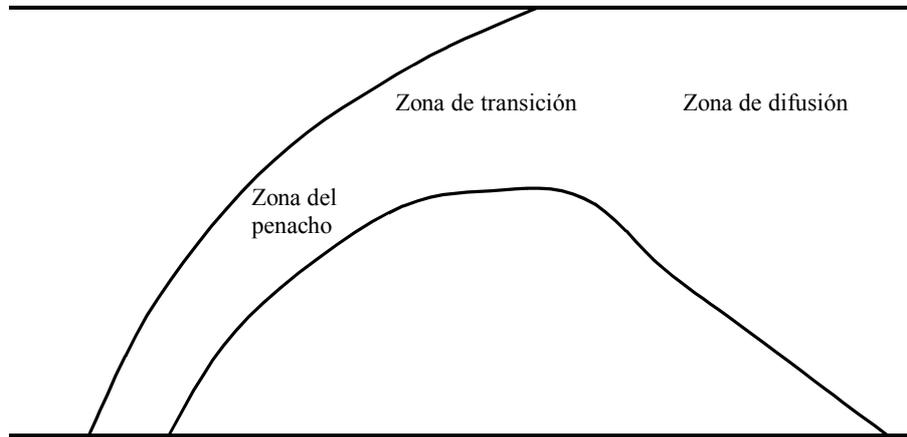


Figura 3.1: Zonas en que se divide la corriente de humos

En primera aproximación, el penacho se considera que adquiere un movimiento libre, sin que le afecten las paredes del túnel. En esta zona se trabaja con un modelo cuasi-unidimensional en que los perfiles de las magnitudes fluidas son autosemejantes en planos perpendiculares a la línea media del penacho. Las magnitudes fluidas se pueden obtener a partir de unos parámetros que únicamente son función de la distancia a lo largo de la línea media del penacho, tal como se estudia en Servert, J., Crespo, A. y Hernández, J. (1997). De esta forma, las ecuaciones de conservación en derivadas parciales se convierten en ecuaciones diferenciales ordinarias de la forma:

$$\frac{d}{ds} (\dot{m} \langle \tilde{\phi} \rangle) = \phi_a \dot{m}'_o + \Delta \Sigma_{\phi} + \dot{m}_a \frac{d\phi_a}{ds} \quad (3.1)$$

siendo ϕ cualquiera de las variables correspondientes a las ecuaciones de conservación (1 para la ecuación de conservación de la masa, u_i para cada componente de la velocidad, h es la entalpía, k la energía cinética turbulenta, ε la disipación de la energía cinética turbulenta, ξ la fracción de mezcla, $g = \xi'^2$ representa la varianza de ξ , $Y_{C(S)}$ la fracción másica hollín y N la densidad número de partículas). En régimen laminar, la ecuación de conservación de la masa, $\phi=1$, las tres de cantidad de movimiento, $\phi=u_i$, y la de la energía, $\phi=h$, forman un sistema cerrado de ecuaciones, ya que, empleando la ecuación de estado para relacionar las variables

termodinámicas, se tendría un sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas, por ejemplo las tres componentes de la velocidad, la presión y la temperatura. k y ϵ son necesarios para el cierre turbulento, la fracción de mezcla y su varianza para el modelo de combustión e $Y_{C(S)}$ y N para calcular la concentración de hollín en el estudio de la radiación. Además, en la ecuación 3.1, el subíndice a señala las propiedades del ambiente, \dot{m} y \dot{m}_a son la masa ficticia que atravesaría la sección recta del penacho con flujo uniforme cuando existen las propiedades del penacho o el ambiente respectivamente, s es la coordenada a lo largo de la línea media del penacho y \dot{m}_o la masa arrastrada desde el exterior del mismo. El término de la izquierda de la igualdad es el balance de entrada - salida al sistema, el primero de la derecha corresponde al arrastre desde el exterior, $\Delta\Sigma_\phi$ representa el término fuente (flotabilidad, radiación,...) y el último tiene en cuenta las variaciones de las propiedades del aire con la altura. En el presente estudio, al estar dentro de un túnel, este término es despreciable.

La radiación es un aspecto fundamental a la hora de tratar incendios, sobre todo si son confinados como es el caso a estudio. Se pondrá especial énfasis en el tratamiento de la emisividad debida al CO_2 y HO_2 , teniendo en cuenta sus bandas de rotación y vibración y empleando el método usado por Ashok y Modak (1979). En cuanto al hollín, se usará un modelo de formación de hollín según un mecanismo de dos etapas que considera tanto el efecto de la reacción química como de la mezcla, el hollín surge a través de distintos procesos partiendo de los productos intermedios de la pirólisis del hidrocarburo, principalmente del acetileno, Fairweather, M., Jones, W. P. y Lindstedt, R. P. (1992). Para calcular la masa de aire arrastrada desde el exterior del penacho se usa el modelo de Escudier, M. P. (1972), en el que el arrastre esta dominado por la turbulencia generada por el movimiento relativo chorro-flujo exterior.

Los volúmenes de control empleados en el penacho son troncos de cono que siguen la línea media del mismo. En las secciones perpendiculares a la línea media del penacho se supone que las magnitudes fluidas presentan una distribución gaussiana derivada del perfil *top-hat*. En dicho perfil, figura 3.2, las propiedades fluidas adquieren dos posibles valores uniformes según estén dentro o fuera del tronco de cono calculado en cada posición. Para hacer la transformación del perfil *top-hat* al gaussiano se pueden emplear coeficientes adimensionales calculados por Servert, 1993 y 1997. En la presente tesis se propone una forma directa de cálculo mediante la integración directa en el perfil considerado.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

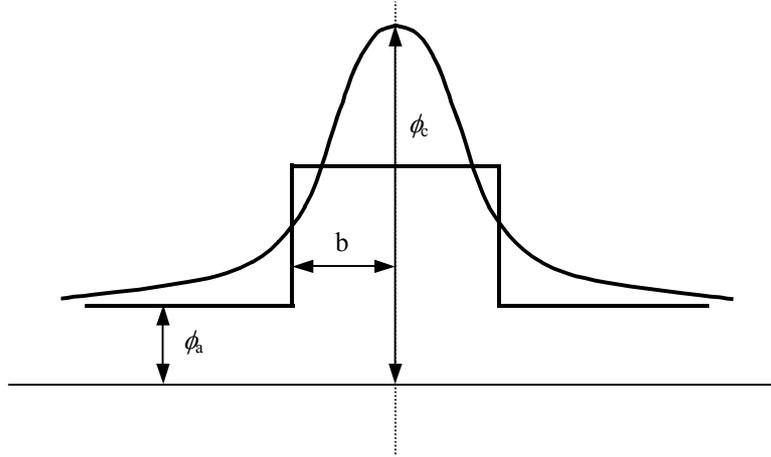


Figura 3.2: Perfiles *top-hat* y gaussiana.

El flujo de la segunda zona, figura 3.1, que consiste esencialmente en la difusión de gases calientes, se tomará como una corriente unidireccional (en el sentido de la ventilación) que ha alcanzado la velocidad de régimen impuesta por los ventiladores. Si la temperatura de los gases fuese aún tan alta como para modificar de forma significativa la densidad, habría que recalcular la velocidad supuesta para que se satisficiera la ecuación de conservación de masa. Se resolverá la ecuación estacionaria de la energía despreciando la disipación viscosa y la difusión en la dirección de avance del viento frente a la variación convectiva en dicha dirección. Se presentara una versión estacionaria del problema, en la que se retiene la difusión en el sentido longitudinal y se desprecian las de las direcciones de la sección transversal a la dirección de la corriente de aire.

La ecuación que gobierna la difusión presenta un comportamiento parabólico. Las condiciones de contorno se imponen en el techo, las paredes, el suelo y en la sección perpendicular a la dirección longitudinal del túnel situada en donde impacta el penacho con el techo. En esta primera sección de cálculo para la zona de difusión, dentro del área intersección del penacho con dicha sección, se imponen las temperaturas obtenidas en el modelo cuasi-unidimensional. En el resto del plano de contorno, se supone temperatura ambiente, figura 3.3.

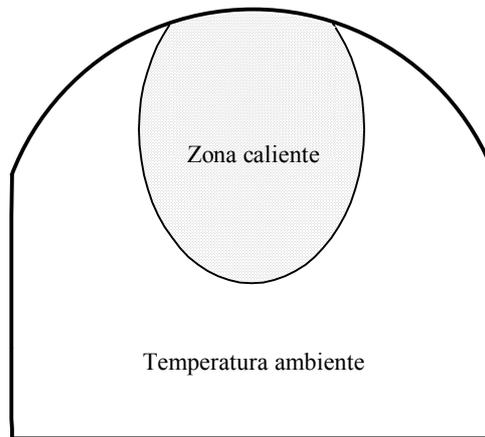


Figura 3.3: condiciones de cálculo en la zona de difusión.

3.2 - COMBUSTIÓN

Su tratamiento está basado en la introducción de un escalar que se conserva, denominado fracción de mezcla. El incendio que se trata de simular consiste en una llama turbulenta de difusión que será descrita mediante distribuciones de valores medios de las distintas magnitudes fluidas. Se considera que es suma de llamas laminares fluctuantes sometidas a estiramientos debidos a las velocidades de deformación del flujo turbulento. Los gradientes de concentraciones pronunciados que se producen aumentan el ritmo con que los reactantes se difunden hacia la zona de reacción. Para mayor información consultar Williams, 1985. En el anexo II se presenta un resumen general de los modelos **k-ε-g** y **eddy break-up** para el estudio de modelos turbulentos con combustión.

3.2.1 – COMBUSTIÓN LAMINAR

Hay distintas hipótesis necesarias en el modelo. Se supone que la reacción de combustión es infinitamente rápida y se produce en una sola etapa de la forma de la ecuación siguiente:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



donde r es la relación estequiométrica (kgOx/kgfuel), de esta forma el ritmo de reacción química es mucho mayor que la difusión. En lo que sigue, cuando sea necesario definir el fuel, se tomará como combustible un hidrocarburo cualquiera de la forma C_nH_m , en el cuál por cada molécula de combustible existirán n átomos de carbono y m de hidrógeno.

Se considera la disipación viscosa despreciable, así como las fluctuaciones de la presión con el tiempo, $\partial p/\partial t$, en la ecuación de la energía. La temperatura y difusividad de las especies químicas se toman como iguales. El número de Mach será mucho menor que uno mientras que el de Lewis ($\rho D_f c_p/k$) será la unidad, es decir $k/c_p = \rho D_f$. Es posible agrupar las ecuaciones de las distintas especies químicas, mediante la adecuada combinación lineal de las mismas, de manera que se eliminen los términos de reacción química. De esta forma surgen unas nuevas variables denominadas de Schvab-Zeldovich, Z_{especies} . Esto mismo se puede conseguir agrupando la ecuación de la energía con la de conservación del combustible, $Z_{\text{temperatura-combustible}}$. Se consigue agrupar la temperatura y concentraciones en una serie de variables que deben cumplir la misma ecuación 3.3.

$$\left. \begin{aligned} Z_{TF} &= \frac{c_p T}{Q} + Y_F \\ Z_{FO} &= Y_F - \frac{Y_o}{r} \\ Z_{FP} &= Y_F + \frac{Y_P}{r+1} \\ Z_{OP} &= \frac{Y_o}{r} + \frac{Y_P}{r+1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial t} + \bar{v} \nabla Z \right) = \text{div}(\rho D \nabla Z) \quad (3.3)$$

donde c_p es el calor específico, T la temperatura, ρ la densidad, D la difusividad, Q el calor de combustión y las Y las concentraciones de cada especie. Los subíndices indican: P=producto, F=fuel y O=oxígeno. Mediante la normalización de las variables “ Z ” anteriores se llega a una única variable, ξ , denominada fracción de mezcla, ecuación 3.4. Sus condiciones de contorno se definen en las regiones donde sólo hay oxidante o combustible. Entre dichos extremos, la fracción de mezcla tomará un valor determinado por donde esté localizada la llama. Si las concentraciones de oxidante y combustible están en la proporción justa para que se produzca la

reacción completa, de forma que sólo queden productos, se da la mezcla estequiométrica, subíndice st. De esta forma es posible determinar los valores de todas las concentraciones y de la temperatura con solo conocer ξ .

$$\xi = \frac{z - z_\infty}{z_1 - z_\infty} = \frac{rY_F - Y_O + Y_{O_\infty}}{r + Y_{O_\infty}} \Rightarrow \begin{cases} \text{oxidante} \Rightarrow \xi = 0 \begin{cases} Y_F = 0 \\ Y_{O_\infty} = 0.231 \end{cases} \\ \text{mezcla estequiométrica} \Rightarrow \xi_{st} = \frac{Y_{O_\infty}}{r + Y_{O_\infty}} \\ \text{fuel} \Rightarrow \xi = 1 \begin{cases} Y_F = 1 \\ Y_O = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3.4)$$

Para el caso laminar, las suposiciones anteriores llevan a la imposibilidad de convivencia de los reactantes $Y_O \cdot Y_F = 0$. La temperatura y las concentraciones de cada especie en función del valor de ξ se representa en la figura 3.4 y en la ecuación 3.5.

$$\xi > \xi_{st} \Rightarrow \begin{cases} Y_F = \frac{\xi - \xi_{st}}{1 - \xi_{st}} \\ Y_O = 0 \\ Y_p = (r+1) \frac{\xi_{st}(1-\xi)}{1-\xi_{st}} \\ T = T_f - (T_f - T_1) \frac{\xi - \xi_{st}}{1 - \xi_{st}} \end{cases} ; \xi < \xi_{st} \Rightarrow \begin{cases} Y_F = 0 \\ Y_O = \frac{\xi_{st} - \xi}{\xi_{st}} Y_{O_\infty} \\ Y_p = (r+1)\xi \\ T = T_\infty + \xi \frac{T_f - T_\infty}{\xi_{st}} \end{cases} \quad (3.5)$$

donde T_f es la temperatura de combustión adiabática ($\xi = \xi_{st}$), definida por la ecuación 3.6.

$$T_f = \xi_{st} \left(T_0 + \frac{Q}{c_p} - T_\infty \right) + T_\infty \quad (3.6)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

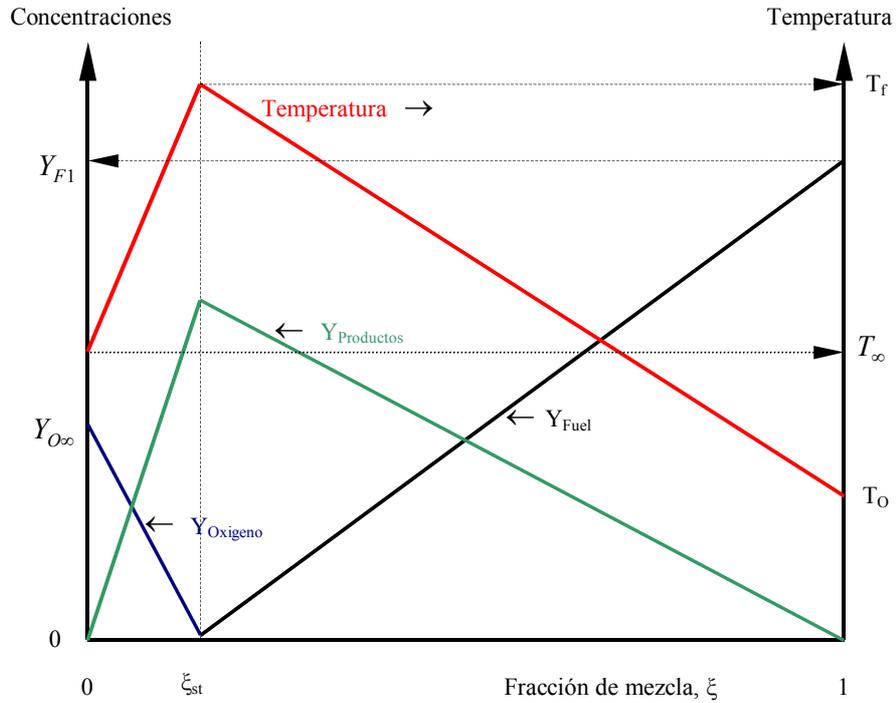


Figura 3.4: Distribución de concentraciones y temperaturas para el caso laminar.

Para una temperatura ambiente de 285K, una temperatura del combustible de 360K y un combustible compuesto de heptano puro, $Q = 4.8 \cdot 10^7$ J/kg, la fracción de mezcla estequiométrica vale 0.06195 y la temperatura de combustión adiabática 3520K.

Sivathanu, 1990, propuso un método alternativo basándose en la existencia de equilibrio termodinámico y comparando con medidas experimentales. Este procedimiento es válido para cualquier tipo de hidrocarburo de la forma C_nH_m , con $1 \leq m/n \leq 4$. Para ello se definen las funciones Ψ , *generalized state relationship*, siguientes:

$$\Psi(CO) = \frac{44n - M_f Y_{CO_2s}}{44n - M_f Y_{CO}} \frac{Y_{CO}}{Y_{CO_2s}} \quad (3.7)$$

$$\Psi(CO_2) = \frac{44n - M_f Y_{CO_2s}}{44n - M_f Y_{CO_2}} \frac{Y_{CO_2}}{Y_{CO_2s}} \quad (3.8)$$

$$\Psi(O_2) = \frac{32n + 8m + M_f Y_{O_2\infty}}{32n + 8m + M_f Y_{O_2}} \frac{Y_{O_2}}{Y_{O_2\infty}} \quad (3.9)$$

$$\Psi(H_2O) = \frac{9m - M_f Y_{H_2O_s}}{9m - M_f Y_{H_2O}} \frac{Y_{H_2O}}{Y_{H_2O_s}} \quad (3.10)$$

obteniéndose dichas funciones generalizadas en función del factor equivalente de combustible, ϕ , siguiente:

$$\phi = \frac{\left(\frac{m_f}{m_a} \right)_{real}}{\left(\frac{m_f}{m_a} \right)_{estequimetrica}} = \frac{\xi}{(1-\xi)} \frac{(1-\xi_{st})}{\xi_{st}} \quad (3.11)$$

La relación entre este conjunto de variables viene dada en la tabla 3.1. Estos valores tienen una forma parecida a los de la figura 3.4, y se corresponden casi exactamente con los de la ecuación 3.5 y con experimentos cuando $\xi < \xi_{st}$. En cambio, cuando $\xi > \xi_{st}$, las relaciones de la ecuación 3.5 dan mejor aproximación. Por ello, en lo que sigue, se usará dicha relación en lugar del método de Sivathanu.

Respecto a la temperatura, Sivathanu no da ninguna función generalizada. Para el caso del gas natural, basándose en resultados experimentales, obtiene la figura 3.5. Dicha figura habría que compararla con la 3.4 o con la ecuación 3.5.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

ϕ	$\psi(N_2)$	$\psi(O_2)$	$\psi(\text{Fuel})$	$\psi(\text{CO}_2)$	$\psi(\text{H}_2\text{O})$	$\psi(\text{CO})$	$\psi(\text{H}_2)$
0'01	100'0	0'990	0'000	0'01	0'01	0'000	0'0000
0'02	50'00	0'980	0'000	0'02	0'02	0'000	0'0000
0'05	20'00	0'950	0'000	0'05	0'05	0'000	0'0000
0'10	10'00	0'900	0'000	0'10	0'10	0'000	0'0000
0'20	5'000	0'800	0'000	0'20	0'20	0'000	0'0000
0'50	2'000	0'510	0'000	0'48	0'50	0'015	0'0000
0'80	1'250	0'250	0'000	0'70	0'78	0'030	0'0040
1'00	1'000	0'110	0'000	0'80	0'96	0'115	0'0080
1'50	0'667	0'065	0'000	0'82	0'98	0'250	0'0180
2'00	0'500	0'051	0'028	0'80	0'97	0'300	0'0220
5'00	0'200	0'041	0'185	0'58	0'86	0'260	0'0220
10'0	0'100	0'035	0'330	0'40	0'70	0'180	0'0200
20'0	0'050	0'025	0'550	0'27	0'49	0'125	0'0170
50'0	0'020	0'018	0'750	0'14	0'23	0'070	0'0120
100'0	0'010	0'008	0'870	0'06	0'13	0'040	0'0094

Tabla 3.1: Valores de relaciones de estado generalizadas para C_nH_m -aire (o mezcla N_2 - H_2) en llamas de difusión

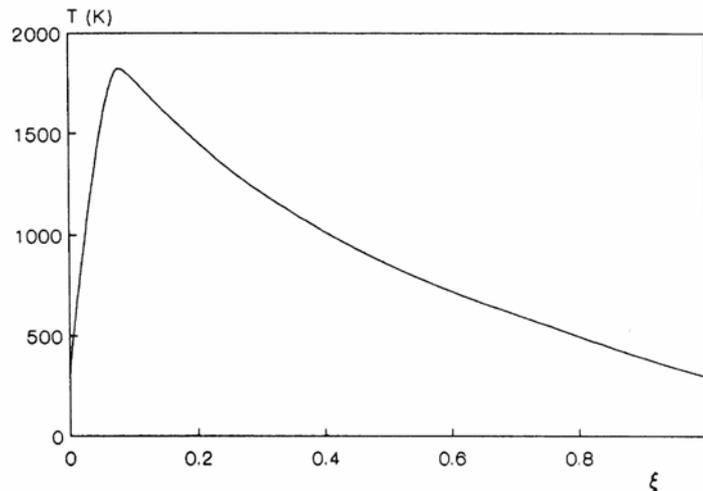


Figura 3.5. Distribución de la temperatura en función de la fracción másica cuando el combustible es gas natural. Sivathanu, 1990.

3.2.2 – COMBUSTIÓN TURBULENTA

Para el caso turbulento, se opera con los valores medios de las variables. En caso de que haya cambios importantes de densidad, conviene operar con la media Favre, donde todas las magnitudes excepto la presión se ponderan con la masa, es decir:

$$\tilde{\phi} = \frac{\overline{\rho\phi}}{\bar{\rho}} \quad (3.12)$$

Por tanto, nos encontramos con que no es suficiente conocer los valores medios de la fracción de mezcla, ya que la media tanto de la temperatura como de las concentraciones no será igual a la temperatura y concentración correspondiente a la media de las fracciones de mezcla, ecuación 3.13.

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_x(\xi) &\neq Y_x(\xi) \\ \tilde{T}(\xi) &\neq T(\xi) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Para calcular los valores medios debemos conocer la distribución espacial y temporal de la función de densidad de probabilidad (pdf) de la fracción de mezcla, $P(\xi)$, ecuación 3.14. En este trabajo se supone que $P(\xi)$ tiene una forma predeterminada, que se calcula mediante un cierto número de parámetros obtenidos a través del método de los momentos aplicados al escalar que se conserva. Concretamente se calculará a partir del valor medio de ξ y de su varianza, tal como se indica en el anexo II.

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_i &= \frac{1}{\bar{\rho}} \int_0^1 Y_i(\xi) \rho(\xi) P(\xi) d\xi \\ \tilde{T} &= \frac{1}{\bar{\rho}} \int_0^1 T(\xi) \rho(\xi) P(\xi) d\xi \\ \bar{\rho} &= \int_0^1 \rho(\xi) P(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (3.14)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

En llamas turbulentas de difusión el término *unmixedness* es utilizado como una medida de la diferencia entre el valor medio de una variable y el valor de esa variable para la media de la fracción de mezcla, es decir, $\bar{Y}_x - Y_x(\xi)$ y $\bar{T} - T(\xi)$. Existen distintas formas de medir esas diferencias. Bilger, 1980, las calcula partiendo de J, la *unmixedness integral*:

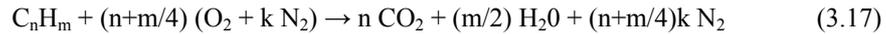
$$J\left(\frac{\xi_{st} - \xi}{\xi}\right) = \int_0^{\xi_{st}} \frac{\xi_{st} - \xi}{\xi} \bar{P}(\xi) d\xi - H(\xi_{st} - \xi) \frac{\xi_{st} - \xi}{\xi} \quad (3.15)$$

donde H es la función escalón unitaria de Heaviside y ξ^2 (=g) la varianza de la fracción de mezcla. Esta última representa la amplitud de las oscilaciones turbulentas de la fracción de mezcla. Bilger, 1980, calculó el valor de J para diferentes tipos de pdf y encontró que es insensible para valores de fracción de mezcla media cercanos a la estequiométrica (st). Para valores lejanos si afecta pero en este caso la corrección por J es pequeña. Mudford, 1989, ha propuesto la correlación experimental de la ecuación II.62 del anexo II.

En esta tesis se calculará J directamente a partir del valor obtenido de P(ξ) utilizando la ecuación 3.15. La pdf usada será una de las más simples, consistente en dos funciones delta, α y $(1-\alpha)$, localizadas respectivamente en $\xi = \xi_1$ y en $\xi = \xi_2$. Los parámetros ξ_1 , ξ_2 y α de la distribución pueden determinarse a partir de la fracción de mezcla y su varianza, ya que estos dos valores se pueden a su vez calcular integrando la pdf, ecuación 3.16. La solución de este problema se presenta en las ecuaciones de la II.66 a la II.71 del anexo II.

$$P(\xi) = \alpha\delta(\xi - \xi_1) + (1-\alpha)\delta(1 - \xi_2) \left\{ \begin{array}{l} \bar{\xi} = \int_0^1 \xi P(\xi) d\xi = \alpha\xi_1 + (1-\alpha)\xi_2 \\ \bar{g} = \int_0^1 (\xi - \bar{\xi})^2 P(\xi) d\xi = \alpha(1-\alpha) \cdot (\xi_1 - \xi_2)^2 \end{array} \right. \quad (3.16)$$

Para un combustible de la forma C_nH_m , la reacción química más general que origine combustión completa es:



donde k es el número de moles de N_2 por mol de O_2 en la corriente de oxidante (para aire seco vale 3'76). Para el caso más general en el que en la corriente de combustible exista una

concentración de fuel Y_{F1} y de oxígeno Y_{O21} , los valores de la concentración de cada especie y la temperatura valen:

$$\tilde{Y}_F = Y_F(\tilde{\xi}) + \frac{Y_{F1}}{1 - \xi_{st}} \hat{\xi} J \left(\frac{\xi_{st} - \tilde{\xi}}{\tilde{\xi}} \right) \quad (3.18)$$

$$\tilde{Y}_{O_2} = r \cdot \tilde{Y}_F + \tilde{Y}_{O_21} - \tilde{\xi} (r + \tilde{Y}_{O_21}) \quad (3.19)$$

$$\tilde{Y}_{N_2} = (\tilde{\xi} - \tilde{Y}_F) \frac{PM_{N_2} \cdot (n + m/4)}{PM_F} \cdot \frac{\tilde{Y}_{N_21} / PM_{N_2}}{\tilde{Y}_{O_21} / PM_{O_2}} + \tilde{Y}_{O_2} \frac{\tilde{Y}_{N_21}}{\tilde{Y}_{O_21}} \quad (3.20)$$

siendo el primer sumando el correspondiente al oxígeno que va a ser consumido y el segundo al exceso del mismo que pueda existir.

$$\tilde{Y}_{H_2O} = (\tilde{\xi} - \tilde{Y}_F) \frac{PM_{H_2O} \cdot m/2}{PM_F} \quad (3.21)$$

$$\tilde{Y}_{CO_2} = (\tilde{\xi} - \tilde{Y}_F) \frac{PM_{CO_2} \cdot n}{PM_F} \quad (3.22)$$

$$\tilde{T} = T(\tilde{\xi}) - \frac{T(\xi_{st}) - T_\infty}{\xi_{st} (1 - \xi_{st})} \hat{\xi} J \left(\frac{\xi_{st} - \tilde{\xi}}{\tilde{\xi}} \right) \quad (3.23)$$

Por todo esto, la distribución de concentraciones y temperatura en el caso turbulento no es la representada por la figura 3.4. Dicha figura se vería sustituida por la 3.6. En ella se observa como en valor medio, no en el instantáneo, pueden convivir ciertas cantidades de combustible con oxidante, tanto para fracción de mezcla menor como mayor que la estequiométrica.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

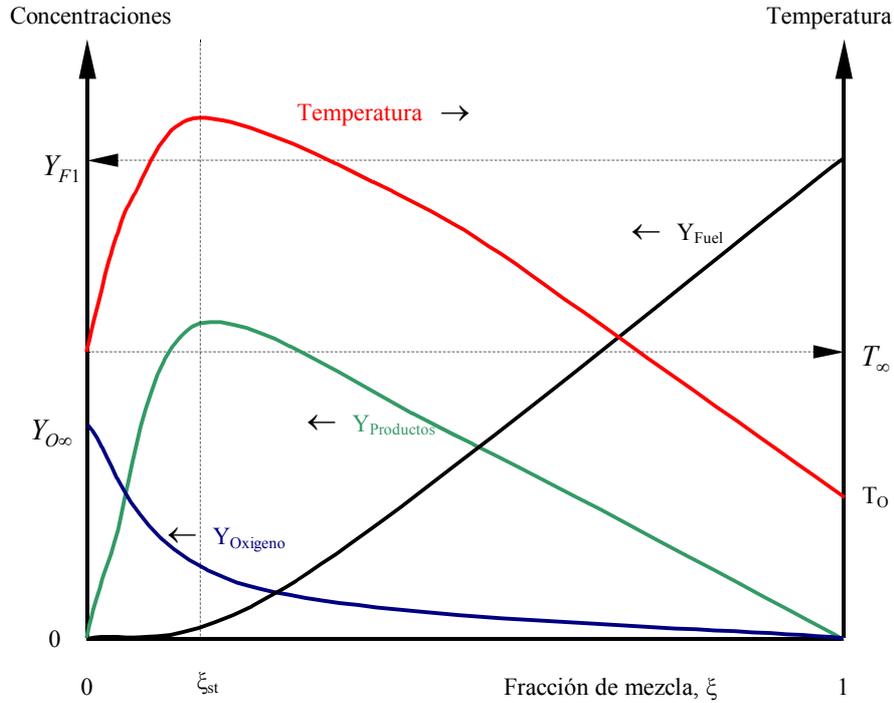


Figura 3.6: Distribución de concentraciones y temperaturas para el caso turbulento.

3.3 - PENACHO

En esta zona del incendio se considera flujo permanente (incendio y ventilación en régimen) junto con movimiento libre al suponer que no afectan las paredes del túnel. Se emplea un modelo cuasi-unidimensional, Servert 1993 y Servert y otros 1997, con perfiles autosemejantes para las magnitudes fluidas en planos perpendiculares a la línea media del penacho, figura 3.7. Para ello se definen los valores medios, $\langle \rangle$, mediante:

$$m(\langle \tilde{\phi} \rangle - \phi_a) = \lim_{A_b \rightarrow \infty} \int_{A_b} \rho u_n (\tilde{\phi} - \phi_a) dA \quad (3.24)$$

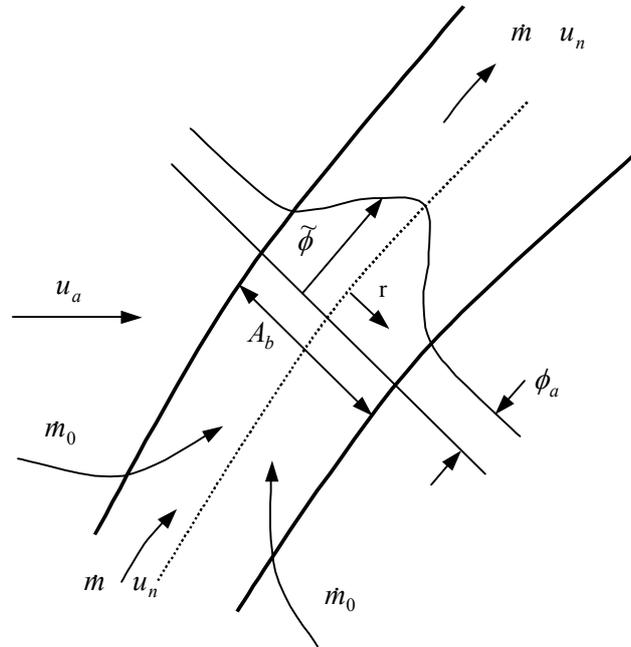


Figura 3.7: Esquema del modelo cuasi-unidimensional en el penacho.

En la ecuación 3.24, el subíndice a señala las propiedades del ambiente y n la dirección de la línea media del penacho. ϕ toma el valor de cualquiera de las variables correspondientes a las ecuaciones de conservación menos a la de la masa:

- u_i , velocidad en la dirección i .
- h , entalpía.
- k , energía cinética turbulenta.
- ε , disipación de energía cinética turbulenta.
- ξ , fracción de mezcla.
- $g = \tilde{\xi}^2$, varianza de fracción de mezcla.
- $Y_{C(S)}$, fracción másica de hollín.
- N , densidad número de partículas.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Para la masa se usa la ecuación 3.25.

$$\dot{m} - \dot{m}_a = \lim_{A_b \rightarrow \infty} \int_{A_b} (\rho u_n - \rho_a u_{an}) dA \quad (3.25)$$

siendo \dot{m} y \dot{m}_a la masa ficticia que atravesaría la sección recta con flujo uniforme y propiedades las del penacho o el ambiente respectivamente. Una relación adicional, necesaria para completar el sistema de ecuaciones, es:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_a} = \frac{\langle \rho \rangle \langle \tilde{u}_n \rangle}{\rho_a u_{an}} \quad (3.26)$$

Con todo lo anterior, las ecuaciones de conservación pueden simplificarse al modelo cuasi-unidimensional. En dicho modelo, las magnitudes fluidas sólo son función de la distancia a lo largo de la línea media del penacho. Dicha línea está contenida en un plano vertical que es paralelo a la dirección del viento incidente. Sus ecuaciones de conservación se convierten en ecuaciones diferenciales ordinarias de la forma ya indicada en la ecuación 3.1.

$$\frac{d}{ds} (\dot{m} \langle \tilde{\phi} \rangle) = \dot{m}_a \dot{m}'_o + \Delta \Sigma_\phi + \dot{m}_a \frac{d\phi_a}{ds} \quad (3.1)$$

donde s es la coordenada a lo largo de la línea media del penacho, \dot{m}'_o la masa arrastrada desde el exterior del mismo y $\Delta \Sigma_\phi$ los términos fuentes y sumideros correspondientes a la variable ϕ . Según el valor de dicha variable, se obtienen las distintas ecuaciones de conservación:

- El sistema clásico de ecuaciones diferenciales para mecánica de fluidos lo forman las ecuaciones de conservación de masa ($\phi=1$), cantidad de movimiento ($\phi=u_i$) y energía ($\phi=h$). La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento son realmente tres ecuaciones, una en cada dirección del espacio. Para el problema cuasi-unidimensional planteado, esas tres ecuaciones se reducen a dos. Existe simetría en un plano que contenga la línea media del penacho y la dirección del viento incidente. Por tanto, sólo habrá que calcular el movimiento en la dirección x (la dirección del aire) y z (la

dirección vertical de la gravedad) de la figura 3.8. Se supone que la componente de la velocidad en la dirección perpendicular al plano de simetría, dirección y , es nula.

- Para cerrar el sistema cuando existe turbulencia, es necesario introducir las ecuaciones de conservación de la energía cinética turbulenta ($\phi=k$) y la disipación viscosa ($\phi=\varepsilon$).
- Con el modelo de combustión empleado, surgen dos nuevas incógnitas que originan dos nuevas ecuaciones de conservación; la de la fracción de mezcla ($\phi=\xi$) y la de su varianza ($\phi=g = \xi'^2$)
- Como se verá en apartados sucesivos, en el término fuente de la ecuación de conservación de la energía es necesario conocer la emisividad. Para poder calcularla se debe conocer el valor de dos nuevas variables que llevan a necesitar resolver dos nuevas ecuaciones; la conservación de la fracción másica de hollín ($\phi=Y_{C(S)}$) y la densidad número de partículas ($\phi=N$).

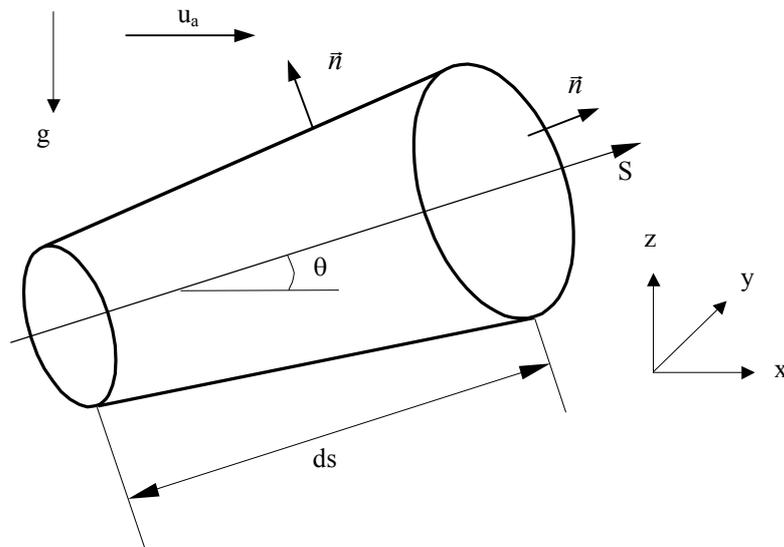


Figura 3.8: Volúmenes de control en el penacho.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

El cálculo de \dot{m}_o se realiza mediante el modelo de Escudier, 1972. Este supone que el arrastre esta dominado por la turbulencia generada debida al movimiento relativo chorro - flujo exterior, caracterizado por las velocidades relativas. Su expresión matemática es:

$$\dot{m}_o = 2\pi b \rho_a \sqrt{\frac{\langle \rho \rangle}{\rho_a}} (\alpha |\langle \tilde{u} \rangle - u_a \cos \theta| + \beta |u_a \sin \theta|) \quad (3.27)$$

con $\alpha=0.057$ y $\beta=0.5$. Ambas constantes tienen en cuenta detalles a gran escala de la estructura del chorro y aquellos asociados a la naturaleza del flujo. La primera multiplica a la diferencia entre la velocidad del penacho y el aire en la dirección paralela a s y la segunda a la componente del aire perpendicular a dicha dirección. Esta última es la responsable de la recirculación en torbellinos que introduce más masa al penacho. El término $(\langle \rho \rangle / \rho_a)^{1/2}$ fue sugerido por Ricou y Spalding, 1970, para chorros en los que este cociente sea mucho menor que la unidad (cierto en las llamas). Cuando se le multiplica por la densidad del ambiente queda $(\rho_a \langle \rho \rangle)^{1/2}$, es decir, la media geométrica de las dos densidades.

Las 10 ecuaciones de conservación a resolver para calcular otras tantas incógnitas son:

$$\frac{d\dot{m}}{ds} = \dot{m}_o \quad (3.28)$$

$$\frac{d(\dot{m} \langle \tilde{u}_x \rangle)}{ds} = u_a \dot{m}_o \quad (3.29)$$

$$\frac{d(\dot{m} \langle \tilde{u}_z \rangle)}{ds} = \Delta \Sigma_{u_z,1} - \Delta \Sigma_{u_z,2} \quad (3.30)$$

$$\frac{d(\dot{m} \langle \tilde{h} \rangle)}{ds} = h_a \dot{m}_o + \Delta \Sigma_h \quad (3.31)$$

$$\frac{d(\dot{m} \langle \tilde{k} \rangle)}{ds} = k_a \dot{m}_o + \Delta \Sigma_k \quad (3.32)$$

$$\frac{d(\dot{m} \langle \tilde{\varepsilon} \rangle)}{ds} = \varepsilon_a \dot{m}_o + \Delta \Sigma_\varepsilon \quad (3.33)$$

$$\frac{d(\dot{m}\langle\tilde{\xi}\rangle)}{ds} = \xi_a \dot{m}_o = 0 \quad (3.34)$$

$$\frac{d(\dot{m}\langle\tilde{g}\rangle)}{ds} = \Sigma_g \quad (3.35)$$

$$\frac{d(\dot{m}\langle\tilde{Y}_{C(S)}\rangle)}{ds} = \Delta\Sigma_{YC(S)} \quad (3.36)$$

$$\frac{d(\dot{m}\langle\tilde{N}\rangle)}{ds} = \Delta\Sigma_N \quad (3.37)$$

con $dh = c_p dT + QdY_F$, Q es el poder calorífico del combustible. En el sistema de ecuaciones anterior sólo quedan por definir los términos fuente, lo cuál se tratará en el siguiente apartado.

Se toma al aire como una corriente paralela a la dirección longitudinal del túnel. La posición de la línea media viene dada por la tangente a la trayectoria del penacho, es decir:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\langle\tilde{u}_z\rangle}{\langle\tilde{u}_x\rangle} \quad (3.38)$$

Los volúmenes de control son troncos de conos que siguen la línea media del penacho, figura 3.8. Sobre cada una de sus superficies las magnitudes fluidas son consideradas uniformes. En las secciones perpendiculares a la línea media del penacho se supone que las magnitudes fluidas presentan una distribución gaussiana derivada del perfil *top-hat*:

$$\tilde{\phi} - \phi_a = (\phi_c - \phi_a) \exp\left(-\left(r/d\right)^2\right) \quad (3.39)$$

para ϕ igual a u_x , u_z , k , ε , ξ , g , h , T , $Y_{C(S)}$ y N . Con ϕ_c el valor en el centro, d un parámetro de la distribución y r la distancia al centro en un plano perpendicular a la línea media, ver figuras 3.2 y 3.7.

Aplicando las definiciones de las medias ya descritas y las hipótesis de unicidad del número de Schmith y presión constante, Servert,1993, demostró que se cumple la ecuación siguiente:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\alpha = \frac{d^2}{b^2} = \frac{\langle \tilde{\phi} \rangle - \phi_a}{\phi_c - \phi_a} \quad (3.40)$$

siendo b un radio equivalente para el penacho cuando tuviese una distribución *top-hat*, ecuación 3.41.

$$b = \sqrt{\frac{m}{\rho_m \langle \tilde{u} \rangle}} \quad (3.41)$$

donde la densidad, ρ_m , se calcula a través de la relación de estado de gases perfectos:

$$\rho_m = \frac{P}{R_g \langle \tilde{T} \rangle} \quad (3.42)$$

siendo P la presión y R_g la constante del gas (constante universal, 8'314 J/molK, dividida por el peso molecular del gas, kg/mol). De esta forma calculando α podremos calcular los parámetros de las variables que restan (no sirve ni para la temperatura ni para la concentración de las especies). Así, podremos definir la distribución gaussiana y con ella el perfil a lo largo del penacho. También de los trabajos de Servert se obtiene el valor de dicha variable α en función de la fracción de mezcla a través de la expresión:

$$\alpha = \frac{F_1}{F_0} \quad (3.43)$$

en la que las funciones F_1 y F_0 están dadas en el apartado 3.3.1.8.

Una representación típica de α se presenta en la figura 3.9. Se trata de una combustión con heptano, en el que t_F vale 11'4. t_F es la temperatura de combustión adiabática normalizada, dada en la ecuación 3.44. En la figura 3.9 se observa que, cuando la perturbación sobre el flujo básico se hace pequeña, $\xi_c \rightarrow 0$, α tiende a 0'5, la cual es una aproximación clásica cuando se realiza el paso de perfil *top-hat* a gaussiano o para obtener perfiles equivalentes. Se corresponde

con una linealización hasta primer orden de las ecuaciones que definen en su forma integral a α . Además se ve como el mínimo valor de α se obtiene para valores ligeramente superiores de la fracción de mezcla estequiométrica.

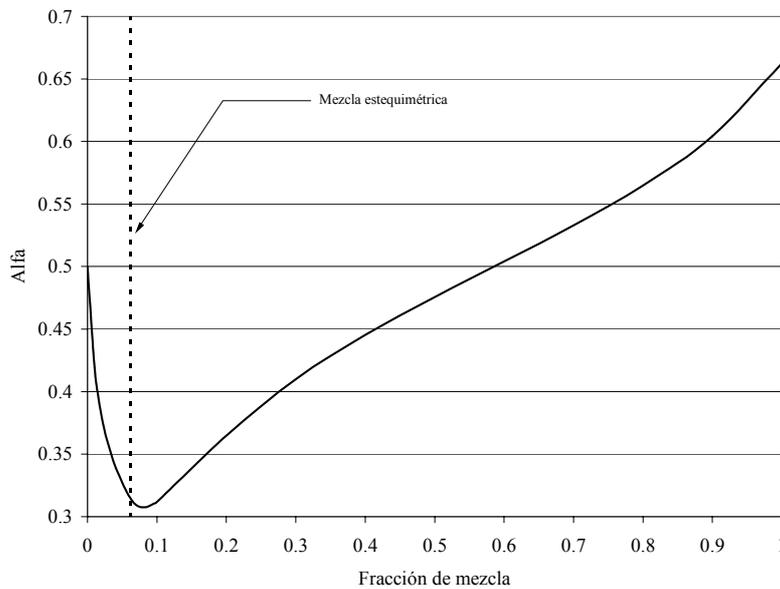


Figura 3.9: α en función de ξ para heptano con $t_F = T_F / T_a = 11'4$.

$$t_F = \frac{T_F}{T_a} \quad (3.44)$$

3.3.1 - TÉRMINOS FUENTE

En el sistema formado por las ecuaciones de la 3.28 a la 3.37, faltan por definir los términos fuente-sumidero, $\Delta\Sigma$. En las expresiones integrales completas que los calculan aparecen, en cada sección de cálculo del modelo cuasi-unidimensional, los valores de las distintas variables que intervienen. En la presente tesis se propone un método directo para

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

calcular los términos fuente mediante integración directa de las ecuaciones que los definen, haciendo el paso de perfil *top-hat* a gaussiano comentado en el apartado anterior.

No obstante, también se ha optado por incluir en el programa de cálculo, como alternativa, el procedimiento seguido por dicho Servert, 1993, para obtener algunos de estos mismos términos fuente: ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento vertical, energía cinética turbulenta y varianza del escalar pasivo. Se trata de relacionar los valores medios de las magnitudes fluidas con $\Delta\Sigma_{uz1}$, $\Delta\Sigma_k$ y Σ_g . Los términos fuente son función de las condiciones ambiente que varían con la altura y los parámetros ϕ_c y R, que caracterizan el paso del perfil *top-hat* al deseado (se emplea el gaussiano). Estos se relacionan a su vez con los valores puntuales y el radio del penacho. Por tanto, se pueden definir unos parámetros α_ϕ tales que:

$$\Delta\Sigma_\phi = (S_\phi - S_{\phi a})\pi b^2 = \alpha_\phi (S_\phi(\langle\tilde{\phi}\rangle) - S_{\phi a})\pi b^2 \quad (3.45)$$

donde ϕ puede valer u_z , k y g . De esta forma, las ecuaciones de conservación se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\frac{d}{ds}(m\langle\tilde{\phi}\rangle) = m'_o\phi_a + m_a \frac{d\phi_a}{ds} + \alpha_\phi (S_\phi(\langle\tilde{\phi}\rangle) - S_{\phi a})\pi b^2 \quad (3.46)$$

Servert, 1993, propuso las expresiones para calcular esas funciones α_ϕ , que se dan en el apartado 3.3.1.8.

3.3.1.1 – ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO VERTICAL

El termino fuente correspondiente a la cantidad de movimiento vertical se divide en dos. El término habitual, $\Delta\Sigma_{uz1}$, está originado por la diferencia de densidades entre el penacho y el ambiente. El componente nuevo, propuesto en la presente tesis, $\Delta\Sigma_{uz2}$, está causado por el efecto de frenado que origina el techo. El término fuente global será la suma de los dos:

$$\Delta\Sigma_{u_z} = \Delta\Sigma_{u_z1} + \Delta\Sigma_{u_z2} \quad (3.47)$$

Como se han despreciado las variaciones transversales de la presión, en el término fuente habitual de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento vertical únicamente aparece el efecto de la flotabilidad. Dicho término corresponde a la diferencia de densidades entre el ambiente y el chorro y se expresa mediante:

$$\Delta\Sigma_{u_z,1} = \int_{A_b} (\rho_a - \rho) \vec{g}_r dA \quad (3.48)$$

donde \vec{g}_r es el vector gravedad.

Por otra parte, el nuevo término, que tiene en cuenta el efecto de frenado del techo sobre el penacho ascendente, se modela mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\Sigma_{u_z,2} = Cm \frac{u_z}{h-z} \quad (3.49)$$

siendo C una constante que se calcula ajustando con resultados numéricos y experimentales (estudios previos llevan a pensar que puede variar desde 0'5 para incendios de 1'5 MW hasta 3 para el caso de 60 MW) y h-z la distancia entre el techo del túnel y la línea media del penacho en la sección de cálculo.

Servert, 1993, modela la flotabilidad mediante:

$$\Delta\Sigma_{u_z,1} = \lim_{A_b \rightarrow \infty} \int_{A_b} (\rho_a - \rho) g_r dA = \alpha_{vz} (\rho_a - \rho_m) g_r \pi b^2 \quad (3.50)$$

donde el coeficiente α_{vz} es igual a la unidad aguas abajo de donde se alcanza la fracción de mezcla estequiométrica y mayor que uno aguas arriba. Su expresión aparece en el apartado 3.3.1.8.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

**3.3.1.2 – ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA
CINÉTICA TURBULENTA**

Su término fuente se puede dividir en tres componentes, Servert 1997; la producción por efectos mecánicos o alargamiento de las líneas de vorticidad, $\Delta\Sigma_{kp}$, la causada por la flotabilidad, $\Delta\Sigma_{kf}$, y la disipación, $\Delta\Sigma_{kd}$. Así nos queda:

$$\Delta\Sigma_{kp} = \lim_{A_b \rightarrow \infty} \left[-\frac{d}{ds} \int_{A_b} \rho u_n \left(\frac{u^2}{2} - \frac{u_a^2}{2} \right) dA - \int_{A_b} (\rho u_n - \rho_a u_{an}) dA \frac{d u_a^2 / 2}{ds} - \int_{A_b} u_z g_r (\rho - \rho_a) dA \right] \quad (3.51)$$

$$\Delta\Sigma_{kf} = \lim_{A_b \rightarrow \infty} \int_{A_b} C_\mu g_r \left[\frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial \rho}{\partial s} \sin(\theta) \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{k_a^2}{\varepsilon_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} \right] dA \quad (3.52)$$

$$\Delta\Sigma_{kd} = \lim_{A_b \rightarrow \infty} \int_{A_b} (\rho \varepsilon - \rho_a \varepsilon_a) dA \quad (3.53)$$

$$\Delta\Sigma_k = \Delta\Sigma_{kp} + \Delta\Sigma_{kf} - \Delta\Sigma_{kd} \quad (3.54)$$

siendo $C_\mu = 0.09$ una de las constantes habituales del modelo k- ε -g, procedente de viscosidad turbulenta, $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, y θ el ángulo que forma el penacho con la horizontal.

Servert, 1993, modela la producción mecánica mediante:

$$\begin{aligned} \Delta\Sigma_{kp} &= \lim_{A_b \rightarrow \infty} \left[-\frac{d}{ds} \int_{A_b} \rho u_n \left(\frac{u^2}{2} - \frac{u_a^2}{2} \right) dA - \int_{A_b} (\rho u_n - \rho_a u_{an}) dA \frac{d u_a^2 / 2}{ds} - \int_{A_b} u_z g_r (\rho - \rho_a) dA \right] = \\ &= \Delta\Sigma_{k1} + \Delta\Sigma_{k2} + \Delta\Sigma_{k3} + \Delta\Sigma_{k4} \end{aligned} \quad (3.55)$$

donde cada uno de los sumandos en que se divide $\Delta\Sigma_{kp}$ son:

$$\Delta\Sigma_{k1} = -m \frac{\langle \tilde{u} \rangle^2 - u_a^2}{2} \frac{d\beta_v}{ds} \quad (3.56)$$

$$\Delta\Sigma_{k2} = m_o \frac{(\langle \tilde{u} \rangle - \bar{u}_a)^2}{2} \beta_v \quad (3.57)$$

$$\Delta\Sigma_{k3} = (\rho_a - \rho_m) \langle \tilde{u}_z \rangle g_r (\beta_v \alpha_{uz} - \alpha') \pi b^2 \quad (3.58)$$

$$\Delta\Sigma_{k4} = \beta_v \left[\frac{\dot{m}}{2} \frac{du_a^2}{ds} - m_a \frac{d\bar{u}_a}{ds} \langle \tilde{u} \rangle \right] + \frac{1}{2} \frac{du_a^2}{ds} (m_a - m) \quad (3.59)$$

Los coeficientes β_v y α' están definidos por:

$$\beta_v = \frac{\langle \tilde{u}^2 \rangle - u_a^2}{\langle \tilde{u} \rangle^2 - u_a^2} \quad (3.60)$$

$$\alpha' = \frac{\lim_{A \rightarrow \infty} \int_A (\rho_a - \bar{\rho}) g_r \tilde{u}_z dA}{(\rho_a - \langle \bar{\rho} \rangle) g_r \langle \tilde{u}_z \rangle \pi b^2} \quad (3.61)$$

Servert, 1993, ha demostrado que α' es igual a uno para perfiles gaussianos y muy próximo a la unidad para otros perfiles. β_v aparece en el apartado 3.3.1.8

Las características de cada uno de los sumandos que forman la producción mecánica de energía cinética turbulenta son:

- $\Delta\Sigma_{k1}$ esta asociado a la variación de β_v . Es positivo aguas abajo de la sección donde se alcanza el extremo de la llama, donde $d\beta_v/ds < 0$, y negativo aguas arriba. Su valor absoluto es mucho menor que el de $\Delta\Sigma_{k2}$ excepto cerca del principio de la llama, donde la fracción de mezcla es del orden unidad, y en una pequeña región aguas abajo del extremo de la llama.
- $\Delta\Sigma_{k2}$ es el más importante de los cuatro. Es análogo a la expresión propuesta por Tamanini, 1981, pero generalizado a perfiles diferentes del *top-hat* con viento cruzado. Este término expresa que la energía cinética turbulenta se crea dentro del penacho a un ritmo determinado por la energía cinética de la velocidad relativa del

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

flujo entrante. Presenta un máximo en las cercanías del extremo de la llama, donde la fracción de mezcla es igual a la estequiométrica. Aguas arriba de ese punto, este segundo término se incrementa principalmente debido al aumento de la temperatura y el descenso de la densidad que dilata el gas y hace que sean mayores tanto el radio del penacho como el ritmo de entrada de aire desde el exterior.

- $\Delta\Sigma_{k3}$ esta asociado con el exceso de energía mecánica creado por la flotabilidad que no contribuye a la energía cinética media. Es siempre positivo ya que tanto β_v , α_{vz} son mayores que uno y α' es igual a la unidad. Será más importante cerca del extremo de la llama.
- $\Delta\Sigma_{k4}$ esta asociado a la variación de las propiedades ambientes con la altura. La contribución es despreciable comparada con los otros tres términos fuente excepto suficientemente lejos aguas abajo, donde las propiedades del penacho son cercanas a las ambientales. En el estudio planteado dentro de un túnel, la contribución de este término es despreciable cuando se consideran las propiedades ambientales uniformes.

En el problema estudiado, β_v y todas las α están cerca de la unidad con lo que la producción mecánica de energía cinética turbulenta según Servert, 1993, valdría:

$$\Delta\Sigma_{kp} = \dot{m}'_o \frac{(\langle \tilde{u} \rangle - \bar{u}_a)^2}{2} \quad (3.62)$$

Servert, 1993, modela la producción por flotabilidad mediante:

$$\begin{aligned} \Delta\Sigma_{kf} &= \lim_{A_b \rightarrow \infty} \int_{A_b} C_\mu g_r \left[\frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial \rho}{\partial s} \sin(\theta) \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{k_a^2}{\varepsilon_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} \right] dA = \\ &= \alpha_{k2} \frac{g_r}{\sigma_h} \left(\frac{\langle \tilde{\mu} \rangle}{\langle \bar{\rho} \rangle} \frac{d\langle \bar{\rho} \rangle}{ds} - \frac{\mu_a}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{ds} \right) \pi b^2 \sin \theta \end{aligned} \quad (3.63)$$

Comparando este término con $\Delta\Sigma_{k3}$ se ve que es del mismo orden pero mucho menor que $\Delta\Sigma_{k2}$ y, en los casos prácticos, despreciable.

El ritmo de disipación, Servert, 1993, lo modela mediante la ecuación 3.64.

$$\Delta\Sigma_{kd} = \lim_{A_b \rightarrow \infty} \int_{A_b} (\rho\varepsilon - \rho_a\varepsilon_a) dA = -\alpha_{k3} (\langle \bar{\rho} \rangle \langle \tilde{\varepsilon} \rangle - \rho_a\varepsilon_a) \pi b^2 \quad (3.64)$$

donde el coeficiente α_{k3} es muy cercano a la unidad.

3.3.1.3 - ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA

Los términos de producción y disipación de ε guardan analogía con los de k . Las fuentes y sumideros se obtienen a partir de sus homólogos de la ecuación de conservación de la energía cinética turbulenta multiplicándolos por ε y dividiéndolos por k . De esta forma obtenemos:

$$\Delta\Sigma_{\varepsilon} = \frac{\langle \tilde{\varepsilon} \rangle}{\langle \tilde{k} \rangle} (C_{\varepsilon 1} \Delta\Sigma_{kp} + C_{\varepsilon 2} \Delta\Sigma_{kf} - C_{\varepsilon 3} \Delta\Sigma_{kd}) \quad (3.65)$$

donde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ y $C_{\varepsilon 3}$ son las constantes habituales del modelo k - ε - g que aparecen en la ecuación de conservación de la disipación de k , 1'44, 0'95 y 1'92 respectivamente.

3.3.1.4 - ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA VARIANZA DE LA FRACCIÓN DE MEZCLA

Aquí aparecen dos términos: uno de producción, Σ_{gp} , con comportamiento análogo al de producción de k , y otro de disipación, Σ_{gd} . Este último podría formularse de forma equivalente al de disipación de k , pero, para simplificar el modelo, se hará una aproximación idéntica a la realizada en el apartado anterior. Puesto que la producción y disipación de la varianza de la fracción de mezcla son nulas en el flujo básico, no es necesario restar las condiciones ambientales, con lo que desaparece el símbolo Δ de la representación de estos términos fuentes. Estos términos se calculan mediante:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\Sigma_{gp} = - \lim_{A_b \rightarrow \infty} \frac{d}{ds} \int_{A_b} \rho u_n \frac{\xi^2}{2} dA \quad (3.66)$$

$$\Sigma_{gd} = -C_g \frac{\langle g \rangle}{\langle k \rangle} \Delta \Sigma_{kd} \quad (3.67)$$

$$\Sigma_g = \Sigma_{gp} + \Sigma_{gd} \quad (3.68)$$

donde C_g viene de la ecuación de conservación de la varianza de la fracción de mezcla del modelo k-ε-g y toma el valor de 2.

Servert, 1993, modela la producción de varianza de la fracción de mezcla de forma análoga a la producción mecánica de energía cinética turbulenta. Se puede decir que:

$$\Sigma_{gp} = - \lim_{A_b \rightarrow \infty} \frac{d}{ds} \int_{A_b} \rho u_n \frac{\xi^2}{2} dA = - \frac{d\beta_\xi}{ds} \dot{m} \langle \xi \rangle^2 + \beta_\xi \dot{m}'_o \langle \xi \rangle^2 \quad (3.69)$$

donde el coeficiente β_ξ es análogo al β_v previamente definido en la ecuación 3.60. En el apartado 3.3.1.8 se encuentra la expresión de β_ξ según el procedimiento de Servert.

$$\beta_\xi = \frac{\langle \xi^2 \rangle}{\langle \xi \rangle^2} \quad (3.70)$$

Los dos términos que presenta la producción de varianza de la fracción de mezcla son respectivamente similares a los $\Delta \Sigma_{k1}$ y $\Delta \Sigma_{k2}$ e iguales comentarios se podrían hacer sobre ellos.

En cuanto a la disipación de fracción de mezcla, Servert, 1993, la estima mediante sustitución directa de las cantidades medias, empleando un factor de corrección igual a uno. Por tanto:

$$\Delta \Sigma_{g2} = -C_g \rho_m \langle \varepsilon \rangle \frac{\langle g \rangle}{\langle k \rangle} \pi b^2 \quad (3.71)$$

donde C_g constante del modelo $k-\varepsilon-g$ vale 0'8.

3.3.1.5 - ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Se supone que la ecuación de conservación de la entalpía, que incluye la energía de formación, sólo tiene como término fuente la radiación. Este término fuente, $\Delta\Sigma_h$, ha sido evaluado por Servert, 1993, en función de α_h , cociente entre el término fuente para la distribución gaussiana y el caso de un perfil uniforme. Para el cálculo de α_h se usarán las expresiones de Servert, 1993, apartado 3.3.1.8. De esta forma, se puede escribir:

$$\Delta\Sigma_h = \alpha_h 2\pi b \varepsilon_r \sigma \left(\langle \tilde{T} \rangle^4 - T_a^4 \right) \quad (3.72)$$

siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5'67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) y ε_r la emisividad de los gases. En ε_r intervienen fundamentalmente 3 compuestos: el vapor de agua, el dióxido de carbono y el hollín. Los dos primeros se tratarán juntos y se considerará que se mezclan con el hollín. Conviene decir que, en el caso general de un incendio, no se sabe bien de que combustible se trata. Los cálculos que se harán se refieren al caso de un hidrocarburo bien definido, como el heptano usado en los ensayos.

3.3.1.5.1 – EMISIVIDAD TOTAL

Basándonos en los trabajos de Ashok y Modak, 1979, se emplea el concepto de longitud media de rayo. Dicha longitud sería el radio que tendría un hemisferio de gas tal que el flujo que radiara al centro de su base fuese igual al que se esta radiando en el punto de interés. Las variables que intervienen en radiación son función de la longitud de onda, λ . Así la radiación, Q_r , que llegaría a un área A procedente de un volumen de un gas con una longitud media del rayo L_e coeficiente de absorción a_λ y potencia emisiva de cuerpo negro $e_{b,\lambda}$ sería:

$$Q_r = A \cdot \int_0^\infty [1 - \exp(-a_\lambda L_e)] e_{b,\lambda} d\lambda \quad (3.73)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

A efectos prácticos se prefiere trabajar con una emisividad equivalente del gas, ε_r , para poder aplicar la relación:

$$Q = A\varepsilon_r\sigma T_g^4 \quad (3.74)$$

en donde T_g es la temperatura del gas tratado como isoterma. Por tanto la emisividad que se usaría para un gas valdría:

$$\varepsilon_r = \frac{\int_0^\infty [1 - \exp(-a_\lambda L_e)] e_{b,\lambda} d\lambda}{\sigma T_g^4} \quad (3.75)$$

Cuando existen dos componentes absorbentes en el gas, existirán dos coeficientes de absorción, $a_{\lambda 1}$ y $a_{\lambda 2}$. Por tanto la emisividad de la mezcla será:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{\sigma T_g^4} \cdot \int_0^\infty e_{b,\lambda} (1 - e^{-(a_{\lambda 1} + a_{\lambda 2})L_e}) d\lambda = \\ &= \frac{1}{\sigma T_g^4} \cdot \int_0^\infty e_{b,\lambda} [1 - e^{-a_{\lambda 1}L_e} + 1 - e^{-a_{\lambda 2}L_e} - (1 - e^{-a_{\lambda 1}L_e})(1 - e^{-a_{\lambda 2}L_e})] d\lambda \end{aligned} \quad (3.76)$$

Esta formulación se puede interpretar como la suma de las emisividades de los gases absorbentes individuales con una corrección por el solapamiento de sus respectivos bandas de absorción, ultimo término de la siguiente expresión:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \frac{1}{\sigma T_g^4} \cdot \int_0^\infty e_{\lambda b,g} \cdot (1 - e^{-a_{\lambda 1}L_e})(1 - e^{-a_{\lambda 2}L_e}) d\lambda \quad (3.77)$$

En nuestro caso se trata, por una parte de la mezcla de agua y de dióxido de carbono, ε_g , y por otra parte del hollín ε_h . En primera aproximación, la emisividad total será:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_g + \varepsilon_h - \varepsilon_g \varepsilon_h \quad (3.78)$$

donde el último término se debe a la superposición de efectos del hollín con la mezcla vapor de agua – dióxido de carbono.

3.3.1.5.2 – EMISIVIDAD DE LA MEZCLA DE VAPOR DE AGUA CON DIÓXIDO DE CARBONO

El modelo que se emplea, Ashok 1979, es una aproximación analítica realizada utilizando los polinomios de Chebichev para ajustar los cálculos espectrales. Se consiguen aproximaciones en una banda del 5% cuando se está en el rango de 300 a 2000 K, presiones parciales entre 0 y 1 atm y productos presión parcial – longitud media del rayo entre 0 y 6 atm·m. En definitiva, las emisividades de ambas sustancias, ϵ_{H_2O} y ϵ_{CO_2} , quedan en función de sus presiones parciales, temperatura y producto presión parcial – longitud media del rayo. Como sus bandas de propiedades ópticas están superpuestas, existe un coeficiente corrector, $\Delta\epsilon_{cw}$, función de los parámetros ya mencionados.

Para ϵ_{H_2O} y ϵ_{CO_2} se usa:

$$\ln(\epsilon) = \sum_{i=0}^2 T_i(x) \sum_{j=0}^3 T_j(y) \sum_{k=0}^3 c_{ijk} T_k(z) \quad (3.79)$$

$$x = 1 + \frac{\ln(p)}{3'45} \quad (3.80)$$

$$y = \frac{2'555 + \ln(pL_e)}{4'345} \quad (3.81)$$

$$z = \frac{T - 1150}{850} \quad (3.82)$$

siendo p la presión parcial de la especie que se este calculando, $T_n(a)$ el polinomio de Chebichev de orden n y argumento a y los c_{ijk} los coeficientes de ajuste, distintos para el H_2O y CO_2 .

El término corrector, $\Delta\epsilon_{cw}$, es nulo para $(p_c + p_w) \cdot L_e$ menor que $0'1$ atm·m, mientras que cuando es mayor vale:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\Delta \varepsilon_{cw} = \left(\frac{\zeta}{10^7 + 101\zeta} - \frac{\zeta^{10^4}}{111^7} \right) \left[\log_{10} \left(101'325 (p_{H_2O} + p_{CO_2}) L_e \right)^{2'76} \right] F(T) \quad (3.83)$$

siendo ζ y $F(T)$ las siguientes funciones:

$$\zeta = \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{CO_2}} \quad (3.84)$$

$$F(T) = -1'0204 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 2'2449 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0'23469 \quad (3.85)$$

Por tanto, de una forma equivalente a las ecuaciones 3.77 y 3.78, la emisividad de la mezcla de agua y dióxido de carbono vendrá dada por la ecuación 3.86.

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \Delta \varepsilon_{cw} \quad (3.86)$$

3.3.1.5.3 – EMISIVIDAD DEL HOLLÍN

En el método de Felske, 1973, para el cálculo de la absorptividad y emisividad de la mezcla de productos de combustión, se asume que las partículas de hollín son pequeñas en comparación con la longitud de onda de radiación y que el índice de refracción del hollín es independiente de la misma. Bajo estas hipótesis, el coeficiente de absorción espectral del hollín es inversamente proporcional a la longitud de onda y los efectos de *scattering* son despreciables. Felske, 1973, modela la emisividad del hollín mediante:

$$\varepsilon_h = 1 - \frac{15}{\pi^4} \psi^{(3)} \left(1 + \frac{K f_v 2b}{c_2} T \right) \quad (3.87)$$

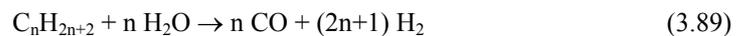
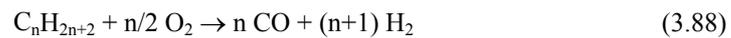
en la que $\psi^{(3)}$ es la función pentagamma, c_2 la constante en la distribución energética espectral de Planck (14388 $\mu\text{m}\cdot\text{K}$), K es una constante de valor 7 (según los estudios de Hottel y Felske) y f_v es la concentración volumétrica de hollín. Debido a esta variable surge como nueva incógnita la fracción másica de hollín, $Y_{C(S)}$. f_v es directamente proporcional a $Y_{C(S)}$ siendo su constante de proporcionalidad el cociente entre la densidad del aire y la del hollín, es decir,

$f_v = Y_{C(S)} \cdot \rho_{aire} / \rho_{C(S)}$. Para calcular $Y_{C(S)}$ es preciso resolver su correspondiente ecuación de conservación, ecuación 3.36 y apartado 3.3.1.6.

3.3.1.6 - ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA FRACCIÓN MÁSICA DE HOLLÍN

Para poder calcular la emisividad del hollín, se debe conocer su concentración. Dos modelos a destacar en este apartado deberían ser el de Gore, 1986, y el de Honnery, 1990. En el primero se postula la relación entre la fracción de mezcla y la concentración de hollín, mientras que en el segundo se supone una preponderancia de la cinética química por lo que la relación se establece entre la cantidad de hollín producido y el tiempo de residencia. El modelo considerado en la presente tesis es, en cierta medida, una síntesis de los dos anteriores. Formulado por Leung, Jones y Lindstedt, 1991, tiene en cuenta dos etapas de reacción. En la primera, dominada por la mezcla, se describe la ruptura del combustible en monóxido de carbono e hidrógeno intermedios. Se forman precursores del hollín que hacen las veces de indicadores de la etapa en que se encuentran las reacciones. En la segunda etapa, a partir de los precursores anteriores, se genera el hollín mediante la oxidación del monóxido de carbono y del hidrógeno. Es decir el hollín no proviene directamente del combustible en sí mismo, procede de la pirólisis de los productos resultantes de la ruptura del combustible. El esquema básico sería el dado en las ecuaciones de la 3.88 a la 3.91.

ETAPA I:



ETAPA II:



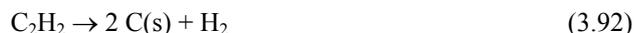
La extensión de este esquema para incluir mecanismos globales de formación y desaparición de hollín se basa en la suposición de que la aparición de dicha especie se deba a la pirólisis del combustible en unas ciertas especies intermedias a través de las etapas básicas de

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

nucleación, crecimiento superficial, coagulación y oxidación. Como indicador principal de esos precursores se ha elegido el acetileno. Este sistema hace necesario incluir dos ecuaciones adicionales de conservación, una para la conservación de la fracción másica de hollín y otra para la densidad número de partículas. También es necesario asumir una determinada forma para estas última, en este caso la esférica, para completar el modelo.

3.3.1.6.1 - NUCLEACIÓN DEL HOLLÍN

La formación de hollín ha sido dividida en dos términos. El primero de ellos concierne a la aparición de partículas incipientes. Las zonas con altas concentraciones de hidrocarburos procedentes de la pirólisis del combustible, principalmente poliacetilenos y poliaromáticos, son donde se inician los núcleos de hollín. Las partículas iniciales de hollín, líquidas o no, muestran una alta velocidad de crecimiento. A pesar del hecho de que en estas etapas iniciales el hollín aún conserva restos del hidrógeno procedente de hidrocarburo que lo originó, ya le representamos por C(s). Esta formación inicial se indica por:



Dos hechos son necesarios estudiar en la nucleación. Primero hay que considerar que la velocidad de crecimiento superficial varía conforme la partícula envejece, es más reactiva una partícula joven que una vieja. Por ello se supone que la formación de las partículas de hollín está dominada por la aparición de los núcleos incipientes y su crecimiento superficial. Este modelo está formulado para reflejar que alrededor del 10% del hollín se forma siguiendo este camino, pero hay que recalcar que la reacción en sí es de crucial importancia en la determinación del área activa para el aumento de tamaño del hollín y para el cálculo de la densidad de C(s) inicial. Las partículas se forman con un cierto número mínimo de átomos de carbono, C_{\min} . La variedad de este parámetro es casi tanta como la de autores. Desde los 100 de Leung hasta los 90000 de Fairweather. Además se tiene en cuenta un radio aproximado de 1'24 nm. Leung ha comprobado que variar dicho parámetro entre 1 y 10 no influye significativamente en los resultados.

Por otra parte, hay que definir adecuadamente la temperatura de activación efectiva de la reacción de nucleación. Estudios sobre distintas mezclas de hidrocarburos han mostrado que dicha temperatura de activación (E/R , siendo E la energía de activación y R la constante

universal de los gases) asociada con las primeras etapas del proceso de formación es algo menor que la de la pirólisis del combustible. Se puede considerar un rango entre 15000 y 25000 K.

Con todo esto, la velocidad de reacción se expresa como:

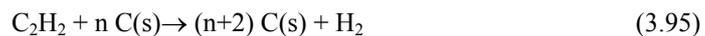
$$R_1 = K_1(T) [C_2H_2] \text{ [kmol/m}^3\text{/s]} \quad (3.93)$$

$$K_1 = 1'35 \cdot 10^6 e^{-\frac{20600}{T}} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (3.94)$$

El factor que multiplica a la exponencial, calculado por Leung mediante la comparación los resultados obtenidos usando la modelización numérica y experimentos de la combustión de C_2H_4 en una corriente del 22% de O_2 y 78% de N_2 , fue de 10000. Sin embargo, estudios posteriores le dan un valor significativamente superior, del orden del que refleja la ecuación 3.94.

3.3.1.6.2 - CRECIMIENTO SUPERFICIAL DEL HOLLÍN

El segundo proceso para la formación de hollín es el del crecimiento superficial debido a la absorción del acetileno sobre las partículas incipientes. Este paso puede representarse esquemáticamente como:



Harris, 1983, ha propuesto, basándose en datos experimentales, que esta reacción es de primer orden en el acetileno. Por lo tanto tendremos:

$$R_2 = K_2(T) f(S) [C_2H_2] \text{ [kmol/m}^3\text{/s]} \quad (3.96)$$

siendo $f(S)$ una función de la densidad de superficie, S , que viene expresada en m^2/m^3 de la mezcla. Su valor será:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$S = \pi d_p^2 (\rho N) = \pi \left(\frac{6}{\pi} \frac{1}{\rho_{C(s)}} \frac{Y_{C(s)}}{N} \right)^{2/3} (\rho N) \quad (3.97)$$

donde N es el número de partículas por kg. de mezcla y d_p el diámetro de la partícula:

$$d_p = \left(\frac{6}{\pi} \frac{1}{\rho_{C(s)}} \frac{Y_{C(s)}}{N} \right)^{1/3} \quad (3.98)$$

La distinta velocidad de crecimiento en función de la edad de la partícula se tiene en cuenta a través de la función $f(S)$. Por ello, no se usa una relación lineal con la densidad de superficie sino una raíz cuadrada, con lo que se reduce el crecimiento a medida que aumenta el tamaño. Por todo ello la velocidad de reacción queda:

$$R_2 = k_2(T) \cdot [C_2 H_2] \sqrt{\pi \left(\frac{6M_{C(s)}}{\pi \rho_{C(s)}} \right)^{2/3}} [C(s)]^{1/3} [\rho N]^{1/6} [\text{kmol/m}^3/\text{s}] \quad (3.99)$$

con M el peso molecular. Como se puede observar en el término R_2 , existe una dependencia con la densidad del número de partículas, por tanto hay que incluir la ecuación de conservación asociada a su determinación. El cálculo del término fuente de dicha ecuación de conservación se explica en el apartado 3.3.1.7.

$[C(s)]$ se puede expresar como:

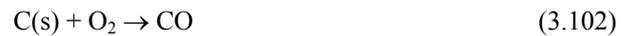
$$[C(s)] = \left[\frac{\rho Y_{C(s)}}{M_{C(s)}} \right] \quad (3.100)$$

Sólo queda determinar la constante de reacción $K_2(T)$. Existe acuerdo general en que la temperatura de activación es 12066 K y Leung calculó mediante el experimento ya descrito el término que multiplica a la exponencial, obteniendo un valor de 6000. Es decir:

$$K_2 = 6 \cdot 10^3 e^{-\frac{12066}{T}} \left[\frac{m^{3/2}}{m - soot \cdot s} \right] \quad (3.101)$$

3.3.1.6.3 - OXIDACIÓN DEL HOLLÍN

La etapa de oxidación presentada esta basada en la formulación de Lee et al., 1962. Sin embargo, hay modificaciones propuestas para llegar a un modelo más complejo. Se asume que el carbón sólido se oxida exclusivamente a monóxido de carbono a las temperaturas de llama típicas según la reacción:



La constante de la reacción se ajusta de acuerdo al máximo de oxidación superficial observado en llamas laminares en flujo paralelo de metano y aire. Es de señalar también que en dicha geometría la oxidación del hollín se produce solamente en regiones muy cercanas al frente de llama. La oxidación del hollín, con su tasa de reacción, puede ser descrita con bastante exactitud por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$R_3 = K_3(T) S [O_2] \text{ [kmol/m}^3\text{/s]} \quad (3.103)$$

$$K_3 = 10^4 e^{-\frac{19600}{T}} \left[\frac{m^3}{m^2 - soot \cdot s} \right] \quad (3.104)$$

Es de destacar que se retiene la dependencia con la densidad superficial, S, y que el valor de la constante que multiplica a la exponencial en K_3 es ocho veces superior al recomendado por Lee pero del orden con el de Garo et al., 1990. Estos últimos proponen la inclusión del radical OH como oxidante. Sin embargo, en el presente modelo se consideró que no era preciso incluirlo para llegar al nivel de exactitud deseado.

Se puede establecer el siguiente cuadro resumen, tabla 3.2, para las constantes de reacción de los distintos procesos considerados. Los valores que aparecen en el se han obtenido mediante comparación con distintos resultados, tanto de predicciones de distintos modelos como de datos experimentales. Se toma la forma básica $K_i = A \cdot T^b e^{-E/RT}$.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Constante	A	b	E	E/R (K)
K ₁	1.35·10 ⁶	0	41·10 ³	20600
K ₂	6·10 ³	0	24·10 ³	12066
K ₃	1.78·10 ⁴	0'5	39·10 ³	19600

Tabla 3.2: Constantes de reacción

3.3.1.6.4 - FORMACIÓN DEL ACETILENO

La modelización de la formación y destrucción de acetileno será tomada de los trabajos de Fairweather, 1992. Esta basada en la comparación con datos experimentales y una detallada modelización química para el caso de llamas de difusión laminares de metano-aire en flujo opuestos. Se comprobó que para *strain rates* en el rango de 60-400 s⁻¹ los resultados son satisfactorios.

Para una cortadura de 60 s⁻¹ la curva propuesta en el trabajo mencionado para la formación de hollín, se puede aproximar por un polinomio función de la fracción de mezcla.

$$X_{C_2H_2} = \begin{cases} 0 & \text{para } \xi < \frac{4}{61} \\ 3'449765 \cdot \xi^5 - 7'134518 \cdot \xi^4 + 5'676643 \cdot \xi^3 - \\ 2'16008 \cdot \xi^2 + 0'3743754 \cdot \xi - 0'0167339 & \text{para } \frac{4}{61} < \xi < \frac{37}{61} \\ 0 & \text{para } \frac{37}{61} < \xi \end{cases} \quad (3.105)$$

En cualquier caso, y como sucede en los procesos indicados en el anexo II y en el apartado 3.2.2., para calcular el valor medio turbulento hay que emplear la integración con la pdf correspondiente en la forma de la ecuación II.53 del anexo II.

3.3.1.6.5 – TÉRMINO FUENTE PARA LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE HOLLÍN

La predicción del hollín se incluye dentro del modelo mediante la solución de las ecuaciones de balance para la fracción másica de hollín, $Y_{C(s)}$, y la densidad número de partículas, N . Estas ecuaciones pueden ser escritas mediante la notación de tensores como:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + \rho S(\phi) \quad (3.106)$$

donde ϕ toma el valor de $Y_{C(s)}$ o N según la ecuación de que se trate. La evaluación de los términos fuente $S(\phi)$ es la labor realizada en los apartados del 3.3.1.6.1 al 3.3.1.6.4 para $Y_{C(s)}$, y la que se hará en los apartados 3.3.1.7.1 y 3.3.1.7.2 para N . En dichos apartados se ve que la formación-destrucción instantánea de $Y_{C(s)}$ por unidad de volumen se puede expresar de la siguiente forma:

$$\rho S(Y_{C(s)}) = R_1 M_{C(s)} + R_2 M_{C(s)} [C(s)]^{2/3} [N]^{1/3} - R_3 M_{C(s)} [C(s)]^{2/3} [N]^{1/3} \quad (3.107)$$

Para hacer el paso al modelo turbulento, es necesario hacer las medias adecuadas en cada variable. Si los símbolos $-$ y \sim sobre cada variable son respectivamente la media temporal convencional y la Favre, el modelo unidimensional cuando ϕ toma el valor de $Y_{C(s)}$ o el valor de N , tendrá por ecuación de conservación:

$$\frac{d}{ds} (m \langle \tilde{\phi} \rangle) = \bar{\rho} \tilde{S}(\phi) \quad (3.108)$$

donde se han despreciado las componentes debidas al ambiente, ya que se considera que el aire fresco arrastrado desde el exterior que llega al penacho no contiene ni hollín ni partículas.

Teniendo en cuenta que se cumple:

$$[C(s)] = \rho Y_{C(s)} / M_{C(s)} \quad (3.109)$$

$$[N] = \rho N \quad (3.110)$$

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

la ecuación 3.107 laminar debe ser sustituida por la 3.111 del caso turbulento.

$$\bar{\rho}\tilde{S}(Y_{C(s)}) = \tilde{R}_1 M_{C(s)} + \tilde{R}_2 \bar{\rho} M_{C(s)}^{1/3} \bar{Y}_{C(s)}^{2/3} \bar{N}^{1/3} - \tilde{R}_3 \bar{\rho} M_{C(s)}^{1/3} \bar{Y}_{C(s)}^{2/3} \bar{N}^{1/3} \quad (3.111)$$

Se puede suponer que el valor medio del término fuente debido a la combustión es el calculado sustituyendo los valores medios de la temperatura y las concentraciones. Esto se debe a que la reacción es mucho más lenta que los tiempos de difusión turbulentos. Por tanto, se usará la relación 3.112 en el cálculo de este término fuente. En el caso opuesto, como lo indicado en el apartado 3.2.2. y en el anexo II, se podría suponer que las concentraciones son función de la fracción de mezcla y calcular los valores medios mediante una pdf.

$$\tilde{S}(\phi) = S(\tilde{\phi}) \quad (3.112)$$

Finalmente, la media de la fracción volumétrica de hollín, necesaria para calcular su emisividad, se deriva de:

$$\bar{f}_v = \frac{\bar{\rho}\bar{Y}_{C(s)}}{\rho_{C(s)}} \quad (3.113)$$

3.3.1.7 - ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA DENSIDAD NÚMERO DE PARTÍCULAS

En el cálculo de la concentración de hollín, surge como nueva incógnita la densidad número de partículas. Por tanto es necesario introducir una nueva ecuación de conservación, ecuación 3.37, para hallarla. Sus términos fuente-sumidero se explican en los siguientes apartados.

3.3.1.7.1 - NUCLEACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

La formación de las partículas se debe a la nucleación, la cual se modela mediante la tasa de reacción siguiente:

$$R_4 = \frac{2}{C_{\min}} N_A R_1 \quad (3.114)$$

donde N_A es el número de Avogadro ($6'022 \cdot 10^{26}$ partículas/Kmol) y R_1 es la tasa de reacción de la nucleación del hollín.

3.3.1.7.2 - CONDENSACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

El mecanismo considerado para la desaparición de las partículas es la condensación, coagulación o aglomeración de las mismas. Es despreciado el sumidero debido a la combustión. Su representación será mediante



En general se acepta que la tasa de reacción es proporcional al cuadrado de la concentración de partículas:

$$R_5 = 2 \cdot C_a \left(\frac{6M_{C(s)}}{\pi \rho_{C(s)}} \right)^{1/6} \left(\frac{6kT}{\rho_{C(s)}} \right)^{1/2} \quad (3.116)$$

donde k es la constante de Boltzmann ($1'38 \cdot 10^{-23}$ J/K) y C_a es la constante de aglomeración, la cual varía según el investigador de que se trate. Leung la asigno el valor de 9, mientras que Kent y Wagner, 1982, la dieron el de 3.

3.3.1.7.3 – TÉRMINO FUENTE PARA LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA DENSIDAD NÚMERO DE PARTÍCULAS

Análogamente a lo expuesto en el apartado 3.3.1.6.5, la formación-destrucción instantánea de N por unidad de volumen se puede expresar, empleando los resultados de los dos apartados anteriores, 3.3.1.7.1 y 3.3.1.7.2, a través de la siguiente ecuación:

$$\rho S(N) = R_4 - R_5 [C(s)]^{1/6} [N]^{11/6} \quad (3.117)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Teniendo en cuenta las ecuaciones 3.109 y 3.110, la ecuación para régimen laminar 3.117 debe ser sustituida por la 3.118 de régimen turbulento.

$$\bar{\rho} \tilde{S}(N) = \tilde{R}_4 - \tilde{R}_5 \bar{\rho}^2 M_{C(s)}^{-1/6} \bar{Y}_{C(s)}^{1/6} \bar{N}^{11/6} \quad (3.118)$$

Por la misma razón del apartado 3.3.1.6.5, que la reacción es mucho más lenta que la difusión turbulenta, se puede emplear la ecuación 3.112 para calcular el término fuente.

3.3.1.8 - CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES AUXILIARES

Para completar los términos fuentes se precisa conocer sus términos correctores. Las ecuaciones que los definen se pueden obtener utilizando expresiones racionales constituidas por los parámetros de las distribuciones y por una serie de integrales, definidas mediante:

$$F_{-1} = \int_0^1 \left(1 - \frac{1}{t}\right) \frac{d\psi}{\psi} \quad (3.119)$$

$$F_n = \int_0^1 \frac{\psi^n}{t} d\psi; n \geq 0 \quad (3.120)$$

De esta forma se consiguen las siguientes funciones analíticas:

$$F_{-1} = \begin{cases} \ln(t_1 + 1); \langle \xi \rangle \leq \xi \\ \ln(t_1 \psi_{st} + 1) + \frac{\ln(t_2 + t_3) - \ln(t_2 \psi_{st} + t_3) + \ln(\psi_{st}) t_3 - \ln(\psi_{st})}{t_3}; \langle \xi \rangle > \xi_{st} \end{cases} \quad (3.121)$$

$$F_0 = \begin{cases} \frac{\ln(t_1 + 1)}{t_1}; \langle \xi \rangle \leq \xi_{st} \\ \frac{\ln(t_1 \psi_{st} + 1)}{t_1} + \frac{\ln(t_2 + t_3) - \ln(t_2 \psi_{st} + t_3)}{t_2}; \langle \xi \rangle > \xi_{st} \end{cases} \quad (3.122)$$

$$F_1 = \begin{cases} \frac{t_1 - \ln(t_1 + 1)}{t_1^2}; \langle \xi \rangle \leq \xi_{st} \\ \frac{t_1 \psi_{st} - \ln(t_1 \psi_{st} + 1)}{t_1^2} + \frac{t_2 - t_3 \ln(t_2 + t_3)}{t_2^2} - \frac{t_2 \psi_{st} - t_3 \ln(t_2 \psi_{st} + t_3)}{t_2^2}; \langle \xi \rangle > \xi_{st} \end{cases} \quad (3.123)$$

$$F_2 = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{t_1^2 + 2 \ln(t_1 + 1) - 2t_1}{t_1^3}; \langle \xi \rangle \leq \xi_{st} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{2}{11} \psi_{st}^2 + 2 \ln(t_1 \psi_{st} + 1) - 2t_1 \psi_{st}}{t_1^3} + \frac{t_2^2 + 2t_3^2 \ln(t_2 + t_3) - t_2 t_3}{t_2^3} + \frac{-\frac{t_2^2 \psi_{st}^2 + 2t_3^2 \ln(t_2 \psi_{st} + t_3) - 2t_2 \psi_{st} t_3}{t_2^3}}{t_2^3} \right); \langle \xi \rangle > \xi_{st} \end{cases} \quad (3.124)$$

donde:

$$\psi_{st} = \frac{\xi_{st}}{\langle \xi \rangle} \quad (3.125)$$

$$t_1 = \frac{t_F - 1}{\psi_{st}} \quad (3.126)$$

$$t_2 = \frac{(t_F - 1)\xi_{st}}{\psi_{st}(\xi_{st} - 1)} \quad (3.127)$$

$$t_3 = \frac{\xi_{st} - t_F}{\xi_{st} - 1} \quad (3.128)$$

$$t_F = \frac{T_F}{T_a} \quad (3.44)$$

siendo t_F la temperatura máxima normalizada que se alcanza cuando $\xi_{st} = \xi_c$ o la que se podría alcanzar si la fracción de mezcla estequiométrica fuera superior a la máxima teniendo en cuenta las pérdidas (principalmente radiación y mezcla parcial), $t_1 + 1$ representa la temperatura máxima normalizada en el centro del penacho si $\xi_{st} > \xi_c$ y t_2 y t_3 son valores que caracterizan la distribución en ese mismo caso.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Con todo esto los términos fuentes quedan:

$$\alpha_{vz} = \frac{F_1}{F_0} \frac{F_{-1}}{1 - F_0} \quad (3.129)$$

$$\beta_v = \frac{\frac{v_c^2}{2} (v_c F_2 + \delta F_1) + \delta'' v_{xc} \frac{\langle \bar{v}_n \rangle}{\langle \bar{t} \rangle}}{\alpha \frac{v_c^2}{2} (v_c F_1 + \delta F_0) + \delta'' v_{xc} \frac{\langle \bar{v}_n \rangle}{\langle \bar{t} \rangle}} \quad (3.130)$$

$$\beta_\xi = \frac{F_2 F_0}{F_1^2} \left(1 - \frac{1}{4} \exp\left(\frac{-\sqrt{v_{nc}}}{2}\right) \right) \quad (3.131)$$

$$\alpha_h = \begin{cases} \alpha \frac{4t_1 + 3t_1^2 + \frac{1}{4}t_1^4 + \frac{4}{3}t_1^3}{\langle \bar{t} \rangle^4 - 1} \quad \text{para } \xi_c \leq \xi_{st} \\ (4t_1 \psi_{st} + 3t_1^2 \psi_{st}^2 + \frac{1}{4}t_1^4 \psi_{st}^4 + \frac{4}{3}t_1^3 \psi_{st}^3 + 4t_3^2 t_2 + 3t_3^2 t_2^2 + \frac{1}{4}t_2^4 + \frac{4}{3}t_3 t_2^3 - 4t_3^3 t_2 \psi_{st} \\ - \ln(\psi_{st}) t_3^4 + \ln(\psi_{st}) - \frac{1}{4}t_2^4 \psi_{st}^4 - 3t_3^2 t_2^2 \psi_{st}^2 - \frac{4}{3}t_3 t_2^3 \psi_{st}^3) \frac{\alpha}{\langle \bar{t} \rangle^4 - 1} \quad \text{para } \xi_c \leq \xi_{st} \end{cases} \quad (3.132)$$

siendo:

$$\alpha = \frac{F_1}{F_0} \quad (3.43)$$

$$\delta = \begin{cases} 0; v_{an} = 0 \\ 1; v_{an} \neq 0 \end{cases} \quad (3.133)$$

$$\delta' = \begin{cases} 0; v_a = 0 \\ 1; v_a \neq 0 \end{cases} \quad (3.134)$$

3.3.1.8.1 - EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES PARA EL CHORRO NO DESARROLLADO

En las etapas iniciales, el chorro no se encuentra plenamente desarrollado y la fracción de mezcla no se distribuye según una gaussiana. Por tanto, no se pueden aplicar los resultados anteriores. Para soslayar este problema, y teniendo en cuenta que se trata de distancias muy cortas en comparación con la longitud total de la llama, se realiza el siguiente cálculo aproximado:

$$\alpha_{\phi} = \frac{\alpha_{\phi 1} - 1}{1 - \langle \xi \rangle_1} \left(1 - \langle \xi \rangle \right) + 1 \quad (3.135)$$

donde $\langle \xi \rangle_1$ y $\alpha_{\phi 1}$ representan los valores que tendrían la fracción de mezcla y α_{ϕ} , respectivamente, en el momento en el que el chorro ha terminado de desarrollarse y consecuentemente ξ_c fuese igual a uno en el centro y el perfil de ξ gaussiano. Para el resto de los valores necesarios, se emplean las relaciones generales. En este caso se evalúan los parámetros del chorro desarrollado en los valores equivalentes obtenidos en la resolución de las ecuaciones diferenciales correspondientes, menos ξ_0 que se supone igual a uno.

El resultado así obtenido es una interpolación entre el valor que se obtendría para un perfil uniforme ($\alpha_{\phi} = 1$) y aquél que se alcanzaría si el chorro se hubiera desarrollado completamente.

3.4 – ZONA DE TRANSICIÓN

El modelo propuesto divide el túnel a estudio en dos partes; la zona del penacho, que contiene a la llama y los gases de combustión hasta que impactan con el techo, y el resto del túnel aguas abajo del incendio. En los cálculos previos del penacho, como ya se indicó al describir la ecuación de conservación de cantidad de movimiento en la dirección vertical, se ha tenido en cuenta el efecto de frenado que ejerce el techo del túnel sobre la corriente de gases calientes ascendentes. En la primera de las zonas, el penacho, se emplea el modelo cuasi-unidimensional, y en la segunda, el resto del túnel, fundamentalmente se tratará, como se verá

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

en el siguiente apartado, un problema de difusión. Entre medias de ambas, existe una zona que denominaremos *Zona de transición*.

En primera aproximación, la sección de cálculo inicial de la difusión toma directamente los valores obtenidos en el cálculo del penacho. Existe un área, interior a la intersección del penacho con el primer plano de cálculo de la difusión, que tendrá un valor procedente de los gases calientes ascendentes. En ese plano, pero fuera de la intersección mencionada, se supone que se dan las condiciones ambientales, figura 3.3. Estos valores serán una de las condiciones de contorno de la zona de difusión. Con esta forma de unir las dos partes en que se divide el modelo, se produce una pérdida de energía menor del 5%. Esta pérdida se debe al hecho de que, teóricamente, el perfil gaussiano de la distribución del penacho es infinito y por tanto penetraría dentro del contorno de la pared, figura 3.10. Esos gases desaparecen de una forma artificial para el resto del túnel. Para compensar esta pérdida, se puede multiplicar los valores de cada nodo de cálculo de la primera sección de la zona de la difusión por una constante, el cociente entre la energía de la última sección de cálculo del penacho y la que habría en la primera sección de la zona de difusión sin hacer esta compensación. De esta forma al menos se cumple la conservación de la energía entre las dos zonas en que se ha supuesto dividido el túnel.

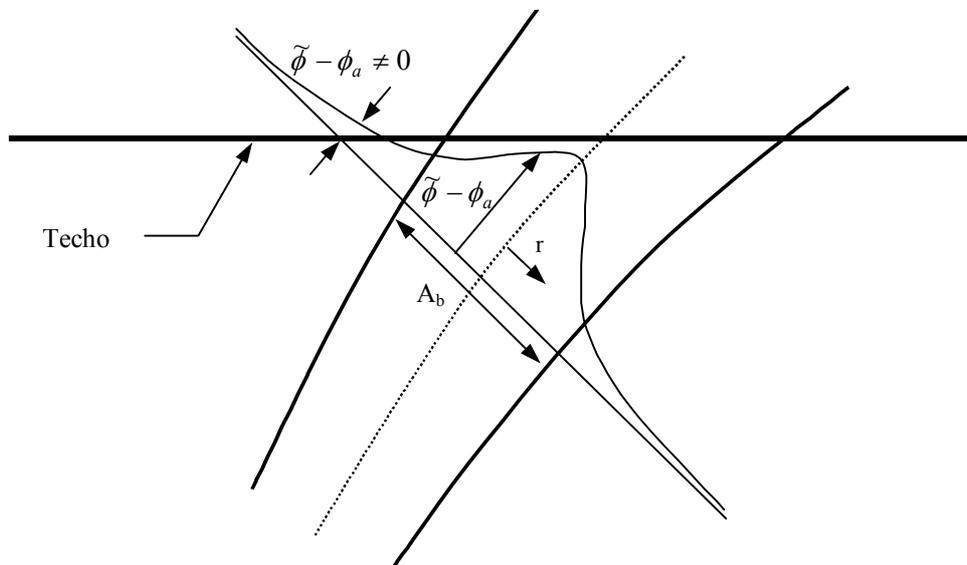


Figura 3.10: Pérdidas en la zona de transición

3.5 - DIFUSIÓN

Como ya se explicó en el apartado 3.1, el modelo cuasi-unidimensional se aplica hasta el punto en que el penacho impacta con el techo. Después de la zona de transición, que hace de enlace entre las dos áreas de cálculo, se llega a la zona llamada de difusión, figura 3.1.

En el modelo presentado, el penacho se calcula para su estado estacionario. Si se supone que el sistema de ventilación ya está en funcionamiento cuando se produce el incendio, o que al menos la velocidad está en régimen, y que la llama se desarrolla rápidamente, se puede considerar que los humos llegan a la zona de difusión casi desde el momento en que se produce el incendio. Para esta situación, si la potencia del fuego es constante, se puede hacer un análisis aproximado del caso transitorio en la zona de difusión. En los dos siguientes apartados se tratarán el flujo permanente y el transitorio para la difusión de los gases de la combustión una vez que el penacho impacta con el techo.

Puesto que se considera que estamos en un problema de flujo incompresible y de velocidad conocida, el problema térmico es el único que hay que resolver. El procedimiento se basa en resolver la ecuación de la energía, ecuación 3.136, bajo distintas simplificaciones según el caso considerado.

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \text{grad} T \right) = \phi_v + \text{div} k \nabla T + Q_r \quad (3.136)$$

3.5.1 - FLUJO PERMANENTE PARA LA DIFUSIÓN DE GASES

Como ya se indicó anteriormente, se considera la corriente de aire incompresible, ya que las variaciones térmicas son pequeñas, unidireccional, paralela al eje longitudinal del túnel, y con una velocidad de módulo el valor impuesto por el sistema de ventilación, U . Se supone un caso estacionario, en el que se desprecia la disipación viscosa, ϕ_v , y el calor intercambiado por radiación, Q_r . El radio equivalente, R_{eq} , se define como dos veces el área de paso dividido por el perímetro mojado de la sección. Se supone que R_{eq} es del orden de las coordenadas “y” y

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

z del plano transversal del túnel, $Re_q \approx "y"$ y $Re_q \approx z$, pero mucho menor que la longitud total del mismo, $Re_q \ll L$. Para el caso estacionario, la coordenada x, dirección longitudinal del túnel, es del orden de la longitud total del túnel, $x \approx L$. En esta situación, la difusión en la dirección x puede despreciarse frente a la variación convectiva en dicha dirección o frente a los términos de difusión en las otras dos direcciones, ecuación 3.137. En esta ecuación, D_T es el coeficiente de difusividad térmica turbulento y T la temperatura de los gases. El problema así planteado adquiere un carácter parabólico en la dirección x. Para calcular los valores en cada sección de cálculo, perpendicular a la dirección longitudinal, se necesitará conocer únicamente los valores de la sección anterior en el sentido del aire impuesto.

$$U \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.137)$$

Se supone que el número de Prandtl turbulento, viscosidad cinemática entre la difusividad térmica, es próximo a la unidad. Por tanto $D_T (k/\rho c_p)$ es del orden de la viscosidad cinemática ($\nu = \mu/\rho$). Para simplificar el problema se tomarán valores uniformes en el tubo para todas las variables anteriores. La viscosidad cinemática es el producto de una constante, k_m , por la velocidad de agitación turbulenta, U^* , y por una longitud típica, ecuación 3.138. Por longitud típica se suele tomar el radio equivalente. La U^* se relaciona con el parámetro λ del diagrama de Moody o con el coeficiente de fricción, usando una velocidad igual a la de la sección del túnel, ecuación 3.139. La constante k_m , que se suele ajustar experimentalmente, puede tener valores en el rango 0'1 a 50.

$$D_T = \frac{k}{\rho c} = \nu = \frac{\mu}{\rho} = k_m U^* R_{eq} \quad (3.138)$$

$$\alpha = \frac{D_T}{U} = k_m \frac{U^*}{U} R_{eq} = k_m \sqrt{\frac{C_f}{2}} = k_m \sqrt{\frac{\lambda}{8}} R_{eq} \quad (3.139)$$

Faltaría imponer las condiciones de contorno en el techo, la pared y el suelo. En primera aproximación se puede tomar como adiabática (flujo de calor nulo): $\partial T/\partial n = 0$.

Se podría mejorar el modelo haciendo que U y D_T no fuesen constantes. Por ejemplo, para D_T se pueden proponer expresiones que la hagan variar en relación con la distancia a la

pared en vez de usar el radio equivalente como longitud típica. También la condición de contorno adiabática para techo, pared y suelo podría cambiarse para tener en cuenta la transmisión y consiguiente acumulación de calor en la pared del túnel. Sin embargo, considerar condiciones adiabáticas es más conservativo ya que se elimina un sumidero de calor. Por tanto, tal como se va a trabajar, las condiciones alcanzadas aguas abajo serán más conservadoras, desde el punto de vista de la seguridad, que el caso real. En el futuro se pretende mejorar esta condición.

3.5.2 - DIFUSIÓN NO ESTACIONARIA DE GASES CALIENTES

En el caso no estacionario, al estudiar el avance del frente de humos, el espesor de la capa de dicho frente, e , es muy delgado, del orden de la coordenada en la dirección longitudinal, x , figura 3.11. Para la aproximación que se va a exponer, este espesor debe ser mucho menor, o como mucho del orden, del radio equivalente. Como ya se dijo en el apartado anterior, las coordenadas en los planos transversales a la dirección longitudinal del túnel son del orden del R_{eq} . Suponiendo $x \leq e \ll R_{eq}$ y que $y \approx z \approx R_{eq}$, la ecuación a resolver sería la proveniente de la 3.136 reteniendo el término transitorio y despreciando la difusión en las direcciones “ y ” y z frente a la que se da en la dirección x , ecuación 3.140.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.140)$$

Para resolver la ecuación que gobierna el movimiento en este caso, nos montamos en el frente mediante el siguiente cambio de variables $T(x,t,y,z) \rightarrow T(\xi,\tau,y,z)$, donde:

$$\begin{cases} \xi = x - Ut \\ \tau = t \end{cases} \quad (3.141)$$

Aplicando el cambio de variable 3.141 a la ecuación 3.140 se obtiene la ecuación 3.142.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \quad (3.142)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

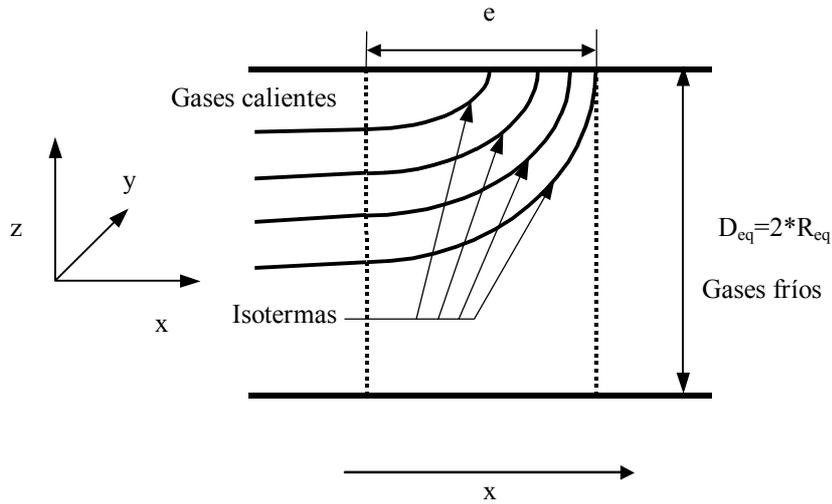


Figura 3.11: Estudio del frente de avance.

Vamos a estudiar el caso en el que el frente separe una zona con flujo estacionario y gases calientes de otra con flujo sin perturbar, ecuación 3.143 y figura 3.12.

$$T = \begin{cases} T_{estacionario}(x, y, z) & \text{para } x < Ut \\ T = T_a & \text{para } x > Ut \end{cases} \quad (3.143)$$

El caso planteado es equivalente a que el tiempo que tarda la llama en alcanzar estado cuasi-estacionario es mucho menor que el que tarda el frente en recorrer el túnel. Para esta situación, la solución de la ecuación 3.142 es la de un problema de semejanza clásico, ecuación 3.144.

$$T(\xi, \tau, y, z) = A + B \cdot erf\left(\frac{\xi}{2\sqrt{D_T \tau}}\right) \quad (3.144)$$

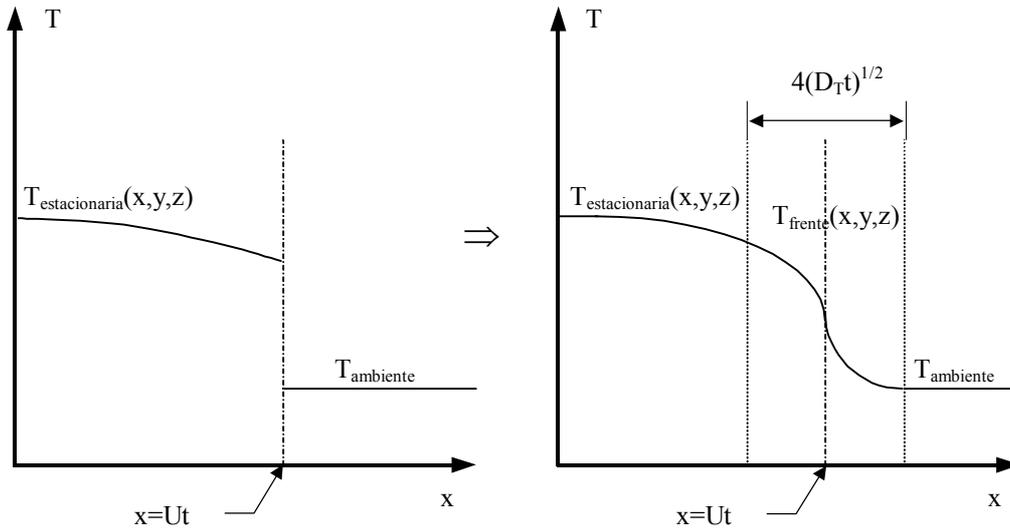


Figura 3.12: Frente de avance

Las condiciones de contorno para calcular las constantes A y B de la ecuación 3.144 serán las dadas en la ecuación 3.145. La función erf es la función error, cuyos valores límites se dan también en la ecuación 3.145, y se define en la ecuación 3.146.

$$\begin{cases} \xi \rightarrow -\infty \Rightarrow x \rightarrow -\infty & T = T_{estacionaria} & erf = -1 \\ \xi \rightarrow \infty \Rightarrow x \rightarrow \infty & T = T_{ambiente} & erf = 1 \end{cases} \quad (3.145)$$

$$erf(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a \exp(-b^2) db \quad (3.146)$$

La ecuación solución es la 3.147.

$$T_{frente}(\xi, \tau, y, z) = T_{ambiente} + \frac{T_{estacionaria}(\xi, y, z) - T_{ambiente}}{2} \left[1 - erf\left(\frac{\xi}{2\sqrt{D_T \tau}}\right) \right] \quad (3.147)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

El espesor del frente debería ser infinito. Sin embargo, la función error cumple que $\text{erf}(-1)=-0,94$ y $\text{erf}(1)=0,94$, con lo que prácticamente en dos veces el valor $2(D_T\tau)^{1/2}$ se alcanzan las condiciones de contorno. Deshaciendo el cambio de variable y suponiendo que el frente empieza en $\xi_{\text{inicial}}=x_{\text{inicial}}-Ut=-2(D_Tt)^{1/2}$, argumento con valor -1 en la función de error de la ecuación 3.147, y termina en $\xi_{\text{final}}=x_{\text{final}}-Ut=2(D_Tt)^{1/2}$, argumento con valor 1 en la función de error de la ecuación 3.147, la solución queda finalmente en la forma de la ecuación 3.148. La figura 3.12 da una representación esquemática de la evolución de la temperatura. De esta forma, la temperatura del frente en $x=Ut$ valdrá la media aritmética entre la temperatura estacionaria en $x=Ut-2(D_Tt)^{1/2}$ y la ambiente.

$$T_{\text{frente}}(x, y, z, t) = T_{\text{ambiente}} + \frac{T_{\text{estacionaria}}(Ut - 2\sqrt{D_T t}, y, z) - T_{\text{ambiente}}}{2} \left[1 - \text{erf}\left(\frac{x - Ut}{2\sqrt{D_T t}}\right) \right] \quad (3.148)$$

Como ya se dijo al principio del apartado, esta solución vale cuando $x \leq e \ll R_{\text{eq}}$. Con los resultados anteriores, ahora se puede concretar que la distancia en que se encuentra el frente debe cumplir:

$$x_{\text{frente}} = Ut \ll R_{\text{eq}} \quad (3.149)$$

y el espesor:

$$e = 4(D_T t)^{1/2} \ll R_{\text{eq}} \quad (3.150)$$

Aplicando la ecuación 3.138 y 3.139 a la 3.150 se obtiene la condición:

$$4\sqrt{k_m U * R_{\text{eq}} \frac{x_{\text{frente}}}{U}} < R_{\text{eq}} \Rightarrow x_{\text{frente}} < \frac{U}{U * 16k_m} R_{\text{eq}} = \frac{\sqrt{2}}{16k_m} \frac{R_{\text{eq}}}{\sqrt{C_f}} = \frac{\sqrt{2}}{8k_m} \frac{R_{\text{eq}}}{\sqrt{\lambda}} \quad (3.151)$$

A medida que el frente de avance progrese, la desigualdad 3.151 empieza a ser menos cierta y habría que resolver la siguiente ecuación completa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.152)$$

En cualquier caso, la solución anteriormente propuesta, serviría como valor indicativo de las tendencias.

3.5.3 - MALLADO EN LA DIFUSIÓN

La velocidad mínima de aire necesaria para suponer que se pueda aplicar el modelo cuasi-unidimensional es tal que la difusión aguas arriba del foco puede considerarse nula. Por tanto, sólo se ha estudiado la evolución de los humos aguas abajo del incendio. Se considera el foco del fuego en el centro de la sección, aplicándose la condición de simetría en el plano longitudinal central. Debido a ello, únicamente se ha modelado media sección transversal del túnel, figura 3.13.

Se ha elegido un mallado uniforme para cada una de las tres direcciones del espacio. La discretización será con diferencias centradas para la ecuación de difusión en el caso estacionario. Para que exista estabilidad en un método numérico explícito de integración, es necesario que los incrementos de discretización cumplan el criterio de Courant:

$$\left. \begin{array}{l} 1 - 2 \frac{D_T}{U} \Delta x \left(\frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) > 0 \\ \Delta y = \Delta z \text{ (en principio)} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta x < \frac{\Delta y^2}{4 \frac{D_T}{U}} \quad (3.153)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

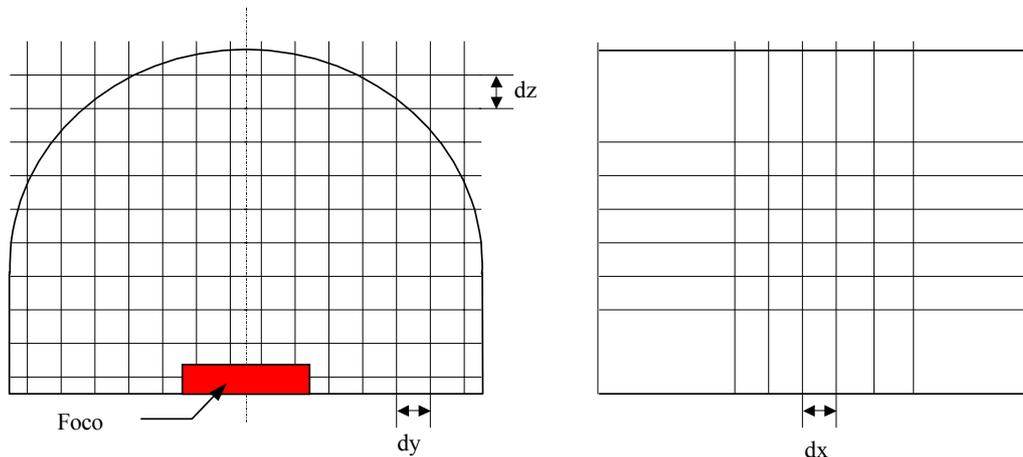


Figura 3.13: Mallado en la difusión

3.6 - FACTORES DE FORMA

El objetivo fundamental, en caso de incendio, de cualquier sistema de ventilación dentro de un túnel de carretera es conseguir asegurar el salvamento de las personas que lo estén utilizando en el momento del accidente. Adicionalmente se pretende que las instalaciones y equipos del túnel no sufran daños importantes para permitir la mayor rapidez posible a la hora de volver a utilizar la instalación. Como ya se explicó en el apartado 1.2.1, para conseguir los objetivos anteriores, uno de los parámetros importantes a tener en cuenta son los niveles de radiación que sufrirían personas y vehículos atrapados por el incendio, así como los sistemas y equipos del túnel. La importancia de la radiación sobre personas es evidente: a mayor radiación mayor es el nivel de daño por quemaduras y mayor el riesgo de fallecimiento. El flujo de calor por radiación sobre vehículos es importante, no únicamente para intentar salvar los bienes de los usuarios, si no sobre todo para evitar una combustión de los mismos por efecto del calor que les llega. Si esto se llegase a producir se originaría un efecto multiplicador de la potencia del fuego y por tanto sus consecuencias negativas. El daño a las instalaciones también es un factor a tener en cuenta ya que puede retrasar la reapertura de las mismas y o causar un

importante daño económico. Piénsese en cables de comunicaciones, fibra óptica, equipos de seguridad del túnel, sus propios ventiladores y sistema de extracción de humos,...

Para túneles unidireccionales, se hace la suposición de que las personas y coches que se encuentren aguas abajo del foco del incendio pueden escapar ya que nada les entorpece el paso. Sin embargo, aguas arriba el incendio constituye una barrera que impide la circulación de los vehículos por lo que los pasajeros los tendrán que abandonar y huir a pié. Estos vehículos abandonados constituyendo un foco potencial de ampliación de la potencia de fuego.

El objetivo de este apartado es dar un medio para calcular el calor que llegará por radiación a las personas que pudiesen estar heridas aguas arriba del incendio y no consiguiesen escapar hacia una salida. También se calcula el calor que llega a los coches atrapados en esa sección del túnel para intentar predecir el flashover.

La normativa existente sólo obliga a contener el incendio. En situaciones críticas este concepto no esta muy claro. Por ello es de interés valorar, aunque el incendio esté contenido aparentemente, cuanta radiación les puede llegar a las personas o coches inmovilizados. Con un sistema de ventilación que cumpliese las recomendaciones actuales, las personas heridas aguas abajo de un incendio tipo, 30 MW, difícilmente sobrevivirían a las altas temperaturas que se alcanzarían en esa zona. Con un cálculo *muy simplificado*, en una zona donde los humos ocupan toda la sección de paso con temperatura uniforme, dicha temperatura quedaría:

$$P = \rho v A c_p (T - T_a) \Rightarrow T = T_a + \frac{P}{\rho v A c_p} \quad (3.154)$$

donde P es la potencia del incendio, ρ y c_p la densidad y calor específico del aire respectivamente, A el área de la sección de paso, v la velocidad de los humos y T_h y T_a la temperatura de los humos y la ambiente respectivamente. Para aire seco sin contaminantes a presión atmosférica en una sección típica de unos 80 m² y aire ambiente a 15 °C, dicha ecuación daría los valores reflejados en la figura 3.14 y en la tabla 3.3. Para la densidad y el calor específico a distintas temperaturas se han empleado los datos de Chapman (1984). Como se puede observar, el valor crítico de temperatura que causa daño por convección para una exposición prolongada, aproximadamente 40 °C, se produce para velocidades de aire menores de 0'7, 2'2 y 4'4 m/s con potencias de incendio de 1'5, 5 y 10 MW respectivamente. Dichas

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

velocidades suelen ser asumibles por los sistemas de ventilación longitudinales. Sin embargo, para los 30 MW de la normativa de diseño, deberíamos llegar a velocidades mayores de 12 m/s, 43'2 km/h, para estar por debajo de los 40 °C. Dicha velocidad es muy alta y podría causar problemas en la circulación dentro del túnel.

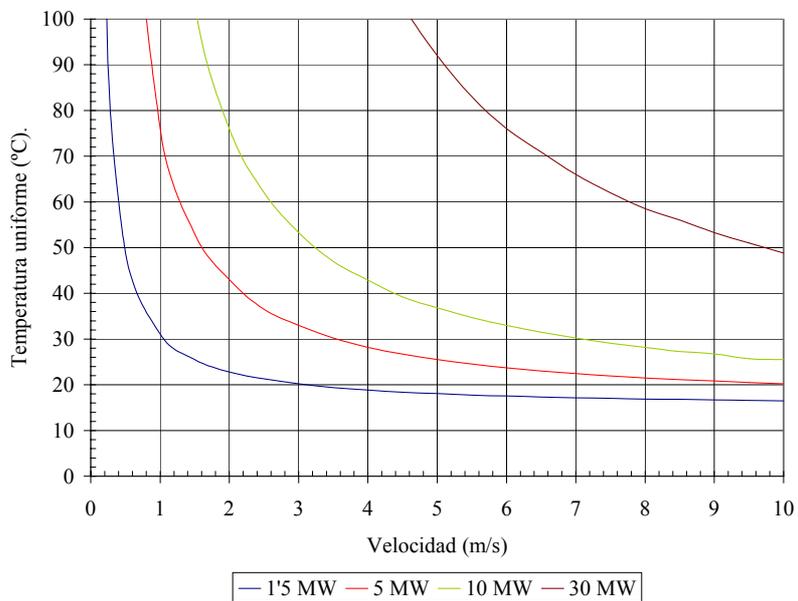


Figura 3.14: Temperatura con capa de humos uniforme y ocupando toda la sección de paso

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C) 1'5 MW	Temperatura (°C) 5 MW	Temperatura (°C) 10 MW	Temperatura (°C) 30 MW
0.07	621	> 650	> 650	> 650
0.23	100	640	> 650	> 650
0.5	49	168	534	> 650
1	31.1	76	167	> 650
1.5	25.5	53	103	536
2	22.8	43	76	311
2.5	21.3	36.5	62	218
3	20.2	33	53.3	168
3.5	19.4	30.2	47	138
4	18.85	28.2	42.9	117
4.5	18.35	26.7	39.2	103
5	18.05	25.5	36.8	92
5.5	17.75	24.55	34.7	83
6	17.55	23.7	33	76
6.5	17.35	23	31.5	70.9
7	17.15	22.45	30.2	66
7.5	17.06	21.95	29.1	62
8	16.9	21.48	28.2	58.5
8.5	16.8	21.15	27.3	56
9	16.7	20.85	26.75	53.3
9.5	16.6	20.5	25.7	51
10	16.5	20.2	25.5	48.8

Tabla 3.3: Temperatura con capa de humos uniforme y ocupando toda la sección de paso

Como ya se ha explicado, actualmente en los túneles unidireccionales se exige una ventilación capaz de contener los humos en la zona aguas abajo del incendio en el sentido de la circulación de vehículos. De esta forma aguas arriba podrán quedar personas heridas y los vehículos de aquellos que huyan caminando en sentido contrario a la circulación original del túnel. La radiación provendrá de las zonas calientes que aparecen a consecuencia del incendio. La figura 3.15 muestra un esquema de la geometría involucrada. El sistema de coordenadas para este apartado se toma con origen en el centro de la base de la llama: eje x en sentido contrario a la circulación, z hacia arriba e y formando un triedro orientado. Se considera que el incendio se produce en el eje de simetría de un túnel de sección abovedada, una zona inferior de forma rectangular de altura h_{pared} y anchura m y un área superior que es una porción de círculo de centro en el eje de simetría a una altura z_c respecto al suelo y de radio R , figura 3.16. Por tanto se debe cumplir:

$$h = z_c + R \quad (3.155)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

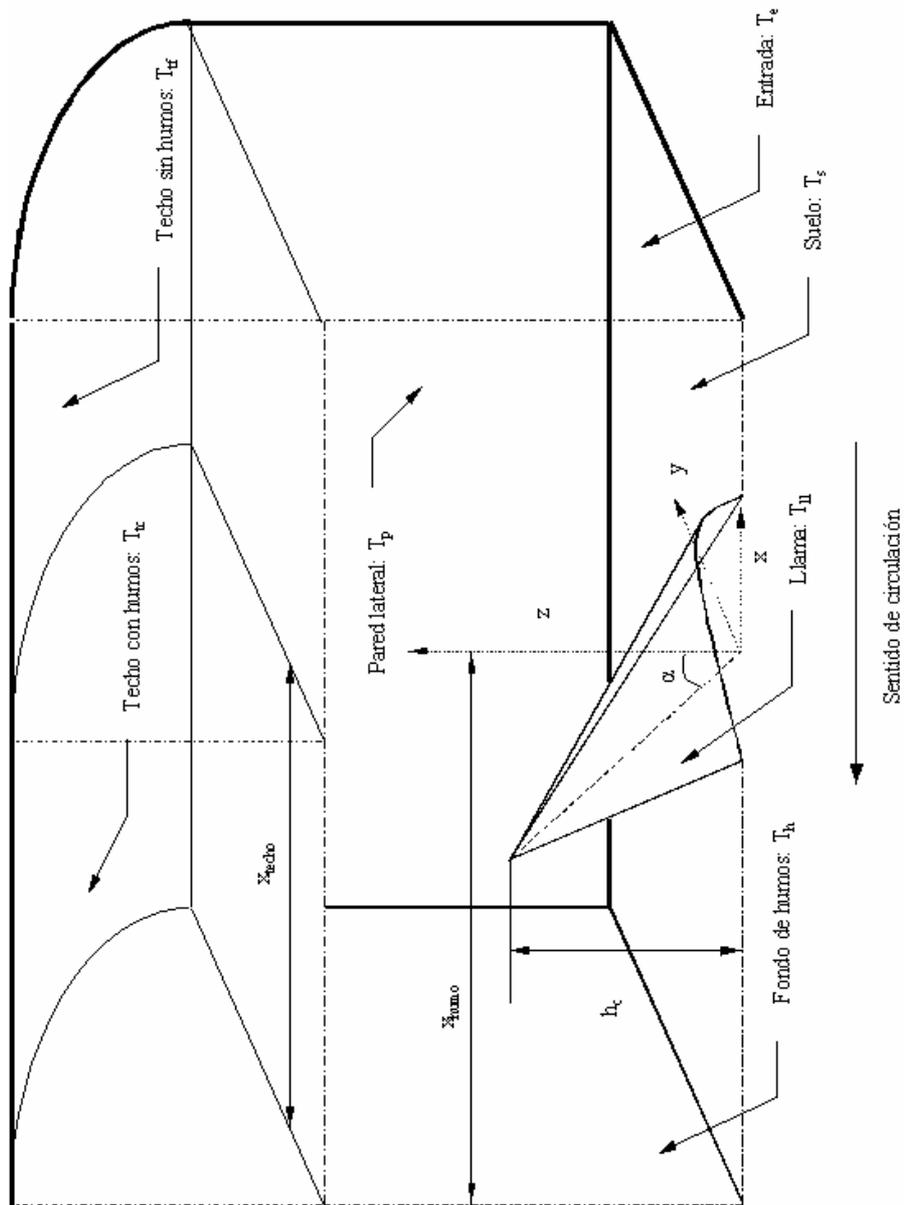


Figura 3.15: Geometría en el cálculo de la radiación a personas y objetos

$$(h_{pared} - z_c)^2 + m^2/4 = R^2 \quad (3.156)$$

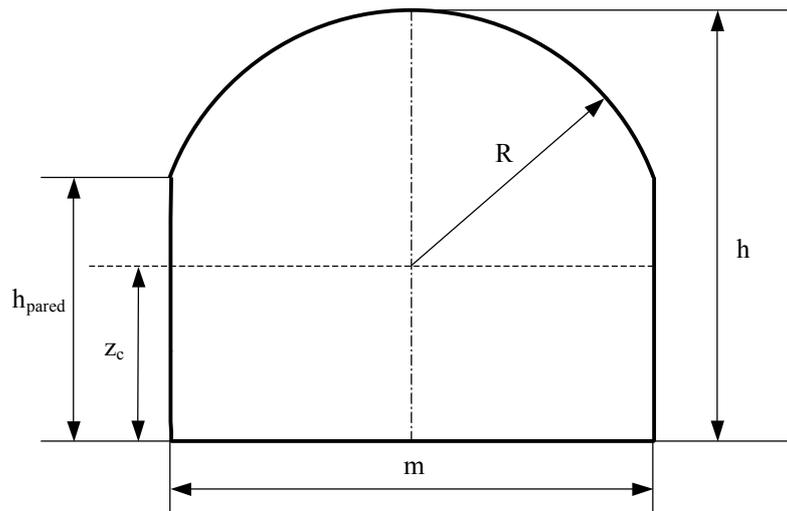


Figura 3.16: Sección transversal típica de un túnel a estudio

Las superficies y volúmenes a considerar serían:

- **Llama.** Se supone una superficie de llama a temperatura T_{ll} . Su forma se simplifica a un cono inclinado en el sentido de la circulación ya que la ventilación orientará la llama hacia dicha zona. La inclinación del cono será α grados medidos desde la vertical. Su base se considera elíptica de semiejes r_a y r_b en las direcciones x e y respectivamente. Las secciones a distintas alturas corresponderán también a elipses cuyos semiejes a y b serán tales que a una altura h_c se encuentre el vértice del cono, ecuaciones 3.157 y 3.158. La superficie de la llama será la dada por la ecuación 3.159. Todas estas dimensiones se pueden obtener con los resultados de los apartados anteriores.

$$a = r_a (1 - z / h_c) \quad (3.157)$$

$$b = r_b (1 - z / h_c) \quad (3.158)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\frac{(x + z \operatorname{tg} \alpha)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ para } 0 \leq z \leq h_c \quad (3.159)$$

- **Fondo de humos**, detrás del incendio. Los humos se acumulan y propagan hacia aguas abajo. Se considera que en una posición x_{humo} (negativa) desde el centro de la llama se llena toda la sección del túnel a una temperatura uniforme T_h , figura 3.17.

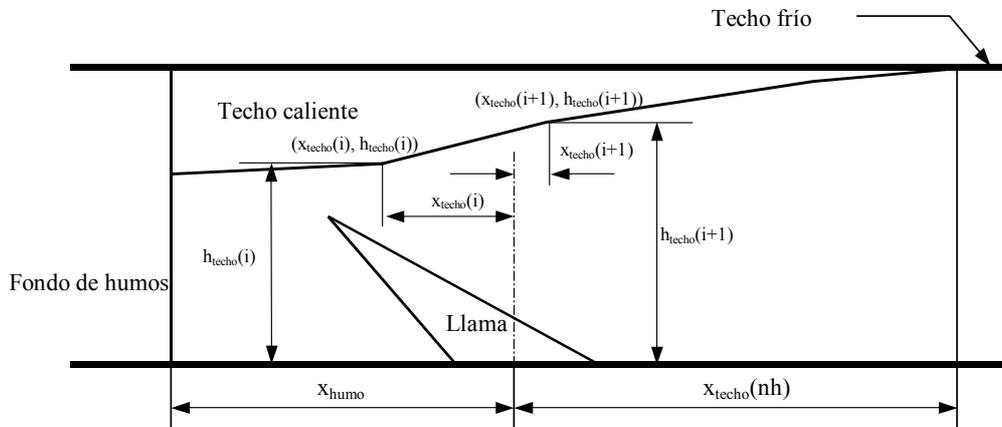


Figura 3.17: Sección longitudinal del incendio

- **Techo caliente**: humos acumulados en el techo. Para incluir más efectos, suponemos que el sistema de ventilación no es suficiente para evitar totalmente la propagación de los humos aguas arriba. Esta capa tendrá una temperatura media T_{tc} . Se considera que la altura de esta zona no tiene que ser ni uniforme ni progresiva, así que se define por una serie de nh puntos, de coordenadas $x = x_{\text{techo}(i)}$ y $z = h_{\text{techo}(i)}$, con i variando entre 1 y nh . Se comienza la numeración en el fondo de humos, por tanto $x_{\text{techo}(1)} = x_{\text{humo}}$, y se finaliza en el techo, por lo que $h_{\text{techo}(nh)} = h$. Entre cada dos puntos se supone que la altura de la capa varía linealmente. Se supone que la capa caliente ocupa toda la sección a partir de la altura en la que existe, con lo que se va adaptando a la forma del techo y las paredes, y su espesor será el de la sección a la altura correspondiente. Por consiguiente suponemos que aparecerá, pegada al techo, una capa de humos calientes que empieza en la región de temperatura de humos uniforme, fondo de humos, y llega hasta una longitud $x_{\text{techo}(nh)}$ aguas arriba. Si el sistema de ventilación

funcionase correctamente y contuviese los humos aguas abajo, ese valor sería negativo. Tanto si se contienen los humos como en caso contrario, la longitud de la zona del techo caliente sería $x_{techo}(nh) - x_{humo}$. Su posición será (x_{tc}, y_{tc}, z_{tc}) , para un x_{tc} que se encuentre entre $x_{techo}(i)$ y $x_{techo}(i+1)$:

$$z_{tc} = h_{techo} + \frac{h_{techo}(i+1) - h_{techo}(i)}{x_{techo}(i+1) - x_{techo}(i)} * (x_{tc} - x_{techo}(i)) \quad \text{para } x_{techo}(i) \leq x_{tc} \leq x_{techo}(i+1) \quad (3.160)$$

$$\begin{cases} -m/2 \leq y_{tc} \leq m/2 & \text{para } z_{tc} \leq h_{pared} \\ -\sqrt{R^2 - (z_{tc} - z_c)^2} \leq y_{tc} \leq \sqrt{R^2 - (z_{tc} - z_c)^2} & \text{para } h_{pared} \leq z_{tc} \leq h \end{cases} \quad (3.161)$$

Con todo lo anterior la posición del fondo de humos, (x_h, y_h, z_h) , quedaría limitada a:

$$\begin{aligned} x_h &= x_{humo} \\ 0 &\leq z_h \leq h_{techo}(1) \\ \begin{cases} -m/2 \leq y_h \leq m/2 & \text{para } z_h \leq h_{pared} \\ -\sqrt{R^2 - (z_h - z_c)^2} \leq y_h \leq \sqrt{R^2 - (z_h - z_c)^2} & \text{para } h_{pared} \leq z_h \end{cases} \end{aligned} \quad (3.162)$$

En caso de tener que considerar vertical el frente de avance de los humos calientes del techo, para evitar indeterminaciones, hay que considerar la radiación de esa superficie por separado. Su temperatura seguiría siendo T_{tc} pero su posición, $(x_{tef}, y_{tef}, z_{tef})$, sería:

$$\begin{aligned} x_{tef} &= x_{techo}(nh) \\ h_{techo}(nh) &\leq z_{tef} \leq h \\ \begin{cases} -m/2 \leq y_{tef} \leq m/2 & \text{para } z_{tef} \leq h_{pared} \\ -\sqrt{R^2 - (z_{tef} - z_c)^2} \leq y_{tef} \leq \sqrt{R^2 - (z_{tef} - z_c)^2} & \text{para } h_{pared} \leq z_{tef} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.163)$$

Adicionalmente deberíamos considerar, para cerrar la geometría:

- **Sección de entrada** del túnel a temperatura T_e . Se encuentra a una distancia n desde el centro de la base de la llama. Su posición será (x_e, y_e, z_e) :

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\begin{aligned}
 & x_e = n \\
 & 0 \leq z_e \leq h \\
 & \begin{cases} -m/2 \leq y_e \leq m/2 & \text{para } z_e \leq h_{pared} \\ -\sqrt{R^2 - (z_e - z_c)^2} \leq y_e \leq \sqrt{R^2 - (z_e - z_c)^2} & \text{para } h_{pared} \leq z_e \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3.164}$$

- **Techo sin humos** a temperatura T_{tf} . Se sitúa en (x_{sh}, y_{sh}, z_{sh}) :

$$\begin{aligned}
 & x_{techo}(nh) \leq x_{sh} \leq n \\
 & h_{pared} \leq z_{sh} \leq h \\
 & -\sqrt{R^2 - (z_{sh} - z_c)^2} \leq y_{sh} \leq \sqrt{R^2 - (z_{sh} - z_c)^2}
 \end{aligned} \tag{3.165}$$

- Las dos **paredes laterales** desde la entrada hasta el fondo de humos a temperatura T_p . Se encuentran en (x_p, y_p, z_p) . x_p varía entre x_{humo} y n ($x_{humo} \leq x_p \leq n$). y_p toma el valor $m/2$ o $-m/2$ ($y_p = \pm m/2$). La expresión de z_p es más complicada y se expresa mediante las dos siguientes ecuaciones:

para $x_{techo}(i) \leq x_p \leq x_{techo}(i+1)$:

$$0 \leq z_p \leq \min \left[h_{pared}, h_{techo}(i) + \frac{h_{techo}(i+1) - h_{techo}(i)}{x_{techo}(i+1) - x_{techo}(i)} * (x_p - x_{techo}(i)) \right] \tag{3.166}$$

para $x_{techo}(nh) \leq x_p$

$$0 \leq z_p \leq h_{pared} \tag{3.167}$$

- **Suelo** desde la entrada hasta el fondo de humos a temperatura T_s . Su posición, (x_s, y_s, z_s) , es:

$$z_s = 0 \text{ para } x_{humos} \leq x_s \leq n \text{ y } -m/2 \leq y_s \leq m/2 \tag{3.168}$$

excepto la sección de la base de la llama, puntos interiores a la elipse: $(x/r_a)^2 + (y/r_b)^2 = 1$

- **Plano de área A_o sobre el que incide la radiación.** Se supone a una temperatura constante T_o . Será el que haga las veces de persona o vehículo. Su posición y orientación variarán según el caso a estudiar.

En la práctica, y al menos durante los instantes iniciales, las 5 últimas temperaturas serán cercanas a la temperatura ambiente, T_a . Esto no es completamente cierto ya que precisamente la radiación hará de fuente de calor y las elevará. Sin embargo lo que nos interesa es saber, en primera aproximación, si el flujo de calor que se recibe supera los límites admisibles para una persona o para el flashover en objetos. Por tanto buscamos el calor intercambiado por radiación con los objetos y superficies más calientes; las tres superficies mencionadas inicialmente.

Vamos a considerar, en una primera aproximación, que la llama, los humos, las superficies y el objeto son óptimamente densos y que emiten como si fuesen cuerpos negros (transmisividad=0 y emisividad=1). Estas últimas suposiciones son conservativas y se podrían usar los resultados del apartado anterior. De esta forma el flujo de calor por unidad de área que llega y sale de una placa plana aguas arriba del incendio a causa de la radiación quedará:

$$\frac{E_{ro}}{A_o} = \sigma T^4 - \sum_{i=1}^8 F_{oi} \sigma T_i^4 \quad (3.169)$$

donde el sumatorio se extiende a todas las superficies que se han mencionado antes, excepto el objeto. En la tabla 3.4 se indica que superficie corresponde a cada índice. F_{oi} es el factor de forma con que con que el objeto ve a la superficie i y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

El factor de forma $F_{1 \rightarrow 2}$ es la fracción de la energía radiante que sale de una superficie de área A_1 que llega a otra superficie de área A_2 . Lo calcularemos resolviendo numéricamente la integral:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi d^2} dA_1 dA_2 \quad (3.170)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

siendo θ_1 y θ_2 los ángulos que forman las normales en el punto de integración de la superficie respectiva con la línea que une los dos puntos de integración y d la distancia entre dichos puntos, figura 3.18.

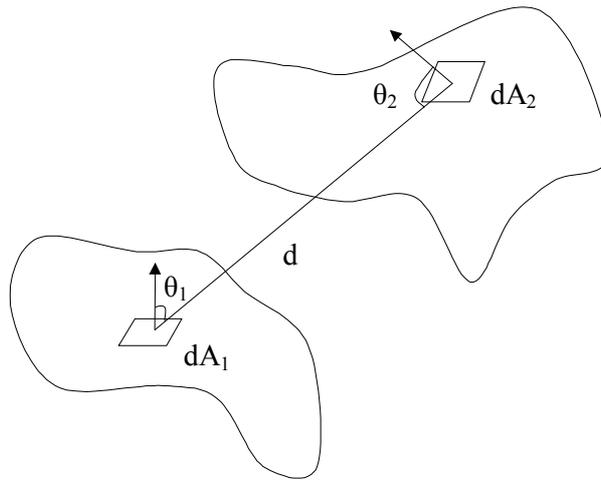


Figura 3.18: Geometría para el cálculo de los factores de forma

Los diferenciales de área y los vectores normales a cada una de las 9 superficies son conocidos e inmediatos de obtener en coordenadas cartesianas excepto para las superficies del cono de llama, índice $j = 7$, para el techo frío, índice $j = 2$, y para el techo caliente, índice $j = 8$.

Para el cono de llama analizamos planos de cota constante. Para cada altura z variando entre 0 y h_c , la coordenada y que define los puntos del contorno de la llama en el sistema cartesiano definido será:

$$y = \pm b \sqrt{1 - \left(\frac{x - x_o}{a} \right)^2} \quad (3.171)$$

donde x_c es la coordenada x del centro de la elipse a esa altura:

$$x_c = -z \tan \alpha \quad (3.172)$$

Índice	Superficie	Temperatura	x menor	x mayor	y menor	y mayor	z menor	z mayor	Vector n
1	Suelo	T_s	x_{humo}	n	$-m/2$	$m/2$	0	0	k
2	Techo frío	T_{cf}	$x_{techo}(nh)$	n	$-m/2$	$m/2$	h_{pared}	h	n_z
3	Pared de y negativa	T_p	x_{humo}	n	$-m/2$	$-m/2$	0	h_{pared}	j
4	Pared de y positiva	T_p	x_{humo}	n	$m/2$	$m/2$	0	h_{pared}	$-j$
5	Fondo de humos	T_h	x_{humo}	x_{humo}	$-m/2$	$m/2$	0	$h_{techo}(l)$	i
6	Entrada	T_e	n	n	$-m/2$	$m/2$	0	h	$-i$
7	Llana	T_l		$(x+z \tan \alpha)^2 / a^2 + y^2 / b^2 = 1$			0	h_c	n_h
8	Techo caliente	T_{tc}	x_{humo}	$x_{techo}(nh)$	$-m/2$	$m/2$	$\text{minimo}(h_{techo}(l))$	h	n_g
9	Frente del techo caliente	T_{tc}	$x_{techo}(nh)$	$x_{techo}(nh)$	$-m/2$	$m/2$	$h_{techo}(nh)$	h	i

Tabla 3.4: Nomenclatura e identificación de las superficies radiantes.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

La pendiente de la elipse en el punto considerado será:

$$y' = \frac{dy}{dx} = -\frac{b^2}{a^2} \frac{x - x_c}{y} \quad (3.173)$$

Si empleamos el sistema coordenadas cilíndrico de la figura 3.19, asociado a cada cota z, esa derivada se puede poner como:

$$y' = -\frac{b^2}{a^2} \frac{1}{\tan \theta} \quad (3.174)$$

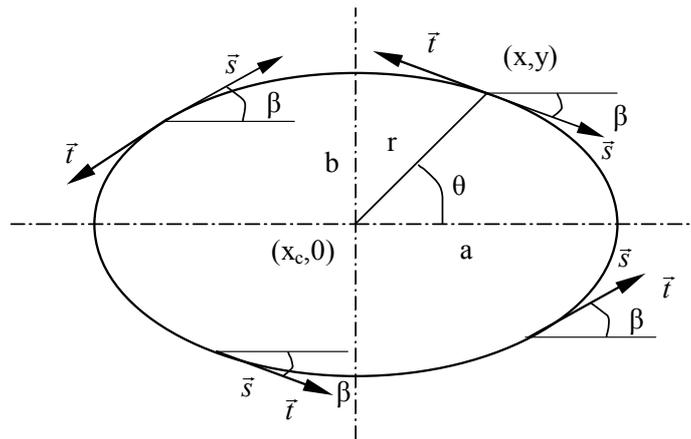


Figura 3.19: Sistema de coordenadas en elipses de cota constante.

Para obtener el valor del radio se sustituye en la ecuación de la elipse las expresiones del sistema cartesiano:

$$x - x_c = r \cos \theta \quad (3.175)$$

$$y = r \sin \theta \quad (3.176)$$

con lo que queda:

$$r = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}}} \quad (3.177)$$

De esta forma la posición x será:

$$x = x_c + \frac{\cos \theta}{\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}}} \quad (3.178)$$

y su diferencial será:

$$|dx| = \frac{\sin \theta}{b^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right)^{3/2}} d\theta \quad (3.179)$$

Con todo lo anterior se puede obtener el diferencial de longitud de la elipse:

$$dl = ab \frac{\sqrt{a^4 \sin^2 \theta + b^4 \cos^2 \theta}}{\left(a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta \right)^{3/2}} d\theta \quad (3.180)$$

Por tanto, el área diferencial del cono de llama, variando θ y z y sustituyendo los semiejes de la elipse a cualquier cota por los de la base, quedará:

$$dA_7 = dA_{ll} = r_a r_b \frac{\sqrt{r_a^4 \sin^2 \theta + r_b^4 \cos^2 \theta}}{\left(r_a^2 \sin^2 \theta + r_b^2 \cos^2 \theta \right)^{3/2}} \left(1 - \frac{z}{h_c} \right) d\theta dz \quad \text{para } \begin{cases} 0 \leq z \leq h_c \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (3.181)$$

Para obtener la normal en cada punto a la superficie de la llama obtengo primeramente el que tiene dirección tangente a cada elipse para z constante con sentido contrario a las agujas

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

del reloj, vector \vec{t} en la figura 3.19. Dicho vector vendrá dado por la derivada de la curva en los cuadrantes 3° y 4° y tendrá sentido contrario en el 1° y 2°, vectores \vec{s} . Por tanto se cumple:

$$y' = -\frac{b^2}{a^2} \frac{x - x_c}{y} = -\frac{b^2}{a^2} \tan \theta = \tan \beta$$

$$\tan \theta = \frac{x - x_c}{y} \quad (3.182)$$

$$\vec{s} = (s_x, s_y, s_z) = \begin{cases} \cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}} \\ \sin \beta = \frac{\tan \beta}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}} = \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} \\ 0 \end{cases}$$

El vector \vec{t} buscado, salvando las discontinuidades de la pendiente, se muestra en la tabla 3.5.

	$\theta = 0$	$0 \leq \theta \leq \pi$	$\theta = \pi$	$\pi \leq \theta \leq 2\pi$
t_x	0	$-\frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$	0	$\frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$
t_y	1	$-\frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$	-1	$\frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$
t_z	0	0	0	0

Tabla 3.5: Vector tangente a las elipses del cono de llama para z constante.
Sentido antihorario

El vector normal a la superficie de llama, \vec{n}_7 , será el producto vectorial del vector \vec{t} calculado y uno \vec{v} que una el punto de calculo sobre la superficie, C, con el vértice del mismo, V, ver figura 3.20.

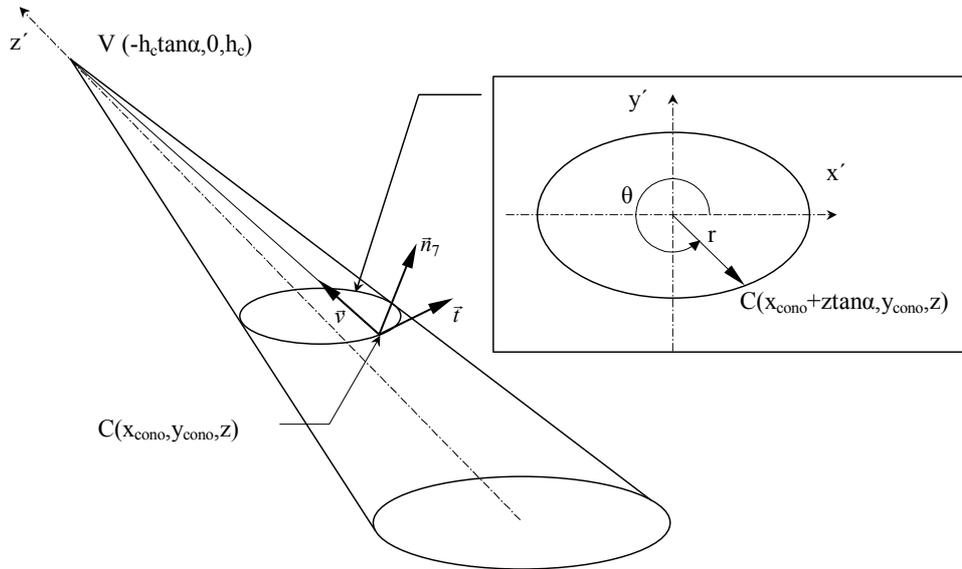


Figura 3.20: Vector \vec{n}_7 normal a la superficie del cono de llama.

Empleando las coordenadas cilíndricas para cada cota constante, figura 3.20, la posición sobre la superficie del cono está definida en las coordenadas cartesianas de la figura 3.15 por:

$$\left. \begin{aligned} x_{cono} &= -z \tan \alpha + \frac{\cos \theta}{\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}}} \\ y_{cono} &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}}} \end{aligned} \right\} \text{ para } 0 \leq z \leq h_c \quad (3.183)$$

Por tanto, el vector \vec{v} queda:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\begin{aligned}
 v_x &= \frac{(-h_c \tan \alpha - x_{cono})}{\sqrt{(-h_c \tan \alpha - x_{cono})^2 + (-y_{cono})^2 + (h_c - z)^2}} \\
 v_y &= \frac{-y_{cono}}{\sqrt{(-h_c \tan \alpha - x_{cono})^2 + (-y_{cono})^2 + (h_c - z)^2}} \\
 v_z &= \frac{(h_c - z)}{\sqrt{(-h_c \tan \alpha - x_{cono})^2 + (-y_{cono})^2 + (h_c - z)^2}}
 \end{aligned} \tag{3.184}$$

Finalmente el vector buscado \bar{n}_7 es:

$$\bar{n}_7 = \bar{i}x\bar{v} = \begin{cases} n_{7x} = \frac{t_y v_z}{\sqrt{(t_y v_z)^2 + (t_x v_z)^2 + (t_x v_y - t_y v_x)^2}} \\ n_{7y} = \frac{-t_x v_z}{\sqrt{(t_y v_z)^2 + (t_x v_z)^2 + (t_x v_y - t_y v_x)^2}} \\ n_{7z} = \frac{t_x v_y - t_y v_x}{\sqrt{(t_y v_z)^2 + (t_x v_z)^2 + (t_x v_y - t_y v_x)^2}} \end{cases} \tag{3.185}$$

Para el techo caliente, figura 3.21, habida cuenta que se considera que está formado por la unión de superficies rectas entre dos puntos, en realidad rectas, de definición se tiene:

$$\bar{n}_{ic} = \bar{n}_8 = \begin{cases} n_{icx} = n_{8x} = \frac{h_{techo}(i+1) - h_{techo}(i)}{\sqrt{(x_{techo}(i+1) - x_{techo}(i))^2 + (h_{techo}(i+1) - h_{techo}(i))^2}} \\ n_{icy} = n_{8y} = 0 \\ n_{icz} = n_{8z} = -\frac{x_{techo}(i+1) - x_{techo}(i)}{\sqrt{(x_{techo}(i+1) - x_{techo}(i))^2 + (h_{techo}(i+1) - h_{techo}(i))^2}} \end{cases} \tag{3.186}$$

$$dl = dx \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h_{techo}(i+1) - h_{techo}(i)}{x_{techo}(i+1) - x_{techo}(i)} \right)^2} \tag{3.187}$$

$$dA_{ic} = dA_8 = dy \cdot dl = \text{para } x_{techo}(i) \leq x_{ic} \leq x_{techo}(i+1) \tag{3.188}$$

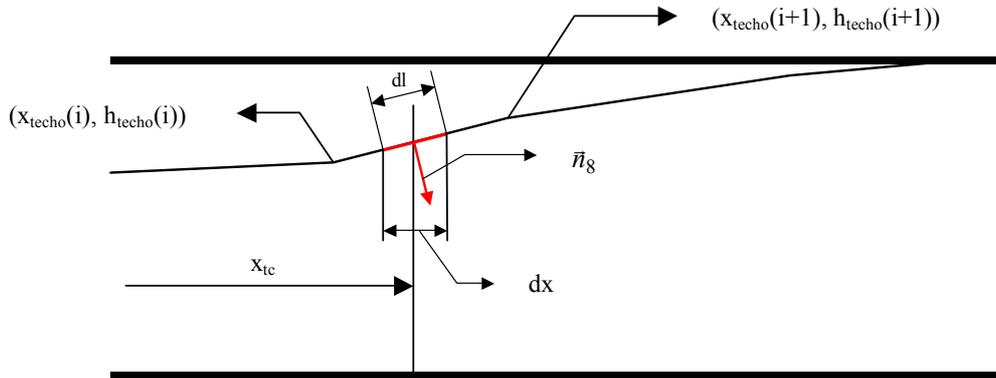


Figura 3.21: Cálculo de la normal y el diferencial de área para el techo caliente

donde dl es el diferencial que surge de proyectar dx sobre los humos calientes en el punto de cálculo x_{tc} del factor de forma entre el techo caliente y el objeto.

Respecto al techo frío, hay que considerar que se trata de un arco de circunferencia y que por tanto la normal va hacia el centro:

$$\vec{n}_{tf} = \vec{n}_2 = \begin{cases} n_{tfx} = n_{2x} = 0 \\ n_{tfy} = n_{2y} = \frac{-y_{tc}}{\sqrt{y_{tc}^2 + (z_c - z_{tc})^2}} \\ n_{tfz} = n_{2z} = \frac{z_c - z_{tc}}{\sqrt{y_{tc}^2 + (z_c - z_{tc})^2}} \end{cases} \quad (3.189)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\begin{aligned}\bar{n}_I &= \frac{y_I \vec{j} + (z_I - z_c) \vec{k}}{\sqrt{y_I^2 + (z_I - z_c)^2}} \\ \bar{n}_{II} &= \frac{y_{II} \vec{j} + (z_{II} - z_c) \vec{k}}{\sqrt{y_{II}^2 + (z_{II} - z_c)^2}} \\ \zeta &= \arccos(\bar{n}_I \cdot \bar{n}_2) \\ dc &= R \cdot \zeta \\ dA_f &= dA_2 = dx \cdot dc\end{aligned}\tag{3.190}$$

donde (y_I, z_I) e (y_{II}, z_{II}) son los puntos de intersección del arco de circunferencia de la sección transversal del túnel con la discretización en la dirección y que se emplea al calcular el factor de forma entre el objeto receptor y el techo frío, \bar{n}_I y \bar{n}_{II} son los vectores unitarios que unen el centro de la circunferencia que sustenta la bóveda con los puntos de intersección anteriores, ζ es el ángulo entre dichos vectores y dc el diferencial de arco perteneciente al punto de cálculo, figura 3.22.

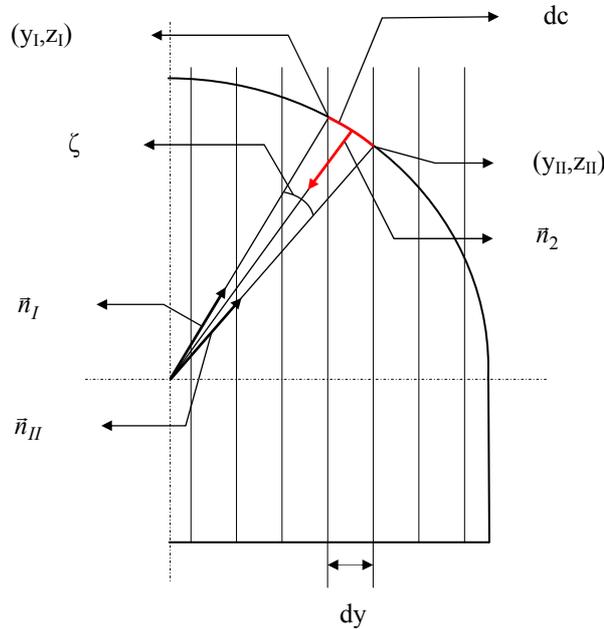


Figura 3.22: Cálculo de la normal y el diferencial de área para el techo frío

Con todo lo anterior se pueden calcular todos los elementos de la tabla 3.4 que faltaban por obtener.

Las distintas funciones de forma se calculan fácilmente integrando numéricamente. Para ello se emplean dos sistemas de referencia, uno para el objeto y otro para la superficie i de que se trate. El sistema elegido para todas las superficies planas, incluido el objeto, es el cartesiano que aparece en figura 3.15. Para la llama es preferible usar uno cilíndrico *modificado*. El adjetivo *modificado* significa que el eje z usado está inclinado respecto al plano que contiene los ejes de referencia de la coordenada radial y de la polar, tal como indica la figura 3.20.

Dado que buscamos encontrar el factor de forma del objeto, subíndice o , con cada superficie i :

$$F_{oi} = \frac{1}{A_o} \int_{A_o} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_o \cos\theta_i}{\pi d^2} dA_o dA_i \quad (3.191)$$

quedan por deducir los cosenos, $\cos\theta_o$ y $\cos\theta_i$, de los ángulos formados entre las normales a las dos superficies de integración, objeto y superficie radiante i , en los puntos del cálculo numérico con la recta que une dichos puntos. También falta calcular la distancia, d , entre ambos puntos. dA_o y dA_i son inmediatos en coordenadas cartesianas y ya ha sido obtenido para las cilíndricas del cono.

Si el punto de integración en el objeto es $A(x_a, y_a, z_a)$ y el de la superficie i es $B(x_b, y_b, z_b)$, la distancia entre ambos será:

$$d = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2} \quad (3.192)$$

y el vector unitario desde A hasta B es:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\begin{aligned}
 m_x &= \frac{x_b - x_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}} \\
 m_y &= \frac{y_b - y_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}} \\
 m_z &= \frac{z_b - z_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}}
 \end{aligned} \tag{3.193}$$

Por tanto los cosenos buscados son:

$$\begin{aligned}
 \cos(\theta_o) &= \bar{n}_o \cdot \bar{m} \\
 \cos(\theta_i) &= -\bar{n}_i \cdot \bar{m}
 \end{aligned} \tag{3.194}$$

donde \bar{n}_o es la normal del objeto y \bar{n}_i es la normal a cada superficie radiante, tabla 3.4.

En la integración numérica, al unir un punto del objeto con otro de alguna superficie i la recta obtenida puede cortar con el cono de llama en un punto intermedio de los anteriores. Además, cuando se está integrando sobre la mitad oculta desde el objeto de la superficie de la llama, siempre habrá un punto de corte con dicha superficie en la superficie vista. En ambos casos el término que habría que añadir al sumatorio de la integración numérica no es válido. El objeto no ve ese punto por lo que no intercambian calor entre ellos. Por tanto, ese sumando no debe ser tenido en cuenta. Para poder detectar numéricamente esa situación hay que calcular la intersección de la recta que une los puntos de integración con el cono de llama. Esa recta tiene la siguiente expresión en coordenadas paramétricas:

$$\begin{aligned}
 x &= x_a + m_x t \\
 y &= y_a + m_y t \\
 z &= z_a + m_z t
 \end{aligned} \tag{3.195}$$

Hemos elegido como origen de la recta en paramétricas el punto A, perteneciente al objeto, y la dirección y sentido el dado por el vector unitario \bar{m} , desde A hacia el punto B perteneciente a

la superficie i . Por consiguiente, si t vale d el punto es la intersección de la recta con la superficie i , punto B, y si vale 0 es la intersección de la recta con el objeto, punto A.

Sustituyendo la recta en la expresión matemática del cono de llama se obtiene el corte entre ambos mediante el valor de t solución de la ecuación de segundo grado resultante. El procedimiento será:

$$r_b^2(x + z \cdot \tan \alpha)^2 + r_a^2 y^2 = \left(1 - \frac{z}{h_c}\right)^2 r_a^2 r_b^2 \quad (3.196)$$

Por tanto hay que resolver el siguiente sistema:

$$r_b^2(x_a + z_a \cdot \tan \alpha + (m_x + m_z \cdot \tan \alpha)t)^2 + r_a^2(y_a + m_y t)^2 = \left(1 - \frac{z_a}{h_c} - \frac{m_z}{h_c} t\right)^2 r_a^2 r_b^2 \quad (3.197)$$

o lo que es lo mismo:

$$c_2 t^2 + c_1 t + c_0 = 0 \quad (3.198)$$

donde

$$\begin{cases} c_2 = r_b^2(m_x + m_z \cdot \tan \alpha)^2 + r_a^2 m_y^2 - r_a^2 r_b^2 \left(\frac{m_z}{h_c}\right)^2 \\ c_1 = 2 \cdot r_b^2(m_x + m_z \cdot \tan \alpha) \cdot (x_a + z_a \cdot \tan \alpha) + 2 \cdot r_a^2 m_y y_a + 2 \cdot r_a^2 r_b^2 \frac{m_z}{h_c} \left(1 - \frac{z_a}{h_c}\right) \\ c_0 = r_b^2(x_a + z_a \cdot \tan \alpha)^2 + r_a^2 y_a^2 - r_a^2 r_b^2 \left(1 - \frac{z_a}{h_c}\right)^2 \end{cases} \quad (3.199)$$

Existe solución únicamente cuando $c_1^2 - 4 c_2 c_0 \geq 0$. Si esto no ocurre el cono no se interpone entre el objeto y la superficie i . Ambos puntos se *ven*. En caso contrario hay que analizar el valor de la solución. En general existirán dos:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$t_{\pm} = \frac{-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4c_2c_0}}{2c_2} \quad (3.200)$$

Para el caso real de que el punto considerado del objeto esté fuera de la llama, las dos soluciones de t , t_{\pm} , son de igual signo:

- Si son negativas quiere decir que la intersección se produce hacia la cara del objeto contraria a su normal \vec{n}_o , lado oculto del objeto. Eso quiere decir que ese corte no vale y que el sumando correspondiente **si** que tiene que ser tenido en cuenta en la integración numérica.
- Si son positivas hay que distinguir dos casos:
 - La superficie i es el cono de llama. En esta situación una de las t solución, t_{\pm} de la ecuación 3.200, debe ser igual a d ya que la recta paramétrica con origen en A debía pasar por B en d unidades de longitud medidas en la dirección y sentido del vector \vec{m} :
 - a) Si la mayor de las t_{\pm} solución es la que vale d , esa será la que represente al punto B . Por tanto existe otro punto intersección dado por la menor t_{\pm} solución que se encuentra más cerca de A y que *tapa* a B . El sumando correspondiente en la integración numérica del factor de forma **no** debe incluirse.
 - b) Si la menor de las t_{\pm} solución es la que vale d , esa será la que represente al punto B . Por tanto el otro punto intersección dado por la mayor t_{\pm} solución se encuentra más lejos de A y *no tapa* a B . El sumando correspondiente en la integración numérica del factor de forma **si** debe incluirse.
 - La superficie i no es la del cono de llama. Ahora ninguna de las soluciones t_{\pm} tiene por que valer d :

-
- a) Si la menor t_{\pm} solución es menor que d , existe un punto intermedio entre A y B que impide el intercambio radiante entre ambos. El sumando correspondiente en la integración numérica del factor de forma **no** debe incluirse. Esto no sería válido si la z del punto intersección, $z_a + m_z \cdot \text{menor}(t_{\pm})$, es mayor que h_c . En este caso el corte con el cono de llama se produce por arriba del cono real, en la imagen simétrica del mismo respecto al vértice V. Por tanto si que existirá intercambio radiante directo entre A y B y **si** hay que incluir el sumando correspondiente en la integración numérica.
- b) Si la menor t_{\pm} solución es mayor que d , no existe punto intermedio entre A y B. Existe intercambio radiante entre ambos y el sumando correspondiente en la integración numérica del factor de forma **si** debe incluirse.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

CAPÍTULO 4

PROGRAMA

4.1 - INTRODUCCIÓN

El modelo y método de cálculo presentados en el capítulo 3 permite obtener las variables fundamentales que afectan a la seguridad en caso de un incendio en el interior de un túnel. En el penacho se emplea el modelo cuasi-unidimensional presentado en los apartados 3.2 y 3.3. Para la difusión se resuelven las ecuaciones correspondientes al caso permanente o a la aproximación no estacionaria, expuestas en el apartado 3.5.

La sistematización del proceso posibilita el análisis de escenarios con distintas hipótesis de potencia de fuego, velocidad de ventilación, geometría del túnel,... El tiempo de cálculo para cada caso es despreciable en comparación con el empleado con cualquier otro de los programas comerciales empleados habitualmente en estos estudios. De esta forma se tiene una herramienta útil para, en fase de diseño, dimensionar la ventilación y crear planes de actuación ante un siniestro.

4.2 - ESTRUCTURA DEL UPMROTUFI (UPM ROAD TUNNEL FIRE)

El programa ha sido implementado utilizando como lenguaje de programación el FORTRAN, ya que este permite diseñar separadamente los bloques y procedimientos de los distintos modelos para ensamblarlos posteriormente en los programas definitivos. La estructura del programa se puede ver en la figura 4.1. Es preciso realizar algunas aclaraciones en cuanto a los contenidos de ciertas secciones de dicha figura.

- Por organización de archivos (sección 1) se entienden los trabajos de creación de archivos y carpetas necesarios para obtener los resultados ordenadamente.
- Los datos se introducen (sección 2) mediante un fichero de entrada. Los valores de dicho fichero pueden ser modificados antes de ejecutar el programa. Para ello se emplea una interacción programa-usuario bajo sistema de ventanas.
- En el cálculo del penacho (sección 4), hay que resolver un sistema de 10 ecuaciones diferenciales acopladas de primer orden. El sistema de ecuaciones para cada paso de cálculo puede ser explícito. Esto ocurrirá cuando se supone que los valores de las propiedades de los gases, que intervienen en los términos fuente de las ecuaciones, se toman como los correspondientes a la posición anterior de cálculo. Si el valor de esas variables se considera en la posición media entre las dos secciones circulares del tronco de cono en que se discretiza el penacho, figura 3.8, el problema se convierte en implícito. En esta situación, se ha empleado un método de Runge-Kutta de cuarto orden para la búsqueda de la solución, Carnahan 1979.

Para decidir si se ha llegado al techo se adopta como criterio que la distancia entre él mismo y el extremo del penacho calculado sea menor que el 45% de la proyección del radio del penacho sobre la vertical. Así se puede asegurar que no existen pérdidas elevadas en el problema planteado en el apartado 3.4 y figura 3.10.

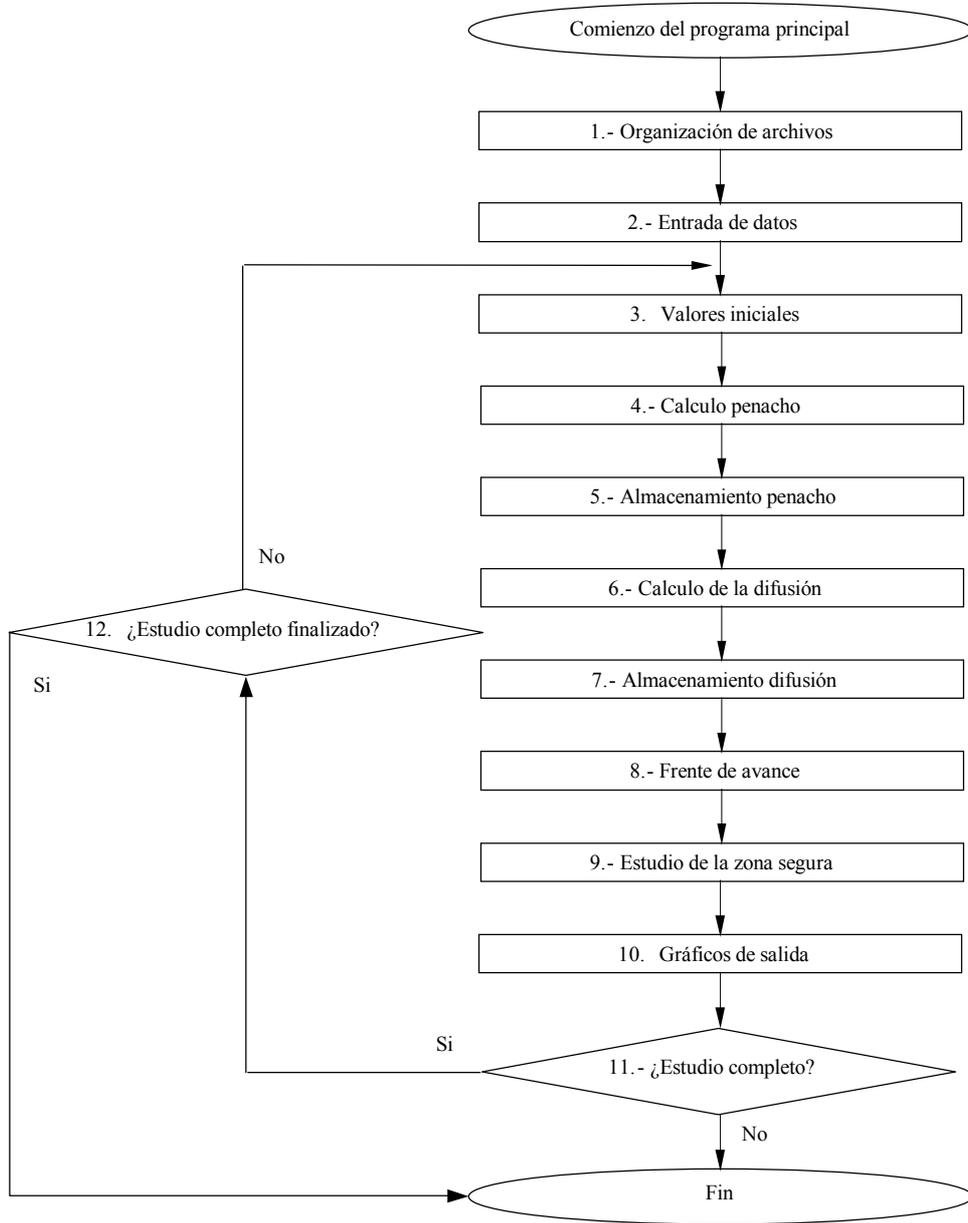


Figura 4.1: Estructura del programa

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

- Se guardan los resultados del penacho antes de calcular la difusión (sección 5) para así poder liberar memoria retenida en las matrices que los almacenan. Dichas matrices, para el penacho, son las de mayor tamaño en todo el programa. Por esta razón, en los pasos de las secciones 1 y, ó, 2, se deben indicar previamente al cálculo los planos en los que se quieren resultados.
- El frente de avance (sección 8) sirve para enlazar las propiedades existentes en la zona de cálculo de la difusión y las exteriores ambientales. Este módulo se activará automáticamente cuando el espacio recorrido por los humos, desde el inicio del fuego hasta el instante fijado, sea inferior a la distancia entre la posición del incendio y la boca de salida.
- Según los criterios adoptados en cuanto a las propiedades que hacen segura la permanencia dentro del túnel, en el estudio de la zona segura (sección 9), se calcula y representa en que zonas del túnel se sobrepasan esos criterios.
- Por gráficos de salida (sección 10) se entiende la parte del programa que creará y visualizará los resultados solicitados en los planos pedidos previamente; temperatura, visibilidad y, o, concentración de cada una de las especies. Al mismo tiempo que se visualiza el gráfico, se crea un fichero con los datos empleados en su obtención.
- Existen dos modos de funcionamiento del programa: calcular un caso aislado o hacer el estudio completo para unas condiciones de potencia dadas, sección 11. En el primero de los casos se calcularían los valores de las magnitudes solución para una determinada velocidad de ventilación. Por estudio completo se entiende un cálculo que empezaría con la velocidad fijada, la cual sería modificada, aumentada o disminuida automáticamente, en sucesivos cálculos hasta encontrar aquella que consigue que exista zona segura en todo el túnel aguas abajo del incendio (sección 12). Una zona segura sería un espacio de escape, con condiciones ambientales admisibles para una persona, entre los humos del techo y el suelo del túnel y desde la posición del incendio hasta la boca de salida. Los criterios fijados para considerar que existe zona segura se pueden introducir en las secciones 1 y, o, 2, siguiendo las recomendaciones del apartado 1.3.

Para el caso de estudio completo, se obtendrían automáticamente las gráficas y ficheros resultados para dicho estudio. Sin embargo, no existiría la posibilidad de ver u obtener resultados para las velocidades concretas en que se basa. Para conseguir estos últimos, habría que ejecutar el programa para la velocidad deseada como un caso aislado, sin estudio completo.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

CAPÍTULO 5

RESULTADOS PARA LA COMPARACIÓN

5.1 - PROCEDIMIENTO

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos mediante distintas vías para validar el modelo y programa propuestos en los capítulos 3 y 4. El procedimiento empleado ha sido similar al llevado a cabo en el estudio de los túneles de Lorca, Crespo 1998. Se trata de analizar el comportamiento de un túnel real ante un incendio que se produce en su interior. Se han obtenidos los siguientes resultados:

- Resultados experimentales, apartado 5.4.4.
- Resultados numéricos:
 - Modelos 3D con combustión: FLUENT, apartado 5.5.3.1, y PHOENICS, apartado 5.5.3.2.
 - Modelos 3D sin combustión: SOLVENT, apartado 5.5.3.3.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Aunque el modelo aproximado presentado en esta tesis es fundamentalmente estacionario, se van a introducir algunos resultados transitorios para ver la evolución del incendio. Además, en ciertas ocasiones, el transitorio obtenido se consigue mediante una sucesión de estados estacionarios intermedios, con los cuales si se pueden hacer comparaciones.

Previamente a los resultados se describirá el túnel, apartado 5.2, los ensayos, apartados 5.4.1, 5.4.2 y 5.4.3, y los modelos numéricos empleados, apartado 5.5.1 y 5.5.2. Además, se comentarán algunos trabajos necesarios para poder llevar a cabo los experimentos sin peligro, apartado 5.3.

5.2 - TÚNEL A ESTUDIO

La ampliación del aeropuerto Madrid-Barajas con una tercera pista en el año 1998, hizo necesario la desviación de la carretera autonómica M-111 en el tramo que une el distrito urbano de Barajas con la localidad de Paracuellos del Jarama. Para sortear las nuevas instalaciones aeroportuarias, se construyó un túnel de 836 metros de longitud. Nuevas ampliaciones del citado aeropuerto con una cuarta pista y nuevos edificios para terminales y servicio, han obligado a desdoblarse y prolongar en 1770 metros el anterior túnel. De esta forma, en la actualidad existen 4 tubos de 2606 metros de longitud, figura 5.1:

- Los dos túneles centrales conducen el tráfico rodado que circula por la carretera M-111, uno por cada sentido de circulación. El estudio se realizará para el tramo sentido Barajas.
- Los dos túneles exteriores son de uso privado:

- El situado más al norte es utilizado únicamente para albergar las canalizaciones necesarias para las instalaciones del propio túnel, servicios aeroportuarios y de otras compañías.
- El tubo sur forma parte de las vías de comunicación dentro del aeropuerto. Por él circula, en ambos sentidos, tráfico rodado interno para salvar las pistas de aterrizaje y despegue. Desde él parte un ramal de acceso a la torre de control.

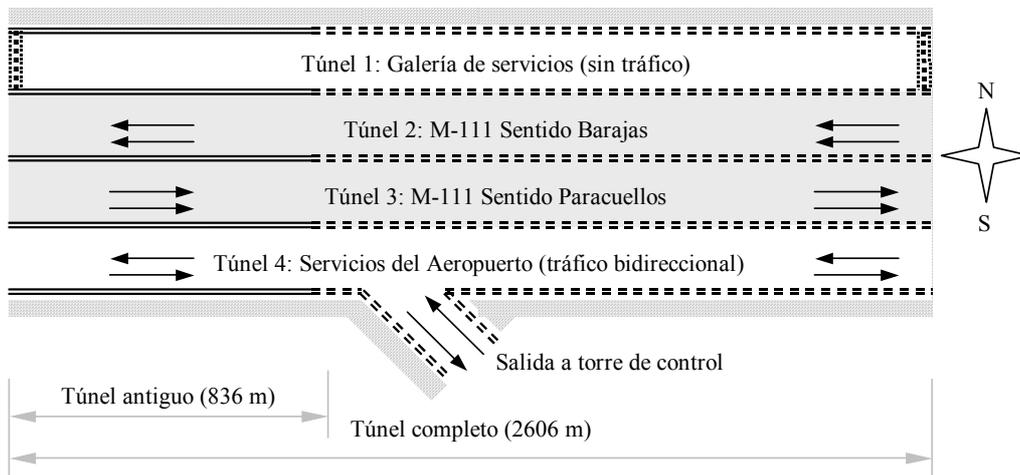


Figura 5.1: Esquema del túnel a estudio

Otras medidas características del túnel se pueden encontrar en las tablas 5.1 y 5.2. Los tramos comienzan a contar desde Barajas, siendo el tramo 1, subtramo 1, el correspondiente al túnel antiguo. Éste precisamente es el único con sección rectangular (con vigas en el techo), el resto tienen sección de arco de circunferencia en la bóveda. Hay que destacar, además de los cambios de sección en los distintos tramos, la pendiente existente en el túnel, muy importante a la hora de los cálculos de ventilación. El punto más alto está a 598'3 m y el más bajo a 569'9 m. Por tanto existe una pendiente media de un 1% predominantemente descendente desde Barajas a Paracuellos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

	Tramo	Ancho (m)	Altura clave (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)	Longitud (m)	Tipo de envolvente	Rugosidad (m)	Díametro hidráulico (m)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
Barreras	1	12.0	6.2	73.8	36.3	935	con vigas en canto	0.66	8.1	598.30	593.65
	2	12.0	8.0	85.5	36.0	537	con bóveda	0.02	9.5	593.65	575.90
	3	17.0	5.0	85.0	44.0	54	revestida	0.02	7.7	578.00	576.70
	4	12.0	8.0	85.5	36.0	529	con bóveda	0.02	9.5	575.90	569.90
	5	17.0	5.0	85.0	44.0	66	revestida	0.02	7.7	571.40	570.80
Paracuellos	6	12.0	8.0	85.5	36.0	334	con bóveda	0.02	9.5	579.92	569.91
	7	12.0	8.0	85.5	36.0	150	con bóveda	0.02	9.5	579.92	577.00
	Toral/media	12.2	7.2	81.3	36.5	2605		0.25	8.9	588.27	580.24

Tabla 5.1: Medidas características del túnel.

Algunos de los tramos en que se divide el túnel están a su vez divididos en subtramos, tabla 5.2. El tramo 1 se divide en dos, el primero corresponde a la parte antigua del túnel y el segundo a la adaptación de secciones entre la construcción vieja y la nueva. Los tramos 2 y 4 están divididos en dos subtramos debido a que los tramos 3 y 5 se intercalan respectivamente en ellos. La razón es el cambio de sección producido al tener que salvar un edificio satélite en el primer caso y un túnel de servicio del aeropuerto en el segundo.

Tramo	Subtramo	Punto métrico (m)	Longitud (m)	Cota (m)
		-835.0		598.3
1	1		835.0	
		0.0		594.5
1	2		100.0	
		100.0		593.7
2	1		512.5	
		612.5		578.0
3			54.0	
		666.5		576.7
2	2		24.5	
		691.0		575.9
4	1		471.0	
		1162.0		571.4
5			66.0	
		1228.0		570.8
4	2		58.0	
		1286.0		569.9
6			334.0	
		1620.0		579.9
7			150.0	
		1770.0		577.0

Tabla 5.2: Longitudes de tramos y subtramos

El túnel cuenta con un sistema de ventilación longitudinal independiente en cada uno de los tubos de la M-111. También se ha previsto ventilación forzada en la galería de servicios

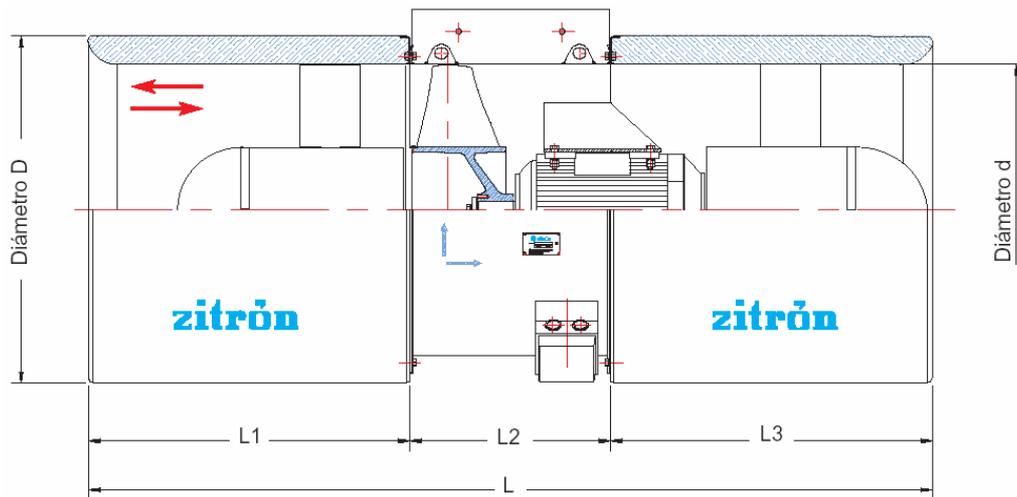
Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

del aeropuerto, con el objetivo de diluir el CO procedente de un eventual paso de vehículos, y como ayuda ante una posible emergencia en el tubo adyacente. Los ventiladores se han colocado por parejas en posición cenital en el centro de los vanos orientados longitudinalmente en la dirección del túnel. Son reversibles por lo que podrían ventilar en ambos sentidos.

El sistema de ventilación del túnel de la M-111 ha sido diseñado por EUROESTUDIOS S.A, 2000. Ésta ha sido la base con la que se han dimensionado las instalaciones. Se supusieron dos intensidades de incendio: 20 MW y 50 MW, y seis posibles localizaciones del incendio, una en cada tramo en que se divide la carretera, calculándose bajo los siguientes criterios el número de ventiladores necesarios según cada caso:

- Mantener los niveles de concentración de CO y de visibilidad por debajo de un máximo determinado.
- Garantizar una velocidad mínima de arrastre de humos en caso de incendio. Se trata de asegurar que, para tubos unidireccionales, no exista retorno de humos. La filosofía de actuación es ventilar en la dirección de circulación de los vehículos, que aguas abajo del incendio no tienen obstáculos y por tanto pueden escapar. Mientras, aguas arriba, los coches atrapados no pueden proseguir su marcha al existir el fuego que obstaculiza la huida pero, como se consigue evitar el retorno de humos mediante la ventilación, existen condiciones seguras que permiten escapar a pie.

Los ventiladores empleados para conseguir los objetivos anteriores son de la empresa ZITRON, modelo JZR10-30/4, de 0'785 m² de área de salida y motor eléctrico WEG, modelo 200L4, de 30 kW de potencia y 1470 rpm. En la figura 5.2 aparecen sus principales características geométricas. Son ventiladores reversibles que deberían girar en el sentido rodete-motor cuando empujan el aire en la dirección de diseño del tráfico. Si en alguna circunstancia se tuviese que cambiar el sentido de circulación o convertir un tubo en bidireccional, los ventiladores podrían girar al revés, sentido motor-rodete, si fuese necesario.



Diámetro D (mm)	Diámetro d (mm)	Longitud L (mm)	Longitud L1 (mm)	Longitud L2 (mm)	Longitud L3 (mm)	Peso (kg)*
1200	1000	2700	1025	650	1025	850

* Este peso corresponde al modelo del ventilador con motor de mayor potencia

Figura 5.2: Principales dimensiones del ventilador ZITRON JZR 10

Este tipo de ventilador fue sometido a ensayo en las siguientes condiciones ambientales:

- Temperatura: 21 °C.
- Presión atmosférica: 100600 Pa.
- Humedad relativa: 84 %
- Densidad ensayo: 1'178 kg/m³.

Para el sentido de giro **Rodete-Motor**, ensayo número 064-C, los resultados fueron:

- Empuje medido: 804 N.
- Empuje real: 970 N.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Empuje real condiciones normales: 988 N.
- Velocidad: 32'39 m/s.
- Caudal: 25'4 m³/s.
- Potencia consumida: 30'4 kW
- Intensidad consumida: 53'8 A.
- Tensión de red: 380 V.

Para el sentido de giro **Motor-Rodete**, ensayo número 065-C, los resultados fueron:

- Empuje medido: 774 N.
- Empuje real: 941 N.
- Empuje real condiciones normales: 958 N.
- Velocidad: 31'89 m/s.
- Caudal: 25 m³/s.
- Potencia consumida: 30'4 kW
- Intensidad consumida: 53'7 A.
- Tensión de red: 380 V.

La solución propuesta por EUROESTUDIOS consiste en una ventilación de 36 ventiladores en el tubo sentido Paracuellos, con la que se alcanza una velocidad de 2'5 m/s en la sección más crítica (tramo 1), mientras que en el tubo hacia Barajas se necesitan 21 ventiladores para conseguir 2'8 m/s en el tramo 6, el más desfavorable. Debido a que se usan por parejas, finalmente se emplearon 22 ventiladores en el tubo a estudio. En la tabla 5.3 se muestra la distribución de los ventiladores en el tubo en que se va a hacer el estudio. Se hace referencia al tubo sentido Paracuellos para ver la importancia de la flotabilidad en la elección de la ventilación.

Punto métrico (m)	Túnel 2
-686	2
-597	2
-507	2
-418	2
752	2
827	2
902	2
1430	2
1503	2
1578	2
1653	2
Total	22

Tabla 5.3: Posición de los ventiladores en el tubo sentido Barajas.

La razón de la diferencia de comportamiento de cada tubo se encuentra en la pendiente y la consiguiente flotabilidad de los humos calientes en caso de incendio, figura 5.3. La inclinación de la carretera es en media de sentido descendente yendo de Barajas hacia Paracuellos. Por tanto la flotabilidad de los humos calientes iría en contra de la circulación para la carretera de sentido hacia Paracuellos y debería ser vencida por los ventiladores (impulsan en igual sentido del avance de los vehículos). En este caso el peor tramo sería el primero (tramo 1) donde hay más columna de humos calientes por vencer. Para la dirección opuesta, Paracuellos-Barajas, la pendiente es creciente y el sentido de la flotación el mismo que la circulación. En este caso, la flotación de los gases calientes iría en el mismo sentido del movimiento inducido por la ventilación y por tanto los ayudaría. En esta boca el tramo crítico sería el 6 y 7, ya que es donde más columna de humos calientes hay que mover. Al recorrer ahora el túnel, en media sería ascendente y los primeros tramos son el 6 y 7. Puesto que en este sentido de circulación la flotabilidad en media ayuda a la ventilación, son precisos menos ventiladores que en el sentido hacia Paracuellos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

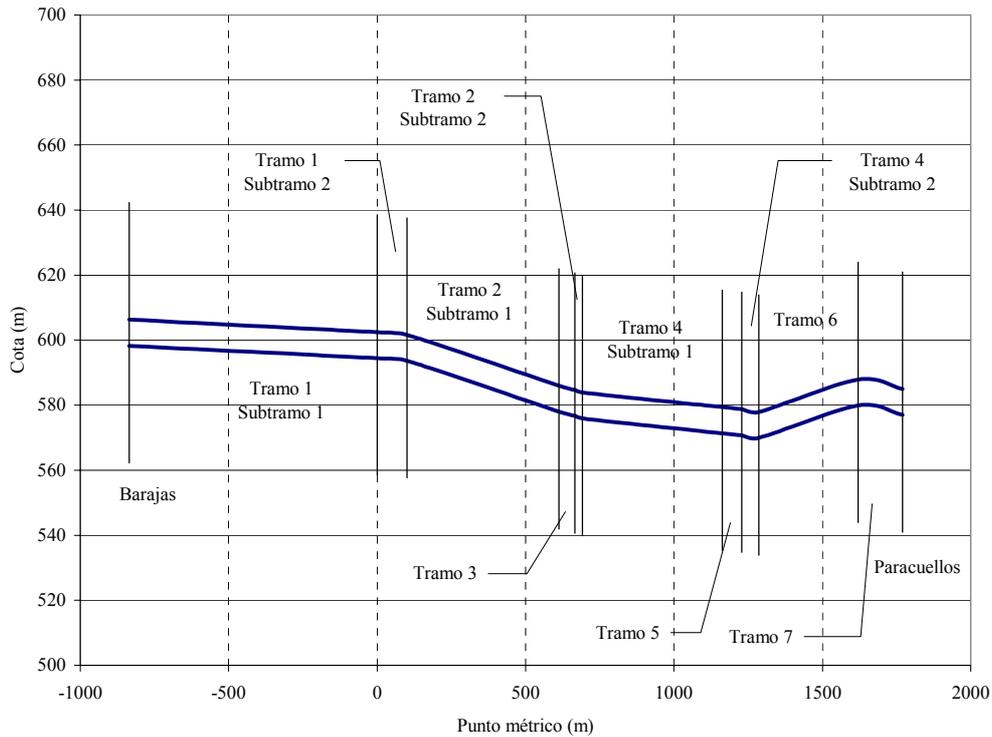


Figura 5.3: Corte vertical del túnel.

5.3 - ESTUDIO PREVIO SOBRE EL SISTEMA DE VENTILACIÓN

Con anterioridad a los ensayos reales y cálculos numéricos definitivos, se han realizado una serie de cálculos preliminares y estimaciones en los órdenes de magnitud de las principales variables que intervendrían en un accidente. De esta forma se pretende llevar a cabo los experimentos con un cierto grado de confianza en cuanto a la seguridad de los mismos hacia las personas que los van a llevar a cabo y sobre todo, ya que la situación estaría

controlada y con personal prevenido, hacia las instalaciones que deberían entrar en funcionamiento casi inmediatamente después del ensayo. Además se busca prever como deberán ser los cálculos definitivos para validar el sistema de ventilación.

En el estudio mencionado de EUROESTUDIOS, se han tenido en cuenta prácticamente todos los factores de interés: pérdida de carga por fricción, pérdidas locales, flotabilidad, depresiones en la entrada y salida, arrastre por los vehículos, etc., aunque no se ha observado que se haya analizado la diferente velocidad de los gases calientes. Dichos gases tienen una menor densidad y por tanto, por conservación de masa, una mayor velocidad aguas abajo del incendio ya que el área de paso varía muy poco. Se han hecho comprobaciones, fundamentalmente para ver si este efecto es importante, y en principio se llega a resultados parecidos a los indicados en cuanto al número de ventiladores necesario para obtener las velocidades críticas impuestas por dicha empresa para contener un incendio de 50 MW (2'5 m/s en el tramo 1 del tubo con sentido hacia Paracuellos y 2'8 m/s en la sección 6 del tubo hacia Barajas).

Se han hecho cálculos con 30 MW, lo que recomienda la normativa, y 20 y 50 MW, las potencias de diseño del estudio, para hallar la velocidad crítica con las relaciones del apartado 1.3.6, ecuaciones 1.33 y 1.36, y los datos de la tabla 5.1. Los resultados aparecen en la tabla 5.4 y 5.5 para los modelos de Oka, 1995, y Wu, 2000, respectivamente. Como se comprueba en dichas tablas, la velocidad supuesta de diseño es inferior a la exigida para la potencia máxima supuesta, 50 MW. Según la correlación de Oka, con ese número de ventiladores se podría contener el incendio, debido a que esta correlación llega a un valor asintótico a partir del cuál no aumenta dicha velocidad a pesar de posibles incrementos en la potencia del incendio. Sin embargo, si se emplea la relación de Wu el incendio que se contendría con el sistema de ventilación previsto sería de potencia menor de 20 MW. Además, y en este mismo sentido, según la *Circulaire Interministérielle N° 2000-63 DU* de agosto del 2000 son necesarios 3 m/s para contener el incendio de 30 MW y según los resultados más desfavorables de los cálculos, modelo de Wu, la velocidad de contención en los tramos críticos serían de 3'2 m/s en el 1 y 3'0 en el 6. Con todo ello, para la potencia usada normalmente como base en las normativas, la situación podría ser crítica. En particular, para contener el incendio de 30

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

MW se dispondría de una velocidad de 2'5 m/s frente a los 3'2 m/s en la sección primera de la carretera Barajas-Paracuellos. La situación sería más holgada para la otra dirección ya que se tendrían 2'8 m/s de velocidad de viento frente a los 3 m/s necesarios.

Potencia (MW)		20			30			50		
Tramo	Altura (m)	Q*	V*	Velocidad crítica (m/s)	Q*	V*	Velocidad crítica (m/s)	Q*	V*	Velocidad crítica (m/s)
1	6.2	0.185	0.320	2.5	0.277	0.320	2.5	0.461	0.320	2.5
2	8.0	0.096	0.297	2.6	0.143	0.320	2.8	0.239	0.320	2.8
3	5.0	0.310	0.320	2.2	0.464	0.320	2.2	0.774	0.320	2.2
4	8.0	0.096	0.297	2.6	0.143	0.320	2.8	0.239	0.320	2.8
5	5.0	0.310	0.320	2.2	0.464	0.320	2.2	0.774	0.320	2.2
6	8.0	0.096	0.297	2.6	0.143	0.320	2.8	0.239	0.320	2.8
7	8.0	0.096	0.297	2.6	0.143	0.320	2.8	0.239	0.320	2.8

Tabla 5.4: Velocidades críticas con el modelo de Oka para $k_v = 0'320$

Potencia (MW)		20			30			50		
Tramo	Diámetro (m)	Q"	V"	Velocidad crítica (m/s)	Q"	V"	Velocidad crítica (m/s)	Q"	V"	Velocidad crítica (m/s)
1	8.1	0.093	0.310	2.8	0.139	0.354	3.2	0.232	0.400	3.6
2	9.5	0.062	0.271	2.6	0.093	0.310	3.0	0.156	0.368	3.5
3	7.7	0.105	0.323	2.8	0.158	0.370	3.2	0.263	0.400	3.5
4	9.5	0.062	0.271	2.6	0.093	0.310	3.0	0.156	0.368	3.5
5	7.7	0.105	0.323	2.8	0.158	0.370	3.2	0.263	0.400	3.5
6	9.5	0.062	0.271	2.6	0.093	0.310	3.0	0.156	0.368	3.5
7	9.5	0.062	0.271	2.6	0.093	0.310	3.0	0.156	0.368	3.5

Tabla 5.5: Velocidades críticas con el modelo de Wu.

Ante los resultados anteriores, es necesario llevar a cabo simulaciones numéricas, empleando los modelos descritos posteriormente, con diferentes velocidades de ventilación para la potencia recomendada en las normativas, 30 MW, y la de diseño del sistema de ventilación, 50MW, para poder así asegurarnos que no existirán problemas durante los ensayos. En las figuras 5.4, 5.6 y 5.7 aparecen cortes transversales del túnel para distintas velocidades de ventilación y potencia del fuego, en las dos secciones críticas indicadas. Las líneas cortas verticales junto al techo de las dos primeras corresponden a las vigas de altura 2 metros y

separación 2'8m del tramo 1. A efectos de área, no se considera la sección de las vigas, considerándose como altura útil la existente desde la parte inferior de las mismas hasta el suelo.

En la figura 5.4, se puede observar que para la sección primera de la carretera Barajas-Paracuellos, con una velocidad incidente de 2'5 m/s y un fuego de 30MW, aunque los humos se contienen, hay una capa caliente de ellos que se extiende por el techo entre las vigas del mismo hacia aguas arriba del incendio. En dicha capa el aire está a una temperatura media de unos 100 °C. El peligro es que por radiación de dicha capa caliente, la de la propia llama y la de los gases calientes, que ocuparían prácticamente toda la sección del túnel aguas abajo y parte del techo, se llegase a extender el incendio aguas arriba a otros objetos o vehículos y o afectar a las personas heridas atrapadas que no pudiesen escapar. Se han hecho cálculos de la radiación, mediante los factores de forma del apartado 3.6, con los resultados del estudio para una llama de forma cónica inclinada de base elíptica, humos calientes en el fondo y en el techo y los siguientes datos:

- Llama cónica inclinada de base elíptica:
 - Temperatura: 2000 K.
 - Altura sobre la vertical del vértice: 0'51 m.
 - Distancia sobre la horizontal desde el vértice al centro de la base del cono: 1'8m.
 - Semieje de la base elíptica en la dirección longitudinal: 1'28 m.
 - Semieje de la base elíptica en la dirección transversal: 0'64 m.

- Fondo de humos:
 - Temperatura: 150 °C.
 - Distancia desde el centro de la base del cono de llama hasta el fondo de humos: 8'8 m.

- Humos calientes en el techo:
 - Temperatura: 100 °C.
 - Distancia desde el fondo de humos hasta el final de los humos calientes del techo: 12'4 m.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

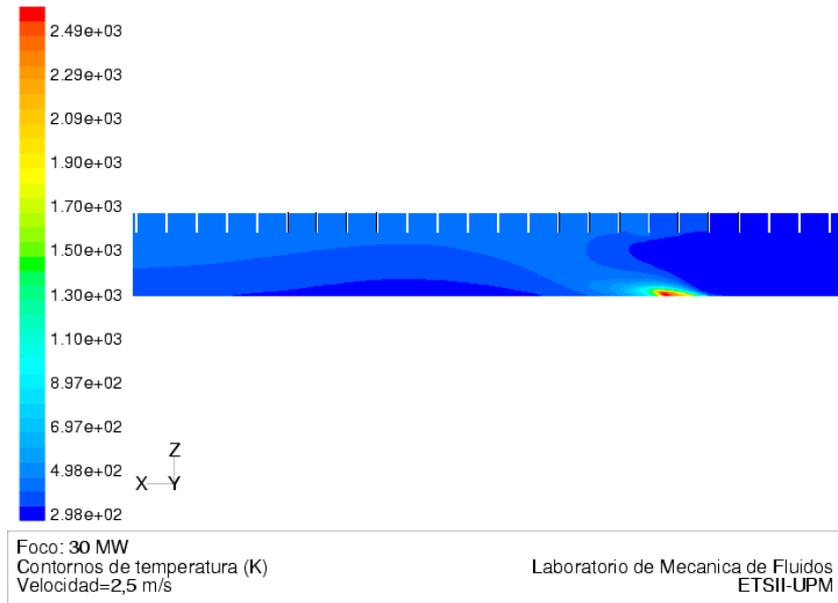


Figura 5.4: Incendio de 30 MW. Sección rectangular Barajas-Paracuellos. V: 2'5 m/s.

La figura 5.5 y tabla 5.6 muestran la radiación incidente sobre planos representativos, suficientemente pequeños para poder ser considerados puntuales ($0'5 \times 0'5 \text{m}^2$), situados en el suelo con distinta inclinación y posición. Se denomina radiación horizontal a la que llegaría a un plano vertical, radiación a 45° a la que alcanzaría a un plano que formase dicho ángulo con el suelo y radiación vertical a la que recibe un plano horizontal. Se puede observar como a menos de 1'6 m del centro del incendio se alcanzarían los 15 kW/m^2 , radiación típica de inicio de flashover, es decir, el calor suficiente para hacer que otro objeto se inflame. A distancias menores de 2'6 m, separación de 1'3 m entre el centro del plano y el extremo de la base de la llama, puede haber una radiación de 3 kW/m^2 , capaz de ocasionar quemaduras graves a una persona. La radiación proviene principalmente de la llama y no de los humos que se extienden aguas arriba. A pesar de que no se cumple el criterio de contener los humos, la magnitud del calor originado por estos es muy pequeña comparado con la originada por la llama. Los posibles daños a objetos y personas serán

significativos a distancias pequeñas del incendio, donde predomina la radiación de la llama frente a la radiación de la capa de humos.

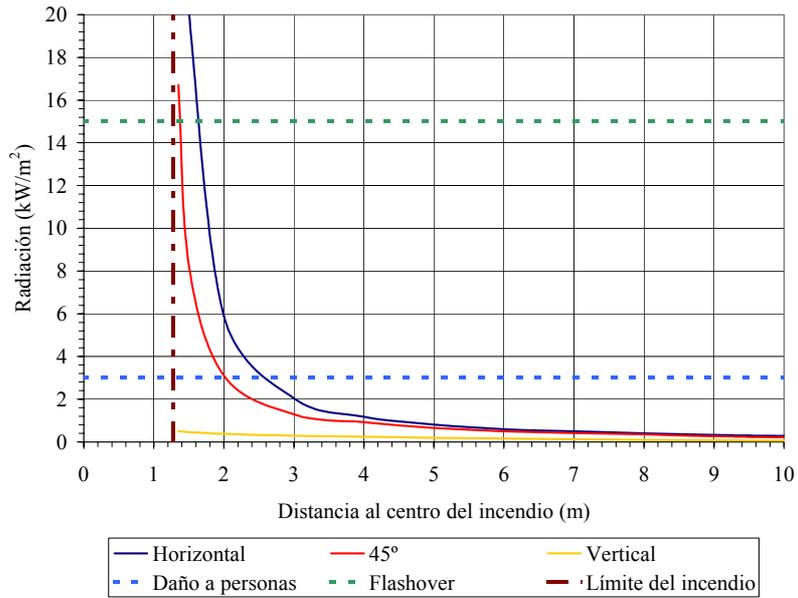


Figura 5.5: Radiación incidente sobre superficies. Potencia 30 MW. Velocidad de aire de 2'5 m/s. Tramo 1. Sentido Paracuellos.

Distancia al centro de la llama (m)	Radiación Horizontal (kW/m ²)	Radiación a 45° (kW/m ²)	Radiación Vertical (kW/m ²)
1.35	26.461	16.703	0.507
1.5	20.092	8.236	0.465
2	5.912	3.107	0.375
3	2.033	1.287	0.293
4	1.173	0.918	0.241
5	0.815	0.653	0.191
6	0.596	0.494	0.152
7	0.498	0.413	0.121
8	0.400	0.348	0.094
9	0.330	0.272	0.074
10	0.274	0.222	0.059
15	0.139	0.122	0.021
20	0.086	0.066	0.010

Tabla 5.6: Radiación incidente sobre superficies. Potencia 30 MW. Velocidad de aire de 2'5 m/s. Tramo 1. Sentido Paracuellos.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Con una velocidad de 3 m/s e igual potencia y situación del fuego, figura 5.6, la llama se inclinaría más (al menos la parte más exterior de la misma donde las temperaturas son más bajas), en sentido normal al papel es más estrecha y la capa caliente del techo prácticamente desaparecería, con lo que las distancias peligrosas se reducen aún más.

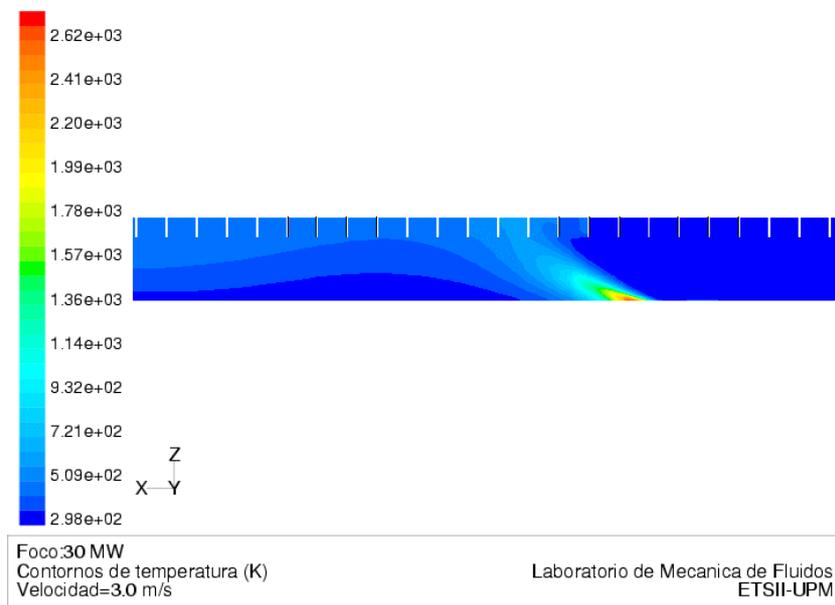


Figura 5.6: Incendio: 30 MW. Sección rectangular Barajas-Paracuellos. V: 3 m/s.

La figura 5.7 corresponde a la sección 6 de la carretera Paracuellos-Barajas, con una velocidad de 2'8 m/s e incendio de 30 MW. El retroceso de los humos es menos importante que en el caso de la figura 5.4. Además su importancia relativa va a ser menor debido a que la sección del túnel y la altura en este tramo son mayores, con lo que disminuirá la radiación incidente sobre objetos retenidos aguas arriba. La temperatura de estos humos así como de los que llenarían el túnel aguas abajo sería de unos 100 °C. Al haber mayor velocidad, la llama se inclinará más por lo que también radiará menos que en el caso anteriormente estudiado. Para repetir los cálculos de radiación en este último caso, los datos necesarios son los siguientes:

- Llama cónica inclinada de base elíptica:
 - Temperatura: 2000 K.
 - Altura sobre la vertical del vértice: 0'4 m.
 - Distancia sobre la horizontal desde el vértice al centro de la base del cono: 1'7m.
 - Semieje de la base elíptica en la dirección longitudinal: 1'5 m.
 - Semieje de la base elíptica en la dirección transversal: 0'75 m.

- Fondo de humos:
 - Temperatura: 125 °C.
 - Distancia desde el centro de la base del cono de llama hasta el fondo de humos: 9'28 m.

- Humos calientes en el techo:
 - Temperatura: 125 °C.
 - 3 puntos de definición:
 - Distancia desde el fondo de humos: 0 m. Altura: 5'9 m.
 - Distancia desde el fondo de humos: 4'88 m. Altura: 7'3 m.
 - Distancia desde el fondo de humos: 10'72 m. Altura: 9'28 m.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

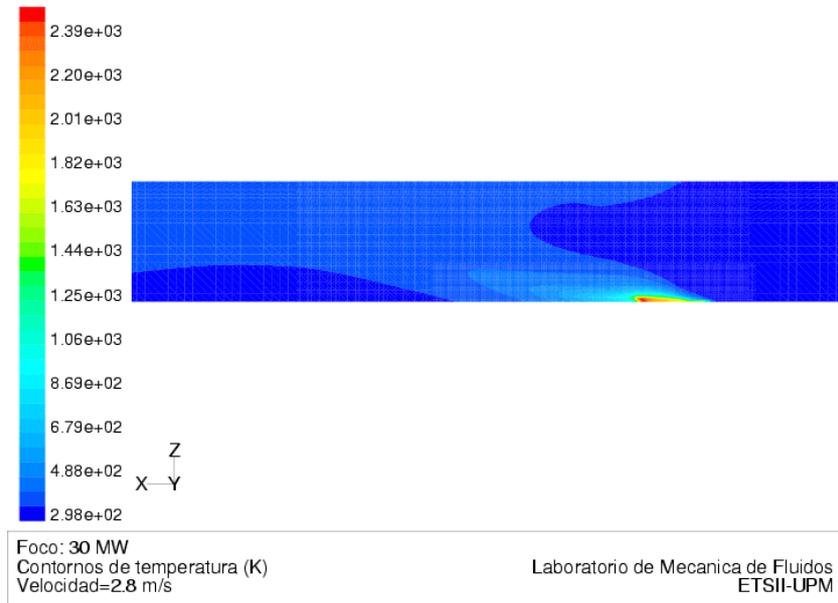


Figura 5.7: Incendio: 30 MW. Sección abovedada Paracuellos-Barajas. V: 2'8 m/s.

La figura 5.8 y tabla 5.7 muestran la radiación incidente sobre planos de 0'5mx0'5m situados en el suelo con distinta inclinación y posición. Se puede observar como casi no se alcanza el valor de radiación que llevaría a la ignición de otro objeto. Prácticamente se llegaría a él cuando se estuviese en contacto físico con el incendio. Para distancias menores de 2'6 m, separación de 1'1 m entre el centro del plano y el extremo de la base de la llama, se alcanzaría el límite tolerable a partir del cual comienzan a producirse quemaduras graves en una persona. La radiación proviene principalmente de la llama y no de los humos que se extienden aguas arriba. A pesar de que no se cumple el criterio de contener los humos, la magnitud del calor originado por estos es muy pequeña comparada con la originada por la llama.

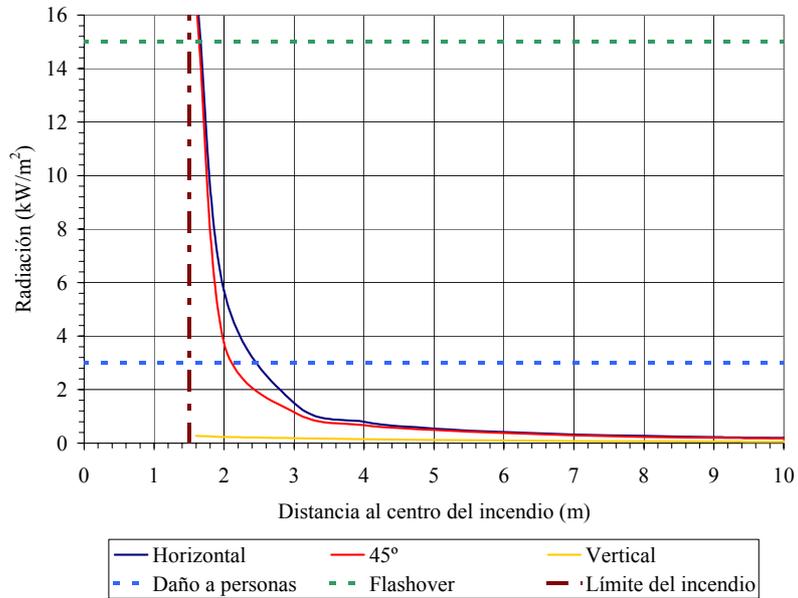


Figura 5.8: Radiación incidente sobre superficies. Potencia 30 MW.
Velocidad de aire de 2'8 m/s. Tramo 6. Sentido Barajas.

Distancia al centro de la llama (m)	Radiación Horizontal (kW/m²)	Radiación a 45° (kW/m²)	Radiación Vertical (kW/m²)
1.6	17.074	16.520	0.268
2	5.699	3.761	0.237
3	1.492	1.156	0.184
4	0.797	0.674	0.147
5	0.546	0.499	0.119
6	0.415	0.382	0.097
7	0.324	0.296	0.080
8	0.267	0.237	0.065
9	0.228	0.200	0.054
10	0.193	0.173	0.045
15	0.107	0.090	0.019
20	0.067	0.055	0.010

Tabla 5.7: Radiación incidente sobre superficies. Potencia 30 MW.
Velocidad de aire de 2'8 m/s. Tramo 6. Sentido Barajas.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Como finalización de esta fase previa, se ha realizado una última comprobación con un incendio de 50 MW, el de diseño del sistema de ventilación. Dado que las condiciones de estado estacionario, con máxima potencia, son críticas y no reflejan la situación en las primeras etapas del incendio, lo que es necesario para establecer las medidas de evacuación, se ha considerado conveniente retener en este cálculo los efectos no-estacionarios. Dado que el primer túnel en abrirse al público iba a ser el de sentido hacia Barajas, se eligió este tramo para aplicar el estudio. Como ya se ha explicado anteriormente, la sección de entrada (tramo sexto), es la más crítica en este tubo, por lo que ha sido elegida para los cálculos. La ley temporal de evolución del incendio y la secuencia de puesta en marcha de los ventiladores, figura 5.9, ha sido la siguiente:

- Sistema de ventilación:

Para tiempos, t , inferiores a $t_0 = 30s$, se supone que no se ha detectado el incendio y que hay una velocidad, v_0 , de 2 m/s. Para tiempos superiores, la velocidad se incrementa siguiendo la ley deducida en el Anexo I, ecuación I.9:

$$v = v_{est} \tanh\left(\frac{t-t_0}{t_c} + \arg \tanh\left(\frac{v_0}{v_{est}}\right)\right) \quad \text{para } t \geq t_0 = 30s \quad (5.1)$$

donde el tiempo característico, t_c , vale:

$$t_c = \frac{\rho A v_{est}}{F/L} = \frac{2D}{\lambda v_{est}} = 40s \quad (5.2)$$

y v_{est} es la velocidad de régimen, ecuación I.3 del Anexo I.

$$v_{est} = \sqrt{\frac{2D}{\lambda \rho L} \frac{F}{A}} = 2'8m / s \quad (5.3)$$

En las relaciones anteriores ρ es la densidad del aire, D el diámetro equivalente (4 veces el radio hidráulico, es decir, cuatro veces el área de paso dividido por el perímetro mojado), λ el coeficiente que da la pérdida de carga mediante el diagrama de Moody o Nikuradse (definida como cuatro veces el coeficiente de fricción), A la sección del túnel y F/L la fuerza de los ventiladores por unidad de longitud de túnel, $900N \times 21(\text{número de ventiladores}) / 2605 \text{ m}$.

En teoría la ecuación 5.1 diría que nunca se alcanza la velocidad final, pero al cabo de 60 s de poner en marcha los ventiladores (90 s del principio del incendio), ya se ha alcanzado el 98% de la misma.

- Evolución del incendio:

Según recomendaciones de la PIARC, 1993, un incendio de 50 MW con vistas a su modelización debería seguir la siguiente secuencia:

$$P = \begin{cases} 10t & \text{para } t < 0'5 \\ 5 & \text{para } 0'5 < t < 2 \\ 5 + 7'5(t - 2) & \text{para } 2 < t < 5 \\ 27'5 + 3'214(t - 5) & \text{para } 5 < t < 12 \\ 50 & \text{para } 12 < t < 39 \end{cases} \quad (5.4)$$

donde P es la potencia en MW y t el tiempo desde que comienza el incendio en minutos. Para tiempos mayores de 39 minutos el incendio empezaría a decrecer en intensidad y se supone que daría lugar a situaciones menos críticas.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

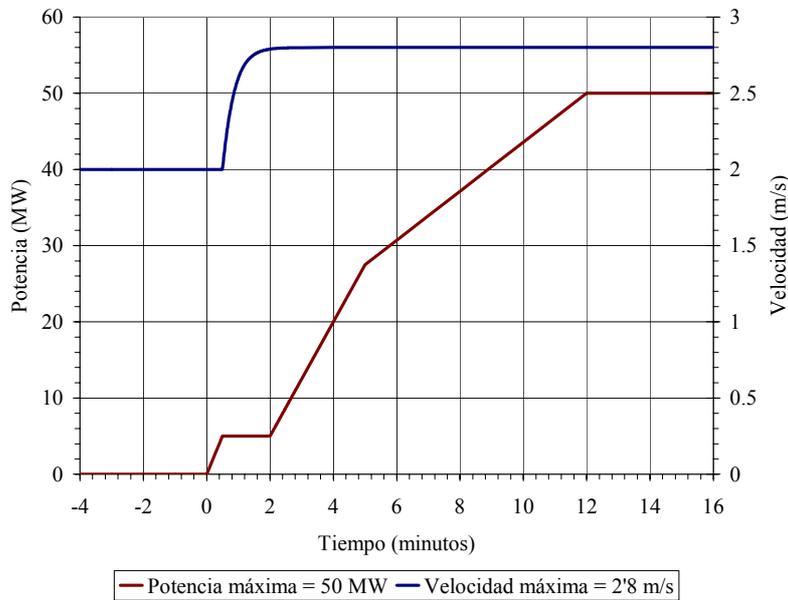


Figura 5.9: Evolución temporal del incendio y puesta en marcha de la ventilación

Entre los 0'5 y 1 minutos del inicio del incendio la potencia se mantiene constante, 5 MW, y la zona afectada por las altas temperaturas se va extendiendo. Al minuto del inicio, con los 5 MW, se alcanza una zona amplia con un campo de temperaturas alto. Manteniendo la potencia, dicha zona disminuye y se hace relativamente pequeña a los 2 minutos, debido al aumento de la velocidad de ventilación. A partir de ese momento la velocidad de ventilación prácticamente se mantiene constante. Esta disminución del tamaño de la zona con temperaturas altas es más aparente en el plano medio, ya que en una vista de un plano transversal, el humo ascendería por el centro y se iría hacia los lados, con lo que realmente lo que está ocurriendo es que el humo caliente se está desplazando del centro hacia los lados. A partir de los 2 minutos y hasta los 12 la zona caliente se va haciendo más extensa y las temperaturas mayores, debido a los efectos combinados del desarrollo del incendio y del crecimiento de su intensidad. Sobre los 10 minutos se nota la aparición una zona más caliente cerca del techo de unos 600 K que está aparentemente desconectada de otra que se forma cerca del incendio; al igual que antes, esto se debe al carácter

tridimensional del movimiento, y a que estos gases calientes ascienden primeramente por los lados. Para tiempos mayores de los 12 minutos, la potencia se mantiene constante, 50 MW, y el efecto más aparente del desarrollo del incendio consiste en que se extiende una capa de aire caliente por el techo aguas arriba. Dicha capa caliente, similar a la de la figura 5.4 pero más extensa, presenta un máximo que se estabiliza a partir del minuto 25. La longitud de la misma es de unos 75 m, con una profundidad media de 1,5 m. Desde ese instante el incendio puede considerarse prácticamente como estacionario hasta que comience a disminuir la intensidad del mismo a partir del minuto 39.

La situación más crítica es claramente la correspondiente al intervalo de tiempo entre aproximadamente los 25 y los 39 minutos en que la capa caliente del techo, que ha penetrado aguas arriba, permanece estacionaria mientras que el incendio emite energía a 50 MW. Esta situación sería la correspondiente a la figura 5.10. En ella el color blanco corresponde a la temperatura ambiente. Al igual que ocurría con el incendio de 30 MW con la velocidad incidente de 2'5 m/s, aunque el incendio se contenga, hay una capa de humo caliente que se extiende por el techo hacia aguas arriba del incendio, ahora dicha distancia es mayor, unos 75 m. Al igual que antes, se ha estudiado el peligro de que por radiación de dicha capa caliente, unida a la radiación de la propia llama y la de los gases calientes que ocuparían prácticamente toda la sección del túnel aguas abajo, se llegase a extender el incendio aguas arriba a otros objetos o vehículos, o afectar a las personas. Se han usado los siguientes datos para los cálculos de radiación:

- Llama cónica inclinada de base elíptica:
 - Temperatura: 2000 K.
 - Altura sobre la vertical del vértice: 1'14 m.
 - Distancia sobre la horizontal desde el vértice al centro de la base del cono: 2'33m.
 - Semieje de la base elíptica en la dirección longitudinal: 1'84 m.
 - Semieje de la base elíptica en la dirección transversal: 0'96 m.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Fondo de humos:
 - Temperatura: 467 K.
 - Distancia desde el centro de la base del cono de llama hasta el fondo de humos: 15 m.
- Humos calientes en el techo:
 - Temperatura: 400 °C.
 - 4 puntos de definición:
 - Distancia desde el fondo de humos: 0 m. Altura: 6'18 m.
 - Distancia desde el fondo de humos: 40 m. Altura: 7'3 m.
 - Distancia desde el fondo de humos: 65 m. Altura: 8 m.
 - Distancia desde el fondo de humos: 90 m. Altura: 9'28 m.

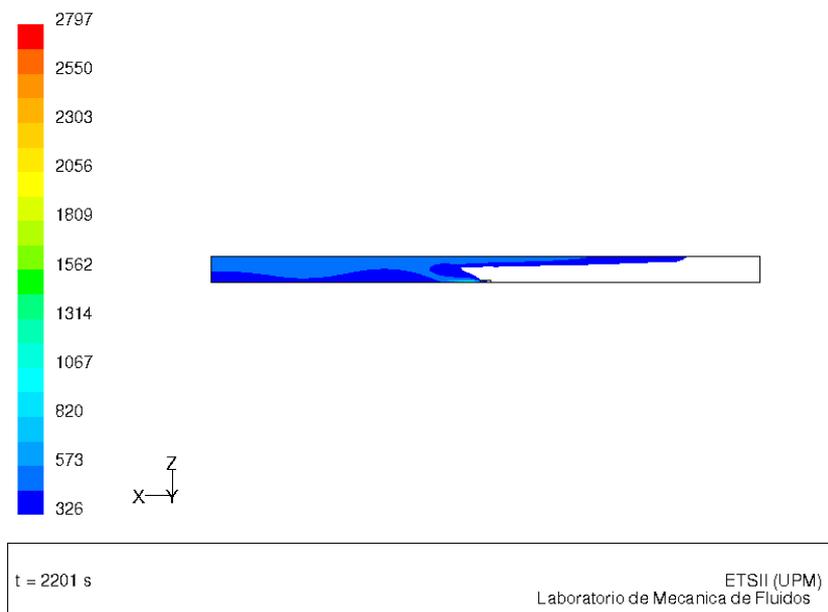


Figura 5.10: Corte transversal del incendio de 50 MW, para la sección sexta de la carretera Paracuellos-Barajas, con una velocidad incidente de 2,8 m/s.

La figura 5.11 y tabla 5.8 muestran, al igual que anteriormente, la radiación incidente sobre planos de $0'25\text{m}^2$ situados en el suelo, centrados con el eje de simetría para distintas inclinaciones y posiciones. Se alcanzan valores de radiación que llevarían a la inflamación de objetos atrapados aguas arriba del incendio. Concretamente para posiciones a menos de $2'7\text{ m}$ del centro del fuego se superan los 15 kW/m^2 . Por otra parte, para distancias menores de $4'9\text{ m}$, separación de 3 m entre el centro del plano y el extremo de la base de la llama, se alcanza una radiación mayor que el límite tolerable a partir de la cual comienzan a producirse quemaduras graves en una persona. Estas situaciones son ligeramente más críticas que las anteriormente estudiadas. Como en los casos anteriores, la radiación proviene principalmente de la llama, pero ahora la componente de la capa de los humos calientes que invaden el techo no es despreciable e incluso llega a ser dominante entre los 20 y 60 m de distancia al centro del incendio. Dicha capa caliente puede ocasionar, a una superficie horizontal, una radiación que va desde 1 kW/m^2 a unos 3 m del incendio hasta $0'4\text{ kW/m}^2$ a 50 m del mismo, que no supondrían peligro para las personas si no están expuestas a esas radiaciones por muy largos periodos.

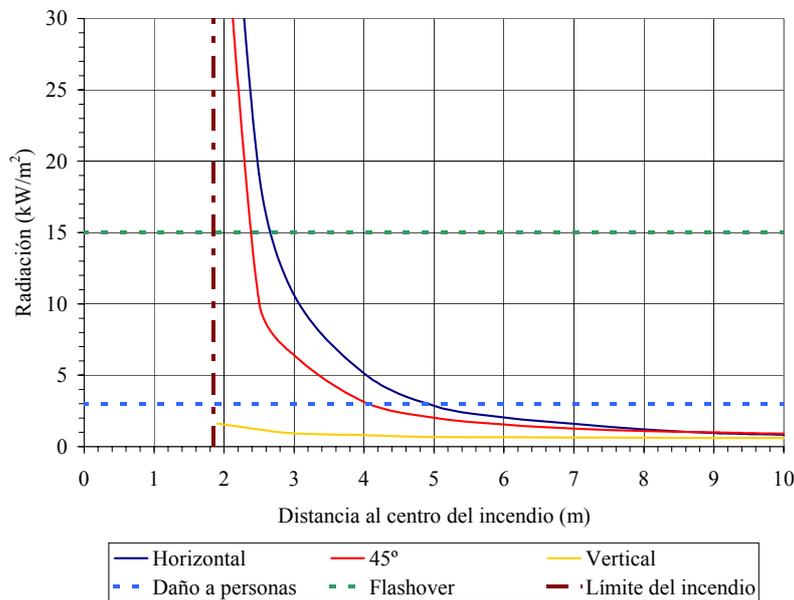


Figura 5.11: Radiación incidente sobre superficies. Potencia 50 MW .
Velocidad de aire de $2'8\text{ m/s}$. Tramo 6. Sentido Barajas.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Distancia al centro de la llama (m)	Radiación Horizontal (kW/m ²)	Radiación a 45° (kW/m ²)	Radiación Vertical (kW/m ²)
1.9	53.707	43.478	1.628
2.5	19.073	10.114	1.193
3	10.619	6.405	0.931
4	5.127	3.134	0.793
5	2.854	2.012	0.679
6	2.035	1.552	0.648
7	1.593	1.259	0.630
8	1.199	1.089	0.615
9	0.942	0.994	0.604
10	0.834	0.918	0.595
15	0.509	0.649	0.566
20	0.391	0.554	0.544
25	0.322	0.510	0.524
30	0.277	0.473	0.504
40	0.225	0.417	0.463
50	0.196	0.370	0.408
75	0.108	0.140	0.092
85	0.050	0.046	0.015
99	0.022	0.018	0.003

Tabla 5.8: Radiación incidente sobre superficies. Potencia 50 MW. Velocidad de aire de 2'8 m/s.
Tramo 6. Sentido Barajas.

Respecto a la situación aguas abajo del incendio, en los tres primeros casos, figuras 5.4, 5.6 y 5.7, no parece haber un medio fácil de evacuación, una vez que el incendio haya alcanzado su situación estacionaria, que es a la que corresponden los cálculos. Sólo parece existir una pequeña zona cerca de la llama donde, debido a la estratificación, las temperaturas a nivel del suelo sería del orden de unos 30 o 40 °C, sin embargo allí la radiación sería intensísima, y además no habría camino para escapar, ya que aguas bajo, donde se han mezclado todos los gases y la temperatura se uniformiza, prácticamente se alcanzarían 100 °C en toda la sección del túnel. Para el caso de la figura 5.10, se puede ver que a partir de los 3 minutos, en que se alcanza prácticamente en toda la longitud del túnel una temperatura superior a los 326 K (53° C), las condiciones ambientales se convierten en mortales.

Como conclusión previa, se puede decir que el sistema de ventilación es suficiente, con ciertas salvedades, para controlar incendios dentro del rango comúnmente aceptado como previsible en túneles, hasta 50 MW. Habida cuenta de que el ensayo se va a realizar con potencias un orden de magnitud inferiores a las analizadas, se puede llevar a cabo con seguridad y tener un margen ante posibles situaciones imprevistas de riesgo.

5.4 - ESTUDIO EXPERIMENTAL

5.4.1 - GENERALIDADES DEL EXPERIMENTO

Una vez acabada la construcción del túnel, y con los ventiladores conectados, se realizaron experimentos en vacío, con humos fríos y con fuego. Se pretendía comprobar el sistema de ventilación antes de la puesta en servicio del túnel al público. En el tubo hacia Barajas, el caso tomado para contrastar el modelo, se llevaron a cabo entre los días 13 y 17 de julio del 2002. Al objeto de esta tesis, me voy a centrar principalmente en los resultados de los incendios. El resto de los ensayos se incluyen para intentar evaluar la velocidad real de la ventilación.

Se hicieron ensayos con dos fuegos, 5 y 10 MW. Como referencia se puede decir que la potencia de un turismo ardiendo y con el depósito lleno es aproximadamente 5 MW, siendo la de un autobús escolar de 25 MW. No empearon potencias mayores por seguridad de las instalaciones donde se realizaba el experimento. Las simulaciones expuestas en el apartado anterior preveían temperaturas que podían ser peligrosas si ocurriese algún fallo durante el proceso.

Las bandejas de combustible se situaron en los tramos más desfavorables de cada tubo, según el sentido de la circulación, en posiciones alejadas de los ventiladores para evitar posibles daños a las instalaciones. En el tubo hacia Barajas, el tramo más crítico es el número 6 y el incendio se ha situado en el punto kilométrico 1'550. Se debe recordar que la referencia

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

kilométrica comienza en el punto de separación de los tramos antiguos y nuevos, entre los subtramos 1 y 2 del tramo 1, siendo positiva hacia la parte nueva del túnel y negativa hacia la antigua, tabla 5.2.

5.4.2 - SECCIONES DE MEDIDA

La distribución de los sensores en las secciones de medición fue:

- SECCIÓN 1, medición de temperatura y velocidad del aire 50 m aguas arriba del incendio, figura 5.12, para ver las condiciones del túnel sin perturbar:
 - Tres anemómetros del tipo hilo caliente Dwier con salida 4-20 mA, situados en el centro de la sección a 1m, 2m y 3m de la clave, llamados **S-1101**, **S-1102** y **S-1103** respectivamente.
 - Un sensor de temperatura tipo sonda PT100 en la clave del túnel, **T-1001**.

- SECCIÓN 2, medición de radiación 10 m aguas arriba del incendio, figura 5.13:
 - Un sensor de temperatura tipo sonda PT100 en el centro de la calzada a 1 m del suelo, **T-2001**. El sensor se introdujo dentro de una *caja negra* consistente en dos placas de cristal tamaño DIN-A4 separadas 8 mm mediante PVC situado en el contorno. Con el fin de evitar en lo máximo posible la pérdida de calor y conseguir que se acumulase el máximo de radiación, el cristal opuesto a la cara enfocada hacia la llama fue pintado de negro. Una sonda situada en su interior no se ve afectada por la convección y únicamente se calienta por la radiación que recibe el sensor y el aire contenido entre las placas. El propósito de este equipo era, una vez calibrado en el laboratorio, medir la radiación incidente en ese punto. Sin embargo, durante el ensayo llevado a cabo posteriormente en el tubo sentido Paracuellos, este equipo fue dañado, dejándolo inservible para poder calibrarlo y sacar conclusiones de las mediciones.

- SECCIÓN 3, medición de temperatura en la sección del incendio, figura 5.14:
 - Seis sensores de temperatura tipo sonda PT100, situados en el centro de la clave, **T-3001**, 1 m más abajo, **T-3002**, en el techo a 2 m a la izquierda del centro de la clave, **T-3003**, 2 metros por debajo del anterior, **T-3004**, y dos sensores en un lateral, uno a 1 m de altura, **T-3006**, y otro a la altura de las bandejas de cables, 4 metros más arriba del anterior, **T-3005**.

- SECCIÓN 0, medición de temperatura que llegaría por convección 10 m aguas abajo del incendio, figura 5.15:
 - Un sensor de temperatura tipo sonda PT100 en el centro de la calzada a 1 m del suelo, **T-0001**.

- SECCIÓN 4, medición de temperatura 50 m aguas abajo del incendio, figura 5.16:
 - Tres sensores de temperatura tipo sonda PT100, situados en el centro de la clave, 1 m más abajo y 2 m a la izquierda y 2 m por debajo del primeramente mencionado en esta sección, llamados **T-4001**, **T-4002** y **T-4003**, respectivamente.

- SECCIÓN 5, medición de temperatura y velocidad de aire 100 m aguas abajo del incendio, figura 5.17:
 - Tres anemómetros del tipo hilo caliente Dwier con salida 4-20 mA, situados en el centro de la sección a 1m, 2m y 3m de la clave, llamados **S-5101**, **S-5102**, y **S-5103** respectivamente.
 - Siete sensores de temperatura tipo sonda PT100, tres situados junto a cada anemómetro, **T-5003**, **T-5004** y **T-5005** con alturas decrecientes, otro en el centro

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

de la clave, **T-5001**, uno en el techo, 2 m a la izquierda del centro de la clave, **T-5002**, y dos sensores más en un lateral, uno a 1 m de altura, **T-5007**, y otro a la altura de las bandejas de cables, 4 metros más arriba del anterior, **T-5006**..

Además de lo anterior, se disponían de cámaras de televisión en el interior de los túneles para poder seguir la evolución del experimento y la propagación de los humos. La posición de las mismas para el túnel con sentido hacia Barajas aparece en la tabla 5.9. En el túnel hacia Barajas las cámaras 1 y 6 están enfocadas hacia el sentido de avance del viento y las restantes al contrario.

Nomenclatura cámara	Posición relativa al incendio	Punto métrico
1	-25	1575
2	125	1425
3	275	1275
4	425	1125
5	1950	-400
6	2350	-800

** Todas las distancias en metros

Tabla 5.9: Posición de las cámaras en el túnel sentido Barajas.

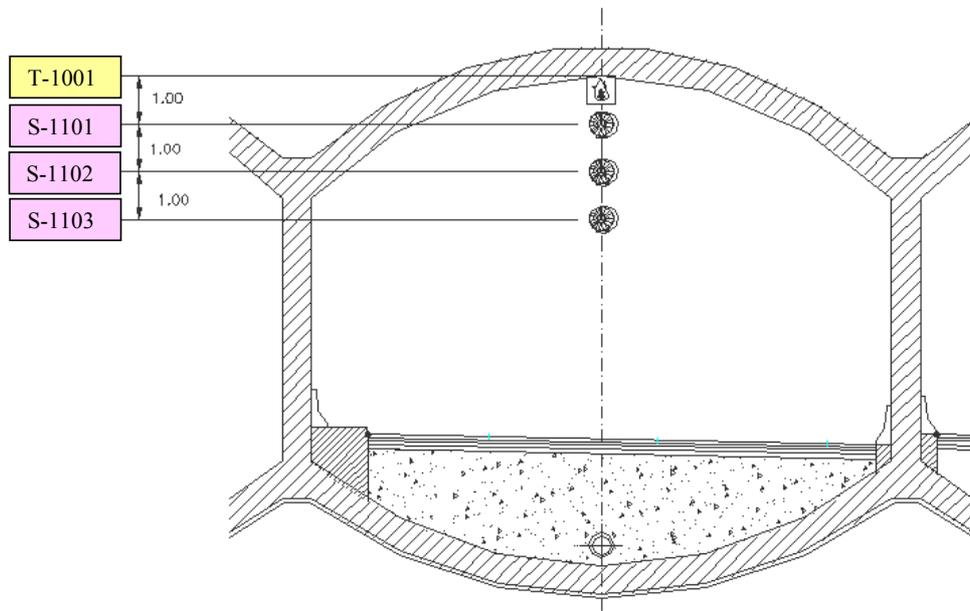


Figura 5.12: Sensores en la sección 1 del túnel sentido hacia Barajas.

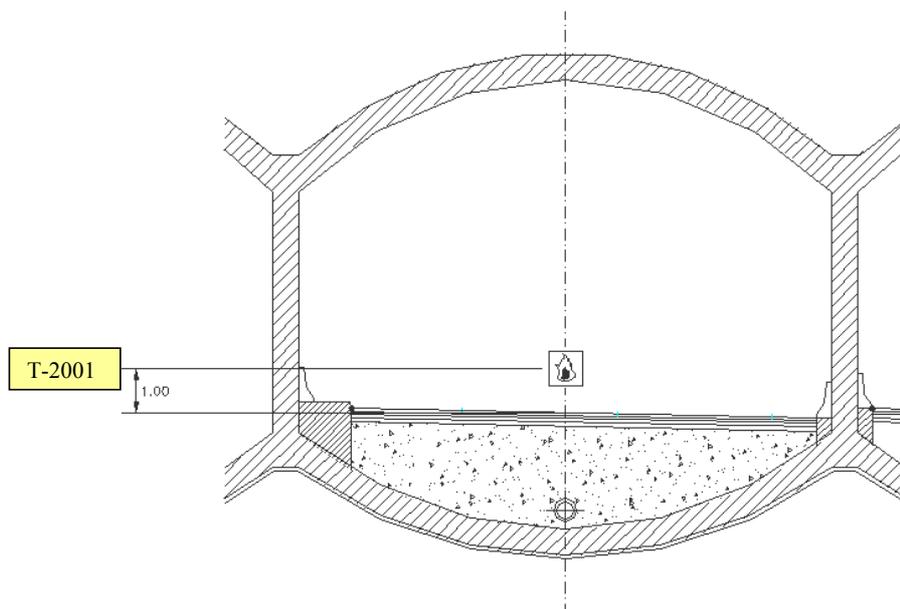


Figura 5.13: Sensores en la sección 2 del túnel sentido hacia Barajas.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

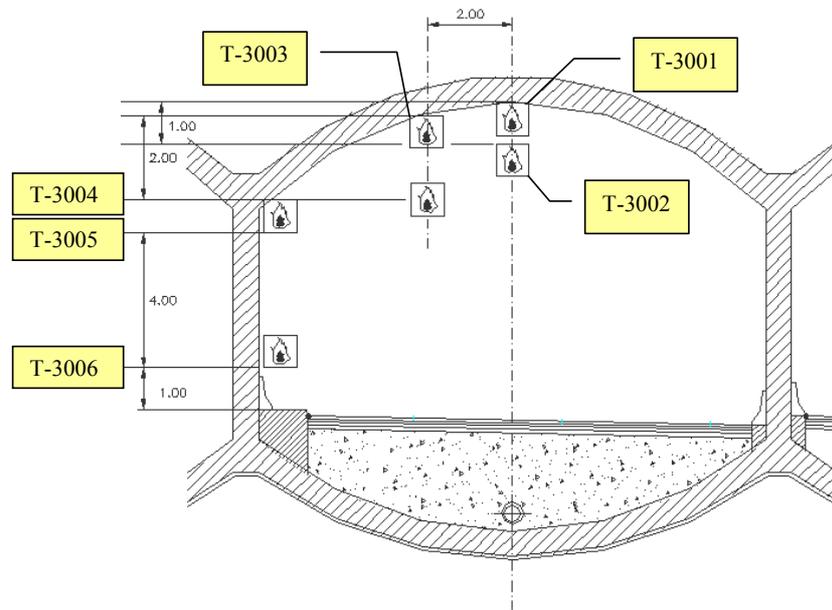


Figura 5.14: Sensores en la sección 3 del túnel sentido hacia Barajas.

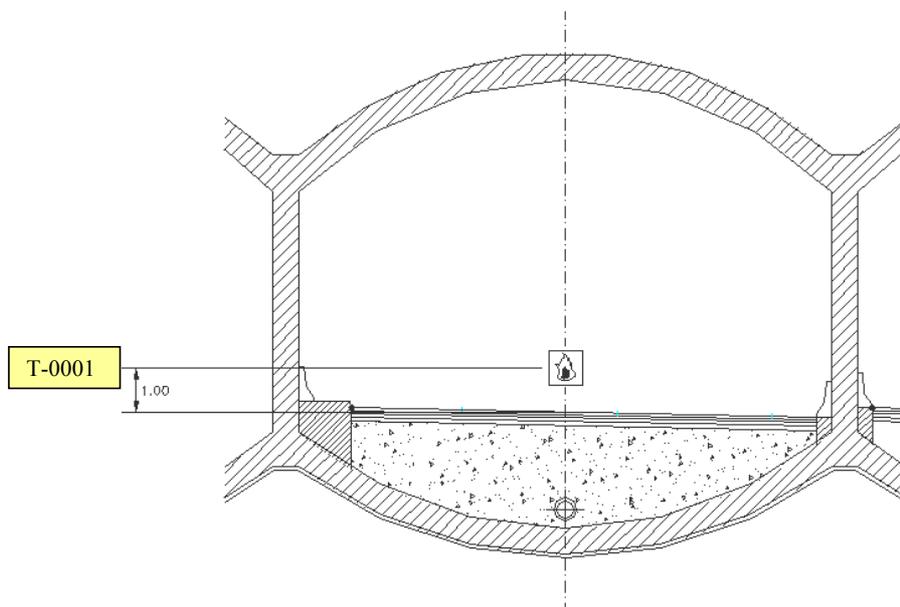


Figura 5.15: Sensores en la sección 0 del túnel sentido hacia Barajas.

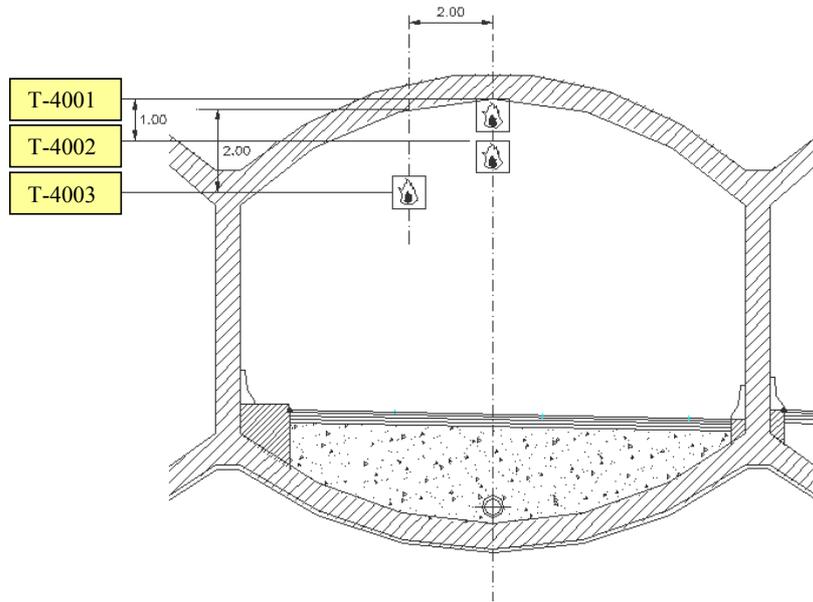


Figura 5.16: Sensores en la sección 4 del túnel sentido hacia Barajas.

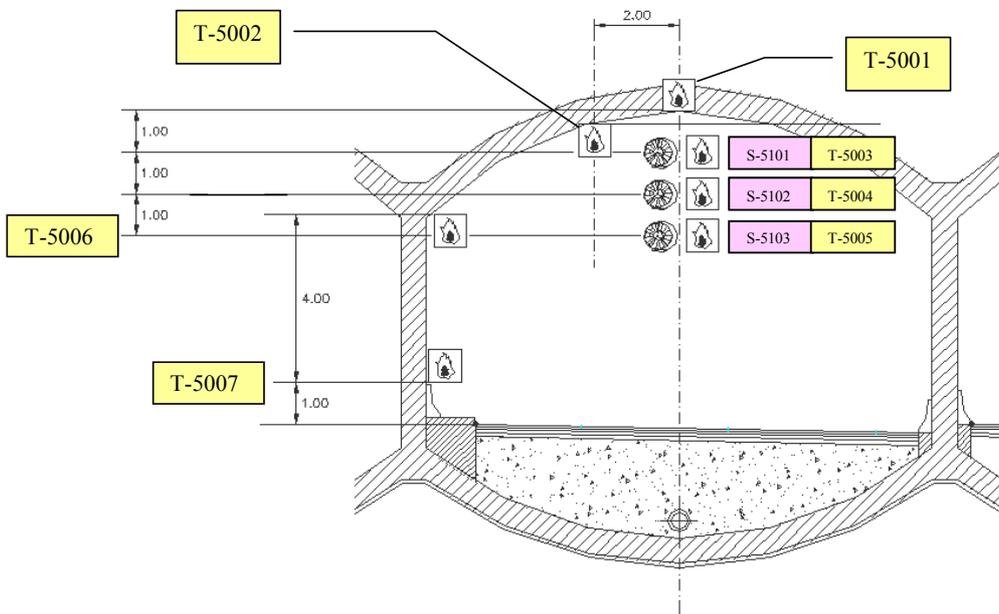


Figura 5.17: Sensores en la sección 5 del túnel sentido hacia Barajas.

5.4.3 – DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

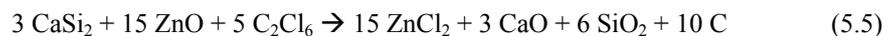
La serie de pruebas se diseñó dividida en tres ensayos; ensayo en vacío, ensayo con botes de humos y ensayo de combustión de heptano. Este último estaría dividido en dos partes una con un incendio de 5 MW y otra con un fuego de 10 MW. Los experimentos comenzarían a las 0 horas del correspondiente domingo y tendrían una duración de 4 horas y media. Más concretamente, cada uno de los se planificaron de la siguiente manera:

- ENSAYO EN VACÍO.

Prueba de la ventilación en ambos sentidos de giro. Se deberían haber encendido y apagado los ventiladores progresivamente mientras se medía la velocidad

- ENSAYO DE HUMOS.

Se realiza mediante la apertura de botes de humo; 8 botes simultáneos cada 2 minutos durante 20 minutos lo que equivale a 50 MW en visibilidad. Se comenzaría sin ventilación de ningún tipo y a los 8 minutos se pondría en marcha la ventilación en sentido de tráfico hasta la evacuación de todos los humos. El sistema de encendido de los botes de humo consiste en una resistencia eléctrica que se encuentra alojada en el interior del bote y que al ser calentada provoca el inicio de la siguiente reacción química:



Cada bote tiene una capacidad de 260 g. de mezcla fumígena. La temperatura del humo generado a la salida del bote oscila entre 700° y 800° C, y la densidad del humo en el mismo punto es de $1.1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$. La cantidad de "humo estándar" que produce cada bote es de 1600 m³. En el supuesto de accionar la apertura de 8 botes la cantidad generada es de 12.800 m³ de humo estándar. El "humo estándar" es aquel que tiene una densidad tal que la luz de una bombilla de 15 W es invisible cuando se observa a través de una capa de 30 metros de espesor.

- ENSAYO DE COMBUSTIÓN CON HEPTANO.

Las propiedades principales del heptano se presentan en la tabla 5.10.

Peso molecular	100'2 g/mol
Punto de inflamación	-4 °C
Punto de congelación	-90 °C
Punto de ebullición	98'4 °C
Límites de inflamabilidad (en aire)	1'1 % hasta 6'7 %
Temperatura de autoignición	215 °C
Densidad	680 kg/m ³
Calor estándar de combustión	48'07 MJ/kg

Tabla 5.10: Propiedades del heptano.

El siguiente paso, una vez elegida la potencia y el tipo de combustible, es conocer la cantidad de heptano y tamaño de la bandeja en que arderá. Para ello se han usado los dos procedimientos descritos en el apartado 1.2.5 Empleando la adimensionalización de MacCaffrey hay que buscar el corte de la figura 1.1 con la curva:

$$Q^* = \frac{5000000 \text{ W}}{1'225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 1004'5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} 300\text{K} \sqrt{9'8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} D(m)^5} = \frac{4'327}{D(m)^{5/2}} \quad (5.6)$$

En dicha gráfica no aparece el heptano, por lo que se usó la curva del hexano, el combustible más parecido al del experimento entre aquellos de los que se tienen datos. El resultado se puede observar en la figura 5.18. El valor solución es 1'35m de diámetro para la bandeja de combustible.

Empleando la relación empírica de Burgess, deberíamos resolver la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = 5MW = 0'0784 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \left(1 - e^{-0'8\text{m}^{-1}D(m)}\right) \pi \frac{D(m)^2}{4} 45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (5.7)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

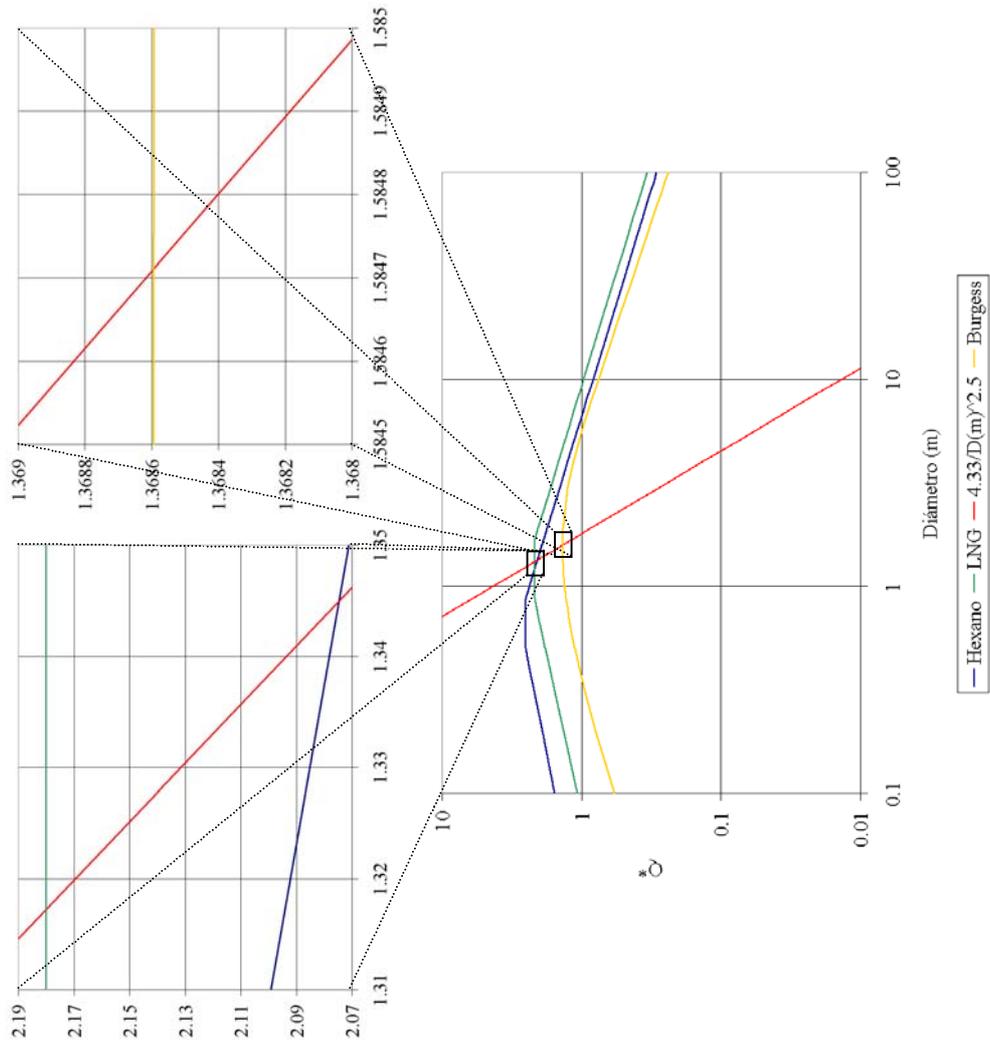


Figura 5.18: Búsqueda del diámetro de la bandeja del experimento.

$$5 = 2'771(1 - e^{-0'8D(m)})D(m)^2 \quad (5.8)$$

Si se emplea la adimensionalización de MacCaffrey para poder representar dicha ecuación en la figura 5.18, quedará:

$$Q^* = \frac{0'0784 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} (1 - e^{-0'8m^{-1}D(m)}) \pi \frac{D(m)^2}{4} 45 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{1'225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 1004'5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} 300\text{K} \sqrt{9'8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} D(m)^5}} = \frac{2'398 (1 - e^{-0'8D(m)})}{\sqrt{D(m)}} \quad (5.9)$$

con lo que se obtiene un diámetro solución de 1'58 m.

Debido a que el método de MacCaffrey no dispone de curvas para el heptano y a la incertidumbre de los coeficientes de Burgess, se ha optado por un diámetro intermedio de 1'4 m.

El recipiente que contenía el heptano para realizar la combustión fue circular con un diámetro interior de 1'40 m y una altura de 0'20 m. Dicho recipiente proporciona una superficie de contacto entre el aire y el heptano de 1'54 m², la cual implica que la potencia del fuego es de 5 MW. Por tanto, para un ensayo a 300K que durase 20 minutos, se precisarían 183 litros de heptano en una bandeja de esas dimensiones. La altura del líquido combustible debería ser 11'9 cm, que consumiría el fuel líquido a 5'96 mm/min, 104 g/s o 0'153 l/s. El recipiente mencionado se encuentra en el interior de otro recipiente de diámetro interior 1'50 m y 0'20 m de altura, para evitar que en el caso de derrame accidental se extienda el heptano de forma incontrolada. Estas previsiones se comprobaron con bastante exactitud durante los ensayos como se comenta en los siguientes apartados.

En el experimento con combustión se realizarían 2 ensayos:

- *Ensayo de 5 MW.* Se iniciaría el incendio con toda ventilación funcionando. Si las mediciones de temperatura indicasen que no existe riesgo, se irían desconectando progresivamente los ventiladores hasta parar la ventilación completamente a los 12 minutos del comienzo. Cuando se consumiese el combustible, a los 20 minutos

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

aproximadamente desde el inicio, se conectaría toda la ventilación para evacuar los humos.

- *Ensayo de 10 MW.* Se llevaría a cabo si, analizando los resultados anteriores, no existiese riesgo para las instalaciones. En caso contrario se realizaría sólo con 5 MW. Se usarían dos bandejas de las dimensiones calculadas para el incendio de 5 MW. Comenzando con la ventilación apagada, se irían conectando ventiladores progresivamente. A los 8 minutos deberían estar todos conectados para poder llegar a un estado estacionario antes de que se consumiese el combustible, hecho que ocurriría aproximadamente a los 20 minutos de iniciado el incendio.

5.4.4 - REALIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Debido a la fase en que se encontraba la obra, no se disponía del sistema de control adecuado para llevar a cabo la secuencia prefijada. Debido a ello, finalmente lo que se hizo fue:

5.4.4.1 - ENSAYO EN VACÍO

El ensayo se llevó a cabo el día 13 de julio del 2002 desde las 22:10:00 hasta la medianoche. Se realizó la prueba de ventilación con vistas a saber la velocidad real del viento disponible en el túnel. Primeramente se hicieron girar los ventiladores en sentido Paracuellos desde las 22:13 hasta las 22:57 aproximadamente. La prueba comenzó con todos los ventiladores funcionando para irlos parando progresivamente. Los resultados de las mediciones para las dos secciones que tenían anemómetros, la 1 y la 5, se presentan en las figuras 5.19 y 5.20 respectivamente. A continuación se invirtió el sentido de giro de la ventilación y se soplo con toda la ventilación hacia Barajas desde las 22:57 hasta las 23:59. También en este caso se fueron parando progresivamente los ventiladores. Los resultados aparecen en las figuras 5.21 y 5.22. En la tabla 5.11 aparece la velocidad media calculada, para cada sensor, en los periodos estacionarios de las figuras 5.23 y 5.24, correspondientes a la ventilación hacia Paracuellos y hacia Barajas respectivamente.

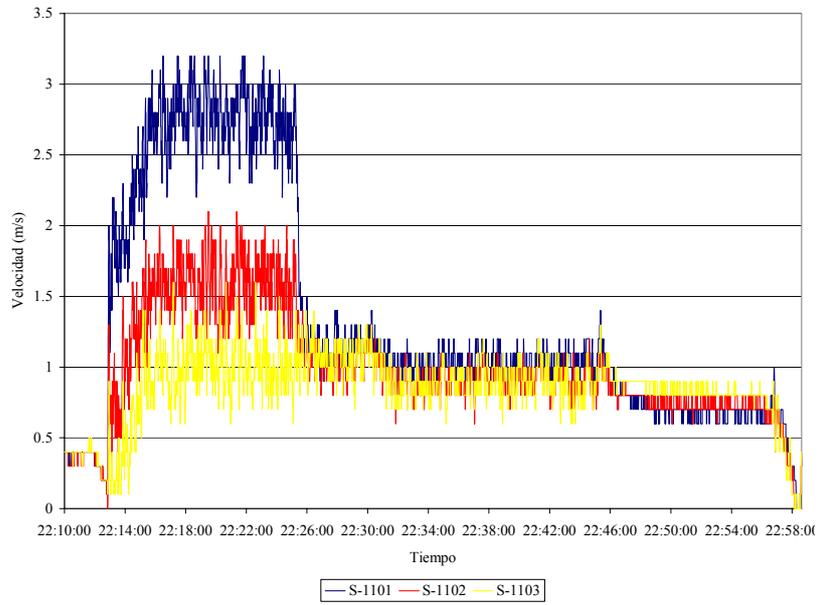


Figura 5.19: Ensayo en vacío. Sección 1. Ventilación hacia Paracuellos.

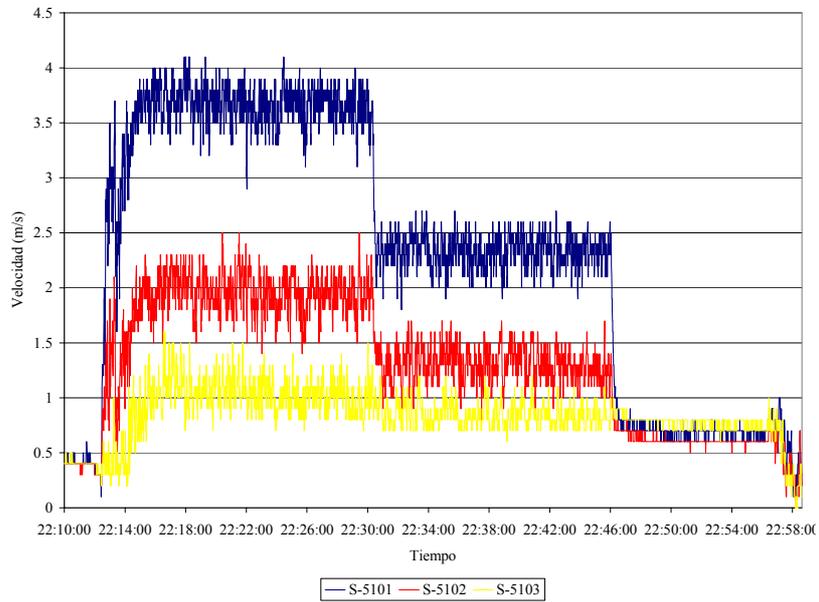


Figura 5.20: Ensayo en vacío. Sección 5. Ventilación hacia Paracuellos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

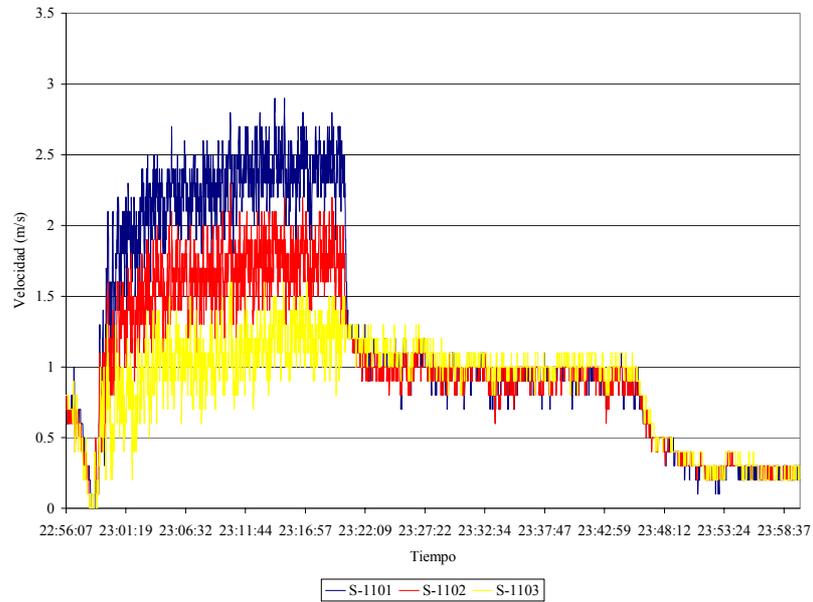


Figura 5.21: Ensayo en vacío. Sección 1. Ventilación hacia Barajas.

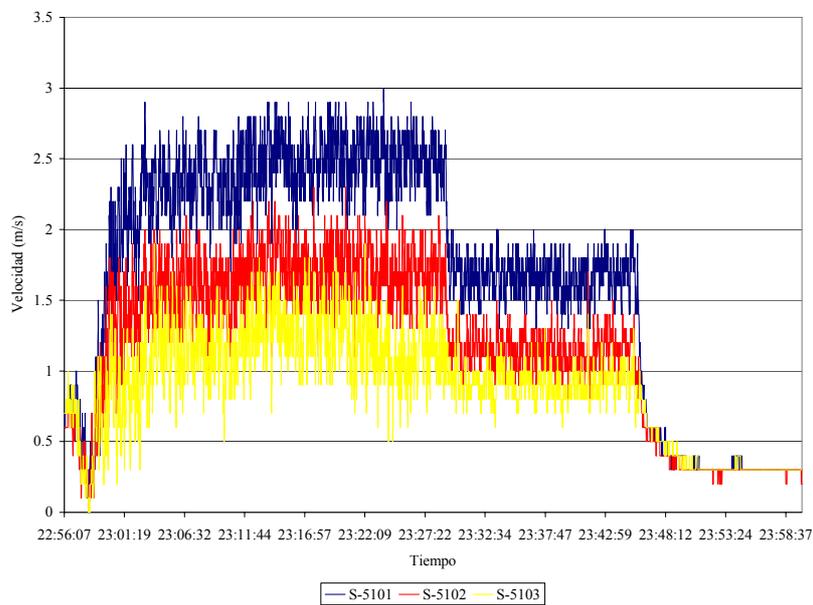


Figura 5.22: Ensayo en vacío. Sección 5. Ventilación hacia Barajas.

Sensor	Ventilacion Barajas (m/s)	Ventilacion Paracuello (m/s)
S1101	2.396	2.786
S1102	1.768	1.618
S1103	1.200	1.023
S5101	2.495	3.652
S5102	1.756	1.951
S5103	1.312	1.057

Tabla 5.11: Velocidades medias durante los ensayos en vacío.

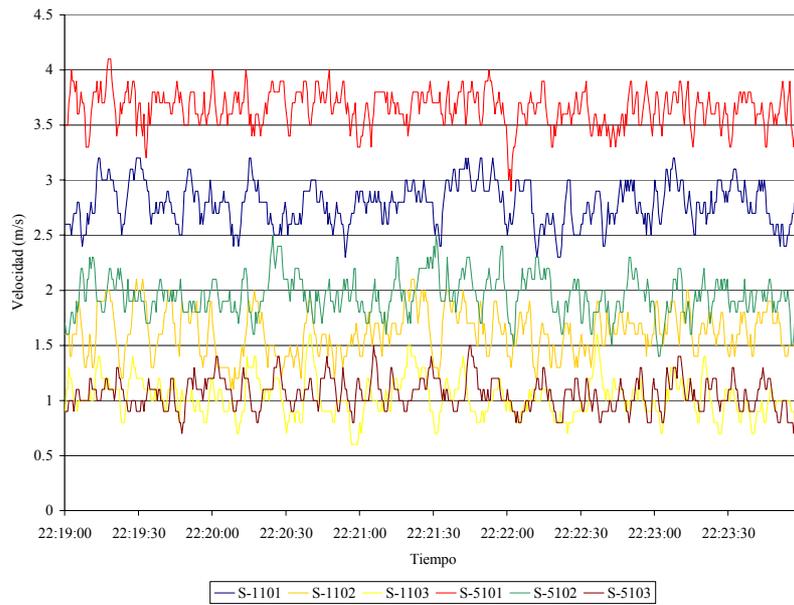


Figura 5.23: Periodo para estimar la velocidad media del ensayo en vacío. Túnel hacia Barajas con ventilación soplando hacia Paracuellos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

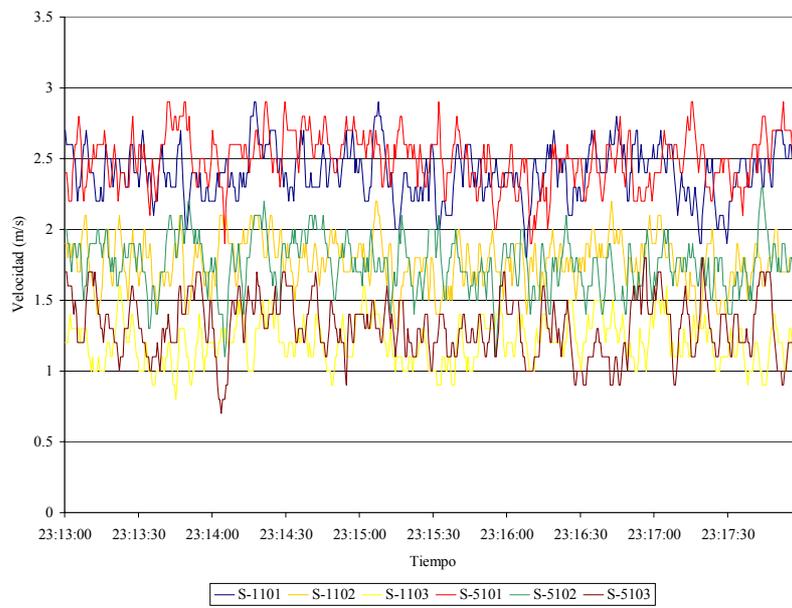


Figura 5.24: Periodo para estimar la velocidad media del ensayo en vacío.
Túnel hacia Barajas con ventilación soplando hacia Barajas.

Los restantes ensayos del túnel no se pudieron llevar a cabo el día previsto, el mismo de los de la ventilación en vacío, debido a problemas con el Aeropuerto de Barajas. Unas obras en ciertas pistas y el cambio de la dirección de viento obligaron a emplear la que se encuentra encima de los túneles. Debido al humo que se podría producir y posibles problemas de visibilidad imprevistos, no se autorizó la realización de las pruebas. En su lugar se realizaron la noche del 16 al 17 de agosto del 2002. En las imágenes 5.1 y 5.2 se observa la sección de experimentación momentos antes de la prueba. En lo que sigue, el recorrido de los humos estará referenciado a la visibilidad obtenida en cada una de las 6 cámaras disponibles, cuya posición se señaló en la tabla 5.9. La figura 5.25 muestra todas las medidas registradas en esta segunda noche.



Imagen 5.1: Vista de la sección del ensayo en el túnel 2.



Imagen 5.2: Vista de la sección del ensayo en el túnel 2.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

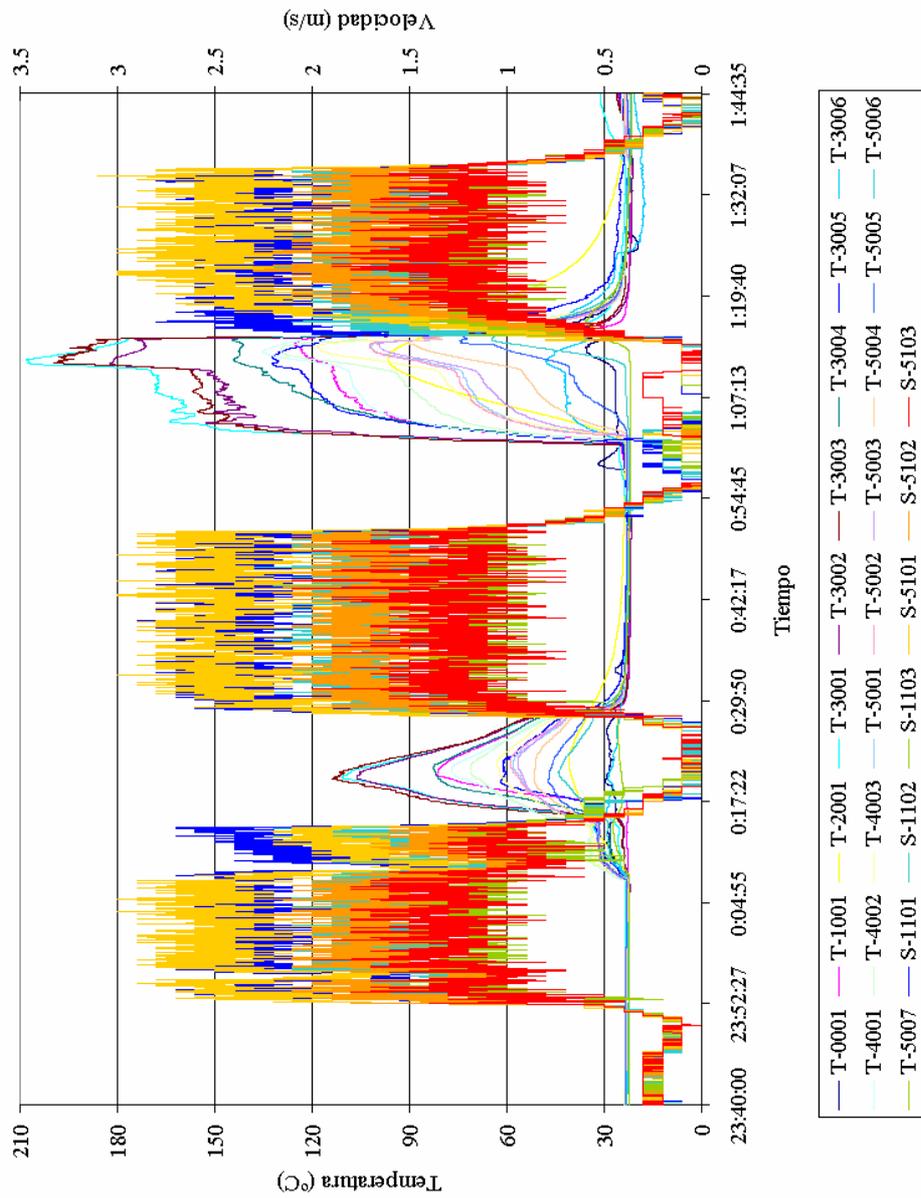


Figura 5.25: Resultados de los ensayos de humos e incendios, sentido hacia Barajas.

5.4.4.2 - ENSAYO CON HUMOS

En la imagen 5.3 se observa una vista de la prueba. La secuencia que se llevó a cabo finalmente partía de los ventiladores parados y solo en los últimos 5 minutos se encendió la ventilación. Mas concretamente, en el video de grabación de las cámaras del túnel se puede observar:

- 23:30:00 – Ventilación apagada.
Velocidad media de 0'25 m/s.
- 23:33:12 – Comienza el ensayo de humos.
Se ve el humo en las cámaras 1 y 2.
- 23:35:30 – En la cámara 3, se ve humo avanzando como un frente.
- 23:36:30 – El humo llega a la cámara 2 e impide casi la visión.
- 23:37:30 – El humo impide la visión desde la cámara 2.
Desde la 3 se ve el avance del frente de humos.
- 23:40:45 – Se ve humo desde la cámara 4.
- 23:41:15 – El humo impide la visión desde la cámara 3.
Desde la 4 se ve el avance del frente de humos.
- 23:44:15 – Llega el humo a la cámara 4.
- 23:44:30 - El humo impide la visión desde la cámara 4.
- 23:45:45 – La producción de humo desde los botes es pequeña.
Se empieza a aclarar la visión de la cámara 2.
- 23:47:30 – Se reaviva la producción de humo.
- 23:49:30 – Vuelve a no existir visión desde la cámara 2.
- 23:51:00 – Puesta en marcha de la ventilación.
- 23:53:30 – Disminuye la producción de humos.
Aumenta la visibilidad en la cámara 2.
- 23:54:00 – Ventilación en régimen.
- 23:54:15 – Aumenta la visibilidad en la cámara 3
Visibilidad media en la cámara 2.
- 23:54:45 – Comienza visibilidad en la cámara 4.
- 23:55:00 – Visibilidad media en cámara 3
- 23:55:15 – Finaliza la producción de humos.
- 23:55:30 – Visibilidad total en las cámaras 2 y 3.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- 23:55:45 – Visibilidad media en la cámara 4.
- 23:56:45 – Empieza a verse humo en la cámara 5.
- 23:57:00 – Visibilidad total en la cámara 4.
- 23:58:00 – Visibilidad media en la cámara 5.
- 23:58:45 – El humo impide la visión desde la cámara 5.
Empieza a verse humo en la cámara 6.
- 23:59:15 – Visibilidad media en la cámara 6.
- 23:59:45 – El humo impide la visión desde la cámara 6.
- 00:02:45 – Aumenta la visibilidad en la cámara 5.
- 00:03:45 – Visibilidad media en la cámara 5.
- 00:04:15 – Aumenta la visibilidad en la cámara 6.
- 00:05:30 – Visibilidad media en la cámara 6.
- 00:06:00 – Visibilidad total en la cámara 5.
- 00:07:00 – Visibilidad total en la cámara 6.

Los registros de las secciones de anemómetros durante el ensayo de humos aparecen en las figuras 5.26 y 5.27. En la tabla 5.12 aparecen las velocidades medias registradas durante el periodo estacionario, concretamente para los 5 minutos reflejados en la figura 5.28.

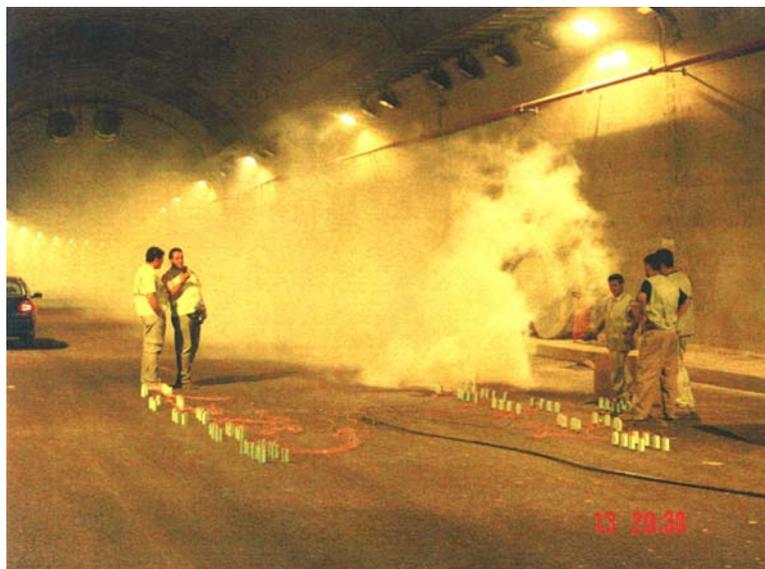


Imagen 5.3: Ensayo con humos en el túnel 2.

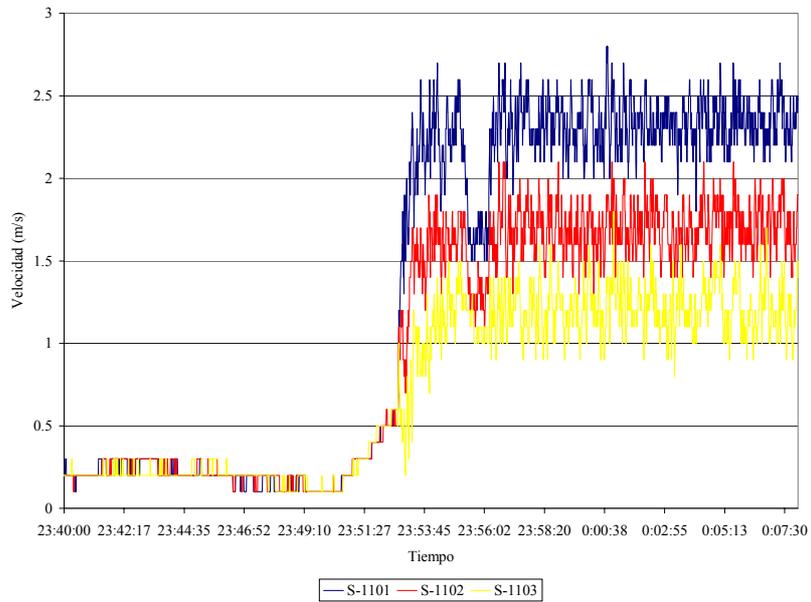


Figura 5.26: Ensayo de humos. Sección 1.

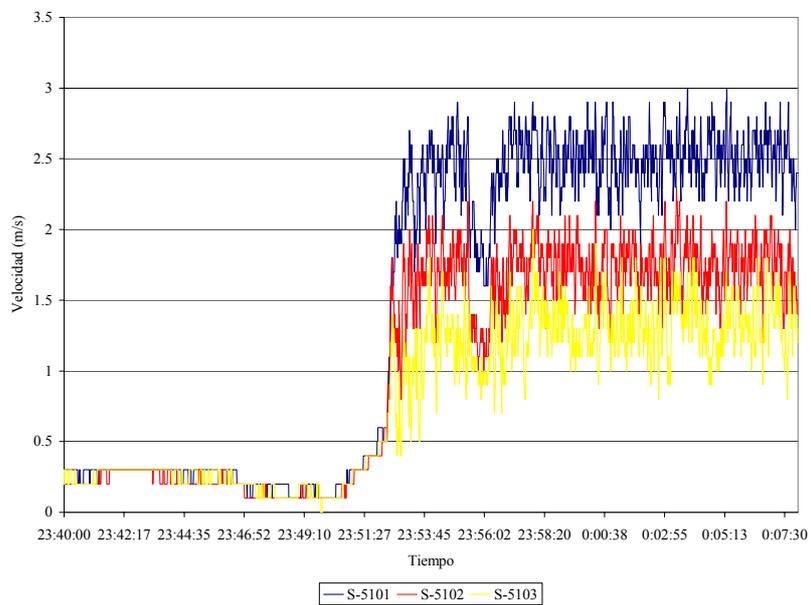


Figura 5.27: Ensayo de humos. Sección 5.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Sensor	Ensayo de humos (m/s)
S1101	2.332
S1102	1.699
S1103	1.216
S5101	2.513
S5102	1.760
S5103	1.323

Tabla 5.12: Velocidades medias durante los ensayos de humos.

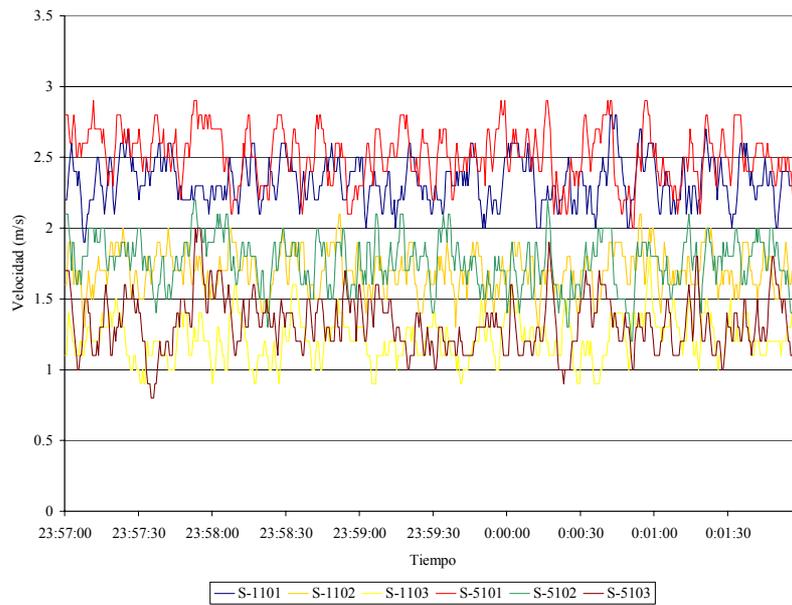


Figura 5.28: Periodo para estimar la velocidad media del ensayo de humos.

5.4.4.3 - ENSAYO DE 5 MW

En la prueba se usaron 150 litros de heptano que tardaron 18 minutos y 24 segundos en arder en una bandeja de 1'4 m de diámetro. Esto representa una potencia real de:

$$Q_{real} = \frac{\Delta H \rho_{liquido} V_{liquido}}{tiempo consumo} = \frac{48'07 (MJ / kg) \times 680 (kg / m^3) \times 0'150 (m^3)}{(18 \times 60 + 24) (s)} = 4'5 MW \quad (5.10)$$

El hecho de resultar este dato menor que el calculado teóricamente se debe, en parte, a que al inicio y al final la llama no está completamente desarrollada y por lo que en esos instantes la potencia es menor que la media. Por tanto se decidió emplear una potencia de 5MW para los cálculos. En la imagen 5.4 se aprecia una vista del ensayo.



Imagen 5.4: Ensayo de 5MW en el túnel 2.

Se partió de la ventilación en marcha y se paró a partir de los 7 minutos y medio de encenderse el fuego. La secuencia que se llevó a cabo finalmente fue la siguiente:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- 00:05:00 – Ventilación en marcha de la prueba de humos.
- 00:06:36 – Comienza el incendio.
Humo visible en la cámara 1.
- 00:07:15 – Humo visible en la cámara 2.
- 00:07:30 – Humo visible en la cámara 3.
- 00:07:45 – Humo llega a la cámara 3.
- 00:08:00 – Visibilidad media en las cámaras 2 y 3.
Humo visible en la cámara 4.
- 00:08:30 – Visibilidad media en la cámara 4.
- 00:09:00 – Disminución de la velocidad medida que se recupera rápidamente.
Visibilidad casi nula en las cámaras 2, 3 y 4.
- 00:14:00 – Se para la ventilación pero las velocidades medidas tardan en bajar.
- 00:15:45 – Humo visible en la cámara 5.
- 00:17:00 – Visibilidad nula en las cámaras 2, 3 y 4.
- 00:18:15 – La llama, oculta por el humo, casi no se ve desde la cámara 1.
- 00:18:45 – Humo visible en la cámara 6.
- 00:19:00 – Velocidad medida igual a la natural, 0'1 m/s.
- 00:19:45 – Visibilidad media en 5.
- 00:20:45 – Humo retrocede hacia la cámara 1.
- 00:21:30 – Visibilidad media en la cámara 6.
- 00:23:15 – Visibilidad casi nula en la cámara 1.
- 00:25:00 – Deja de verse llama desde la cámara 1.
- 00:27:00 – Aumenta la visibilidad en la cámara 1.
- 00:28:15 – Aumenta la visibilidad en la cámara 2.
- 00:29:00 – Visibilidad total en cámaras 1 y 2.
Visibilidad nula en cámaras 5 y 6.
- 00:29:15 – Aumenta la visibilidad en la cámara 3.
- 00:30:00 – Visibilidad total en la cámara 3.
Aumenta la visibilidad en la cámara 4.
- 00:31:00 – Visibilidad total en la cámara 4.
- 00:38:00 – Aumenta la visibilidad en la cámara 5.
- 00:38:30 – Visibilidad media en la cámara 5.
- 00:39:15 – Aumenta la visibilidad en la cámara 6.
- 00:39:45 – Visibilidad total en la cámara 5.
- 00:40:30 – Visibilidad media en la cámara 6.

- 00:41:45 – Visibilidad total en la cámara 6.

En la figura 5.29 aparecen todas las medidas realizadas durante el ensayo. En las figuras 5.30 y 5.31 se muestran las velocidades registradas en las secciones 1 y 5, 50 metros aguas arriba y 100 aguas abajo del foco respectivamente. La tabla 5.13 contiene las velocidades medias máximas calculadas una vez en marcha la ventilación, concretamente con los datos de la figura 5.32. La figura 5.33 refleja las temperaturas medidas en las secciones 0, 1 y 2, que se encuentran a 10 metros aguas abajo y 50 y 10 aguas arriba del foco respectivamente. La sección 3, el incendio, la 4, 50 metros aguas abajo, y la 5, 100 metros aguas abajo del foco, midieron las temperaturas que aparecen en las figuras 5.34, 5.35 y 5.36 respectivamente.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

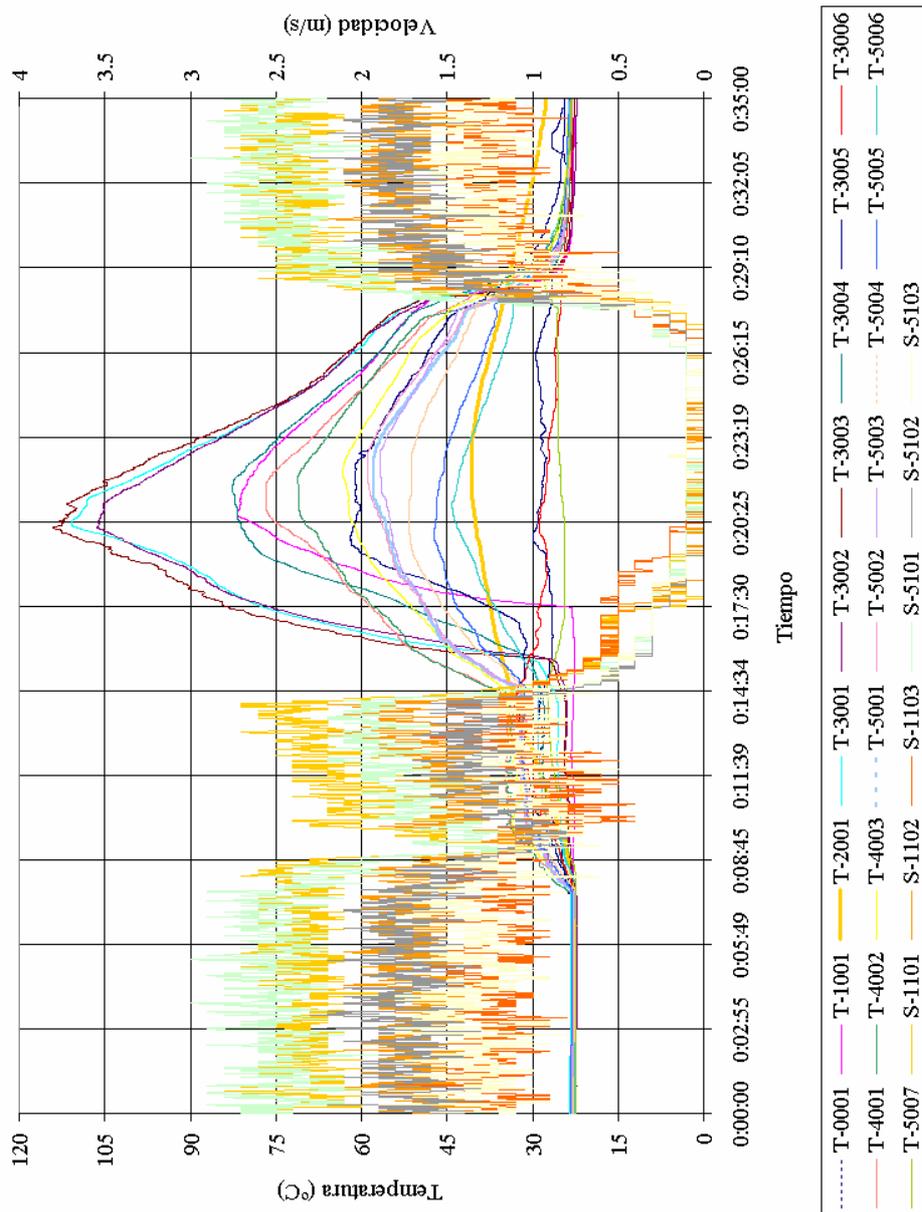


Figura 5.29: Resultados del ensayo de 5MW, sentido hacia Barajas.

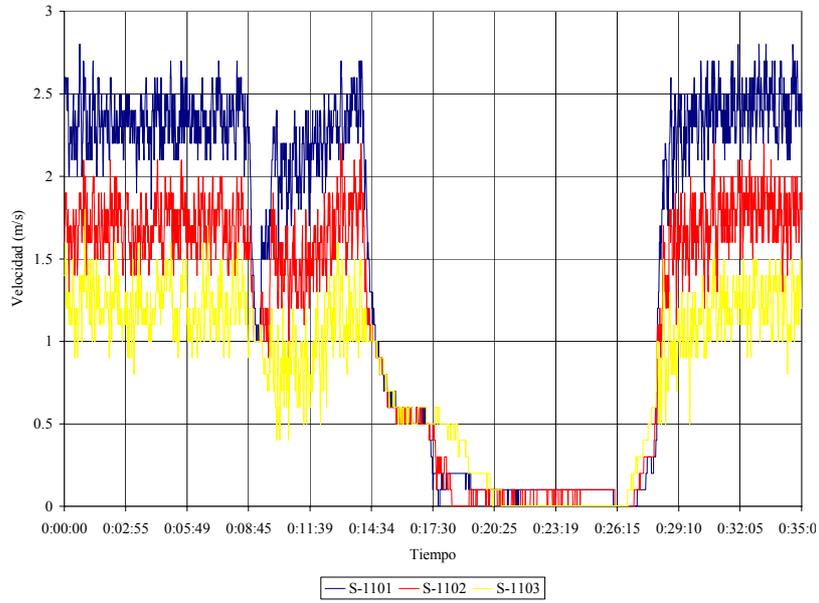


Figura 5.30: Ensayo de 5 MW. Velocidades. Sección 1.

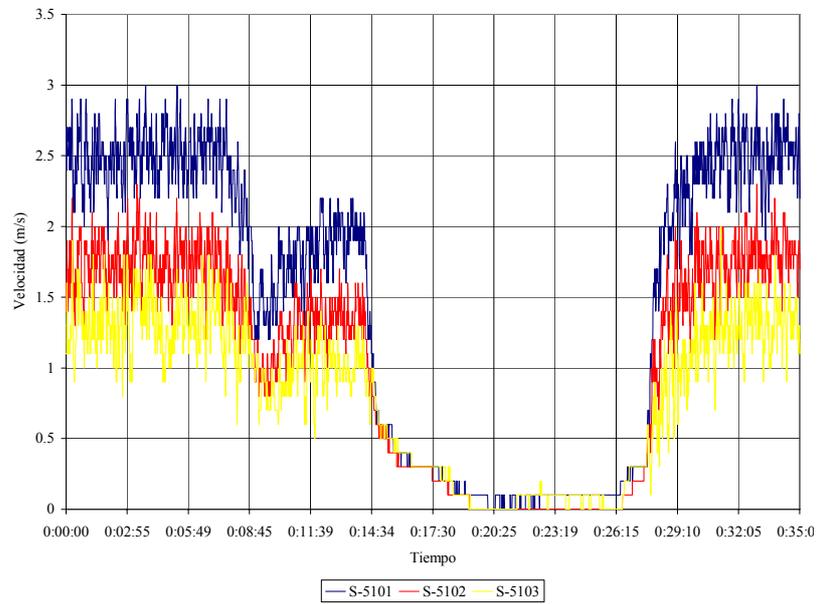


Figura 5.31: Ensayo de 5 MW. Velocidades. Sección 5.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Sensor	5 MW Barajas (m/s)
S1101	2.332
S1102	1.706
S1103	1.235
S5101	2.504
S5102	1.746
S5103	1.321

Tabla 5.13: Velocidades medias máximas durante los ensayos de 5 MW.

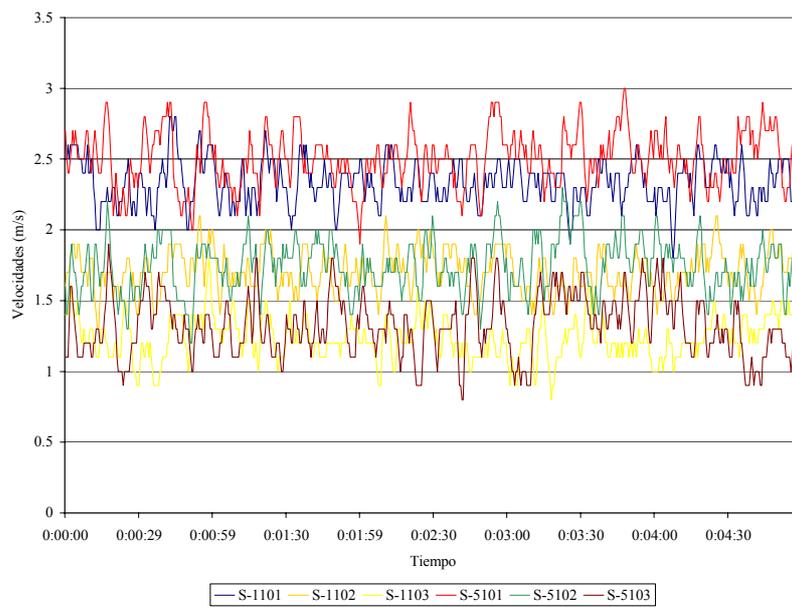


Figura 5.32: Periodo para estimar la velocidad media del ensayo de 5 MW.

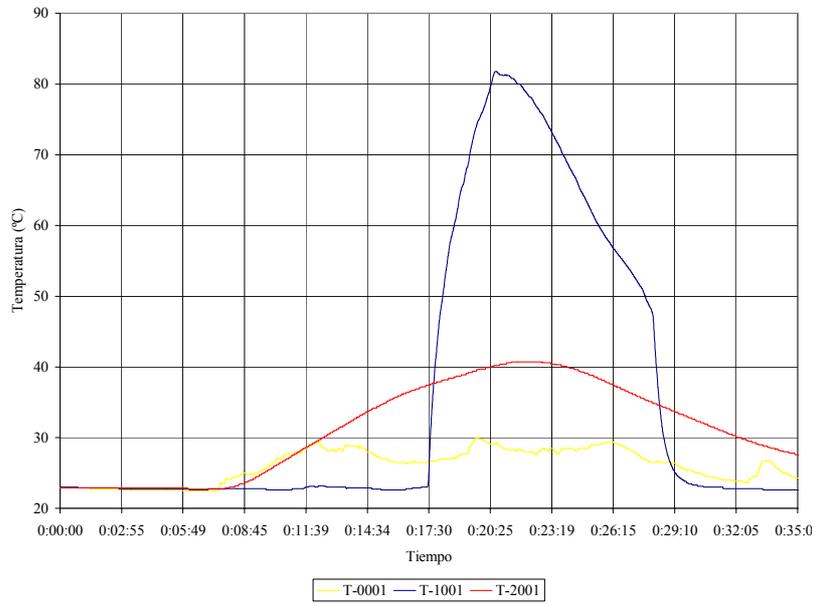


Figura 5.33: Ensayo de 5 MW. Temperaturas. Secciones 0, 1 y 2.

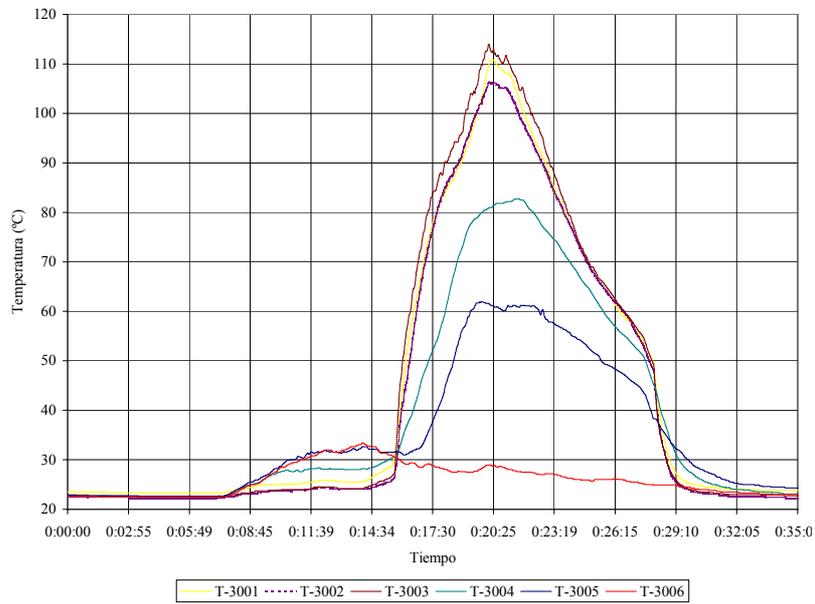


Figura 5.34: Ensayo de 5 MW. Temperaturas. Sección 3.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

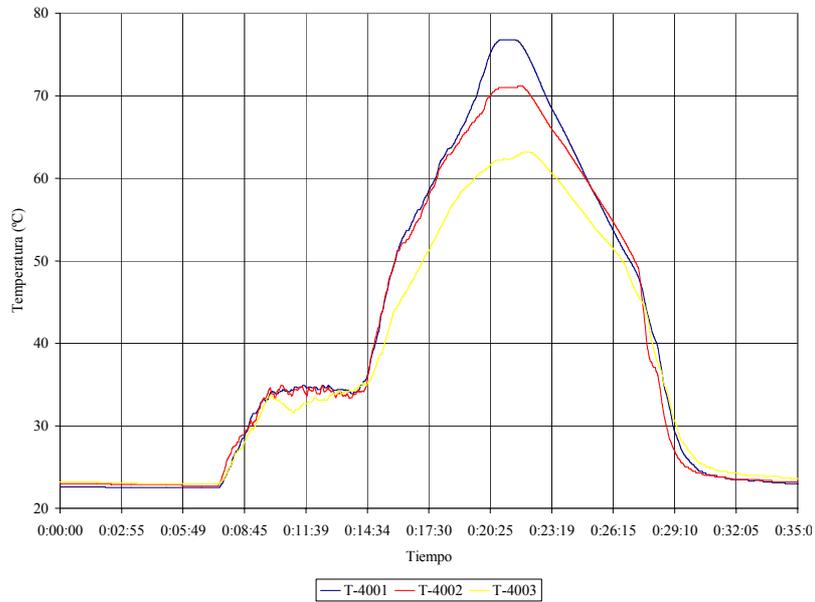


Figura 5.35: Ensayo de 5 MW. Temperaturas. Sección 4.

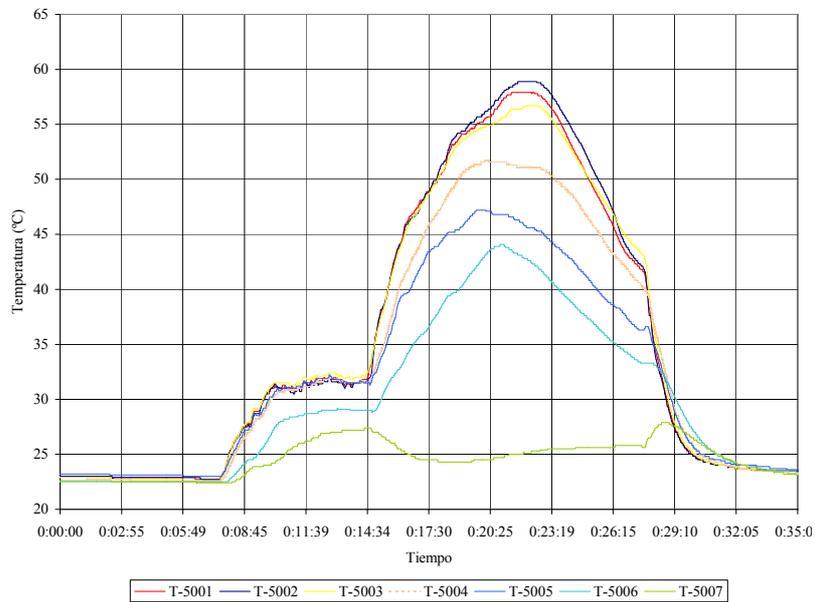


Figura 5.36: Ensayo de 5 MW. Temperaturas. Sección 5.

5.4.4.4 - ENSAYO DE 10 MW

Se emplearon dos bandejas de diámetro igual a la empleada en la anterior prueba. Cada una de ellas contenían 150 litros de heptano. Se encendieron con una diferencia de 15 segundos. La última en prender siguió ardiendo 1 minuto y 30 segundos más desde que lo dejó de hacer la primera. La bandeja inicial duró 17 minutos y la segunda tardó en consumir el combustible 18 minutos y 15 segundos. Por tanto, la primera de ellas produjo una potencia media de 4'8 MW y la segunda 4'5 MW, es decir 9'3 MW totales. Por las mismas consideraciones hechas al comienzo del apartado 5.4.4.3, se ha elegido una potencia de 10 MW para los cálculos numéricos.

$$\dot{Q}_{real} = \sum \frac{\Delta H \rho_{liquido} V_{liquido}}{tiempo consumo} = 4'8 MW + 4'5 MW = 9'3 MW \quad (5.11)$$

La ventilación inicialmente estaba parada y se arrancó casi al final de la prueba, 13 minutos y medio después del encendido de la primera bandeja. Más concretamente, la secuencia que se llevó a cabo fue la siguiente:

- 01:00:00 – Ventilación parada.
Velocidad natura medida de 0'2 m/s.
- 01:00:30 – Encendido de la primera bandeja.
Estratificación completa vista desde las cámaras 1 y 2.
- 01:00:45 – Encendido de la segunda bandeja.
Estratificación completa vista desde la cámara 3.
- 01:10:00 – La cámara 1 pierde visibilidad.
- 01:11:00 – Visibilidad nula desde la cámara 1.
- 01:11:15 – El frente de humos llega a la cámara 2.
Se pierde la visibilidad totalmente desde la cámara 2.
- 01:11:30 – El humo se acerca rápidamente a la cámara 3.
- 01:11:37 – Desde la cámara 1 no se ve la llama por el humo interpuesto.
- 01:11:45 – Se ve humo desde la cámara 4.
- 01:13:00 – Visibilidad nula en las cámaras 3 y 4.
- 01:13:15 – Se comienza a ver a la llama desde la cámara 1.
- 01:14:00 – Comienza la ventilación.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

- 01:14:45 – Visibilidad total desde la cámara 1.
- 01:15:45 – Se empieza a ver la llama desde la cámara 2.
- 01:16:45 – Visibilidad media en la cámara 2.
Aumenta la visibilidad en la cámara 3.
- 01:17:30 – Se apaga la primera bandeja.
Aumenta la visibilidad en la cámara 4.
- 01:18:15 – Llama de la segunda bandeja muy pequeña.
Visibilidad media en la cámara 3.
- 01:18:30 – Velocidad en régimen.
Visibilidad total en cámara 2.
- 01:19:00 – Visibilidad total en cámara 3.
Visibilidad media en cámara 4.
- 01:19:30 – Humo en cámara 5.
- 01:19:50 – Se apaga la segunda bandeja.
- 01:21:00 – Visibilidad total en cámara 4.
Visibilidad media en cámara 5.
- 01:21:30 – Visibilidad nula en cámara 5.
- 01:22:15 – Humo en cámara 6.
- 01:22:30 – Visibilidad media en cámara 6.
- 01:23:00 – Visibilidad nula en cámara 6.
- 01:26:30 – Aumenta visibilidad en cámara 5.
- 01:27:00 – Visibilidad media en 5.
Finaliza la secuencia de video.

En la figura 5.37 aparecen todas las medidas realizadas durante el ensayo. En las figuras 5.38 y 5.39 se muestran las velocidades registradas en las secciones 1 y 5, 50 metros aguas arriba y 100 metros abajo del foco respectivamente. La tabla 5.14 contiene las velocidades medias máximas calculadas una vez en marcha la ventilación, concretamente con los datos de la figura 5.40. La figura 5.41 refleja las temperaturas medidas en las secciones 0, 1 y 2, que se encuentran a 10 metros aguas abajo y 50 y 10 metros aguas arriba del foco respectivamente. La sección 3, el incendio, la 4, 50 metros aguas abajo, y la 5, 100 metros aguas abajo del foco, midieron las temperaturas que aparecen en las figuras 5.42, 5.43 y 5.44 respectivamente.

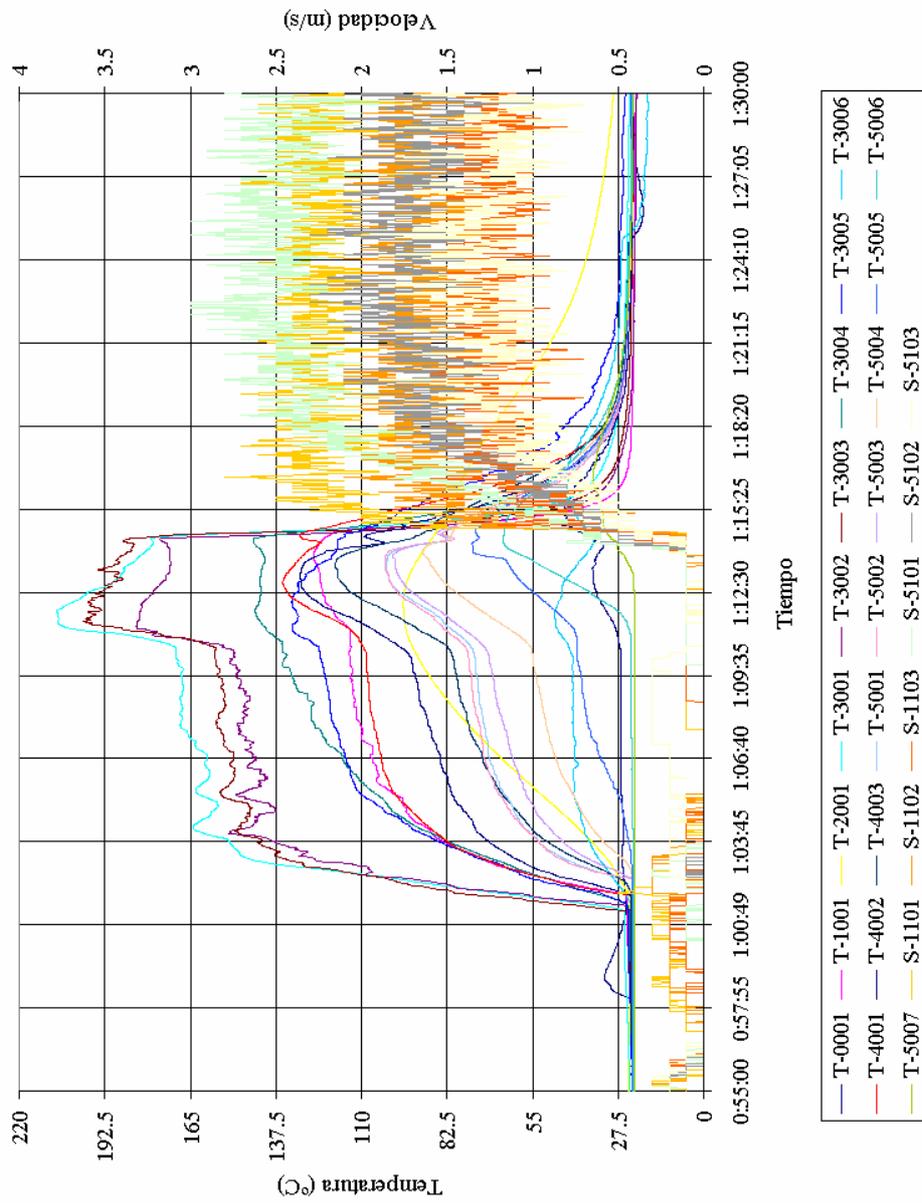


Figura 5.37: Resultados del ensayo de 10MW, sentido hacia Barajas.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

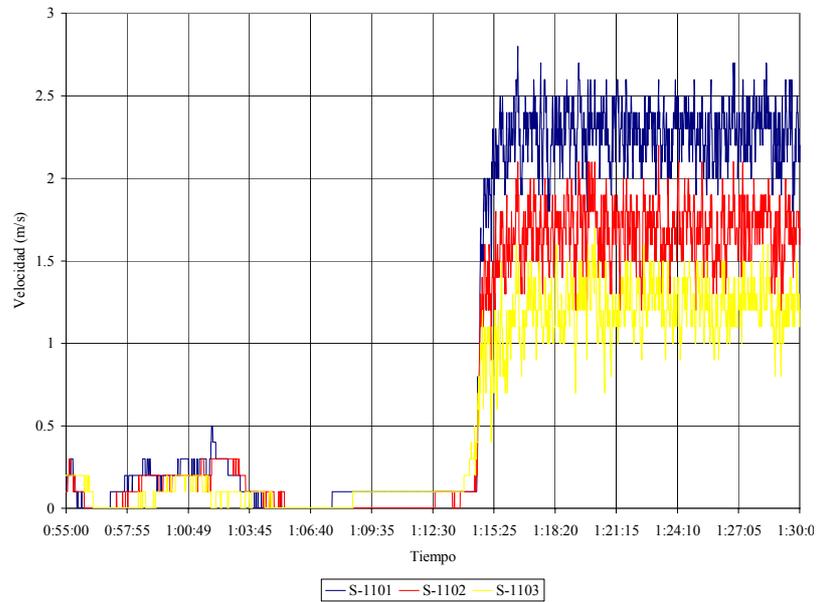


Figura 5.38: Ensayo de 10 MW. Velocidades. Sección 1.

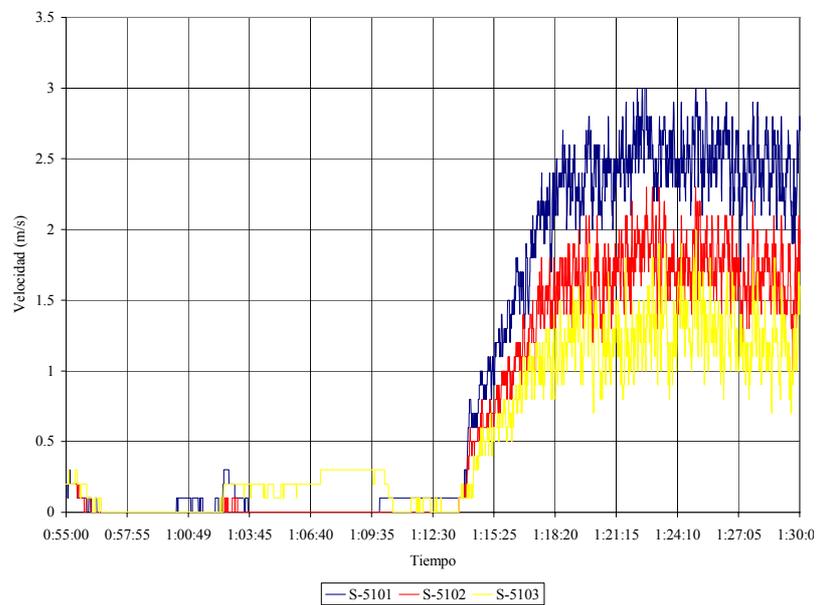


Figura 5.39: Ensayo de 10 MW. Velocidades. Sección 5.

Sensor	10 MW Barajas (m/s)
S1101	2.276
S1102	1.675
S1103	1.227
S5101	2.467
S5102	1.716
S5103	1.244

Tabla 5.14: Velocidades medias máximas durante el ensayo de 10 MW.

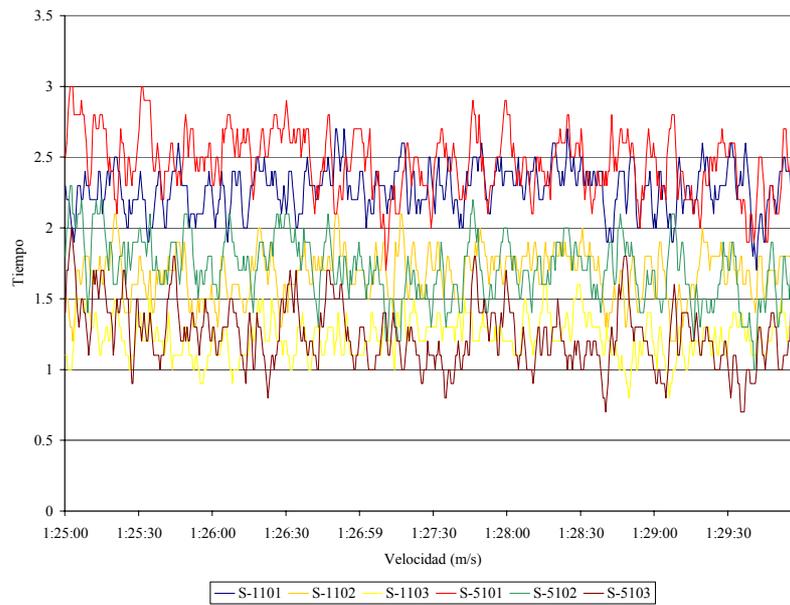


Figura 5.40: Periodo para estimar la velocidad media del ensayo de 10 MW.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

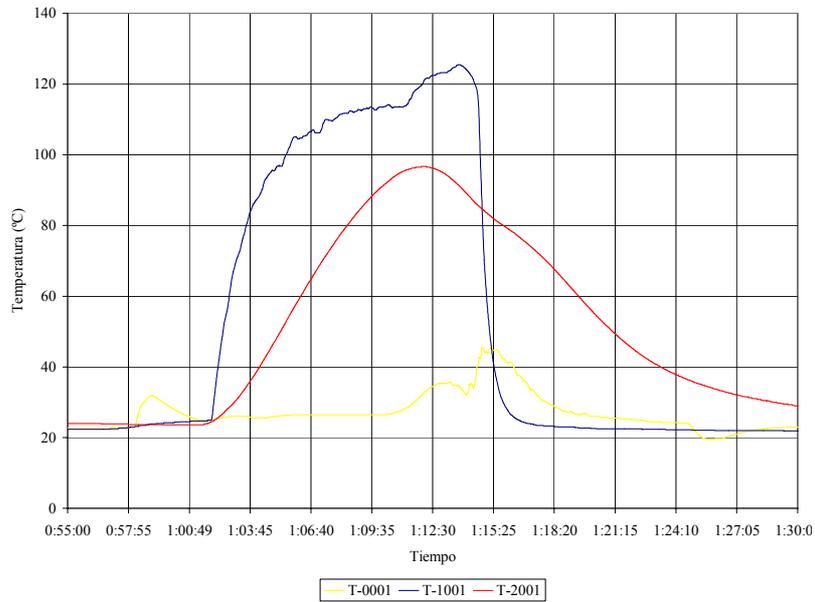


Figura 5.41: Ensayo de 10 MW. Temperaturas. Secciones 0, 1 y 2.

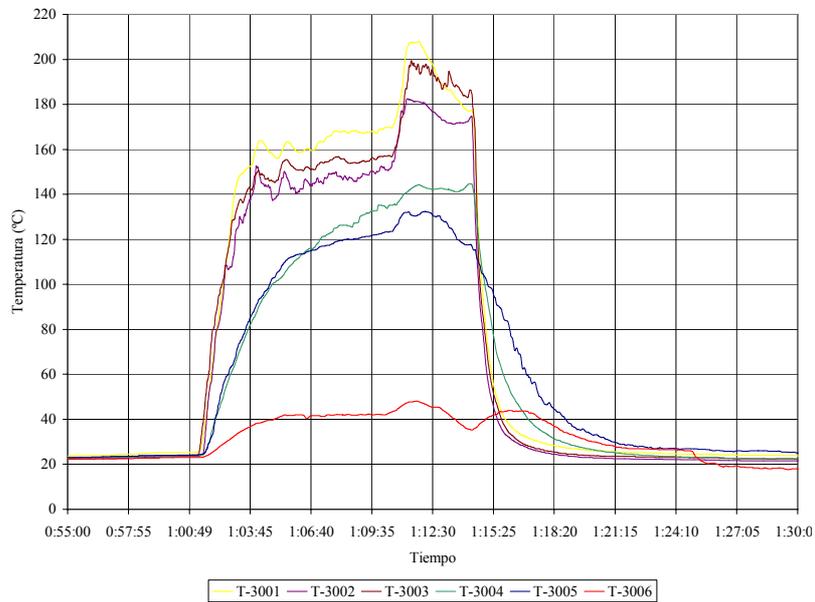


Figura 5.42: Ensayo de 10 MW. Temperaturas. Sección 3.

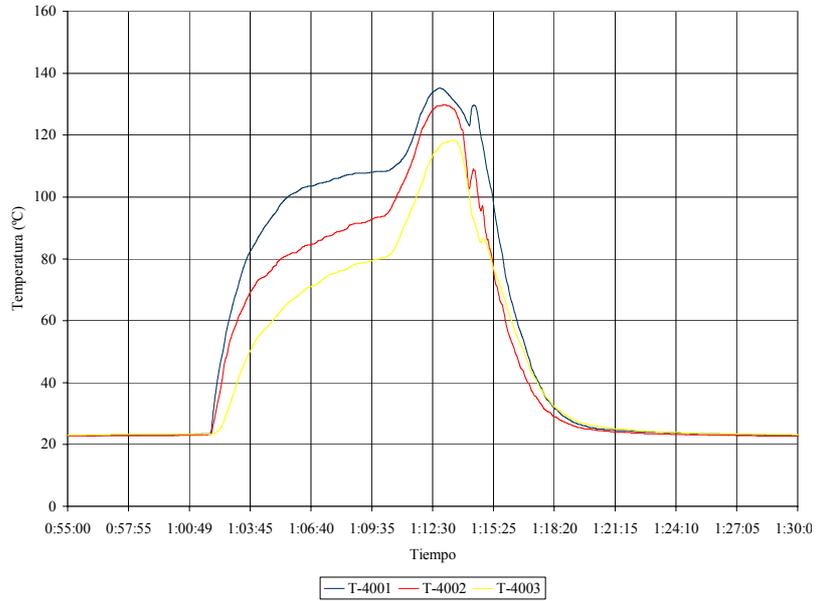


Figura 5.43: Ensayo de 10 MW. Temperaturas. Sección 4.

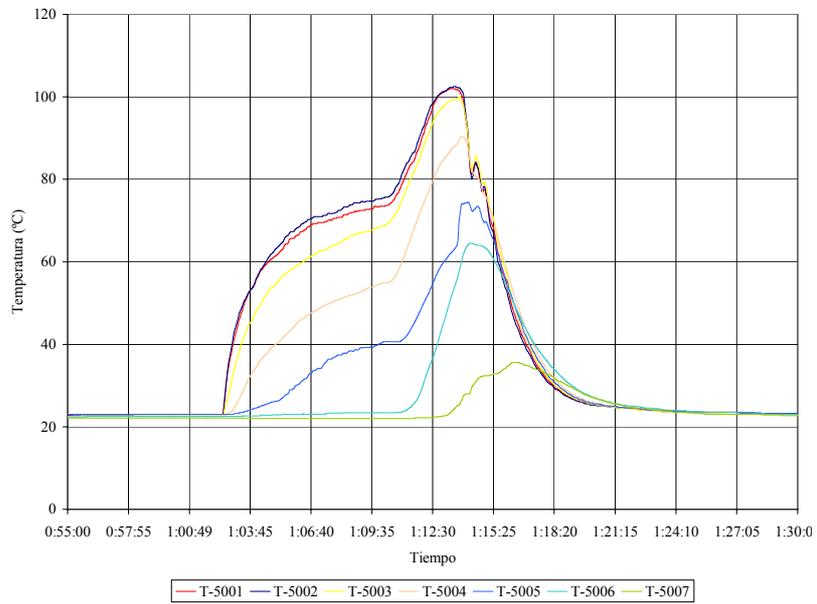


Figura 5.44: Ensayo de 10 MW. Temperaturas. Sección 5.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

5.4.5 - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Al objeto de esta tesis, los ensayos en vacío y con humos sirven para evaluar la velocidad conseguida con el sistema de ventilación con aire natural y viciado. Lo primero que destaca es el hecho de que en ambos casos junto con los dos ensayos con incendio, las medidas de los anemómetros muestran velocidades mucho menores que las esperadas. Supuestamente el sistema de ventilación en estos casos debería ser capaz de proporcionar una velocidad de 2'8 m/s. Para el caso estacionario, con ventilación a pleno funcionamiento, obtenido con la media de los cuatro casos reales, se obtendrían las velocidades de la tabla 5.15. Se puede comprobar como están claramente por debajo de la prevista, máxime cuando recordamos que la tabla 5.15 muestra velocidades puntuales decrecientes con la altura y el 2'8 debería ser la media en toda la sección. Los sensores SX101 están a 8.28 m, los SX102 a 7'28 m y los SX103 a 6'28 m de altura.

Sensor	Medias (m/s)
S1101	2.334
S1102	1.712
S1103	1.219
S5101	2.495
S5102	1.744
S5103	1.300

Tabla 5.15: Velocidades medias máximas en los sensores.

Otra opción sería, ya que el sensor es muy sensible al alineamiento de su boquilla con la corriente incidente, considerar como válidos realmente los picos de velocidad, sin hacer medias. De esta forma lo que quedarían serían los resultados de la tabla 5.16.

Sensor	Velocidad máxima (m/s)
S-1101	2.9
S-1102	2.3
S-1103	1.8
S-5101	3.1
S-5102	2.3
S-5103	2.1

Tabla 5.16: Máximos registrados durante los ensayos.

Obviamente, las velocidades aumentan respecto a las anteriores, superando ya alguna las previsiones. Pero, teniendo en cuenta de nuevo que son puntuales tanto espacial como temporalmente, no se puede asumir que en el túnel exista la velocidad media prevista. De hecho sólo existen 34 datos en el sensor S-1101 y 589 en el S-5101 que igualen o superen la velocidad de diseño. Si se tiene en cuenta que durante al menos una hora, 7200 registros, existía velocidad con ventiladores a plena potencia, solo un 0'5 % de las mediciones del PT100 S-1101 y un 8'2 % de las del S-5101 cumplirían el criterio de los 2'8 m/s.

En vista de estas discrepancias, para poder emplear los datos del experimento, se ha optado por dos vías. Comprobar en los videos disponibles la velocidad con que se propagaba el frente de humos y realizar mediciones in situ con anemómetros calibrados.

El caso que puede ser tomado como referencia, para nuestro propósito, es él de los 10 MW. La saturación visual de dos cámaras suficientemente separadas entre sí es lo suficientemente brusca para poder indicar que el frente está pasando por ellas. El hecho de que inicialmente en este ensayo no estuviese funcionando el sistema de ventilación, hace que la velocidad calculada sea inferior a la que habría el que caso más favorable, con todos los ventiladores funcionando todo el tiempo, con lo que obtendremos un valor inferior al real. En el video de la grabación de las cámaras del túnel se observa como en el instante 01:11:17 llega el frente de humos a la cámara 2 y la satura. Lo mismo ocurre en la 5 a las 01:21:30. Por tanto, el humo tarda 613 segundos en llegar de una a otra. Ambas cámaras están en los puntos métricos 1425 y -400, es decir, separadas 1825 metros. La velocidad media que ha llevado el humo en este caso es de 3 m/s. Puesto que la ventilación no funcionó hasta la 01:14:00 y no alcanzo su valor de régimen hasta las 01:18:30, existen 163 segundos durante los que hubo ventilación natural y 270 en que existió ventilación forzada no completamente desarrollada. Es decir, que de los 613 segundos de la medición, el 26'6 % del tiempo hubo tiro natural, el 44 % tiro forzado no desarrollado y el 29'4 % la ventilación era la máxima, figura 5.45. Por tanto, esa velocidad de 3 m/s debe ser mucho menor que la real. Ya de por sí, esa velocidad es mayor que las medias medidas en este periodo de comprobación, tabla 5.17, siendo de casi el doble que la máxima media medida. Simplificando mucho el problema, si se supone que durante la primera parte del periodo tomado como referencia no existe velocidad, durante la última se alcanza una velocidad máxima uniforme y en la intermedia hay una velocidad creciente linealmente entre ambas, la evolución del perfil de velocidades sería el dado en la figura 5.46.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Para que quedase una media durante todo el periodo de 3 m/s, la velocidad máxima de dicho esquema, V_{\max} , se calcularía mediante:

$$\frac{1}{2}V_{\max} (m/s) * 270 (s) + V_{\max} (m/s) * 180 (s) = 3 (m/s) * 613 (s) = 1825 (m) \quad (5.12)$$

Con lo que la velocidad en régimen estacionario sería 5'8 m/s, casi cuatro veces superior a la máxima media registrada durante la prueba tomada como referencia.

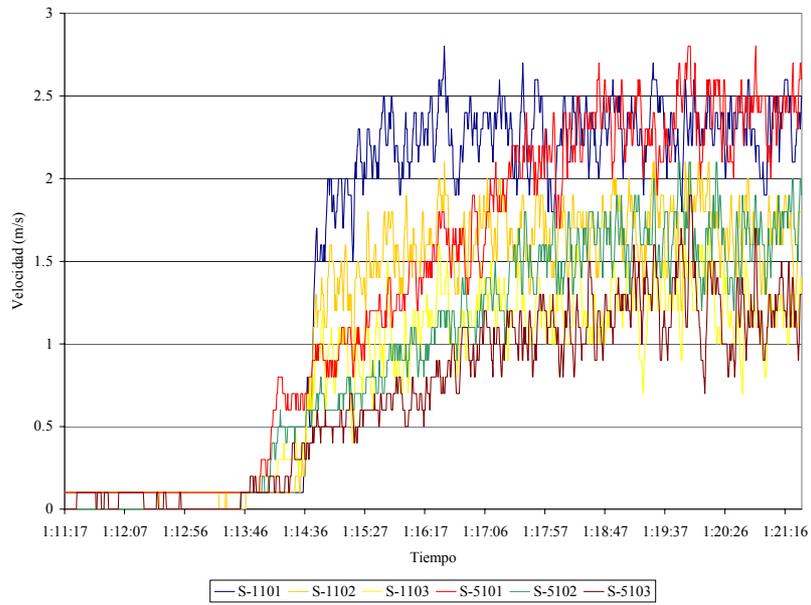


Figura 5.45: Velocidades en el caso tomado como referencia.

Sensor	Medias (m/s)
S-1101	1.524
S-1102	1.109
S-1103	0.813
S-5101	1.352
S-5102	0.933
S-5103	0.695

Tabla 5.17: Velocidades medias durante el caso tomado como referencia.

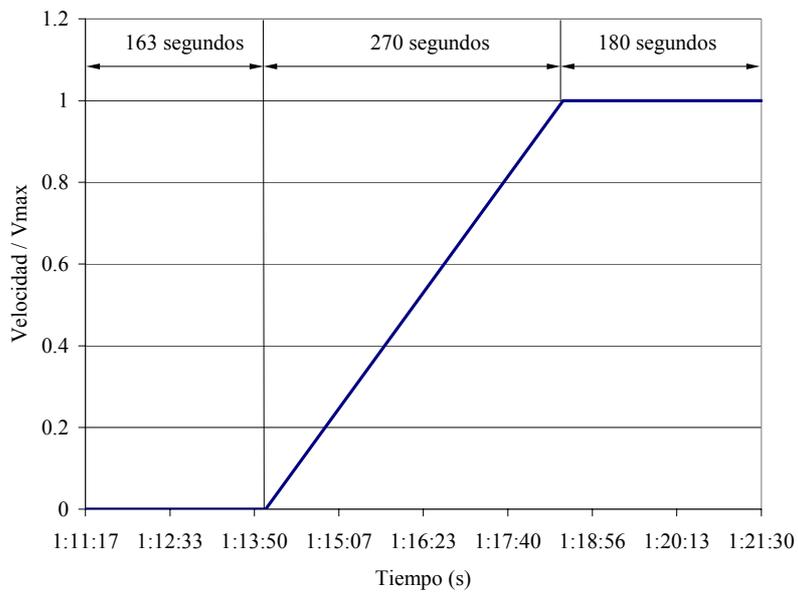


Figura 5.46: Esquema de velocidad simplificado durante el periodo tomado como referencia para el cálculo de la velocidad de régimen en el túnel.

La segunda comprobación realizada consiste en verificar los sensores. Se ha comparado la posición relativa de las secciones de medida con los ventiladores, tabla 5.18, y con otros posibles objetos del túnel que pudiesen interferir con la medición. Estos últimos están más separados que los ventiladores. En la tabla 5.18, se comprueba como la distancia con las secciones 1 y 5, donde existen anemómetros, es tal que hace previsible la no existencia de interferencias, estelas y chorros, de la ventilación sobre los sensores de velocidad. Hay unos 20 metros de separación cuando a partir de los 6 diámetros de ventilador, 6 metros, ya no deberían existir.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Sección	Posición relativa al incendio	Punto métrico	Ventilador más cercano aguas abajo	Ventilador más cercano aguas arriba	Distancia al ventilador más cercano aguas abajo	Distancia al ventilador más cercano aguas arriba
1	-50	1600	1578	1653	22	53
2	-10	1560	1503	1578	57	18
3	0	1550	1503	1578	47	28
0	+10	1540	1503	1578	37	38
4	+50	1500	1430	1503	70	3
5	+100	1450	1430	1503	20	53

** Todas las distancias en metros

Tabla 5.18: Separación desde las secciones de medida hasta los ventiladores.

Se acudió a dichas instalaciones el día 2 de agosto del 2002 entre las 13 y las 16 horas, tomándose datos de velocidad de viento con un anemómetro calibrado. Durante estas mediciones había una pareja de ventiladores desconectada, existía maquinaria y personal en el túnel y al menos dos pasos entre túneles, espacios de 5x5 m², estaban abiertos. Por tanto, las nuevas mediciones estarían distorsionadas fundamentalmente a la baja, debido a que existía menor empuje de ventilación y se escapaba caudal desde el túnel 2 hacia el túnel 3. El efecto de la maquinaria es menos importante ya que las mediciones no se realizaron junto a ellas. Los resultados para distintas posiciones se reflejan en la tabla 5.19. Dichas medidas están tomadas entre 1 y 2'5 metros de altura. Hay que resaltar que, excepto en una posición de la tabla, todas las velocidades medias registradas están considerablemente por encima de las medidas tomadas por los sensores de velocidad durante los ensayos con fuego. En las medidas de comprobación se midieron picos de 6 y 7 m/s. *Las medidas tomadas en la sección 1 del ensayo con uno de los anemómetros del experimento, al mismo tiempo y en la misma posición del calibrado, fueron siempre alrededor de 1 m/s por debajo.*

Por todo lo anterior, se puede afirmar que la velocidad registrada en los ensayos es bastante menor que la que realmente existió, estimándose esta en más de 3 m/s. El problema es como asignar una velocidad realista para hacer la comprobación empleando los resultados obtenidos.

En los resultados de temperaturas también se encuentran dificultades para su interpretación. Los del incendio de 5 MW pueden ser explicados acudiendo a una velocidad de ventilación mayor que la registrada. Sin embargo, en el ensayo de 10 MW los problemas vuelven a aparecer. En las figuras 5.37 y de la 5.41 a la 5.44, aparecen 7 zonas según como evoluciona la temperatura registrada:

Punto métrico (m)	Posición respecto al incendio (m)	Velocidad media (m/s)
1700	-150	4.35
1600	-50	5.1
1550	0	3.5
1280	270	3.6
1000	550	4
650	900	4.75
540	1010	4.4
350	1200	3.6
75	1475	3.45
0	1550	3.85
-200	1750	3.7
-400	1950	2.3
-418	1968	3.6
-507	2057	3.25
-600	2150	3.6
-700	2250	2.9
-835	2385	3.6

Tabla 5.19: Velocidad de viento media con anemómetro calibrado en el túnel.

- Zona 1: Antes del comienzo del incendio los sensores miden la temperatura ambiente. Existe un pico en la PT100 de la sección 0, 10 m aguas arriba del incendio a 1 m del suelo, explicable ya que en las proximidades se encontraban vehículos que pudieron interferir puntualmente en la medición.
- Zona 2: El incendio comienza a la 01:00:30 y a medida que van llegando los humos calientes a cada sección se produce un aumento drástico, con una pendiente en función de la posición de la misma, de la temperatura medida.
- Zona 3: Más pronto o más tarde, en casi todos los sensores aparece un estado casi estacionario con una velocidad máxima medida de 0'3 m/s en dirección Paracuellos.
- Zona 4: Alrededor de la 01:10:30, se conecta la ventilación, en sentido Barajas, con lo que existe un periodo en que se pasa de medir 0'3 a 0'1 m/s. El empuje de los ventiladores contrarresta el natural. Las temperaturas aumentan drásticamente.
- Zona 5: En varios sensores, sobre todo en los de las secciones 3 y 4, deja de aumentar la temperatura e incluso disminuye, sin que exista causa aparente. No se registra aumento de la velocidad y sigue existiendo humo en esas secciones.
- Zona 6: Al notarse el efecto de la ventilación, las temperaturas disminuyen pronunciadamente.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

- Zona 7: El incendio de la primera bandeja se apaga a la 01:17:30 y el de la segunda a la 01:19:00, pero antes de ello, la mayoría de los sensores que más temperatura registraron durante el incendio de 5MW, en su fase estacionaria con ventilación, disminuyen su valor medido por debajo de lo que registraron en dicho caso, siendo las velocidades muy similares. La explicación más probable es que se trate de algún fallo de los sensores.

Se realizaron nuevos ensayos con las PT100 para ver como evoluciona su medición cuando desaparece la fuente de calor. En principio los resultados fueron satisfactorios. No se apreciaron errores de histéresis.

5.5 - ESTUDIO NUMÉRICO

La limitación de los resultados experimentales lleva a la necesidad de usar otros medios para comprobar los resultados predichos por el modelo presentado. De esta forma es lógico acudir a resultados obtenidos mediante métodos numéricos ya contrastados. Estos métodos deben tener una serie de propiedades:

- Consistencia, convergencia y exactitud.- Los errores pueden provenir de errores del modelo físico, errores de la discretización y errores de la convergencia según el método de resolución empleado. La discretización debe ser exacta cuando el espacio entre celdas tiende a cero. La diferencia entre la solución exacta y la discretizada se llama error de truncamiento.
- Estabilidad.- Un método numérico se dice que es estable si no amplifica los errores que aparecen en el curso del proceso de cálculo
- Conservación de las magnitudes fluidas.
- Soluciones acotadas.- Las soluciones obtenidas deben estar entre los límites apropiados, Por ejemplo, no tiene sentido valores negativos de densidad o energía cinética turbulenta, o concentraciones fuera del rango 0-100%.

Estos procedimientos de estudio constan en general de 3 aspectos:

- Modelo matemático.- Es el conjunto de ecuaciones diferenciales que pueden contener aproximaciones o idealizaciones del problema a resolver, apartado 5.5.1 y Anexo II.

- Métodos de discretización.- Al linealizar las ecuaciones diferenciales se transforman en un conjunto de ecuaciones algebraicas en las que las variables son un conjunto de valores en puntos del espacio y tiempo, apartado 5.5.2.
- Resolución del sistema de ecuaciones.- Las ecuaciones algebraicas obtenidas hay que resolverlas y para ello se dispone de métodos directos y métodos iterativos.

Para llevar a cabo los dos últimos puntos se han desarrollado códigos numéricos que desarrollan el modelo matemático considerado.

5.5.1 - MODELOS MATEMÁTICOS

Dada la complejidad del problema planteado, que incluye el estudio de combustión turbulenta basada en técnicas de dinámica de fluidos computacional, surgen diferentes vías para tratarlo. En los programas empleados en esta tesis para contrastar los resultados, se utilizan dos modelos alternativos: el modelo **k- ϵ -g**, basado en el **conserved scalar approach**, para el PHOENICS y el modelo **eddy break-up** en el FLUENT. Los modelos de flujo fluido en ambos son similares. Se diferencian principalmente en la modelización de la combustión. En el apartado 3 ya se comentaron distintos aspectos de estos modelos pero con vistas a su empleo en el modelo cuasi-unidimensional propuesto en la presente tesis. En el anexo II, se presenta una somera explicación de ambos desde la perspectiva de su empleo en códigos numéricos más generales. Comparaciones entre estos y otros modelos de combustión han sido llevadas a cabo, por ejemplo, por Goldin, 1998, y Eaton, 1999. Sin embargo, existen muchas menos comparaciones para escenarios de fuego confinados. Un ejemplo de estos últimos es Xue, 2001.

5.5.2 - MODELOS NUMÉRICOS

La plasmación de los modelos expuestos en el apartado anterior precisan un tratamiento numérico que posibilite su empleo. La implementación práctica se realiza mediante distintos programas comerciales de propósito general, que pueden ser aplicados a cualquier problema fluido, y programas más particulares, que se centran en determinados tipos de problema. En esta tesis como medio de comprobación de los resultados obtenidos se van a emplear, de entre los programas generalistas, el FLUENT y el PHOENICS. Los modelos de flujo fluido serán similares en ambos programas. La combustión en cambio se simulará con **eddy break-up** en el FLUENT y con **k- ϵ -g** en el PHOENICS. De entre los programas desarrollados

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

para su aplicación en incendios en túneles, se ha elegido para validar el modelo el SOLVENT, el cual emplea un modelo $k-\epsilon$ para la turbulencia pero no simula la combustión de forma directa. Este es un caso de programa cerrado, en el sentido de que no se pueden cambiar las ecuaciones que se van a resolver. En el FLUENT y PHOENICS, se pueden modificar, al menos hasta cierto punto, fuentes y sumideros, términos de las ecuaciones a resolver, coeficientes del modelo,... Sin embargo en el SOLVENT, muy pocos parámetros pueden ser alterados. Esto es comprensible puesto que la filosofía de los primeros es valer para cualquier problema fluidodinámico, mientras que el último se aplicará a unos escenarios muy concretos.

Las etapas en un programa de CFD son tres:

- PRE-PROCESO.- Se trata de definir el dominio físico y el consiguiente dominio computacional, generando la malla que lo represente. Este es un punto fundamental en la solución obtenida. Existen dos tipos de mallas: estructuradas y no estructuradas:
 - Las *mallas estructuradas* obtienen la representación de dominio computacional a partir del físico mediante transformaciones analíticas o a través de métodos numéricos. Con las transformaciones analíticas se impone un paso analítico de un dominio al otro, mientras que con los métodos numéricos se impone alguna condición que permita modelar mejor el campo físico. Ambos procedimientos obtienen un ordenamiento lógico de las celdas, es decir, dando una posición es posible conocer los puntos vecinos de la malla según alguna regla matemática. Este es el tipo de malla que se ha empleado en el código PHOENICS para resolver el problema planteado.
 - En las *mallas no estructuradas* hay que dar una lista de los nodos vecinos de cada celda para conocer la posición relativa de cada una de ellas. Se emplean habitualmente mallas con forma de triángulo, tetraedros, hexaedros o mezclas de las anteriores. Estas son las mallas empleadas con el código FLUENT.

Las estructuradas serían las idóneas ya que las mallas alineadas con el cuerpo son siempre la opción óptima. Sin embargo existen fuertes restricciones en la generación debido a la rigidez de este tipo de malla y al costo que representa. Este defecto puede paliarse empleando mallas multibloque o acudiendo a las mallas no estructuradas, las cuales pueden generarse casi automáticamente y permiten más fácilmente llegar a

refinamientos locales. El inconveniente de estas es su gran requerimiento de memoria y de tiempo de cálculo.

- **CÁLCULO.**- Se debe linealizar y discretizar las ecuaciones del modelo y resolver el sistema de ecuaciones resultante.

Los principales métodos de discretización son:

- *Diferencias finitas.*- Parten de la definición de derivada, desarrollos en serie de Taylor y ajustes con polinomios para la discretización de las ecuaciones. Pueden ser **hacia adelante**, si para un nodo emplean los datos del propio nodo y del siguiente, **hacia atrás** si emplean los del anterior además de los suyos propios, y **centradas**, si emplea valores de tres puntos, del punto de cálculo, del anterior y del posterior. Las diferencias centradas son las más exactas pero pueden tener asociadas oscilaciones en la solución.
- *Elementos finitos.*- El dominio de cálculo se divide en elementos (triángulos o cuadriláteros) permitiendo mallas no estructuradas. Se supone que la solución del problema tiene una forma determinada con una fuerte dependencia de la geometría. Se busca la solución de una ecuación en forma integral obtenida mediante una formulación de residuos ponderados. Este procedimiento se ha desarrollado únicamente para casos sencillos: flujo potencial, flujo incomprensible para número de Reynolds bajos e intermedios.
- *Métodos espectrales.*- Es menos aconsejable para CFD que los volúmenes finitos o los elementos finitos salvo en casos especiales (DNS en turbulencia). Las derivadas espaciales se obtienen con la ayuda de series de Fourier de orden N. El error de la derivada decrece exponencialmente con N si la función buscada es periódica en la posición en la que se aplica la serie de Fourier. Para sacar ventaja de este método, además de la periodicidad de la función, debe ocurrir que la malla esté uniformemente espaciada.
- *Volúmenes finitos.*- La principal ventaja de este método estriba en que la solución obtenida asegura implícitamente que magnitudes como la masa, la cantidad de movimiento y la energía se conservan para cualquier grupo de

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

volúmenes de control y, por supuesto, para todo el dominio a estudio. Se parte de las ecuaciones de conservación en forma integral y se divide el dominio en pequeños volúmenes de control. No precisa mallas estructuradas y son los de mayor significado físico. La discretización se realiza mediante:

- ❖ *Diferencias centradas.*- Desarrollo de Taylor para cada término de derivada.
- ❖ *Esquema upwind.*- Se cambia la forma de discretizar los términos convectivos pero no el resto. Parte de la idea de que cuando predomina la convección frente a la difusión (número de Peclet mayor que 2) es mejor suponer que la propiedad que sufre la convección tiene el mismo valor en el centro de la celda que en la cara de donde procede el flujo. La principal ventaja es que de esta forma los coeficientes de las ecuaciones resultantes siempre cumplen el criterio de Scarborough que predice si existirán problemas de convergencia.
- ❖ *Esquema exponencial.*- Relaciona los términos de las ecuaciones resultantes mediante exponenciales.
- ❖ *Esquema híbrido.*- Variante del anterior que da distintas leyes de variación según el número de Peclet.
- ❖ *Esquema ley potencial.*- Nueva variante con otras leyes según el valor de Peclet.

Tanto en el PHOENICS como en el FLUENT se ha usado un híbrido de los métodos anteriores, concretamente el *esquema upwind* para las derivadas de primer orden y las *diferencias centradas* para las de segundo.

A la hora de resolver el sistema de ecuaciones resultante de la discretización se pueden emplear distintos métodos:

- *Solución directa.*- Invertir el sistema de ecuaciones y obtener la solución exacta representada por el problema. Sería el idóneo pero computacionalmente es prohibitivo salvo en casos muy concretos.
- *Solución secuencial o iterativa.*- La solución se obtiene después de un proceso de repetición del cálculo hasta llegar a una solución con error menor que el deseado. En el sistema de ecuaciones de conservación clásico: masa, cantidad de movimiento y energía, esta última se desacopla en los flujos incompresibles. Se

pasa por tanto de un sistema de 5 ecuaciones con 5 incógnitas, las tres componentes de la velocidad y dos propiedades termodinámicas, a uno de 4 ecuaciones con 4 incógnitas, las tres componentes de la velocidad y una propiedad termodinámicas. Nuestro caso es un problema compresible y además hay que incluir las ecuaciones de conservación para el cierre del modelo turbulento y tener en cuenta la combustión. Hay dos tipos de métodos dentro de estas soluciones:

- ❖ *Función de corriente y vorticidad.*- Las ecuaciones de Navier-Stokes se simplifican introduciendo como variables dependientes la función corriente y la de vorticidad, relacionadas entre sí y que pasan a ser las dos incógnitas del problema. Se emplea especialmente en dos dimensiones ya que en tres, para el caso laminar incompresible, daría lugar a seis variables dependientes cuando inicialmente existen 4.
- ❖ *Variables primitivas.*- Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes tomando como incógnitas la velocidad, dos variables de estado, y las variables de los modelos de turbulencia y combustión considerados. Existen varias formas de resolver el problema así planteado:

Método de factorización aproxima la ecuación de cantidad de movimiento por una expresión factorizada que se resuelve por aproximaciones sucesivas.

Método de compresibilidad artificial es un ejemplo de cómo métodos utilizados en flujos compresibles pueden ser adaptados al caso de densidad constante. Para aplicarlo hay que modificar el carácter de las ecuaciones añadiendo una derivada temporal de la presión, $\partial p / \partial t$, en la ecuación de conservación de la masa. Cuando dicha derivada sea nula se puede afirmar que la solución obtenida cumple las ecuaciones de flujo incompresible y se recuperan las ecuaciones reales. Con este tipo de manipulación este método no sirve para el caso transitorio.

Métodos explícitos.- Usan un esquema en el que las incógnitas en función del tiempo pueden ser despejadas sin necesidad de iteraciones en el tiempo. Su inconveniente es que puede ser necesario recurrir a un paso temporal muy pequeño para conseguir la estabilidad de la solución.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

Métodos implícitos son más estables y pueden usar incrementos de tiempo más grandes, con la limitación de la exactitud de la solución obtenida. Como desventaja, no se puede despegar directamente la solución en función del tiempo por lo que habrá que iterar para encontrarla. Por tanto se han creado distintos procedimientos para llevarlo a cabo. Son los usados tanto en la resolución con PHOENICS como con en el FLUENT. Casi todos ellos emplean una corrección de presión en lugar de la presión misma y las velocidades obtenidas en primer lugar son sólo valores provisionales que deben ser corregidos en sucesivos cálculos llevados a cabo de forma iterativa y secuencial. El método SIMPLE desprecia las correcciones de velocidad originadas por los nodos vecinos frente al valor en el nodo. SIMPLEC (SIMPLE consistente) es una alternativa menos drástica que toma un valor promediado entre los nodos vecinos para las correcciones de velocidad. El método PISO hace la misma aproximación que el SIMPLE en una primera etapa pero introduce correcciones en un segundo paso en función de los nodos vecinos. Se emplea únicamente en casos muy concretos. El SIMPLER simplifica la expresión de corrección de presión pero la solución se emplea únicamente para corregir la velocidad de manera que satisfaga la ecuación de continuidad. Una vez obtenida esta velocidad, se emplea en la ecuación original para calcular la nueva presión. Este último método es el más usado ya que necesita menor número de iteraciones aunque requiere mayor número de ecuaciones y por tanto mayor tiempo de cálculo.

- POST-PROCESO.- Representar e interpretar los resultados obtenidos.

5.5.2.1 - PROGRAMA FLUENT

El programa tiene dos códigos principales. El GAMBIT y el FLUENT propiamente dicho. El primero es el encargado de crear el dominio de cálculo, imponer ciertas condiciones de contorno y crear el mallado. El FLUENT se encarga de resolver las ecuaciones empleado

los algoritmos deseados. Es un programa de propósito general que, al igual que el PHOENICS, resuelve ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes mediante el método de volúmenes finitos. Tiene incorporada la posibilidad de elegir entre malla estructurada o no estructurada a la hora de resolver el problema, habiendo sido esta última la empleada en el problema planteado. En este caso está formada por tres bloques conectados entre sí, cada uno de ellos con una malla estructurada formada por hexaedros, dando lugar a una malla global no estructurada.

La combustión se ha modelado mediante el método **eddy-break-up**, comentado en el anexo II. Se ha utilizado el método iterativo **SIMPLE** para resolver las ecuaciones, empleándose un esquema de discretización híbrido entre **upwind** y **diferencias centradas**, el primero para las derivadas de primer orden y el segundo para las de segundo. Al igual que en el PHOENICS, todas las variables del problema han sido convenientemente relajadas para conseguir la convergencia del proceso iterativo de cálculo.

En dirección longitudinal se ha refinado inicialmente en la sección donde se produce el fuego. Posteriormente se ha refinado la malla en la zona donde hay combustión utilizando el método de **hanging node**. En este proceso se ha utilizado como criterio para refinar la malla el que el gradiente de la temperatura no superase un determinado valor. En la figura 5.47 se presentan una vista longitudinal y otra transversal de las mallas utilizadas. En la vista longitudinal se observa el refinamiento mencionado en la sección del foco.

5.5.2.2 - PROGRAMA PHOENICS

También consta de dos códigos principales: un preprocesador denominado SATELLITE y un procesador llamado EARTH. El primero es un intérprete que construye ficheros de datos a partir de las instrucciones dadas por ejemplo a través de un fichero de datos de entrada. El segundo contiene el principal software de simulación de flujos. Este programa lee los datos proporcionados por SATELLITE, ejecuta los correspondientes cálculos y produce distintos tipos de ficheros con resultados. Tanto SATELLITE como EARTH poseen subrutinas a las que se puede acceder para introducir condiciones de contorno, implementar términos fuente y propiedades del flujo, y dar órdenes de control del procedimiento numérico y de la salida de resultados. Para el problema planteado se ha utilizado una subrutina especial.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

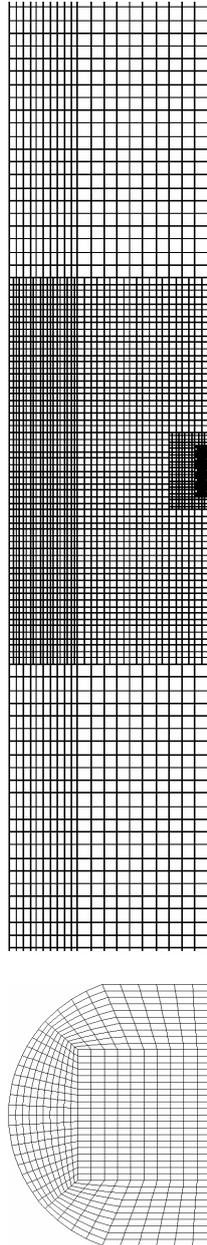


Figura 5.47: Malla utilizada en el FLUENT.

Se ha empleado una malla estructurada de tipo alternada para la localización de los puntos de cálculo de las variables. Las variables vectoriales se calculan en las caras del volumen de control y las escalares en el centro del volumen de control, es decir, se utiliza un volumen de control alternado para cada tipo de variable. Se han utilizado coordenadas ajustadas al cuerpo para construir la malla en la sección transversal. La distribución de las celdas en cada sección es no uniforme; la malla se ha refinado en las zonas cercanas al suelo y a las paredes donde la variación de las propiedades es mayor. En la dirección del eje del túnel la forma de las celdas es más regular. En esta dirección la malla es más fina en las zonas próximas a los ventiladores y al fuego. En la figura 5.48 se presenta una visión de la malla utilizada.

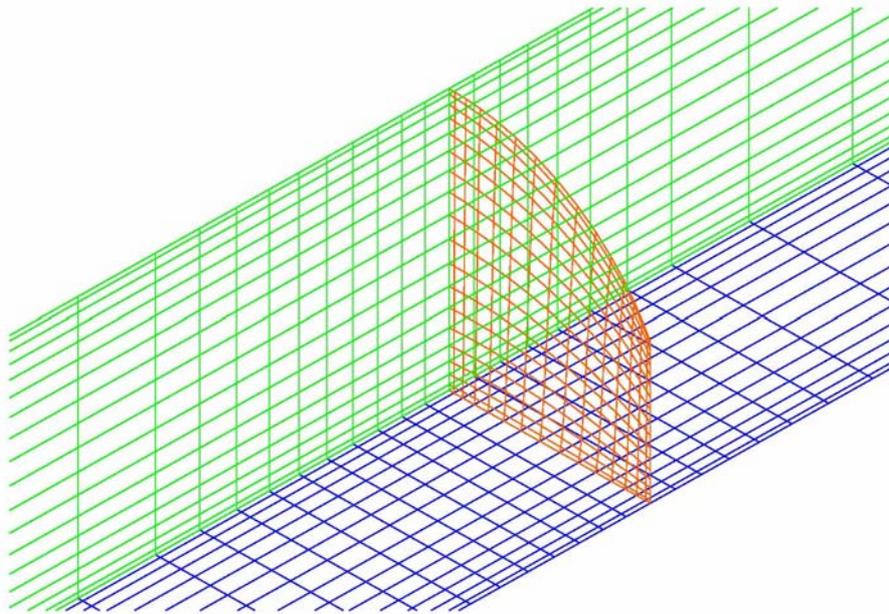


Figura 5.48: Malla utilizada con el PHOENICS.

El modelo empleado para simular la combustión ha sido el **k- ϵ -g**, ver anexo II. En la discretización de las ecuaciones se ha empleado un procedimiento híbrido **upwind/diferencias centrales** para los términos convectivos y difusivos de las ecuaciones, dependiendo de que el número de Peclet sea mayor o menor de dos respectivamente. Se emplea el algoritmo

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

SIMPLEST, variante del **SIMPLE**, para resolver el acoplamiento de las ecuaciones de continuidad y de conservación de la cantidad de movimiento a través de la presión. Aplicando el algoritmo **SIMPLEST** al proceso iterativo de cálculo de las magnitudes fluidas se obtiene un sistema lineal de ecuaciones algebraicas. El código emplea un algoritmo del tipo **predictor-corrector**, que reduce iterativamente la diferencia entre los dos miembros de cada ecuación hasta que dicha diferencia es suficientemente pequeña, para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas resultantes.

5.5.2.3 - PROGRAMA SOLVENT

Como ya se anticipó en el apartado 1, este programa fue creado durante la fase IV de los trabajos llevados a cabo durante los experimentos del programa MTFVTP, *Memorial Túnel Fire Ventilation Test Program*. Se trató de una serie de ensayos a escala real realizados para conseguir datos que permitieran conocer y diseñar los sistemas de ventilación y crear un código que calculase las principales magnitudes del problema. Las tres primeras fases del MTFVTP comprendían el desarrollo del plan de actuación del programa, el diseño y construcción de los equipos necesarios, la realización de los experimentos y la evaluación los resultados. La Fase IV se centró en el desarrollo y validación de un código CFD específico para aplicaciones en túneles. Como base del programa se eligió uno previo de propósito general, el **COMPACT-3D**, el cual emplea el método de volúmenes finitos. Dicho programa fue modificado con submodelos conducentes a incluir de forma sencilla los ventiladores y conductos de ventilación de aire. El **SOLVENT** resuelve problemas transitorios y estacionarios con ventilación longitudinal, transversal o semitrasversal. Da la opción de suponer la densidad constante, de esta forma se desacoplan ecuaciones como la de la energía, para que el sistema de ecuaciones sea más rápido de resolver.

No se simula el proceso de combustión. El fuego se representa mediante una fuente volumétrica de calor y de humo. El ritmo de calor liberado se obtiene del ritmo de quemado del combustible, del su calor de combustión y de la eficiencia de la misma. El usuario tiene la posibilidad de especificar que fracción de calor de la combustión se pierde por radiación o usar un modelo de radiación de seis flujos para un cálculo detallado de la radiación térmica entre los medios envueltos en el proceso. La concentración de humos se modela mediante una ecuación de conservación separada que contiene un término fuente en la zona del fuego donde la combustión tiene lugar. El ritmo de producción de humos se calcula a partir del ritmo de

consumo del combustible y de la relación estequiométrica, basada en asumir combustión completa.

Los ventiladores son modelizados como equipos que producen de forma constante un flujo de aire, representado por una fuente y un sumidero de masa y cantidad de movimiento dentro del campo fluido en la zona adyacente a la descarga y entrada respectivamente. En la ventilación transversal se emplea una red unidimensional que simula las entradas y salidas de los conductos al modelo CFD tridimensional que representa al túnel.

Las condiciones de contorno que se pueden imponer son:

- Pared.
- Flujo de entrada.
- Flujo de salida.
- Presión.
- Simetría.

El SOLVENT, en principio, únicamente permite trabajar con túneles de sección rectangular. Para poder representar secciones abovedadas, como es la del caso del túnel usado para contrastar la presente tesis, se debe insertar un bloque macizo en el techo y crear una “obstrucción negativa” o vaciado de dicho bloque sólido. De esta forma se consigue un espacio hueco que hace las veces de sección abovedada.

Se ha empleado una malla similar a las usadas durante la fase de validación de los ensayos en el Memorial Túnel. Básicamente es una malla uniforme refinada en la zona del foco del incendio. En la figura 5.49 se presenta una visión de la malla utilizada.

5.5.3 - RESULTADOS NUMÉRICOS

Fundamentalmente se trata de hacer comparaciones con el modelo simplificado propuesto y con los resultados experimentales.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

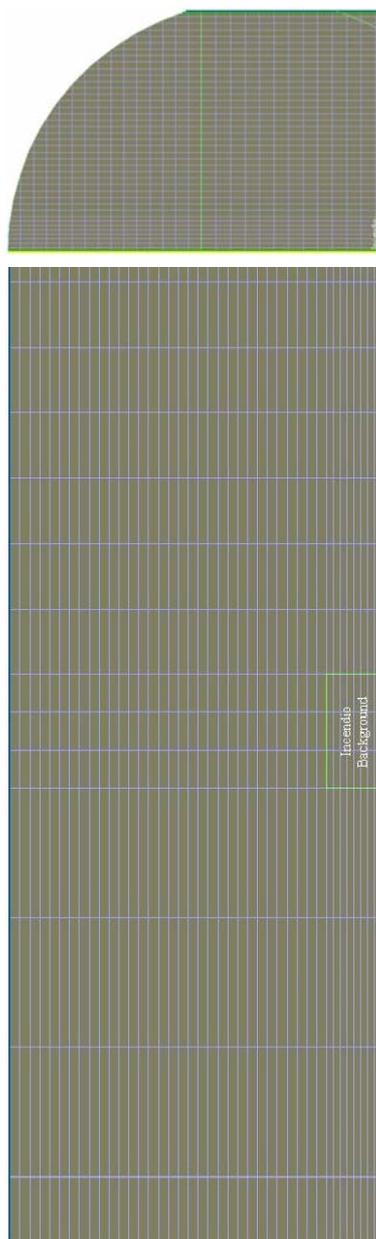


Figura 5.49: Malla utilizada con el SOLVENT.

5.5.3.1 - PROGRAMA FLUENT

Se modeló con este programa el incendio de 10 MW. Las restricciones que hay que imponer a los cálculos computacionales hacen que no sea posible modelar el túnel completo. Por ello se ha elegido simular una sección de 200 m imponiendo condiciones de presión en los contornos de forma que se logren las velocidades de viento deseadas. La malla utilizada contiene 174000 celdas de la forma explicada y representada en el apartado 5.5.2.1. El ordenador empleado ha sido un HP k360 con 4 procesadores a 180 MHz y 780 MB de memoria RAM. El tiempo de ordenador necesario para conseguir los resultados fue del orden de semanas. El incendio se sitúa en el centro del tramo, por lo que las secciones que se encontrasen a más de 100 m del mismo no se pueden obtener. Además, las que estén muy cerca de dicha distancia se verán falseadas por tener una condición de salida impuesta en sus cercanías. La temperatura ambiente supuesta es de 288 K.

El modelo aproximado propuesto en esta tesis es fundamentalmente estacionario, pero, debido a que el caso transitorio del FLUENT se ha calculado como una sucesión de estados estacionarios, se muestran algunos casos intermedios con los que se podría comparar. En las figuras desde la 5.50 hasta la 5.75 se muestran 7 representaciones para cada una de las 4 velocidades seleccionadas, excepto para la última de ellas que sólo tiene 5:

- De la 5.50 hasta la 5.56 se usa velocidad nula, caso más desfavorable.
- De la 5.57 a la 5.63 se usa una velocidad de 1'5 m/s.
- De la 5.64 a la 5.70 se representa una velocidad de 2 m/s.
- De la 5.71 a la 5.75 son para el caso de una velocidad de 2'5 m/s.

Se ha elegido representar como velocidades estas tres últimas velocidades no nulas ya que son las comprendidas en el rango de magnitud de las medidas en los experimentos de dicho túnel. Dentro de las 7 figuras dedicadas a cada velocidad, aparece una primera con una vista longitudinal del túnel modelado, mientras que las 6 siguientes corresponden, en orden, a cada una de las 6 secciones donde existía algún tipo de sensor: secciones 1, 2, 3, 0, 4 y 5, situadas a -50, -10, 0, +10, +50 y +100 metros del foco respectivamente. Para la velocidad de 2'5 m/s, no se representan las secciones 1 y 2 ya que en el rango de colores elegido para comparar todas estas figuras, no se aprecia calentamiento. Las zonas blancas corresponden a puntos donde la temperatura supera el límite representado de 450 K.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

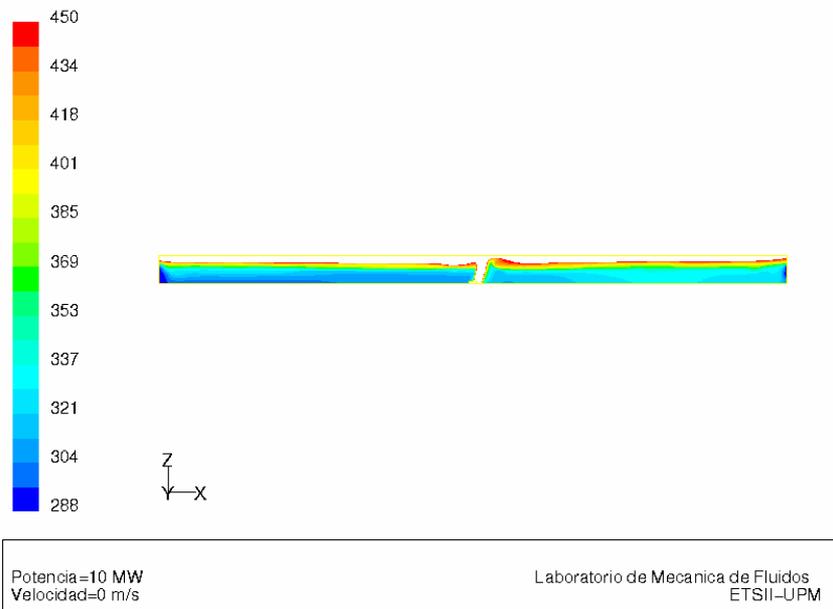


Figura 5.50: FLUENT. Velocidad: 0 m/s. Temperaturas longitudinales.

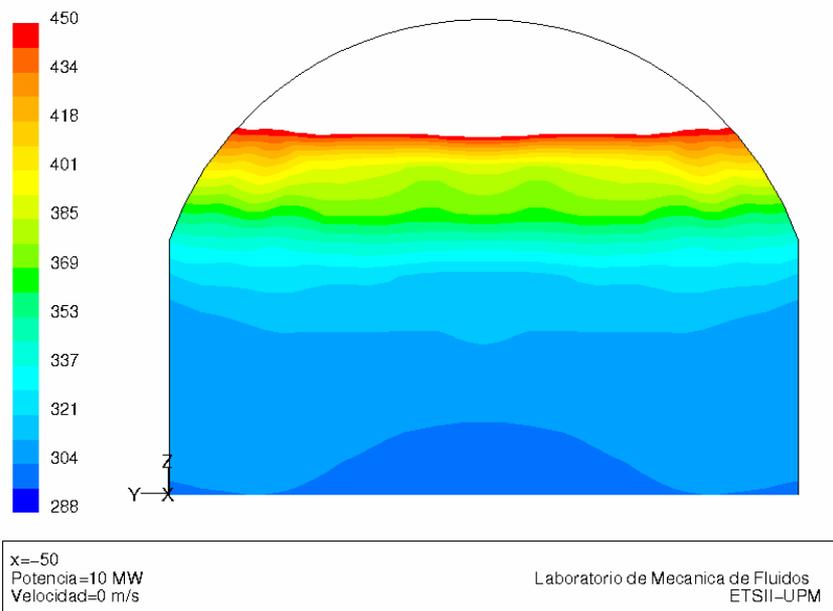


Figura 5.51: FLUENT. Velocidad: 0 m/s. Sección 1. Temperaturas.

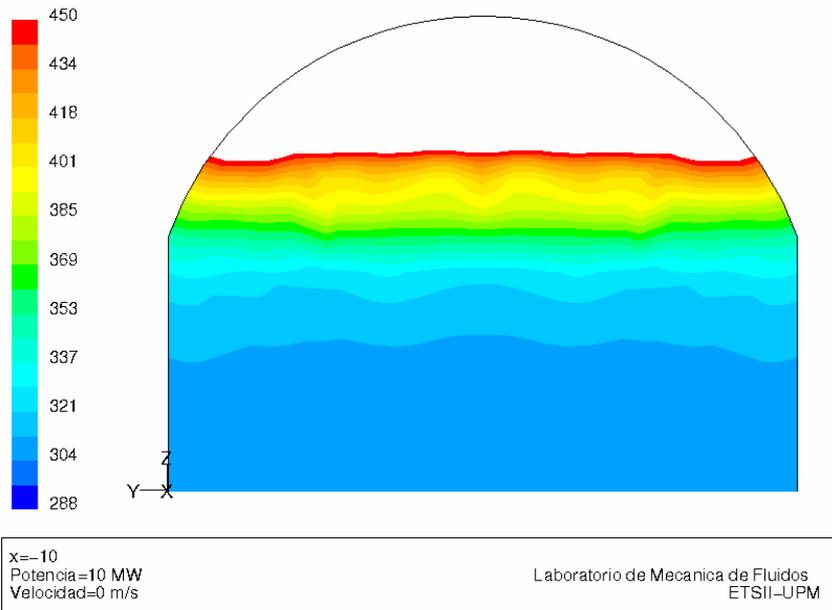


Figura 5.52: FLUENT. Velocidad: 0 m/s. Sección 2. Temperaturas.

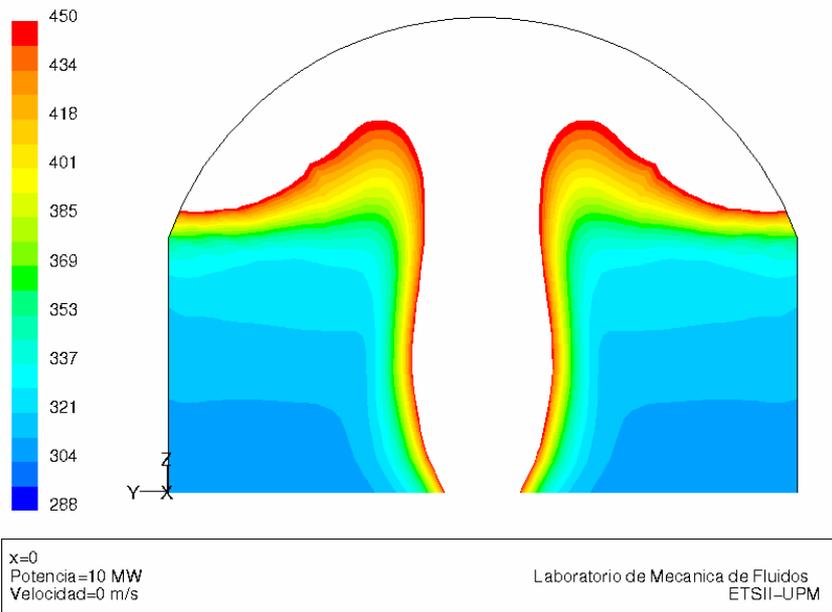
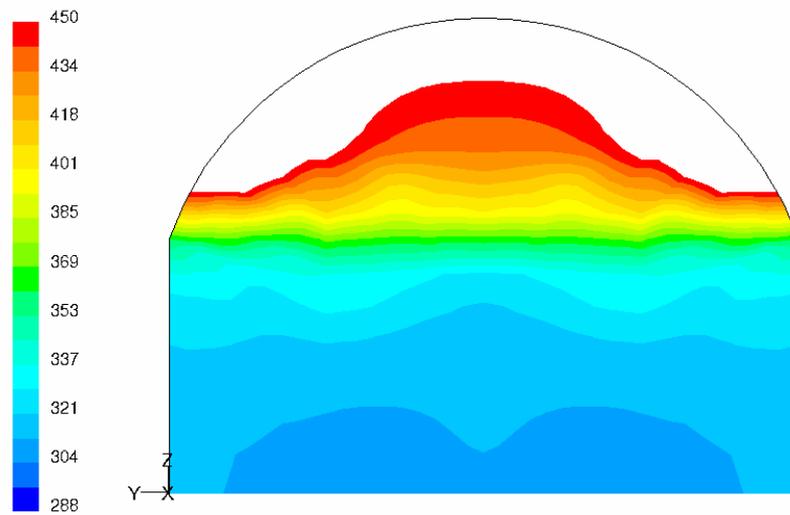


Figura 5.53: FLUENT. Velocidad: 0 m/s. Sección 3. Temperaturas.

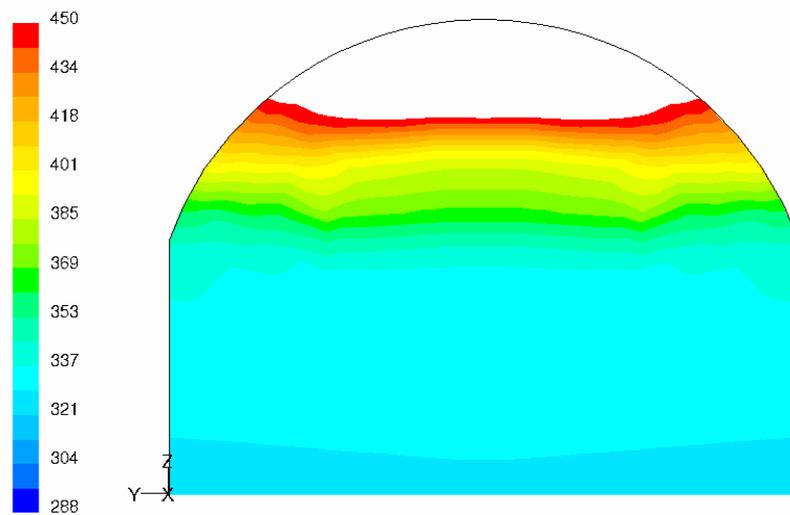
**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



x=+10
Potencia=10 MW
Velocidad=0 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.54: FLUENT. Velocidad: 0 m/s. Sección 0. Temperaturas.



x=+50
Potencia=10 MW
Velocidad=0 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.55: FLUENT. Velocidad: 0 m/s. Sección 4. Temperaturas.

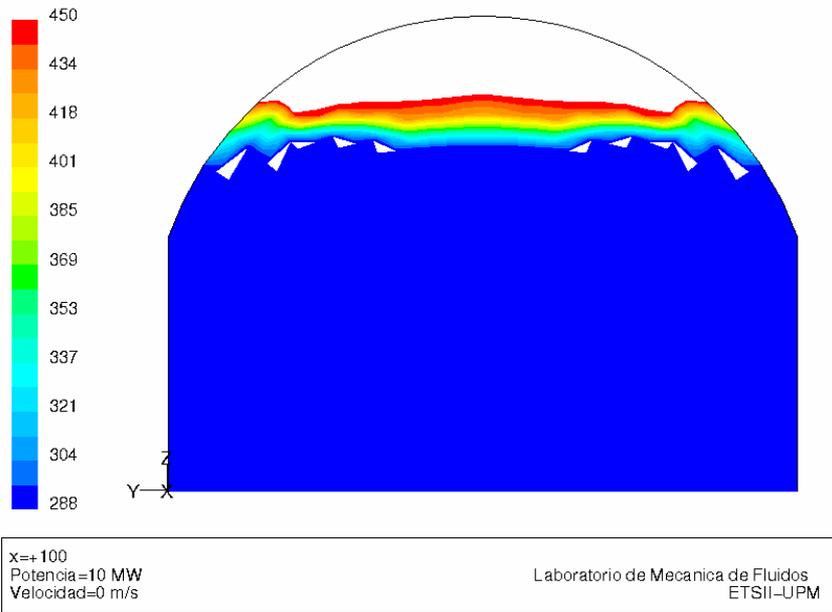


Figura 5.56: FLUENT. Velocidad: 0 m/s. Sección 5. Temperaturas.

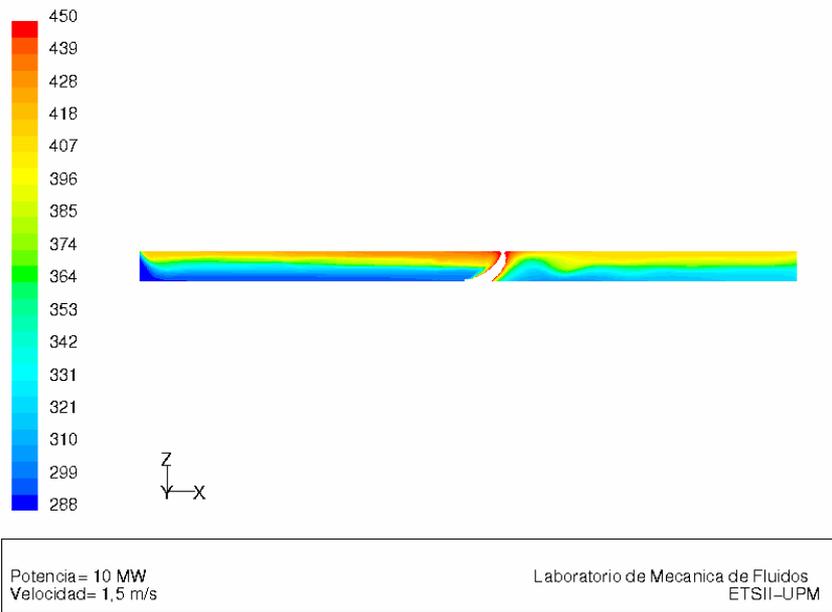
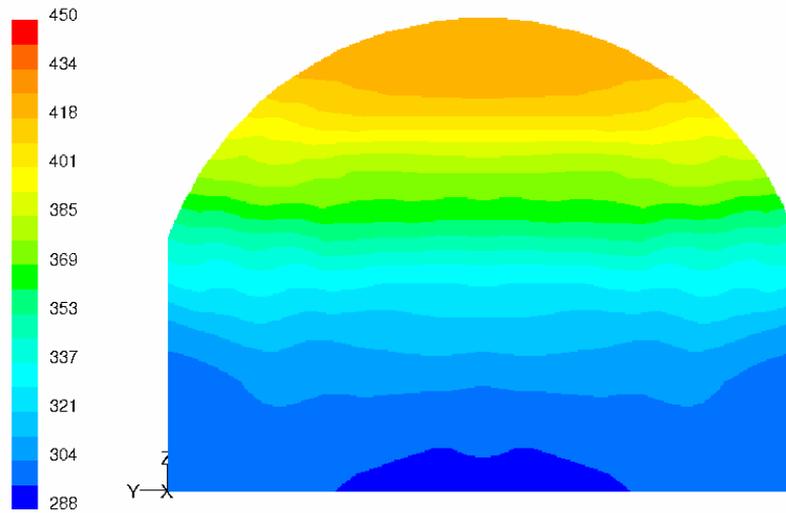


Figura 5.57: FLUENT. Velocidad: 1'5 m/s. Temperaturas longitudinales.

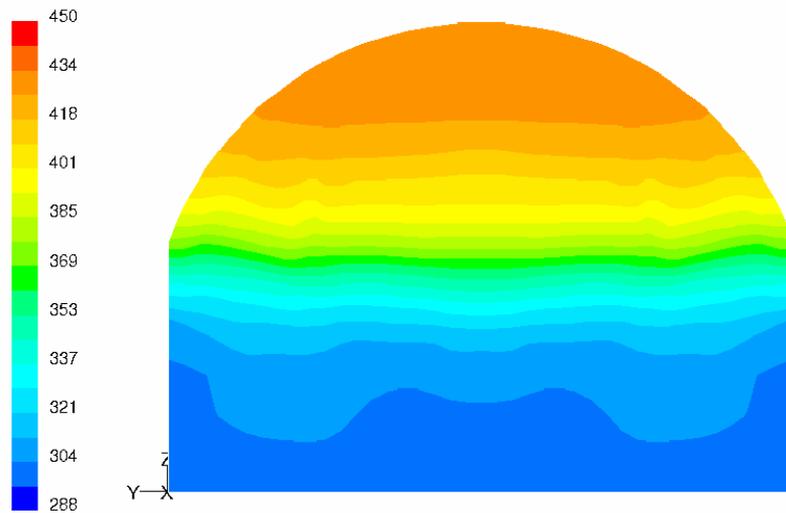
**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



x=-50
Potencia=10 MW
Velocidad=1,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

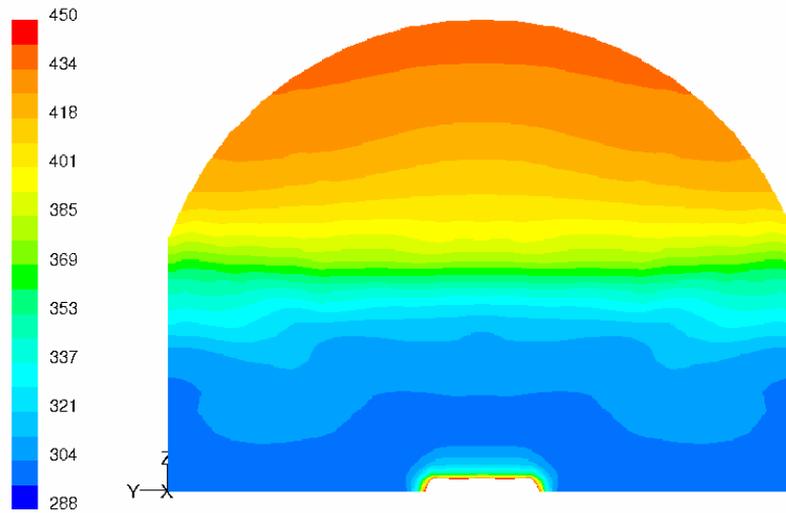
Figura 5.58: FLUENT. Velocidad: 1'5 m/s. Sección 1. Temperaturas.



x=-10
Potencia=10 MW
Velocidad=1,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

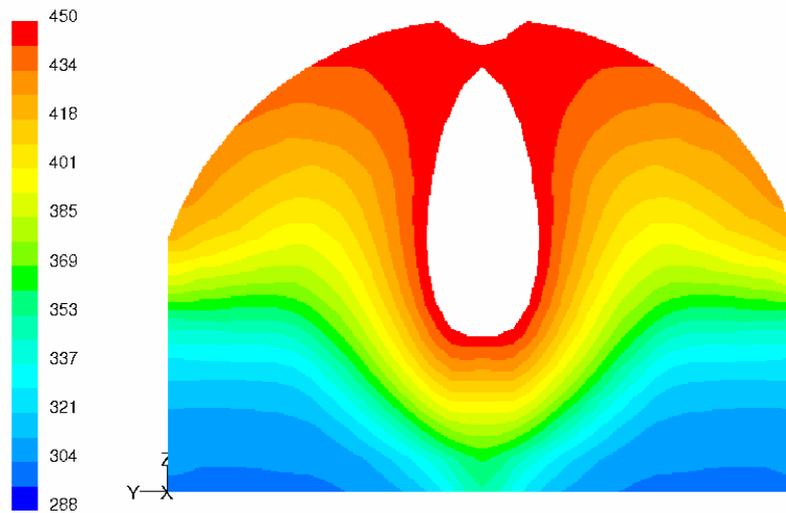
Figura 5.59: FLUENT. Velocidad: 1'5 m/s. Sección 2. Temperaturas.



x=0
Potencia=10 MW
Velocidad=1,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.60: FLUENT. Velocidad: 1'5 m/s. Sección 3. Temperaturas.

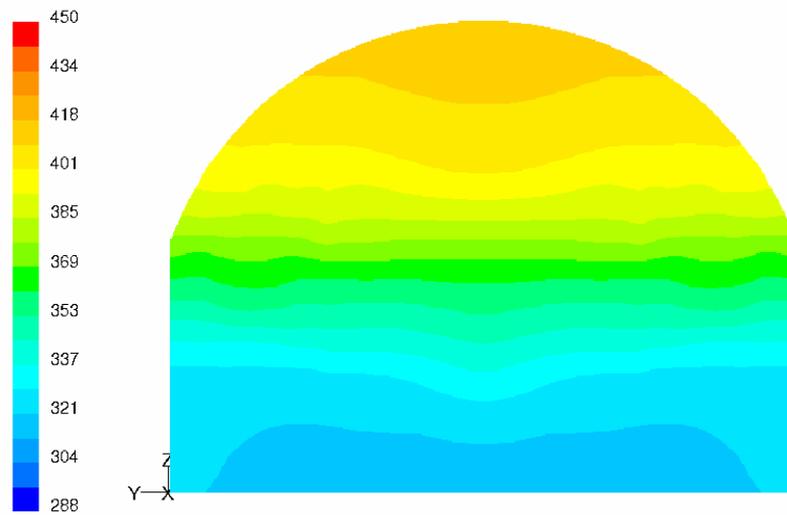


x=+10
Potencia=10 MW
Velocidad=1,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.61: FLUENT. Velocidad: 1'5 m/s. Sección 0. Temperaturas.

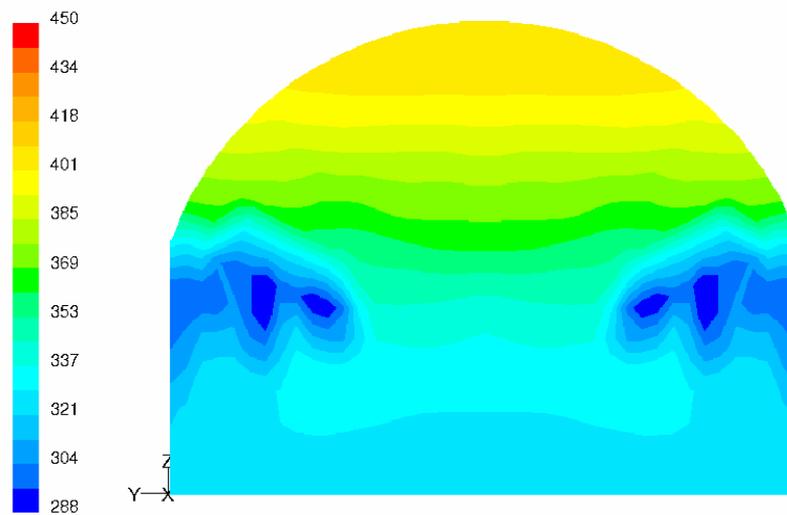
**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



x=+50
Potencia=10 MW
Velocidad=1,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

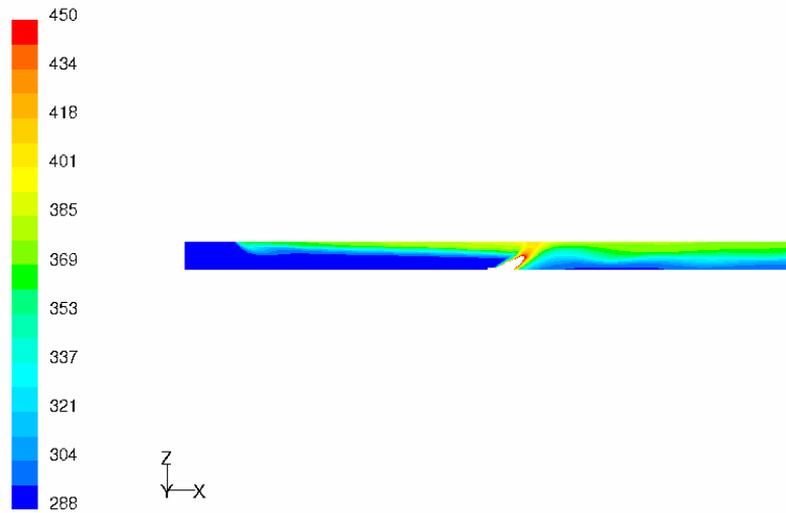
Figura 5.62: FLUENT. Velocidad: 1'5 m/s. Sección 4. Temperaturas.



x=+100
Potencia=10 MW
Velocidad=1,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

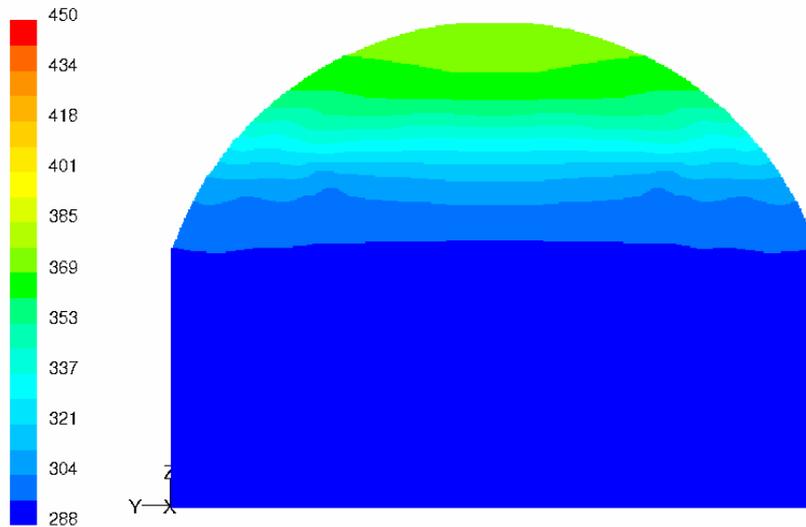
Figura 5.63: FLUENT. Velocidad: 1'5 m/s. Sección 5. Temperaturas.



Potencia= 10 MW
Velocidad=2 m/s

Laboratorio de Mecanica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.64: FLUENT. Velocidad: 2 m/s. Temperaturas longitudinales.

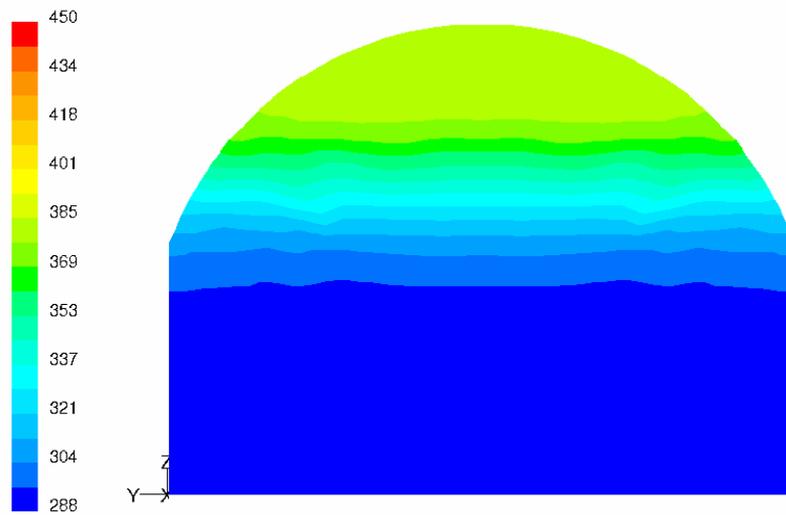


x=-50
Potencia= 10 MW
Velocidad=2 m/s

Laboratorio de Mecanica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.65: FLUENT. Velocidad: 2 m/s. Sección 1. Temperaturas.

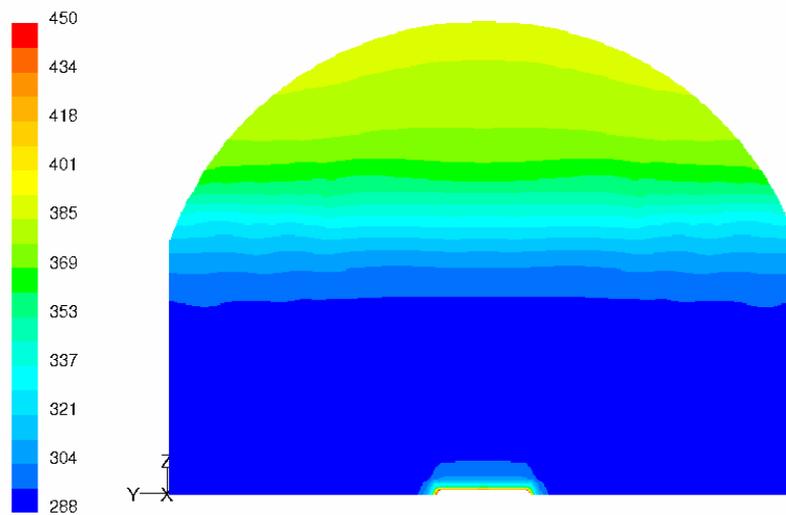
**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



x=-10
Potencia= 10 MW
Velocidad=2 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

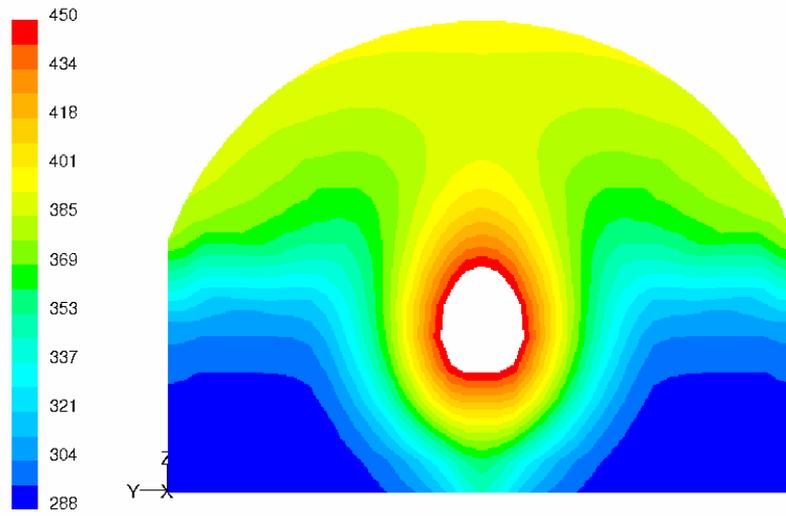
Figura 5.66: FLUENT. Velocidad: 2 m/s. Sección 2. Temperaturas.



x=0
Potencia= 10 MW
Velocidad=2 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

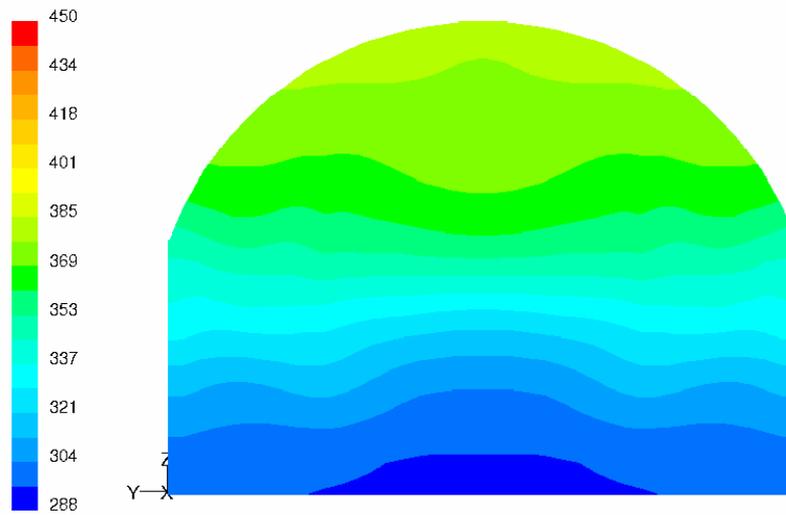
Figura 5.67: FLUENT. Velocidad: 2 m/s. Sección 3. Temperaturas.



x=+10
Potencia= 10 MW
Velocidad=2 m/s

Laboratorio de Mecanica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.68: FLUENT. Velocidad: 2 m/s. Sección 0. Temperaturas.

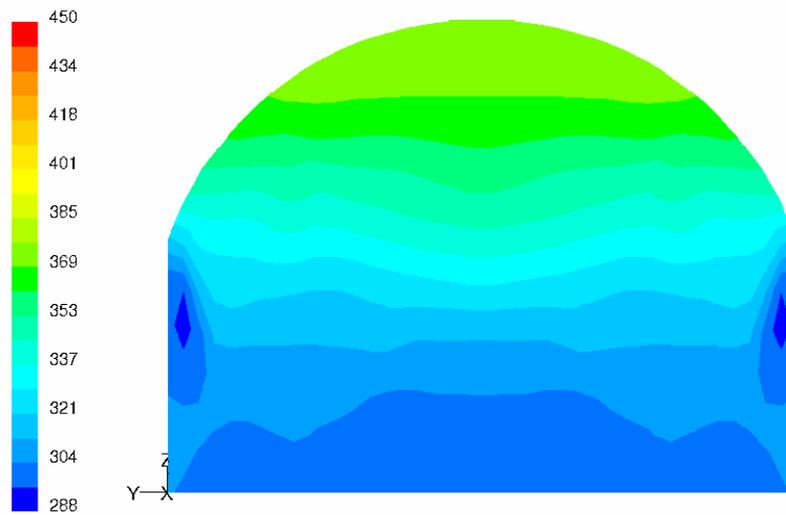


x=+50
Potencia= 10 MW
Velocidad=2 m/s

Laboratorio de Mecanica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.69: FLUENT. Velocidad: 2 m/s. Sección 4. Temperaturas.

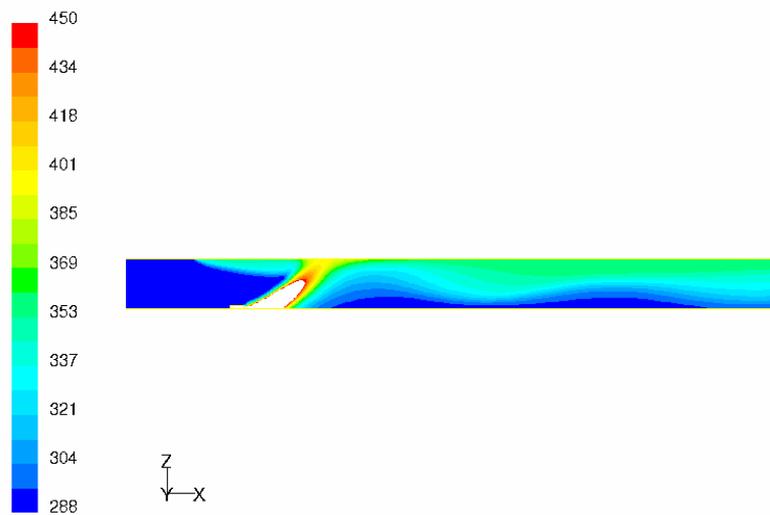
**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



x=+100
Potencia= 10 MW
Velocidad=2 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

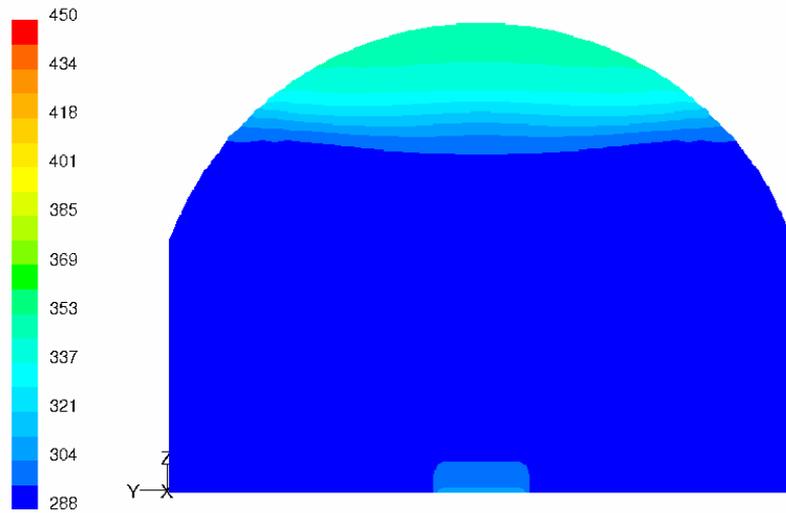
Figura 5.70: FLUENT. Velocidad: 2 m/s. Sección 5. Temperaturas.



Potencia= 10 MW
Velocidad= 2,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

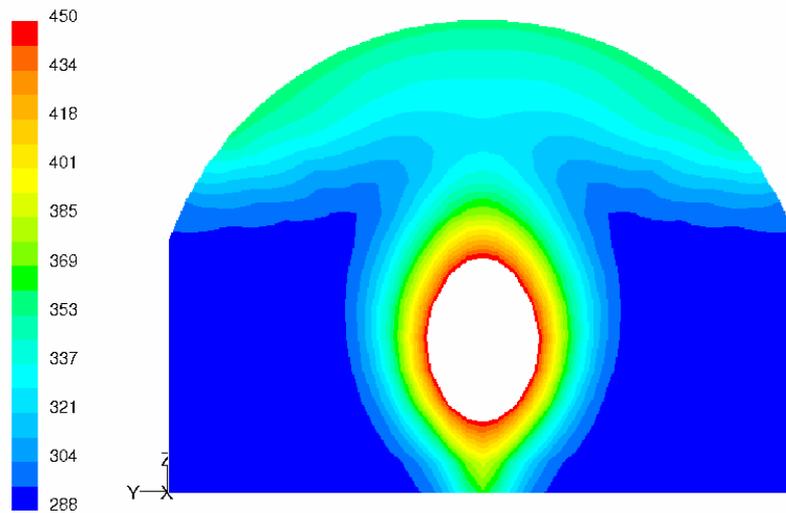
Figura 5.71: FLUENT. Velocidad: 2,5 m/s. Temperaturas longitudinales.



x=0
Potencia = 10 MW
Velocidad = 2,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.72: FLUENT. Velocidad: 2'5 m/s. Sección 3. Temperaturas.

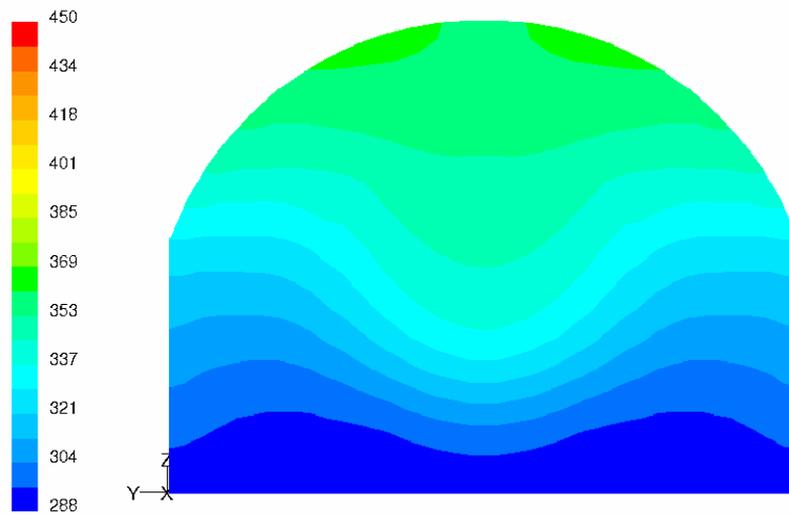


x=+10
Potencia = 10 MW
Velocidad = 2,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.73: FLUENT. Velocidad: 2'5 m/s. Sección 0. Temperaturas.

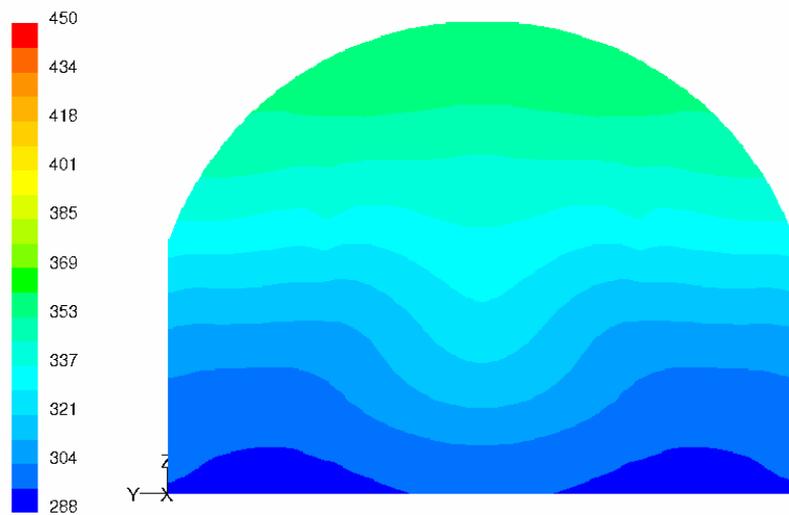
**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**



x=+50
Potencia= 10 MW
Velocidad= 2,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.74: FLUENT. Velocidad: 2'5 m/s. Sección 4. Temperaturas.



x=+100
Potencia= 10 MW
Velocidad= 2,5 m/s

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
ETSII-UPM

Figura 5.75: FLUENT. Velocidad: 2'5 m/s. Sección 5. Temperaturas.

5.5.3.2 - PROGRAMA PHOENICS

Para simular el ensayo de 5 MW se usó este programa. Al igual que con el FLUENT, se producen limitaciones de hardware para modelar el túnel completo. En este caso se ha simulado un tramo de 350 metros de longitudinal, situándose el incendio a 190 metros de la entrada, y aplicando condición de simetría en el eje del túnel para tener que simular sólo la mitad del mismo. La malla utilizada fue curvilínea, de la forma explicada y representada en el apartado 5.4.2.2, adaptada a la forma de la sección mediante $15 \times 18 \times 140$ (= 37800) celdas, ancho x alto x largo, para la mitad de túnel simulada. El ordenador es una estación de trabajo HP J5000 con dos procesadores. El tiempo de cálculo para el problema ha sido del orden de semanas.

Se trata de un estudio no estacionario en el que la ventilación está inicialmente parada con una temperatura ambiente de 288 K. Los ventiladores se ponen en marcha 1 minuto después del comienzo del incendio. Para reproducir la ventilación se han situado dos ventiladores, uno en cada media sección, a 90 metros del inicio del túnel. En ellos, se impone el empuje necesario para lograr la ventilación deseada, 2'8 m/s, la supuesta en los informes de ventilación previos. La evolución de la velocidad media y máxima del aire conseguida por este procedimiento aparece en la tabla 5.20 y en la figura 5.76. Tanto en la tabla como en la figura, se aprecia como a los 10 minutos nos encontramos en estado estacionario. Se comprueba como la velocidad final alcanzada, 2'44 m/s, es inferior a la proyectada, posiblemente por efecto de bloqueo a causa del incendio.

Tiempo (s)	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad media (m/s)
< 60	0.00	0.00
120	1.18	1.11
180	1.84	1.65
240	2.09	1.84
300	2.36	2.09
360	2.55	2.25
420	2.66	2.34
480	2.72	2.39
540	2.75	2.42
600	2.77	2.44

Tabla 5.20: Velocidad de ventilación durante la simulación del incendio de 5MW.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

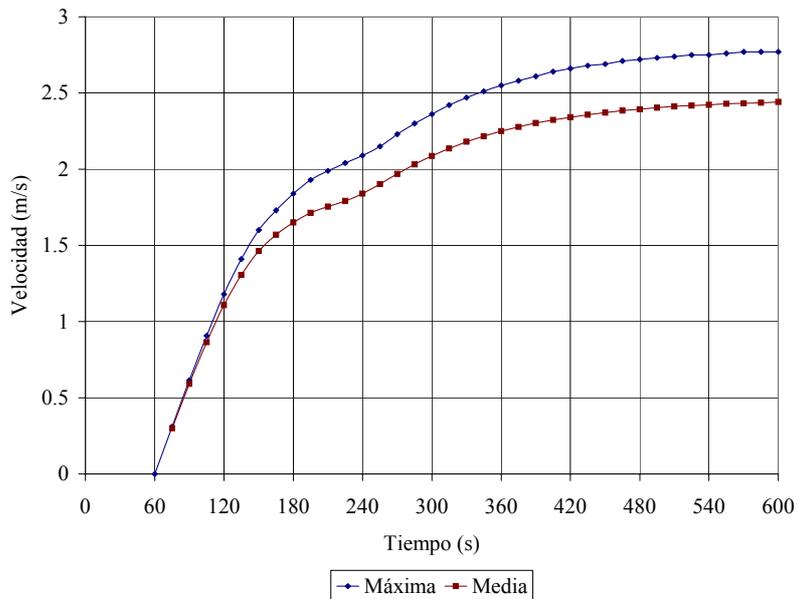


Figura 5.76: Velocidad de ventilación durante la simulación del incendio de 5MW.

En las figuras 5.77, 5.78 y 5.79 se muestran cortes longitudinales de temperatura; entre el instante inicial y los 4 minutos, entre los 4 y los 8 minutos y de los 8 a los 10 minutos respectivamente. En las dos primeras figuras se muestran resultados cada 30 segundos, mientras que en la tercera, ya acercándose al caso estacionario, son cada 15 segundos. En las figuras 5.80, 5.81 y 5.82 se muestran también cortes longitudinales; entre 0 y 4 minutos en la figura 5.80, entre los 4 y 8 minutos en la figura 5.81 y entre 8 y 10 en la figura 5.82. De nuevo, en las dos primeras las figuras son cada 30 segundos mientras que en la última son cada 15s. Las zonas blancas corresponden a puntos donde el valor supera el límite representado, 388 K o 3 m/s, según que la magnitud representada sea la temperatura o la velocidad. Los trazos negros que contienen las figuras indican la posición de las secciones de medida; comenzando desde la izquierda aparecen las de -50, -10, 0, +10, +50 y +100 m del foco.

En las figuras 5.79 y 5.82 se puede observar como las variaciones de temperatura y velocidad respectivamente son casi imperceptibles, con lo cuál se ha alcanzado el estado estacionario.

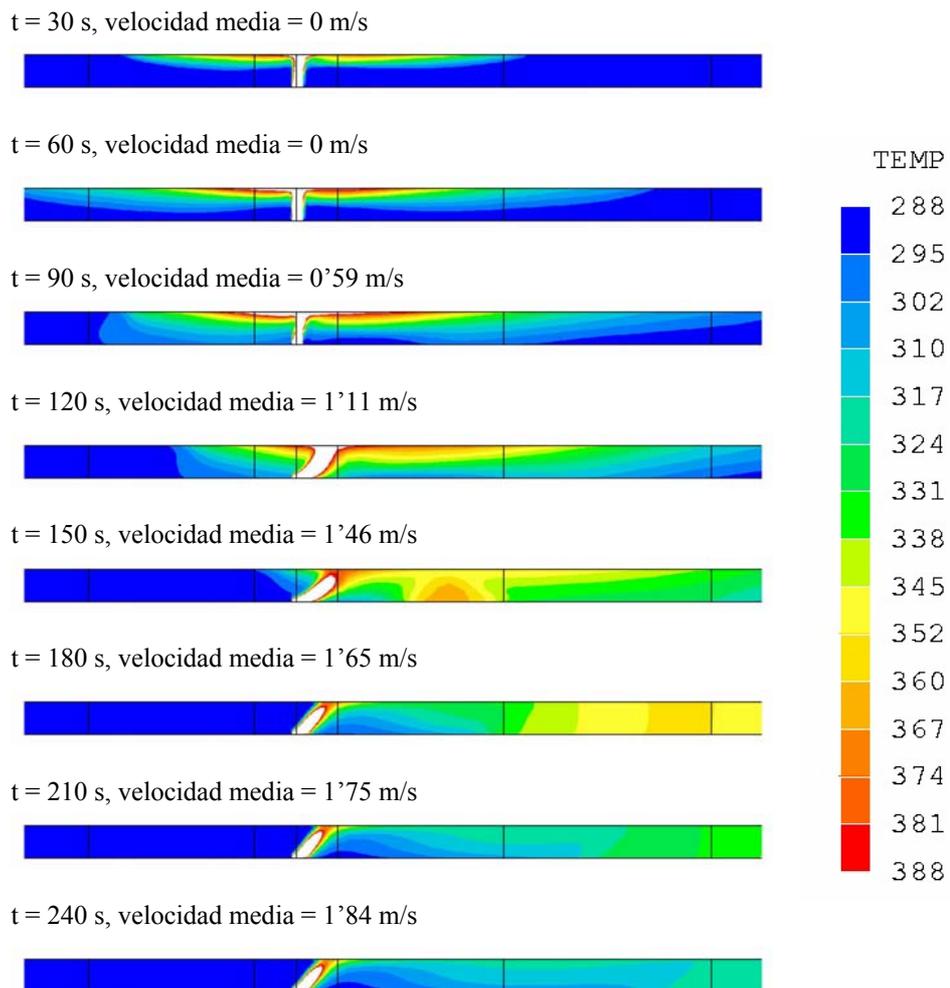


Figura 5.77: PHOENICS. Cortes longitudinales de temperatura.
Incendio de 5MW. Tiempo entre 30 y 240 s. Ventilación arranca a los 60 s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

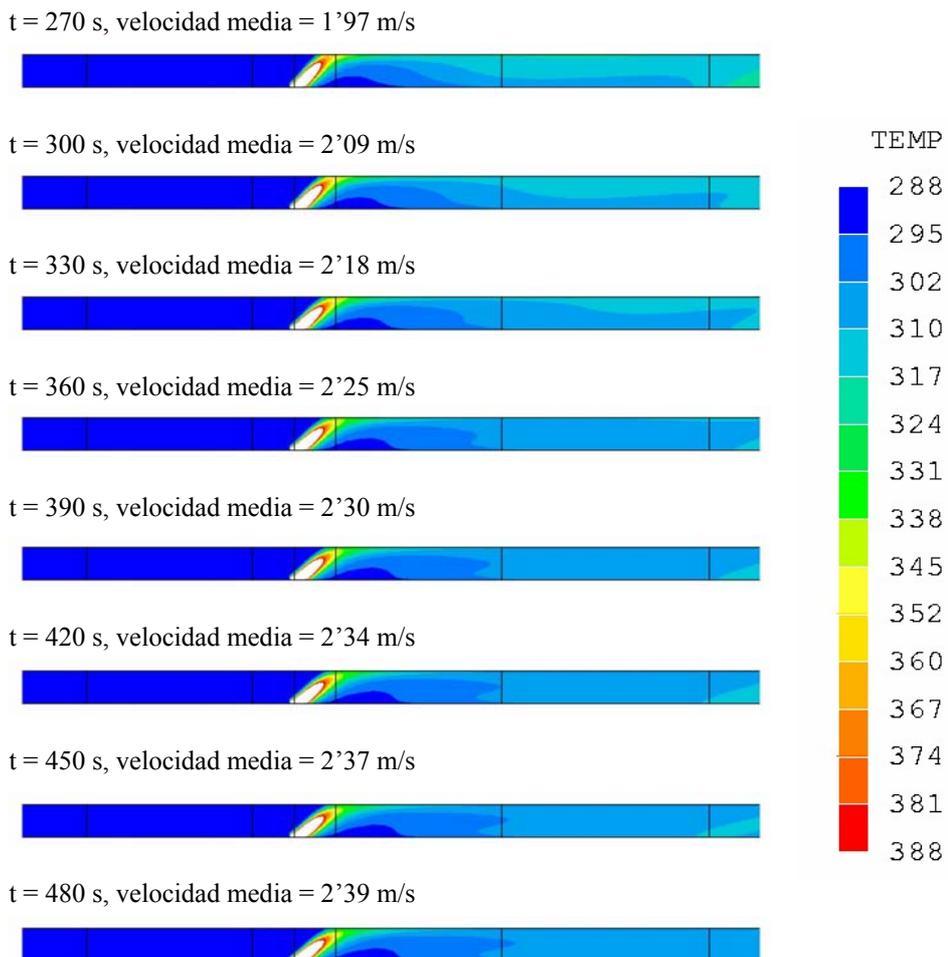


Figura 5.78: PHOENICS. Cortes longitudinales de temperatura.
Incendio de 5MW. Tiempo entre 270 y 480 s. Ventilación arranca a los 60 s.

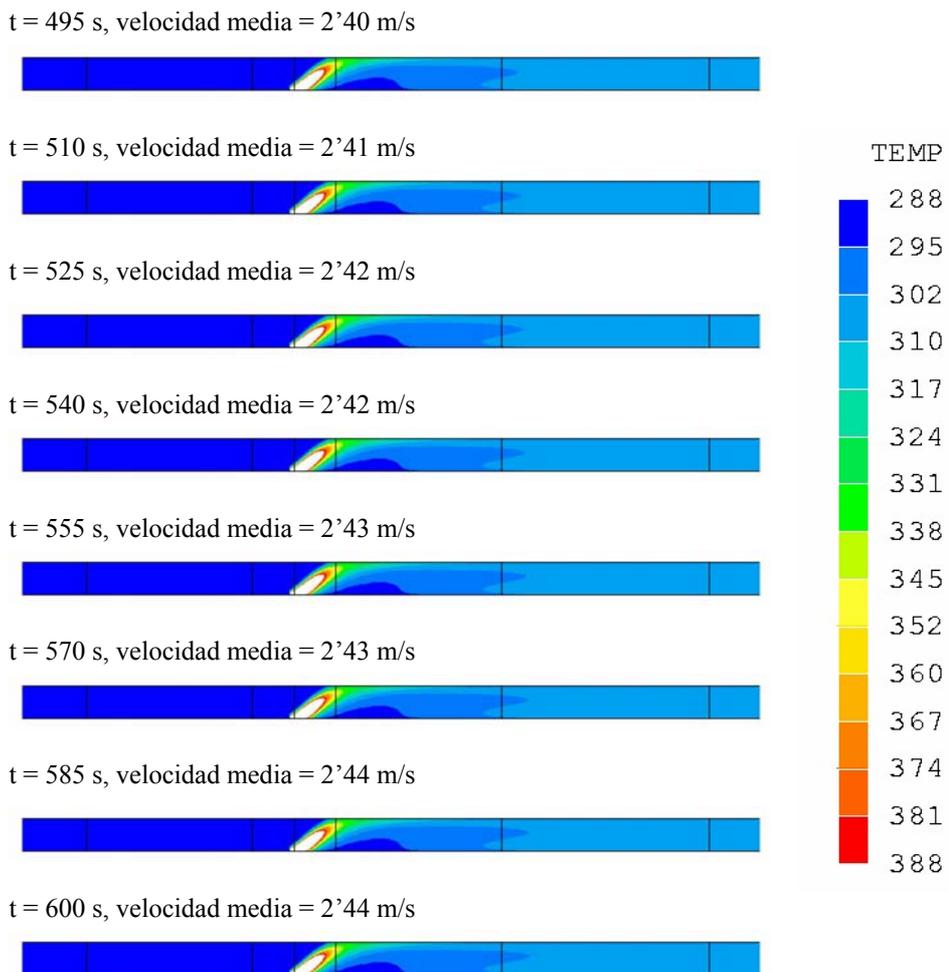


Figura 5.79: PHOENICS. Cortes longitudinales de temperatura.
Incendio de 5MW. Tiempo entre 495 y 600 s. Ventilación arranca a los 60 s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

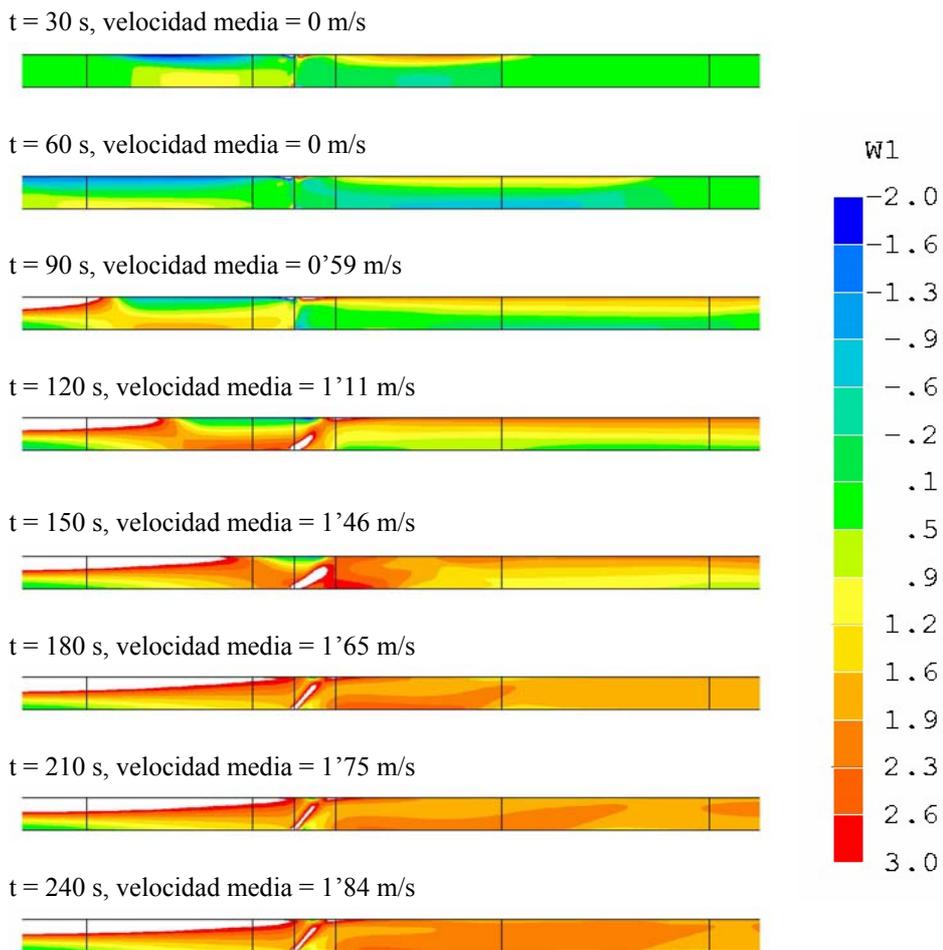


Figura 5.80: PHOENICS. Cortes longitudinales de velocidad.
Incendio de 5MW. Tiempo entre 30 y 240 s. Ventilación arranca a los 60 s.

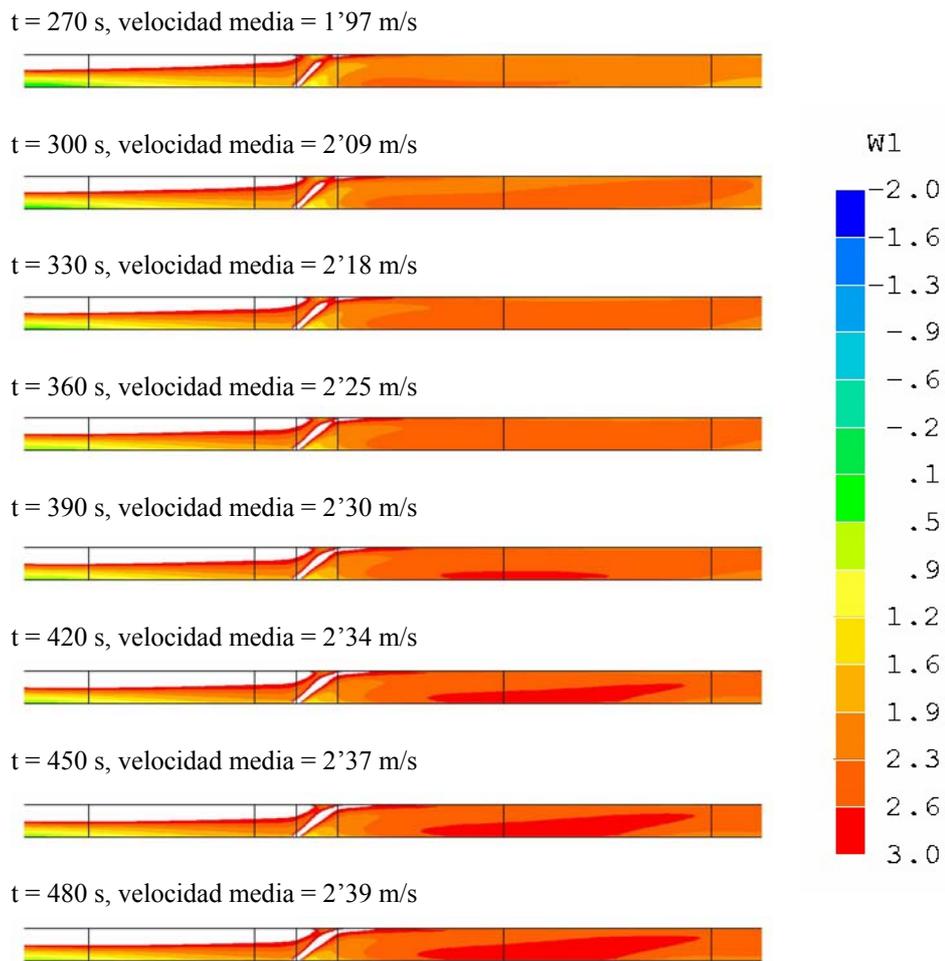


Figura 5.81: PHOENICS. Cortes longitudinales de velocidad.
 Incendio de 5MW. Tiempo entre 270 y 480 s. Ventilación arranca a los 60 s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

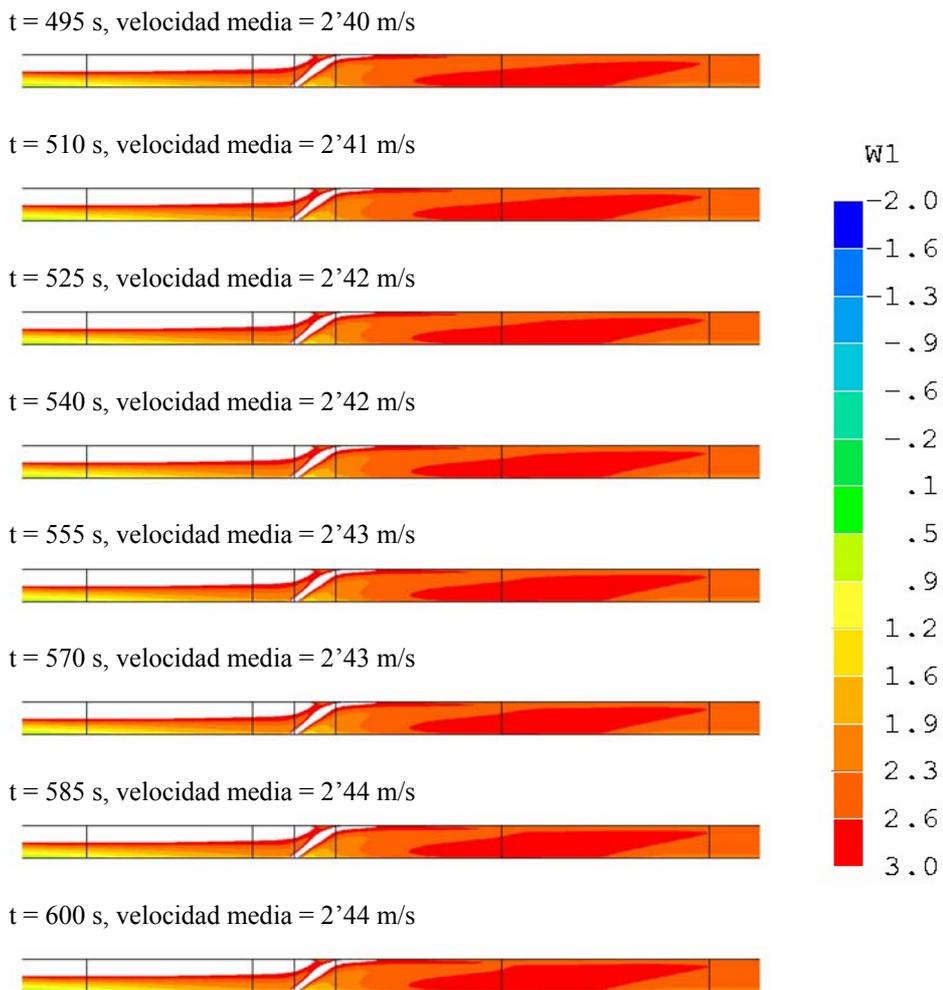


Figura 5.82: PHOENICS. Cortes longitudinales de velocidad.
Incendio de 5MW. Tiempo entre 495 y 600 s. Ventilación arranca a los 60 s.

De la figura 5.83 a la 107 se presentan, por cada minuto, cortes transversales en las 6 secciones con sensores: denominadas 1, 2, 3, 0, 4 y 5, situadas a -50, -10, 0, +10, +50 y +100 metros del foco respectivamente. Se ha optado por suprimir las figuras de aquellos casos en que la velocidad de aire impuesta evacuaba los humos de tal forma que con la gama de colores elegida no se apreciaba calentamiento. Cada figura contiene los siguientes casos:

- De la 5.83 a la 5.87, $t = 60$ s, no existe ventilación.
- De la 5.88 a la 5.93, $t = 120$ s, hay una velocidad media de 1'11 m/s.
- De la 5.94 a la 5.97, $t = 240$ s, existe una velocidad media de 1'84 m/s.
- De la 5.98 a la 5.100, $t = 360$ s, existe una velocidad media de 2'25 m/s.
- De la 5.101 a la 5.103, $t = 480$ s, hay una velocidad media de 2'39 m/s.
- De la 5.104 a la 5.106, $t = 600$ s, se alcanza una velocidad media de 2'44 m/s.

Las zonas blancas representan el eje de simetría y, o, zonas donde la temperatura supera el límite representado en la gama de colores, 388 K

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

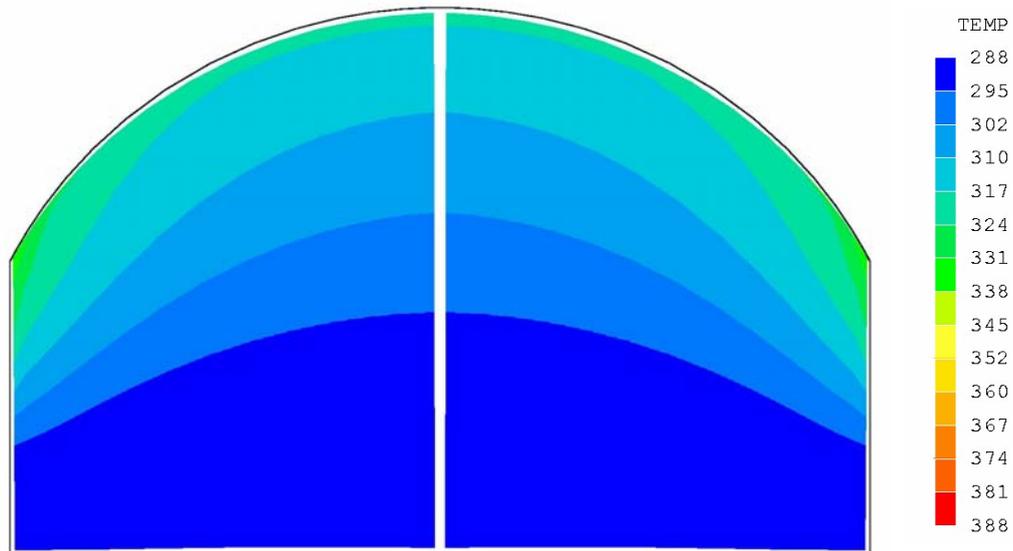


Figura 5.83: PHOENICS. Sección 1. Potencia: 5MW. Tiempo: 60 s. Velocidad: 0 m/s.

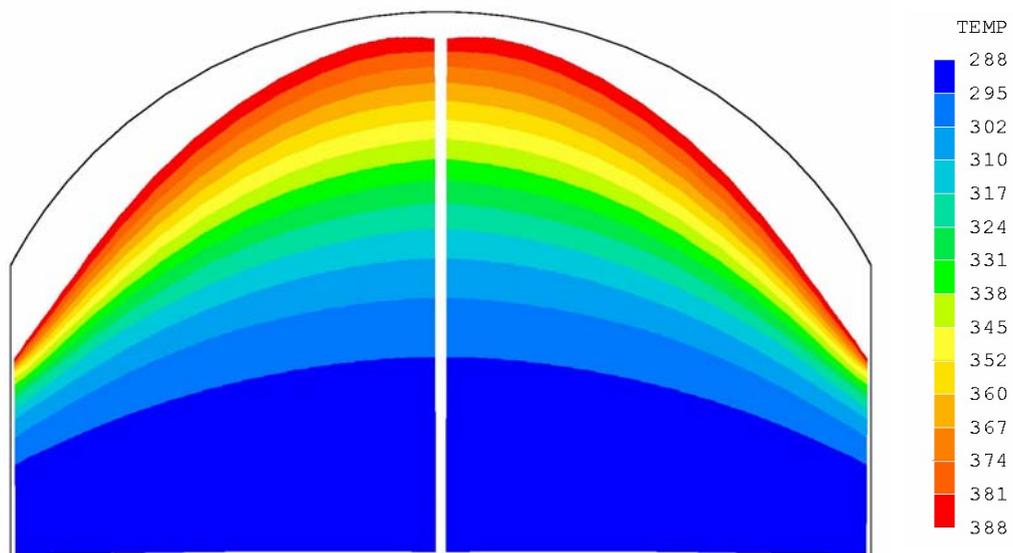


Figura 5.84: PHOENICS. Sección 2. Potencia: 5MW. Tiempo: 60 s. Velocidad: 0 m/s.

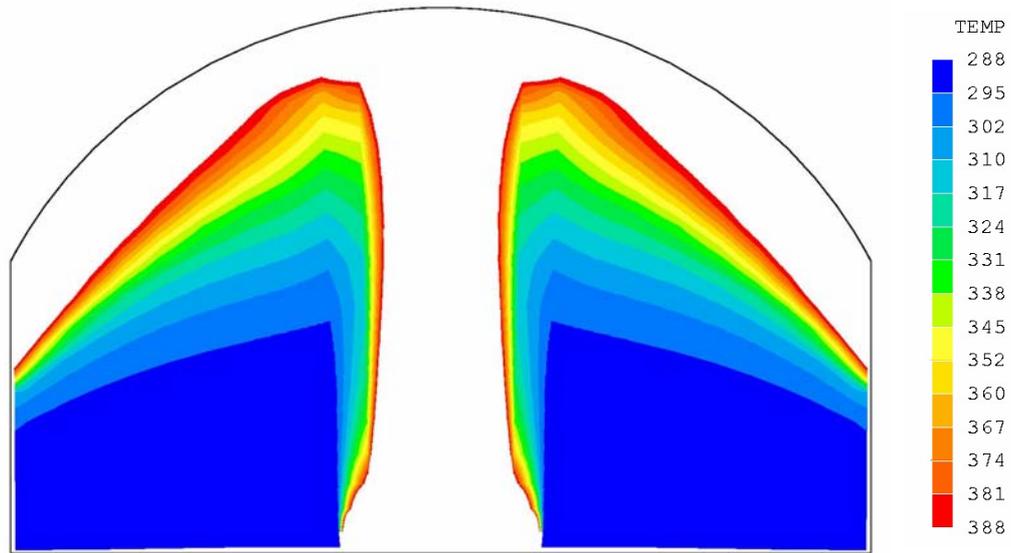


Figura 5.85: PHOENICS. Sección 3. Potencia: 5MW. Tiempo: 60 s. Velocidad: 0 m/s.

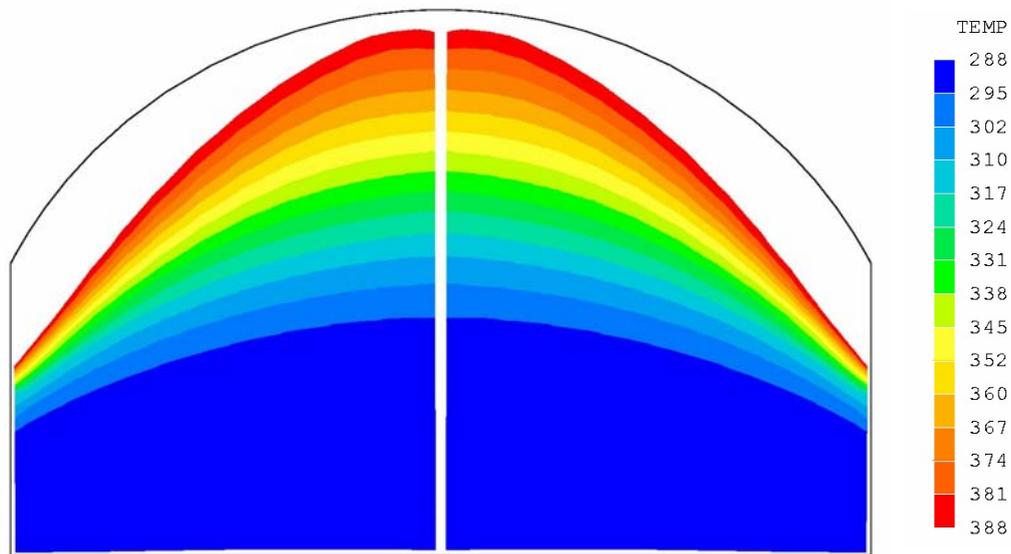


Figura 5.86: PHOENICS. Sección 0. Potencia: 5MW. Tiempo: 60 s. Velocidad: 0 m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

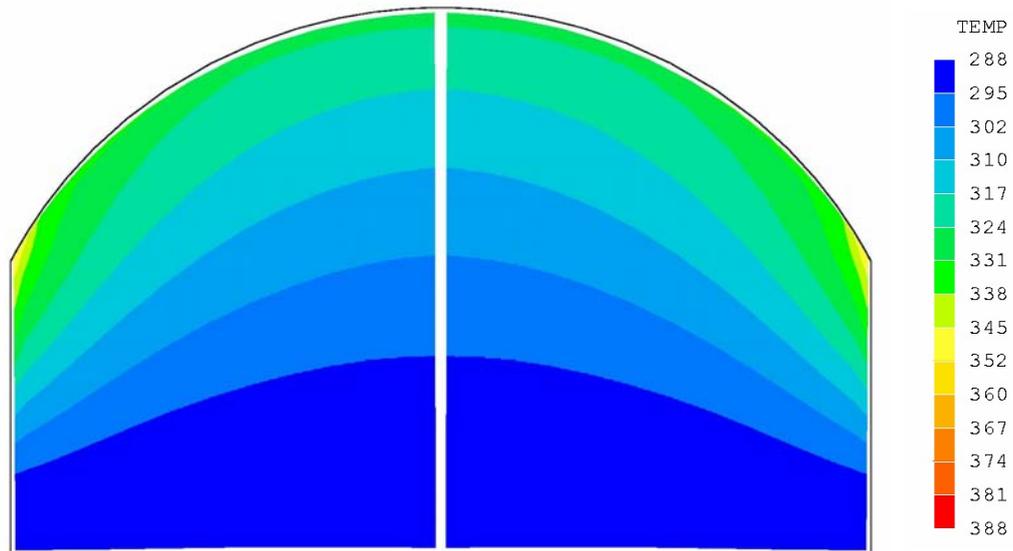


Figura 5.87: PHOENICS. Sección 4. Potencia: 5MW. Tiempo: 60 s. Velocidad: 0 m/s.

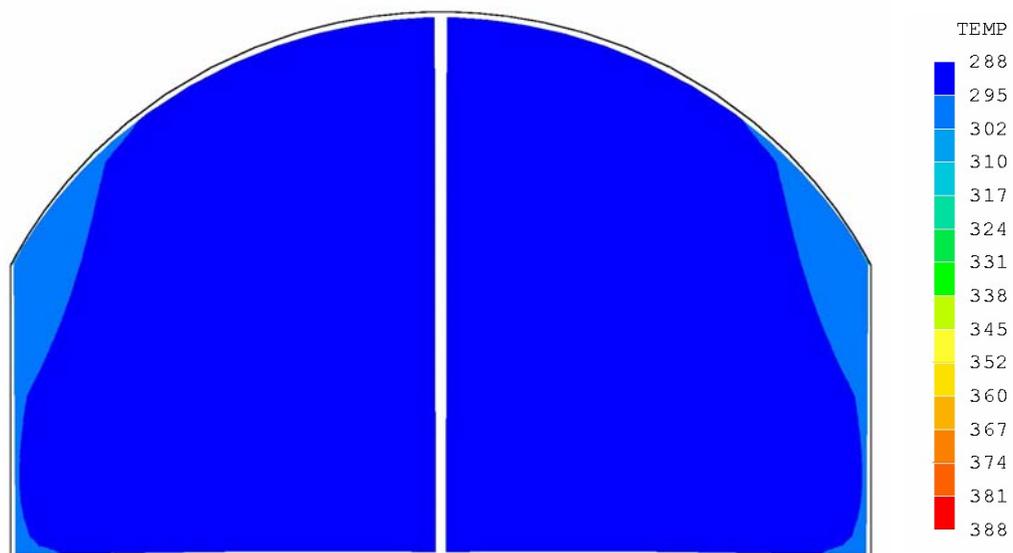


Figura 5.88: PHOENICS. Sección 1. Potencia: 5MW. Tiempo: 120 s. Velocidad: 1'11 m/s.

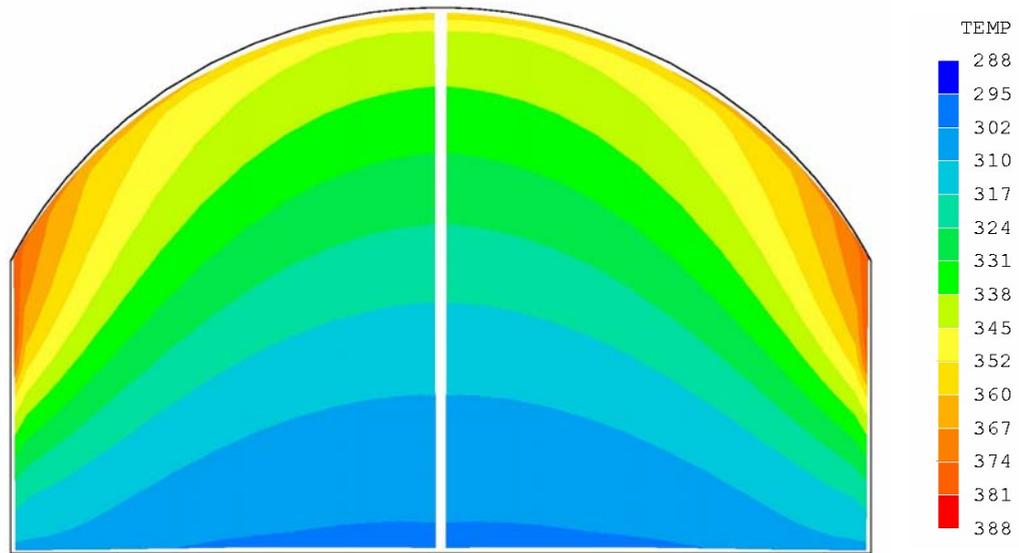


Figura 5.89: PHOENICS. Sección 2. Potencia: 5MW. Tiempo: 120 s. Velocidad: 1'11 m/s.

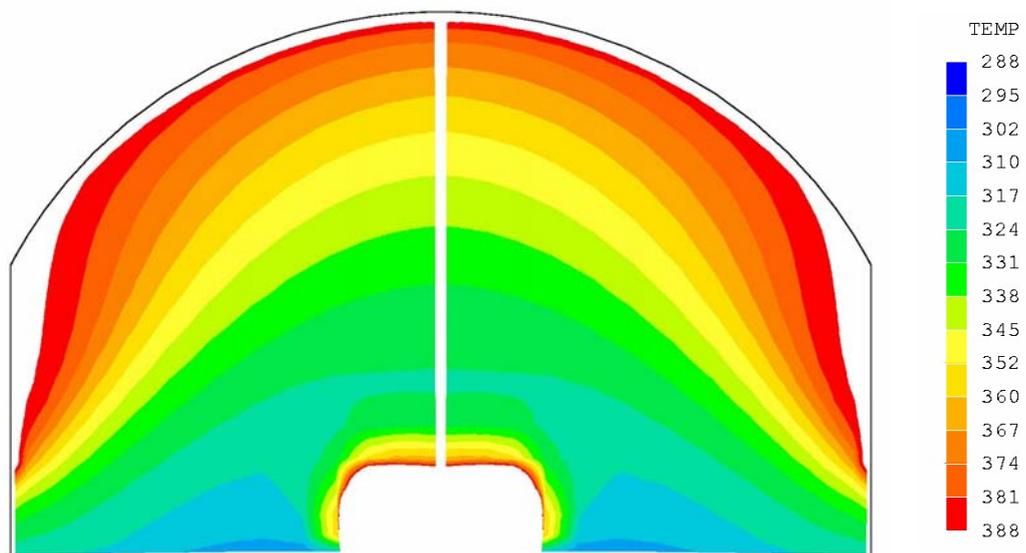


Figura 5.90: PHOENICS. Sección 3. Potencia: 5MW. Tiempo: 120 s. Velocidad: 1'11 m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

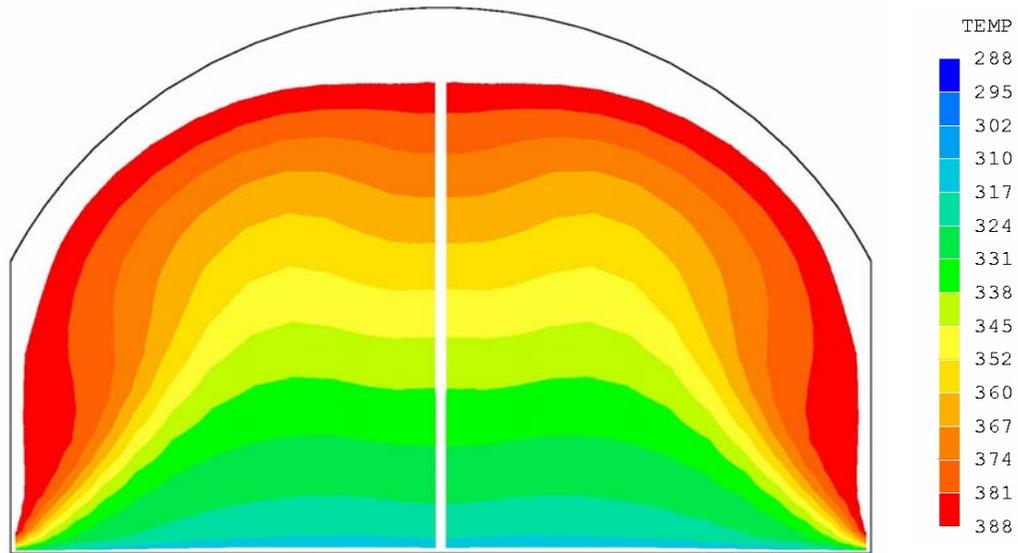


Figura 5.91: PHOENICS. Sección 0. Potencia: 5MW. Tiempo: 120 s. Velocidad: 1'11 m/s.

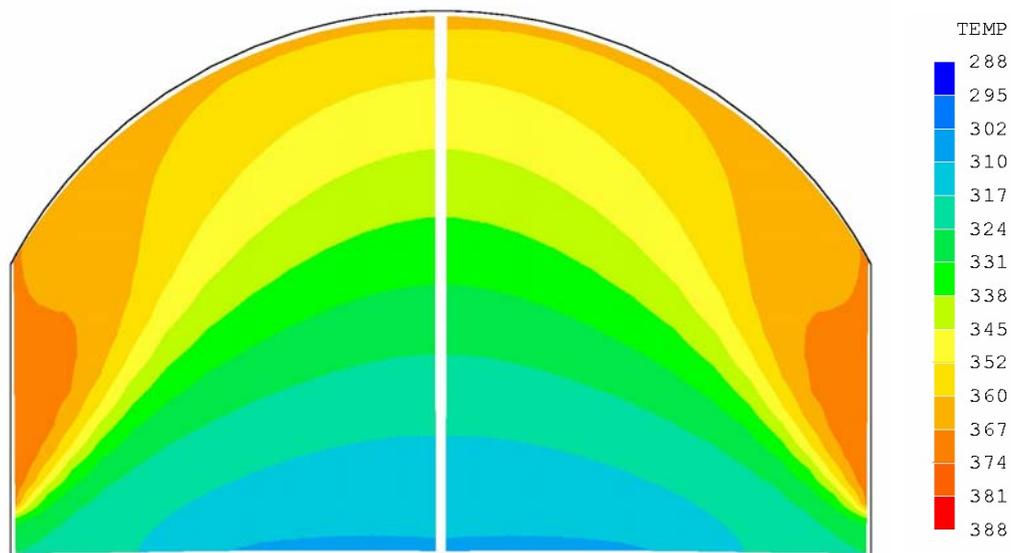


Figura 5.92: PHOENICS. Sección 4. Potencia: 5MW. Tiempo: 120 s. Velocidad: 1'11 m/s.

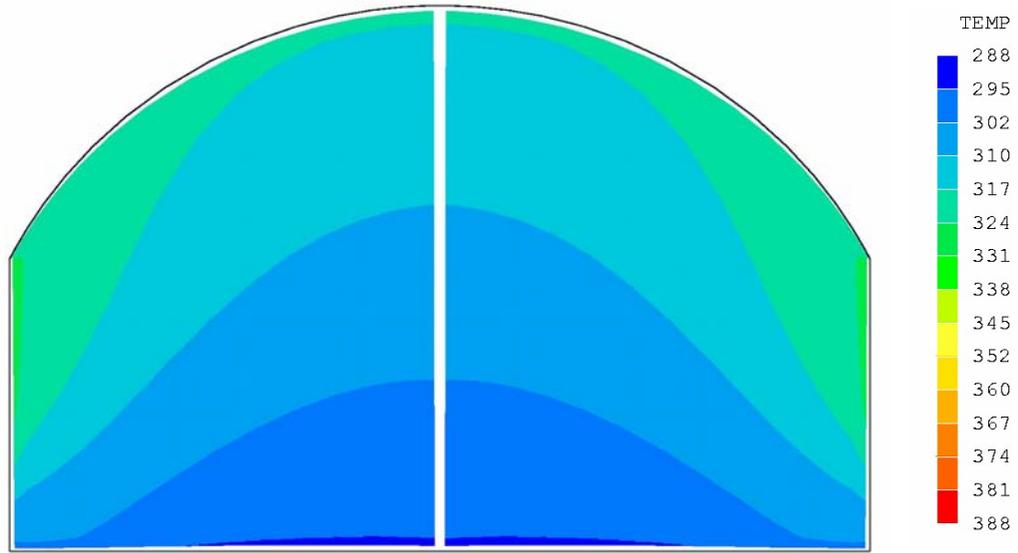


Figura 5.93: PHOENICS. Sección 5. Potencia: 5MW. Tiempo: 120 s. Velocidad: 1'11 m/s.

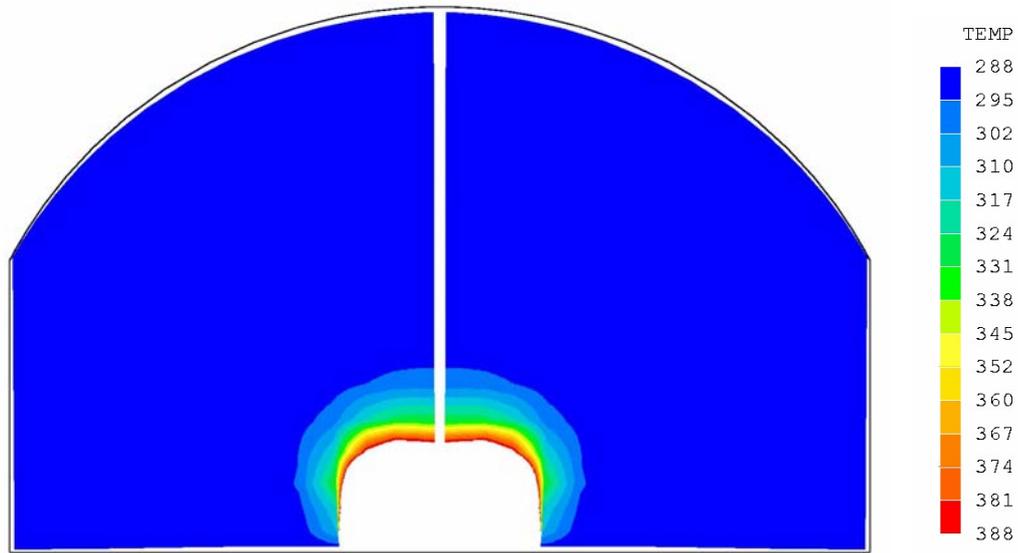


Figura 5.94: PHOENICS. Sección 3. Potencia: 5MW. Tiempo: 240 s. Velocidad: 1'84 m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

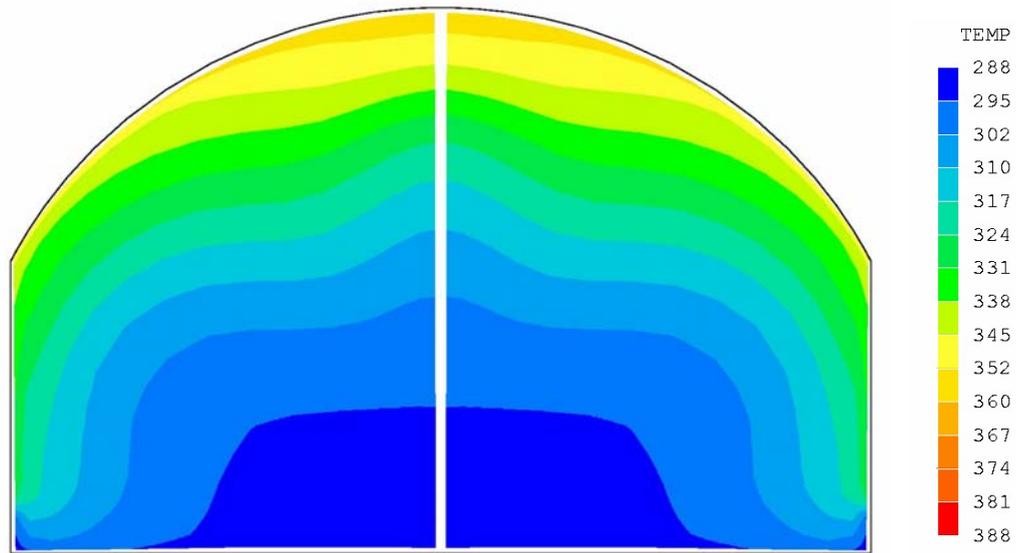


Figura 5.95: PHOENICS. Sección 0. Potencia: 5MW. Tiempo: 240 s. Velocidad: 1'84 m/s.

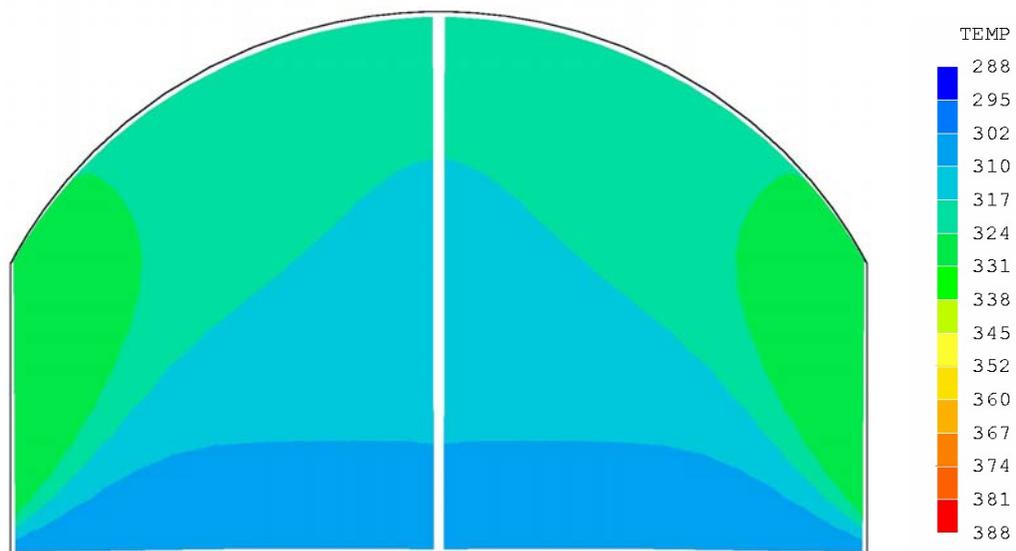


Figura 5.96: PHOENICS. Sección 4. Potencia: 5MW. Tiempo: 240 s. Velocidad: 1'84 m/s.

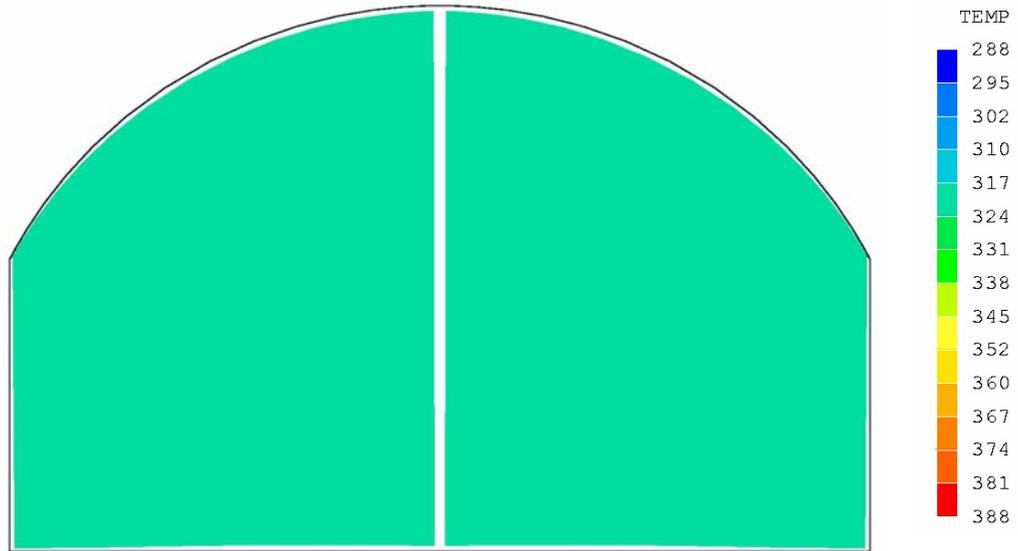


Figura 5.97: PHOENICS. Sección 5. Potencia: 5MW. Tiempo: 240 s. Velocidad: 1'84 m/s.

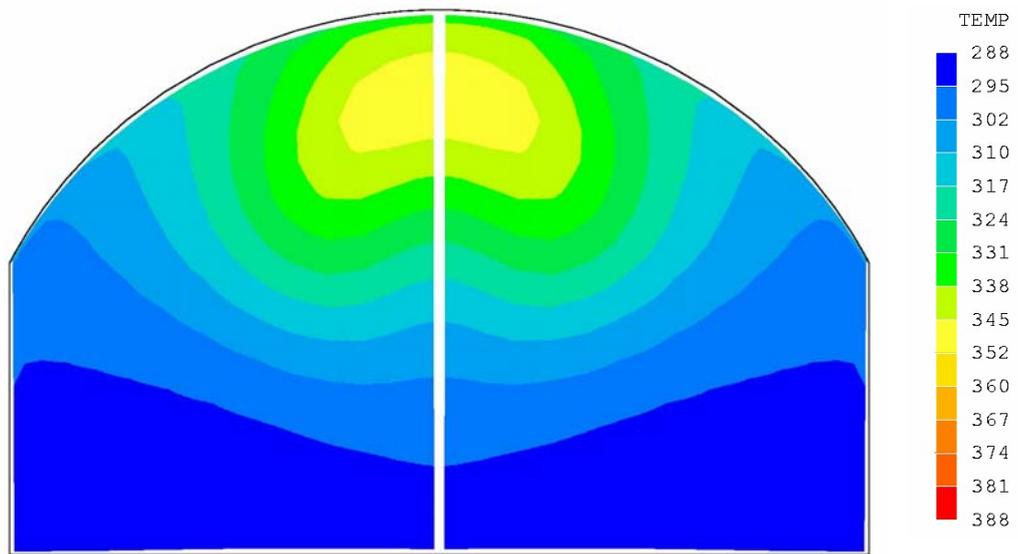


Figura 5.98: PHOENICS. Sección 0. Potencia: 5MW. Tiempo: 360 s. Velocidad: 2'25 m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

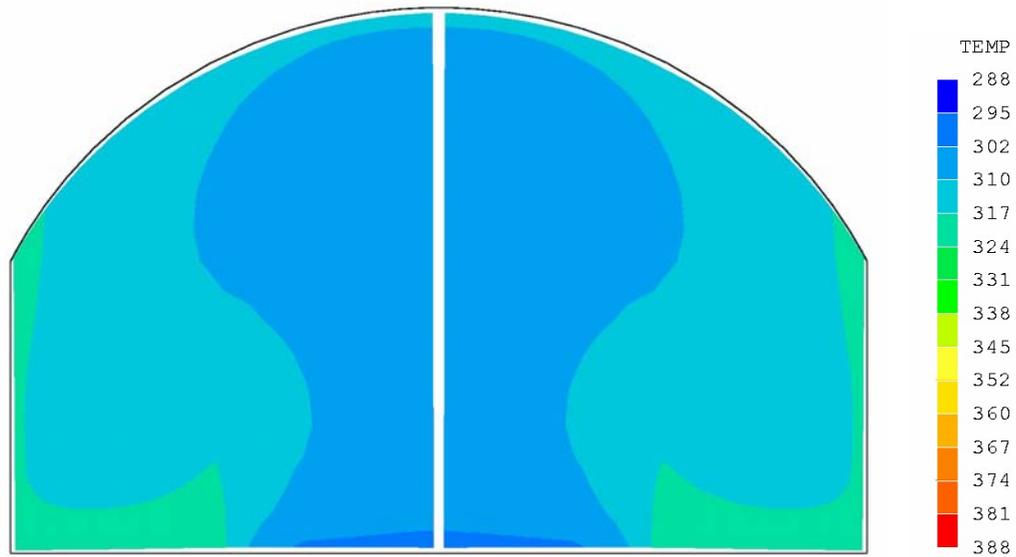


Figura 5.99: PHOENICS. Sección 4. Potencia: 5MW. Tiempo: 360 s. Velocidad: 2'25 m/s.

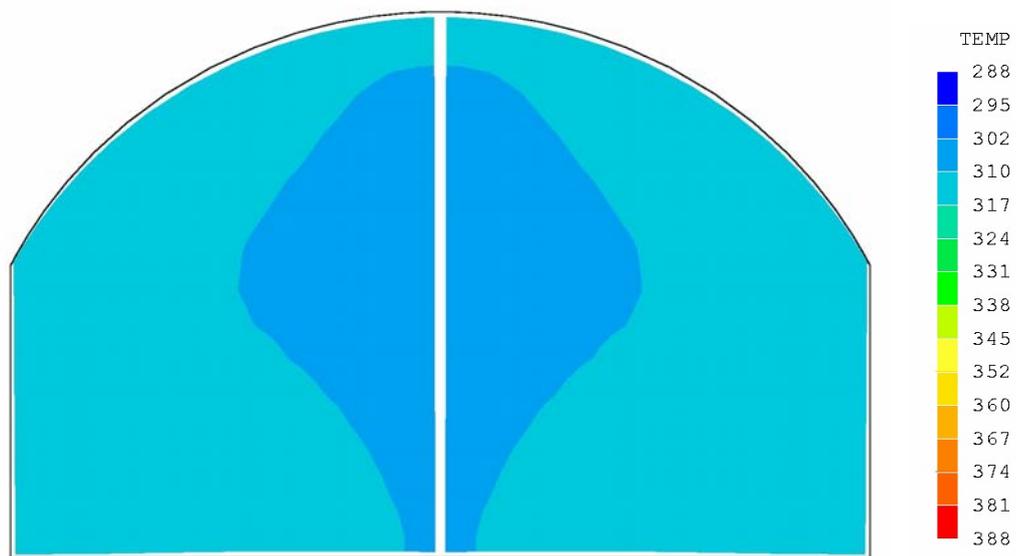


Figura 5.100: PHOENICS. Sección 5. Potencia: 5MW. Tiempo: 360 s. Velocidad: 2'25 m/s.

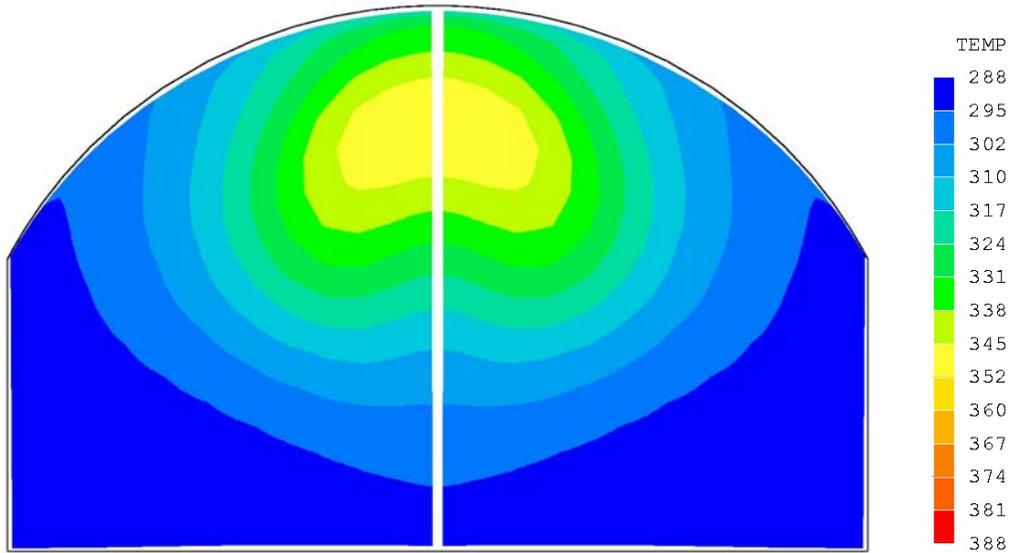


Figura 5.101: PHOENICS. Sección 0. Potencia: 5MW. Tiempo: 480 s. Velocidad: 2'39 m/s.

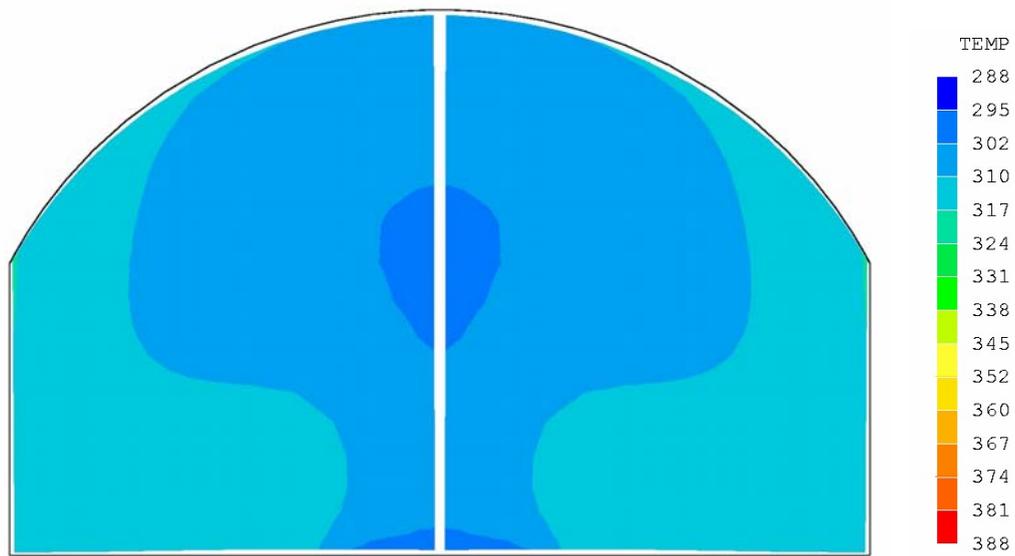


Figura 5.102: PHOENICS. Sección 4. Potencia: 5MW. Tiempo: 480 s. Velocidad: 2'39 m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

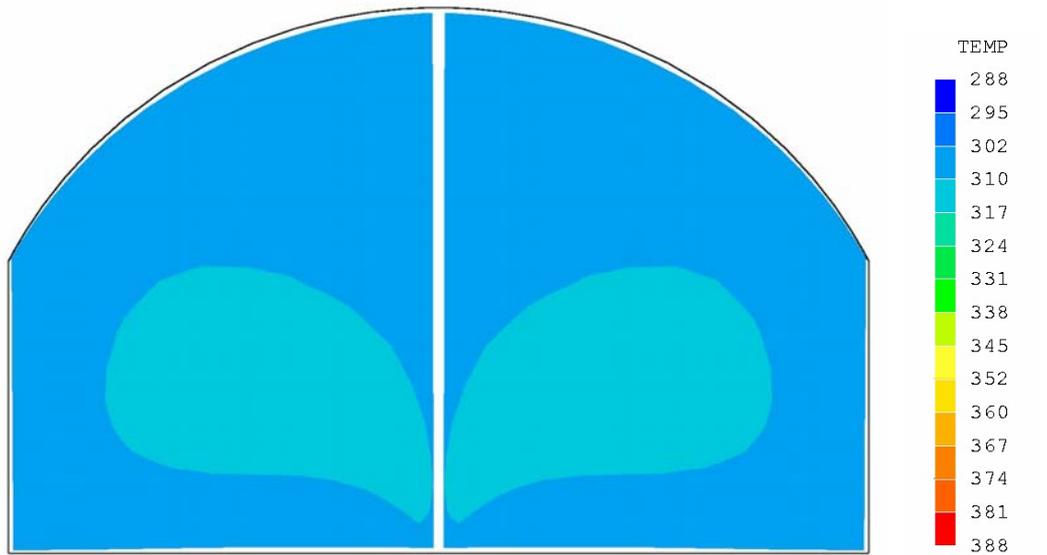


Figura 5.103: PHOENICS. Sección 5. Potencia: 5MW. Tiempo: 480 s. Velocidad: 2'39 m/s.

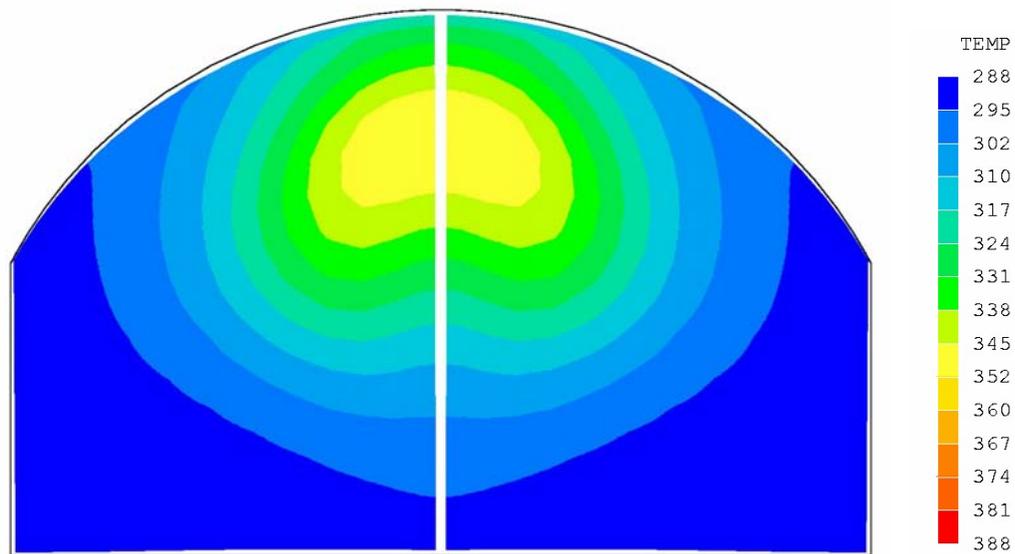


Figura 5.104: PHOENICS. Sección 0. Potencia: 5MW. Tiempo: 600 s. Velocidad: 2'44 m/s.

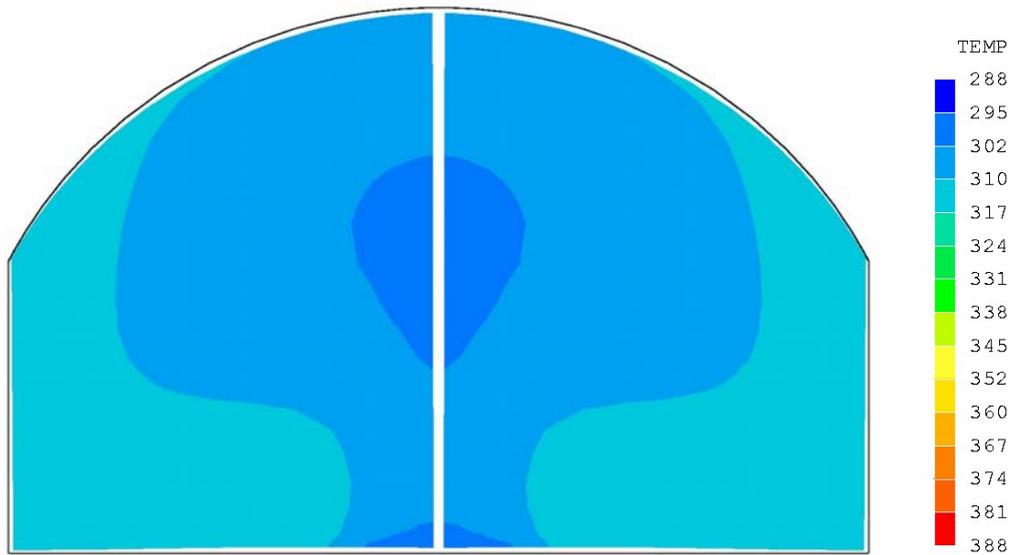


Figura 5.105: PHOENICS. Sección 4. Potencia: 5MW. Tiempo: 600 s. Velocidad: 2'44 m/s.

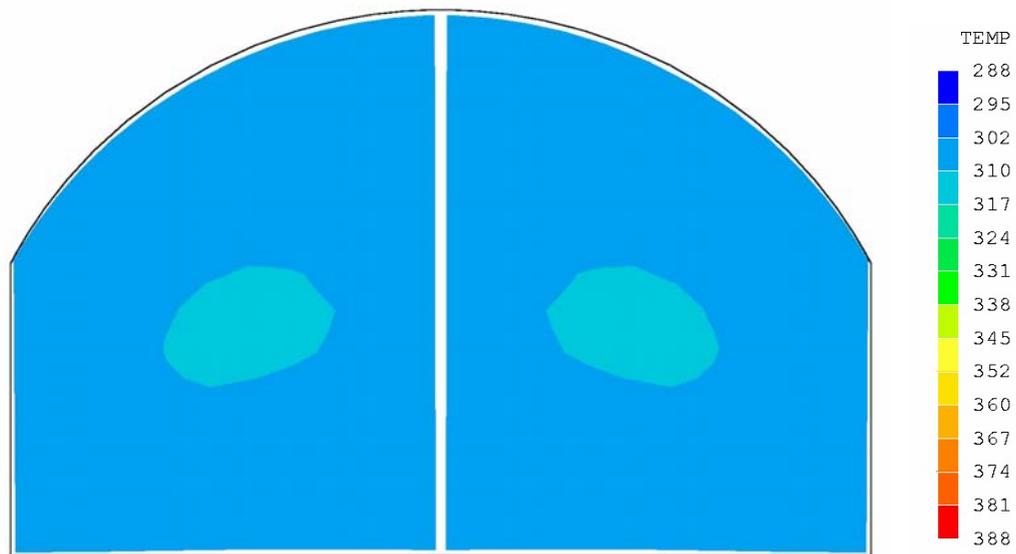


Figura 5.106: PHOENICS. Sección 5. Potencia: 5MW. Tiempo: 600 s. Velocidad: 2'44 m/s.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

5.5.3.3 – PROGRAMA SOLVENT

Se ha usado el programa SOLVENT en un incendio de 10 MW. Se ha realizado un estudio estacionario, con ventilación longitudinal, densidad del aire variable y una pérdida de calor por radiación desde la zona del fuego de un 30 %. Como en el resto de problemas, no es posible modelar el túnel completo por lo que se ha elegido un tramo de 300 metros. Nuevamente se ha aplicado la condición de simetría en el eje del túnel. La malla utilizada contiene 40 x 30 x 203 (= 243600) celdas, ancho x alto x largo, de la forma explicada y representada en el apartado 5.4.3.1. El ordenador empleado ha sido un PC Pentium II de 400 MHz y 524 MB de memoria RAM. El tiempo necesario de cálculo para el problema ha sido del orden de días. El incendio se ha situado a 100 metros de la entrada, en la cual se ha impuesto una velocidad de aire de 3 m/s. La temperatura ambiente supuesta fue 22 °C.

El SOLVENT, en principio, únicamente permite trabajar con túneles de sección rectangular. Para poder representar secciones abovedadas, como es la del caso del túnel a estudio, se debe insertar un paralelepípedo rectangular macizo en el techo, zonas de color azul y rojo de la figura 5.107, y crear una “obstrucción negativa” o “vaciado” con forma cilíndrica, cuya intersección con el bloque sólido anterior, zona de color azul, dará el contorno deseado. De esta forma se consigue un espacio hueco, el cual hace las veces de sección abovedada, que contiene un medio fluido. Debido a esto, la parte del techo que no ha sido eliminada para representar la curvatura, que es sólida y no fluida, aparecerá reflejada en las figuras de resultados como un área en donde la variable a representar no varía respecto a las condiciones de la pared, zona de color rojo en la figura 5.107. Por tanto, el fluido podrá circular tanto por la zona de color amarillo, que se crea desde el principio con carácter fluido, como por la azul. Consecuentemente, existe una zona en las salidas gráficas, claramente detectable en la parte superior derecha de los cortes transversales, donde realmente existe techo. Esta zona aparecerá representada con el valor correspondiente a la pared. Por ejemplo, cero para la velocidad o el valor ambiente (22 °C en el caso ejemplo) para la temperatura.

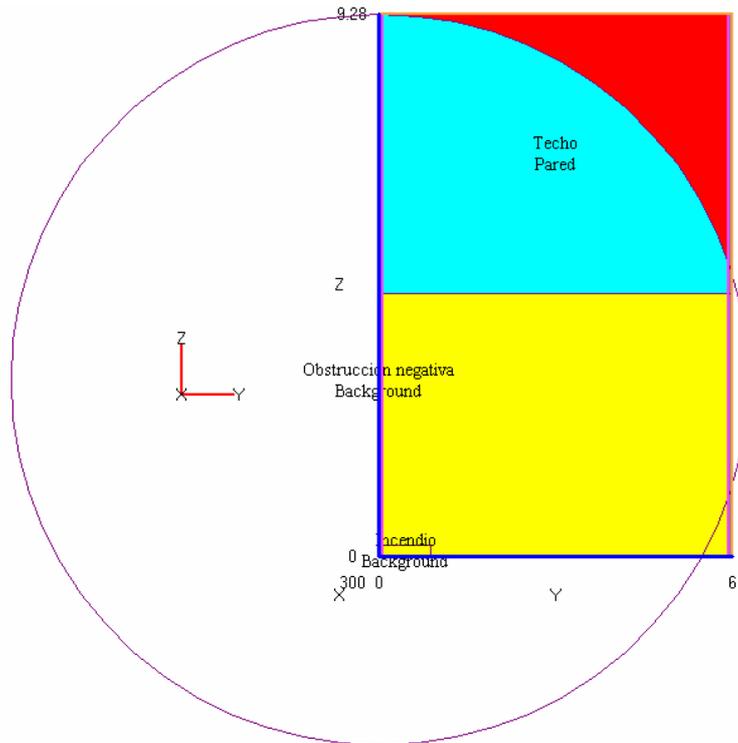


Figura 5.107: Medio de crear la geometría con el SOLVENT:
Zona roja: sólido. Zona azul y amarilla: fluido.

Las figuras 5.108 y 5.117 presentan vistas en perspectiva de las velocidades longitudinales y temperaturas en el plano central del túnel y en secciones a -50 , -10 , 0 , $+10$, $+50$, $+100$ y $+150$ metros del foco del incendio, situado, como ya se ha dicho, a 100 metros de la entrada. En las figuras 5.109 y 5.118 aparece un corte longitudinal en el plano de simetría de las velocidades longitudinales y temperaturas respectivamente. Las figuras de la 5.110 a la 5.116 presentan cortes transversales de velocidad a -50 , -10 , 0 , $+10$, $+50$, $+100$ y $+150$ metros del foco respectivamente. Las figuras de la 5.119 a la 5.123 presentan cortes transversales de temperatura a 0 , $+10$, $+50$, $+100$ y $+150$ metros del foco respectivamente. No se presentan las de -50 y -10 por que al contenerse el incendio no se produce retroceso de los humos calientes y por tanto no se aprecia aumento de temperatura respecto de la ambiente.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

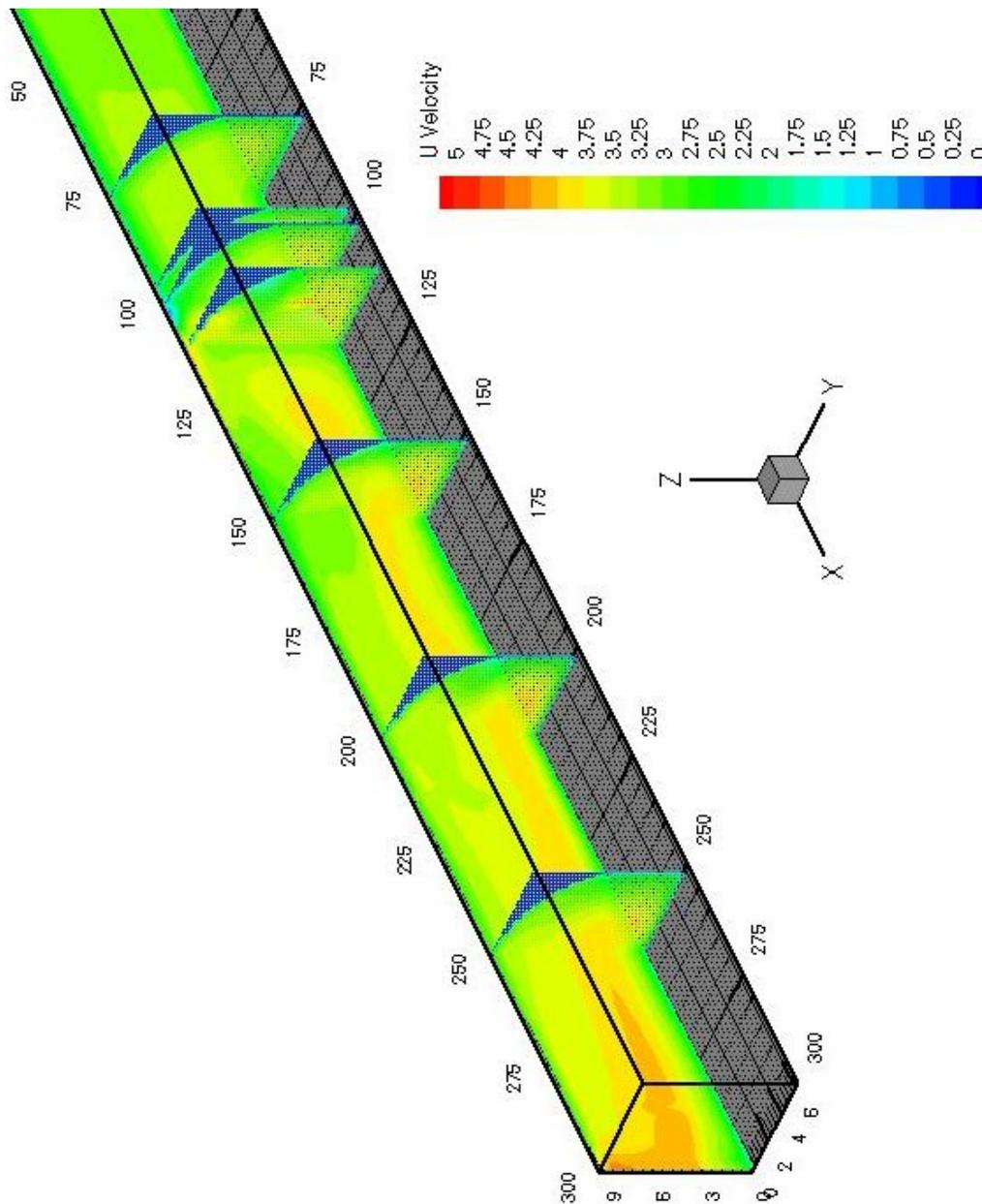


Figura 5.108: SOLVENT. Velocidades. Incendio de 10 MW.

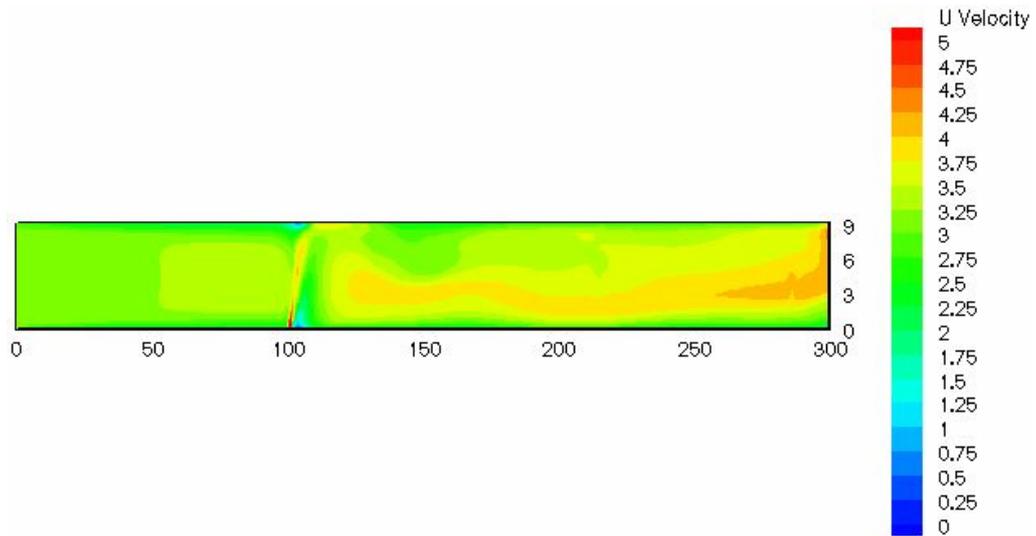


Figura 5.109: SOLVENT. Corte longitudinal de velocidades. Incendio de 10 MW.

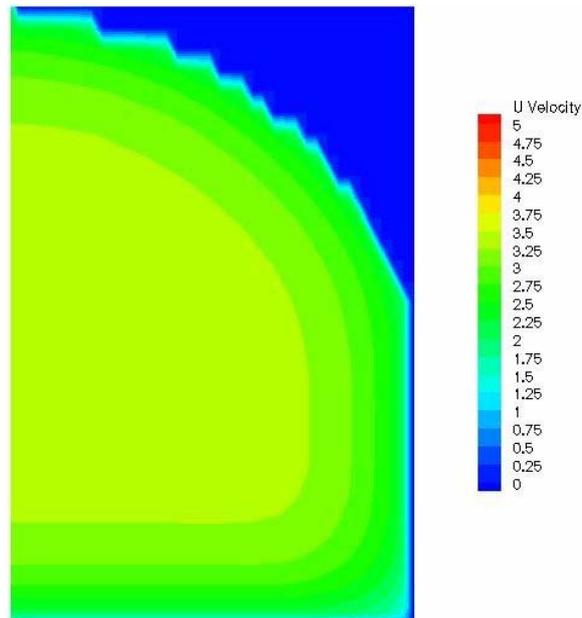


Figura 5.110: SOLVENT. Sección: -50m del incendio. Velocidades.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

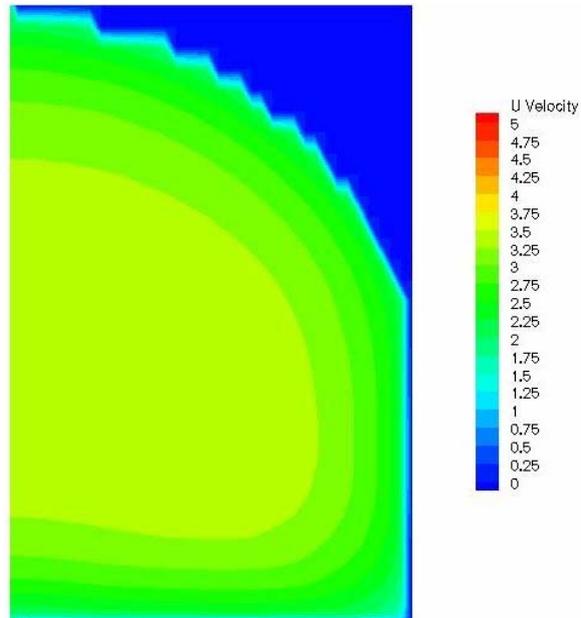


Figura 5.111: SOLVENT. Sección: -10 m del incendio. Velocidades.

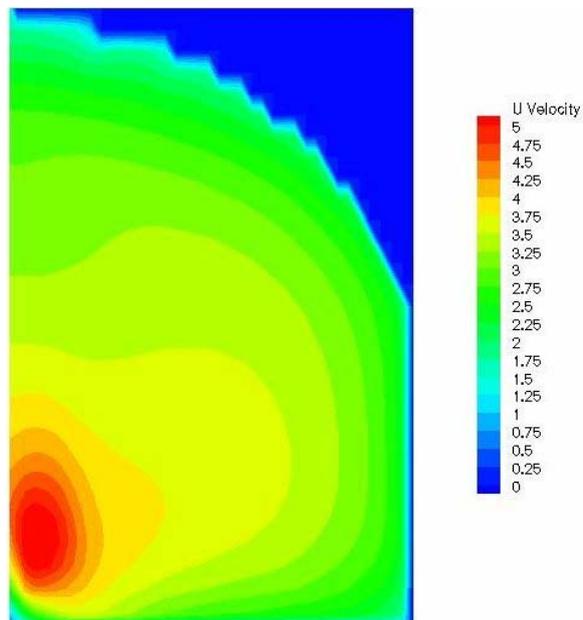


Figura 5.112: SOLVENT. Sección: 0 m del incendio. Velocidades.

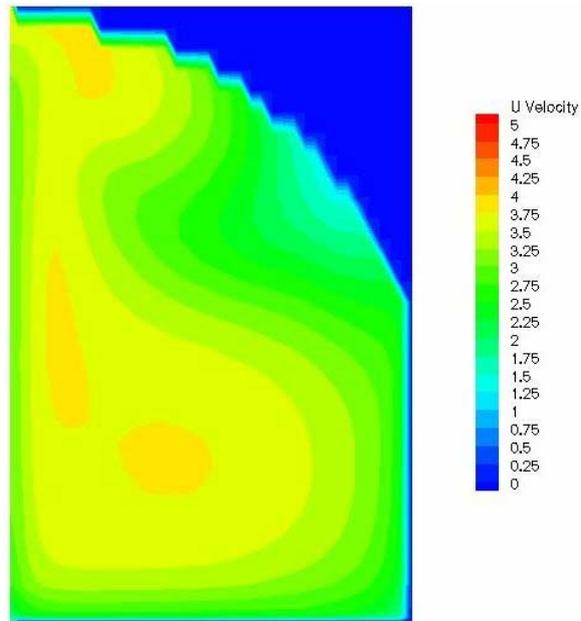


Figura 5.113: SOLVENT. Sección: +10 m del incendio. Velocidades.

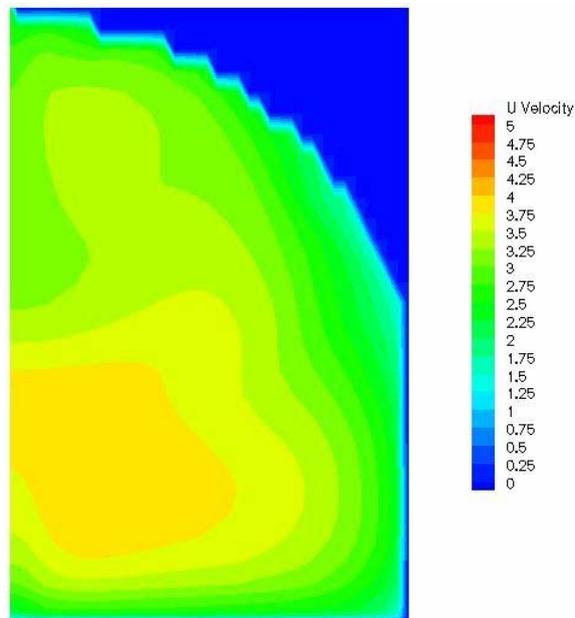


Figura 5.114: SOLVENT. Sección: +50 m del incendio. Velocidades.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

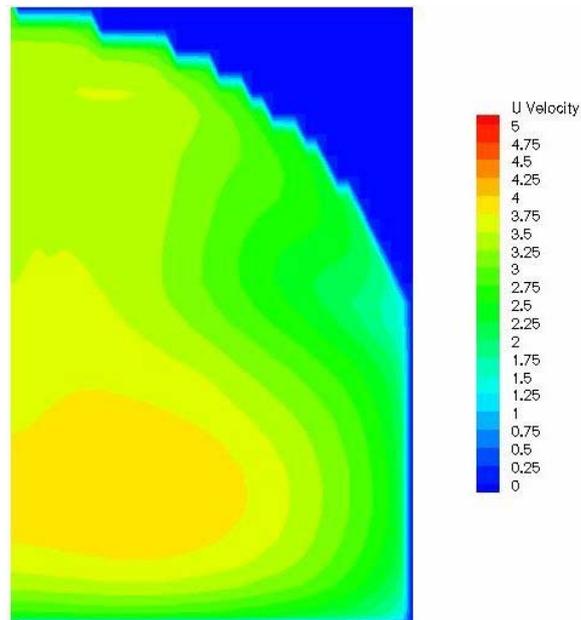


Figura 5.115: SOLVENT. Sección: +100 m del incendio. Velocidades.

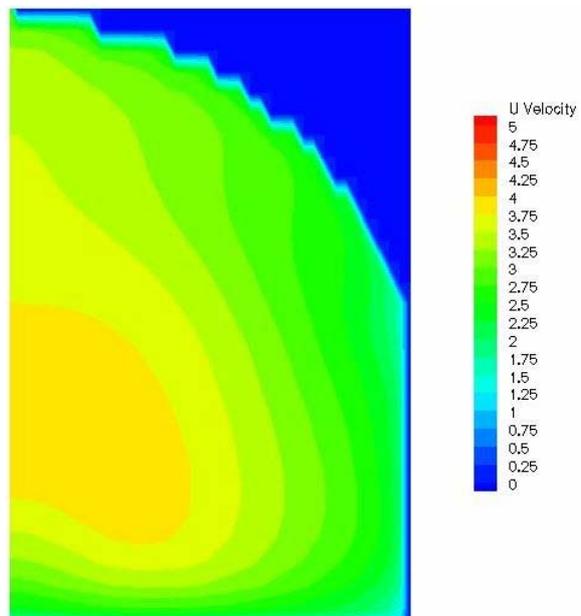


Figura 5.116: SOLVENT. Sección: +150 m del incendio. Velocidades.

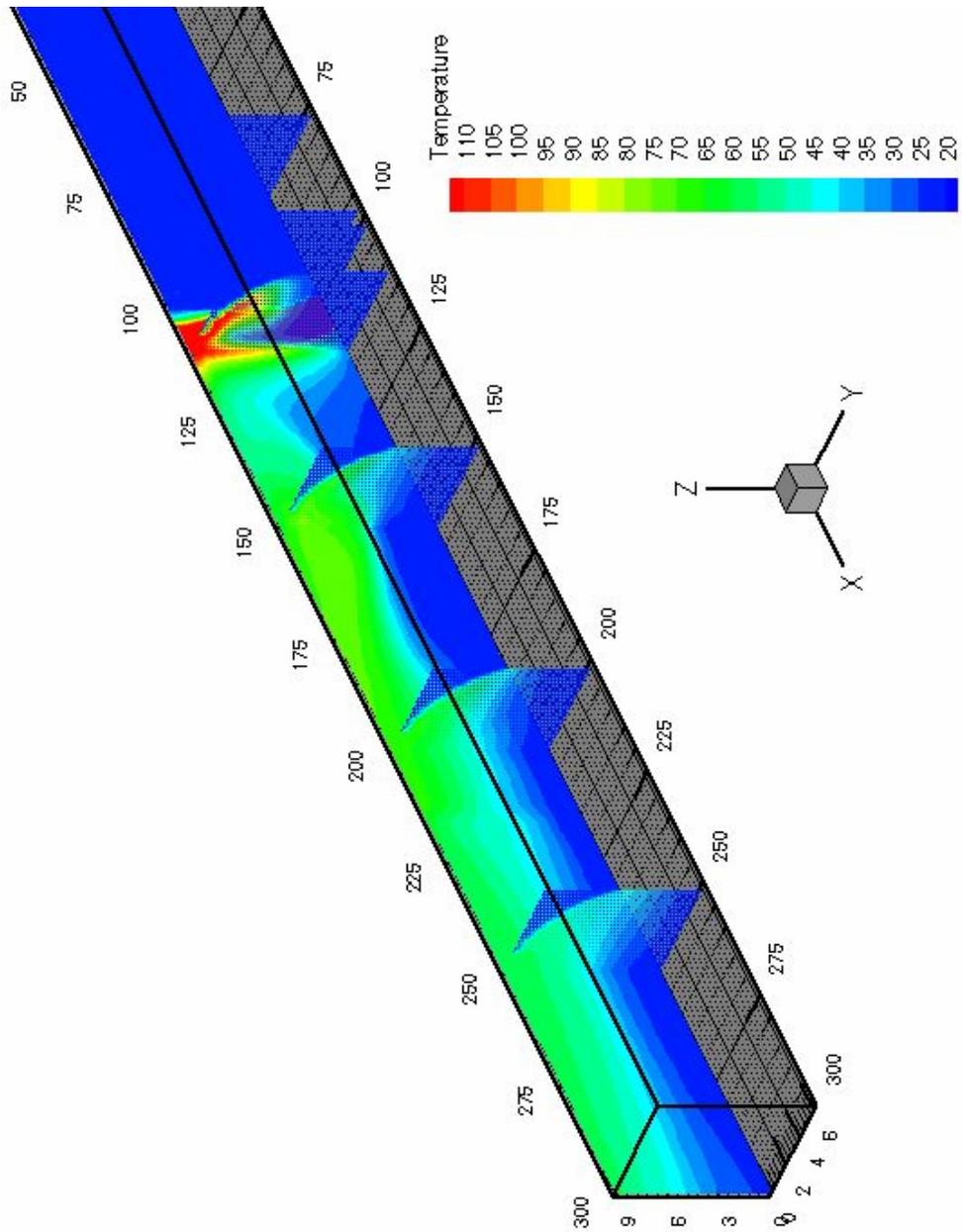


Figura 5.117: SOLVENT. Temperatura. Incendio de 10 MW

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

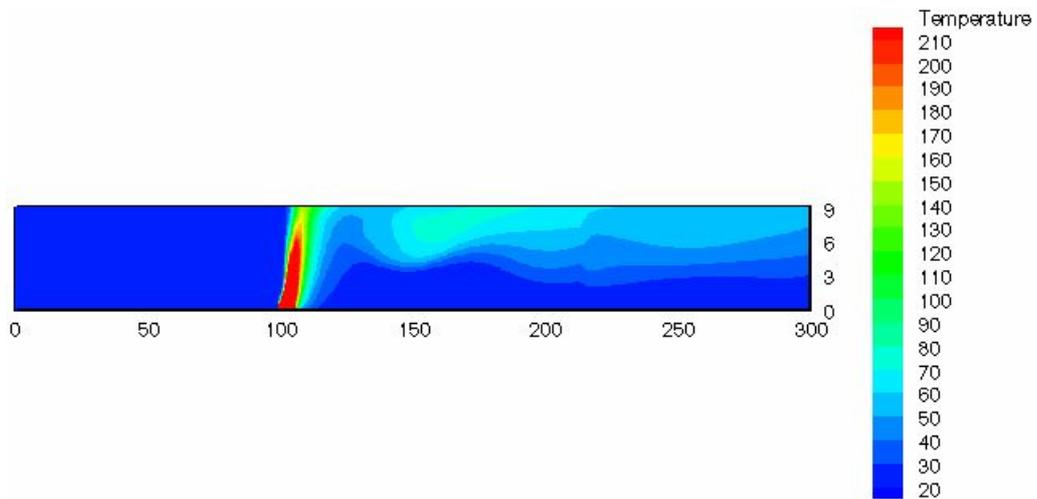


Figura 5.118: SOLVENT. Corte longitudinal de temperaturas. Incendio de 10 MW

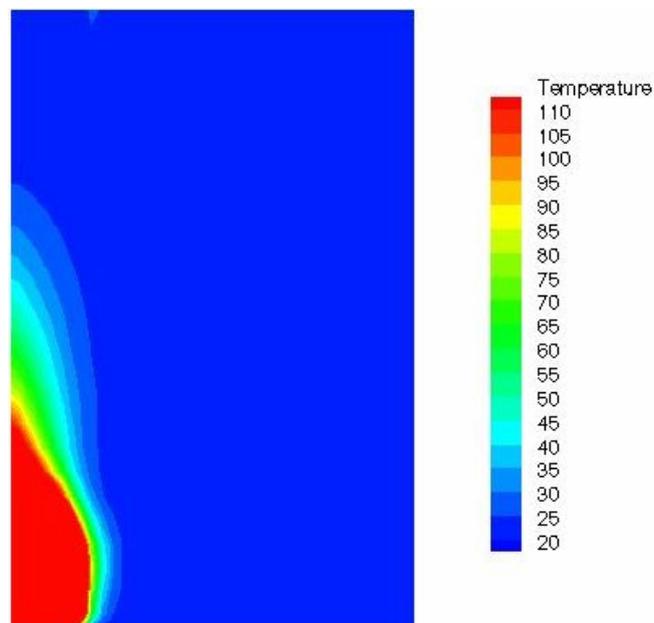


Figura 5.119: SOLVENT. Sección: 0 m del incendio. Temperaturas.

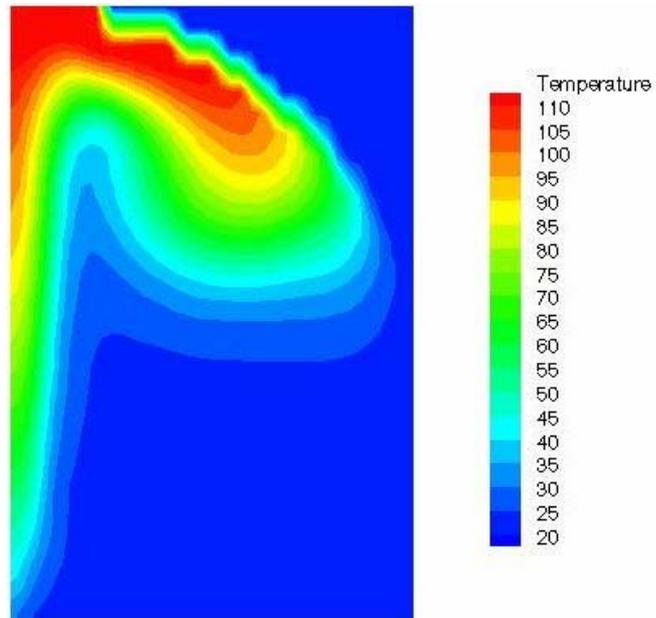


Figura 5.120: SOLVENT. Sección: +10 m del incendio. Temperaturas.

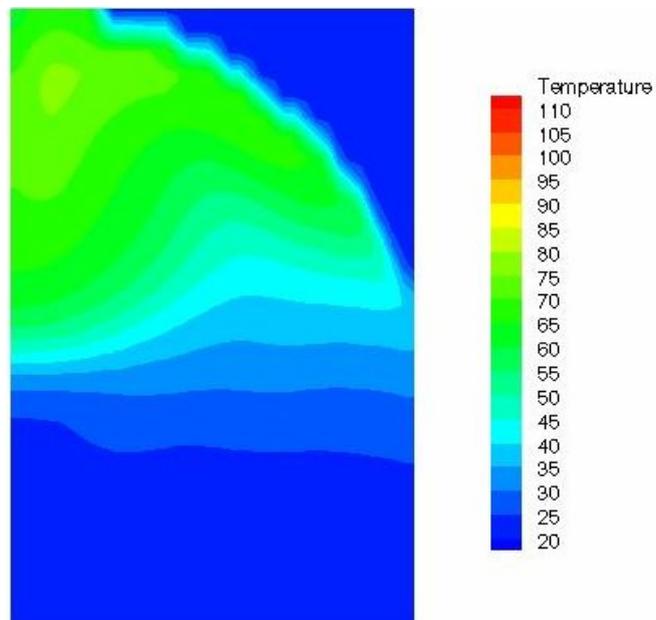


Figura 5.121: SOLVENT. Sección: +50 m del incendio. Temperaturas.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

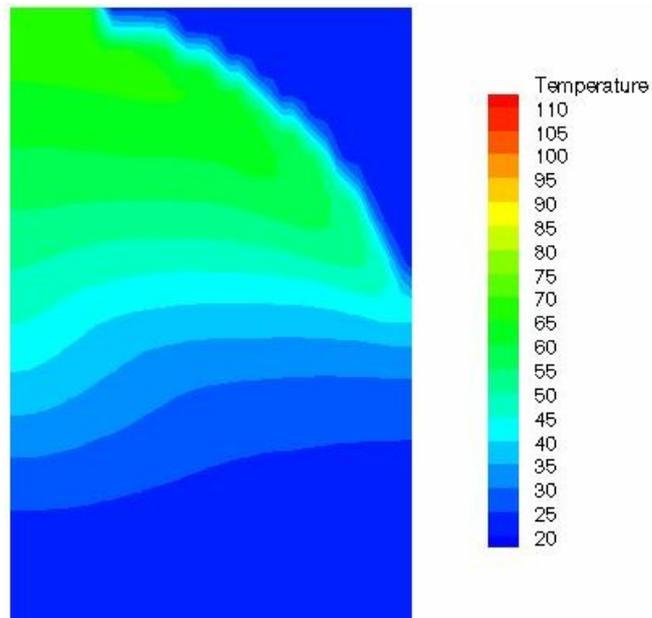


Figura 5.122: SOLVENT. Sección: +100 m del incendio. Temperaturas.

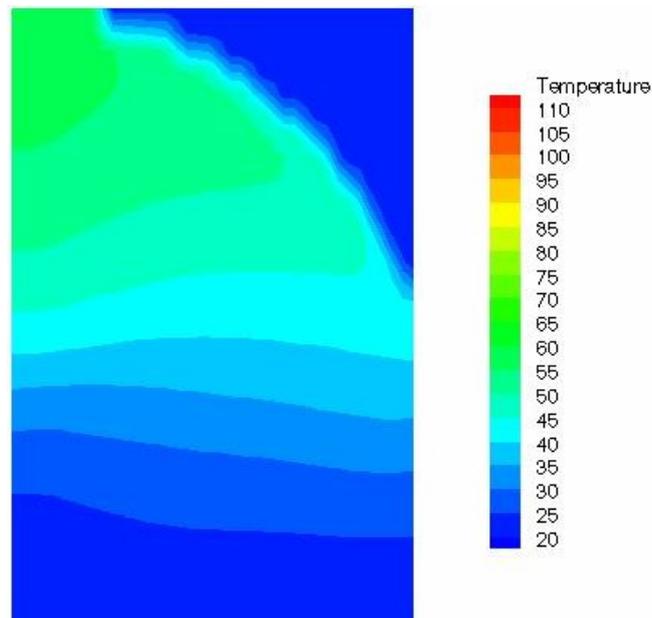


Figura 5.123: SOLVENT. Sección: +150 m del incendio. Temperaturas.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN SOBRE EL MODELO

6.1 - AJUSTES DEL MODELO

Con los resultados numéricos del FLUENT se ha procedido a ajustar el modelo cuasi-unidimensional. Una vez hecho esto, se realizarán las comparaciones del modelo con los experimentos y los resultados numéricos del FLUENT, PHOENICS y SOLVENT.

6.1.1 – FLUENT: AJUSTES Y COMPARACIONES

Como ya se indicó, el tiempo necesario para llevar a cabo los estudios numéricos con programas generalistas es muy elevado, por lo que se hizo necesario comenzar los cálculos antes de los experimentos. Debido a que las previsiones de velocidad en el túnel se vieron ampliamente superadas, no ha sido posible realizar comparaciones de dichos resultados numéricos con los experimentales. Sin embargo, sí que se pueden emplear los resultados numéricos para ajustar el modelo cuasi-unidimensional y hacer comparaciones con él. Los primeros cálculos obtenidos fueron con el FLUENT y por ello es el que va a ser usado para ajustar el modelo de la tesis.

Básicamente hay que ajustar dos parámetros. El primero, C de la ecuación 3.49, tiene en cuenta el frenado que supone el techo para la corriente de humos ascendente en el penacho. Será función por tanto de la potencia del incendio y de la geometría de su sección. Cuanto mayor sea, más va a frenar y por tanto más se tumbará la llama. El segundo, k_m de la ecuación 3.138, controlará el ritmo de difusión de los gases calientes. Es el factor experimental que se

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

precisa para poder calcular la difusividad térmica turbulenta. Al aumentar se incrementará la difusión y antes se homogeneiza la temperatura.

Para realizar el ajuste, se han elegido las tres secciones donde existían medidas experimentales y que puede simular el modelo cuasi-unidimensional. De los resultados numéricos del FLUENT disponibles, todos ellos para 10 MW, los más adecuados para este propósito son los de la sección 4, 50 metros aguas abajo del incendio. La razón de ello es por que no se encuentra perturbada ni por la condición de contorno impuesta en el FLUENT en la sección 5 a 100 metros del foco, ver apartado 5.5.3.1, ni por el penacho. La velocidad elegida es la máxima de las obtenidas en los cálculos, y por tanto la más cercana a la real 5'8 m/s. En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presenta la comparación de resultados del FLUENT con el modelo cuasi-unidimensional para distintos valores de C y k_m . Se trata respectivamente de las temperaturas en las líneas de simetría de las secciones a 10, 50 y 100 metros aguas abajo de un incendio de 10 MW con 2'5 m/s de velocidad de aire. Mediante comparaciones similares se ha elegido para este túnel como factor C el valor 5 y para k_m 0'5. Se hace notar que, excepto cerca del foco, las variaciones de C no afectan mucho a los resultados. El valor de k_m debe precisarse más en función de la potencia del incendio.

En las figuras de la 6.4 a la 6.7 se presentan los resultados de temperatura del modelo cuasi-unidimensional para $k_m = 0'5$ y $C = 5$. La figura 6.4 muestra una vista longitudinal en el plano de simetría del túnel. Esta figura es la equivalente a la 5.71 obtenida con el FLUENT. Las figuras 6.5, 6.6 y 6.7 son tres cortes transversales a 10, 50 y 100 metros aguas abajo del incendio. Estas figuras son las equivalentes respectivamente a la 5.73, 5.74 y 5.75 del FLUENT, con las que se pueden comparar para ver la similitud de los resultados. Se hace notar que las escalas de color son distintas en ambos grupos de figuras.

Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia entre ambos modelos excepto en la zona más cercana al incendio. En ella, el modelo cuasi-unidimensional tumba menos a la llama, por lo que las temperaturas más altas se sitúan más hacia el techo que con el FLUENT. En el resto de secciones, el modelo cuasi-unidimensional muestra una cierta mayor tendencia de homogeneizar los resultados. Sin embargo, la similitud de las tendencias y los resultados concretos es buena.

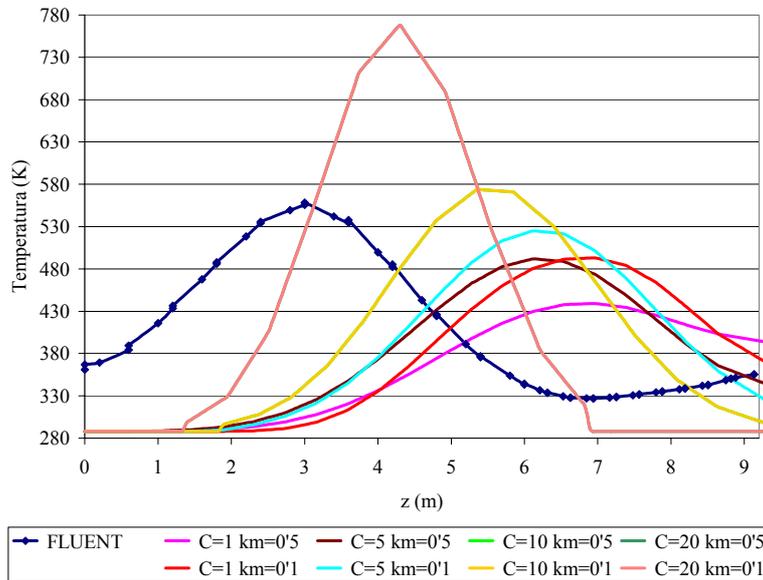


Figura 6.1: FLUENT y modelo cuasi-unidimensional para distintos k_m , ecuación 3.138, y C , ecuación 3.49. Eje de simetría a +10m del incendio. Potencia 10MW. Velocidad 2'5 m/s.

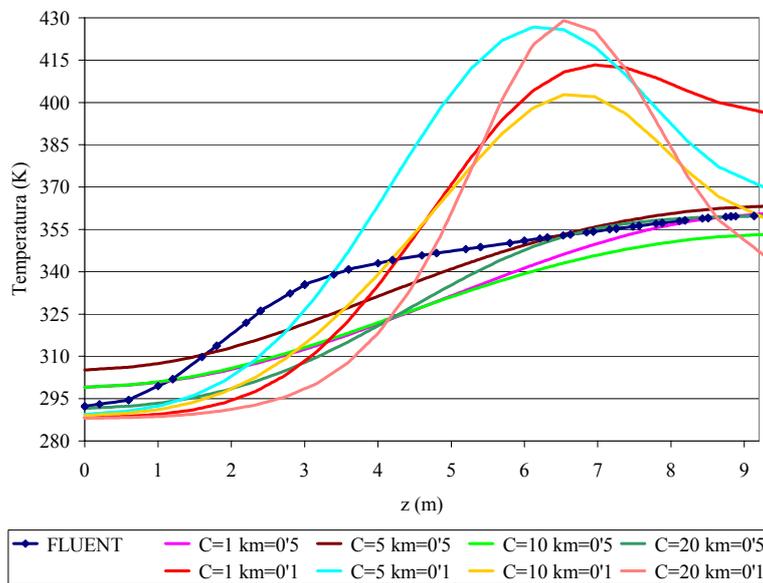


Figura 6.2: FLUENT y modelo cuasi-unidimensional para distintos k_m , ecuación 3.138, y C , ecuación 3.49. Eje de simetría a +50m del incendio. Potencia 10MW. Velocidad 2'5 m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

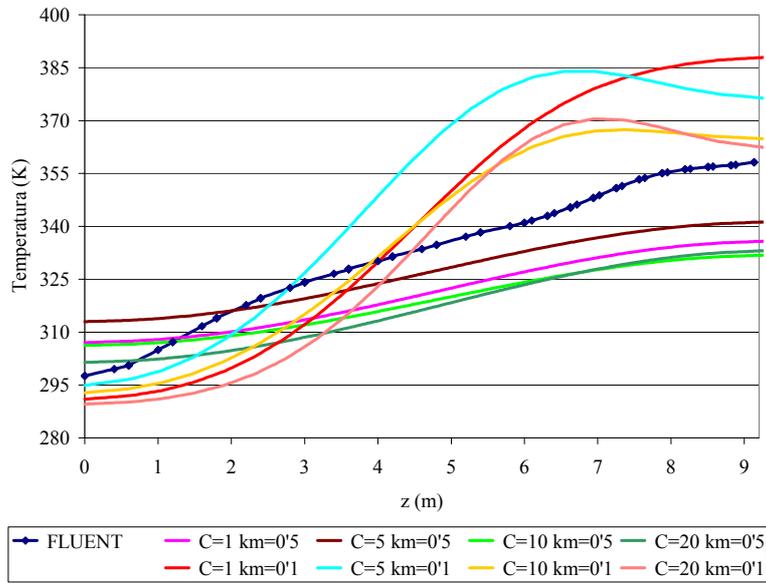


Figura 6.3: FLUENT y modelo cuasi-unidimensional para distintos k_m , ecuación 3.138, y C , ecuación 3.49. Eje de simetría a +100 m del incendio. Potencia 10MW. Velocidad 2'5 m/s.

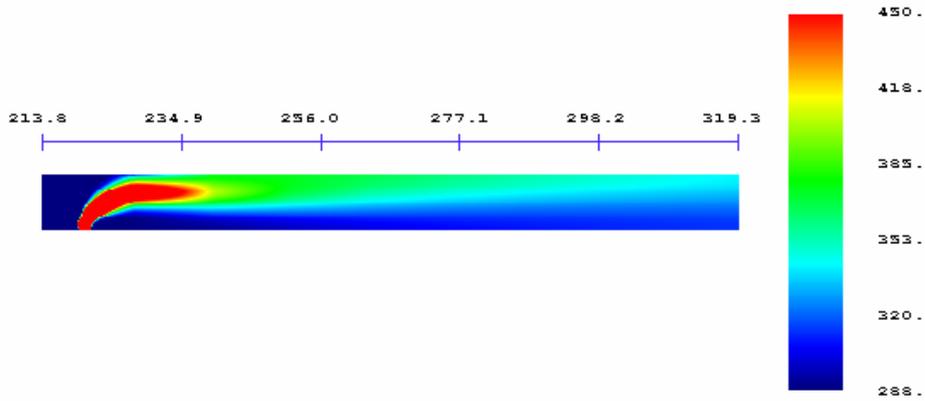


Figura 6.4: Corte longitudinal. Potencia: 10MW. Velocidad: 2'5 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

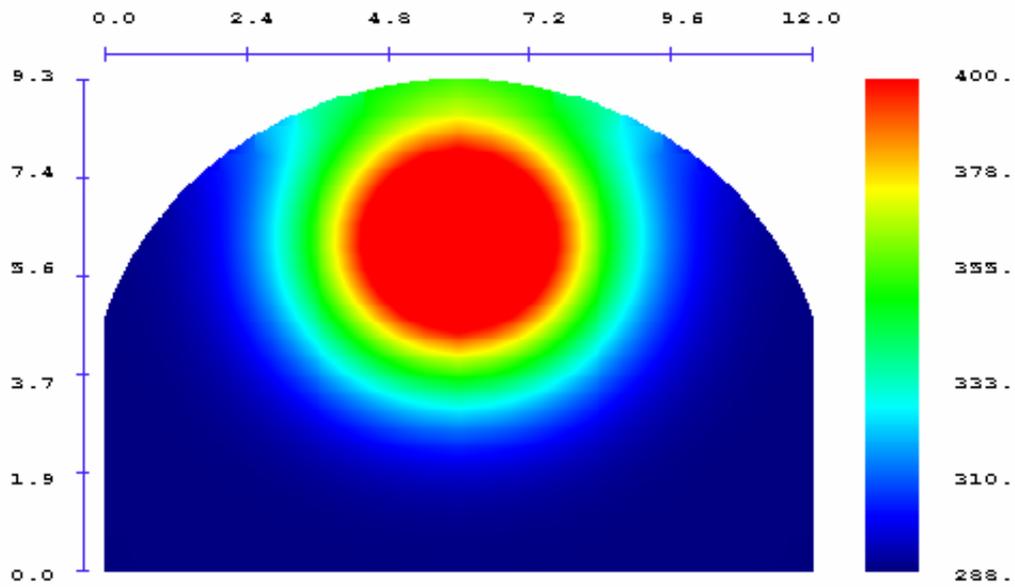


Figura 6.5: Sección 0. Potencia: 10MW. Velocidad: 2'5 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

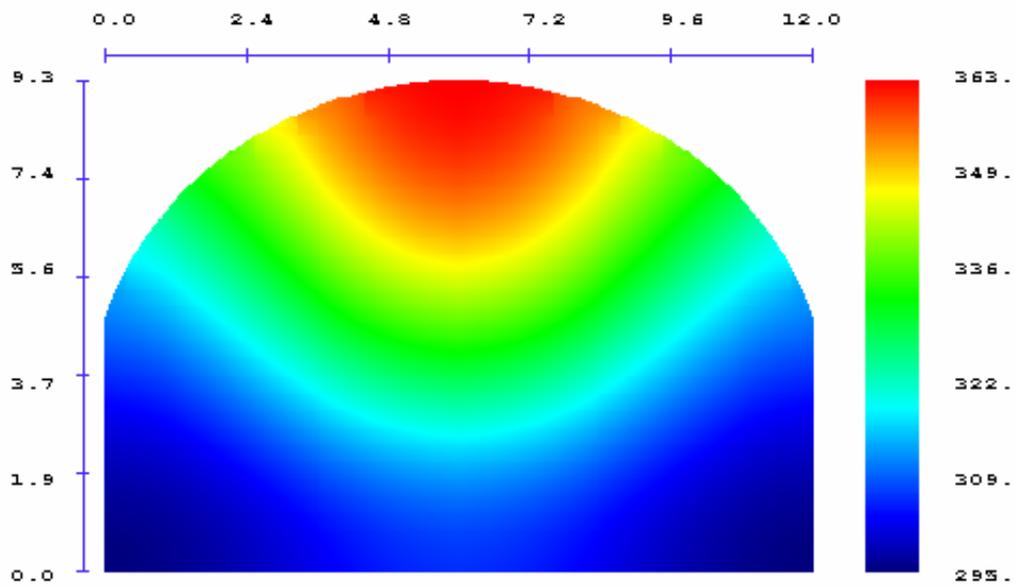


Figura 6.6: Sección 4. Potencia: 10MW. Velocidad: 2'5 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

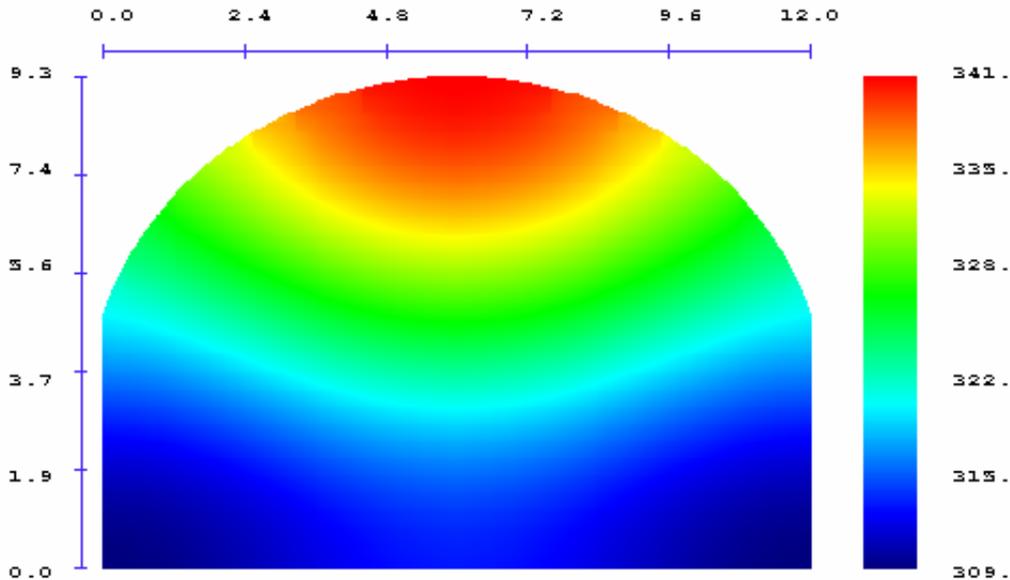


Figura 6.7: Sección 5. Potencia: 10MW. Velocidad: 2'5 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

6.2 – COMPARACIONES

Con los resultados útiles, tanto experimentales como numéricos, se ha procedido a realizar las comparaciones. Con el modelo cuasi-unidimensional se consigue realizar cálculos mucho más rápidamente, con la posibilidad de variar distintos parámetros, aunque posiblemente con una menor exactitud de los resultados.

6.2.1 - EXPERIMENTOS

El modelo cuasi-unidimensional puede ser comparado con periodos cuasiestacionarios del experimento. En el ensayo de 10 MW no hay ningún periodo de dicho tipo, por lo que únicamente podemos hacer la comparación para el caso de 5 MW. En dicha prueba, se produjo un periodo suficiente de tiempo en que estuvieron conectados todos los ventiladores y el incendio estaba en régimen permanente. Para ajustar las constantes C y k_m se han usado los

resultados del apartado anterior obtenidos con FLUENT. Mediante un posterior cambio de estas constantes se obtiene una mejor concordancia con los de los experimentos. Como consecuencia se ha optado por no variar la k_m , 0'5, y se ha reducido la C a un valor de 1. El cambio de $C = 5$ a $C = 1$ no da lugar a un cambio muy importante de los resultados, excepto en las inmediaciones del foco, como puede comprobarse en las figuras 6.2 y 6.3.

En las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 aparece ese periodo estacionario para las tres secciones con sensores que logra simular el modelo cuasi-unidimensional, sección 0, 4 y 5 a 10, 50 y 100 metros aguas abajo del foco respectivamente. Se recuerda que en la primera de ellas el sensor estaba introducido en un dispositivo que únicamente permitía el paso de calor por radiación, por lo que los resultados entre los experimentos y el modelo cuasi-unidimensional no se pueden hacer directamente. Las curvas de igual color indican los resultados experimentales y numéricos para una misma posición de los sensores. Las crecientes y decrecientes representan los resultados experimentales y las horizontales los cálculos numéricos. En las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se muestran los cálculos del modelo en colores y los resultados experimentales mediante números en las mismas secciones de medida que las tres figuras anteriores.

La forma de obtener la velocidad de ventilación ha sido extrapolándola en el incendio de 10 MW, ver apartado 5.4.5. Hay que tener en cuenta la incertidumbre existente en la medición de dicho valor y como los valores de temperatura dentro de un túnel en el que se produce un incendio son muy sensibles con su variación. A pesar de todo ello, en las figuras mencionadas anteriormente, se comprueba como el modelo cuasi-unidimensional logra reproducir de manera muy aceptable los resultados medidos experimentalmente. En la comparación de resultados, figuras 6.9 y 6.10, se observa como el modelo cuasi-unidimensional predice exactamente algunos de ellos y sobrevolara o infravalora otros, con errores menores de 4° C. En general, al igual que lo ocurrido con el FLUENT, se homogeneizan más las temperaturas en cada sección, obteniéndose unos resultados medios buenos y con una cierta mayor discrepancia en los puntuales.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

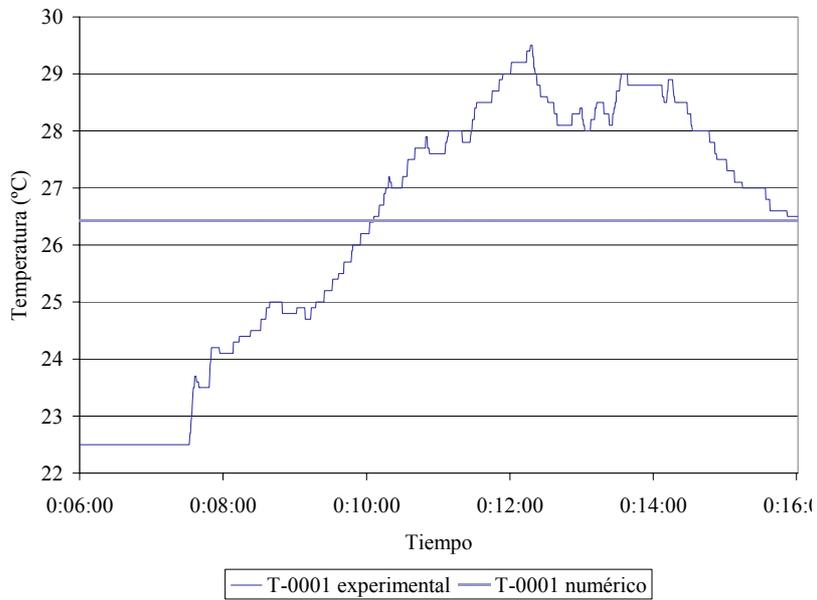


Figura 6.8: Sección 0. Potencia: 5MW. Resultados experimentales y cuasi-unidimensionales.

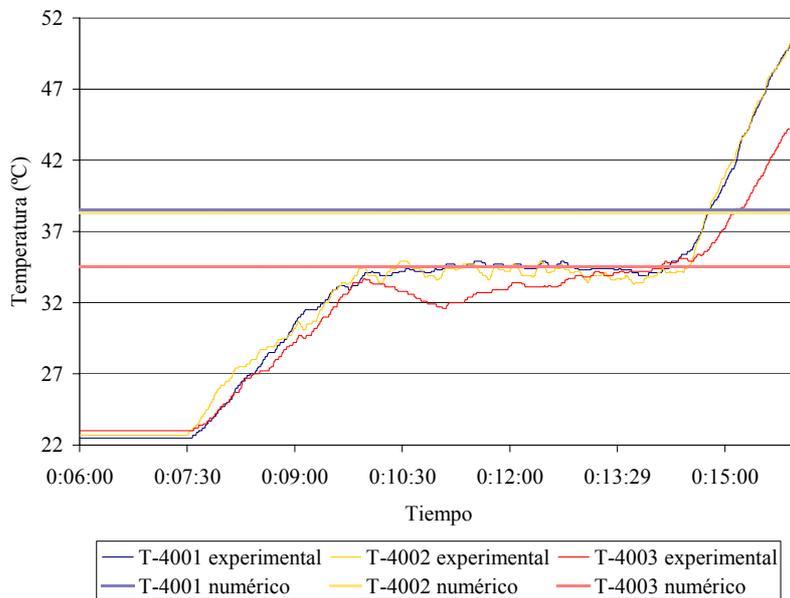


Figura 6.9: Sección 4. Potencia: 5MW. Resultados experimentales y cuasi-unidimensionales.

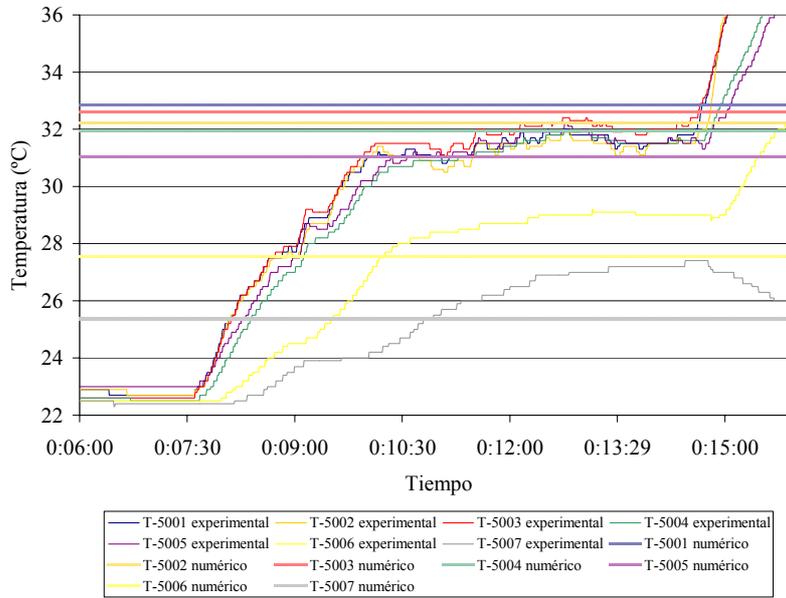


Figura 6.10: Sección 5. Potencia: 5MW. Resultados experimentales y quasi-unidimensionales.

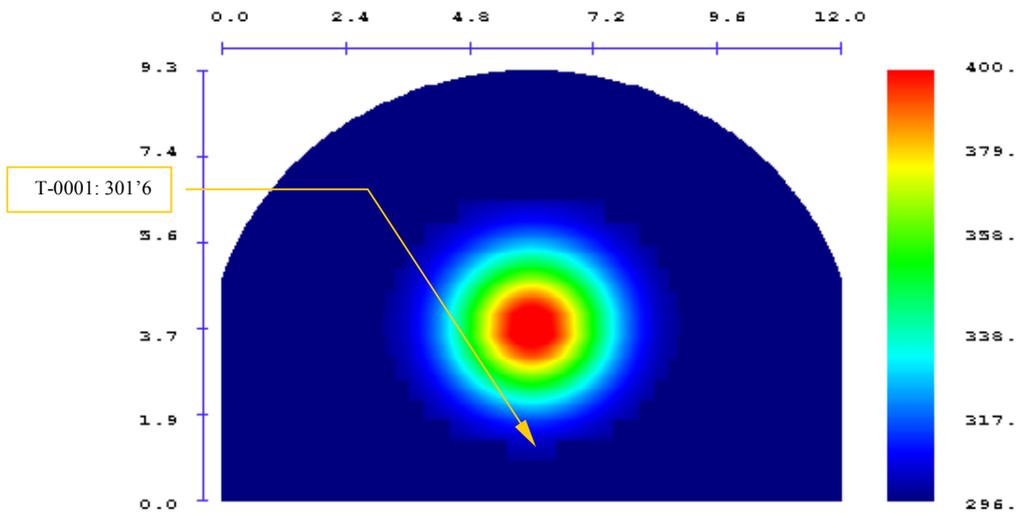


Figura 6.11: Sección 0. Potencia: 5MW. Velocidad: 5'8 m/s. Modelo quasi-unidimensional y resultados experimentales.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

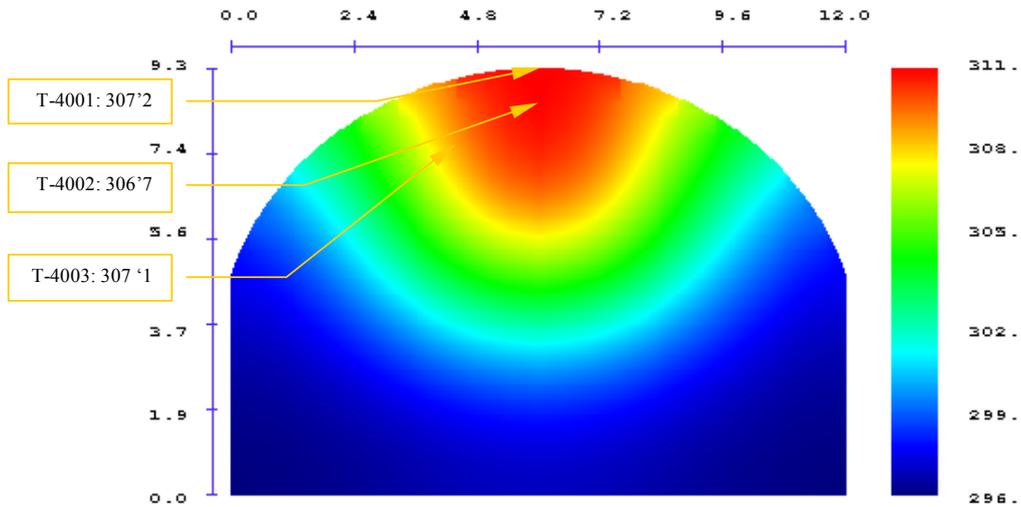


Figura 6.12: Sección 4. Potencia: 5MW. Velocidad: 5'8 m/s.
Modelo cuasi-unidimensional y resultados experimentales.

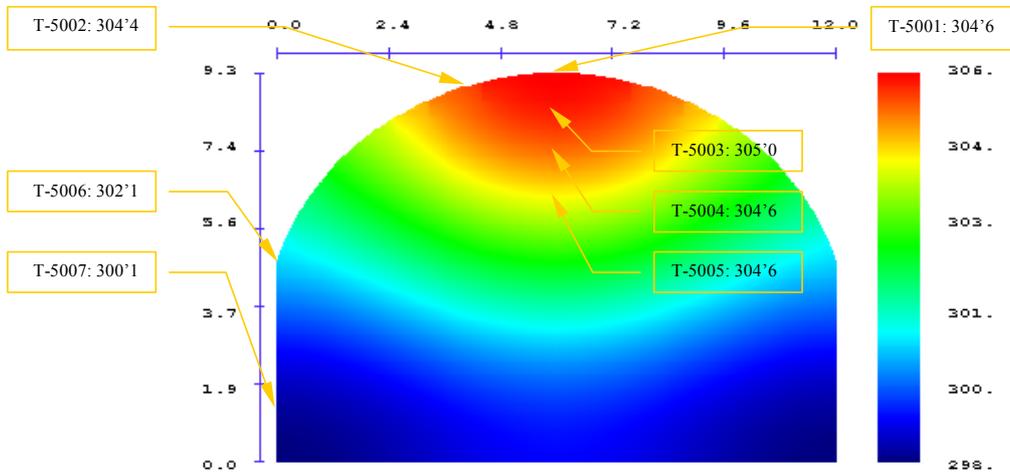


Figura 6.13: Sección 5. Potencia: 5MW. Velocidad: 5'8 m/s.
Modelo cuasi-unidimensional y resultados experimentales.

6.2.2 - PHOENICS

De los resultados obtenidos con este modelo, se van a emplear en la comparación los correspondientes al instante de 10 minutos de cálculo. En el apartado 5.5.3.2, se vio que ya se había alcanzado el estado estacionario, con una velocidad de 2'44 m/s. Se trataba de un incendio de 5 MW y una temperatura ambiente de 288 K

En la figura 6.14 se presenta una vista de las temperaturas, en un corte longitudinal de la sección de simetría, obtenida empleando el modelo cuasi-unidimensional. Esta figura es la equivalente de la última imagen de la 5.79 procedente de los cálculos del PHOENICS. La comparación gráfica de ambos resultados numéricos, en el eje de simetría a 2, 4 y 6 metros sobre el suelo, se muestra en la figura 6.18. Las figuras de la 6.15 a la 6.17 son secciones a 10, 50 y 100 metros aguas abajo del incendio conseguidos con el modelo cuasi-unidimensional. Estas figuras son las que se deben comparar respectivamente con la 5.104, 5.105 y 5.106 obtenidas con el PHOENICS. Comparando las secciones correspondientes de +10, +50 y +100, para las verticales a 0, 2 y 4 metros del eje de simetría, se obtienen las figuras 6.19, 6.20 y 6.21

Como se puede comprobar de las comparaciones de estos resultados, y de los del apartado anterior dedicado al FLUENT, no se detectan con el modelo cuasi-unidimensional ciertas irregularidades y detalles del flujo. En concreto, la discrepancia que más destaca son los altos valores de temperatura que aparecen fuera del plano central de simetría en la figura 5.106, que se debe comparar con la 6.17 del modelo cuasi-unidimensional. Dichos círculos se deben a la recirculación de la corriente de gases calientes que, una vez que el penacho impacta con el techo, son desviados hacia las paredes y posteriormente devueltos hacia el centro. Esta componente no longitudinal de la velocidad no es tenida en cuenta por el modelo cuasi-unidimensional, por lo que no se puede simular dicha recirculación.

Nuevamente, los resultados medios en las secciones no colindantes con el incendio son muy próximos en ambos modelos. Sin embargo, en este caso aumentan las discrepancias cuando se trata de hacer comparaciones punto a punto. A diferencia de lo que ocurría con el FLUENT y los experimentos, ahora es el PHOENICS el que presenta mayor tendencia a homogeneizar la temperatura. Además, acumula mucho más los gases calientes en cotas inferiores que el modelo cuasi-unidimensional. Este modelo homogeneiza las temperaturas más lentamente y mantiene los gases calientes en cotas altas durante mayor longitud de túnel.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

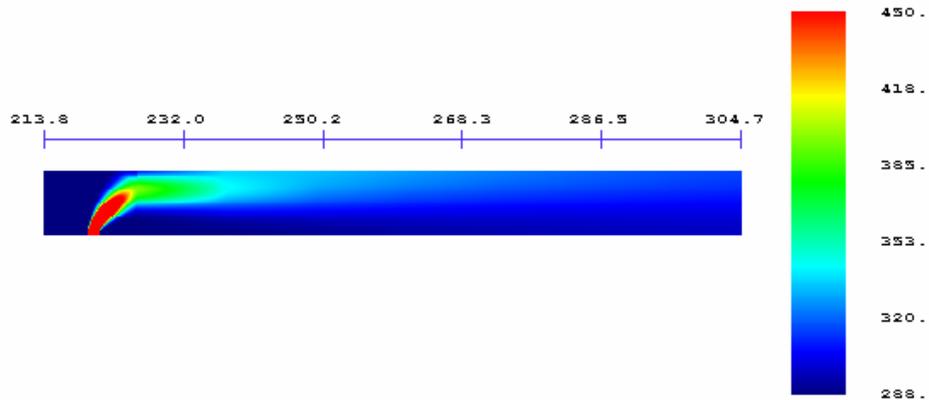


Figura 6.14: Corte longitudinal. Potencia: 5MW. Velocidad: 2'44 m/s.
Modelo cuasi-unidimensional.

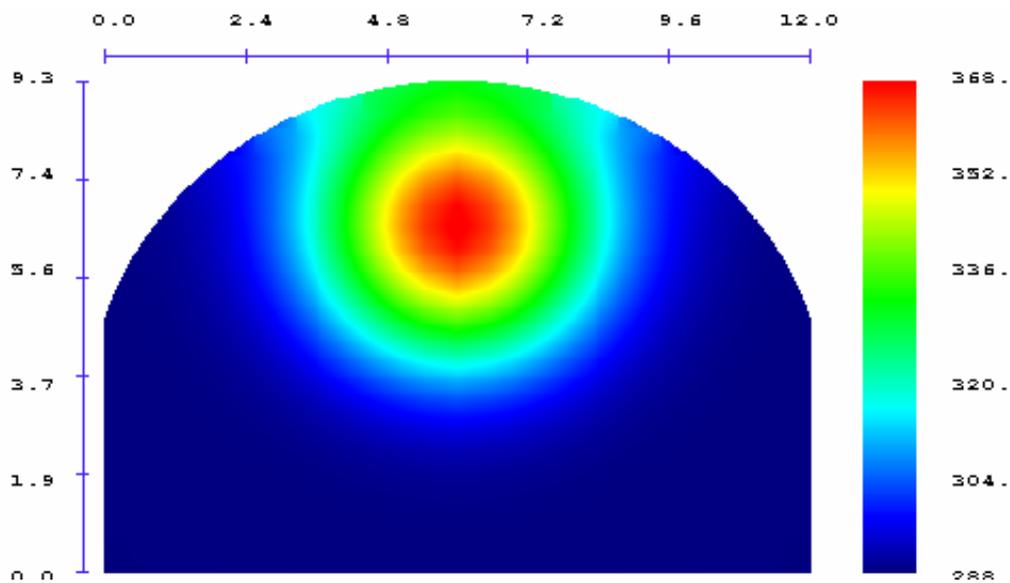


Figura 6.15: Sección 0. Potencia: 5MW. Velocidad: 2'44 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

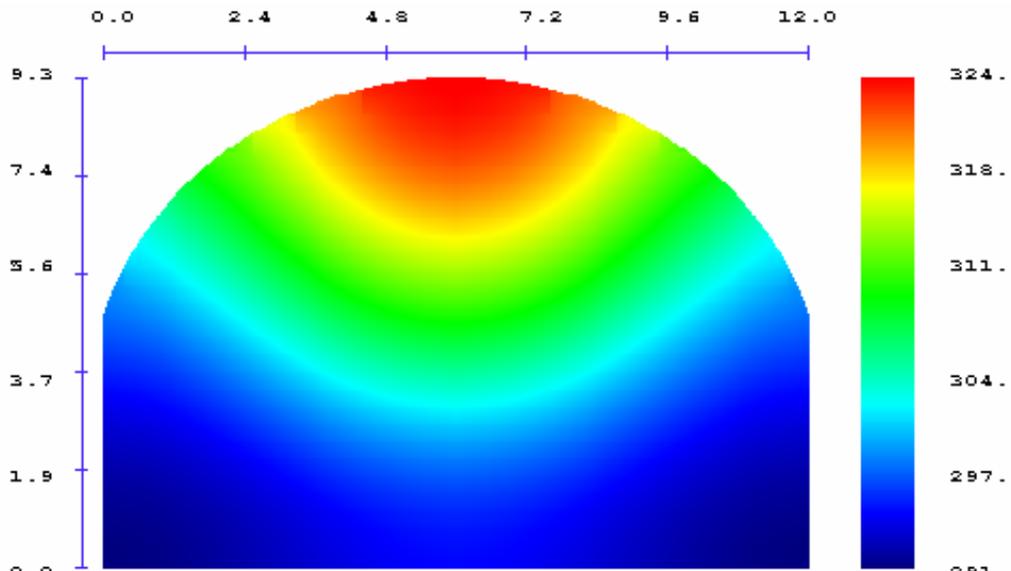


Figura 6.16: Sección 4. Potencia: 5MW. Velocidad: 2'44 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

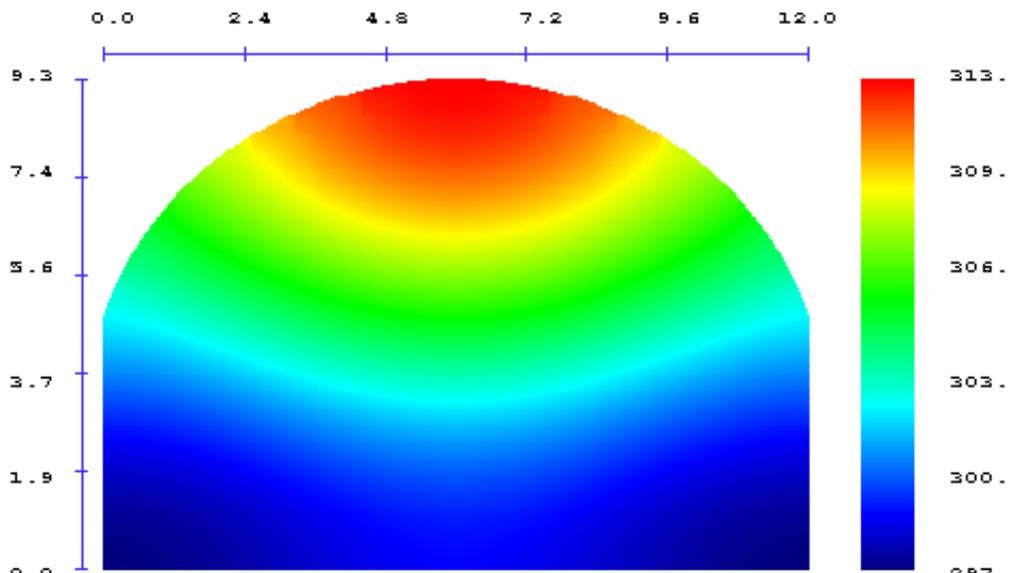


Figura 6.17: Sección 5. Potencia: 5MW. Velocidad: 2'44 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

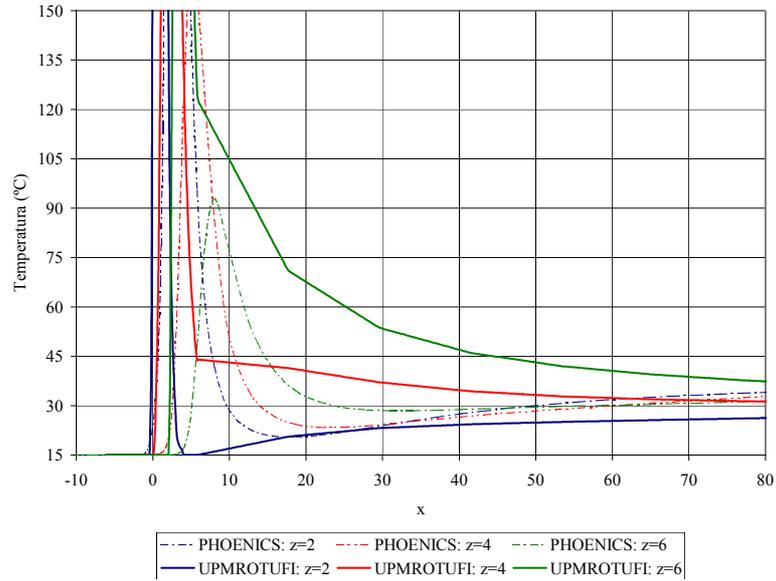


Figura: 6.18: Temperaturas en el plano de simetría del túnel a 2, 4 y 6 m sobre el suelo. Comparación del PHOENICS y del modelo cuasi-unidimensional.

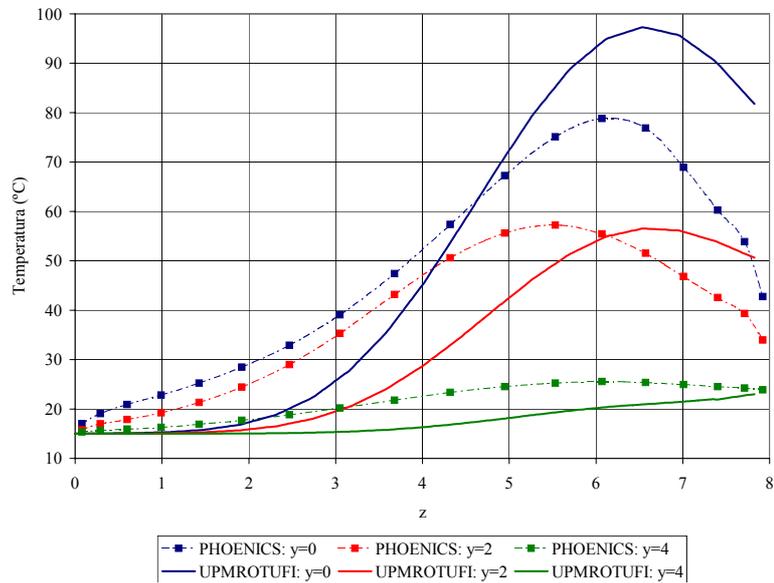


Figura: 6.19: Temperaturas a +10 m del incendio a 0, 2 y 4 m del eje de simetría. Comparación del PHOENICS y del modelo cuasi-unidimensional.

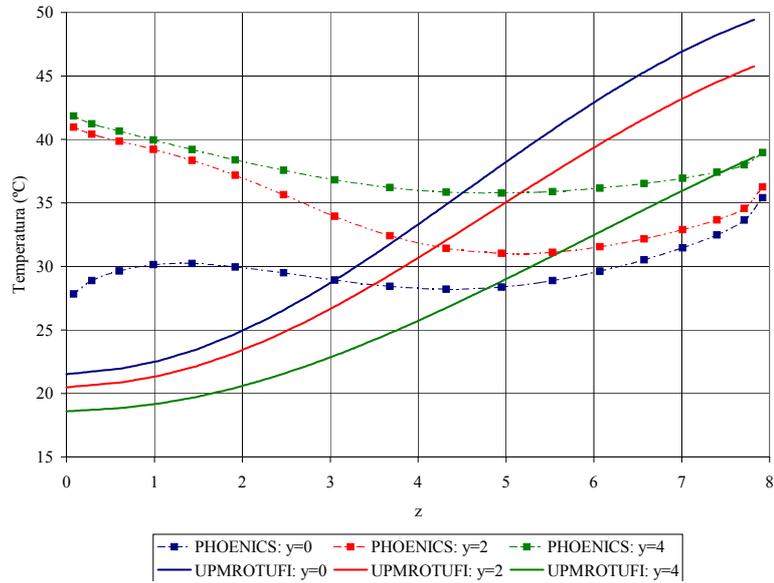


Figura:

6.20: Temperaturas a +50 m del incendio a 0, 2 y 4 m del eje de simetría. Comparación del PHOENICS y del modelo cuasi-unidimensional.

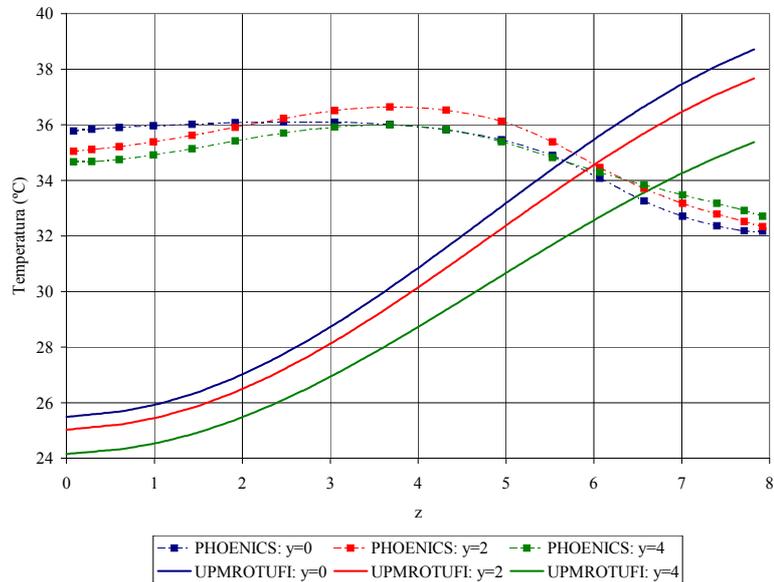


Figura:

6.21: Temperaturas a +100 m del incendio a 0, 2 y 4 m del eje de simetría. Comparación del PHOENICS y del modelo cuasi-unidimensional.

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

6.2.3 - SOLVENT

Con esta aplicación se modeló un incendio de 10 MW, para una velocidad de 3 m/s y una temperatura ambiente de 295 K. En la figura 6.22 se presenta una vista, de un corte longitudinal en el plano de simetría, de las temperaturas obtenidas con el modelo cuasi-unidimensional. En las figuras de la 6.23 a la 6.25 aparecen cortes a 10, 50 y 100 metros aguas abajo del incendio, obtenidas también con dicho modelo. La 6.22 sería equivalente a la figura 5.118 obtenida con el SOLVENT. Las figuras entre la 5.120 y 5.122, conseguidas con dicho programa, son las que hay que comparar respectivamente con la 6.23, 6.24 y 6.25.

La comparación gráfica entre SOLVENT y el modelo cuasi-unidimensional, para el plano de simetría longitudinal, se presenta en la figura 6.26. Se muestran temperaturas a 2, 4 y 6 metros del suelo. Las comparaciones para las secciones transversales se muestran en las figuras 6.27, 6.28 y 6.29 para las secciones a +10, +50 y +100 metros del foco respectivamente. En ellas se representan los valores de temperatura en las verticales a 0, 2 y 4 metros del eje de simetría de la sección.

En general la concordancia con los resultados del SOLVENT es buena, tanto cualitativa como cuantitativamente, sobre todo en las secciones más alejadas del incendio, y mejor que con el FLUENT o PHOENICS. Con el SOLVENT no se aprecian claramente esas zonas circulares de temperatura elevada que surgen en el PHOENICS. La razón de esta discrepancia no está clara, ya que en lo único que difieren estos tres programas comerciales es en la combustión, y esta debería tener solo influencia muy cerca del incendio. La comparación de la evolución de las temperaturas con la altura mejora respecto a lo que ocurría con el PHOENICS. Tanto con el SOLVENT como con el modelo cuasi-unidimensional se aprecia una mayor estratificación de los gases, con una clara tendencia a que estos se acumulen en las cotas superiores. Además, en todas las secciones se aprecia un mayor valor de la temperatura media predicha por el modelo cuasi-unidimensional que por el SOLVENT.

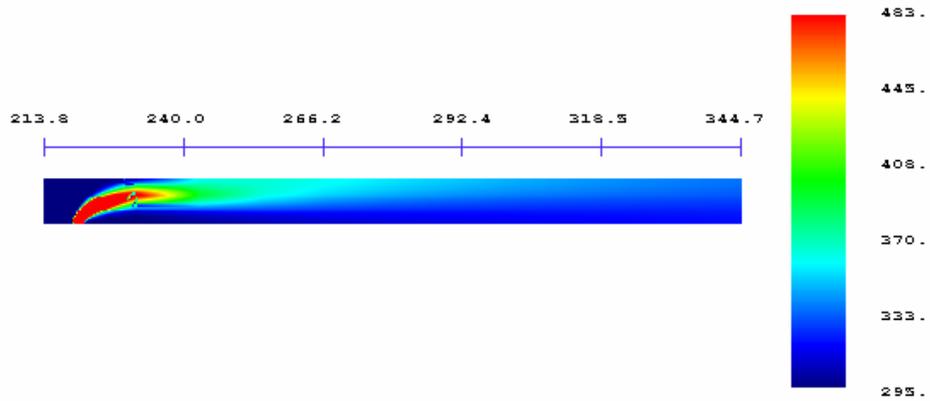


Figura 6.22: Corte longitudinal. Potencia: 10MW. Velocidad: 3 m/s.
Modelo cuasi-unidimensional.

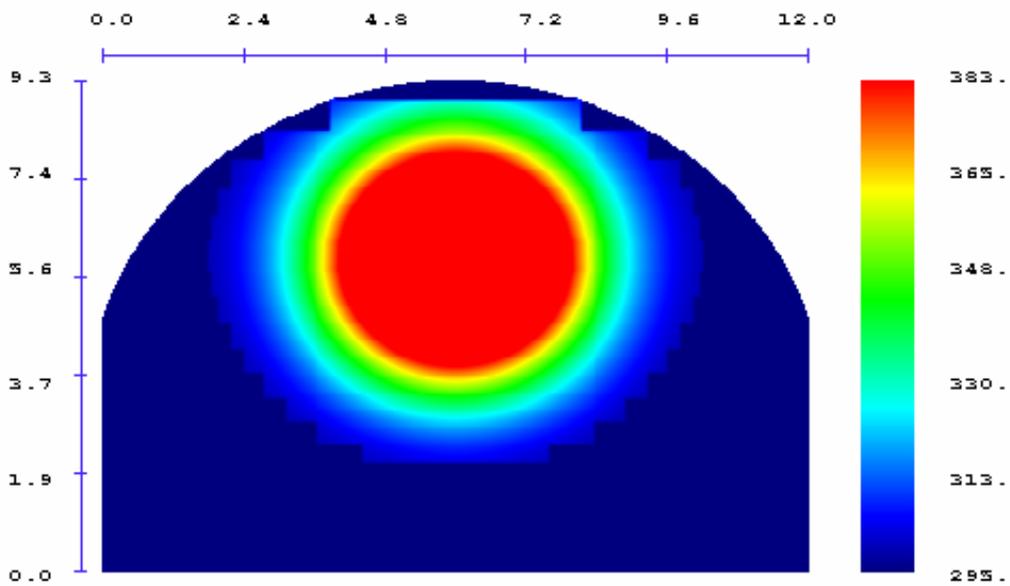


Figura 6.23 Sección 0. Potencia: 10MW. Velocidad: 3 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

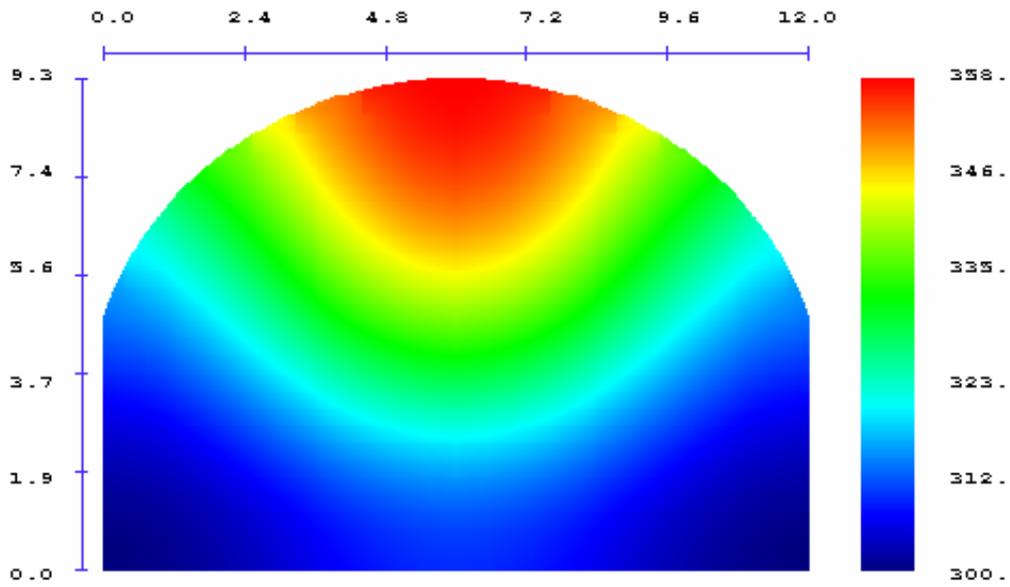


Figura 6.24: Sección 4. Potencia: 10MW. Velocidad: 3 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

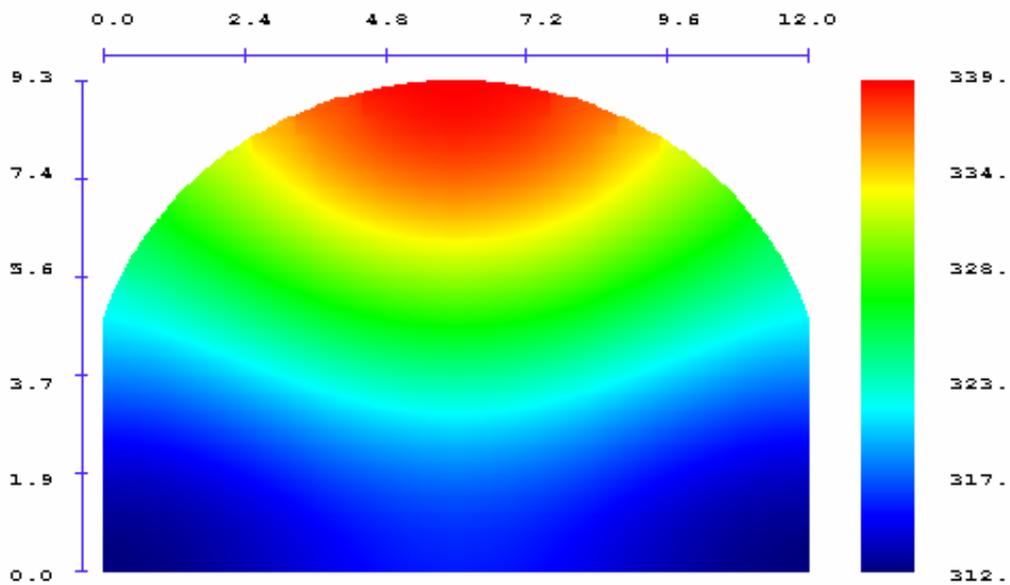


Figura 6.25: Sección 5. Potencia: 10MW. Velocidad: 3 m/s. Modelo cuasi-unidimensional.

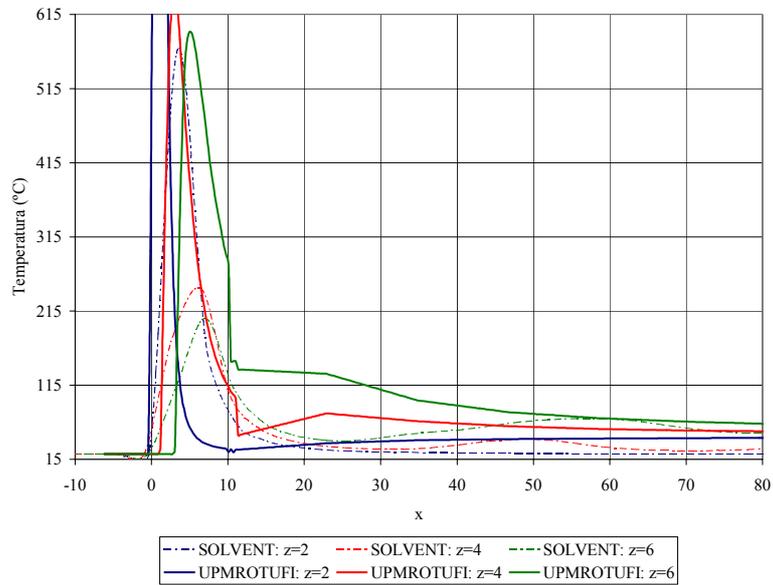


Figura: 6.26: Temperaturas en el plano de simetría del túnel a 2, 4 y 6 m sobre el suelo. Comparación del SOLVENT y del modelo cuasi-unidimensional.

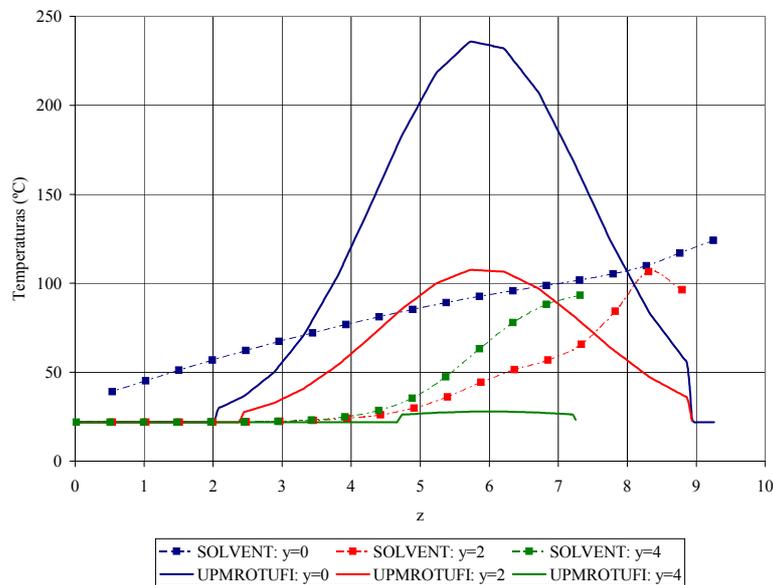


Figura: 6.27: Temperaturas a +10 m del incendio a 0, 2 y 4 m del eje de simetría. Comparación del SOLVENT y del modelo cuasi-unidimensional.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

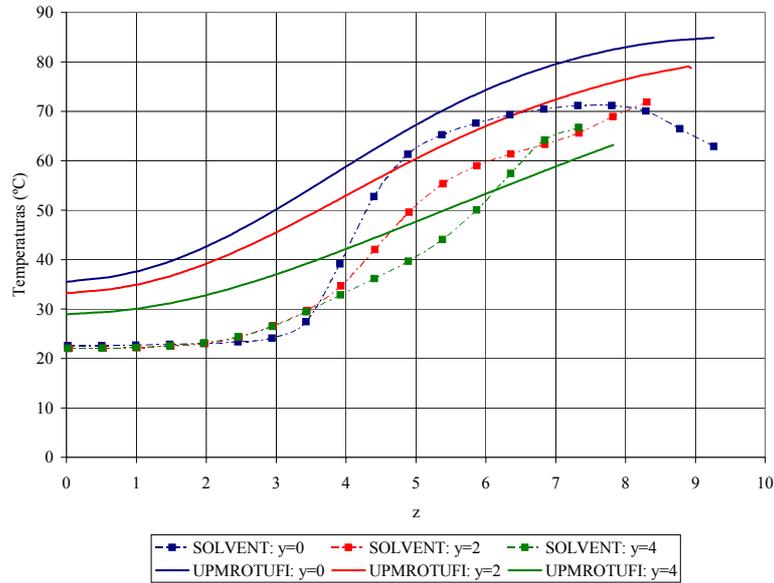


Figura: 6.28: Temperaturas a +50 m del incendio a 0, 2 y 4 m del eje de simetría. Comparación del SOLVENT y del modelo cuasi-unidimensional.

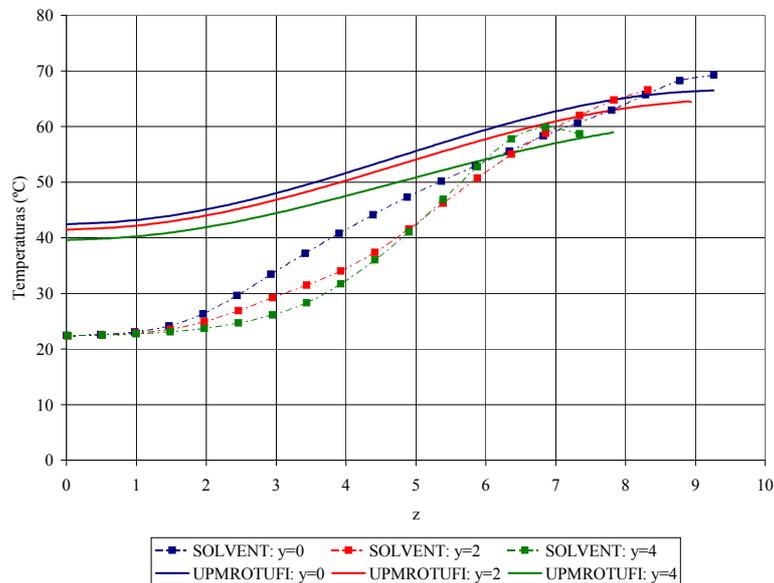


Figura: 6.29: Temperaturas a +100 m del incendio a 0, 2 y 4 m del eje de simetría. Comparación del SOLVENT y del modelo cuasi-unidimensional.

6.3 – OTROS RESULTADOS

En este apartado se presentan algunos otros resultados que tiene un cierto interés pero que no pueden ser contrastados plenamente con resultados experimentales, bien por falta de los mismos o por su incertidumbre.

6.3.1 – RESULTADOS TÍPICOS DEL FRENTE DE AVANCE

En las figuras 6.30 y 6.31 se representa respectivamente el frente de avance de las temperaturas después de 20 y 50 segundos del inicio del fuego. Se trata de un incendio de 10MW con una velocidad de aire de 2'5 m/s, el cual es el caso estudiado con el FLUENT y con el que se ajustó el modelo cuasi-unidimensional.. Para obtener estas figuras se ha empleado el modelo propuesto en el apartado 3.5.2 para el caso no estacionario.

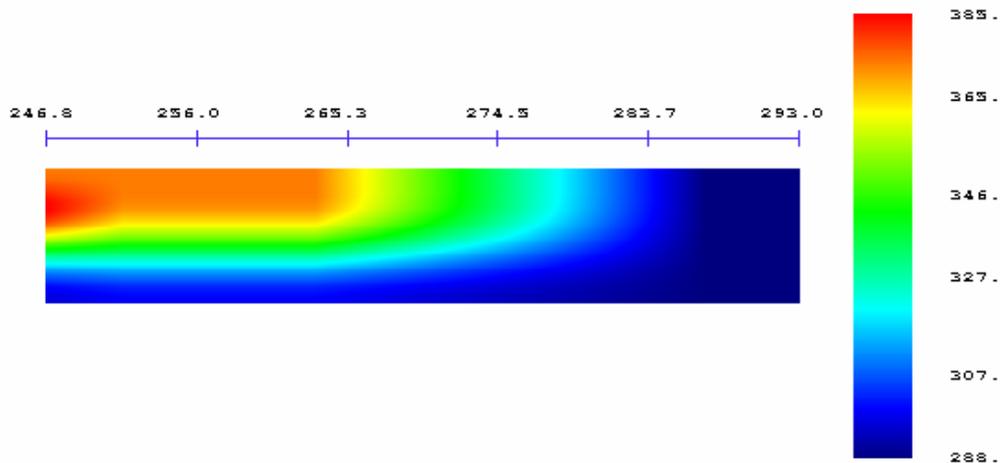


Figura 6.30: Frente de avance después de 20 segundo.
Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

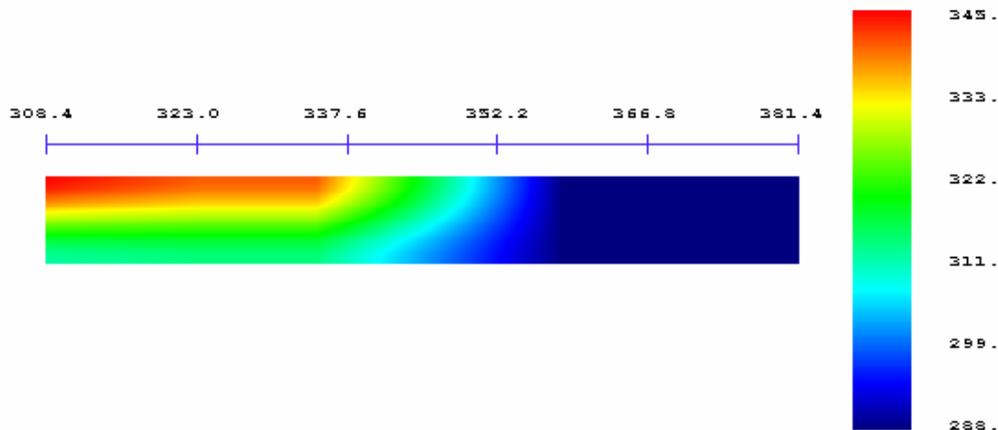


Figura 6.31: Frente de avance después de 50 segundo.
Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

6.3.2 – RESULTADOS TÍPICOS DE VISIBILIDAD Y CONCENTRACIONES

Para ciertas variables como la visibilidad y concentración de contaminantes, las comparaciones con experimentos son muy complicadas ya que se trata de medir en un recinto muy grande. Por ello se decidió hacer las comparaciones únicamente con la temperatura, como se ha hecho en los apartados 6.1 y 6.2.

En las figuras de la 6.32 a la 6.40 se representan los resultados obtenidos para algunas de estas variables, en concreto la visibilidad y la concentración de dióxido de carbono y oxígeno. Estas variables en muchos casos son fundamentales para predecir si existen condiciones que permitan la evacuación segura del túnel. Se muestra para cada una de ellas, sus valores respectivos en las secciones 0, 4 y 5, es decir a 10, 50 y 100 metros aguas abajo del foco, para el mismo caso que las figuras 6.30 y 6.31.

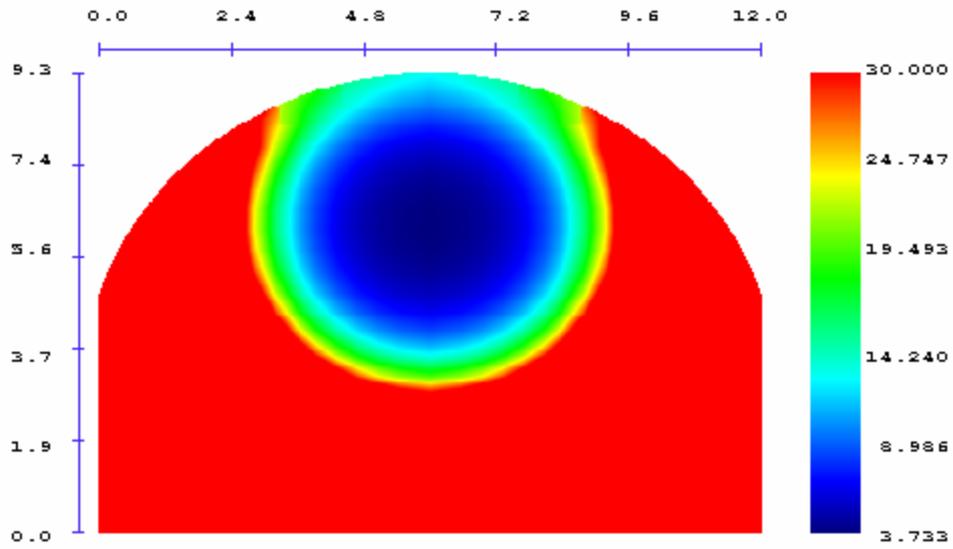


Figura 6.32: Modelo cuasi-unidimensional. Visibilidad.
Sección a 10 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

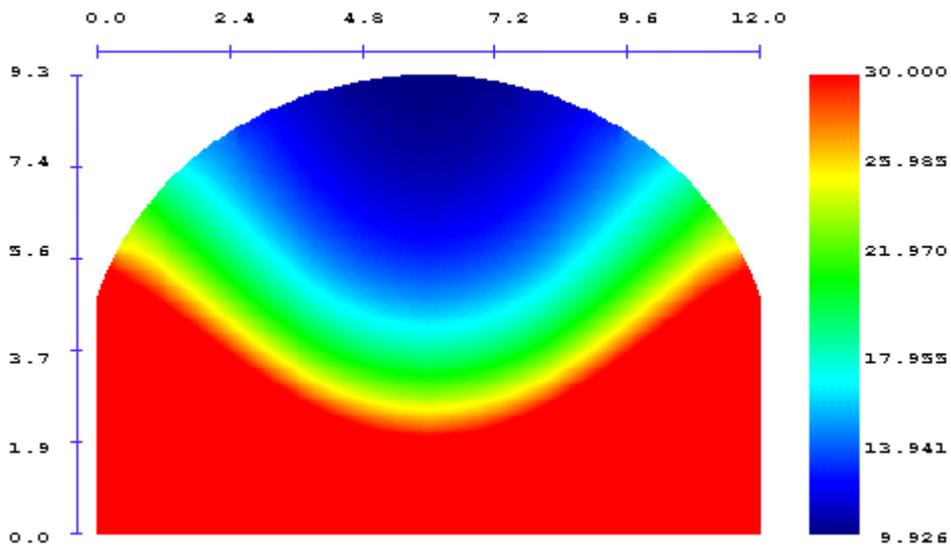


Figura 6.33: Modelo cuasi-unidimensional. Visibilidad.
Sección a 50 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

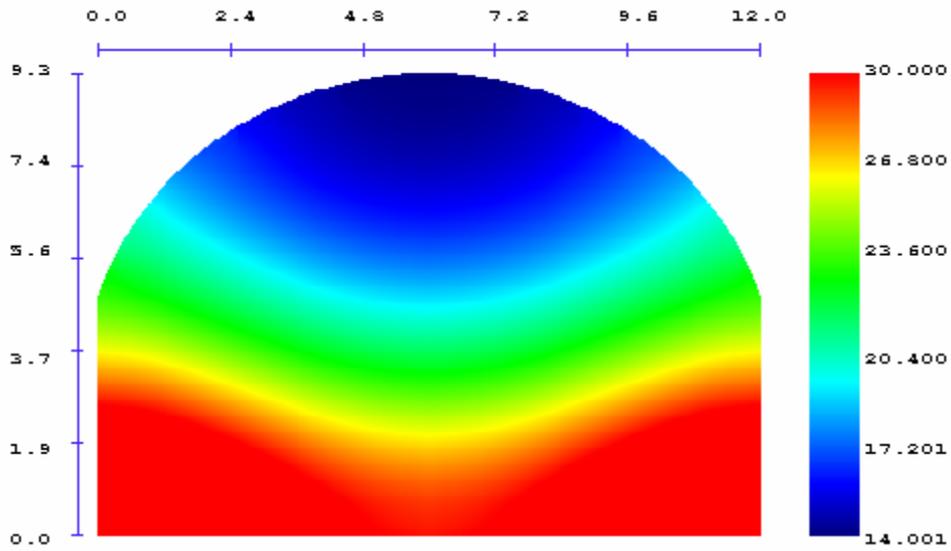


Figura 6.34: Modelo cuasi-unidimensional. Visibilidad.
Sección a 100 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

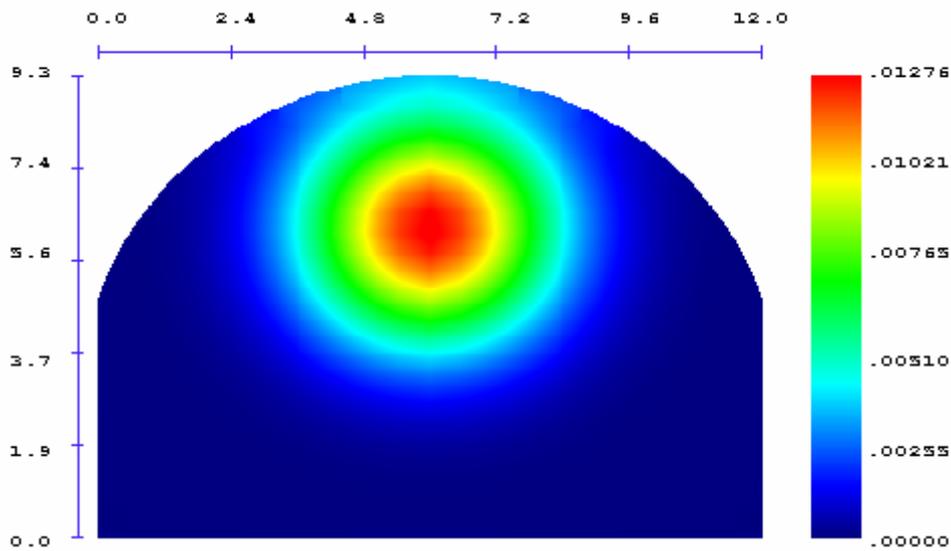


Figura 6.35: Modelo cuasi-unidimensional. Concentración de dióxido de carbono.
Sección a 10 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

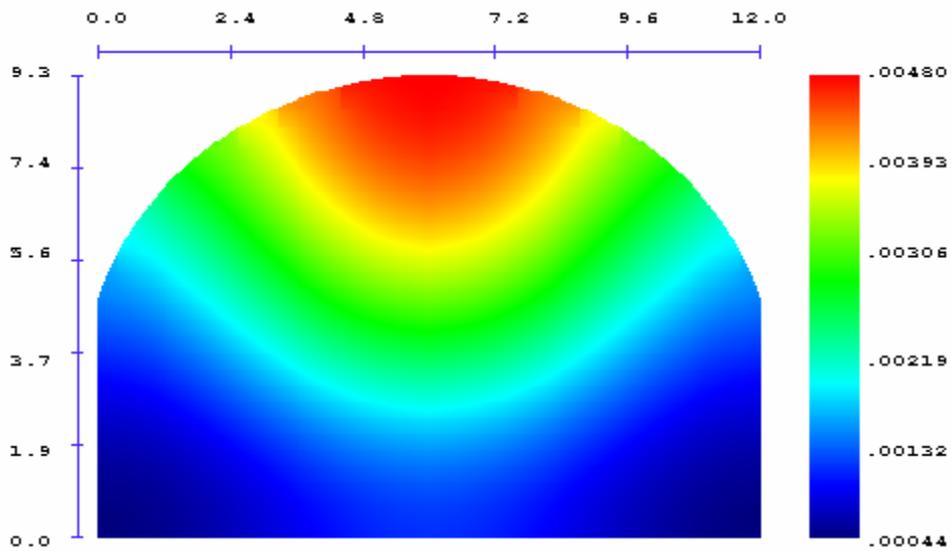


Figura 6.36: Modelo cuasi-unidimensional. Concentración de dióxido de carbono. Sección a 50 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

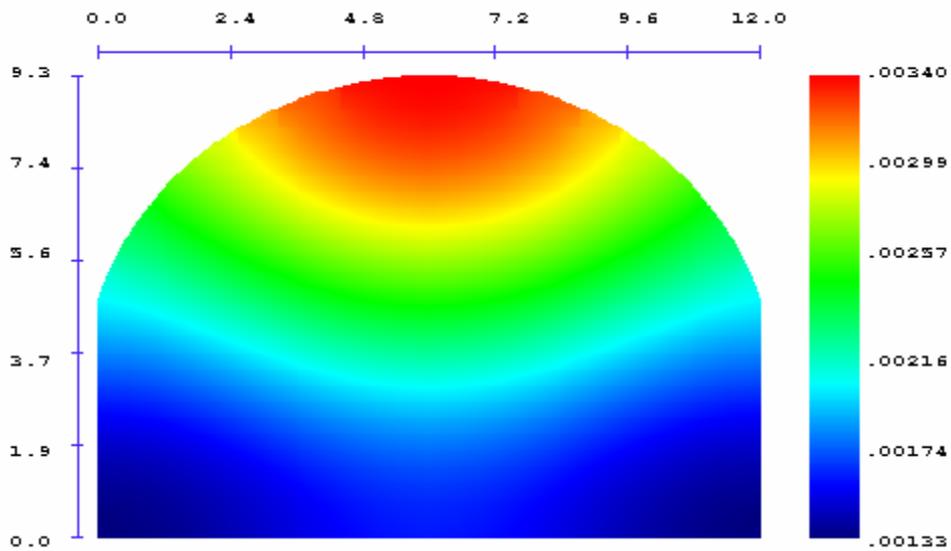


Figura 6.37: Modelo cuasi-unidimensional. Concentración de dióxido de carbono. Sección a 100 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

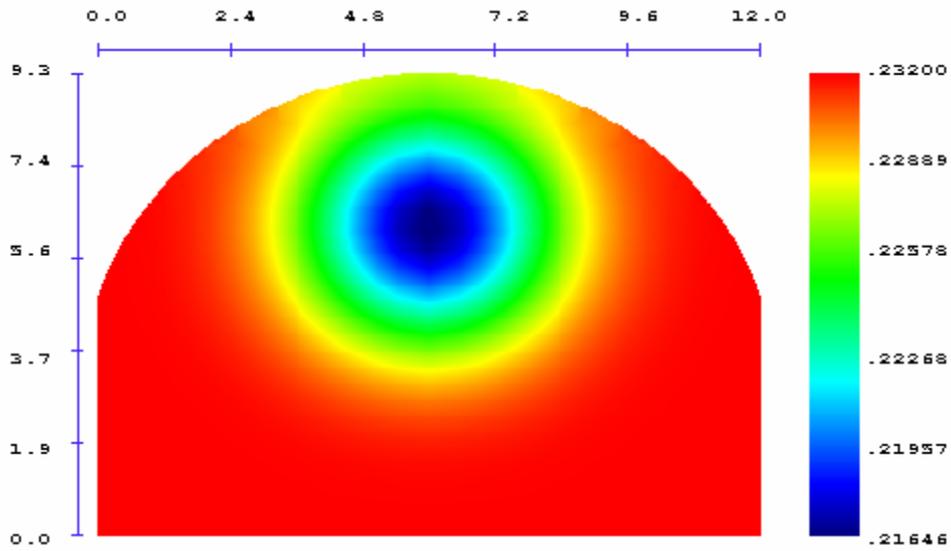


Figura 6.38: Modelo cuasi-unidimensional. Concentración de oxígeno.
Sección a 10 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

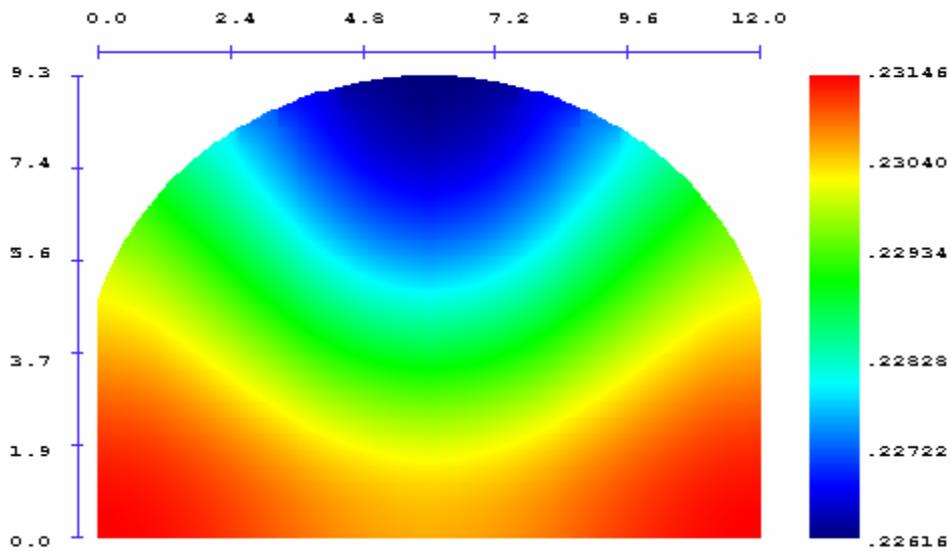


Figura 6.39: Modelo cuasi-unidimensional. Concentración de oxígeno.
Sección a 50 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

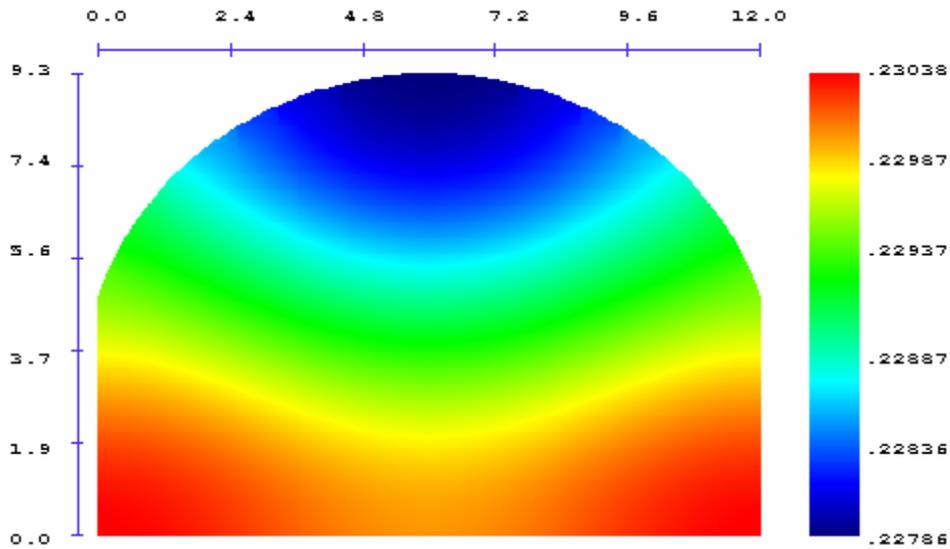


Figura 6.40: Modelo cuasi-unidimensional. Concentración de oxígeno.
Sección a 100 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW. Velocidad de aire 2'5m/s.

6.3.3 – COMPARACIÓN CON RESULTADOS OBTENIDOS EN OTRO TÚNEL

Este apartado no se ha incluido en la parte principal de la tesis debido a la incertidumbre que, como se comentará a continuación, surge a la hora de evaluar la velocidad de ventilación de este estudio. La intención original era comparar con otro ensayo realizado en un túnel con distinta configuración y condiciones de incendio. Con este propósito, se pretendían usar los resultados del ensayo llevado a cabo en el tercer tubo, el de sentido Paracuellos, de los cuatro en que se divide el túnel Barajas-Paracuellos, ver figura 5.1. Se trata de un tubo prácticamente igual que el descrito en el apartado 5.2 pero en sentido contrario. Por tanto ahora el tramo más desfavorable desde el punto de vista de un incendio sería el primero, ya que se tiene que evacuar toda la corriente de gases calientes en sentido contrario del tiro natural, ver figura 5.3. Este tramo es la parte vieja del túnel, antes de las ampliaciones, con lo que su sección y recubrimiento difiere completamente del resto, ver tablas 5.1 y 5.2. Sus características más diferenciadas son que su sección es rectangular, que existen vigas transversales en el techo de dos metros de altura, que imposibilitan la circulación libre de los

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

gases, y que su acabado en las paredes es con ladrillo visto. Estas diferencias con el otro experimento lo convertía en adecuado para la comprobación deseada en un escenario distinto.

Los sensores se dispusieron en las mismas secciones respecto al fuego. En las figuras 6.41 y 6.42 se presentan las secciones a 50 y 100 metros aguas abajo del foco, denominadas 4 y 5 respectivamente. Los sensores precedidos por una T son termopares y los precedidos por una S los anemómetros. Se emplea la misma nomenclatura que la usada en el apartado 5.4.2. El 21 de agosto del 2002 se realizaron los ensayos de vacío, humos e incendio de 5 MW.

Los problemas ya comentados en la prueba de la boca sentido Barajas volvieron a surgir de nuevo. En esta ocasión no se dispusieron de las películas de video para estimar la velocidad, necesarias por las dudas planteadas sobre la precisión de las medidas de los anemómetros. Para poder estimar este valor, se analizaron los resultados obtenidos y se emplearon los resultados del FLUENT, comparándolos a distintas velocidades con los experimentos, figura 6.43. Por estos procedimientos se estimó la velocidad en unos 6 m/s para la sección libre por debajo de las vigas. Para dicha velocidad, se usó el modelo cuasi-unidimensional con distintos valores de coeficiente C , ecuación 3.49, y k_m , ecuación 3.138, obteniéndose la figura 6.44. Se eligieron como valores adecuados, $C = 2$ y $k_m = 0.55$. La variación respecto a los supuestos en el apartado 6.1.1 se debe a la diferente sección del túnel, la altura de la sección libre, descontando las vigas, disminuye de 9.25 a 6.45, y al aumento de la rugosidad de la pared. En la figura 6.44 se observa la notable coincidencia entre los resultados tanto experimentales como numéricos obtenidos con el FLUENT y el modelo cuasi-unidimensional.

En las figuras de la 6.45 a la 6.50 se muestran los resultados gráficos, alternativamente para el FLUENT y el modelo cuasi-unidimensional, primeramente para una vista longitudinal y posteriormente para las secciones a 50 y 100 metros aguas abajo del incendio, secciones 4 y 5 de medida respectivamente. Las figuras muestran únicamente la sección hasta una altura de 6.45 metros, es decir la sección libre por debajo de las vigas. Se hace notar las diferentes escalas de colores usadas en todas ellas y como los resultados concuerdan satisfactoriamente. El mayor efecto diferenciador es que, para el modelo cuasi-unidimensional, la sección superior de las vigas es maciza, por lo que no existe acumulación de gases calientes en el volumen comprendido entre ellas y consiguientemente no se refleja la caída de los mismos por las paredes. Además, en el FLUENT, las temperaturas máximas entran en dicho volumen por lo que los máximos son a mayor cota y no aparecen en sus figuras correspondientes.

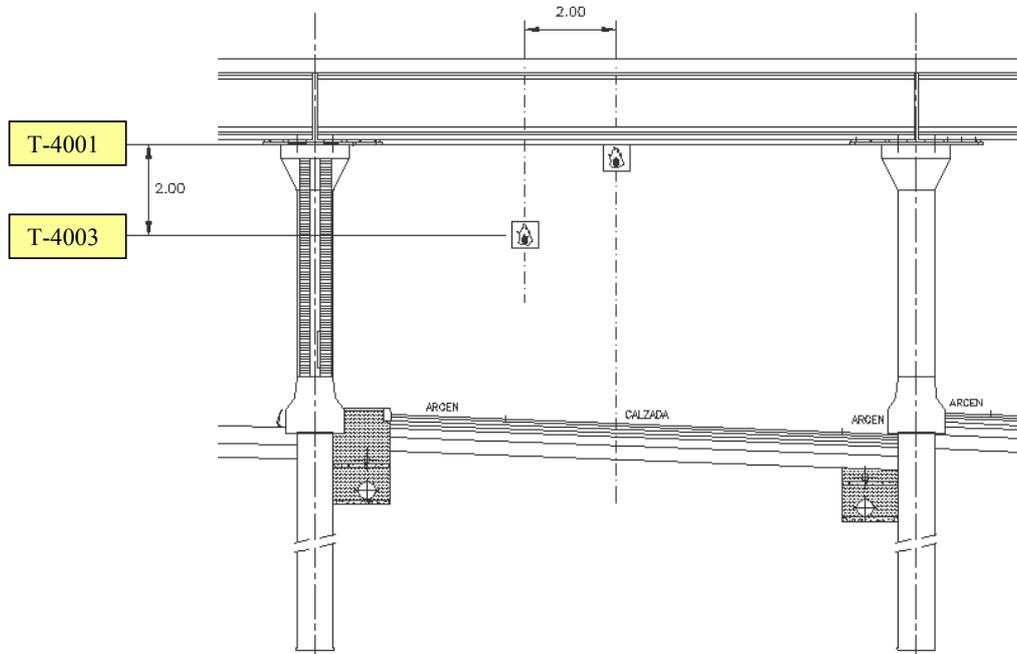


Figura 6.41: Sensores en la sección 4 del túnel sentido hacia Paracuellos.

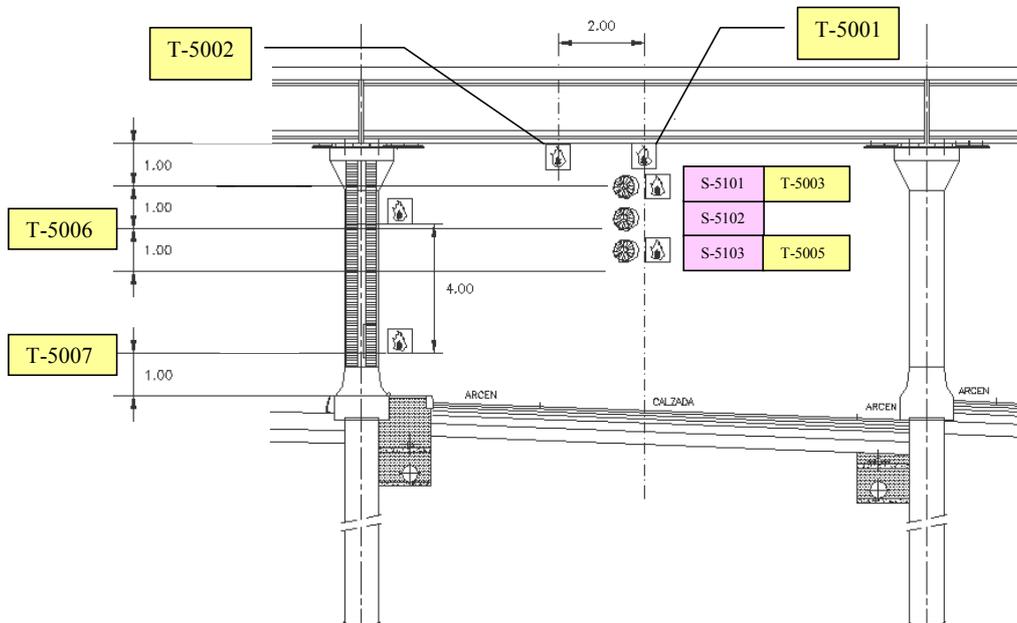


Figura 6.42: Sensores en la sección 5 del túnel sentido hacia Paracuellos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

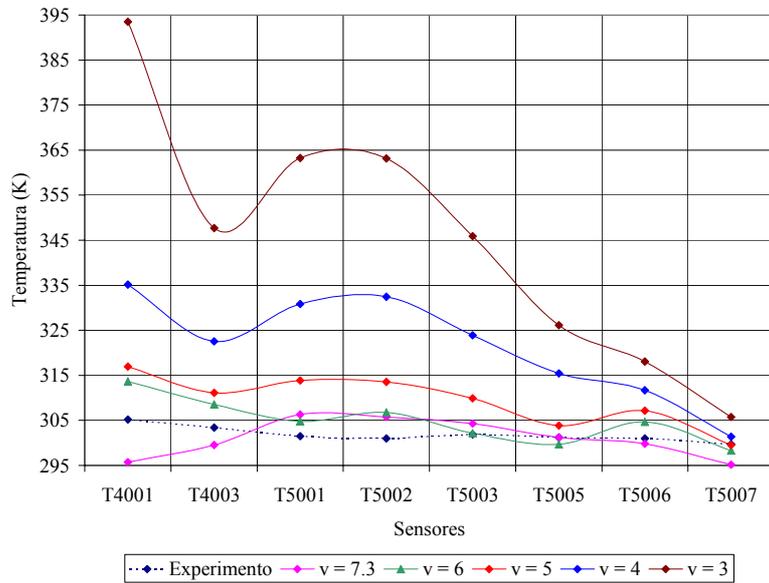


Figura 6.43: Comparación de los resultados experimentales con los numéricos del FLUENT a distintas velocidades. Potencia 5 MW.

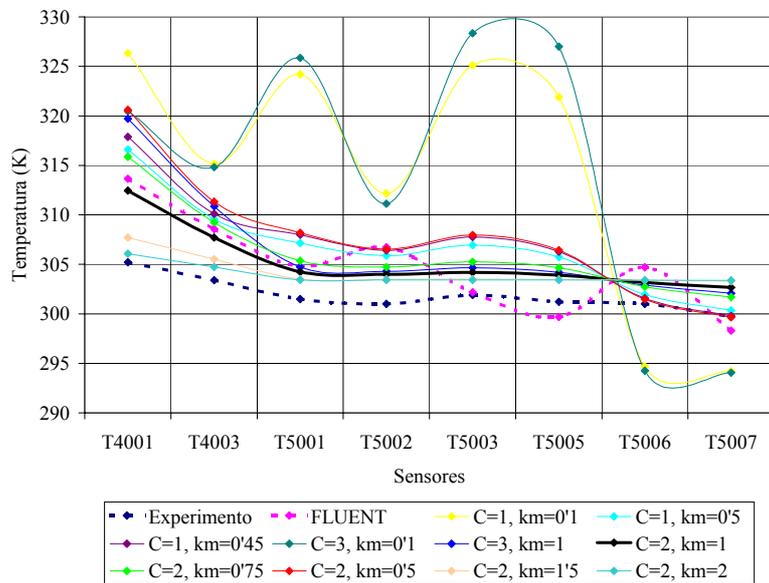


Figura 6.44: Resultados experimentales, FLUENT y del modelo cuasi-unidimensional para distintos valores de C , ecuación 3.49, y k_m , ecuación 3.138, Velocidad 6 m/s. Potencia 5 MW.

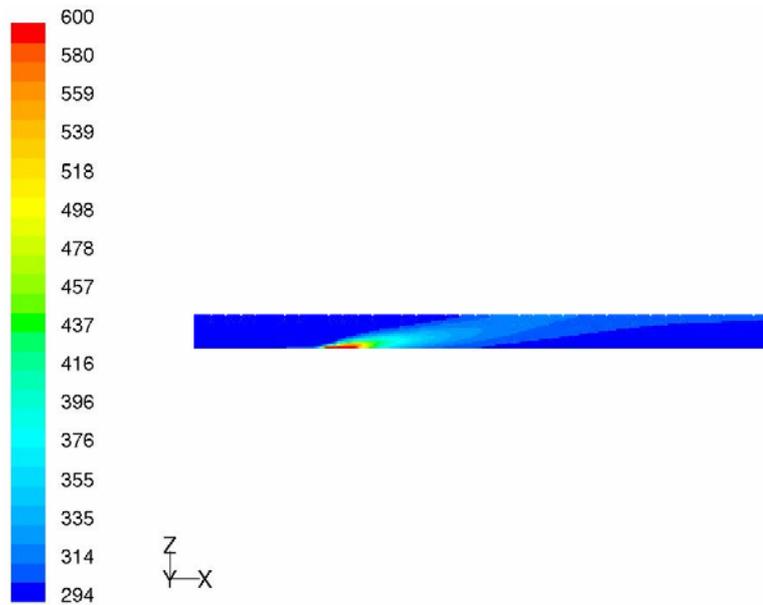


Figura 6.45: FLUENT. Velocidad: 6 m/s. Potencia 5 MW.
Temperaturas longitudinales. Sentido Paracuellos.

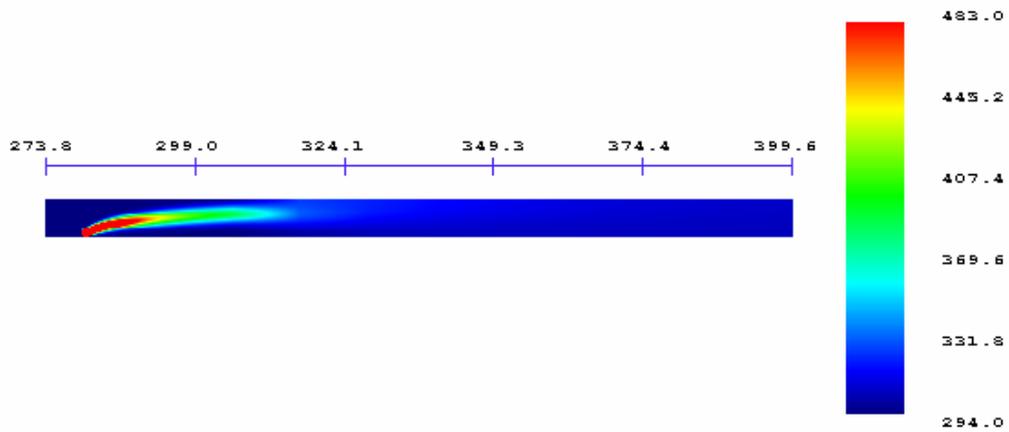


Figura 6.46: Modelo cuasi-unidimensional. Velocidad: 6 m/s. Potencia 5 MW.
Temperaturas longitudinales. Sentido Paracuellos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

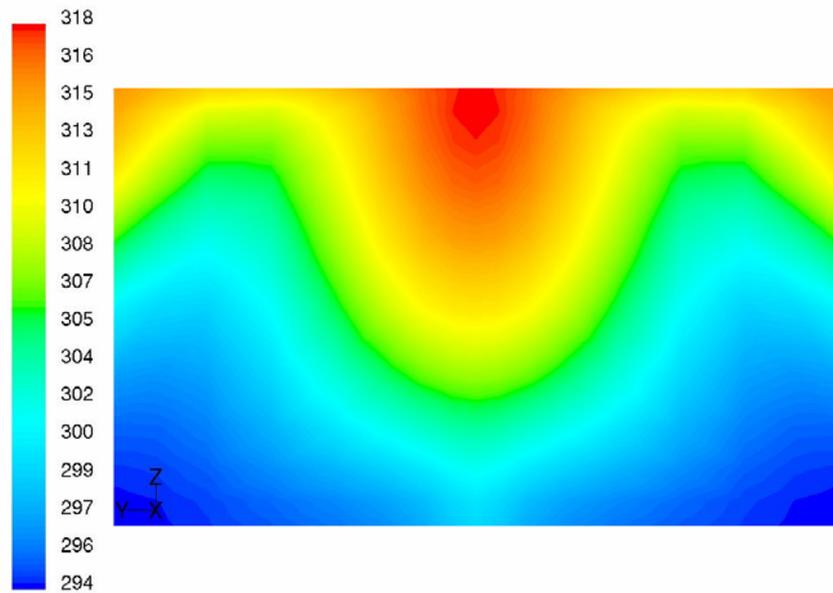


Figura 6.47: FLUENT. Velocidad: 6 m/s. Potencia 5 MW.
Sección 4. Temperaturas. Sentido Paracuellos.

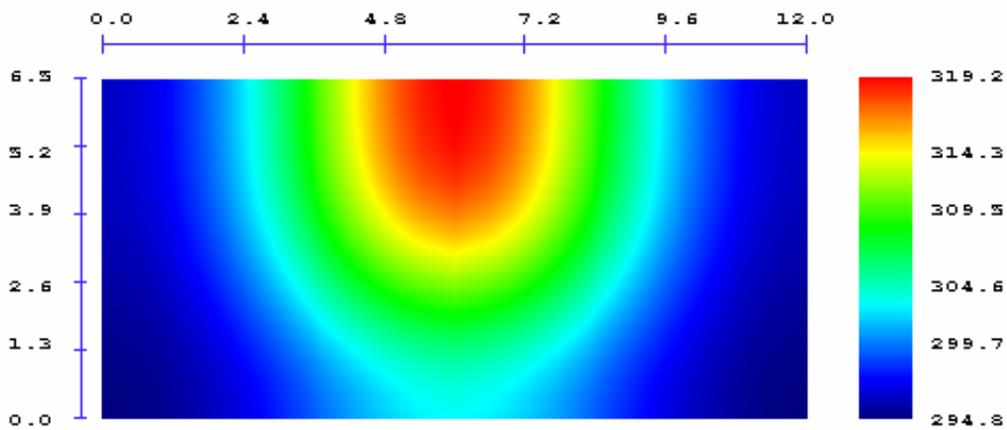


Figura 6.48: Modelo cuasi-unidimensional. Velocidad: 6 m/s. Potencia 5 MW.
Sección 4. Temperaturas. Sentido Paracuellos.

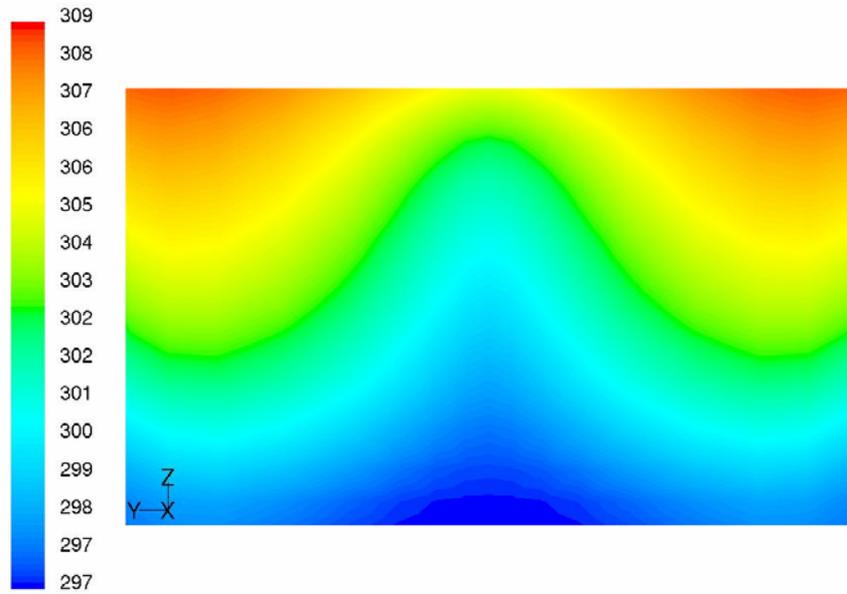


Figura 6.49: FLUENT. Velocidad: 6 m/s. Potencia 5 MW.
Sección 5. Temperaturas. Sentido Paracuellos.

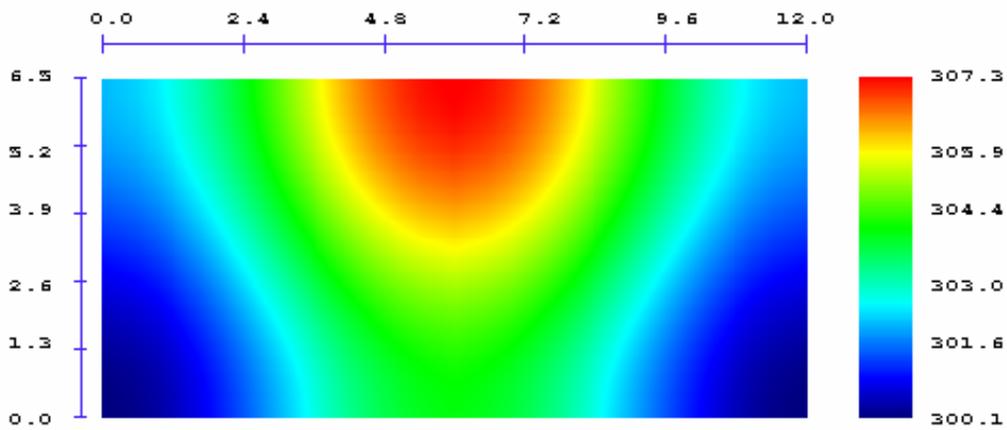


Figura 6.50: Modelo cuasi-unidimensional. Velocidad: 6 m/s. Potencia 5 MW.
Sección 5. Temperaturas. Sentido Paracuellos.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y APLICACIONES

7.1 – VALIDEZ DEL MODELO

El objetivo de la presente tesis era encontrar un método **rápido** de calculo que nos permitiese conocer, ante una potencia de incendio y velocidad de ventilación dadas, si el sistema de ventilación de un túnel es suficiente para garantizar la seguridad de usuarios, bienes e instalaciones. Las hipótesis planteadas para alcanzar dicho objetivo llevan a la mayor de las limitaciones del modelo, la necesidad de una velocidad mínima de aire, por lo que no se considera el retroceso de humos aguas arriba del incendio en caso de velocidades bajas. En el apartado de memoria y de la validación se comentaron distintos procedimientos para calcular la velocidad necesaria para que, aguas arriba del foco, el túnel estuviese libre de humos. Este valor es función, principalmente de la potencia y en segundo lugar de la geometría del túnel. A mayor potencia mayor será la velocidad de aire necesaria para tumbar la llama y enviar los humos hacia aguas abajo.

Para casos en que la contención del incendio fuese límite, se ha descrito un procedimiento para estudiar el calor por radiación que incide sobre un objeto situado aguas arriba del incendio. Típicamente se trataría de una persona herida que no pudiese huir o de un coche que no puede seguir su marcha por que el incendio le cierra el paso en su sentido de circulación. En el primer caso, según el tiempo de exposición y la radiación que incida, la persona afectada puede sufrir daños mortales por las quemaduras ocasionadas sin necesidad de

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

estar en contacto directo con el incendio. En el caso del coche, se pueden alcanzar condiciones tales que se produzca su autoignición con lo cuál aumentaría la potencia del incendio y sus efectos dañinos. Mediante los cálculos numéricos de los factores de forma de la llama, fondo de gases calientes aguas abajo y capa de humos calientes aguas arriba, se puede dar una estimación de esa radiación incidente y saber si se sobrepasan los umbrales de daño según la dosis y tiempo de exposición. Como ya se ha dicho, con el modelo presentado no se podría calcular ese retroceso de gases calientes en el techo, que habría que calcularlo mediante otros programas, tipo FLUENT, PHOENICS o SOLVENT.

En primera aproximación las paredes han sido consideradas adiabáticas. La conductividad de calor se toma lo suficientemente baja para que no se almacene en las mismas una cantidad de calor significativa durante el tiempo en que deberían actuar los sistemas de detección, evacuación y extinción del incendio. Se ha comprobado en accidentes ocurridos, y mencionados en el capítulo introductorio, como en muchas ocasiones un incendio en un túnel se convierte en una situación difícilmente abordable por los sistemas tradicionales de apagado del incendio. Muchas veces hay que esperar simplemente a que se consuma el combustible presente. En estas situaciones, la hipótesis de paredes adiabáticas sería conservadora, ya que no se produciría pérdidas al contorno. Por tanto el calor y las temperaturas calculadas serían más elevadas que las reales.

La necesidad de un equilibrio entre rapidez y exactitud obligaron a limitar la consideración de ciertos fenómenos. El más importante de ellos sería el carácter estacionario del estudio. A pesar de ello, se apunta una línea para extenderlo fácilmente a situaciones no estacionarias. El presente modelo da resultados interesantes para el dimensionamiento de las instalaciones y conocer la situación final alcanzada en cuanto a las principales magnitudes peligrosas en un incendio: temperatura, concentración de especies contaminantes y visibilidad. En todo caso daría valores, de los parámetros significativos, una vez establecida la potencia máxima del incendio, con lo cuál se sobredimensionaría el equipo, siempre estando del lado de la seguridad. Sin embargo, los instantes iniciales de un incendio son muy importantes, más si cabe en recintos confinados. Conocer el tiempo de que disponen los usuarios para la evacuación y las condiciones alcanzadas durante la misma, permitiría hacer unos mejores planes de actuación tanto desde el punto de vista de la evacuación como de las labores de extinción. Con el caso estacionario nos situamos seguramente en instantes posteriores a los tiempos de detección, evaluación y respuesta.

7.2 –ANÁLISIS DE LAS APLICACIONES

La principal ventaja del método desarrollado es que el tiempo de cálculo es tan pequeño, teniendo en cuenta los múltiples aspectos físico-químicos considerados, que permite hacer multitud de simulaciones para poder evaluar múltiples escenarios según el sistema de ventilación diseñado. Sin embargo, debido a la complejidad del problema planteado, otros programas y modelos tardan varios órdenes de magnitud de tiempo más que el presentado en esta tesis. Como ejemplo se pueden mencionar los casos utilizados para la validación de los resultados. El FLUENT y el PHOENICS emplean semanas en llevar a cabo todo el proceso, incluyendo la creación de la geometría, el mallado, asignar las condiciones de contorno y llevar a cabo los cálculos. En el SOLVENT, los pasos anteriores al cálculo propiamente son bastante rápidos pero el cálculo en si mismos, aunque dura menos que el FLUENT o el PHOENICS, puede llevar varios días. El modelo presentado en esta tesis resuelve el problema en minutos, incluyendo todo el trabajo. En muchas ocasiones sería más rápido el cálculo que el tiempo necesario para crear el caso a estudio.

Una segunda ventaja, que amplía su rango de aplicación, son los requisitos del material necesario para los cálculos. En programas comerciales de tipo generalista, se necesitan estaciones de trabajo muy potentes para abordar el problema, principalmente debido al tamaño de malla necesario. En muchos casos, las empresas o instituciones que realizan cálculos de este tipo no disponen de estos ordenadores para poderlos emplear por su elevado coste. Programas más centrados en un problema concreto, caso de la presente tesis o del SOLVENT, pueden ser empleados en un simple PC con inversiones mucho menos cuantiosas que en los otros casos.

Una última ventaja, que hace que el rango de empleo sea más elevado, es la necesidad de personal especialista para su aplicación. En los programas que abordan el problema fluidomecánico sin particularizarlo, los generalistas, son necesarios trabajos de una complejidad relativamente elevada para poder establecer las condiciones que nos delimitan el problema y la forma de resolver las ecuaciones del modelo. Son precisos conocimientos considerables del problema físico y de las herramientas matemáticas para resolverlo. Por el contrario en modelos como el presente, o en general los no generalistas, los conocimientos del

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

usuario no necesitan ser tan elevados, reduciéndose muchas veces a saber definir el problema e interpretar los resultados.

Por tanto la principal aplicación de la presente tesis radica en estudios que necesiten los resultados de una variada batería de problemas con vistas a conocer las bondades de un sistema de ventilación: necesidad de aumentarlo para llegar a condiciones seguros o la posibilidad de no sobredimensionarlo en caso de que se excedan las necesidades del túnel. Todo ello se consigue sin necesidades de hardware y personal sofisticado.

7.2.1 – PLANES DE ACTUACIÓN

Una aplicación típica que se podría hacer de este modelo es crear planes de actuación. En dichos planes se pretende tener sistematizada cuál debería ser la forma de actuar del operador del centro de control o la secuencia de operaciones a programar en un sistema automático de toma de decisión. En cualquiera de los casos se trataría de determinar la magnitud del incendio y según ella saber cuál es la decisión más adecuada para minimizar el daño a los usuarios, bienes e instalaciones.

Se debe buscar un óptimo de velocidad. Una velocidad alta permite diluir los gases de la combustión para conseguir disminuir la temperatura y concentración de gases inertes y aumenta la visibilidad. Una velocidad baja se emplea para no avivar el incendio, no tumbar la llama (evitar el flashover y anclaje de la llama) y dar tiempo a personas atrapadas aguas abajo a huir (velocidad del frente \approx velocidad de ventilación). En túneles bidireccionales con ventilación longitudinal se pretendería contener los humos para que se propaguen lo menos posible hacia cualquiera de las bocas y así dar tiempo a los usuarios retenidos en ambos sentidos a escapar. En los unidireccionales se supone que escaparán sin problemas los vehículos que se encuentran aguas abajo del incendio en el sentido de la circulación. Para salvaguardar a los que están aguas arriba, cuyo camino se ha visto cerrado por el fuego, y cuando se dispone de ventilación longitudinal, se impulsa en el mismo sentido de la circulación para intentar evitar que los humos retrocedan y los afecten.

Se pueden establecer criterios de peligrosidad en función de la temperatura, visibilidad y concentración de las especies:

- Supervivencia:

$$Y_{CO} < 200\text{ppm} = 2 \cdot 10^{-4} \quad (7.1)$$

$$Y_{O_2} > 16 \% \text{ durante minuto} = 0'16 \quad (7.2)$$

$$t < 60 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7.3)$$

- Visibilidad $> 10 \text{ m}$
- Flashover para temperaturas mayores de $400 \text{ }^\circ\text{C}$
- Radiación mortal en una habitación a temperaturas mayores de $200 \text{ }^\circ\text{C}$

Todos los criterios anteriores se pueden poner en función de la fracción de mezcla y así sacar cual de ellos es el más restrictivo. Para el caso anterior sería la visibilidad, lo cual equivaldría a una fracción de mezcla de 10^{-3} . Según la ventilación y potencia de incendio se pueden encontrar los puntos en que se alcanza dicho valor a una altura determinada. La altura típica podría ser de 2 metros, algo más que la altura de un coche o una persona. De esta forma surgen figuras de la forma del esquema 7.1, o de los cortes longitudinales del capítulo anterior. Por ejemplo, en la serie de figuras de la 5.77 a la 5.79 se puede observar como evoluciona el perfil de la temperatura y la posible zona segura con la intensidad de la ventilación. En la figura 7.1 se ve que a 3 longitudes distintas desde el incendio se alcanzan condiciones peligrosas a la altura de referencia. Esas 3 longitudes: L_1 , L_2 y L_3 , dividen el túnel en zonas consideradas seguras o peligrosas a la altura considerada. L_1 y L_2 disminuyen con la potencia y aumentan con la velocidad de ventilación, L_1 ligeramente y L_2 bruscamente, mientras que L_3 aumenta con la potencia y disminuye con la velocidad de aire.

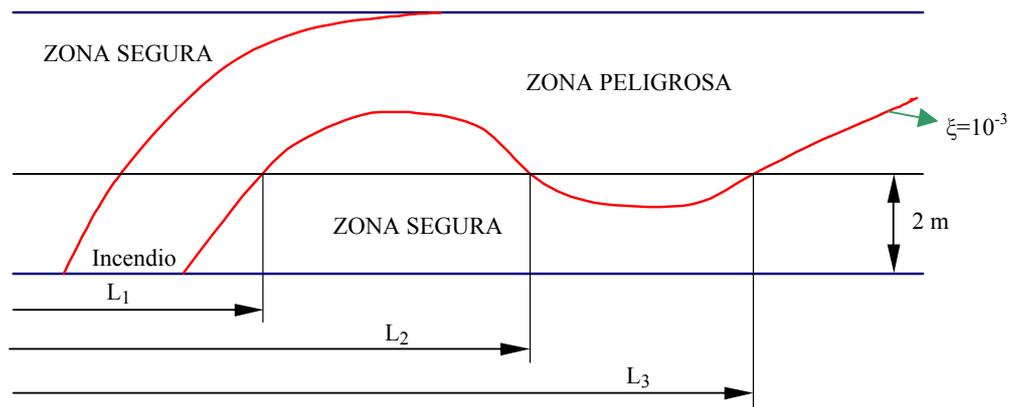


Figura 7.1: Esquema de zonas segura y peligrosa

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Un ejemplo de estudio del tipo anterior se llevó a cabo para el túnel de la autovía del Mediterráneo E-15, antigua N-340, a su paso por la localidad murciana de Lorca, Crespo 1998. Se trata de un túnel de 920 metros de largo con sección abovedada de unos 65 m², 4 ventiladores que dan velocidades de hasta 17 m/s e incendio situado a 230 metros de la entrada, figura 7.2. Según el número de ellos que estén en funcionamiento se alcanzará una velocidad de impulsión mayor o menor. En la tabla 7.1 aparecen dichas velocidades.

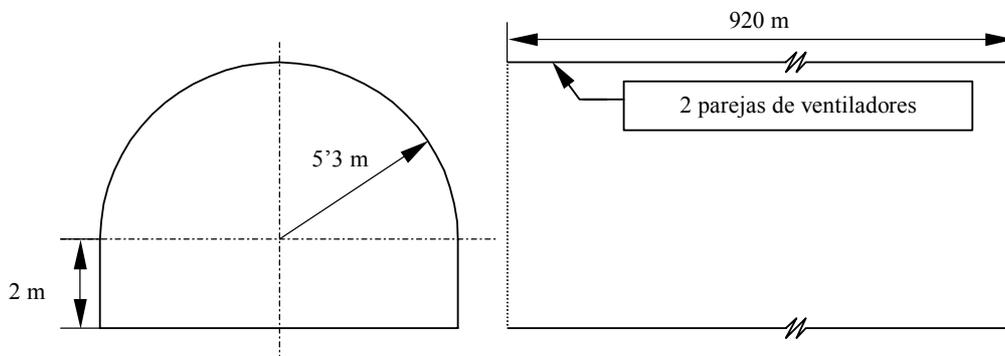


Figura 7.2: Túnel ejemplo para un plan de actuación.

nº de ventiladores	Viento (m/s)	Incendio
1	8.5	27 MW
2	12	38 MW
3	14.5	46 MW
4	17	53 MW

Tabla 7.1: Velocidades de ventilación y potencia máxima de incendio para que exista zona segura en todo el túnel según el número de ventiladores.

En el caso unidireccional con ventilación longitudinal del ejemplo anterior, para una velocidad de viento y potencia determinadas, la figura 7.3 muestra en color azul la zona peligrosa, aquella que sobrepasa los límites fijados con anterioridad. Este caso se trata de una potencia de 20 MW a dos velocidades, 6 y 7 m/s. Se puede observar como, al aumentar la velocidad de aire, disminuye la capa de humos peligrosa.

a) Velocidad de aire 6 m/s.



b) Velocidad de aire 7 m/s.



Figura 7.3: Zona peligrosa. Incendio: 20 MW a 230 m de la boca.

Ejecutando el modelo para distintas velocidades de aire y potencias de incendio se conseguirían figuras del tipo de la 7.4. En dicha figura se muestra, también para el ejemplo anterior pero con una potencia de 60 MW, un camión cisterna de combustible, la distribución de longitudes L_1 , L_2 y L_3 para distintas velocidades de aire. La velocidad recomendada sería aquella en la que L_2 coincide con L_3 (zona segura en todo el túnel desde L_1) o en su defecto que no exista L_2 . Se observa como esa velocidad valdría 18'45 m/s. Así mismo se podría saber cual es la longitud de túnel segura según el número de ventiladores en funcionamiento. Con los 4 a plena potencia, 17 m/s, existiría una zona entre los 593 y los 856 metros desde la entrada en que no existiría zona segura. Del fuego, situado a 230 hasta los 593 metros, existiría una zona segura. Tema aparte sería saber el tiempo que una persona atrapada en dicha zona podría sobrevivir a la radiación de los gases que existirían sobre ella..

En la tabla 7.1 aparecía la potencia de incendio que se conseguiría controlar según el número de ventiladores en funcionamiento. En la tabla 7.2 aparece la velocidad de ventilación necesaria para conseguir el objetivo de zona segura en todo el túnel en función de la potencia del incendio. En la tabla 7.3 se muestra el número de ventiladores mínimos que conseguirían controlar los rangos de potencia de incendio indicados. En principio esta sería la solución que debería proponer el plan de actuación ya que aumentar la velocidad perjudicaría en otros aspectos ya señalados anteriormente.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

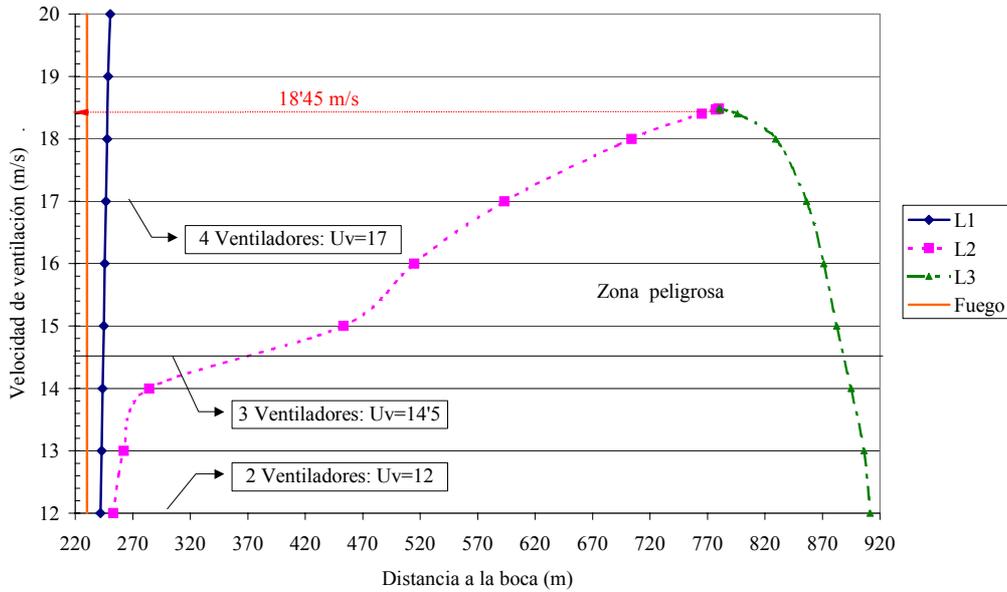


Figura 7.4: Ejemplo de estudio de zonas peligrosas para distintas velocidades de aire.

Potencia (MW)	Viento (m/s)
5	<3
10	3.15
25	7.85
40	12.45
60	18.45
100	30.26

Tabla 7.2: Velocidad de viento para que $L_2 = L_3$ según la potencia del incendio.

n° de ventiladores	Incendio
1	Pot (MW) < 27
2	27 < Pot (MW) < 38
3	38 < Pot (MW) < 46
4	46 < Pot (MW) < 53

Tabla 7.3: Número de ventiladores necesarios según la potencia del fuego.

En el ejemplo anterior, para potencias mayores de 53 MW no se podría lograr una zona segura aguas abajo del incendio con la ventilación proyectada. En realidad, las normativas y recomendaciones, tanto nacionales como internacionales, son menos exigentes y no obligan a que exista esa zona segura que se ha exigido anteriormente para la seguridad de los usuarios. Lo que si que fijan es la contención de los humos aguas abajo del foco, que no exista retorno aguas arriba. Este sería el criterio de velocidad crítica visto en el apartado 1.3.6. Para emplear dicho criterio mediante el modelo cuasi-unidimensional, se puede usar uno equivalente consistente en confinar los humos del incendio según el ángulo de impacto con el techo. Fijando un ángulo máximo entre la corriente ascendente y la horizontal, sabríamos la velocidad mínima necesaria para que el penacho se incline lo suficiente para que no exista retorno de humos. En la tabla 7.4 se muestran, en función de la potencia, los ángulos de impacto con el techo y la velocidad de ventilación que los origina para el ejemplo de Lorca.

Uv (m/s)	1.5 MW	5 MW	10 MW	40 MW	60 MW	100 MW
10			10.9	21.1	25	31.7
9			12.7	24.5	29	36
8			15.1	28.6	34	41
7			18.3	34	39	47
6	9.1	16.4	22.7	40.8	47	54
5	11.9	21.3	29.1	49.5	55	62
4	16.5	28.9	38.6	59.6	64.7	70
3	24.8	41.5	52.4	70.2	73.7	77
2	41.9	60.7	69.2	79.4	81.9	82
1	71.6	80	82.8	86	86.6	87
0.5	83.6	86.2	87.1	88.3	88.5	88.5

Tabla: 7.4: Angulo de impacto con el techo del penacho del incendio.

7.3 – TRABAJOS FUTUROS

Dada la enorme complejidad del problema, hay muchos aspectos que se pueden mejorar en el presente modelo. Algunos provienen de las propias limitaciones que se han señalado en anteriores apartados y otros de fenómenos aún no tenidos en cuenta y que, dada la naturaleza de las hipótesis consideradas, hacen posible considerarlos de una forma abordable.

Quizás el más importante sería encontrar alguna ley o relación que ajuste de forma automática los coeficientes del modelo con cada caso a estudio. Esta tarea precisa múltiples

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

comparaciones numéricas y experimentales con distintos tipos de túneles, de diferente geometría y rugosidad, velocidades de ventilación y magnitud de incendio. La labor puede ser ardua pero el mayor inconveniente es la disponibilidad de recursos para el cálculo numérico y la dificultad de realizar ensayos experimentales. En su defecto se puede acudir a la literatura existente sobre el tema para realizar este trabajo.

De entre las limitaciones propias del modelo, cabe mencionar el hecho de que se trata de un estudio estacionario. En la memoria, ya se indicó una forma sencilla de tratar el problema transitorio para la zona de la difusión. Se ha asumido la simplificación de que la corriente de aire adquiere una velocidad longitudinal uniforme en esta zona. Como ya se comentó en el apartado 3.5.2, mediante la función error se podría pasar de la zona con humos a la zona donde aún no han llegado. Para la zona del penacho se asumía que rápidamente se alcanzaba el desarrollo de la llama, los humos alcanzaban el techo y por tanto se podía desprestigiar ese tiempo comparado con el de llenado y evacuación del humo en el resto del túnel. Ambas suposiciones son mejorables. En primer lugar, para el penacho se podría introducir un ritmo variable de liberación de energía hasta alcanzar la potencia del objeto que ardiese. Para la zona de la difusión, se pueden retener los términos difusivos en los planos transversales a la dirección del aire para el caso no estacionario. De esta forma, se puede calcular con mayor exactitud la evolución de los humos cuando no se cumplen los criterios expuestos en la memoria. Todo esto multiplicaría el tiempo de cálculo aunque quizás no demasiado y, en principio, el modelo presentado seguiría siendo competitivo con otros programas y modelos similares.

Respecto a la radiación, ya se tiene en cuenta la pérdida de calor en la llama debido a este fenómeno. La potencia liberada por un objeto, o el combustible usado como foco en el modelo, no se transmite en su totalidad por convención a los humos generados. Parte de la misma se pierde por radiación, típicamente un 30%. Debido al costo en tiempo y recursos que supondría simular la combustión completa, muchos de los modelos y programas existentes, no resuelven este problema y lo que fijan es una fuente de calor, cantidad de movimiento y humos en la zona del incendio. En esa fuente de calor se asume un determinado tanto por ciento de pérdidas por radiación para hacer los cálculos. Con el presente trabajo esas suposiciones no son necesarias y, mediante el cálculo de las emisividades de las principales especies surgidas en la combustión, se puede computar el sumidero de radiación en la ecuación de la energía. También se estima la radiación incidente sobre un cuerpo u objeto atrapado aguas arriba del incendio. Lo

que no se tiene en cuenta es la radiación intercambiada con las paredes y, o, posibles objetos atrapados aguas abajo. Puesto que se calculan las emisividades de los humos en cada punto del dominio, se podrían estimar los intercambios radiantes entre superficies separadas por zonas de gases calientes emisoras y absorbedores de esa misma radiación. En la zona de la difusión, la radiación no se ha tenido en cuenta. Sin embargo, en esa parte del túnel, las temperaturas son pequeñas por lo que los efectos esperados de los intercambios radiantes serán despreciables.

Siguiendo con el apartado energético, sería interesante estudiar las pérdidas de calor por las paredes. Habría que establecer un método que, basándose tanto en el calor que llega a las paredes por convección como por radiación, permitiese estimar cuál es su calentamiento y las pérdidas que se producen a su través. De esta forma no sería necesario acudir a la hipótesis de contorno adiabático y se podría establecer unas condiciones de contorno más realistas. En esos cálculos habría que introducir no sólo las ganancias de energía por radiación sino también los intercambios con otras superficies, objetos, humos calientes y la propia llama. Todo esto habría que llevarlo a cabo de forma tal que el tiempo de resolución necesario no impidiese cumplir con el criterio de rapidez de cálculo fijado en los objetivos del trabajo.

Aspectos no tenidos en cuenta y que podría ayudar a mejorar el modelo serían: efecto de la pendiente, estudio del tiro natural, efectos de la presencia de obstáculos (coches atrapados o desprendimientos), análisis de las condiciones meteorológicas en las bocas (sobre todo su efecto en la presión y velocidad de aire), mejorar la zona de transición entre la zona del penacho y la de difusión, para el posible estudio transitorio tener en cuenta el movimiento inducido antes del incendio por los vehículos en movimiento,... Algunos de los puntos anteriores se consideran indirectamente a través de la velocidad longitudinal del aire impuesta, ya que su efecto final sería aumentar o disminuir la velocidad de la corriente. Actualmente, ese efecto de aceleración o frenado no se calcula y habría que darlo como dato.

Todo lo descrito en el presente apartado señala las múltiples vías que se podrían seguir para mejorar el modelo presentado. En muchos casos son temas complementarios que no requerirían modificar sustancialmente el modelo, mientras que en otros lo que se abrirían serían nuevas líneas de actuación que modificarían sustancialmente la presente tesis.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA

- Adiga, K. C., Ramakader, D. E., Tatem, P. A. y Williams, F. W. (1989). *Fires Saf. J.*, 14, 241-250.
- Adiga, K. C., Ramakader, D. E., Tatem, P. A. y Williams, F. W. (1990). *Fires Saf. J.*, 16, 443-458.
- Alarcón, E. (1997). Natural and forced ventilation flows, effects of moving vehicles. *Transcripciones del Workshop on Hazardous Chemical Spills in Tunnels*. Zurich, 20-21 de Abril de 1995.
- Alarcón, E. A. (2002). La seguridad de las infraestructuras. El caso de los incendios en túneles. *Sesión Inaugural del Año Académico de la Academia de Ingeniería*, 29 de enero de 2002.
- Anderson, R. A., Watson, A. A. y Harland, W. A. (1981) *Med. Sci. Law* 21, 175.
- Aplicación de la instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS98) a las obras subterráneas promovidas por la comunidad de Madrid. *BOCM. Consejería de Obras Pública y Transporte*. Orden del 27 de julio del 2000.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Apte, Green y Kent (1991). Pool Fire Plume Flow in a Large-Scale Wind Tunnel. *Fire Safety Science-Proceedings of the Third International Symposium*. New York: Hemisphere.
- Atkinson, G. T., y Wu, T.(1996). Smoke control in sloping tunnels. *Fire Safety J*, 27, 335-341.
- Ashok y Modak. (1979). Radiation from Products of Combustion. *Fire Research*, 1, 339-361.
- Babrauskas, V. (1979) *SU National Bureau of Standards, technical note 1103*.
- Bandeis y Mergman. (1983). A Numerical Study of Tunnel Fires. *Combustion Science And Technology*, 35, 133-135.
- Baun, H. R. y REM, R. G. y Gore, P. (1990). *23rd Symp (International) on Combustion*. 715-722.
- Bechtel Parsons Brinckerhoff (1995). Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program. Test Report. *Massachusetts Highway Department*.
- Bendelius, A (1996). Memorial tunnel fire ventilation test program. *One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels*, Londres, 2 de Abril de 1996.
- Bendelius, A. G. (2002). Tunnel fire and life safety within the world road association (PIARC). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17, 159-161.
- Beswick, F. W., Holland, P. y Kemp, K. H. (1972) *Br. J. Ind. Med.* 29, 289.
- Bettis, R. J., Jagger, S. F, y Wu, Y. (1993). Interim validation of tunnel fire consequence models; summary of phase 2 tests. *The Health and Safety Laboratory Report IR/L/FR/93/11, The Health and Safety Executive, UK*.

- Bettis, R. J., Jagger, S. F., Macmillan, A. J. R., y Hambleton, R. T. (1994). Interim validation of tunnel fire consequence models; summary of phase 1 tests. *The Health and Safety Laboratory Report IR/L/FR/94/2, The Health and Safety Executive, UK.*
- Bilger, R. W. (1980). Turbulent Flows with Nonpremixed Reactants. En P. A. Libby y F. A. Williams, *Turbulent Reacting Flows* (chapter 4, vol 44). Springer-Verlag.
- Bilger, R. W. (1989). Turbulent Diffusion Flames. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 21, 101-135.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA (1997). *Programme de Simulation Numérique d'un Incendie en Tunnel "TUFISI"*.
- Burgerss, D. S., Strasser, A. y Grumer, J. (1961). Diffusive burning of liquid fuels in open trays. *Fire Res Abst Rev*, 3(3), 177.
- Carnahan, B., Luther, H. A., y Wilkes, J. O. (1979). Cálculo Numérico: Métodos, Aplicaciones. *Editorial Rueda*. Páginas 384-403.
- Casalé. (1997). *Les Simulations Numeriques-Validation des Résultats et Précaution d'Emploi*. Ponts Formation Edition.
- Celada, B., Cabo, M., y Fernández, M. (2001). Algunos aspectos del proyecto de túneles de carretera que inciden en su seguridad. *Monográfico de Túneles*, Nº 7.
- Chapman, A. J. (1984). Transmisión de calor. *Librería Editorial Bellisco*, Madrid, pp 680 y 681.
- Circulaire Interministérielle Nº 2000-63 DU relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national: NOR EQUR 00 10 142 C. *Ministère de L'intérieur à Ministère de L'équipement des Transports et du Logement*. 25 de agosto de 2000.
- Craft, T. J., Launder, B. E., y Suga, K. (1995). *Proc the 10th Symp on Turbulent Shear Flows*, Pen State University.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Crespo, A., Colombás, J., Hernández, J., y Moreno, D. (1986). Modelización del movimiento de humos y gases en incendios. *Encuentro Internacional de Centros de Investigación y Ensayos de Incendios, Ávila, Octubre 1986*. Publicado en Proceedings. Editorial MAPFRE. pp 1-25.
- Crespo, A., y Hernández, J. (1988). A simplified preflashover zone model of a fire in a single room. *Fire Safety Science- Proceedings of the 2nd Int. Symposium*. ISBN 0-89116-864-8. Editorial Hemisphere Publishing Corporation, pp. 463-471.
- Crespo, A. (1997). Prediction and modeling of tunnel fires. *Transcripciones del Workshop on Hazardous Chemical Spills in Tunnels*. Zurich, 20-21 de Abril de 1995.
- Crespo, A., García, J., Gómez, P., Hernández, J., y Migoya, E. (1998). Informe para ELSAMEX sobre los modelos numéricos para la simulación de incendios y ensayos con humos fríos y comparación con los experimentos en los túneles de Lorca. *Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, E.T.S.I. Industriales, UPM*.
- Crespo, A., García, J., Migoya, E., Hernández, J., y Gómez, P. (1999). Fire simulation in a road tunnel. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Fire Safety Science*. Potiers. Julio 1999.
- Crespo, A., Hernández, J., García, J., y Migoya, E., (2002). Informe para INDRA sobre los modelos numéricos para la simulación de incendios y ensayos con humos fríos y comparación con los experimentos en los túneles de la M-111 a su paso por el aeropuerto de Madrid-Barajas. *Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, E.T.S.I. Industriales, UPM*.
- Cox, G. (1995). *Combustion Fundamentals of Fire*. Academic Press.
- Daish, N. (1997). Tunnel fire experiments and a near-fire model. *Transcripciones del Workshop on Hazardous Chemical Spills in Tunnels*. Zurich, 20-21 de Abril de 1995.

- Danielson (1984). Människans fysiska talighet vid brand, värmeupplagring. *FAO-report C54055*. Estocolmo, Mayo.
- Danzinger, N. H., y Kennedy, W. D. (1982). Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels. *Proceedings of the Fourth International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, 169-186.
- Deardorff, J. W. (1970). *Fluid Mech* 41, 453-480.
- Del Rey, I., Migoya, E., Fraile, A., Crespo, A., y Alarcón, E. (2000). Modelos numéricos para el estudio de incendios en túneles. *Carreteras. Revista técnica de la Asociación Española de Carreteras*. Extraordinario de 2000, 95-109.
- Eaton, A. M., Smoot, L. D., Hill, S. C., y Eatough, C. N. (1999). Components, formulations, solutions, evaluations and applications of comprehensive combustion models. *Prog Energy Combust Sci*, 25, 387-436.
- Emmons, H. (1971). Fluid Mechanics and Combustion. *13th Symposium -International- on Combustion, Plenary Lecture*, 1-18.
- Emmons, H. (1978). The prediction of fires in buildings. *17th Symposium -International- on Combustion*, 1101-1112.
- Escudier, M. P. (1972). Aerodynamics of a Burning Turbulent Gas Jet in a Crossflow. *Combustion Science and Technology*, 4, 293-301.
- Euroestudios (2000). Proyecto Constructivo. Desvío y Soterramiento de la Carretera M-111 en el Aeropuerto de Madrid/Barajas. Tomo 5. Memoria y Anejos (V).
- Fairweather, M., Fones, W. P. y Lindstedt, R. P. (1992). Predictions of Radiative Transfer from a Turbulent Reacting Jet in a Cross-Wind. *Combustion and Flame*, 89, 45-63.
- Felske, J. D. y Tien, C. L. (1973). *Combustion Science and Technology*, 7, 25.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Fletcher, C. A. J. (1991). *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, Vols I and II. Second Edition. Springer-Verlag.
- Fletcher, D. F., Kent, J. H., Apfe, V. B., y Green, A. R. (1994a). *Fire Saf J*, 23, 305-325.
- Fletcher et al. (1994b). Numerical Simulations of Smoke Movement from a Pool Fire in a Ventilation Tunnel. *Fire Safety Journal*, 23, 305-325.
- Fujimura et al (1988). Practical test of emergency ventilation combined with bus firing at the Kan-Estu tunnel. 6th International symposium on the aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, September.
- García, J., Hernández, J., Crespo, A., y Gómez, P., (1999). Simulación numérica de incendios y ensayos con humos fríos en túneles de carretera. *Publicado en CD Rom del IV Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*. Sevilla Junio 1999.
- García, J., Crespo, A., y Hernández, J., (2001). Informe para INTECSA-OPC sobre los modelos numéricos para la simulación de incendios en los túneles de interconexión de las nuevas terminales del aeropuerto de Madrid-Barajas. *Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, E.T.S.I. Industriales, UPM*.
- Garo, A., Prado, G. y Lahaye, J. (1990). *Combustion and Flame*, 79, 226-233.
- Gillard, J. R. (1997). *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Development for the XXI Century*. bHr Group, Mech. Eng. Publication.
- Goldin, G. M., y Menon, S. (1998). A comparison of scalar PDF turbulent combustion models. *Combust Flame*, 113, 442-453
- Gore, J. P. y Faeth, G. M. (1986). Structure and Spectral Radiation Properties of Turbulent Ethylene/Air Diffusion. *XXI Symposium International Conference on Fires in Tunnels*, The Combustion Institute, 1521-1531.

- Gray, D. J. y Varkevisser, J. (1994). The Huguenot Toll Tunnel Fire. *Department of Transport: Roads South Africa*.
- Haack, A. (1994). Introduction to the Eureka-EU 499. *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels*, Boras, Swedish, Octubre 10-11 1994, pp 37-50.
- Hacar, F., Abella, A., y Arango, I. G^a. (1993). Incendio en túneles. *Ed Paraíso*.
- Harris, S. J. y Weigner, A. M. (1983). *Combustion Science and Technology*, 32, 267-275.
- Hartzell, G. E., Priest, D. N. Y Switzer, W. G. (1985). *J. Fire Sci.* 3, 115.
- Hartzell, G. E., Priest, D. N. Y Switzer, W. G. (1986). *Proc. First Int. Symp. Fire Safety Sci.*, p. 1059. Hemisphere Publishing Co., New York.
- Hernández, J., Crespo, A. y Duijm, N. J. (1995). Numerical Modeling of Turbulent Jet Diffusion Flames in the Atmospheric Surface Layer. *Combustion and Flame*, 101, 113-131.
- Heselden, A. J. M. (1976). Studies of fire and smoke behavior relevant to tunnels. *Proceedings of the Second International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Paper J1.
- Honnery, D. R. y Kent, J. H. (1990) Soot Formation in Long Ethylene Diffusion Flames. *Combustion and Flame*, 82, 426-434.
- Hymes (1993). The Physiological and Pathological Effects of Thermal Radiation. *Health and Safety Executive*. UK, Septiembre.
- Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS98). *Secretaría de estado de Infraestructuras y Transportes*. Orden del 19 de noviembre de 1998.
- Ivarsson, E. (1995). Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels. *Nat. Test & Research Institute*, Boras, Swedish.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Jia, F. , Galea, E. R. y Patal, M. K. (1997). *Fire Safety Science – Proc. Fifth International Symposium*, p 439-450
- Jin, T. (1981) *J. Fire Flamm.* 12, 130.
- Kennedy, W. D., y Parsons, B (1996). Critical velocity: past, present and future. *One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels*, Londres, 2 de Abril de 1996.
- Kent, J. H. y Wagner, H. Gg. (1982). *Combustion and Flame*, 45, 53-6.
- Klote y Milke (1993). Design of smoke management systems. *ASHRAE*.
- Koseki, H. y Hayasaka, H. (1989). Estimation of thermal valance in heptane pool fire. *J Fire Sci*, 7, 237-250
- Kumar, S. y Cox, G. (1985). *Mathematical Modeling of Fires in Road Tunnels*. V International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Road Tunnels. Lille, France.
- MacCaffrey, B. J. (1988) Flame Height SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Capítulo 1-18. *National Fire Protection Association, Quincy, Mass.*
- Magnussen, B. R., y Hjertager, B. H. (1976). On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion. *16th Symp. Int. on Combustion*, Cambridge, MA 15-20 agosto.
- Mannering y Kilareski. (1990). *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*. J. Wiley.
- McGrattan (2000). Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide. *Technical Report NISTIR 6467, National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, Maryland, Enero 2000.

- Mell, W. E., McGrattan, K. B. y Baum, H. R. (1996). 26th (International) on Combustion. 1523-1530.
- Meneveau, C., y Katz, J. (2000). Scale-Invariance and Turbulence Models for Large-Eddy Simulation. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 32, 1-32.
- Mitler, H. E. (1987). *Users guide to FIRST, a comprehensive single-room fire model*. NBSIR 87-3595.
- Mochón, L., Hernández, J., Crespo, A., y Alarcón, E. (1994a). Algunos problemas en la ventilación de túneles de carretera. *Jornadas Técnicas sobre Túneles. La Seguridad en la Construcción y Servicio*. Gijón, 22-24 de Junio de 1994.
- Mochón, L. (1997). Ventilación de túneles de carretera. *Tesis Doctoral*. UPM.
- Mudford, N. R., y Bilger, R. W. (1984). Examination of Closure Models for Mean Chemical Reaction Rate Using experimental Results for an Isothermal Turbulent Reaction Flow. *20th Symp. (Int) on Combustion*, 387-394.
- Novozhilov, V. (2001) Computational fluid dynamics modelling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27, 611-666.
- Launder, B. E. y Spalding, D. B. (1972). *Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press.
- Lee, K. B., Thring, H. W. y Beer, J. H. (1962). *Combustion and Flame*, 6, 137.
- Leggenhager, k. Von (1974) *Acta. Med. Scand. 196 (Suppl.) 563, 1*.
- Leung, K. H., Lindstedt, R. P. y Jones, W. P. (1991). A Simplified Reaction Mechanism for soot formation in Nonpremixed Flames. *Combustion and Flame*, 87, 289-305.
- Lilly, D. K. (1966). On the application of the eddy viscosity concept in the inertial subrange of turbulence. *Manuscript 123, National Centre for Atmospheric Research, Boulder, CO*.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Luo, M. y Beck, V. (1994). *Fire Safety Journal*, 23, 413-438.
- Luo, M., He, Y. y Beck, V. (1997). *Fire Safety Journal*, 29, 1-25.
- Megrét, O. y Vauquelin, O. (2000). A model to evaluate tunnel fire characteristics. *Fire Safety Journal*, 34, 393-401.
- Nota de servicio sobre equipamiento en los túneles en servicio y de nueva construcción de la red de carreteras del estado (RCE), gestionada por la Dirección General de Carreteras. *Dirección General de Carreteras*. Diciembre de 2001.
- Oka, Y., y Atkinson, G. T. (1995). Control of smoke flow in tunnel fires. *Fires Safety J.* 25, 303-322.
- Parsons, Brinkerhoff, Quade y Douglas (1980) Inc Subway environmental design handbook, vol II, Subway Environment Simulation (SES) Computer Program Version 3, Part I: User's manual. *U. S. Department of Transportation*.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere
- PIARC (1993). Fire and smoke control in road tunnels. *Committee on Road Tunnels. Working group on Fire and Smoke Control (C5-WG6)*. Ref 05.05.B.
- PIARC (1999). *XXIst World Road Congress*, 3-9 October 1999, Kuala Lumpur, Malasia.
- Purser, D. A., Grimshaw, P. Y Berrill, K. R. (1984) *Arch. Environ. Health* 39, 394.
- Purser, D. A. (1988) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 1-14*, p. 201. Society of Fire Protection Engineers, Boston.
- Purser (1993). Modeling Toxic and Physical Hazard in Fire. *Interflam*.

- Quintiere, J. Q. (1998) *Third Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, Singapore. 3-14.
- Rasbash, D. J. (1975) *Fire Int.* 5, 30.
- Retana, M. P. (1999). Regímenes transitorios de ventilación. Aplicación a la seguridad frente a incendios. *Tesis Doctoral. UPM*
- Servert, J. (1993). Modelado de llamas de difusión turbulenta y de su interacción con el medio ambiente y objetos circundantes. *Universidad Politécnica de Madrid, Ph. D. Thesis.*
- Servert, J., Crespo, A. y Hernández, J. (1997). A One-Dimensional Model of a Turbulent Jet Diffusion Flame in an Ambient Atmospheric Flow, Derived from a Three-Dimensional Model. *Combustion Science and Technology*, 124, 83-114.
- Simcox et al. (1989). *Computer Simulation of the Flows of Hot Gases from the Fire at King's Cross Underground Fire: Fire Dynamics and Organization of Safety*. Leamington Spa, UK: MEP Publishing.
- Sivathanu, Y. R. y Faeth. (1990). Generalized State Relationships for Scalar Properties in Nonpremixed Hydrocarbon/Air Flames. *Combustion and Flame*, 82, 211-230.
- Smagorinsky (1963). *J Monthly Weather Rev*, 91, 99-164
- Spalding, D. B. (1970). *Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames*. XIII Symposium International on Combustion, Salt Lake City UT, 23-29 August (paper)
- Spalding, D. B. (1989). *The PHOENICS Reference Manual*. CHAM TR/100.
- Steckler, K. D., Quintiere, J. G., y Rinkinen, W. D. (1982a). *19th Symposium (International) on Combustion*, p 913-920.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

- Steckler, K. D., Baum, H. R., y Quintiere, J. K. (1982b). Flow Induced by fire in a compartment, *NBSIR 82-2520, National Bureau of Standards*, Washington.
- Steckler, K. D., Baum, H. R., y Quintiere, J. K. (1984). *20th Symposium (International) on Combustion*, p 1591-1600.
- Swedish National Testing and Research Institute. (1994). *Proceedings of the International Conference of Fires in Tunnels*. Böras, Sweden. London, U.K.: Communication limited
- Tamanini, F. (1981). An Integral Model of Turbulent Fire Plumes. *Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1081-1090*.
- Tieszen, S. R. (2001). On the Fluid Mechanics of Fires. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 33, 67-92.
- Waterman, T. E. (1966) Determination of fire conditions supporting room flashover. *Final Report IITRI Project M6131, DASA 1 1886. Defense Atomic Support Agency*. Washington, DC.
- Williams, F. A., (1985). *Combustion Theory*. Second Edition, Benjamin-Cummings.
- Woodburn, P. J., y Britter, R. E. (1996a). *Fire Saf J*, 26, 63-90
- Woodburn, P. J. y Britter, R.E. (1996b). CFD Simulations of a Tunnel Fire. *Fire Safety Journal*, 26, 35-90.
- Wu, Y., y Bakar, M. Z. A. (2000). Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity. *Fire Safety Journal*, 35, 363-390.
- Xue, H., Ho, J. C., y Cheng, Y. M. (2001) Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation. *Fire Safety Journal*, 36, 37-54
- Yan, Z., y Holmstedt, G. (1996). *Fire Safety Journal*, 27, 201-238.

- Yan, Z., y Holmstedt, G. (1997). *Fire Safety Science – Proc. Fifth International Symposium*, p 345-356.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

ANEXO I

EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN UN TÚNEL AL CONECTARSE LA VENTILACIÓN

En el presente anexo se hace una estimación de cómo evoluciona la velocidad dentro de un túnel al conectar el sistema de ventilación. Esta relación es necesaria en algunos de los cálculos numéricos empleados para simular lo que ocurre al detectarse un incendio.

Para tiempos, t (s), inferiores a t_0 se supone que no se ha detectado el incendio y que hay una velocidad, v_0 (m/s).

$$v = v_0 \quad \text{para} \quad t \leq t_0 \quad (\text{I.1})$$

Para tiempos superiores, se puede suponer que estamos en el caso turbulento unidireccional para fluidos de densidad constante. Hay que resolver la ecuación I.2. Dicha

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

ecuación es la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento integrada en la dirección del movimiento, para una longitud de túnel L .

$$\rho L \frac{dv}{dt} - \frac{F}{A} = -\frac{\lambda v^2}{2D} \rho L \quad (I.2)$$

donde el primer sumando del termino de la izquierda proviene del producto de la masa por la aceleración del fluido y el segundo de la fuerza, F , generada por los ventiladores por unidad de área en la sección del túnel, A . El término de la derecha corresponde a la pérdida de carga en conductos, D es el diámetro equivalente (4 veces el radio hidráulico, es decir, cuatro veces el área de paso dividido por el perímetro mojado) y λ es el coeficiente que da la pérdida de carga mediante el diagrama de Moody o Nikuradse, definida como cuatro veces el coeficiente de fricción. Se supone velocidad uniforme y que las iguales presiones a la entrada y salida son iguales, no existe tiro.

Para hallar la velocidad en régimen estacionario, v_{est} , bastaría con anular el primer término de la ecuación I.2. Igualando la perdida de carga en el conducto con el empuje que dan los ventiladores se obtiene la ecuación I.3.

$$v_{est} = \sqrt{\frac{2D}{\lambda \rho L} \frac{F}{A}} \quad (I.3)$$

Se puede definir un tiempo característico, t_c , mediante el cociente entre el gasto másico que atraviesa el túnel y la fuerza de los ventiladores por unidad de longitud:

$$t_c = \frac{\rho A v_{est}}{F/L} = \frac{2D}{\lambda v_{est}} \quad (I.4)$$

siendo ρ la densidad del aire, A la sección del túnel, v_{est} la velocidad final y F/L la fuerza de los ventiladores por unidad de longitud de túnel. Empleando el cambio de variable de las ecuaciones I.5 y I.6 en la ecuación I.2 se obtiene la relación I.7.

$$x = \frac{v}{v_{est}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{2D}{\lambda \rho L} \frac{F}{A}}} \quad (I.5)$$

$$\tau = \frac{t}{t_c} = \frac{t}{\frac{\rho L v_{est}}{F/A}} = \frac{t}{\frac{2D}{\lambda v_{est}}} \quad (I.6)$$

$$\frac{dx}{d\tau} = 1 - x^2 \quad (I.7)$$

cuya solución es:

$$x = \tanh(\tau + \text{constante}) \quad (I.8)$$

Deshaciendo el cambio de variable y aplicando la condición I.1, la velocidad de aire en el túnel, una vez se encienden los ventiladores, se incrementa según la siguiente ley:

$$v = v_{est} \tanh\left(\frac{t-t_0}{t_c} + \arg \tanh\left(\frac{v_0}{v_{est}}\right)\right) \quad \text{para } t \geq t_0 \quad (I.9)$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

ANEXO II

MODELOS MATEMÁTICOS GENERALES PARA ESTUDIOS NUMÉRICOS CON INCENDIOS

El presente anexo presenta los modelos matemáticos tridimensionales con combustión empleados en los códigos PHOENICS Y FLUENT. Con ellos se obtienen resultados numéricos con los que comparar el modelo presentado en la presente tesis.

II.1 - MODELO k- ϵ -g

Presenta una forma de cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes completadas con un modelo de combustión basado en un escalar que se conserva.

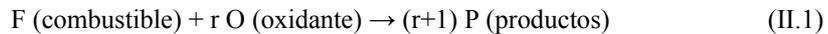
II.1.1 ESTRUCTURA DE LA LLAMA LAMINAR

La llama turbulenta se considera como un conjunto de pequeñas llamas laminares, fluctuantes, corrugadas y sometidas a estiramiento. Este estiramiento se debe a las velocidades de deformación existentes en el flujo turbulento, que producen gradientes de concentración pronunciados e incrementan el ritmo al que los reactantes se difunden hacia la zona de reacción. Bajo la hipótesis de reacción infinitamente rápida, los ritmos de reacción química son mucho mayores que los de difusión, de forma que, para una reacción irreversible de una etapa,

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

no existiría oxidante para mezclas más ricas que la estequiométrica y no existirá combustible para mezclas pobres.

Para estudiar la estructura de cada llamita laminar, se puede considerar un problema de dos flujos de combustible y oxidante, respectivamente, cada uno de ellos con composición uniforme. Además de la hipótesis de reacción infinitamente rápida se supondrá que la reacción es de una etapa, que las difusividades de las especies químicas y la temperatura son iguales, que el número de Mach es bajo y que el calor por radiación es despreciable (éste sin embargo se tendrá en cuenta de una forma global en el problema planteado), junto con otras hipótesis menos restrictivas. Con estas hipótesis, la temperatura y las distribuciones de las fracciones de másicas a través de la llama laminar son sólo funciones de un escalar que se conserva, todos los escalares que se conservan están relacionados linealmente, y la elección del escalar que se utilice es arbitraria. Un escalar que se conserva es una magnitud escalar que no se crea ni se destruye por reacciones químicas. En el problema de dos flujos considerado, la reacción química de una sola etapa se puede expresar mediante:



siendo r la relación estequiométrica (1kg de combustible reacciona con r kg de oxidante para dar $(r+1)$ kg de producto. Las ecuaciones de conservación de cada fracción másica serán, suponiendo despreciables los efectos Soret, Dufour y la difusión debida a gradientes de presión:

- Conservación de combustible:

$$\rho \left(\frac{\partial Y_F}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla Y_F \right) = \text{div}(\rho D_F \nabla Y_F) - W_F \quad (\text{II.2})$$

- Conservación de oxidante:

$$\rho \left(\frac{\partial Y_O}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla Y_O \right) = \text{div}(\rho D_O \nabla Y_O) - W_O \quad (\text{II.3})$$

- Conservación de productos:

$$\rho \left(\frac{\partial Y_P}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla Y_P \right) = \text{div}(\rho D_P \nabla Y_P) + W_P \quad (\text{II.4})$$

denotando los subíndices F, O y P al combustible, el oxidante y los productos respectivamente. W_i e Y_i son respectivamente la producción másica por unidad de volumen y tiempo y la fracción másica de la especie i . Por conservación de masa se cumple:

$$\begin{aligned} \sum_i W_i &= -W_F - W_O + W_P = 0 \\ \frac{W_O}{r} &= W_F = \frac{W_P}{r+1} \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

Restando a la ecuación del combustible la del oxidante dividida por r , subíndice $j = FO$ en la ecuación II.6, sumando a la ecuación del combustible la de los productos dividida por $(r+1)$, subíndice $j = FP$ en la ecuación II.6, o sumando a la del oxidante la de los productos dividida por $(r+1)$, subíndice $j = OP$ en la ecuación II.6, y suponiendo que los coeficientes de difusión, D_i , de todas las especies son iguales, queda la siguiente ecuación de conservación en todos los casos:

$$\rho \left(\frac{\partial \beta_j}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \beta_j \right) = \text{div}(\rho D \nabla \beta_j) \quad j = FO, FP, OP \quad (\text{II.6})$$

pero con distintas variables según la combinación de ecuaciones empleada. En todos los casos desaparece el término de reacción química. Por tanto, se pueden utilizar como escalares las siguientes funciones de Shvab-Zeldovich:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\begin{aligned}\beta_{FO} &\equiv Y_F - \frac{Y_O}{r} \\ \beta_{FP} &\equiv Y_F + \frac{Y_P}{r+1} \\ \beta_{OP} &\equiv Y_F + \frac{rY_P}{r+1}\end{aligned}\quad (\text{II.7})$$

Lo más habitual es usar la denominada fracción de mezcla como escalar que se conserva. Se puede definir como:

$$\xi \equiv \frac{\beta - \beta_\infty}{\beta_1 - \beta_\infty} \quad (\text{II.8})$$

donde los subíndices 1 e ∞ corresponden respectivamente a los flujos de combustible y oxidante, de forma que $\xi=1$ es en el lado del combustible y $\xi=0$ en el lado del oxidante. Localmente, la fracción de mezcla es la fracción de materia presente que procede del flujo de combustible. La fracción de mezcla estequiométrica, para $\beta_{FO} = 0$, corresponde a una mezcla en la que los reactantes están en proporción estequiométrica:

$$\xi_{st} = \frac{Y_{O\infty}}{rY_{F1} + Y_{O\infty}} \quad (\text{II.9})$$

De esta forma la ecuación de conservación para la fracción de mezcla será:

$$\rho \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \xi \right) = \text{div}(\rho D \nabla \xi) \quad (\text{II.10})$$

Si las condiciones iniciales y de contorno son apropiadas, puede demostrarse que todos los escalares que se conservan están relacionados linealmente. La fracción de mezcla puede expresarse como:

$$\xi \equiv \frac{Y_i - Y_{i\infty}}{Y_{i1} - Y_{i\infty}} \quad i = O, F, P \quad (\text{II.11})$$

La entalpía total, suma de la térmica y química, de una mezcla de n especies puede expresarse como:

$$h = \sum_{i=1}^n h_i Y_i \quad (\text{II.12})$$

siendo n es el número de especies existentes, representadas por el subíndice i . La entalpía total de cada especie, h_i , puede aproximarse mediante:

$$h_i = c_{pi} T + h_i^o \quad (\text{II.13})$$

donde se ha supuesto que los calores específicos son constante. h_i^o es el calor de formación de la especie i . De las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$h = c_p T + \sum_{i=1}^n h_i^o Y_i = h_{\text{térmica}} + h_{\text{química}} \begin{cases} h_{\text{térmica}} = c_p T \\ h_{\text{química}} = \sum_i h_i^o Y_i = Q Y_F \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

siendo $c_p = \sum_{i=1}^n c_{pi} Y_i$ el calor específico a presión constante de la mezcla. En lo que sigue,

sólo se opera con la parte térmica de la entalpía. A la parte química se le asigna un calor de reacción, Q , que es el calor liberado por unidad de masa de combustible. Al multiplicar Q por la concentración de fuel se obtendría la entalpía química. Esta será tomada en cuenta en los cálculos a través de una fuente de calor.

La ecuación conservación de la entropía, otra forma de expresar el principio de conservación de la energía, es:

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla s \right) = \Phi_v + \text{div}(k \nabla T) + W_F Q + Q_r \quad (\text{II.15})$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

donde s es la entropía, Φ_v la función de disipación de Rayleigh, Q es el calor liberado por unidad de masa de combustible quemado y Q_r el calor recibido mediante radiación por unidad de volumen y tiempo. Una nueva hipótesis es que se trate de un flujo con bajo número de Mach, para poder prescindir de la energía cinética y de las variaciones de presión comparadas con la presión absoluta. La ecuación II.16 se cumple en primera aproximación. Con las suposiciones ya hechas pero además despreciando la disipación viscosa, el flujo de calor por radiación y el término de fluctuación de presión $\partial p/\partial t$ en la ecuación de la energía y considerando el calor específico constante y el número de Lewis, $Le = \rho D c_p / \kappa$, igual a la unidad, por lo que $\kappa / c_p = \rho D$, se demuestra que la solución para la entalpía, h , será similar a las correspondientes a otros escalares que se conservan si existen condiciones iniciales y de contorno apropiadas:

$$Tds = dh - \frac{1}{\rho} dp \approx dh \Rightarrow Tds \approx c_p dT \quad (\text{II.16})$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T \right) = \text{div}(k \nabla T) + W_F Q \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c_p T}{Q} \right) + \bar{v} \cdot \nabla \left(\frac{c_p T}{Q} \right) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \nabla \left(\frac{c_p T}{Q} \right) \right) + W_F \quad (\text{II.18})$$

De forma que se podría crear una nueva función de Shvab-Zeldovich sumando la anterior expresión de conservación de la energía a la ecuación de conservación másica del combustible, β_{FT} , ecuación II2, con lo que se anula W_F y se obtiene el siguiente escalar pasivo:

$$\beta_{FT} \equiv Y_F + \frac{c_p T}{Q} \quad (\text{II.19})$$

También se puede poner:

$$\xi \equiv \frac{h - h_\infty}{h_1 - h_\infty} \quad (\text{II.20})$$

Para la reacción irreversible de una etapa, las fracciones másicas de oxidante, productos e inertes, subíndice I, pueden expresarse explícitamente en función de la fracción de mezcla y la fracción másica de combustible:

$$Y_O = Y_{O\infty}(1-\xi) + r(Y_F - Y_{F1}\xi) \quad (\text{II.21})$$

$$Y_P = -(1+r)(Y_F - Y_{F1}\xi) \quad (\text{II.22})$$

$$Y_I = (1 - Y_{O\infty})(1-\xi) + (1 - Y_{F1})\xi \quad (\text{II.23})$$

Suponiendo que el calor específico es igual para todas las especies y por tanto igual al de la mezcla, la temperatura puede expresarse en función de ξ e Y_F :

$$T = T_\infty + (T_1 - T_\infty)\xi - \frac{Q}{c_p}(Y_F - Y_{F1}\xi) \quad (\text{II.24})$$

Las distribuciones de concentración y de temperatura en ausencia de combustible son:

$$Y_{O0} = Y_{O\infty}(1-\xi) \quad (\text{II.25})$$

$$Y_{F0} = Y_{F1}\xi \quad (\text{II.26})$$

$$T_0 = T_\infty + (T_1 - T_\infty)\xi \quad (\text{II.27})$$

Con la hipótesis de reacción infinitamente rápida, existirá una llama en la superficie donde $Y_F = Y_O = 0$ y $\xi = \xi_{st}$. En este límite, todas las fracciones másicas y la temperatura pueden expresarse en función de ξ :

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$\begin{cases}
 \xi > \xi_{st} \left\{ \begin{array}{l}
 Y_O = 0 \\
 Y_F = Y_{F1} \frac{\xi - \xi_{st}}{1 - \xi_{st}} \\
 T = T_0 + \frac{Q}{c_p} \frac{Y_{O\infty}}{r} (1 - \xi)
 \end{array} \right. \\
 \\
 \xi < \xi_{st} \left\{ \begin{array}{l}
 Y_O = Y_{O\infty} \left(1 - \frac{\xi}{\xi_{st}} \right) \\
 Y_F = 0 \\
 T = T_0 + \frac{Q}{c_p} Y_{F1} \xi
 \end{array} \right.
 \end{cases} \quad (II.28)$$

La temperatura adiabática de llama, T_f , se puede obtener de la expresión anterior para $\xi = \xi_{st}$:

$$T_f = T_0 + \frac{Q}{c_p} Y_{F1} \xi_{st} \quad (II.29)$$

La prescripción de $T(\xi)$ puede tener en cuenta las pérdidas de calor por radiación, corrigiendo la temperatura adiabática de llama de forma que las temperaturas instantáneas coincidan con las medidas. Este enfoque, que será el utilizado en la validación, es sólo apropiado para llamas cuya fracción de pérdidas de calor por radiación sea suficientemente independiente de la posición en la llama, lo que se espera que ocurra en llamas con efectos de flotación como los que existen en el problema planteado, para las que la fracción de calor perdido por radiación del calor total generado es casi independiente del gasto de combustible. Esta hipótesis también vale para el caso turbulento que se estudia a continuación.

II.1.2 - ECUACIONES DE CONSERVACIÓN

El incendio que se trata de simular consiste en una llama turbulenta de difusión que será descrita mediante distribuciones de valores medios de distintas magnitudes fluidas

obtenidas mediante modelos de tipo estadístico. Un enfoque razonable para tratar el problema consiste en reducirlo a uno equivalente que corresponda a un flujo turbulento sin combustión. La simplificación se consigue mediante el denominado **conserved scalar approach**.

Debido al carácter no lineal de las ecuaciones del apartado anterior, para calcular las distribuciones de los valores medios de las fracciones másicas y la temperatura mediante el enfoque basado en la introducción de la fracción de mezcla, es necesario conocer, además de la distribución del valor medio de la fracción de mezcla, la distribución espacial y temporal de su función de densidad de probabilidad, pdf. Los métodos que requieren la utilización de funciones de densidad de probabilidad se basan frecuentemente en la selección de una pdf del escalar que se conserva de una determinada forma general, descrita por un cierto número de parámetros. Estos parámetros son calculados mediante métodos de momentos aplicados al escalar que se conserva. Por ejemplo, la pdf del escalar en cada punto, $P(\xi)$, puede ser obtenida a partir de la media y la varianza del escalar, utilizando algunas hipótesis adicionales sobre su forma.

Para deducir las ecuaciones de conservación para las magnitudes promediadas se utiliza una técnica de promediado de tipo Favre, en la que todas las magnitudes fluidas excepto la presión son promediadas utilizando un pesado en masa. Para la variable genérica ϕ , la media Favre será:

$$\phi^* = \frac{\overline{\rho\phi}}{\overline{\rho}} \quad (\text{II.30})$$

donde * denota media Favre y la línea horizontal promedio convencional en el tiempo. Por lo tanto:

$$\phi = \phi^* + \phi'' \quad (\text{II.31})$$

donde la doble prima denota las fluctuaciones con respecto a la media Favre.

Para cerrar el sistema de ecuaciones para las magnitudes promediadas es necesario introducir las hipótesis de cierre apropiadas para modelar las correlaciones entre componentes

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

de magnitudes fluctuantes. El modelo **k-ε-g** supone que las escalas de tiempos de las fluctuaciones turbulentas son mucho menores que el tiempo característico de variación de las magnitudes fluidas medias. Pueden deducirse las siguientes ecuaciones, válidas para elevados números de Reynolds:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^*) = 0 \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_j^*)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^* u_i^*) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} (u_j'' u_i'')^*) - \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i \quad (\text{II.33})$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^* k) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \bar{\rho} (u_j'' u_i'')^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} + \bar{\rho} \varepsilon \quad (\text{II.34})$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^* \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{\varepsilon 1} \bar{\rho} (u_j'' u_i'')^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \varepsilon \right) \quad (\text{II.35})$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \xi^{*2})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^* \xi^{*2}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \xi^{*2}}{\partial x_j} \right) \quad (\text{II.36})$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \xi^{*2})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^* \xi^{*2}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_g} \frac{\partial \xi^{*2}}{\partial x_j} \right) + C_{g1} \mu_t \left(\frac{\partial \xi^{*2}}{\partial x_j} \right)^2 - C_{g2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \xi^{*2} \quad (\text{II.37})$$

donde k es la energía cinética turbulenta, ε su disipación y $\xi^{*2} = \overline{\rho \xi''^2} / \bar{\rho}$ la varianza de la fracción de mezcla, que también se representa por g y proporciona una medida de la fluctuación de la fracción de mezcla en el flujo turbulento. Además:

$$- \bar{\rho} (u_j'' u_i'')^* = \mu_t \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\mu_t \frac{\partial u_k^*}{\partial x_k} + \bar{\rho} k \right) \quad (\text{II.38})$$

$$\mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.39})$$

$$C_\mu = 0.09 \quad (\text{II.40})$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad (\text{II.41})$$

$$C_{e2} = 1'92 \quad (\text{II.42})$$

$$C_{g1} = 2/\sigma_{\xi} \approx 2'8 \quad (\text{II.43})$$

$$C_{g2} = 2'0 \quad (\text{II.44})$$

$$\sigma_k = 1'0 \quad (\text{II.45})$$

$$\sigma_e = 1'3 \quad (\text{II.46})$$

$$\sigma_{\xi} = 0'7 \quad (\text{II.47})$$

$$\sigma_g = 0'7 \quad (\text{II.48})$$

Los efectos de flotación sobre la turbulencia han sido despreciados aunque no sobre las magnitudes medias. Suponiendo que los pesos moleculares de las distintas especies en la mezcla no difieren excesivamente, la ecuación de estado puede expresarse como:

$$\frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} = RT^* \quad \text{donde} \quad R = \sum_{i=1}^n \frac{R_u Y_i}{M_i} \quad (\text{II.49})$$

siendo R_u la constante universal de los gases, 8'314 J/molK, y M_i el peso molecular de la especie i .

II.1.3 - MODELO DE COMBUSTIÓN TURBULENTA

El sistema formado por las ecuaciones del apartado anterior no es un sistema cerrado salvo que se introduzca una expresión para la temperatura media que permita calcular la densidad media a partir de la ecuación de estado. Esta expresión se obtiene del modelo de combustión.

Las ecuaciones del apartado 5.4.1.1.1 que expresan la fracción de mezcla y temperatura en función de la fracción de mezcla se satisfacen en cualquier punto e instante, por lo que pueden obtenerse las media y otros momentos si se conoce la función de densidad de probabilidad de ξ . Si la densidad media se define como:

$$\bar{\rho} = \int_0^1 \rho(\xi) P(\xi) \quad (\text{II.50})$$

se puede obtener una función de densidad de probabilidad mediante:

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

$$P^*(\xi) = \frac{\rho(\xi)}{\bar{\rho}} P(\xi) \quad (\text{II.51})$$

de forma que:

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{\rho}}{\int_0^1 P(\xi) d\xi} = \left[\int_0^1 \frac{P^*(\xi)}{\rho(\xi)} d\xi \right]^{-1} \quad (\text{II.52})$$

Por tanto la media del resto de variables se obtiene mediante:

$$Y_i^* = \frac{1}{\bar{\rho}} \int_0^1 Y_i(\xi) \rho(\xi) P(\xi) d\xi = \int_0^1 Y_i(\xi) P^*(\xi) d\xi \quad (\text{II.53})$$

$$T^* = \frac{1}{\bar{\rho}} \int_0^1 T(\xi) \rho(\xi) P(\xi) d\xi = \int_0^1 T(\xi) P^*(\xi) d\xi = \frac{1}{\bar{\rho}} \int_0^1 \frac{p(\xi)}{R} P(\xi) d\xi = \frac{\bar{p}}{R\bar{\rho}} \quad (\text{II.54})$$

donde en la última expresión se ha introducido la ecuación de estado. Para la ecuación irreversible de una sola etapa base, se cumple:

$$Y_F^* = \frac{Y_{F1}}{1 - \xi_{st}} \int_{\xi_{st}}^1 (\xi - \xi_{st}) P^*(\xi) d\xi \quad (\text{II.55})$$

$$Y_O^* = \frac{rY_{F1}}{1 - \xi_{st}} \int_0^{\xi_{st}} (\xi - \xi_{st}) P^*(\xi) d\xi \quad (\text{II.56})$$

$$T^* = \int_0^{\xi_{st}} \left(T_0 + \frac{Q}{c_p} Y_{F1} \xi \right) P^*(\xi) d\xi + \int_{\xi_{st}}^1 \left[T_0 + \frac{Q}{c_p} \frac{Y_{O\infty}}{r} (1 - \xi) \right] P^*(\xi) d\xi \quad (\text{II.57})$$

Operando con las expresiones anteriores se puede llegar a la Temperatura media T^* en función de ξ^* e Y_F^* :

$$\begin{aligned}
T^* &= T_0^* + \int_0^1 \frac{Q}{c_p} Y_{F1} \xi P^*(\xi) d\xi + \int_{\xi_{st}}^1 \left[\frac{Q}{c_p} \frac{Y_{O\infty}}{r} (1-\xi) - \frac{Q}{c_p} Y_{F1} \xi \right] P^*(\xi) d\xi = \\
&= T_0^* + \frac{Q}{c_p Y_{F1} \xi^*} + \frac{Q}{c_p} \frac{Y_{O\infty}}{r} \frac{1}{\xi_{st}} \int_{\xi_{st}}^1 (\xi_{st} - \xi) P^*(\xi) d\xi \quad (II.58) \\
&= T_0^* + \frac{Q}{c_p} (Y_{F1} \xi^* - Y_F^*)
\end{aligned}$$

Si la función de densidad de probabilidad fuese una única función δ y las fluctuaciones desaparecieran, las diferencias entre la media de una magnitud y su valor instantáneo correspondiente a la media de la fracción de mezcla serían nulas. La turbulencia hace que Y_F^* y T^* difieran de $Y_F(\xi^*)$ y $T(\xi^*)$. En llamas turbulentas de difusión el término *unmixedness* es utilizado como una medida de magnitudes tales como $Y_F^* - Y_F(\xi^*)$ y $T^* - T(\xi^*)$. Existen diferentes definiciones cuantitativas de dicho término. Bilger, 1980, lo expreso mediante:

$$J \left[\frac{\xi_{st} - \xi^*}{\sqrt{g}} \right] = \int_0^{\xi_{st}} \frac{\xi_{st} - \xi}{\sqrt{g}} P^*(\xi) d\xi - H(\xi_{st} - \xi) \frac{\xi_{st} - \xi}{\sqrt{g}} \quad (II.59)$$

donde $H(\xi_{st} - \xi^*)$ es la función escalón unitaria de Heaviside. Se obtiene:

$$Y_F^* = Y_F(\xi^*) + \frac{Y_{F1}}{1 - \xi_{st}} \sqrt{g} J \left[\frac{\xi_{st} - \xi^*}{\sqrt{g}} \right] \quad (II.60)$$

$$Y_O^* = Y_O(\xi^*) + \frac{r Y_{F1}}{1 - \xi_{st}} \sqrt{g} J \left[\frac{\xi_{st} - \xi^*}{\sqrt{g}} \right] \quad (II.61)$$

Bilger también calculó J para diferentes tipos de funciones de densidad de probabilidad, y ha encontrado que es poco sensible a la forma de la pdf para valores de ξ^* próximos a ξ_{st} . Para valores grandes de $(\xi_{st} - \xi^*)/\sqrt{g}$, J es sensible a la forma de la pdf, pero para ellos la corrección debida a la **falta de mezcla** es pequeña. En la figura II.1 se puede ver su valor para distintas pdf.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

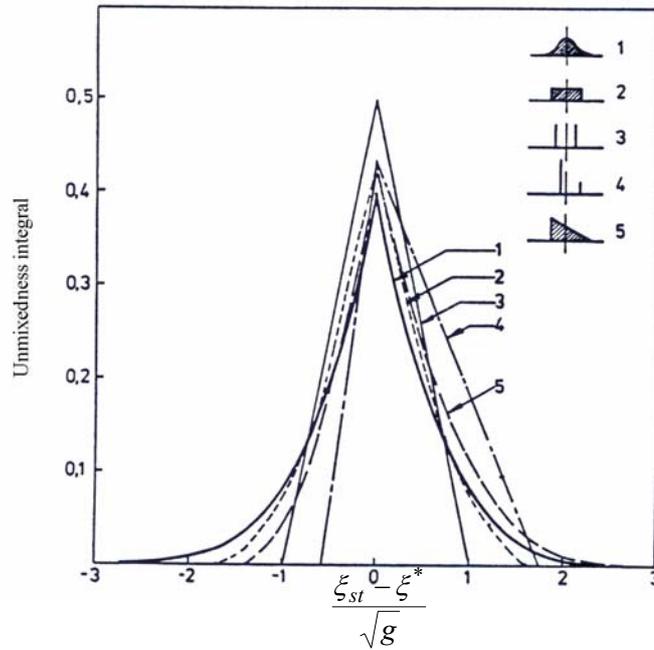


Figura II.1: Corrección por falta de mezcla para distintas formas de pdf.

Muldford, 1984, propuso la siguiente correlación experimental:

$$J = 0'45 \exp\left(-\frac{|\xi_{st} - \xi|}{\sqrt{g}}\right) \quad (\text{II.62})$$

Es posible introducir, en el código de ordenador utilizado para resolver el problema planteado, diferentes tipos de funciones de densidad de probabilidad. Uno muy simple consiste en dos funciones delta, α y $(1-\alpha)$, localizadas respectivamente en $\xi = \xi_1$ y en $\xi = \xi_2$, es decir:

$$P^*(\xi) = \alpha \delta(\xi - \xi_1) + (1 - \alpha) \delta(\xi - \xi_2) \quad (\text{II.63})$$

Los parámetros ξ_1 , ξ_2 y α pueden determinarse a partir de ξ^* y \sqrt{g} con ayuda de ciertas hipótesis. La media y la varianza de la fracción de mezcla pueden obtenerse mediante la pdf:

$$\xi^* = \int_0^1 \xi P(\xi) d\xi = \alpha \xi_1 + (1 - \alpha) \xi_2 \quad (\text{II.64})$$

$$g = \xi''^{2*} = \int_0^1 (\xi - \xi^*)^2 P(\xi) d\xi = \alpha(1 - \alpha) \cdot (\xi_1 - \xi_2)^2 \quad (\text{II.65})$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones planteado, se obtienen las siguientes soluciones:

- 1) Cuando $\xi^* \leq \sqrt{g}$ se supone que $\xi_1 = 0$ con lo que resulta:

$$\xi_2 = \frac{\xi^{*2} + \xi''^{2*}}{\xi^*} \quad (\text{II.66})$$

$$\alpha = \frac{\xi''^{2*}}{\xi^{*2} + \xi''^{2*}} \quad (\text{II.67})$$

- 2) Para $0 < \xi^* - \sqrt{g} < \xi^* + \sqrt{g} < 1$ se supone que α vale 0'5 con lo que se obtiene:

$$\xi_1 = \xi^* - \sqrt{g} \quad (\text{II.68})$$

$$\xi_2 = \xi^* + \sqrt{g} \quad (\text{II.69})$$

- 3) Si $\xi^* + \sqrt{g} \geq 1$, suponiendo $\xi_1 = 1$, resulta:

$$\xi_2 = 1 - \frac{(1 - \xi^*)^2 + \xi''^{2*}}{1 - \xi^*} \quad (\text{II.70})$$

$$\alpha = \frac{(1 - \xi^*)^2}{(1 - \xi^*)^2 + \xi''^{2*}} \quad (\text{II.71})$$

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

Para determinar J se han considerado dos casos:

- 1) Si $\xi_1 < \xi_{st} < \xi_2$, se pueden obtener las siguientes expresiones para J, dependiendo del valor relativo de ξ y ξ_{st} :

$$J = \frac{\alpha(\xi_{st} - \xi_1)}{\sqrt{g}} \quad \text{para } \xi_{st} < \xi^* \quad (\text{II.72})$$

$$J = \frac{(1-\alpha)(\xi_2 - \xi_{st})}{\sqrt{g}} \quad \text{para } \xi_{st} > \xi^* \quad (\text{II.73})$$

- 2) Si $\xi_{st} \leq \xi_1$ o $\xi_{st} \geq \xi_2$, J es nulo.

Esta pdf consistente en dos funciones delta da buenos resultados para fracciones de mezcla próximas al valor estequiométrico, pero desprecia los efectos de *unmixedness* para $|\xi_{st} - \xi^*| > \sqrt{g}$. Otra posibilidad para salvar ese escollo es utilizarse una función beta con pdf:

$$P^*(\xi) = \frac{\xi^{a-1}(1-\xi)^{b-1}}{\int_0^1 \xi^{a-1}(1-\xi)^{b-1} d\xi} \quad (\text{II.74})$$

con:

$$a = \xi^* \left[\frac{\xi^*(1-\xi^*)}{\xi^{*2}} - 1 \right] \quad (\text{II.75})$$

$$b = a \frac{1-\xi^*}{\xi^*} \quad (\text{II.76})$$

ξ^{*2} debe satisfacer:

$$0 \leq \xi^{n2*} \leq \xi^*(1 - \xi^*) \quad (\text{II.77})$$

lo que implica que $a \geq 0$ y $b \geq 0$.

II.2 - MODELO “EDDY BREAK-UP”

Se basa en la solución de las ecuaciones de transporte para las concentraciones de reactantes y productos. El mecanismo de la reacción debe ser explícitamente definido, pudiendo ser de una sola etapa o reacciones multietapa. Se asume que las reacciones son infinitamente rápidas de forma que nunca coincidan combustible y oxidante en el mismo punto.

En este modelo de combustión se han empleado las mismas ecuaciones citadas anteriormente para el primer modelo excepto la ecuación correspondiente a la varianza de la fracción de mezcla. En lugar de esa ecuación, se plantean ecuaciones de conservación similares a las del apartado 5.4.1.1.2 para cada una de las especies pero añadiendo un término fuente:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}Y_i^*)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}u_j^*Y_i^*) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \frac{\partial Y_i^*}{\partial x_j} \right) + \omega_i^* \quad (\text{II.78})$$

Los términos fuente que aparecen en estas ecuaciones de conservación para cada una de las especies que interviene en la combustión del heptano determinan la masa de la especie correspondiente que se ha formado o destruido por reacción química. Se han modelado utilizando el modelo de combustión conocido como **eddy break-up**. La influencia de la turbulencia en la tasa de reacción es tenida en cuenta mediante el modelo empleado por Magnussen, 1976. En este modelo, para el caso particular del combustible, el ritmo de reacción de la especie i viene determinado por el valor mínimo obtenido de las siguientes expresiones:

$$\omega_F^* = -A\rho \frac{\varepsilon}{k} Y_F^* \quad (\text{II.79})$$

$$\omega_F^* = -AB\rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{Y_P^*}{1+r} \quad (\text{II.80})$$

Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.

siendo A y B constantes empíricas de valor 4'0 y 0'5 respectivamente.

En este modelo la temperatura se calcula promediando $T(\xi)$ una vez determinadas la fracción másica del combustible y la fracción de mezcla.

El modelo **eddy break-up** relaciona la tasa de reacción con la tasa de disipación de los torbellinos que contienen los reactantes y productos. El cociente k/ϵ representa la escala temporal de los torbellinos turbulentos de acuerdo con el modelo propuesto por Spalding, 1970. Bilger, 1989, demostró que este procedimiento se puede derivar del anterior **k- ϵ -g**. Este modelo es útil para la predicción de llamas premezcladas o de difusión, además de para flujos parcialmente premezclados.

II.3 - CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO

Se ha hecho uso de la simetría del problema, empleando como dominio computacional la mitad del dominio físico delimitado por una plano vertical en la dirección longitudinal que contiene el eje de la sección transversal.

Si los ventiladores están inicialmente parados y las presiones en los extremos del túnel son iguales, se puede suponer que inicialmente el campo fluido está en reposo y a una temperatura y composición uniformes. Si las presiones fuesen diferentes el estado inicial sería el correspondiente a una corriente en el túnel cuya pérdida de carga equilibrase dicha diferencia de presiones. Si los ventiladores estuviesen en marcha antes de iniciarse el ensayo, habría que imponer inicialmente el campo de velocidades inducido por los mismos; el campo fluido inicial, debido tanto a la diferencia de presiones como a los ventiladores, se debería calcular numéricamente. En tal caso, el problema estacionario correspondiente debería ser resuelto antes del problema general.

Se deben imponer condiciones de contorno en las paredes y suelo del túnel, en las secciones de entrada y salida y en la fuente del incendio. En las paredes se supone que el campo de velocidades y las características turbulentas del flujo, energía cinética turbulenta, k , y su ritmo de disipación, ϵ , cumplen la ley logarítmica de la pared:

$$\begin{aligned}
 u &= 2.5u^* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \\
 l &= C_\mu^{-0.5} u^{*2} \\
 \varepsilon &= \frac{2.5u^{*3}}{z}
 \end{aligned}
 \tag{II.81}$$

donde z es la distancia a la pared y z_0 la rugosidad de la pared del túnel, para la que se han tomado los valores apropiados, en nuestro caso los del estudio de EUROESTUDIOS indicados en la tabla 5.1 del texto principal, según el tramo considerado. La velocidad u tiene la dirección de la tensión cortante turbulenta en la pared, τ , que a su vez está relacionada con la velocidad turbulenta de fricción u^* por la ecuación:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \tag{II.82}$$

Se supone que los flujos de calor y de escalar pasivo a través de las paredes son nulos. En general, para paredes no suficientemente aisladas térmicamente, se debe resolver un problema transitorio en el material sólido que recubre el túnel, e imponer condiciones de contorno en las caras exteriores. A través de la condición de contorno para la temperatura en la pared se produciría también un acoplamiento con la transmisión de calor. Sin embargo se ha considerado que la pared está aislada térmicamente, lo que será conservativo. Tampoco se han tenido en cuenta, en los modelos 3D con combustión, pérdidas por radiación de la llama, lo que también es conservativo. Lo anterior se podría interpretar como que los casos corresponden a intensidades de fuego de las que se ha descontado la pérdida de calor por radiación.

En la fuente de combustible o de humos, situada en el centro del túnel, se impone una velocidad de salida de combustible. Se supone que el heptano sale en forma vapor con una velocidad igual a la de su vaporización (5 mm/s) multiplicada por el cociente entre las densidades del heptano líquido y gaseosos. Se ha comprobado que las características de la turbulencia en el chorro del combustible o del gas tienen una influencia despreciable en la evolución del incendio.

**Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios:
Aplicación a túneles de carretera.**

En la entrada y salida se imponen los valores correspondientes de la presión. No obstante, en el modelo resuelto con el código PHOENICS, en la zona de entrada al túnel se supone que se satisface la ecuación de Bernoulli entre el exterior del túnel y la sección de entrada, de forma que la velocidad del aire en ésta es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia entre la presión ambiente y la que existe en la sección de entrada.