

U.N.E.D.



E.T.S. INGENIEROS
INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
CONSTRUCCIÓN Y FABRICACIÓN

TESIS DOCTORAL

TÍTULO:

**INVESTIGACIÓN SOBRE UN SISTEMA DE
CONTROL DE HUMOS DERIVADOS DE UN
INCENDIO EN TÚNELES CARRETEROS.
PROPUESTA DE SOLUCIONES.**

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Carlos Morales Palomino

ALUMNO:

**D. Francisco Hinojosa Romero
Ingeniero de Organización Industrial**

FECHA:

Año 2007

AGRADECIMIENTOS

A M^a. Ángeles, mi esposa, por su apoyo incondicional en todo momento.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, el profesor Dr. Carlos Morales Palomino, por su valiosa e inestimable ayuda en el desarrollo de esta tesis.

A Ferrovial Agroman S.A., por los medios y servicios prestados y, especialmente, a Marta Pérez, del Dpto. de informática y a Enrique Oñoro, del Dpto. de Instalaciones en Obras Civiles de la Dirección Técnica.

RESUMEN

Si nos acogemos a las directrices que nos marca la actual normativa sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles carreteros y las recomendaciones de los expertos en materia de seguridad, para túneles mayores de 200 m en zonas urbanas y 600 m en interurbanas, la ventilación del túnel tiene que ser de forma mecánica y debe ser la encargada de extraer los humos producidos, tanto por el contaminante emitido por los vehículos (estado de confort) como los producidos en un incendio (estado de incendio). Para ello es necesario dotar el túnel de una infraestructura de ventilación para poder actuar ante cualquier tipo de incidencia.

En la actualidad se están empleando tres sistemas de ventilación diferentes y algunos como combinación de estos.

- *Ventilación Longitudinal*
- *Ventilación Semitransversal*
- *Ventilación Transversal pura*

No es posible describir exhaustivamente las variables que intervienen en el estudio de un incendio debido a la diversidad de motivos que los pueden originar. Así no es lo mismo el incendio producido por el derrame de combustible de un vehículo cisterna que el producido por la auto-ignición del motor de un vehículo pesado.

La propuesta de soluciones objeto de estudio consiste un sistema de impulsión de aire, con el objeto de confinar o desplazar los humos producidos por un incendio derivado de un accidente en el interior del túnel. Se pretende estudiar el comportamiento del sistema y la forma que este interfiere en la ventilación actual.

Para ello se colocarán baterías de ventiladores situados en la parte superior de la sección del túnel, en forma de barreras repetidas a lo largo del túnel, con el fin de que se genere una cortina de aire que impida el paso de los humos. Esta batería de equipos de ventilación recogerá el aire del propio túnel y lo impulsará transversalmente a la

sección en la dirección del fuego. Estos equipos se repetirán a lo largo del túnel, coincidiendo con los sectores de extracción.

Hay que destacar que la propuesta de soluciones es un sistema complementario al actual, por lo que el estudio se centrará en el comportamiento de las distintas variables de visibilidad, temperatura, velocidad, nivel de concentración del CO, etc. y la interacción de este sistema con el actual de extracción de humos.

Para la realización del estudio ha sido necesario situarse en un caso específico, por lo que nos centraremos una autopista situada en el norte de Italia denominada PEDEMONTANA VENETA, actualmente en fase de diseño, que une Vicenza y Treviso con una longitud de 90 Km, conectando la A-27 (Caselli Conegliano en Treviso Nord), con la A31 (Caselli Dueville, Thiene) y la A-4 (Caselli Montecchio). Entre el PK 10+940,00 y el 17+440,00, y con una longitud de 6.500 m existe un túnel denominado "Malo" en el que centraremos nuestro estudio.

Este túnel carretero ha sido diseñado con un sistema de ventilación transversal pura, capaz de extraer el aire contaminado tanto en estado de confort (funcionamiento normal de túnel), como en estado de incendio. El aire fresco entra en la sección del túnel a través de unas rejillas que comunican un gran conducto generado debajo del pavimento de rodadura y el propio túnel, en cambio la extracción se realiza a través de unas compuertas situadas en la parte superior del túnel, que comunican con otro gran conducto superior. Este aire contaminado se extrae a través del conducto y se expulsa a la calle mediante unas chimeneas.

Para el cálculo se ha utilizado un software llamado F.D.S "Fire Dynamics Simulator" del NIST "National Institute of Standards and Technology" USA.

El FDS es un modelo de Mecánica de Fluidos Computacional (MFC) especializado en el estudio de flujos generados por fuego. Los modelos de mecánica de fluidos computacional son los más avanzados; estos modelos hacen muy pocas simplificaciones "a priori" respecto a los procesos de transferencia de masa y de calor. Están basados en soluciones de tres dimensiones y dependientes del tiempo. Las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas sin simplificación, y en muchos puntos del espacio, mediante métodos de elementos finitos. Estos códigos necesitan intervalos de tiempo muy pequeños y una rejilla muy fina, lo que implica un tiempo de cálculo muy largo.

Este modelo ha sido validado con unas pruebas realizadas en enero de 2006 por el U.S. Nuclear Regulatory Comisión, Electric Power Institute (EPRI), National Institute of Standards and Technology de USA.

Todos los resultados obtenidos han sido comparados con el estado original, de forma que se pueda comprobar la variación que tienen las distintas variables, concentración de CO, visibilidad, temperatura, velocidad, etc. con respecto al escenario con cortina.

En los dos escenarios de funcionamiento analizados, modo pozo y modo transversal (sistemas de extracción en función del tipo de tráfico, fluido o congestionado), se consigue dirigir y confinar el humo, evitando su propagación a lo largo del túnel, facilitando de esta forma la evacuación de las personas. Por otro lado, se

consigue reducir el espacio en el que se encuentra el humo, desplazándolo a la zona próxima al fuego y, por último, se consigue introducir aire menos contaminado en la parte inferior del tubo, aumentando la visibilidad en la zona de trabajo de los servicios de emergencia.

En el modo de funcionamiento transversal, la propuesta de soluciones no interfiere en el sistema de ventilación actual. Una vez alcanzado el régimen estacionario, el humo mantiene su estratificación y no altera el efecto del sistema de extracción transversal.

La solución propuesta mejora de una forma significativa en todos los escenarios, disminuyendo la velocidad de exposición al contaminante y consiguiendo hacer una evacuación mas tranquila, evitando el pánico en esos instantes tan cruciales, como son los primeros momentos después de un accidente.

Las gráficas de resultados comparativos ilustran de forma significativa el efecto que produce el sistema en las distintas variables, lo que permite interpretar de una forma clara la idoneidad de la propuesta de soluciones.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
ÍNDICE	5
1.- <u>OBJETO DE LA TESIS</u>	17
1.1.- ANTECEDENTES.....	17
1.2.- CONSECUENCIAS.....	17
1.3.- PROPUESTA DE MEJORA.....	18
2.- <u>ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA</u>	20
2.1.- <u>NORMATIVA</u>	20
2.1.1.- CONSIDERACIONES PREVIAS	20
2.1.2.- NORMATIVA VIGENTE ACTUAL	21
2.2.- <u>ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD ACTUAL EN TÚNELES</u> <u>CARRETEROS</u>	22
2.2.1.-INSTALACIONES BÁSICAS	22
2.2.2.-INSTALACIONES DE SEGURIDAD PARA INCIDENCIAS	23
2.3.- <u>SISTEMAS DE CONTROL DE HUMOS Y GASES EN</u> <u>FUNCIÓN DEL TIPO DE VENTILACIÓN DEL TÚNEL</u>	23
2.3.1.- CONTROL A TRAVÉS DE LA VENTILACIÓN PRINCIPAL	23
2.3.1.1.- Ventilación longitudinal natural	23
2.3.1.2.- Ventilación longitudinal natural con pozo	24
2.3.1.3.- Ventilación longitudinal con ventiladores en pozo	24
2.3.1.4.- Ventilación longitudinal por ventiladores de chorro	25
2.3.1.5.- Ventilación longitudinal por ventiladores en pozo y aceleradores	26

2.3.1.6.- Ventilación semi-transversal con inyección de aire fresco	26
2.3.1.7.- Ventilación transversal total	27
2.3.1.8.- Ventilación pseudo-transversal	28
2.3.1.9.- Mixtos	29
2.3.2.- CONTROL A TRAVÉS DE LA VENTILACIÓN SECUNDARIA	29
2.3.2.2.- Refugios y nichos	29
2.3.2.1.- Locales técnicos	30
2.4.- ANÁLISIS DEL SISTEMA UTILIZADO EN LA ACTUALIDAD	
2.4.1.- CONTROL DEL HUMO EN CASO DE INCENDIO EN UN TÚNEL CON VENTILACIÓN TRANSVERSAL PURA	30
2.4.1.1.- Sistema de ventilación en caso de incendio	30
2.4.1.2.- Incendio en el interior de un túnel	32
2.4.1.3.- La seguridad ante incendio	33
2.4.1.4.- Extracción del humo en un incendio	35
2.4.1.5.- Recomendaciones de la PIARC sobre ventilaciones transversales	36
2.4.2.- INCONVENIENTES DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN TRANSVERSAL PURA	37

3.- <u>PROPUESTA DE UNA SOLUCIÓN. SISTEMA QUE CONTROLA EL HUMO EN TÚNELES CARRETEROS</u>	38
3.1.- DEFINICIÓN DEL SISTEMA	38
3.1.1.- OBJETO	38
3.1.2.- DEFINICIÓN DE LA IDEA INNOVADORA	38
3.1.3.- ELEMENTOS QUE LO COMPONEN	39
3.2.- ANÁLISIS DE LOS AGENTES Y DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL INCENDIO	40
3.2.1.- GENERALIDADES	40
3.2.1.1.- El foco de incendio	40
3.2.1.2.- El humo	41
3.2.1.3.- Las temperaturas	42
3.2.2.- EL INCENDIO	42
3.2.2.1.- Potencia	42
3.2.2.2.- Emisión de humos y temperatura	44
3.2.2.3.- Evolución temporal del incendio	45
3.2.3.- INCENDIOS EN TÚNELES.....	45
3.2.3.1.- Características.....	46
3.2.3.2.- Niveles.....	46
3.2.3.3.- Configuraciones de intervención dentro de los túneles	46
3.2.3.4.- Operativa de intervenciones	46
3.2.3.5.- Factores que determinan la evacuación en el interior de un túnel	46
3.2.3.6.- Planteamiento del protocolo	57
3.2.4.- CONSECUENCIAS DE UN INCENDIO EN EL INTERIOR	

DE UN TÚNEL	57
3.2.4.1.- Flashover	57
3.2.4.2.- Modelos numéricos para el régimen permanente	58
3.3.- ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE AIRE EN EL INTERIOR DEL TÚNEL	59
3.3.1.- EFECTO BACKLAYERING	59
3.3.2.- EFECTO CHIMENEA Y GEOGRÁFICO	61
3.3.3.- EFECTO ÉMBOLO DEBIDO AL TRÁFICO	61
3.3.4.- RESISTENCIA DEBIDA AL VIENTO	62
3.3.5.- EFECTO PRODUCIDO POR LA FRICCIÓN	62
3.3.6.- FUERZAS PRODUCIDAS POR EL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE HUMOS	63
3.4.- ESTUDIO DE LA CORTINA DE AIRE	64
3.4.1.- DATOS DE PARTIDA Y CONDICIONES DE CONTORNO	64
3.4.2.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS EQUIPOS	66
3.4.3.- DEFINICIÓN GEOMÉTRICA	69
3.4.4.- ANÁLISIS DE FUERZAS PRODUCIDAS EN EL SISTEMA	71
3.4.5.- LOCALIZACIÓN DE LAS CORTINAS	75
3.4.6.- MODO DE OPERACIÓN	76

4.-	<u>VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIONES</u>	78
4.1.-	APLICACIÓN DEL SISTEMA AL TÚNEL DE MALO	78
4.1.1.-	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL	78
4.1.2.-	DEFINICIÓN GEOMÉTRICA Y GEOGRÁFICA	81
4.1.3.-	CRITERIOS DE DISEÑO	82
4.1.4.-	SOLUCION PROYECTADA	84
4.1.4.1.-	Ventilación en los túneles	84
4.1.4.2.-	Sistema de presurización en las galerías de escape	86
4.1.5.-	CAUDALES NECESSARIOS PARA LA EXTRACCIÓN DE HUMOS	87
4.1.5.1.-	Elementos auxiliares	88
4.1.5.2.-	Presurización de galerías	91
4.2.-	MODELIZACIÓN	93
4.2.1.-	LOS MODELOS NUMÉRICOS	93
4.2.2.-	FIRE DYNAMIICS SIMULATOR (FDS V.4.)	95
4.2.2.1.-	Presentación general	95
4.2.2.2.-	¿Como utilizar FDS?	98
4.2.3.-	EVALUACIÓN DE LAS BASES DE CÁLCULO VALIDACIÓN	100
4.2.4.-	SENSIBILIDAD DEL MODELO Y EXACTITUD DE LOS RESULTADOS	100
4.2.4.1.-	El Tamaño de de rejilla	101
4.2.4.2.-	Simulación de la turbulencia	101
4.2.4.3.-	La transmisión térmica de la radiación	102

4.2.4.4.- Sensibilidad de las características termofísicas de los combustibles sólidos	103
4.2.5.- CONSIDERACIONES DE LA SIMULACIÓN Y PARÁMETROS DE ESTUDIO.	104
4.2.5.1.- Configuración del modelo y datos de partida	104
4.2.5.2.- Características de la localización del modelo y de los distintos escenarios.	105
4.2.6.- TRATAMIENTO DE LAS VARIABLES Y RESULTADOS DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS	107
4.2.6.1.- Consideraciones de los distintos escenarios y variables analizadas. Valores límites.....	107
4.2.6.2.- Tratamiento de las variables.....	108
4.2.6.3.- Modo pozo, 30MW. Escenario inicial.	109
4.2.6.3.1.- Evolución de la concentración de CO.....	109
4.2.6.3.2.- Densidad de los humos	111
4.2.6.3.3.- Visibilidad.....	113
4.2.6.3.4.- Velocidades	115
4.2.6.3.5.- Temperaturas	117
4.2.6.3.6.- Evolución de las partículas de humo	119
4.2.6.4.- Modo pozo 30MW. Escenario con cortina.....	122
4.2.6.4.1.- Evolución de la concentración de CO.....	122
4.2.6.4.2.- Densidad de los humos	124
4.2.6.4.3.- Visibilidad.....	126
4.2.6.4.4.- Velocidades	128
4.2.6.4.5.- Temperaturas	130
4.2.6.4.6.- Evolución de las partículas de humo	132
4.2.6.5.- Modo pozo, 100MW. Escenario inicial.	135

4.2.6.5.1.- Evolución de la concentración de CO.....	135
4.2.6.5.2.- Densidad de los humos	137
4.2.6.5.3.- Visibilidad.....	139
4.2.6.5.4.- Velocidades	141
4.2.6.5.5.- Temperaturas	143
4.2.6.5.6.- Evolución de las partículas de humo	145
4.2.6.6.- Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina.....	148
4.2.6.6.1.- Evolución de la concentración de CO.....	148
4.2.6.6.2.- Densidad de los humos	150
4.2.6.6.3.- Visibilidad.....	152
4.2.6.6.4.- Velocidades	154
4.2.6.6.5.- Temperaturas	156
4.2.6.6.6.- Evolución de las partículas de humo	158
4.2.6.7.- Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial.	161
4.2.6.7.1.- Evolución de la concentración de CO.....	161
4.2.6.7.2.- Visibilidad.....	163
4.2.6.7.3.- Velocidades	165
4.2.6.7.4.- Temperaturas	167
4.2.6.7.5.- Evolución de las partículas de humo	169
4.2.6.8.- Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina.....	172
4.2.6.8.1.- Evolución de la concentración de CO.....	172
4.2.6.8.2.- Visibilidad.....	174
4.2.6.8.3.- Velocidades	176
4.2.6.8.4.- Temperaturas	178
4.2.6.8.5.- Evolución de las partículas de humo	180

4.2.6.9.- Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial.	183
4.2.6.9.1.- Evolución de la concentración de CO.....	183
4.2.6.9.2.- Visibilidad.....	185
4.2.6.9.3.- Velocidades	187
4.2.6.9.4.- Temperaturas	189
4.2.6.9.5.- Evolución de las partículas de humo	191
4.2.6.10.- Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina....	194
4.2.6.10.1.- Evolución de la concentración de CO.....	194
4.2.6.10.2.- Visibilidad.....	196
4.2.6.10.3.- Velocidades	198
4.2.6.10.4.- Temperaturas	200
4.2.6.10.5.- Evolución de las partículas de humo	202
4.2.7.- COMPARATIVA DE RESULTADOS, PROYECTO, CORTINA.....	205
4.2.7.1.- Modo pozo, 30MW.	205
4.2.7.1.1.- Evolución de la concentración de CO.....	205
4.2.7.1.2.- Visibilidad.....	207
4.2.7.1.3.- Velocidades	209
4.2.7.1.4.- Temperaturas	211
4.2.7.1.5.- Evolución de las partículas de humo	215
4.2.7.2.- Modo pozo, 100MW.	216
4.2.7.2.1.- Evolución de la concentración de CO.....	216
4.2.7.2.2.- Visibilidad.....	218
4.2.7.2.3.- Velocidades	220
4.2.7.2.4.- Temperaturas	222
4.2.7.2.5.- Evolución de las partículas de humo	226

4.2.7.3.- Modo transversal, 30 MW.....	227
4.2.7.3.1.- Evolución de la concentración de CO.....	227
4.2.7.3.2.- Visibilidad.....	229
4.2.7.3.3.- Velocidades	231
4.2.7.3.4.- Temperaturas	233
4.2.7.3.5.- Evolución de las partículas de humo	237
4.2.7.4.- Modo transversal, 100 MW.....	238
4.2.7.4.1.- Evolución de la concentración de CO.....	238
4.2.7.4.2.- Visibilidad.....	240
4.2.7.4.3.- Velocidades	242
4.2.7.4.4.- Temperaturas	244
4.2.7.4.5.- Evolución de las partículas de humo	248
4.2.8.-EVOLUCIÓN DE LAS DISTINTAS VARIABLES EN EL TIEMPO	249
4.2.8.1.- Modo pozo, 30MW	
4.2.8.1.1.- Evolución de la concentración de CO.....	249
4.2.8.1.2.- Visibilidad.....	249
4.2.8.1.3.- Velocidades	250
4.2.8.1.4.- Temperaturas	250
4.2.8.2.- Modo pozo, 100MW.....	251
4.2.8.2.1.- Evolución de la concentración de CO.....	251
4.2.8.2.2.- Visibilidad.....	251
4.2.8.2.3.- Velocidades	252
4.2.8.2.4.- Temperaturas	252
4.2.8.3.- Modo transversal, 30 MW.....	253

4.2.8.3.1.- Evolución de la concentración de CO.....	253
4.2.8.3.2.- Visibilidad.....	253
4.2.8.3.3.- Velocidades	254
4.2.8.3.4.- Temperaturas	254
4.2.8.4.- Modo transversal, 100 MW.....	255
4.2.8.4.1.- Evolución de la concentración de CO.....	255
4.2.8.4.2.- Visibilidad.....	255
4.2.8.4.3.- Velocidades	256
4.2.8.4.4.- Temperaturas	256
4.2.9.-INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	257
4.2.9.1.- Modo pozo, 30MW.	257
4.2.9.1.1.- Evolución de la concentración de CO.....	257
4.2.9.1.2.- Visibilidad.....	257
4.2.9.1.3.- Velocidades	257
4.2.9.1.4.- Temperaturas	258
4.2.9.1.5.- Evolución de las partículas de humo	258
4.2.9.2.- Modo pozo, 100MW.	259
4.2.9.2.1.- Evolución de la concentración de CO.....	259
4.2.9.2.2.- Visibilidad.....	259
4.2.9.2.3.- Velocidades	259
4.2.9.2.4.- Temperaturas	260
4.2.9.2.5.- Evolución de las partículas de humo	260
4.2.9.3.- Modo transversal, 30 MW.	261
4.2.9.3.1.- Evolución de la concentración de CO.....	261
4.2.9.3.2.- Visibilidad.....	261

4.2.9.3.3.- Velocidades	261
4.2.9.3.4.- Temperaturas	261
4.2.9.2.5.- Evolución de las partículas de humo	261
4.2.9.4.- Modo transversal, 100 MW.....	263
4.2.9.4.1.- Evolución de la concentración de CO.....	263
4.2.9.4.2.- Visibilidad.....	263
4.2.9.4.3.- Velocidades	263
4.2.9.4.4.- Temperaturas	263
4.2.9.2.5.- Evolución de las partículas de humo	263
4.2.10.-EVOLUCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES EN EL TIEMPO.....	265
4.2.10.1.- Modo pozo, 30MW.....	265
4.2.10.1.1.- Evolución de la concentración de CO.....	265
4.2.10.1.2.- Visibilidad.....	265
4.2.10.1.3.- Velocidades	265
4.2.10.1.4.- Temperaturas	265
4.2.10.2.- Modo pozo, 100MW.....	266
4.2.10.2.1.- Evolución de la concentración de CO.....	266
4.2.10.2.2.- Visibilidad.....	266
4.2.10.2.3.- Velocidades	266
4.2.10.2.4.- Temperaturas	266
4.2.10.3.- Modo transversal, 30 MW.....	267
4.2.10.3.1.- Evolución de la concentración de CO.....	267
4.2.10.3.2.- Visibilidad.....	267
4.2.10.3.3.- Velocidades	267
4.2.10.3.4.- Temperaturas	267

4.2.10.4.- Modo transversal, 100 MW.....	268
4.2.10.4.1.- Evolución de la concentración de CO.....	268
4.2.10.4.2.- Visibilidad.....	268
4.2.10.4.3.- Velocidades	268
4.2.10.4.4.- Temperaturas	268
5.- <u>CONCLUSIONES</u>	269
6º.- <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	272
7º.- <u>TESIS QUE SE PUEDEN PROPONER COMO CONSECUENCIA DE LA PROPUESTA</u>	278
8.- <u>CURRICULUM VITAE</u>	279

ANEXO I

- I.1) VALIDACIÓN DEL MODELO**
- I.2) CÓDIGO DEL FDS PARA EL MODELO**

1.- OBJETO DE LA TESIS.

1.1.- ANTECEDENTES.

En la seguridad de túneles carreteros, debe considerarse un antes y un después del incendio en el túnel del Montblanc – 24 de marzo de 1999 - . Esta terrible catástrofe nos puso en evidencia sobre algo que se debería haber previsto, que es, que la técnica de construcción y explotación de túneles ha avanzado muy rápido, lo que ha permitido hacer túneles cada vez más largos y con más tráfico, sobre todo camiones y no ha avanzado de igual forma la seguridad en los mismos.

Aunque se sabía que la longitud de un túnel y la intensidad del tráfico (IMD), aumentan más que proporcionalmente los riesgos, la creencia de que la accidentalidad en túneles de carretera es bastante menor que a cielo abierto – del orden de 1/3 – lo cual es cierto, pero hay que enfatizar que una vez producido un accidente en el interior de un túnel, sus consecuencias pueden ser muchísimo más graves que a cielo abierto. Esto se ha demostrado dramáticamente en pocos años, en incendios tan importantes como fueron, los del Canal de la Mancha, Montblanc, Tauern y Kafrun. Es evidente que lo más peligroso en un túnel es el incendio.

Tradicionalmente en túneles carreteros mayores de 600 m la ventilación del túnel tiene que ser de forma mecánica y es la encargada de extraer los humos producidos, tanto por el contaminante emitido por los vehículos (estado de confort) como por los producidos en un incendio (estado de incendio). Para ello es necesario dotar de una infraestructura de ventilación, necesaria para poder actuar ante cualquier tipo de incidencia.

Uno de los aspectos más importantes es la variedad del tipo de carga y de potencia de fuego a las que está expuesto el túnel, debido a aleatoriedad del tipo de vehículos que pueden circular en su interior.

Por otro lado hay que destacar, que históricamente la mayoría de las muertes producidas en accidentes en el interior de los túneles, son debidas a la inhalación de humos, esto nos hace pensar que tenemos un camino importante por recorrer, en el estudio del comportamiento y control del humo en el interior de un túnel carretero.

1.2.- CONSECUENCIAS.

En los incendios en túneles, el fuego presenta de forma general un comportamiento similar a los incendios que se producen en cualquier recinto cerrado. Aunque el carácter lineal de este tipo de estructuras, reduce la complejidad de su comportamiento, la existencia de un flujo forzado de aire dificulta la predicción del comportamiento del mismo.

No es posible describir rigurosamente los diferentes elementos que intervienen en el estudio de un incendio, debido a la diversidad de los motivos que los originen. No es lo mismo el incendio producido por el derrame de combustible de un vehículo cisterna, que el producido por la auto-ignición del motor de un vehículo pesado.

Por otro lado nos encontramos con la propia geometría del túnel como factor decisivo, en la elección del sistema de ventilación empleado. En la actualidad se están empleando tres sistemas y algunos como combinación de estos.

- Ventilación Longitudinal.
- Ventilación Semitransversal
- Ventilación Transversal pura.

El sistema longitudinal es el empleado en túneles cortos (entre 600 y 3000 m) y desplaza el aire longitudinalmente al túnel. El semitransversal toma el aire por las bocas del túnel y lo expulsa a través de unas galerías intermedias al exterior y por último el transversal puro, que es el empleado en túneles largos (mayores de 3000m), este sistema extrae y aporta aire a través de conductos perpendicularmente a la sección. Será el sistema de ventilación transversal puro, el escenario donde se desarrolla nuestro estudio.

Cuando se produce un incendio en el interior del túnel, es el sistema de ventilación el encargado de extraer el humo, y de aportar el aire fresco para su renovación. En ese proceso, el sistema tiene que ser capaz de controlar esa evolución del humo, y evitar su propagación hacia la zona donde se encuentran retenidos los vehículos. En este proceso intervienen, tanto agentes Internos como externos al túnel, que pueden alterar la evolución del humo, como por ejemplo: el viento, tipo de fuego, retardo en su detección, las condiciones climatológicas, geográficas, efecto parada brusca de vehículos, etc.

Todos estos factores hacen que el sistema sea vulnerable, ya que la alteración de alguno de ellos puede provocar consecuencias irremediables.

1.3.- PROPUESTA DE MEJORA.

El estudio se centrará en el estudio de un sistema de impulsión de aire, con el objeto de confinar o desplazar los humos producidos por un incendio derivado de un accidente en el interior del túnel.

Se pretende diseñar un sistema de impulsión de aire, mediante baterías de ventiladores colocados en la parte superior de la sección del túnel, de forma que se generen barreras o cortinas de aire, y se puedan conseguir sectores de incendio.

Este sistema será complementario al sistema de ventilación mecánica que posee el túnel y deben de coexistir, de forma que asegure el control del humo.

En el caso de un incendio se activará el sistema provocando una descarga de aire en forma de cortina, de forma transversal a la sección del túnel. Esta sectorización provocada por el aire será repetida a lo largo del túnel, tantas veces como salidas de emergencia y sectores existan.

Estas cortinas actuarán en el instante del incendio para evitar así la propagación del humo a lo largo del recorrido hasta que quede asegurada la evacuación de las personas a través de las salidas reglamentarias.

Es importante destacar que el aire debe ser impulsado a una presión y un caudal definido, que será determinado por las características del foco del incendio ya que intervienen muchos parámetros o factores que influyen en el comportamiento del sistema, como pueden ser: diferencia de presión interior y exterior, diferencia de temperatura, velocidad del viento, etc.

Una vez descrito el sistema y analizados tanto los efectos como las consecuencias del incendio, se procede a una validación del sistema a través de una aplicación en un caso real, de esta forma se podrán cuantificar los efectos y obtener unas conclusiones objetivas. Para ello nos centraremos en el túnel Malo de 6,5 Km de longitud, de la autopista Italiana Pedemontana Veneta.

Este tramo de túnel, resuelve actualmente el control de humos derivados de un incendio, mediante el sistema de ventilación transversal pura, introduciendo aire fresco a través de un gran conducto situado en la parte inferior del túnel, y la extracción del aire contaminado la soluciona, a través otro gran conducto situado en la parte superior. Este aire contaminado es expulsado a la calle a través de unas grandes chimeneas.

Existen dos formas diferentes de actuación, en función del tráfico:

MODO TRANSVERSAL Se utiliza cuando el túnel está colapsado, el sistema de ventilación debe ser capaz de extraer los humos generados en el incendio, y de aportar aire fresco para su renovación.

MODO POZO Se utiliza cuando el túnel circula con normalidad y los vehículos pueden marcharse, el sistema debe ser capaz de garantizar una corriente longitudinal del aire en el sentido de circulación que evite el retroceso de la capa de humos hacia los vehículos situados aguas arriba del foco.

Otro aspecto importante a tener en cuenta, es la carga de fuego. Actualmente el sistema de ventilación de este túnel ha sido dimensionado para una carga máxima de fuego de 30 MW (carga equivalente a un camión ardiendo). Nuestro estudio analizará el comportamiento del humo en varios escenarios, 30 y 100 MW (carga equivalente a varios camiones o cisternas cargadas con productos derivados del petróleo). Se podrá comprobar como evolucionan en ambos escenarios las distintas variables como el humo, CO, visibilidad, etc.

Para el cálculo aerodinámico se ha utilizado un software de modelización de incendios de contrastada fiabilidad denominado FDS "Fire Dynamics Simulator". Este software ha sido extraído de NIST "National Institute of Standards and Technology" de EEUU.

Se ensayarán los ambos escenarios, estado actual y el estado con la propuesta de soluciones, generando resultados comparativos, en los que se podrá observar como evolucionan las distintas variables.

2.- ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA.

2.1.- NORMATIVA.

Es importante analizar la normativa mundial y las recomendaciones de los comités de expertos ya que en materia de seguridad en túneles, en la actualidad están regulados tanto los sistemas mínimos necesarios que deben ser instalados en un túnel, así como el procedimiento de actuación en el caso de un siniestro. Destacando que todas estas normas no son de obligado cumplimiento, adoptándose siempre las recomendaciones como buena práctica, bien es cierto que prácticamente en la totalidad de las nuevas ejecuciones se están respetando.

2.1.1.- CONSIDERACIONES PREVIAS

Tal y como hemos comentado a partir del incendio dramático en el Montblanc, todas las administraciones, sobre todo europeas y muy especialmente las de los cuatro países alpinos, se han lanzado a revisar todos sus túneles, especialmente los más largos, analizando su equipamiento y posibles carencias. A este respecto, conviene destacar los dos magníficos trabajos siguientes:

Grupo de trabajo creado por la oficina federal de carreteras de Suiza y su informe final de 23 de mayo de 2000.

En este informe se repasan todos los túneles viarios de Suiza y se proponen mejoras en aquellos que se considera necesario. En el grupo participaron expertos de los cuatro países alpinos y se propuso aumentar el presupuesto de conservación en 500 millones de francos suizos en 5 años.

En el año 1987 la Asociación Mundial de la Carretera (AIPCR) comenzó a elaborar unas recomendaciones acerca de las medidas de seguridad que deberían disponer los túneles de carretera y en Estados Unidos lo hace la NFPA-502 en vigor desde 1975.

En Francia, el Centro de Estudios de Túneles (CETU), en colaboración con la Dirección de Carreteras elaboró un inventario de equipamientos y carencias y propuso destinar 2000 millones de Francos Franceses para mejorar la seguridad en sus túneles viarios. Además, con fecha septiembre de 2000 ha publicado la nueva norma de seguridad en túneles: Circulaire interministérielle n° 2000-63 du 25 août 2000- que es, probablemente, la norma más minuciosa y precisa publicada hasta la fecha. Francia, además, ha creado un grupo de trabajo permanente para la seguridad de los túneles que se reúne dos veces al año.

En Europa el Parlamento ha dispuesto una directiva sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras a través de la Directiva 2004/54/CE.

En España, la Dirección General de Carreteras ha hecho un inventario de todos sus túneles, con todos sus equipamientos y características principales, tales como longitud, IMD, de uno o dos tubos, urbano, periurbano o interurbano. A la vista de ello se creó un grupo de trabajo para analizar los riesgos en cada túnel y proponer las mejoras más adecuadas en cada caso.

Por otro lado en España se está preparando el borrador por el que se transpone la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del consejo de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.

2.1.2.- NORMATIVA VIGENTE ACTUAL

El Parlamento Europeo y el Consejo aprobaron el 29 de Abril de 2004 la directiva 2004/54/Ce sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras. La aplicación de esta directiva requiere que los estados y las regiones concreten y fijen su ámbito real de aplicación. También se fijan como obligatorias algunas recomendaciones y se detallan la organización, procedimientos y sistemas que deberán de ejecutarse en cada una de las fases del ciclo de vida de un túnel de carretera.

A continuación se exponen las más importantes normas que regulan la seguridad en túneles y que a lo largo del estudio se citarán.

- * Normativa Italiana del Ministerio de Transportes, sobre túneles carreteros.
- * IOS-98 - BOE del 1 de Diciembre de 1998 por el Ministerio de Fomento, Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre, donde se fijan los sistemas mínimos necesarios en los túneles, determina la necesidad de ciertas instalaciones (ventilación, iluminación, energía, sistema contra incendios, señalización y control de tráfico, etc.) en función de características del túnel como longitud, tráfico (frecuencia y tipo), trazado, sección, etc., que clasifican a los túneles según tres niveles de servicio.
- * Manual de Autoprotección – Real Decreto 132 de 29 de Junio de 1990. En él se describen las directrices para la elaboración de un Plan de Emergencia contra Incendios y de Evacuación de Locales y Edificios. Aunque este Manual no se refiere directamente a explotaciones como las de un túnel, viene siendo casi la única orientación para la definición de los recursos movilizados en túneles viarios en respuesta a incidentes y emergencias.
- * Transporte de Mercancías Peligrosas (R.D. 2115/1998 de 2 de octubre, B.O.E. 248 de 16.10.98).
- * Circular Interministerial francesa 2000-63 de Agost de 2000. Su publicación es resultado del trabajo de un grupo de expertos que analizaron el grave incendio del Mont Blanc. En ella se establecen procedimientos técnicos APRA la puesta en

servicio de nuevos túneles y modalidades de seguimiento de la explotación. Igualmente, para túneles ya en explotación, se define el trámite que han de seguir para acomodar equipamiento y obra de seguridad, junto a la explotación, a las nuevas exigencias.

- * El Parlamento Europeo y el Consejo aprobó el 29 de Abril de 2004 la Directiva 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras. Esta directiva no se aplica a un conjunto de túneles que no perteneciendo a la red transeuropea son de vital importancia en la movilidad de una región.
- * PIARC de la asociación mundial de la carretera elaborada por el comité técnico de túneles carreteros.

Hasta ahora, las recomendaciones de la PIARC, del CETU, del Ministerio de Fomento y de otras instituciones Internacionales, junto a la elevada cualificación de los explotadores y proyectistas, habían venido siendo la guía a la hora de acometer los proyectos, construcción y explotación de los túneles.

Todo este conjunto de normativas y recomendaciones ha hecho que las exigencias sean mucho mayores para los responsables de explotación de los mismos. Sin embargo, no contaban con normas que definieran con precisión sus obligaciones y les garantizaran la entrega de un túnel con unas condiciones de seguridad suficientes (obra civil, instalaciones, infraestructuras).

2.2- ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD ACTUAL EN TÚNELES CARRETEROS.

Es importante destacar que en el protocolo de actuación ante un accidente (entendiendo por accidente el supuesto más desfavorable que es el incendio) intervienen una serie de sistemas necesarios para la detección del incidente en el menor tiempo posible, evacuación del túnel y posterior extinción del fuego.

Para poder conseguir el objetivo es necesario dotar el túnel de una serie de instalaciones que a continuación se describen y valoran.

2.2.1.-INSTALACIONES BÁSICAS.

- Ventilación (con sus correspondientes detecciones de CO, opacidad y anemómetros. Usada tanto para la extracción del CO como los humos en caso de incendio),
- Iluminación.
- Comunicaciones (internas y externas),
- Señalización fija y variable (incluso carriles reversibles),
- Detectores de gálibo en entradas,
- Detectores de tráfico y velocidad,
- Semáforos,
- Control de mercancías peligrosas,
- Suministro auxiliar de energía (doble suministro y/o grupos electrógenos).

2.2.2.- INSTALACIONES DE SEGURIDAD PARA INCIDENCIAS.

- Alumbrado de emergencia.
- Detección de incendios.
- Postes de SOS.
- Cámaras de TV en circuito cerrado (CCTV) con detección automática de incidencias.
- Red de suministro de agua.
- Extintores.
- Drenaje de vertidos contaminantes y/o con riesgo de incendio.
- Refugios presurizados.
- Galerías de evacuación presurizadas.
- Barreras en entradas túnel.
- Megafonía.
- Detectores de presencia humana.

2.3.- SISTEMAS DE CONTROL DE HUMOS Y GASES EN FUNCIÓN DEL TIPO DE VENTILACIÓN DEL TÚNEL.

Se pretende definir la tecnología que actualmente se utiliza en el control de humos (tanto los derivados de un incendios como los producidos por el uso normal de los vehículos) en función del tipo de ventilación del túnel. Para ello se describirán las distintas configuraciones que utilizan actualmente.

2.3.1.- CONTROL A TRAVÉS DE LA VENTILACIÓN PRINCIPAL.

Es importante hacer una clasificación de sistemas de evacuación y control del contaminante, en función de la dirección en la que circula el flujo de aire.

Se describirán los tres tipos básicos de ventilación que existen (transversal, semitransversal y longitudinal). También existen combinaciones de éstas y que a continuación se exponen.

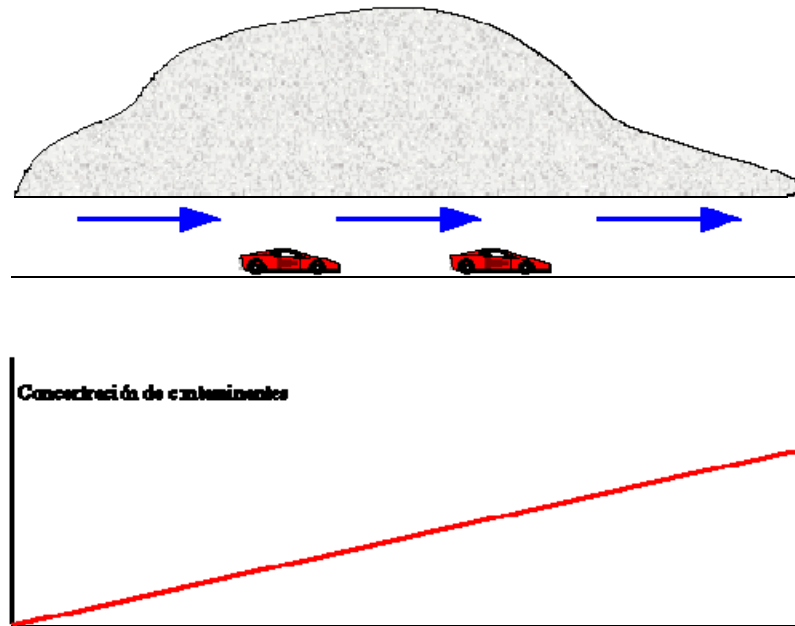
Los cometidos del sistema de ventilación no corresponden únicamente al funcionamiento habitual del túnel, manteniendo los niveles de contaminación dentro de unos niveles considerados admisibles, sino que también debe ser capaz de permitir la evacuación en caso de accidente y el control de la nube de humos producidos por el fuego.

A continuación se exponen los sistemas de ventilación primaria así como sus combinaciones.

2.3.1.1.- Ventilación longitudinal natural.

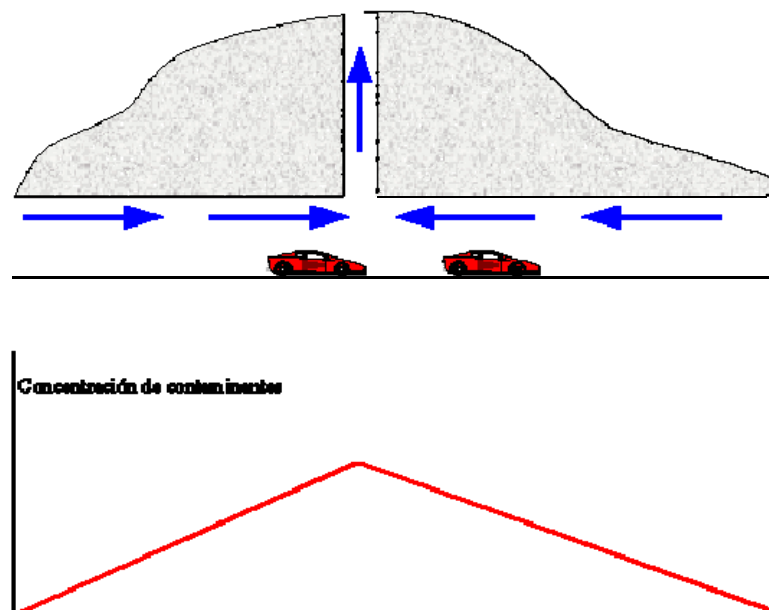
No corresponde propiamente a un sistema de ventilación al no disponerse instalaciones de ventilación ya que la dilución de contaminantes se produce únicamente por efectos meteorológicos o del tráfico creando una corriente suficiente de aire en el túnel. Suele

emplearse solamente en túneles muy cortos (no superior a 300 metros) ya que no existe ningún control sobre la ventilación en caso de accidente.



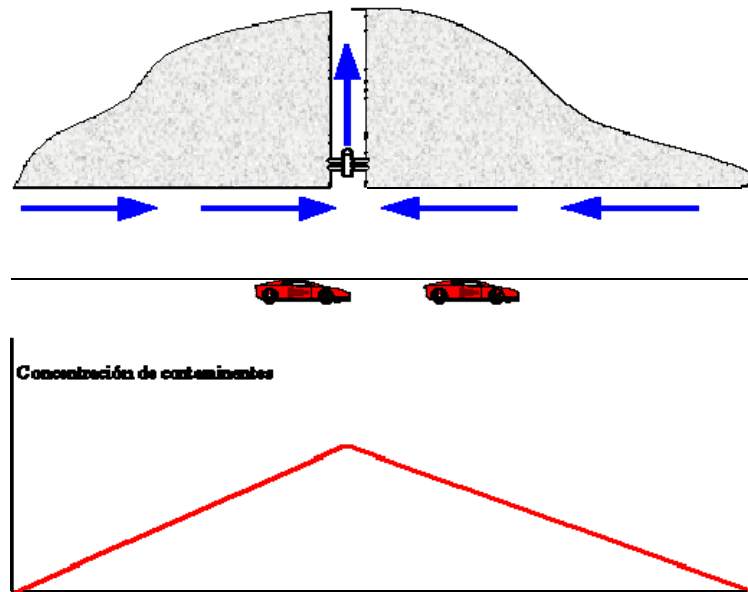
2.3.1.2.- Ventilación longitudinal natural con pozo

Este sistema, prácticamente en desuso, es muy similar al longitudinal natural pero se potencia el efecto atmosférico creando un pozo de ventilación gracias al cual, debido al efecto atmosférico, parte del aire viciado se extrae del túnel. Sin embargo, en caso de algunas circunstancias meteorológicas pueden aparecer funcionamientos incorrectos del sistema.



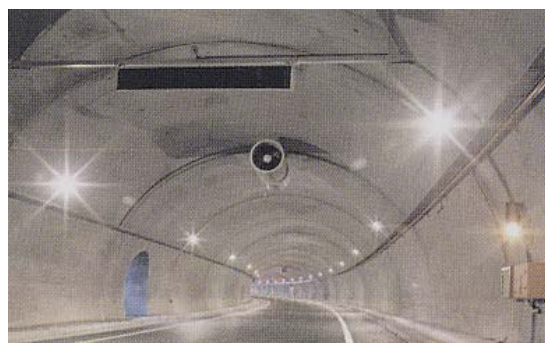
2.3.1.3.- Ventilación longitudinal con ventiladores en pozo

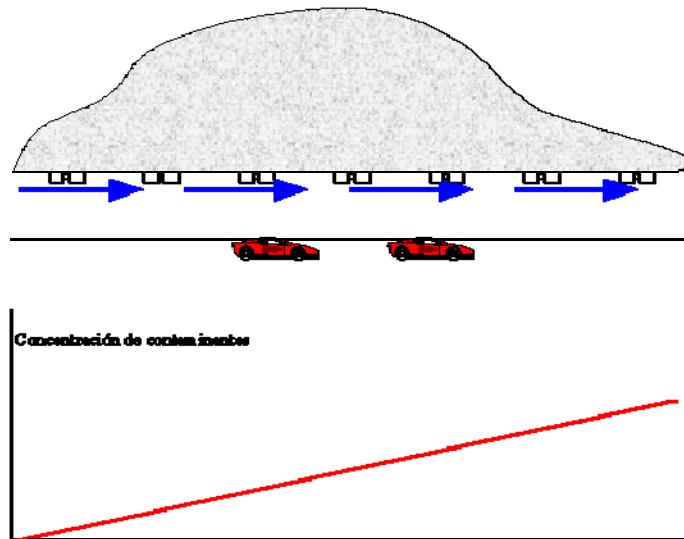
Partiendo del concepto anterior este sistema permite el control correcto del flujo de aire con contaminantes en la dirección deseada. Es posible tener configuraciones en las que a través del pozo se sople aire fresco o se aspire aire viciado. En cualquier caso, el segundo tipo es más favorable ya que evita las molestias de un fuerte chorro en la mitad del túnel y en zonas urbanas no sale aire contaminado a través de las bocas.



2.3.1.4.- Ventilación longitudinal por ventiladores de chorro

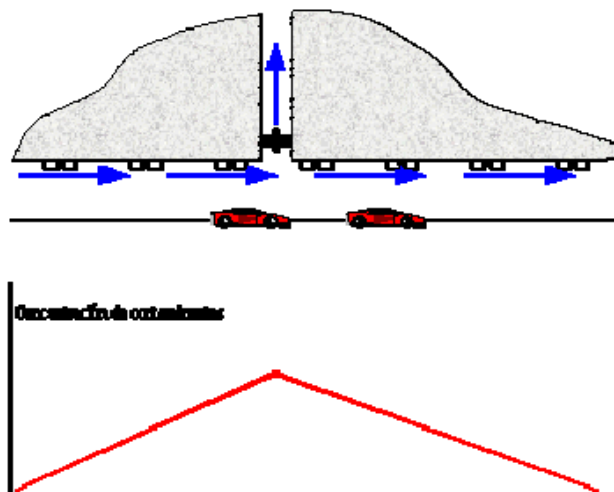
En este tipo de túneles se disponen pequeños ventiladores de chorro situados a lo largo del túnel, los cuales generan una corriente longitudinal de aire en el mismo. Este tipo de ventilación está especialmente indicado para túneles con un sentido único de circulación incluso para grandes longitudes (<3.000m). En caso de incendio, se impulsan los humos hacia la boca de salida de los vehículos, evitando el retroceso de los humos a la zona en la que se produce la retención de los coches. En túneles bidireccionales es muy conveniente que los ventiladores sean de tipo reversible para facilitar el control de los humos en caso de incendio. Su gran ventaja es un reducido coste tanto inicial como de explotación.





2.3.1.5.- Ventilación longitudinal por ventiladores en pozo y aceleradores

Este sistema de ventilación tiene la ventaja de que el pozo de extracción permite doblar la longitud máxima del túnel y a la vez controlar la nube de contaminantes en caso de incendio.



2.3.1.6.- Ventilación semi-transversal con inyección de aire fresco

Con este tipo de ventilación se pretende dar a cada zona del túnel la cantidad de aire fresco necesario para diluir los contaminantes que allí se producen. El aire fresco se introduce a lo largo de todo el túnel a través de una serie de aberturas que comunican un conducto auxiliar con el túnel. El conducto auxiliar habitualmente va situado en un falso techo del túnel. El aire contaminado sale a través de las bocas. Para prevenir el caso de incendio este tipo de ventilación puede estar preparada para invertir el sentido del aire y pasar a una aspiración a lo largo del túnel o en zonas localizadas. Para ello se disponen trampillas que se pueden abrir o cerrar según el caso.

En el caso de incendio, se opera de forma contraria, se extrae el humo por el conducto superior y el aire fresco se aporta por las bocas del túnel.

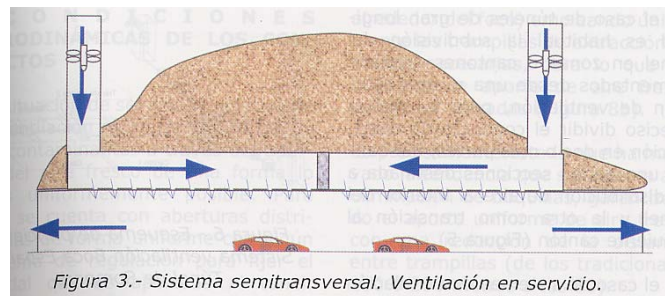
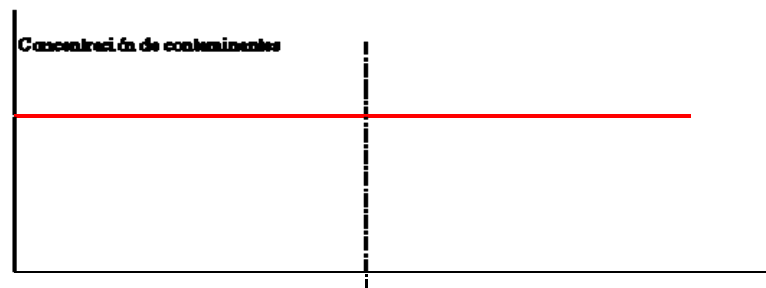
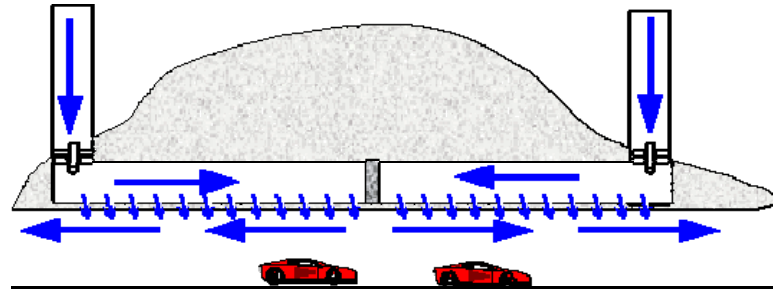
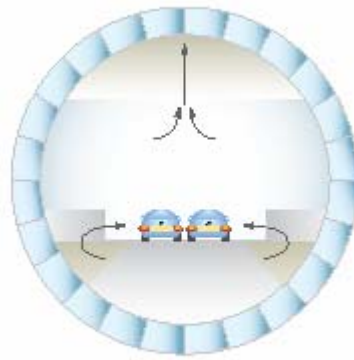


Figura 3.- Sistema semitransversal. Ventilación en servicio.

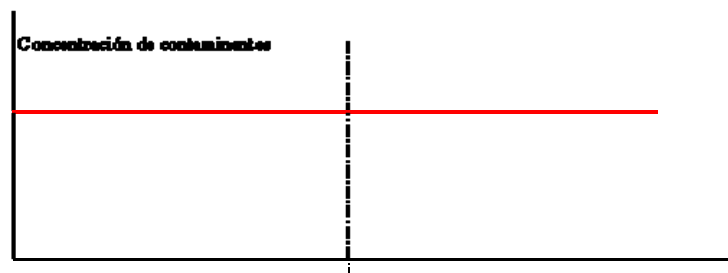
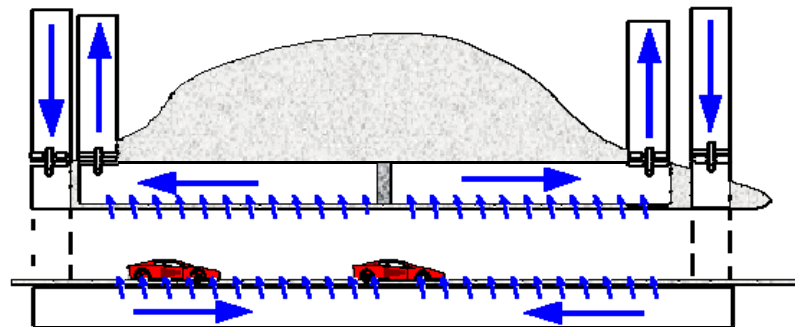
2.3.1.7.- Ventilación transversal total

Con este tipo de ventilación cada tramo del espacio de tráfico recibe exactamente la cantidad de aire fresco necesario para diluir las materias nocivas producidas. El aire fresco se aporta a través de unas aberturas situadas al nivel de la calzada, mientras que el aire viciado se extrae por la parte superior del túnel. Las aberturas para la extracción de aire viciado deben situarse siempre en la parte superior del túnel para permitir la extracción de los humos en caso de incendio.

Este es probablemente el sistema de ventilación más completo, aunque conlleva los mayores gastos, tanto de instalación como de mantenimiento y explotación. Existen dudas también sobre su capacidad para controlar la velocidad longitudinal del aire (y por consiguiente la nube de humos en caso de incendio) en caso de fuertes diferencias de presión entre bocas.



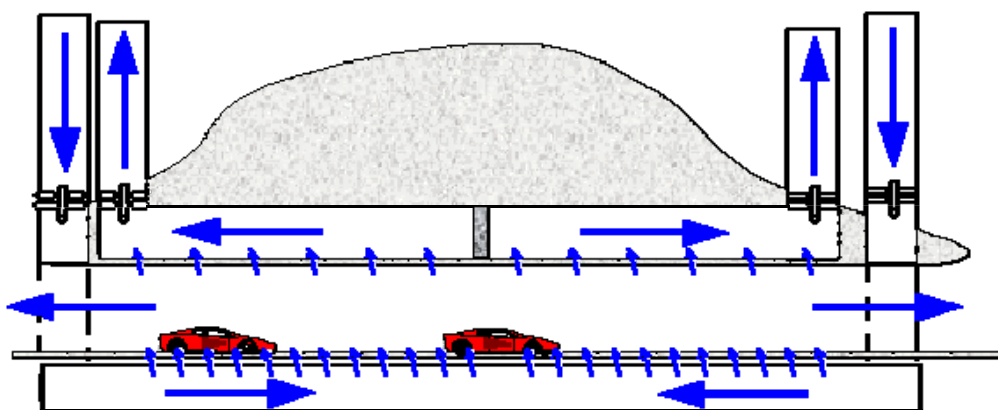
FULLY TRANSVERSE



El sistema objeto del estudio será analizado en un túnel con este tipo de configuración.

2.3.1.8.- Ventilación pseudo-transversal

La ventilación pseudo-transversal está basada en la transversal total con la diferencia de que la cantidad de aire extraído es menor que la del aire inyectado, saliendo por las bocas la diferencia entre ambos. Esto permite reducir los gastos de explotación y de construcción al dimensionarse los conductos de extracción para un menor caudal. Sin embargo, la capacidad del sistema de extracción en caso de incendio se ve reducida.



2.3.1.9.- Mixtos

A la hora de llevar a la práctica estos principios, las limitaciones económicas de espacio o simplemente las peculiaridades de cada túnel obligan a buscar soluciones intermedias. Una alternativa interesante consiste en diferenciar el funcionamiento del túnel en caso de servicio y en caso de incendio.

El sistema de control y confinamiento de humos que se va a proponer pretende ser un complemento a estos sistemas de ventilación, para dar respuesta a esas limitaciones económicas, de espacio o simplemente de configuración particular del propio túnel.

2.3.2.- CONTROL A TRAVÉS DE LA VENTILACIÓN SECUNDARIA.

Existen otros conjuntos de ventilación a los que se presta a veces menos atención que a los anteriores aunque son fundamentales en el funcionamiento del túnel especialmente para los casos de incendio.

2.3.2.1.- Refugios y nichos

Para túneles de gran longitud se considera imprescindible la disposición a lo largo del túnel y a unas distancias no excesivas de locales en los que los usuarios puedan utilizar en caso de incendio. Hay dos tipos distintos de locales que deben cumplir la misión de salvaguardar temporalmente a los usuarios: los nichos y los refugios.

Los nichos, de reducidas dimensiones están pensados para albergar a una o dos personas y en ellos se sitúan instalaciones de seguridad como los postes SOS o los hidrantes para los servicios de emergencia. Su uso es de duración limitada y, aunque se ventilan, no suelen someterse a grandes exigencias de tiempo en relación con su resistencia al fuego.

Los refugios, en cambio, son locales de dimensiones mayores con capacidad para un número más elevado de personas donde guarecerse en caso de incendio hasta la llegada de los equipos de rescate. Por ello deben estar dotados de un sistema de ventilación suficiente para las personas que vayan a permanecer además de generar una ligera sobrepresión para impedir la entrada de humos al local.

Generalmente se exige que estos refugios tengan una salida diferente a la entrada para evitar su conversión en trampas mortales.

Normalmente, estos locales tienen un sistema de ventilación independiente del sistema principal que se alimentan mediante tuberías dispuestas en la calzada a lo largo de todo el túnel. Las estaciones de ventilación que sirven estos conductos poseen ventiladores que en caso de incendio actúan al máximo de su capacidad y en caso de servicio garantizan un aporte de aire "de limpieza".

2.3.2.2.- Locales técnicos

Otros locales que están habitualmente dispuestos en el interior del túnel son los locales técnicos para los transformadores de los sistemas eléctricos que dan servicio a instalaciones como la de iluminación del túnel, dispositivos de señalización, detectores de CO y humos, etc. El calor generado por los transformadores se disipa mediante sistemas de ventilación independientes que operan de modo automático cuando la temperatura de estos recintos se incrementa.

2.4.- ANÁLISIS DEL SISTEMA UTILIZADO EN LA ACTUALIDAD.

En el punto anterior se han descrito las distintas configuraciones de ventilación que se están siendo utilizadas en estos momentos. **El escenario en el que se va a implantar nuestro sistema de control de humos, es en un túnel con ventilación transversal total o pura, por lo que a partir de ahora nos centraremos en este tipo de configuración.**

La principal razón de implantar este sistema de control de humos en una ventilación transversal pura, es la de evitar movimientos del aire de forma longitudinal que puedan interferir con la inyección de aire perpendicular que provoca la cortina de aire.

2.4.1.- CONTROL DEL HUMO EN CASO DE INCENDIO EN UN TÚNEL CON VENTILACIÓN TRANSVERSAL PURA.

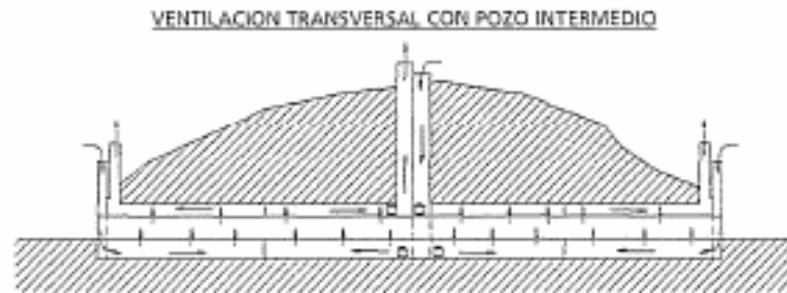
Cuando se produce un incendio en un túnel, el hecho de que se trate de un recinto cerrado facilita que la sección del túnel se vea ocupada rápidamente por los humos del incendio y la temperatura aumenta rápidamente; favoreciendo, a su vez la progresión del incendio.

2.4.1.1.- Sistema de ventilación en caso de incendio.

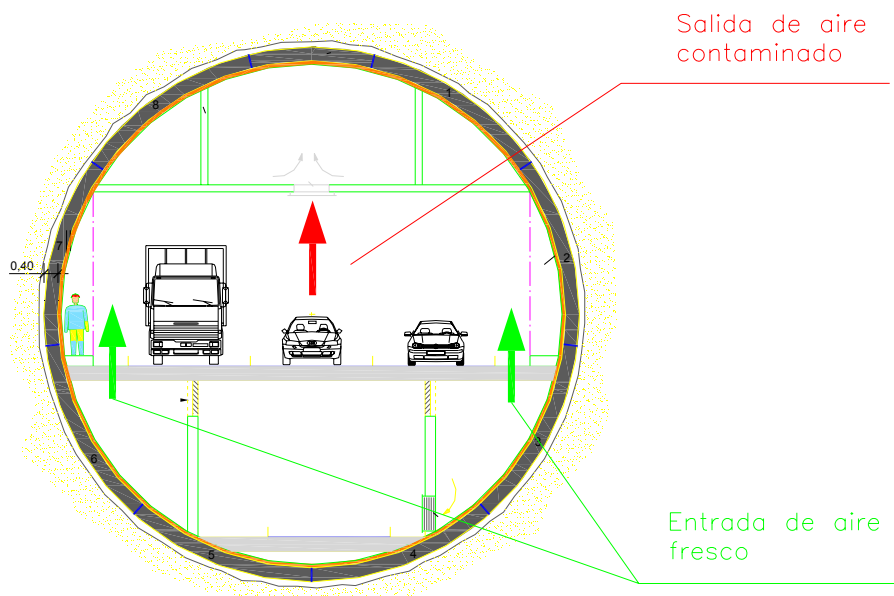
La ventilación transversal pura es el más complejo y el que permite mayores longitudes de túnel y mayores intensidades de tráfico, pero resulta también el más caro en instalación y mantenimiento.

El objetivo del sistema de ventilación es mantener a los usuarios del túnel en la zona de aire fresco el mayor tiempo posible. Tradicionalmente, cuando el sistema estaba basado en pequeñas aberturas en el techo para extraer los humos situadas a lo largo del túnel, esto significaba mantener intacta la estratificación de la capa de humos.

Cada vez más se está tendiendo a situar aberturas de grandes dimensiones mucho más cercanas de tal forma que el sistema se comporte como un sumidero donde se debe centrar la máxima capacidad de extracción en las cercanías del incendio. Para ello se disponen trampillas telecomandadas sobre las que se puede actuar desde el centro de control.



En los sistemas de ventilación transversales la inyección de aire fresco al nivel de la calzada produce una rotación del flujo longitudinal que contribuye a deshacer la estratificación.



En los sistemas de ventilación transversales reversibles, es fundamental reducir el tiempo de inversión del sistema de la fase de inyección de aire fresco a la de extracción de humos.

Según la Directiva Europea en su Art. 2.9.4 "La ventilación transversal o semitransversal se utiliza en aquellos túneles que requieran un sistema de ventilación mecánica

(mayores de 1000 m o con volumen superior a 2000 vehículos por carril) y estos sistemas deberán poder extraer el humo en caso de incendio”.

En el sistema de ventilación transversal se emplean habitualmente ventiladores del tipo axial en los que el flujo proveniente de los conductos de ventilación pasa por el ventilador que lo acelera. El punto de funcionamiento del ventilador dependerá de la instalación a la que se acople y según la curva característica del mismo. No obstante, de una forma general, se puede aproximar la curva de funcionamiento por un polinomio de segundo grado.

2.4.1.2.- Incendio en el interior de un túnel.

La evolución del incendio a lo largo del tiempo es más importante que los niveles máximos que pueden darse en el foco ya que, los tiempos transcurridos desde el inicio del mismo determinan la posibilidad de salvamento de los usuarios involucrados en el incidente.

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento del sistema de ventilación de los túneles es necesario definir una curva temporal de incendio. Los ensayos realizados en el proyecto EUREKA 499 así como estudios anteriores y las curvas dadas en las recomendaciones nacionales muestran, de forma general, un desarrollo muy rápido del incendio en los primeros 10 minutos, incluso para vehículos pequeños (turismo) alcanzando un máximo en ese tiempo y observándose una bajada más o menos rápida. Este comportamiento puede acelerarse para el caso de turismos mientras que muestran una zona de valor máximo de mayor duración en el caso de autobuses o camiones con carga.

Para simplificar la evolución temporal de las distintas magnitudes que definen el incendio y poder presentar una curva de proyecto se han realizado curvas normalizadas por la potencia máxima, como por ejemplo la de Mizuno, de forma escalonada hasta alcanzar el máximo, permaneciendo indefinidamente en este valor. Sin embargo, existen discrepancias en cuanto al tiempo de permanencia en el máximo y la etapa de descenso.

Si se pretende recoger el comportamiento obtenido durante los ensayos del proyecto EUREKA 499 se puede emplear una curva normalizada con un tiempo de subida de 5-8 minutos, un tiempo de permanencia en el máximo próximo a los 5 minutos y una bajada en dos tiempos, primero más brusco y luego más suave hasta la finalización del incendio.

El desarrollo del fuego es especialmente importante en las primeras fases del incendio ya que estos instantes son claves en el control de los humos y la evacuación de pasajeros.

Respecto a los contaminantes, su emisión viene dada por el producto del caudal generado durante el incendio por la concentración del contaminante que se puede aplicar tanto al CO como a la opacidad.

Como resultado de los ensayos EUREKA, se puede aceptar una relación lineal entre la concentración de CO y la potencia calorífica disipada en el incendio, hablando en valores promedio.

Aunque la relación con la opacidad no es tan clara, ante la ausencia de otros datos más fiables observando las curvas de evolución temporal de CO y de humos parece razonable trabajar con la curva de potencia normalizada para las emisiones.

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

Desde el punto de vista de la seguridad en caso de incendio, los objetivos a cumplir son los siguientes:

- Mantener controlada la nube de humos lo más lejos posible de los usuarios. Para conseguirlo debe mantenerse en la medida de lo posible la estratificación de la misma o expulsarla a gran velocidad si las personas situadas aguas abajo del incendio ya han sido evacuadas.
- Evitar la distribución de los humos a zonas próximas al túnel pero no implicadas en el incendio (locales técnicos, otro tubo en túneles comunicados, galerías de escape, etc.)
- Ayudar en las tareas de salvamento a los equipos de rescate.

En caso de accidente la computadora hace lo que le ha sido ordenado y eso no siempre pasa con los operarios, especialmente si tienen que tomar decisiones en poco tiempo y con una gran presión. La tendencia actual es disponer de pautas pre-programadas de actuación tras estudiar los cientos de casos que se obtienen al hacer variar la diferencia de presión entre bocas, el lugar del incendio, la intensidad de tráfico, etc.

Todos esos parámetros son actualizados de forma continua por el sistema de control de los grandes túneles y en función de ellos es posible recomendar un tipo de actuación. El ordenador determina esa pauta en segundos y aconseja una forma de actuar a la espera de la conformidad del operario de control. Si al cabo de dos o tres minutos éste no se decide o no está presente, el ordenador desencadena la actuación prevista. Recuérdese que los primeros minutos son cruciales para controlar el incendio y para favorecer la evacuación.

2.4.1.3.- La seguridad ante incendio.

El objetivo irrenunciable de la seguridad ante incendio es garantizar el mantenimiento de las condiciones de supervivencia para las personas implicadas en dicho incidente. Este objetivo, genérico, recogido así por toda la normativa y reglamentación en la materia, se despliega en matices para cada tipo de infraestructura o edificio.

El caso del túnel: el túnel es una infraestructura necesaria, que sin embargo configura un medio psicológicamente hostil para los conductores por varios motivos:

- * Cambio de las condiciones ambientales y físicas en la entrada y salida del túnel, (sección, luz, aire...).
 - * Espacio limitado a la sección transversal.
 - * Efectos psicológicos que pueden incidir sobre el conductor: claustrofobia, ...etc.
- Mayor repercusión que a cielo abierto, de cualquier avería, accidente, o incendio.

Para la seguridad del túnel, la hipótesis de un incendio en su interior es la más desfavorable porque, además de las consecuencias intrínsecas al propio accidente que lo produce, la existencia de materiales, cargas o fluidos combustibles en los vehículos involucrados puede aumentar con rapidez el desarrollo y evolución del incendio inicial, lo que puede provocar que dicho suceso llegue a alcanzar unas consecuencias y daños de dimensiones catastróficas en vidas y bienes.

El humo generado por causa de un incendio tiene tres efectos lesivos sobre las personas expuestas a su acción:

- Oscuridad, que dificulta la huida debido a la falta de visibilidad.
- Toxicidad, que incapacita a las personas para una huida rápida y, finalmente, puede producir la muerte. Sus efectos dependerán de la naturaleza de los elementos tóxicos presentes en el humo, de su concentración y del tiempo de exposición a los mismos.
- Temperatura, que aturde y, dependiendo del tiempo de exposición, puede causar la muerte.

Así, sin olvidarnos de otros efectos producidos por el incendio, como es la propia radiación debida a la combustión de los materiales presentes en el escenario de incendio, establecemos la distinción con el humo por presentar estos sus efectos a una mayor distancia del foco del incendio, siendo por ello crítico para la evacuación.

Para atajar los efectos del humo, siendo importante el diseño del sistema de ventilación, lo es mucho más la definición de la estrategia y Pautas de Actuación de dicho sistema en caso de incendio. Recibe el nombre de Pauta de Actuación, la estrategia secuencial de operación sobre el sistema de ventilación que responde y resuelve una determinada situación de incendio.

Ante situaciones con incendio en el interior del túnel, la primera medida consistirá en facilitar la evacuación de las personas más próximas al lugar del incendio a través de los itinerarios de evacuación existentes mediante el confinamiento de la nube de humos durante un tiempo suficiente, para proceder a continuación a la extracción o en su caso, al barrido del humo, y facilitar así las labores de extinción.

Para ello, deberá actuarse sobre el sistema de ventilación partiendo de las condiciones de funcionamiento en el momento del incendio y conociendo datos tales como

condiciones ambientales, dirección y densidad de tráfico, tipo de vehículos involucrados, magnitud y potencia.

2.4.1.4.- Extracción del humo en un incendio.

En un sistema con ventilación transversal pura funciona introduciendo el aire limpio en el túnel mediante un colector independiente en la cavidad del túnel, que generalmente abastece a varios ramales secundarios y que a su vez comunican con los puntos de inyección de aire del túnel en la parte inferior de la sección en la calzada.

El aire de extracción es recogido por unas rejillas situadas en la parte superior y conducido a través de unos conductos al exterior del túnel.

En realidad, cuando se produce un incendio importante, los túneles equipados con un sistema de ventilación transversal pura, se comportan como si tuvieran un sistema semitransversal, debido a que no consiguen solucionar todo el humo que genera en un espacio de tiempo tan reducido.

Los puntos de inyección de aire limpio, de los sistemas transversales, suelen estar en los hastiales del túnel a nivel de la calzada, mientras que los puntos de succión del aire viciado, están en la clave del túnel. A veces también se coloca en los colectores de ventilación, un falso tabique, dividiendo en dos, que se adosa a la clave, de manera que tanto la inyección como la succión se realizan por la parte superior del túnel. El mejor sistema, es el que inyecta aire desde el nivel de la calzada y succiona a nivel de clave, porque el aire resultante en el interior del túnel es más limpio.

Tanto la inyección de aire fresco como la succión del viciado, requiere su correspondiente equipo mecánico. Como es fácil de deducir, en caso de incendio, el ventilador que succiona será el más vulnerable, puesto que todos los gases calientes generados por el incendio, pasarán a través de él. Los expertos recomiendan extraer todo el humo generado en un incendio en una longitud de túnel de 400 m, es decir que el sistema de extracción debe ser capaz de sacar la totalidad del humo en los elementos del dominio establecido en ese espacio limitado, para evitar la propagación del humo a lo largo del túnel.

Este último aspecto es el punto débil de este sistema de extracción, ya que es bastante difícil poder conducir esa gran cantidad de humo generado en tan poco tiempo hacia un sentido determinado, sin poder evitar la propagación de humo en el sentido más desfavorable, que siempre será en aquel en el que se encuentran los vehículos retenidos.

Estos efectos negativos a veces no solo están motivados por la falta de conjunción entre la capacidad de extracción del sistema y la premura de tiempo, sino porque existen agentes que influyen desfavorablemente en el comportamiento del aire en el interior del túnel y son aleatorios y de difícil control, como puede ser el viento, el efecto chimenea, etc. en definitiva todos los movimientos de aire longitudinales que provocan turbulencias con el humo estratificado y por consiguiente expansión de la nube de humo hacia los vehículos parados.

2.4.1.5.- Recomendaciones de la PIARC sobre ventilaciones transversales

Las recomendaciones que hace la Asociación Mundial de la Carretera a través de sus comités técnicos, sirven actualmente como referencia de primer orden a la hora de dimensionar una ventilación transversal en un túnel. Es importante considerar estas recomendaciones ya que en estos momentos la mayoría de los diseños están considerando estas normas.

En la publicación *Fuego y Humo en interior de un Túnel* en su artículo V.8. Recomienda las siguientes prescripciones:

- Todos los conductos deben ser completamente estancos
- Hay que conseguir que la estratificación de los humos permanezca en las capas superiores el mayor tiempo posible.
- La velocidad longitudinal del aire debe ser inferior a 2 m/s. En caso de velocidades más altas comienzan turbulencias entre el humo y el aire fresco.
- Con una velocidad del aire alrededor de 2 m/s, la mayoría del humo se separa a un lado (efecto backlayering) y comienza a avanzar en la sección en una distancia aproximada de 400 a 600m en sentido descendiente al fuego. Puede ser determinante si la detección del fuego no es lo suficientemente rápida.
- Con velocidades prácticamente 0 la estratificación puede durar unos 10 minutos, después de este tiempo el humo desciende debido al enfriamiento de los gases.
- Los vehículos parando bruscamente generan un incremento de la velocidad longitudinal.
- En un sistema transversal, los elementos encargados del aporte de aire fresco a nivel de suelo, inducen una rotación en el aire del interior del túnel que provocan un arrastre de los humos hacia la calzada y por lo tanto rompe la estratificación. Por este motivo se recomienda sobredimensionar entre 1/2 y 1/3 el aporte de aire fresco y por consiguiente el de extracción. Este dato es muy importante ya que sobredimensiona la instalación de una forma significativa.
- El cambio de del sistema en estado de confort al estado de incendio debe de hacerse lo mas inmediato posible, por lo que es prioritario detectar lo antes posible la incidencia.
- Las compuestas tanto de extracción como de impulsión de aire tienen que ser automáticas, bien mediante motores o mediante electroimanes que detectan el calor y salta un resorte, este último tiene el inconveniente del rearme.
- Una vez establecido el tipo de incendio para el que se ha dimensionado el sistema, obtendremos una capacidad de generación de humos. Los sistemas de extracción deben de estar dimensionados en exceso para poder extraer la tasa de humo generado.

- Es importante detectar la posición exacta del fuego y acotar la zona de trabajo, de esta forma se actuará en la zona donde se está generando el humo y por lo tanto todos los recursos disponibles de extracción de humos potenciarán una zona en concreto, especialmente en túneles largos.
- El valor recomendado para la extracción se cuantifica según la velocidad longitudinal a través de la sección, se debe conseguir combatir una velocidad de propagación de humos denominada backlayerin que depende de la carga de fuego y que puede ser aproximadamente entre 3 y 4 m/s.
- Se recomienda que la entrada de aire fresco sea a nivel de calzada para que el barrido de la sección sea transversal y se desaconseja el aporte de aire por la parte superior.

2.4.2.- INCONVENIENTES DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN TRANSVERSAL PURA.

En los puntos anteriores se ha descrito el funcionamiento del sistema, las consecuencias en el diseño y el protocolo de actuación en el caso de un incendio. Como se puede deducir la ventilación transversal pura es un sistema vulnerable y necesita mucha precisión ya que depende de unas condiciones óptimas para su perfecto funcionamiento.

El sistema no solo depende de que esté bien dimensionado y posteriormente construido, sino que está sujeto a un protocolo de funcionamiento muy preciso, ya que necesita tener la información rápida y concisa de lo que ha ocurrido en el interior del túnel.

Tal y como se ha comentado anteriormente el principal inconveniente que se presenta en el interior del túnel cuando se produce un incendio es la propagación del humo hacia el lugar donde se encuentran los coches parados. **En la actualidad no existe ningún sistema que garantice el confinamiento del humo.**

Una vez descritas las recomendaciones que PIARC hace para túneles con ventilación transversal pura, podemos deducir que se trata de un sistema que depende de agentes externos, como puede ser las corrientes de aire que emergen en el interior del túnel (efecto geográfico, chimenea, parada brusca de coches, extracción en estado de confort, etc.) y que pueden influir negativamente en el proceso de extracción. Por otro lado es muy importante la rapidez de detección del fuego ya que en su fase inicial hay que comenzar con la configuración del sistema de extracción en su fase de incendio.

Todo esto nos hace pensar que es muy difícil controlar la evolución del humo cuando se produce un incendio en el interior de un túnel, de forma que se garantice la salvaguarda de las personas y la visibilidad para el acercamiento al incendio de los servicios de extinción.

3.- PROPUESTA DE UNA SOLUCIÓN. SISTEMA QUE CONTROLA EL HUMO EN TÚNELES CARRETEROS.

3.1.- DEFINICIÓN DEL SISTEMA.

3.1.1.-OBJETO.

El trabajo consiste en el estudio de un sistema control de humos mediante cortinas de aire situadas transversalmente a su recorrido y repetidas forma periódica a lo largo del túnel coincidiendo con los cantones de extracción, para evitar la propagación del humo en caso de un incendio.

Para ello se analizará el comportamiento del humo de un incendio producido en el interior del túnel, frente a una barrera de aire. Se trata de sectorizar el túnel controlando los humos de forma que estos se desplacen o queden confinados y no se extiendan a lo largo de su recorrido hasta que se haya garantizado la evacuación de las personas.

Las dos propuestas de funcionamiento a las que se aplicará la propuesta de soluciones, son las siguientes:

1º.- Desplazamiento del aire.- consiste en potenciar el desplazamiento del aire hacia donde no existen vehículos parados por el accidente. Esta solución se aplicará cuando el tráfico sea fluido.

2º.- Confinamiento del aire.- Consiste en impulsar una barrera de aire transversalmente a la sección de forma que los humos queden confinados en una zona concreta y no se extiendan a lo largo del túnel. Esta solución se aplicará cuando el túnel está colapsado de coches.

Las dos propuestas de funcionamiento se realizarán con la misma cortina, variando de posición las lamas de impulsión de aire.

Si conseguimos confinar o desplazar el humo producido por un incendio a través del sistema de cortinas de aire, evitaremos la propagación de humos en el sentido donde se encuentran los vehículos parados.

En consecuencia se obtendrán dos ventajas importantes, primera se asegurará la evacuación de las personas atrapadas en el interior del túnel, y segunda se mejora el acceso y la labor a las personas encargadas de su extinción.

3.1.2.-DEFINICIÓN DE LA IDEA INNOVADORA.

Se trata de una idea innovadora ya que actualmente los sistemas de extracción del humo que se aplican en la actualidad están basados en los modelos anteriormente descritos, ventilaciones longitudinales, semitransversales, transversales puras o bien combinaciones de ambas. En este caso como complemento del sistema de ventilación adaptado se incorporarán estas cortinas que garanticen el control del humo.

El estudio se centrará en el comportamiento físico del medio, así como en el análisis matemático del sistema con el objeto de crear diferencias de presión en distintas partes del túnel. De esta forma se podrán establecer las condiciones necesarias de caudal, presión, ángulo de impulsión,... etc. de las cortinas de aire.

El sistema de control de humos propuesto tiene su aplicación en todos los tipos de ventilación descritos anteriormente, en cambio el estudio se centrará en los sistemas de ventilación transversal pura, siendo objeto de otro estudio más pormenorizado el reto de combinaciones.

Si conseguimos confinar el humo producido por un incendio a través del sistema de cortinas de aire, evitaremos la propagación de humos en el sentido donde se encuentran los vehículos parados y no será necesario este sobredimensionado del aire de extracción, tal y como recomienda en la actualidad las normas editadas por la Asociación Mundial de la Carretera en sus publicaciones PIARC.

Para poder iniciar el estudio es necesario comenzar con una estructura lógica, es decir definir unas generalidades, el foco, el humo, las temperaturas,..etc. después profundizar en el incendio, potencias, emisión, evolución, para terminar con el comportamiento de todos estos factores en el interior de un túnel con unas características determinadas.

Una vez definidos y acotados los parámetros se podrá validar el sistema a través de una aplicación práctica en el un túnel de Malo de la autopista Italiana Pedemontana Veneta, mediante un modelo matemático computerizado (FDS). Este cálculo nos acercará a la realidad de lo que ocurre con el humo en unas condiciones virtuales de fuego en el interior de un túnel. Todo proceso de validación se desarrollará en el capítulo 4.

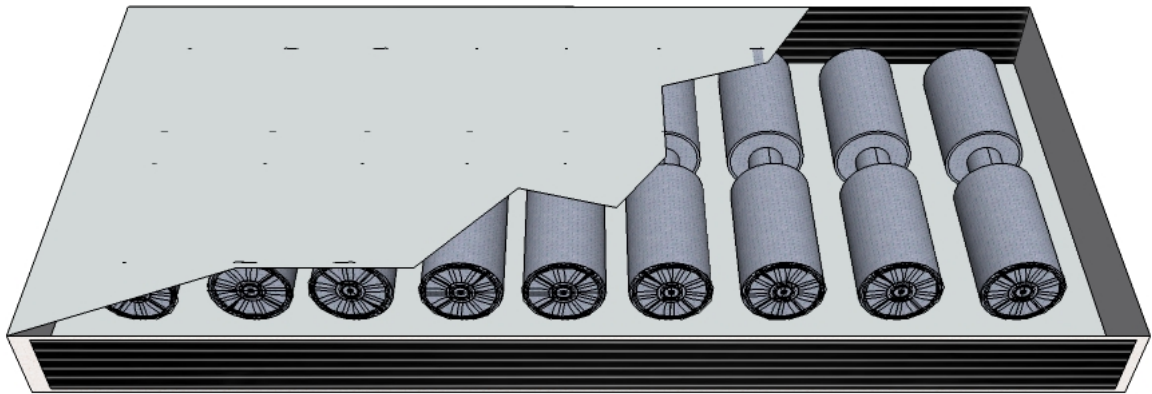
3.1.3.- ELEMENTOS QUE LO COMPONEN.

El sistema está formado por una batería de ventiladores que recogen el aire del propio túnel y lo impulsan a través de una rejilla lineal motorizada el aire, de forma longitudinal o transversal a la sección del túnel.

El conducto de succión del aire deberá recoger el aire a una distancia determinada para evitar el reflujos de los humos, es decir que el aire que se aporte siempre sea limpio y evitar en todo momento introducir el ventilador humos a elevada temperatura.

El accionamiento de la cortina deberá estar enclavada con el sistema de control de incidencias, para poder conocer exactamente donde se ha producido el fuego y actuar sobre las cortinas que se ponen en marcha y en que momento deben de accionarse.

Todos estos sistemas son claves en el correcto funcionamiento, por lo que se describirán a lo largo del capítulo.

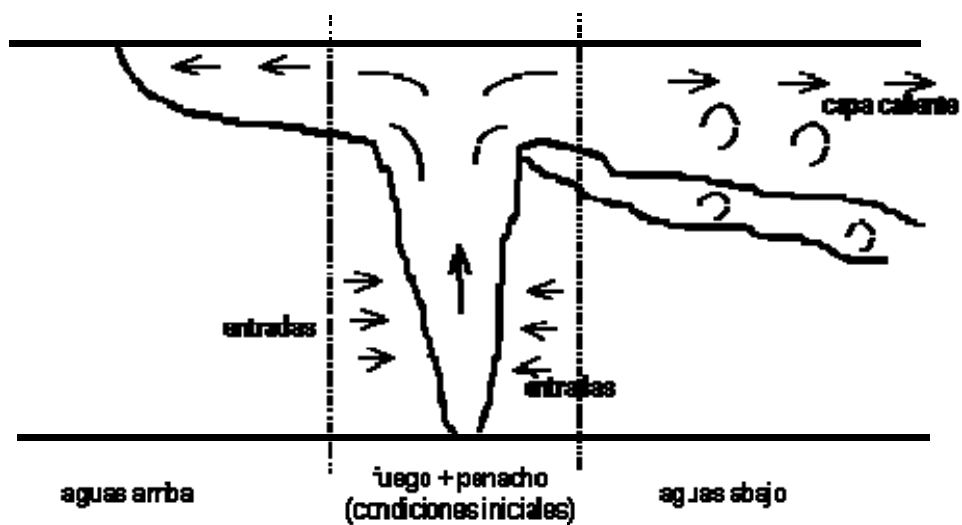


3.2.- ANÁLISIS DE LOS AGENTES Y DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL INCENDIO.

3.2.1.- GENERALIDADES.

3.2.1.1.- El foco de incendio.

Una vez que comienza el desarrollo del incendio se produce a partir del foco un penacho a elevada temperatura que por efecto de la flotabilidad impacta en el techo y se estratifica, manteniéndose en la zona superior de la sección. Cuando el humo caliente se aleja del foco comienza a enfriarse descendiendo y ocupando toda la sección.



El foco se alimenta por su parte inferior, con corrientes de aire re-entrantes. En función de las condiciones de la corriente de aire longitudinal existente en el túnel la distribución de la nube de humos se producirá en mayor o menor medida aguas arriba del foco produciendo el retorno (back layering) de la capa caliente de humos.

La peligrosidad de la nube de humos viene dada por la cantidad de contaminantes que contenga, la reducción de la visibilidad producida y los efectos de la temperatura por radiación o convección.

3.2.1.2.- El humo.

Las propiedades del humo se cuantifican en función de su capacidad de reducción de la visibilidad mediante diferentes magnitudes:

- La transmitancia T se define como:

$$T = \frac{I_x}{I_0}$$

I_0 : intensidad de la luz de la fuente

I_x : intensidad de la luz tras recorrer una distancia determinada x.

- La densidad óptica por unidad de longitud relacionada con la transmitancia por:

$$\delta = -\frac{\log_{10} T}{x}$$

x: distancia recorrida por la luz

- El coeficiente de atenuación (o extinción) por unidad de longitud se define de igual forma que la densidad óptica pero empleando el logaritmo neperiano.

$$K = -\frac{\log_e T}{x}$$

luego

$$K = 2.303 \delta$$

Se suele considerar que 0.4 es un valor crítico para el coeficiente de extinción, K, en túneles de carretera.

3.2.1.3.- Las temperaturas.

Dentro de este apartado se van a englobar dos fenómenos distintos que, sin embargo, tienen un mismo efecto sobre las personas. En el desarrollo del incendio, la capa caliente de humos se sitúa en la zona superior de la sección. Se produce, en primer lugar, una emisión de calor debida a la radiación de la misma a sus alrededores. Posteriormente, cuando la nube de humos ocupa toda la sección a ese fenómeno se le añade el efecto de temperatura por convección.

- *Calor por radiación*

La radiación se produce cuando un cuerpo se encuentra a una determinada temperatura pudiéndose determinar la energía emitida según la ecuación:

$$E = 5.67 \times 10^{-8} \times \epsilon_r \times T^4 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

donde ϵ_r es la emisividad del humo y T su temperatura.

La capacidad del ser humano de soportar la radiación depende de las prendas de protección empleadas. Sin embargo, se considera que el valor umbral para el rescate de una persona está entre 2 y 2.5 kW/m² para una exposición de varios minutos. Los equipos de rescate pueden soportar niveles de radiación de hasta 5 kW/m² durante no más de 30 minutos con los trajes de protección y respiración adecuados.

- *Calor por convección*

Si una persona se ve expuesta a una corriente de aire caliente el tiempo que es capaz de soportar depende la temperatura de la corriente. Las curvas de resistencia frente al tiempo presentan una cierta variación en función de los autores, sin embargo, a modo de orientación se considera que, para permitir la evacuación la temperatura del aire no debería sobrepasar los 80°C, siendo soportable hasta unos 15 minutos.

3.2.2.- EL INCENDIO.

Para poder definir las características de un incendio es necesario emplear distintas magnitudes que lo cuantifiquen de forma global o temporal.

Las características del incendio producido dentro del túnel dependen en gran medida de los vehículos implicados en el mismo. Los materiales con los que han sido fabricados o que son transportados influyen de forma decisiva.

3.2.2.1.- Potencia.

Los fuegos de proyecto se caracterizan fundamentalmente por la potencia calorífica liberada (dada habitualmente en MW). Hasta hace poco, en la mayoría de los países se tomaba como referencia las recomendaciones dadas por PIARC en 1987 basadas en los estudios de Heselden que se apoyaban en los ensayos realizados en Ofeneg (Suiza, 1965) y Zwenberg (Austria, 1974). Sin embargo, a principios de la década de los noventa se relanzaron nuevos proyectos cuyo fin era precisamente la determinación de

curvas de incendio para el proyecto de túneles de carretera y ferroviarios. Así, en Europa se realizaron una serie de ensayos agrupados en el proyecto EUREKA 499, con gran repercusión internacional.

Los valores máximos de la potencia calorífica disipada por el foco de incendio dependen de las condiciones de ventilación existentes. Sin embargo, en líneas generales los valores recogidos serían los siguientes:

Tipo de vehículo	Potencia máxima (MW)
Turismo	2.5 – 5
2-3 turismos	8
Furgoneta	15
Autobús / Camión de mercancías	20 – 30
Cisterna	>100

Sin embargo, estos valores son orientativos y dependen de la fuente tomada como referencia, especialmente para el incendio de vehículos cisterna donde algunas referencias varían considerablemente. Así, por ejemplo, la propuesta de normativa francesa da un valor de 200 MW mientras que en la KIVI (holandesa) se aceptan escenarios con 300 MW.

Estos resultados se apoyan en los estudios clásicos de Heselden que ya en 1976 estimó características generales de fuego como resultado del análisis de ensayos en los túneles de Ofenegg (Suiza, 1965) y Zwenberg (Austria, 1974) mostradas a continuación.

Output of fire MW	3	10	20	50	100
Notional source of fire	'car'	'van'	'Lorry or 'Coach'	Petrol Spill 1	Petrol Spill 2
Notional horizontal dimensions m x m	1.5 x 4	2 x 6	2.5 x 10	4 x 6	4 x 12
Area of fire – m ²	6	12	25	25	50
Perimeter of fire – m	10	15	25	20	30
Flame height in open air – m	4	6	7	16	17
Rate of smoke production – kg/s	17	24	35	48	95
Initial velocity of smoke layer – m/s	1.3	2.2	3.0	5.3	6.7
Initial layer depth – m	0.7	0.9	1.2	1.7	2.7
Minimum distance for extraction – m	35	50	75	100	200
Average temperature rise of gases in layer above fire - ° C	135	310	430	1000*	1000*

Critical distance for unbearable pain on bare skin □ m (layer temperature 160 ° C)	No extraction	0	65	140	350	700
	With extraction	0	35	60	100	200
Critical distance for ignition □ m (layer temperature 580 ° C)	No extraction	0	0	0	105	210
	With extraction	0	0	0	65	130

3.2.2.2.- Emisión de humos y temperatura.

Otro parámetro empleado para el dimensionamiento de la ventilación es el caudal de humos (m³/s) producido durante el mismo. Recopilando los resultados dados por las recomendaciones KIVI, la normativa alemana (RABT) las publicaciones PIARC y la reciente normativa francesa, se pueden dar valores de caudal de humos generado.

Tipo de vehículo	Producción de humo (m ³ /s)
Turismo	20
2-3 turismos	30
Furgoneta	50
Autobús / Camión de mercancías	60 – 90
Cisterna	>100

Nuevamente, estos valores dependen de la fuente tomada.

Al igual que ocurre con la potencia calorífica máxima producida en el foco del incendio, la temperatura máxima que se puede obtener depende en gran medida de las condiciones de ventilación y la geometría del túnel. Sin embargo, a modo de orientación los diferentes ensayos realizados han permitido definir los valores de temperatura máxima:

Tipo de vehículo	Temperaturas máximas (°C)
Turismo	400
Autobús	700
Camión de mercancías	1000
Cisterna*	1200

3.2.2.3.- Evolución temporal del incendio.

La evolución del incendio a lo largo del tiempo es más importante que los niveles máximos que pueden darse en el foco ya que, como ya se comentó, los tiempos transcurridos desde el inicio del mismo determinan la posibilidad de salvamento de los usuarios involucrados en el incidente.

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento del sistema de ventilación de los túneles es necesario definir una curva temporal de incendio. Los ensayos realizados en el proyecto EUREKA 499 así como estudios anteriores y las curvas dadas en las recomendaciones nacionales muestran, de forma general, un desarrollo muy rápido del incendio en los primeros 10 minutos, incluso para vehículos pequeños (turismo) alcanzando un máximo en ese tiempo y observándose una bajada más o menos rápida. Este comportamiento puede acelerarse para el caso de turismos mientras que muestran una zona de valor máximo de mayor duración en el caso de autobuses o camiones con carga.

Para simplificar la evolución temporal de las distintas magnitudes que definen el incendio y poder presentar una curva de proyecto se han realizado curvas normalizadas por la potencia máxima, como por ejemplo la de Mizuno, de forma escalonada hasta alcanzar el máximo, permaneciendo indefinidamente en este valor. Sin embargo, existen discrepancias en cuanto al tiempo de permanencia en el máximo y la etapa de descenso.

Si se pretende recoger el comportamiento obtenido durante los ensayos del proyecto EUREKA 499 se puede emplear una curva normalizada con un tiempo de subida de 5-8 minutos, un tiempo de permanencia en el máximo próximo a los 5 minutos y una bajada en dos tiempos, primero más brusco y luego más suave hasta la finalización del incendio.

El desarrollo del fuego es especialmente importante en las primeras fases del incendio ya que estos instantes son claves en el control de los humos y la evacuación de pasajeros.

Respecto a los contaminantes, su emisión viene dada por el producto del caudal generado durante el incendio por la concentración del contaminante que se puede aplicar tanto al CO como a la opacidad.

Como resultado de los ensayos EUREKA, se puede aceptar una relación lineal entre la concentración de CO y la potencia calorífica disipada en el incendio, hablando en valores promedio.

Aunque la relación con la opacidad no es tan clara, ante la ausencia de otros datos más fiables observando las curvas de evolución temporal de CO y de humos parece razonable trabajar con la curva de potencia normalizada para las emisiones.

3.2.3.- INCENDIOS EN TÚNELES.

Este punto está condicionado por las prescripciones de la Dirección General de Emergencias y Seguridad Civil.

3.2.3.1.- Características.

Los incendios producidos en túneles siempre estarán condicionados por una serie de factores, en muchos casos específicos para estos tipos de instalaciones. A continuación se detallan los más importantes:

- Efecto horno
- Propagación a otros vehículos
- El tiempo de respuesta. Condicionada por el tipo de detección
- El tipo de ventilación de túnel
- Las condiciones de evacuación y accesibilidad
- La existencia o no de extinción automática.

3.2.3.2.- Niveles.

Clasificación de los niveles de incendio establecida por bomberos.

- Nivel 0
- Nivel 1
- Nivel 2

Esta clasificación se realiza en función de determinados valores de temperatura, radiación máxima, opacidad de los humos y nivel de concentración de CO.

3.2.3.3.- Configuraciones de intervención dentro de los túneles.

Para la intervención en un túnel hay que tener una estrategia preestablecida, aplicarla correctamente y que conjugue a los gestores y a los equipos de intervención.

Se pueden estructurar las intervenciones en túneles en cinco grandes tipos, en función de la ventilación y configuración del túnel.

3.2.3.4.- Operativa de intervenciones.

La dinámica de los incendios en túneles y el desarrollo rápido que pueden tener algunos, hace que la operativa de las intervenciones no pueda soportar ninguna pérdida de tiempo y ha de estar bien adaptada al nivel de incendio desarrollado desde el momento que llegan a pie de obra.

Dada la ausencia de valores claramente identificados para expresar la potencia crítica y la potencia de un fuego no dominante se toman arbitrariamente la siguiente estructura:

- * Túneles Viarios: Sin vigilancia
- * Túneles Viarios: Con vigilancia

3.2.3.5.- Factores que determinan la evacuación en el interior de un túnel.

La evacuación es la medida de autoprotección que tiene como objetivo, en caso de grave emergencia, en la que pelagra la seguridad de los ocupantes del túnel, el traslado

de los mismos hasta un lugar seguro, realizando dicho desplazamiento en unas condiciones adecuadas de seguridad.

Todas las situaciones de emergencia en túneles por su carácter de espacios confinados, y por la atmósfera contaminada que generan los escapes de los vehículos, principalmente monóxido de carbono, vapores nitrosos y anhídrido sulfuroso, representan un riesgo para la seguridad de las personas que se encuentran en su interior.

La situación pasa a ser de grave emergencia, cuando se produce un incendio en el interior del túnel, como consecuencia del gran volumen de gases tóxicos que se generan en pocos minutos y que hacen el ambiente irrespirable para el ser humano, sin contar con las altas temperaturas que se pueden alcanzar.

Los factores que influyen en el desarrollo de la evacuación podemos agruparlos en dos áreas:

A.- Factores técnicos:

A.1 Condiciones de las vías de evacuación

A.2 Existencia de una adecuada planificación de la evacuación.

B.- Factores humanos

B.1 Nivel de preparación de las personas claves de autoprotección.

B.2 Nivel de información de los conductores

A. FACTORES TÉCNICOS QUE DETERMINAN LA EVACUACIÓN DE LOS TÚNELES:

Para una correcta evacuación será necesario disponer de unas vías de evacuación seguras, que permitan la circulación de las personas hasta el exterior, y una planificación del desarrollo de la evacuación, que evite el descontrol y el pánico de las personas a evacuar.

No existe ninguna Normativa de túneles que regule las condiciones de trazado y cálculo de las vías de evacuación.

Esta situación nos hace pensar que, como apuntábamos en la introducción, los túneles no han sido considerados elementos, que por su vulnerabilidad frente a los riesgos, precisen una posible evacuación de sus ocupantes.

Si analizamos el panorama en el campo de la edificación, vemos que la situación es muy diferente. Así el riesgo de incendio en los edificios ha dado lugar a una norma

específica, Norma Básica de la Edificación: Condiciones de Protección contra Incendios (NBE-CPI), que lo regula, y que se fundamenta principalmente en dos principios:

- La compartimentación de espacios para evitar la propagación del fuego, y
- La evacuación de los ocupantes del lugar del incendio.

Si partimos de las premisas establecidas en la NBE-CPI-96, en vigor, podremos establecer un paralelismo conceptual y terminológico entre la evacuación de las edificaciones y la evacuación de los túneles para determinar los criterios que han de informar una posible norma que regule la evacuación de los túneles.

Queremos resaltar que, según se ha expresado, las condiciones de evacuación en la edificación se han determinado desde el riesgo de incendio, y por tanto son las condiciones de desarrollo del incendio las que condicionan el trazado y cálculo de las vías de evacuación. Por consiguiente el estudio que a continuación hacemos tendrá como objeto definir los parámetros característicos de las vías de evacuación de túneles frente al riesgo de incendio.

A.1. CONDICIONES DE LAS VÍAS DE EVACUACIÓN DE TÚNELES FRENTE AL RIESGO DE INCENDIO:

Vías de evacuación: Recorrido horizontal o vertical que debe seguirse desde cualquier punto del interior del túnel hasta la salida a un espacio exterior.

Objetivo de las vías de evacuación: Permitir, que en caso de emergencia por incendio, los ocupantes del túnel puedan desplazarse hasta un lugar seguro, realizando dicho desplazamiento en unas condiciones adecuadas de seguridad.

El logro de este objetivo implica determinar y definir de forma precisa:

- El lugar seguro al que se dirigirán los ocupantes del túnel a evacuar.
- Los elementos y recorridos de evacuación (aceras, pasarelas, salidas, galerías peatonales, túneles de servicio, etc.) fijando sus condiciones de capacidad y seguridad.
- El Plan establecido para efectuar la evacuación

Lugar seguro: Es un espacio donde existe garantía de que no va a existir transferencia de los factores de riesgo que concurren en el escenario del siniestro. (Lugar donde hay seguridad de que no se va a propagar el incendio). Normalmente el espacio exterior.

Elementos y recorridos de evacuación: Dentro de los recorridos de evacuación hay que distinguir entre:



Vías de evacuación no protegidas.- Son aquellas que discurren por el interior del túnel (aceras, pasarelas, etc.) y no constituyen un recinto independiente del volumen del túnel.



El diseño y dimensionado de las vías de evacuación dependerá del tipo de vía de que se trate.

Condiciones de trazado de las vías de evacuación no protegidas.- el dimensionado de las vías de evacuación no protegidas dependerá del máximo recorrido, dentro del túnel, que los usuarios son capaces de efectuar sin poner en peligro su vida antes de alcanzar la salida del mismo.

El máximo recorrido, dentro del ámbito del túnel siniestrado, que los usuarios son capaces de efectuar es función de:

- La **velocidad de marcha de las personas** en presencia de los distintos parámetros que caracterizan la situación de emergencia (por ejemplo en caso de incendio, en presencia de humo, calor, y demás parámetros de fuego).
- El **tiempo de respuesta empleado en adoptar la decisión de evacuación**, función del sistema de detección y gestión de emergencias que posea el túnel.

La duración de las diferentes etapas que van desde la percepción o detección del siniestro hasta el inicio del proceso de evacuación es muy variable y depende de muchos factores:

- Punto origen del siniestro
- Tipo de siniestro, en caso de fuego (vehículos y materias implicadas, etc.)
- Sistema de detección y alarma existentes
- Existencia o no de Planes de Autoprotección debidamente implantados.

La NBE-CPI-96, teniendo en cuenta las condiciones ambientales que se generan en los incendios en los edificios, en concreto:

- Gran cantidad de gases tóxicos procedentes de la combustión.
- Disminución de forma importante de la concentración de oxígeno, por necesidades propias de la combustión.
- Producción de grandes cantidades de humos que dificultan la visibilidad.
- Aumento de la temperatura de forma considerable debido a la radiación térmica y al desplazamiento de humos calientes.
- **Posibles daños en la estructura de las construcciones, por efecto del fuego, que afecten a los usuarios.**

Y considerando que:

- **Los parámetros que han dado lugar a un mayor número de muertos son los gases y humos calientes.**
- **Los incendios en los edificios son de evolución rápida, produciendo una media de 16 a 17 m³/seg de humos a los tres minutos de iniciarse el incendio.**
- **Los humos y gases inicialmente se pegan al techo, y a medida que se enfrían bajan hasta llegar al dintel de la puerta e invaden el resto de las habitaciones, sino encuentran compartimentaciones estancas que impidan su avance.**
- **Las alturas habituales de las piezas de edificación son entre 2,5 y 3,00 metros.**

Establece:

Que los ocupantes de una zona siniestrada deben alcanzar la salida de la misma en un tiempo límite de 2,5 minutos, y en función de este parámetro fija los recorridos máximos de las vías de evacuación no protegidas:

(1) El trazado máximo de una vía de evacuación no protegida será de 25 metros si el recinto, por donde discurre, dispone de una única salida.

(2) El trazado máximo de una vía de evacuación no protegida será de 50 metros si el recinto, por donde discurre, dispone de más de una salida, con la condición de que el trazado de la vía hasta un punto donde exista la posibilidad de optar por dos vías alternativas no sea superior a 25 metros.

Si comparamos los incendios en la edificación con los incendios en los túneles veremos que en los últimos la situación puede alcanzar cotas de mayor gravedad.

Así los humos producidos en los incendios en túneles, dependen del tipo de vehículos y mercancías siniestradas siendo según diferentes fuentes:

Tipo de vehículo	Caudal de humos (m ³ /s). Según diferentes fuentes				
	AIPCR 1984	RABT (Alemania) 1994	CETU (Francia) 1997	NFPA (USA) 1998	EUREKA
Vehículo ligero	20	20-40	20	20	
Autocar	60	60-90	80	60	50-60
Camión			50-80		
Camión cisterna	100-200	150-300	300	100-120	

El comportamiento de los humos y gases en los incendios en túneles varía respecto a su comportamiento en las edificaciones debido a la geometría del túnel, ESTRUCTURA LINEAL, y responde a dos modelos distintos dependiendo de la existencia o no de una corriente de aire en el interior del túnel.

TUNELES SIN CORRIENTE LONGITUDINAL DE AIRE: En los primeros momentos de incendio, en un túnel sin corriente de aire (5-6 minutos), los humos y gases calientes se desplazan por el techo del túnel a ambos lados del foco del incendio, dejando espacio respirable en la zona baja en un recorrido que según distintos ensayos oscila entre 300 y 500 metros, para a partir de este punto ocupar toda la sección del túnel.

TUNELES CON CORRIENTE LONGITUDINAL DE AIRE: En los primeros momentos de incendio, en un túnel con corriente longitudinal de aire (5-6 minutos), los humos y gases calientes se desplazan por el techo del túnel en la dirección de la ventilación, a una velocidad constante, ligeramente más alta que la velocidad del aire fresco, dejando espacio respirable en la zona baja en un recorrido que según distintos ensayos oscila entre 700 y 1000 metros, para a partir de este punto ocupar toda la sección del túnel.



Humo evacuado por la boca francesa del túnel del Mont Blanc tras el accidente del 24 de marzo de 1999. (Imagen París Match)

No obstante cabe señalar que en casos específicos la distancia que pueden recorrer los humos y gases procedentes de un incendio antes de caer al suelo, puede ser inferior, en función de las características constructivas de la sección del túnel, en concreto de si tiene o no tiene revestimiento.

Así en el ensayo de incendio que se efectuó en los Túneles de El Padrum (26 de marzo 1992), la sección del túnel fue completamente ocupada por los humos en pocos minutos:

- A los 2 minutos, desde el punto del fuego y hacía la salida de humos, aún había una zona de unos 75 metros de aire respirable, rebasada la cual los humos ocupaban plenamente la sección.
- Desde ese momento se comenzó a producir una mezcla de esa zona con la capa superior, de manera que a los 3 minutos ya toda la sección del tubo quedó completa de humos.

Según los autores del estudio (HACAR RODRÍGUEZ, F.; ABELLA SUÁREZ, A. y GARCÍA-ARANGO GARCÍA-JOVELLANOS, I., 1993) esto fue debido a un enfriamiento relativo de los humos que se iban acumulando en las oquedades existentes en la bóveda, que aún no había sido revestida, obligando a la lámina de gases más calientes que avanzaban por el techo a descender hacía la calzada, con lo que la mezcla con la capa inferior se facilitaba, y así la sección total del tubo se llenó de humos. Además a la hora de considerar los tiempos necesarios para la evacuación hay que tener en cuenta la pérdida de visibilidad que se produce como consecuencia de los humos, lo que implica desorientación que unido a la disminución de la concentración de oxígeno da lugar a una pérdida de agilidad en el proceso de evacuación.



Columna de humo en una de las bocas del túnel de Tauern (mayo de 1999).
El puesto de mando de la emergencia tuvo que desplazarse cerca 2 km. debido a la toxicidad de los gases evacuados. (Imagen Reuters)

Si la producción de humos por incendio en un túnel es muy superior a los producidos por incendio en la edificación, las temperaturas alcanzadas también son mucho más elevadas como consecuencia de la capacidad calorífica de los combustibles y de la escasa dispersión térmica que se produce por la propia morfología de espacio enterrado que caracteriza al túnel.

Así tenemos para los diferentes vehículos:

Tipo de vehículo	Vehículo ligero	Autocar o Camión	Camión cisterna
Potencia calorífica MW	5	20-30	50-100
Temperaturas a 10 m del foco del fuego °C	400	700	1000

Según la AIPCR, 1995

La capacidad humana para soportar altas temperaturas se sitúa entre los siguientes valores: con temperaturas de 50-60°C comienzan a producirse situaciones de estrés térmico y a partir de 70-80°C se producen lesiones importantes que conducen a la muerte en función del tiempo de exposición.

De lo anteriormente expuesto se deduce la importancia de limitar los recorridos de evacuación en el interior del túnel, siendo preciso disponer de vías de evacuación protegidas que permitan salir al exterior.

Condiciones de trazado de las vías de evacuación protegidas.- Estas vías deben de constituir un compartimento independiente respecto al trazado del túnel, con una

resistencia al fuego suficiente para impedir el paso de los diferentes parámetros que caracterizan un incendio durante un periodo de tiempo determinado.

Es decir sus elementos delimitadores han de presentar:

- **Estabilidad al fuego**, aptitud de un elemento de construcción de permanecer inalterado en su función mecánica bajo la acción del fuego, por un determinado *periodo de tiempo*.
- **Estanqueidad al fuego**, aptitud de un elemento de construcción de impedir el paso de las llamas o gases calientes a través de él, por un determinado *periodo de tiempo*, lo que implica la no aparición de fisuras, orificios, grietas u otras aberturas en dicho elemento.
- **No emisión de gases inflamables**, cualidad propia de un elemento de construcción de no generar ni emitir gases por su cara no expuesta al fuego, durante un determinado *periodo de tiempo*, siendo dichos gases inflamables procedentes de la pirólisis, combustión o descomposición del material que lo constituye.
- **Resistencia térmica**, propiedad de un material o elemento de construcción de dificultar la transmisión de calor a través de él, durante un determinado *periodo de tiempo*, que evita que la temperatura en la cara no expuesta al fuego sufra un incremento con relación a la temperatura inicial a la aplicación del programa térmico, mayor de 180°C en cualquiera de sus puntos, ni la media se incremente en más de 140°C, ni en todo caso, se alcancen los 220°C.

A.2. NECESIDAD DE UN PLAN DE EVACUACIÓN:

La existencia de unas vías de evacuación correctamente dimensionadas no garantiza por sí solas el éxito de una evacuación.

Para que la evacuación sea efectiva debe existir una planificación previa del proceso, atendiendo a las características específicas de estas infraestructuras del transporte en general y, a las particularidades de cada túnel en concreto.

Características específicas de los túneles que inciden en la evacuación:

- El uso del túnel – medio de transporte – implica que la percepción que se tiene de estos elementos es desde un vehículo, a una velocidad muy superior a la de un peatón, agravada por el hecho de que las condiciones de visibilidad son inferiores a las de los tramos de carretera a cielo abierto.
- La mayoría de los conductores desconocen la existencia de vías de evacuación en los túneles, por no ser las mismas que se utilizan para el uso normal de la circulación, y carecer de una señalización capaz de fijar su percepción.
- En general no existe personal adscrito a la explotación del túnel que, en caso de emergencia, se constituya en equipo de evacuación y dirija el proceso de evacuación.

Esta situación de partida representa un gran obstáculo para el desarrollo de una evacuación eficaz, por ello dentro de la estrategia de seguridad de la explotación de los túneles se deben adoptar acciones encaminadas a fomentar la percepción de las vías de evacuación por diferentes medios, y de modo reiterativo, hasta crear un lenguaje de

signos en los conductores que sea capaz de crear el concepto "autoprotección" como un valor asumido socialmente que genere conductas automáticas de respuesta frente a una situación de emergencia.

Para generar conductas automáticas en un grupo social, (los conductores atrapados en una emergencia en el túnel), es necesario que el grupo tenga asumido un "valor" en el sentido de una creencia en tal acción, y para ello es preciso hablar del tema, recibir información del tema y en definitiva incorporar al lenguaje cotidiano de la carretera el valor de la evacuación como medio de autoprotección en las emergencias en túneles.

Es un hecho que el lenguaje de signos utilizados en la carretera genera conductas concretas en los conductores, como consecuencia de los valores, de seguridad en unos casos y de información en otros, que transmiten y que han sido asumidos socialmente.

Pongamos el ejemplo de los paneles informativos de área de descanso en las autovías, es fácil constatar la utilización de estas zonas, por los conductores, en lugar de parar en cualquier otro sitio que no le ofrece el valor de seguridad de estos espacios.

Por tanto **el punto de partida en la planificación de la evacuación es hacer explícitas de forma clara y reiterativa a los conductores las vías de evacuación mediante:**

- La delimitación y señalización, de los recorridos peatonales que discurren en el mismo volumen del túnel, teniendo en cuenta que han de ser percibidos de forma clara y precisa por los conductores cuando circulan de modo habitual por los túneles.
- La señalización de las salidas de emergencia a vías de evacuación protegidas, con la misma premisa de ser percibidas de forma clara y precisa por los conductores cuando circulan de modo habitual por los túneles.



Pictogramas utilizados para la señalización de salidas de emergencia

- La preseñalización mediante una secuencia de carteles de aproximación con información sobre las vías de evacuación del túnel.
- La distribución de pequeñas guías básicas de evacuación por todos los canales posibles, en los peajes de autopistas, en las gasolineras, en la prensa, etc.
- La realización de campañas de TV, divulgando los conceptos fundamentales sobre la evacuación de los túneles.
- La realización de prácticas de evacuación en túneles.
- Etc.

Esta primera fase de planificación de la evacuación que podríamos denominar preventiva, garantizará una predisposición en los conductores que guiará sus actuaciones en las situaciones de emergencia, pero no cabe duda que la existencia de

un equipo de evacuación adscrito a la explotación del túnel que dirija el proceso evitará posibles situaciones de duda o pánico que podrían poner en peligro la evacuación.

Los primeros momentos en una situación de crisis, son decisivos, es por ello necesario que exista un personal perfectamente entrenado que diga en el momento que hay que iniciar la evacuación y transmita a los conductores instrucciones precisas que refuercen sus conductas y les impidan dudar.

Estas órdenes e instrucciones, en muchos casos, no podrán ser dadas en el lugar, por lo que es necesario tener previsto el medio de transmisión (megafonía, emisora de radio, etc.) que garantice en todo momento la comunicación entre el personal de evacuación y los conductores.

Finalmente la planificación de la evacuación debe garantizar que en fase de emergencia los conductores no pierdan la referencia de los caminos de evacuación, en tanto que son la pauta que guía su conducta, para ello:

- Las vías de evacuación deben disponer de iluminación de emergencia, con el suministro garantizado por duplicidad de la fuente de energía ya sea por doble acometida o mediante grupos electrógenos, que entre en funcionamiento caso de fallo del alumbrado general.

Los puntos de luz se situarán sobre los hastiales, a una altura aproximada de un metro sobre la calzada o acera. Con ello se consigue iluminar la zona de tránsito de la evacuación y garantizar su visión en caso de la existencia de humo en el techo.

- La señalización de las vías de evacuación debe estar realizada con materiales fotoluminiscentes, es decir aquellos que tras ser estimulados por una radiación ultravioleta, visible o infrarroja lucen sin ningún otro estímulo durante un periodo de tiempo determinado.

La señalización será reiterativa en los recorridos de evacuación que discurren en el interior del túnel, mediante señales puntuales y líneas guía pintadas en la acera o en la parte baja del hastial, que permitan resaltar los posibles obstáculos.



Pictogramas utilizados para la señalización de tramos de recorrido que conducen a salidas de emergencia

B. FACTORES HUMANOS QUE DETERMINAN LA EVACUACIÓN DE LOS TÚNELES:

Del estudio anterior podríamos deducir, que el proceso de evacuación se sustenta sobre los medios técnicos que lo hacen posible y sobre las capacidades humanas para desarrollar la actuación de respuesta adecuada.

Las actuaciones de respuesta en caso de evacuación las podemos dividir en dos grupos:

- La respuesta del personal que constituye los equipos de evacuación.
- La respuesta de los conductores.

El personal que constituye los equipos de evacuación debe tener una respuesta de liderazgo, de dirección.

Los conductores deben de tener respuestas automáticas, que neutralicen las actitudes de bloqueo que se producen en las situaciones de emergencia, por el exceso de información extraordinaria que se recibe de forma muy rápida y con connotaciones negativas para la supervivencia.

En ambos casos solo será posible obtener las repuestas adecuadas mediante una formación basada en:

- El conocimiento de los medios y medidas de autoprotección
- La práctica sistemática de las acciones a desarrollar, mediante ejercicios y simulacros de evacuación, que potencian las respuestas automáticas.

3.2.3.6.- Planteamiento del protocolo.

La seguridad vial es una de las mayores preocupaciones de la Dirección General de Carreteras. En lo concerniente a los túneles, el tema es si se quiere más grave, tanto por la magnitud de los daños, materiales y humanos, que se pueden producir, como por la repercusión que todo incidente relacionado con los túneles tiene en la opinión pública.

3.2.4.- CONSECUENCIAS DE UN INCENDIO EN EL INTERIOR DE UN TÚNEL.

3.2.4.1.- Flashover.

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

Desde el punto de vista de la seguridad en caso de incendio, los objetivos a cumplir son los siguientes:

- Mantener controlada la nube de humos lo más lejos posible de los usuarios. Para conseguirlo debe mantenerse en la medida de lo posible la estratificación de la misma o expulsarla a gran velocidad si las personas situadas aguas abajo del incendio ya han sido evacuadas.
- Evitar la distribución de los humos a zonas próximas al túnel pero no implicadas en el incendio (locales técnicos, otro tubo en túneles comunicados, galerías de escape, etc.)
- Ayudar en las tareas de salvamento a los equipos de rescate.

El objetivo del sistema de ventilación era mantener a los usuarios del túnel en la zona de aire fresco el mayor tiempo posible. Tradicionalmente, cuando el sistema estaba basado en pequeñas aberturas en el techo para extraer los humos situadas a lo largo del túnel, esto significaba mantener intacta la estratificación de la capa de humos.

Cada vez más se está tendiendo a situar aberturas de grandes dimensiones mucho más cercanas de tal forma que el sistema se comporte como un sumidero donde se debe centrar la máxima capacidad de extracción en las cercanías del incendio. Para ello se disponen trampillas telecomandadas sobre las que se puede actuar desde el centro de control.

En los sistemas de ventilación transversales la inyección de aire fresco al nivel de la calzada produce una rotación del flujo longitudinal que contribuye a deshacer la estratificación. Este es el motivo por el que se suele recomendar una reducción de los niveles de inyección del mismo.

En los sistemas de ventilación semi-transversales reversibles, es fundamental reducir el tiempo de inversión del sistema de la fase de inyección de aire fresco a la de extracción de humos.

3.2.4.2.- Modelos numéricos para el régimen permanente

El objetivo de los modelos numéricos para el estudio del régimen permanente es el dimensionamiento de los equipos necesarios para el sistema de ventilación del túnel, tanto para los escenarios de servicio como los de incendio.

Estos modelos se basan en el cálculo de las pérdidas de carga producidas en el túnel (ventilación longitudinal) o en los conductos auxiliares (ventilación semi/transversal) durante su funcionamiento. Para ello se resuelve la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento al circuito considerado, es decir,

$$\sum i\Delta P_{\text{fricción}} + i\Delta P_{\text{sing}} + (\Delta P_{\text{acc}}) + (\Delta P_{\text{dec}}) + (\Delta P_{\text{rot}}) = 0$$

Los factores que intervienen en la ecuación que comprende las pérdidas de carga del sistema son:

- * Pérdidas por fricción y singularidades
- * Efecto émbolo de los vehículos

- * Diferencia de presión por condiciones meteorológicas
- * Empuje de los ventiladores

Por otro lado tenemos el efecto de avance del humo debido al calentamiento de humos y aumento de presión en la zona del incendio, denominado Backlayering. Este avance de los humos ayudado por los factores anteriormente citados será la suma de esfuerzos que tendremos que superar con las cortinas para poder evitar el retroceso del humo hacia la zona donde se encuentran los vehículos retenidos.

En el siguiente capítulo analizaremos cada uno de ellos y describiremos las consecuencias en nuestro estudio.

3.3.- ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE AIRE EN EL INTERIOR DEL TÚNEL.

Al analizar un incendio en el interior de un túnel podemos encontrar distintos factores que influyen decisivamente en el comportamiento del humo que deseamos controlar. Algunos de estos factores son intrínsecos a la propia configuración del túnel, otros son derivados de la ubicación geográfica y algunos otros son generales para todos los túneles. A continuación se describen los más importantes.

3.3.1.- EFECTO BACKLAYERING.

El efecto debido a la flotabilidad del aire, donde una parte del mismo tendería a producir un retorno aguas arriba, también conocido como backlayering. En esta hipótesis, se considera que no hay ninguna dirección predominante.

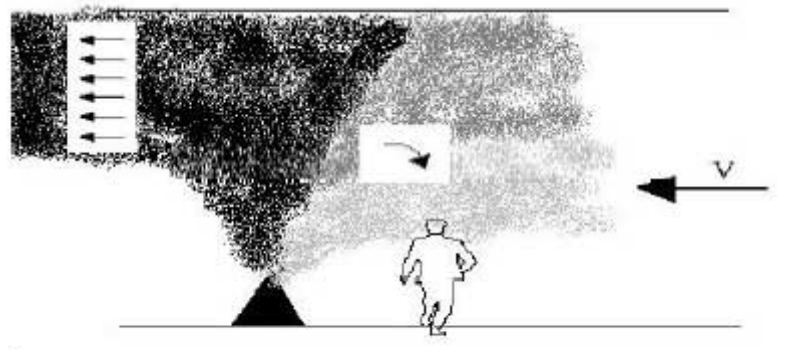


Fig.1 Esquema del fenómeno de "Back-layering".

La velocidad del aire que evita el retorno de la nube de contaminantes se denomina **velocidad crítica**, la cual depende de la pendiente del túnel, la potencia del incendio y la geometría de la sección transversal.

Habitualmente se emplea la siguiente ecuación simplificada para determinar el valor de la velocidad crítica para evitar el retorno de la nube de humos:

$$V_c = K_1 \cdot K_2 \left[\frac{gHQ}{\rho_\infty C_p A \left(\frac{Q}{\rho_\infty C_p A V_c} + T_\infty \right)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

donde:

V_c es la velocidad crítica

K₁ y **K₂** son constantes

g es la aceleración de la gravedad

H es la altura del túnel

Q es la potencia calorífica del incendio

A es el área de la sección transversal del túnel

C_p es el calor específico del aire

ρ_∞ y **T_∞** son la densidad y temperatura a temperatura ambiente

Para calcular la densidad del aire, se debe tener en cuenta que la densidad es función de la temperatura, un aumento de la temperatura implica un descenso en la densidad.

La temperatura que puede alcanzar el aire en un incendio, depende del tipo de vehículo que esté involucrado, siendo:

- turismo → 400 °C
- autobús → 700 °C
- camión → 1000 °C
- cisterna → 1200 °C

Para el cálculo de la densidad partimos de la ecuación de los gases ideales;

$$PV = nRT \Rightarrow PV = \frac{m}{M} RT$$

sabiendo que:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

queda:

$$\rho = \frac{MP}{RT}$$

Los valores que obtenemos para la densidad del aire son:

* Turismo	$\rho_{turismo} = 0.52447 \frac{g}{m^3}$
* Autobús	$\rho_{autobus} = 0.36279 \frac{g}{m^3}$
* Camión	$\rho_{camion} = 0.27730 \frac{g}{m^3}$

* Cisterna

$$\rho_{cisterna} = 0.23966 \frac{g}{m^3}$$

Por lo tanto sustituyendo en la fórmula obtenemos la velocidad crítica para los distintos tipos de vehículos:

Para un turismo: $V_c = 2.17 \text{ m/s}$

Para un autobús: $V_c = 2.66 \text{ m/s}$

Para un camión: $V_c = 2.76 \text{ m/s}$

Para un cisterna: $V_c = 3.13 \text{ m/s}$

3.3.2.- EFECTO CHIMENEA Y GEOGRÁFICO.

El efecto chimenea y el efecto geográfico, están relacionados.

El efecto geográfico es debido a la diferencia de altura, que conlleva una diferencia de temperaturas, y una diferencia en presión barométrica entre las dos bocas del túnel; produciéndose el efecto chimenea.

La influencia de estos efectos se estudiará más adelante cuando se particularice el estudio de un túnel determinado. Sus efectos para nuestro estudio serán mínimos ya que las presiones son bajas comparadas con los otros comportamientos. Otro aspecto significativo es que no se permiten pendientes muy grandes en túneles carreteros, por lo que la diferencia geográfica queda limitada y minimizada.

3.3.3.-EFECTO ÉMBOLO DEBIDO AL TRÁFICO.

Los vehículos en el interior del túnel ejercen una fuerza debido a su resistencia aerodinámica que viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_{\text{túnel}} = \sum_1^{n_{\text{vehículos}}} C_x \frac{A_{\text{veh.}}}{A_{\text{túnel}}} N_{\text{veh}} \frac{\rho}{2} (v_{\text{veh}} - v_a) |v_{\text{veh}} - v_a|$$

donde:

C_x : Coeficiente aerodinámico de los vehículos

$A_{\text{veh.}}$: Área frontal de los vehículos (m)

$A_{\text{túnel}}$: Área de la sección transversal del túnel (m²)

N_{veh} : Número de vehículos que circulan

ρ : Densidad del aire (Kg/m³)

v_{veh} : Velocidad de los vehículos (m/s)

v_a : Velocidad del aire de ventilación (m/s)

El signo de la velocidad de los vehículos es positivo cuando coincide con el del aire de ventilación. Este efecto crea un empuje positivo cuando los vehículos circulan en el mismo sentido que el aire de ventilación, excepto cuando circulan a velocidad más baja que este, y negativo cuando lo hace en sentido opuesto.

El sumatorio contabiliza los efectos creados por cada carril, puesto que los distintos carriles pueden llevar distinta velocidad, e incluso en un túnel bidireccional los vehículos de un carril frenan el aire y los del otro le impulsa. Asimismo hay que considerar por separado los efectos de los vehículos ligeros y los pesados, ya que tienen distintos coeficientes aerodinámicos y áreas de arrastre.

3.3.4.- RESISTENCIA DEBIDA AL VIENTO.

Se tratan aquellos efectos de carácter aleatorio que son responsables del tiro natural. Se consideran las pérdidas debidas al efecto del viento, la diferencia de presión barométrica entre bocas y el efecto chimenea. El efecto del viento suele ser el principal responsable de la diferencia de presión entre bocas.

3.3.5.- EFECTO PRODUCIDO POR LA FRICCIÓN.

Las pérdidas por rozamiento se oponen siempre al sentido de circulación del aire. En estas pérdidas se incluye además de la rugosidad de la pared, las pérdidas por ensanchamientos o estrechamientos, la resistencia de pequeños obstáculos de la instalación tales como aparatos de luz, señales, bandejas portacables, etc.

$$\Delta P_{\text{Módulo}} + \Delta P_{\text{tubo}} = - \left(\lambda \frac{L}{D_h} + \alpha + \beta + \xi \right) \frac{v_a^2 \rho}{2}$$

donde:

λ : coeficiente de rozamiento

α : coeficiente de pérdidas en descarga (1)

β : coeficiente de pérdidas en carga (0.5)

ξ : coeficiente de singularidades

L : longitud del tramo de túnel (m)

D_h : diámetro hidráulico del tramo de túnel (m)

v_a : velocidad del aire de ventilación en el tramo considerado (m/s)

ρ : densidad del aire (Kg/m³)

Las pérdidas de carga producidas por singularidades no incluyen algunos efectos de mayor complejidad que producen grandes distorsiones del flujo. Este es el caso de elementos, que generan importantes pérdidas de carga al producir recirculaciones no deseadas, como vigas de cuelgue en los forjados superiores o grandes concavidades en túneles no revestidos.

3.3.6.- FUERZAS PRODUCIDAS POR EL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE HUMOS.

Los ventiladores deben contrarrestar el efecto de todas las resistencias que intervienen, si bien, durante el funcionamiento normal del túnel los ventiladores trabajarán en el sentido que tengan que vencer menos resistencia (el tráfico y las condiciones atmosféricas pueden ser efectos favorables), el sistema implantado debe ser capaz de vencer todos los efectos en contra.

Habitualmente, en los catálogos de los fabricantes de equipos viene dado el empuje teórico unitario en ausencia de flujo externo al ventilador, relacionando la velocidad del chorro con el área del ventilador según:

$$f_v = \rho A_d v_d^2$$

Además, el empuje que aporta el ventilador está afectado por las condiciones del ambiente en que trabaja. Influyen especialmente la velocidad y área del chorro, la proximidad a la pared y las condiciones geométricas del túnel, representadas en el factor K.

$$\Delta P_{\text{vent}} = \frac{f_{\text{vent}}}{S} = \frac{f_v}{S} \left(1 - \frac{v_s}{v_d}\right) \frac{1}{k}$$

En el **sistema de ventilación semitransversal o transversal** se emplean habitualmente ventiladores del tipo axial en los que el flujo proveniente de los conductos de ventilación pasa por el ventilador que lo acelera. El punto de funcionamiento del ventilador dependerá de la instalación a la que se acople y según la curva característica del mismo. No obstante, de una forma general, se puede aproximar la curva de funcionamiento por un polinomio de segundo grado.

$$\Delta P_{\text{vent}} = \alpha + \beta q + \gamma \cdot q^2$$

En función del tipo de vehículos que circula por el túnel es posible definir el incendio de proyecto para el cual se deben dimensionar las necesidades de ventilación del sistema. Este caudal de proyecto determinará las pérdidas de carga que se producirán en la instalación y por tanto permitirá definir las características de los equipos.

3.4.- ESTUDIO DE LA CORTINA DE AIRE.

3.4.1.- DATOS DE PARTIDA Y CONDICIONES DE CONTORNO.

Para poder aplicar nuestro sistema en este túnel, es necesario definir las condiciones de contorno y circunstanciales en las que se va a producir el incendio, para ello se especificarán las variables que afectan al sistema.

1°.- Backlayering.

Con respecto al Backlayering anteriormente descrito, se analizarán los dos escenarios camiones con y sin cisterna, es decir 30 y 100 Mw, por lo que la velocidad crítica de avance de los humos será $V_c = 2.76 \text{ m/s}$ y $V_c = 3.13 \text{ m/s}$ respectivamente.

Para un turismo: $V_c = 2.17 \text{ m/s}$

Para un autobús: $V_c = 2.66 \text{ m/s}$

Para un camión: $V_c = 2.76 \text{ m/s}$

Para un cisterna: $V_c = 3.13 \text{ m/s}$

2°.- Efecto geográfico.

El efecto producido por la diferencia de cota, a continuación se describen en la calzada izquierda, que va a ser el analizado.

M30 SUR CALZADA IZQUIERDA

PK	0	509	912	1485	2015	2608	3120	3633	3900
Cota	551.588	541.144	531.340	530.08	532.484	548.345	564.226	582.291	599.397
Pend. (%)		-2.05	-2.43	-0.22	0.45	2.88	3.09	3.52	6.41

3°.- Fricción en paredes.

La circulación de aire a lo largo de un túnel es causada por diferencias de presión entre distintos puntos. Si se supone, para simplificar, que las diferencias de densidad del aire son despreciables a lo largo del túnel, y se supone al aire un fluido no viscoso (lo cual hace que se desprecien las pérdidas por fricción entre moléculas) se tiene el teorema de Bernouilli, que expresa que la carga específica permanece constante a lo largo de un filete fluido.

Si a lo largo de un tramo del trayecto que sigue el aire en la extracción, un caudal Q experimenta una pérdida de carga Δx , que se define como la resistencia aerodinámica, según la siguiente expresión:

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

Siendo:

R = Resistencia aerodinámica (Ns^2/m^8)

Δx = Pérdida de carga (Pa)

Q = Caudal de aire (m³/s)

Por otro lado, la fórmula general para el cálculo de la resistencia aerodinámica de un tramo del circuito, es la siguiente:

$$R = \frac{10^3}{8g} \times \frac{\lambda Y P L}{S^3} = 153,03 \frac{\lambda Y P L}{S^3}$$

Siendo:

g = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

λ = Coeficiente de pérdida de carga.

Y = Peso específico del aire. Consideraremos 12,01 N/m³

P = Perímetro del conducto (m)

S = Sección del conducto (m²)

L = Longitud del tramo considerado (L)

Por otro lado debemos considerar un coeficiente de pérdida total λ definido como coeficiente de frotamiento del tubo de túnel, que se calcula mediante la siguiente expresión:

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

siendo:

λ_p = Coeficiente de pérdida de carga de las paredes

λ_s = Coeficiente de pérdida de carga del suelo

Según se recoge en el Manual de túneles y obras subterráneas del profesor Dr. Carlos López Jimeno. Los coeficientes de pérdida de carga en las paredes de un túnel son las siguientes:

λ_p = 0,002 hormigón

λ_s = 0,03 Suelo asfaltado

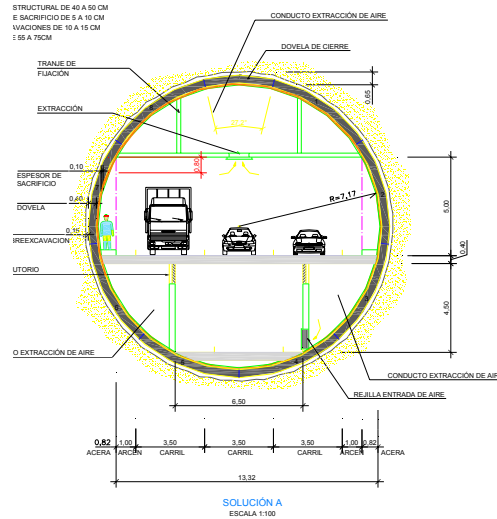
Una vez que conocemos la R en nuestro túnel obtendremos la pérdida de carga Δx, ya que como hemos comentado anteriormente

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

Estos parámetros son introducidos en el modelado, para ser considerados en el cálculo.

4º.- Definición de espacios para alojar los equipos.

Uno de los aspectos más importantes previos al análisis numérico es determinar el espacio disponible en el techo de los túneles para alojar los equipos.



Solo se dispone de 0.8 m en el techo del túnel para ubicación de los sistemas de control, iluminación y señalización, por lo que en esos 0.8 m deberíamos de incorporar nuestros equipos.

3.4.2.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS EQUIPOS.

Ventiladores

Un dato importante son las características ofrecidas por el fabricante de los equipos mecánicos. Limitados por una altura de ventilador de 80 cm., se elige para este caso el modelo de ventilador reversible SODECA mod. THT/IMP-CREV-63-2.

Este tipo de ventilador es del tipo reversible y apto para soportar humos a 400 ° 2horas, la envolvente es de chapa galvanizada y las hélices de aluminio de ángulo variable, especialmente diseñadas para grandes empujes.

Las características técnicas del modelo seleccionado son las siguientes: presión de 390 N para un caudal de 37.800 m³/s y una velocidad de empuje de 32.6 m/s.

THT/IMP-C-REV-63-2/4T

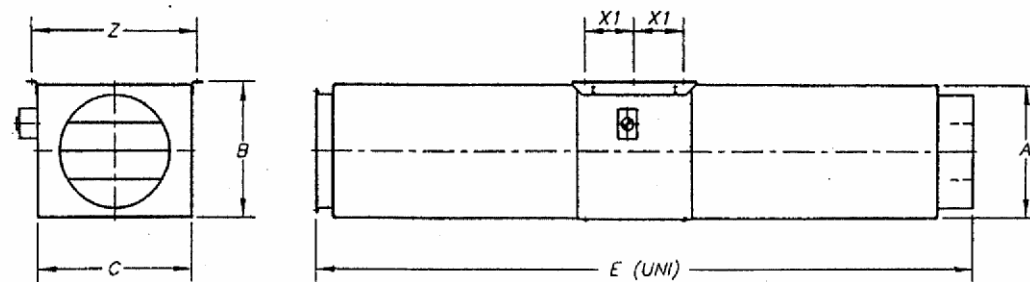
Velocidad: 2.900 r.p.m.
Potencia: 13,5/3,3 KW
Caudal máximo: 37800 m³/h
Nivel presión sonora (Lp): 68 dB (A)
Peso aprox. : 328 Kg

Se instalarán una batería de 9 unidades trabajando en paralelo. Todos ellos envueltos en una caja metálica. Tanto la impulsión como toma de aire se realiza a través de una rejilla lineal que impulsa el aire con un ángulo de 35 °.

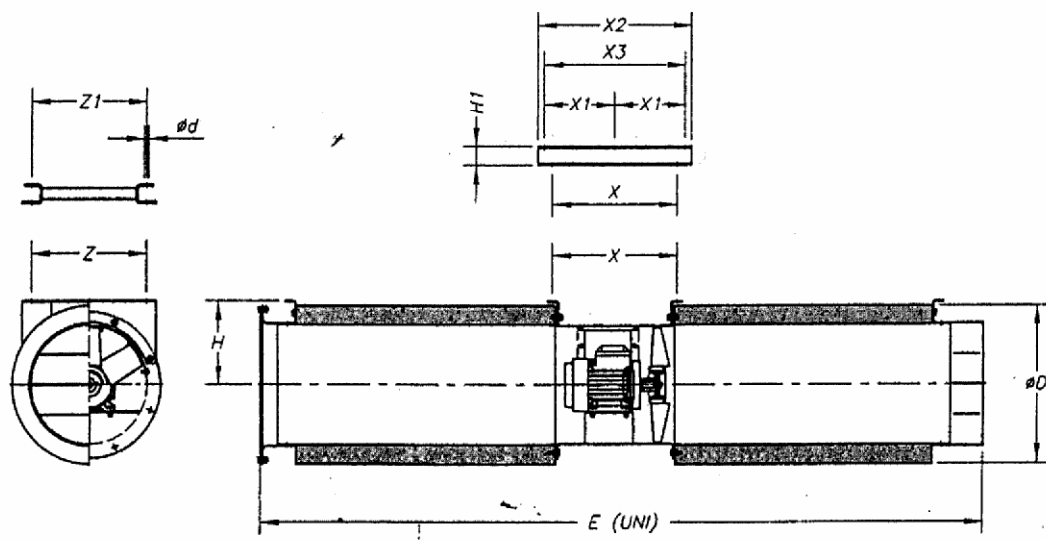
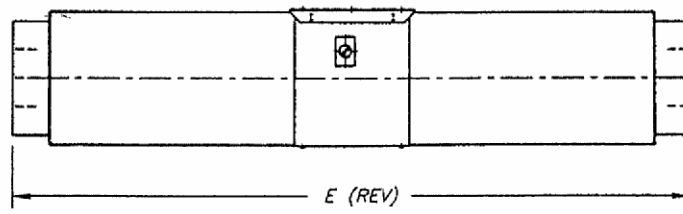
Envolvente.

Se diseña una caja de chapa cerrada, montada sobre una estructura metálica, en la que alojarán 9 equipos dispuestos en paralelo.

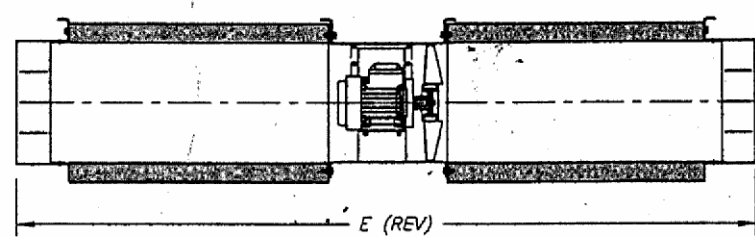




THT/IMP-R



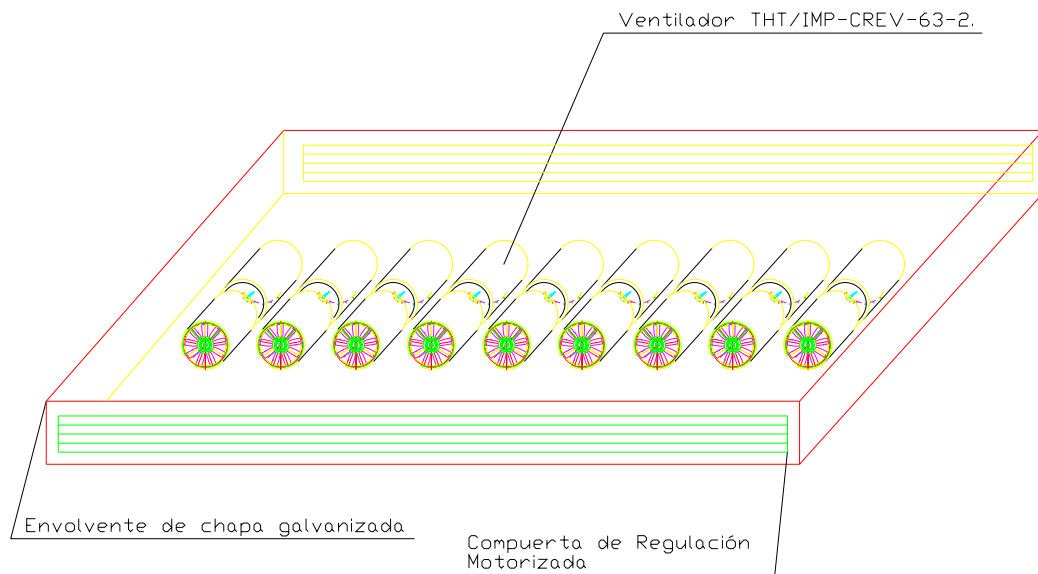
THT/IMP-C



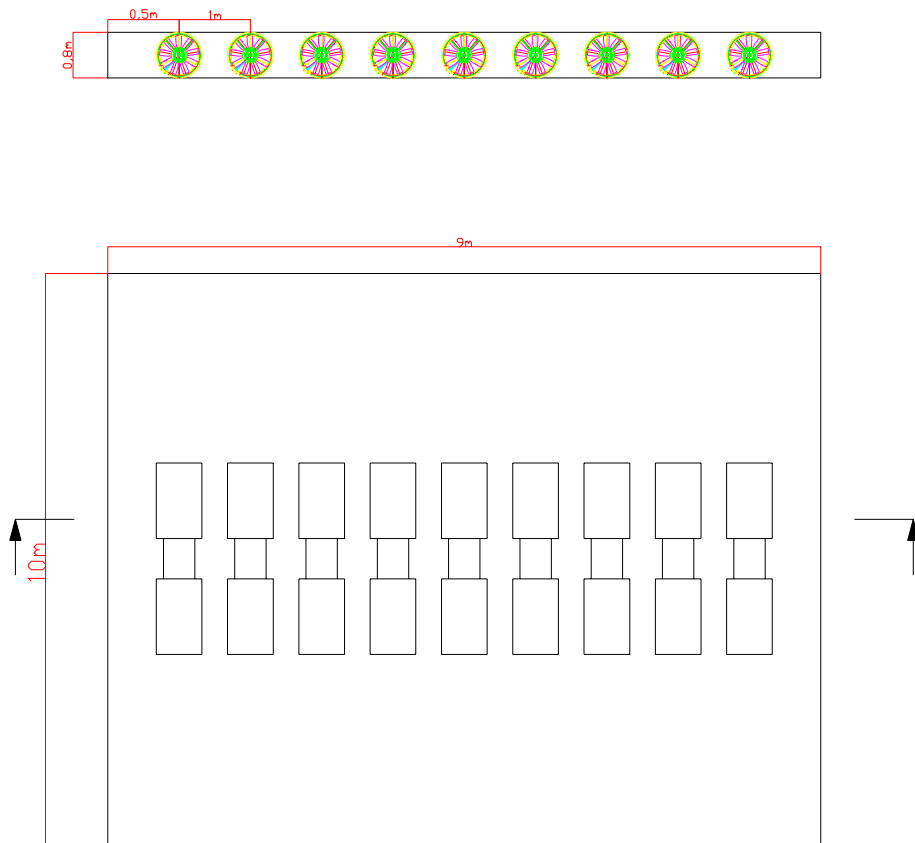
Dimensiones	Valor (mm)
D	800
OD 1	4
E_UNI_	3.295
E_REV_	3.350
H	435
H1	80
X	706
X1	418
X2	900
Z	550

3.4.3.- DEFINICIÓN GEOMÉTRICA.

Una vez descrito el equipo, se configura una batería de ventiladores, colocados en paralelo y con una envolvente estanca de chapa de acero galvanizado en forma de cajón. En los extremos de la base se dispone de una rejilla lineal motorizada, por la que se toma o impulsa el aire bien en régimen lineal o con una inclinación determinada en función del tráfico. Esta envolvente de colgará del techo a través de una estructura metálica que soporta el sistema.



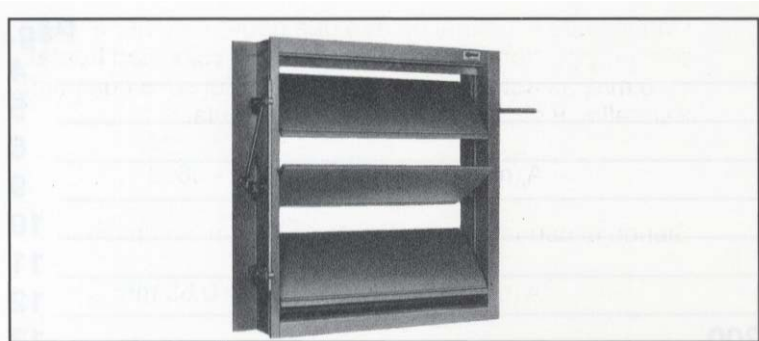
El peso de cada uno de los jets es de 328 kg, por lo que tenemos un peso total de 2952 Kg repartidos en una superficie de 9 m * 10m, a través de unos perfiles metálicos anclado al techo. A continuación de detallan las dimensiones del conjunto.

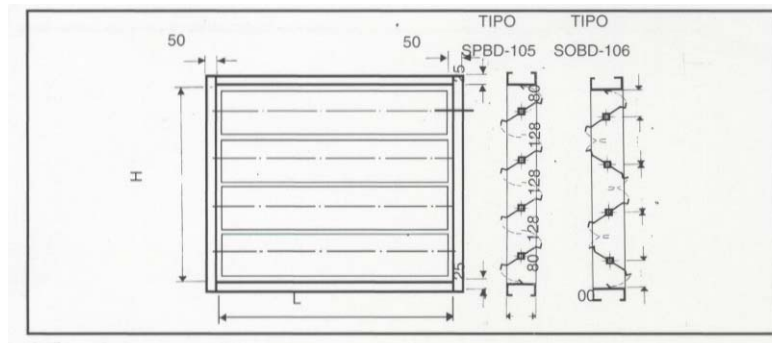


Compuertas de Regulación:

Las compuertas de regulación serán del tipo de aleta plana o aerodinámica construida en acero con mando motorizado, este tipo de compuerta tiene una pérdida de carga muy pequeña.

Se dispondrán dos unidades, en los laterales del cajón tal y como indica la figura. El objetivo es poder impulsar de forma lineal en modo pozo y con una regulación del ángulo en modo transversal. Los dos extremos poseen compuerta ya que en modo transversal la cortina deberá funcionar por cualquier lado en función de la confinación de los humos.





3.4.4.- ANÁLISIS DE FUERZAS PRODUCIDAS EN EL SISTEMA.

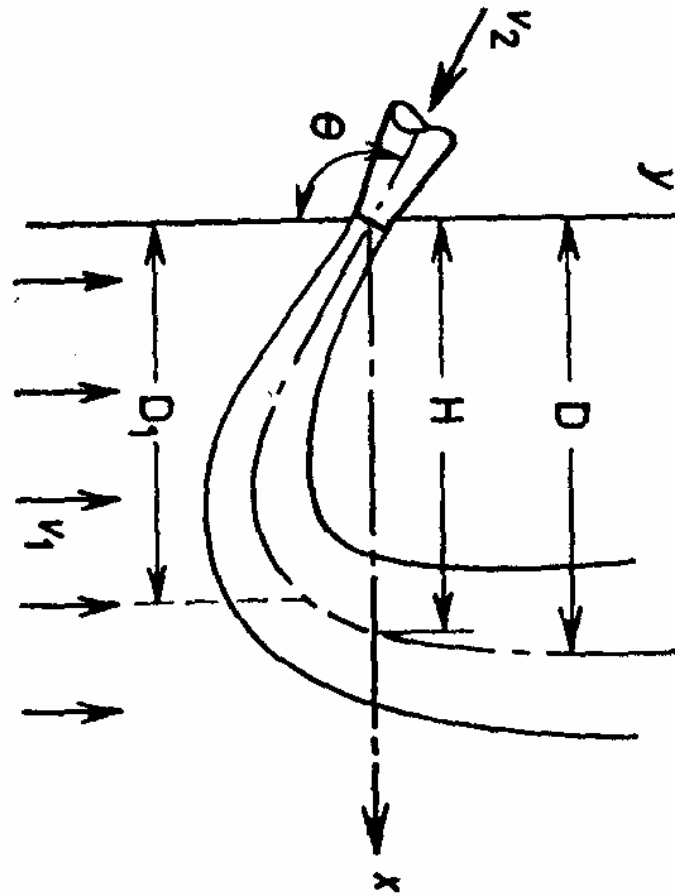
El estudio del comportamiento del sistema se realizará a través un modelo matemático computerizado, por lo que todos los imput necesarios serán recogidos de la información descrita en este capítulo y será el software el que analice lo que ocurre en los distintos escenarios. En el próximo capítulo se expondrá en software, su validación, escenarios de fuego, riegos, etc.

Antes de realizar el cálculo numérico en el ordenador es conveniente hacer un análisis analítico simple que nos ofrezca unos órdenes de magnitud y nos acerque a la situación real de lo que se pretende conseguir.

Tal y como hemos descrito anteriormente intervienen distintos factores que hacen complicado un análisis exhaustivo de lo que ocurre en el interior del túnel cuando se produce un incendio, este es el principal motivo por el que se recurre a una modelización, es el procedimiento menos alejado de la realidad del que disponemos, para conocer el comportamiento de los humos.

Por otro lado es necesario hacer un análisis analítico del comportamiento de un chorro de corriente externa en un espacio de dimensiones mayores. Para ello se recurrirá a un procedimiento empírico que V.V. Batirin hace en su libro de Fundamentos de Ventilación Industrial.

Este análisis nos permitirá tener un orden de magnitud de las variables (caudal, velocidad, ángulos de lanzamiento del chorro) que intervienen en el proceso. Hay que destacar que en el cálculo intervienen algunas variables que no se están teniendo en cuenta ya que solo analizamos lo que ocurre con un chorro de aire cuando se lanza a un espacio de mayores dimensiones y éste es interferido por un una corriente de aire perpendicular. El conjunto de todas las fuerzas que intervienen serán recogidas en el modelo y serán analizadas en el capítulo siguiente. A continuación se describe gráficamente las cotas y variables que se van a analizar.



Esta investigación fue realizada por Ivanof en el instituto Central de Turbinas de vapor en Rusia. La corriente externa circulaba por un conducto vertical de 400x600 mm de sección transversal con una pared lateral de 1250mm de altura, en la cual se introdujeron boquillas. Algunas boquillas eran circulares ($d= 5,10$ y 20 mm) y otras rectangulares $h/b= 5$). El ángulo θ entre el eje del chorro y la dirección de la corriente externa se hizo variar entre 30 y 150° ($\theta= 0$ indica que las dos corrientes circulan en el mismo sentido y $\theta= 180^\circ$ en sentido opuesto).

Cuando $Ar < 0,005$ la deformación del chorro debida a las fuerzas gravitacionales se puede despreciar. En este caso (para régimen turbulento) la deformación de la línea central del chorro, tanto si es isotérmica como si no lo es, depende de:

- 1º.- La relación de cantidades de movimiento de la corriente externa y del chorro que sale de la boquilla, $(\rho_1 V_1^2) / (\rho_2 V_2^2)$.
- 2º.- El ángulo de incidencia θ
- 3º.- El coeficiente de turbulencia del chorro, a .
- 4º.- La forma de la boquilla y su orientación.

Resumiendo,

$$y/d = f (x/d, \theta, (\rho_1 V_1^2) / (\rho_2 V_2^2))$$

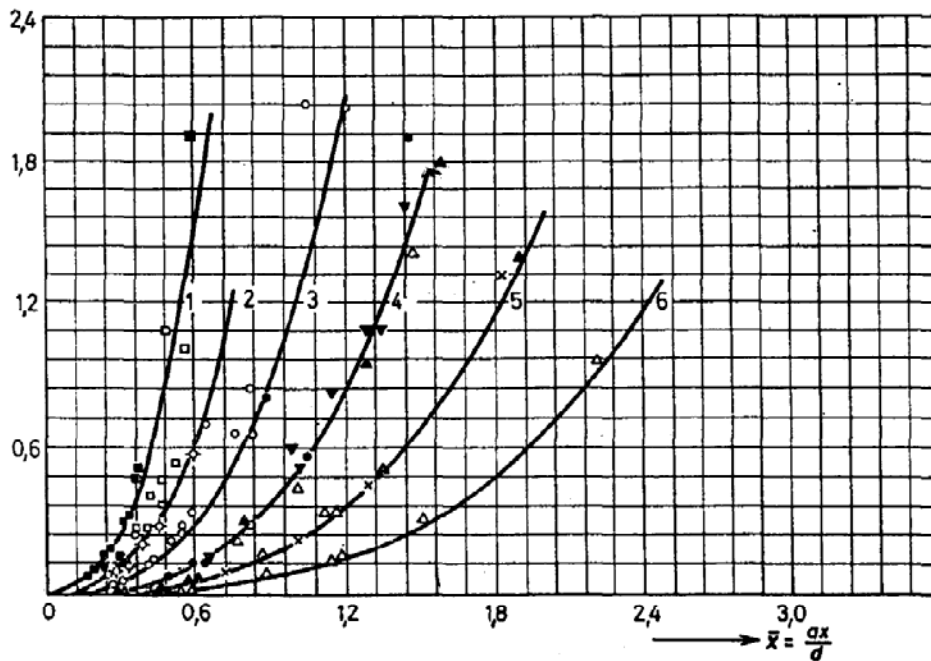


Fig. 4.43. Trayectorias de chorros que se propagan por una corriente externa para valores de a comprendidos entre 0,06 y 0,08 y $\theta = 90^\circ$.

Curva núm.	$\frac{q_1 v_1^2}{q_2 v_2^2}$	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$	a	Símbolo
1	0,08	5	2	0,06	■ □
2	0,04	5	1	0,06	} □
	—	5	1	0,065	
		5	1	0,08	} ◇
3	0,02	10	2	0,06	
		7,11	1	0,06	} ○
4	0,01	10	1	0,06	
		10	1	0,065	} ▼ ▲
	0,01	10	1	0,08	
5	0,005	20	2	0,06	} ▲ +
		14-15	1	0,06	
6	0,0025	20	1	0,06	△

En la figura se muestran las trayectorias de varios chorros todos ellos $\theta = 90^\circ$, utilizando coordenadas adimensionales $ay/d = f(ax/d)$, a fin correlacionar las curvas obtenidas para distintos valores de a ($a =$ de 0,006 a 0,008).

Para generalizar los resultados de los ensayos se propuso la siguiente ecuación empírica para la trayectoria de chorros circulares que se propaguen a través de una corriente externa:

$$ay/d = 195 \left(\frac{\rho_1 V_1^2}{\rho_2 V_2^2} \right)^{1.3} (ax/d)^3 - ax/d \operatorname{tg}(\theta - 90)^\circ$$

La cual se ha comprobado para $(\rho_1 V_1^2) / (\rho_2 V_2^2) =$ de 0,00145 a 0,08 en el intervalo de ángulos de incidencia θ , $60^\circ < \theta < 120^\circ$.

De los ensayos se concluye que los chorros originados en aberturas rectangulares en las que $h/b < 5$ siguen trayectorias que casi coinciden con las de los chorros circulares con un coeficiente de turbulencia $a = 0,06$.

Para el cálculo aproximado de las trayectorias de los chorros de aberturas rectangulares se puede emplear una ecuación del siguiente tipo:

$$y/d_{eq} = ((\rho_1 V_1^2) / (\rho_2 V_2^2))^{1.3} (x/d_{eq})^3 - (x/d_{eq}) \operatorname{tg}(\theta - 90^\circ)$$

la cual da buenos resultados para chorros circulares cuando $a = 0,07$ y $60^\circ < \theta < 120^\circ$.

En el interior de conductos rectangulares con una razón $B/d < 24$ las trayectorias de los chorros se apartan de las seguidas en una corriente externa, mientras si $B/d > 24$ ambas coinciden, siendo B la longitud del lado más corto de la sección rectangular del conducto.

Si aplicamos este ensayo a nuestro sistema.

Datos de partida:

$V_1 = 32,6$ m/s (velocidad de salida del ventilador seleccionado)

$V_2 = 3,13$ m/s (Backlayering para 100MW)

$d = 0,8$ m (diámetro del chorro correspondiente a una sección equivalente de la salida)

Resultados:

La razón de velocidades es: $V_1/V_2 = 10,41$

Según la tabla anterior, corresponde con la curva nº 3, en la que el coeficiente a es 0,06.

Se observa en la gráfica que el chorro toma una dirección horizontal cuando $ax/d = 1,3$

Siendo la correspondiente distancia horizontal $ay/d = 2$

Transformando estos datos en metros, tendremos que el fluido llega en una distancia:

$X = 17,3$ m

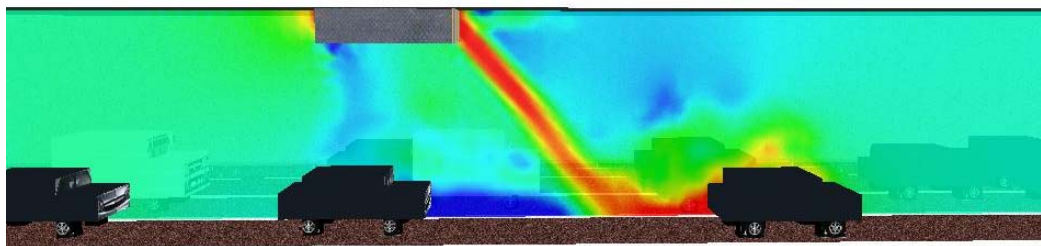
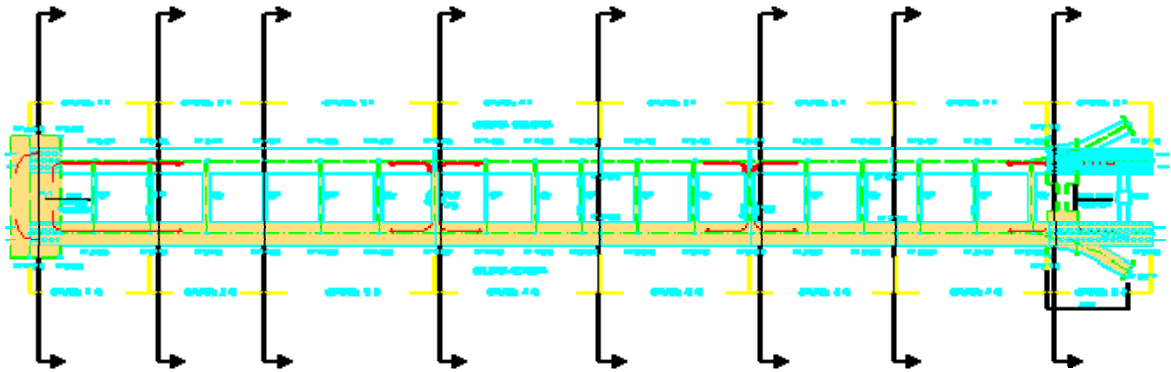
$Y = 26,6$ m

Esto quiere decir que la línea media del flujo llega hasta una distancia de 17,3 m, más que suficiente en túneles en el que los equipos estarán situados a una altura aproximada de 5 m del suelo.

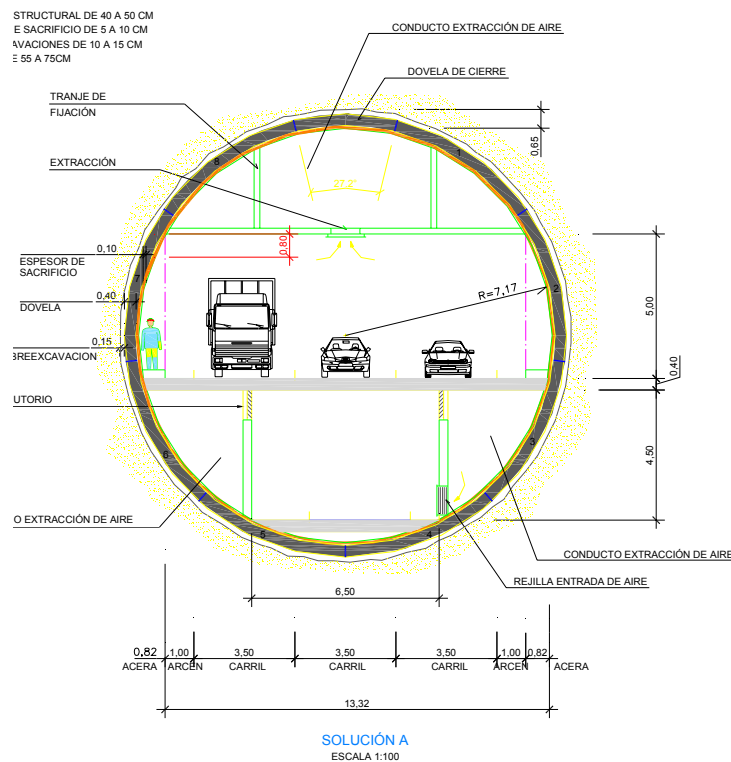
Este cálculo corresponde con un ensayo, tal y como hemos comentado anteriormente y solo nos sirve como orientación de que la corriente de aire llegará hasta el suelo. En el conjunto iteran muchas más variables que no han sido tenidas en consideración, por lo que necesario ayudarnos de un modelo computerizado para acercarnos a la realidad de una forma más exacta. En estos momentos es el único procedimiento que mejor nos acerca a la realidad.

3.4.5.- LOCALIZACIÓN DE LAS CORTINAS.

Se dispondrán cada 600m coincidiendo con la división de los cantones y con las salidas de emergencia, se trata de poder generar sectores de incendio y trabajar con las extracciones motorizadas de los cantones.



Frame: 50
Time: 2.8



3.4.6.- MODO DE OPERACIÓN.

Una vez descrito el sistema y su localización en el interior del túnel, hay que comentar el modo de funcionamiento. El funcionamiento del sistema es consecuencia de una aplicación específica por lo que será detallado con más profundidad en la validación de la propuesta de soluciones.

Este sistema ha sido diseñado para funcionar de dos formas diferentes:

- **Modo Pozo:** En esta forma de funcionamiento el aire se desplaza longitudinalmente al túnel (sistema de ventilación longitudinal), para ello se abrirán las dos compuertas laterales (aspiración e impulsión) con ángulo 0° para que el aire fluya de forma longitudinal al túnel.
- **Modo Transversal:** En esta forma de funcionamiento el aire se desplaza transversalmente a la sección del túnel (cortina de aire). En este escenario funcionarán dos cortinas, la anterior y la posterior al fuego, de forma que el fuego quede confinado. Para ello la posición de las lamas será: aspiración a 0° (para evitar pérdidas de carga elevadas) y la expulsión de aire con un ángulo de 35° con respecto a la sección transversal.

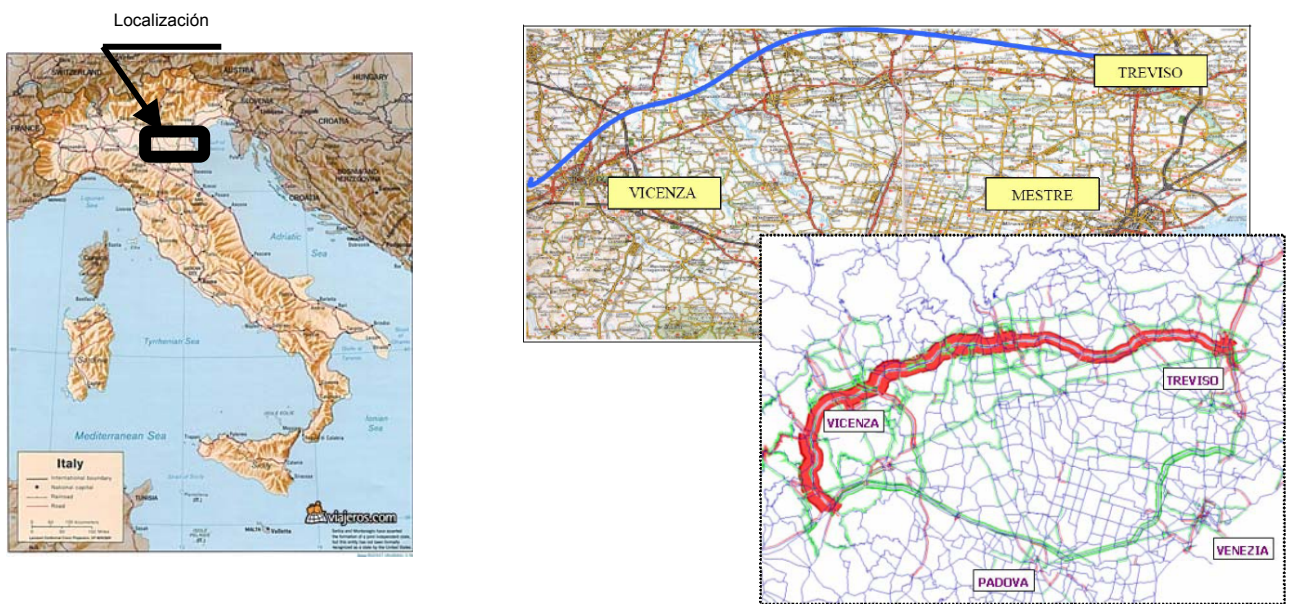
Los motores serán reversibles, es decir deberán funcionar en ambos sentidos, ya que en el modo transversal, tendrán que funcionar dos cortinas para poder confinar el fuego,

para ello el funcionamiento de ambas será en sentido opuesto. Las compuertas serán motorizadas y el sistema deberá permitir la apertura y cierre de las lamas en función de las necesidades.

4.- VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIONES.

4.1.- APLICACIÓN DEL SISTEMA AL TÚNEL MALO.

Una vez analizados tanto los efectos como las consecuencias del incendio, es necesario aplicarlo en una situación real, de esta forma se podrán cuantificar los efectos y obtener unas conclusiones objetivas. Nuestra aplicación se centrará en una autopista situada en el norte de Italia en Pedaggio denominada *PEDEMONTANA VENETA*, actualmente en fase de diseño, que une Vicenza y Treviso con una longitud de 90 Km, conectando la A-27 (Caselli Conegliano en Treviso Nord), con la A31 (Caselli Dueville, Thiene) y la A-4 (Caselli Montecchio). Entre el PK 10+940,00 y el 17+440,00, y con una longitud de 6.500 m existe un túnel denominado "Malo" en el que centraremos nuestro estudio.



4.1.1.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL.

Este futuro túnel carretero está diseñado con un sistema de ventilación transversal puro, capaz de extraer el aire contaminado tanto en estado de confort (funcionamiento normal de túnel), como en estado de incendio.

En este último supuesto, el sistema de ventilación deberá extraer los humos producidos por el incendio y es el responsable del control del humo. Es de vital importancia que los ventiladores sean capaces de extraer humo próximos a la velocidad a la que se guerrear, para que de esta forma la propagación sea mínima.

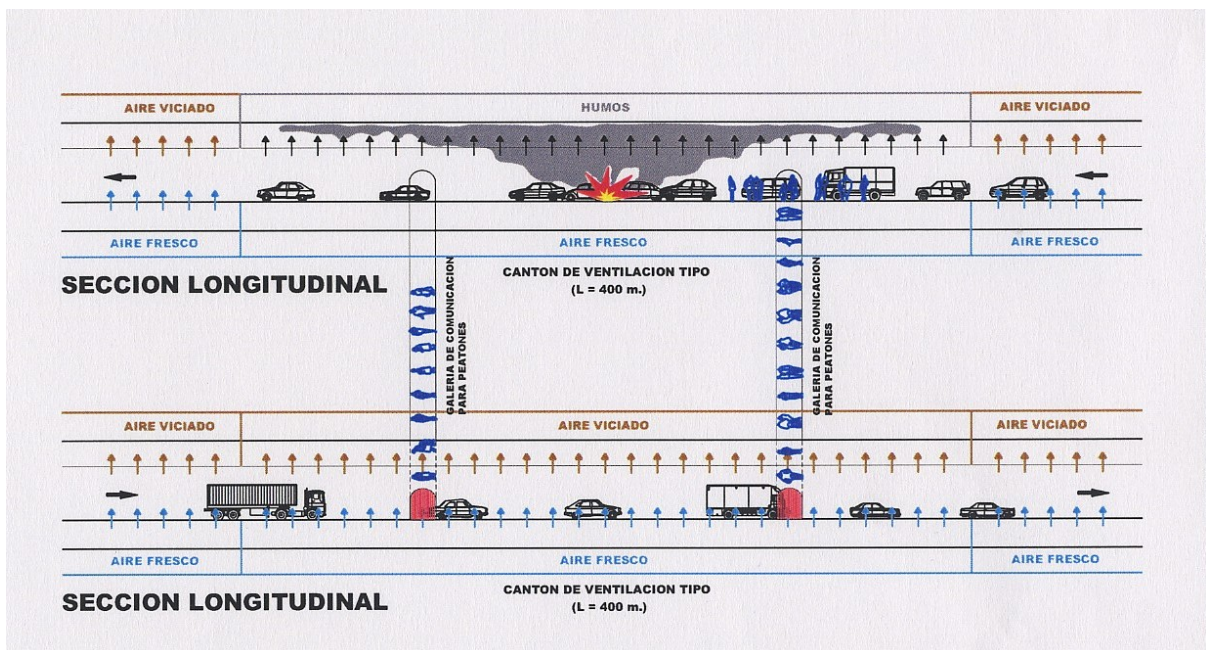
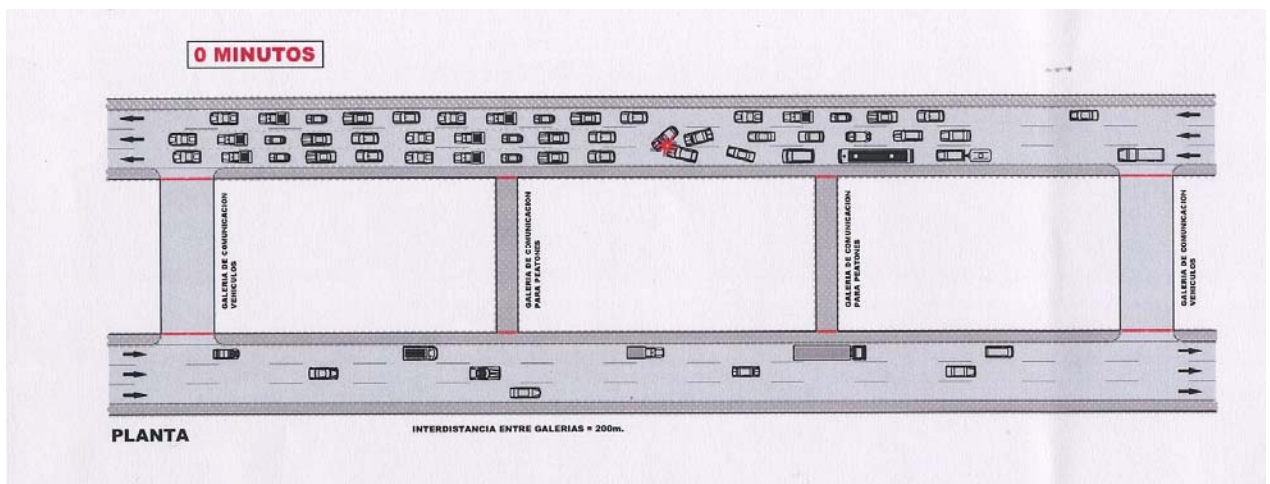
Este modo de funcionamiento es el previsto para los casos de incendio con tráfico fluido donde los vehículos situados aguas abajo del incendio (en el sentido del tráfico) pueden abandonarlo sin encontrar interrupción.

Para este caso se ha previsto la disposición en el falso techo de una trampilla de extracción de humos en posición normalmente cerrado que, en caso de incendio, abrirá con una capacidad de extracción de 340 m³/s en la zona de extracción.

Se situará una trampilla de extracción masiva para cada cantón y situadas lo más cerca posible de los pozos de extracción.

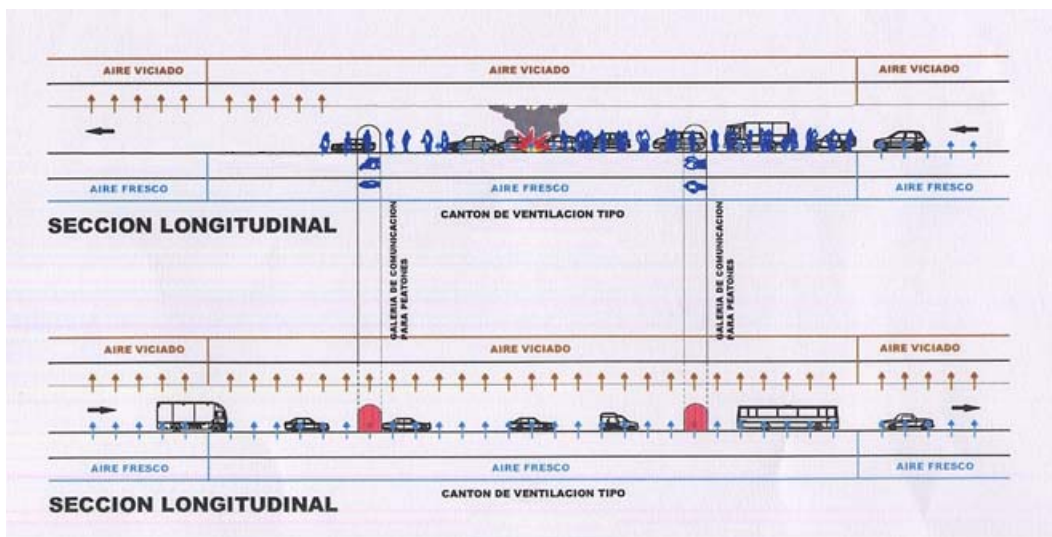
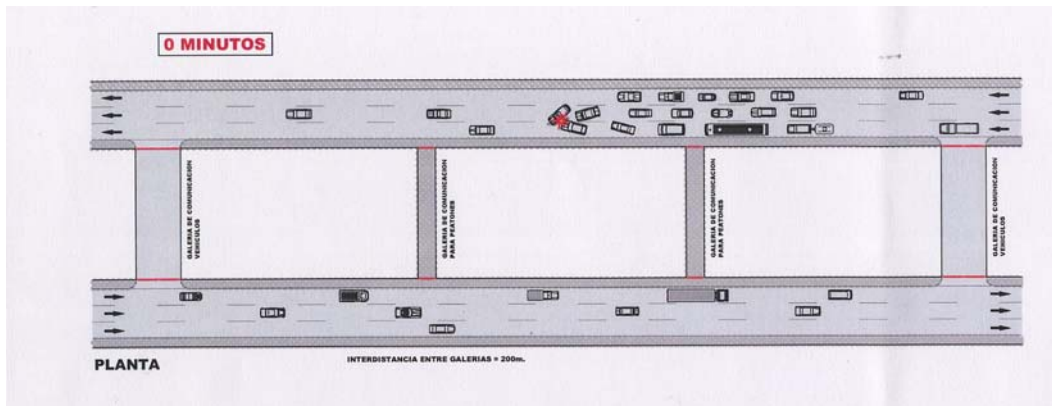
El dimensionamiento del sistema de extracción de humos se realiza en función del caudal necesario extraer en caso de un incendio de 30 MW, que es del orden de 80 m³/s. Existen dos modos de funcionamiento:

MODO TRANSVERSAL Se utiliza cuando el túnel está colapsado y el sistema de ventilación debe ser capaz de extraer un caudal capaz de absorber los humos generados más una velocidad adicional de 1,5 m/s en el túnel, lo que lleva a un caudal total en los 600 m de cantón de 170 m³/s.



MODO POZO Se utiliza cuando el túnel circula con normalidad y los vehículos pueden marcharse, el sistema debe ser capaz de garantizar una corriente longitudinal del aire en el sentido de circulación que evite el retroceso de la capa de humos hacia los

vehículos situados aguas arriba del foco. Se adopta una velocidad crítica de 3 m/s, de modo que el caudal total necesario en modo pozo sería 320 m³/s. Este valor se obtiene extrayendo simultáneamente por los dos cantones situados aguas abajo del foco a través de los grandes exutorios telecomandados.



En ambos modos la impulsión de aire, en los cantones adyacentes al correspondiente al foco del incendio, es imprescindible. No sólo por dar aire fresco a los usuarios y servicios de emergencia, sino también por que es la única forma de controlar la velocidad del aire longitudinal.

Nuestro sistema será complementario a éste y tendrá que ser capaz de asegurar el avance del humo, hasta que las personas atrapadas en el interior abandonan el túnel contaminado de humo y son conducidas a través de las galerías de conexión al otro tubo, previo corte de tráfico.

4.1.2.-DEFINICIÓN GEOMÉTRICA Y GEOGRÁFICA.

Los túneles del proyecto tienen un carácter unidireccional e interurbano.

Las principales características geométricas que a su vez han sido tomadas como datos de partida para los cálculos son las siguientes:

Longitud: 6.500m

Número de carriles: 3

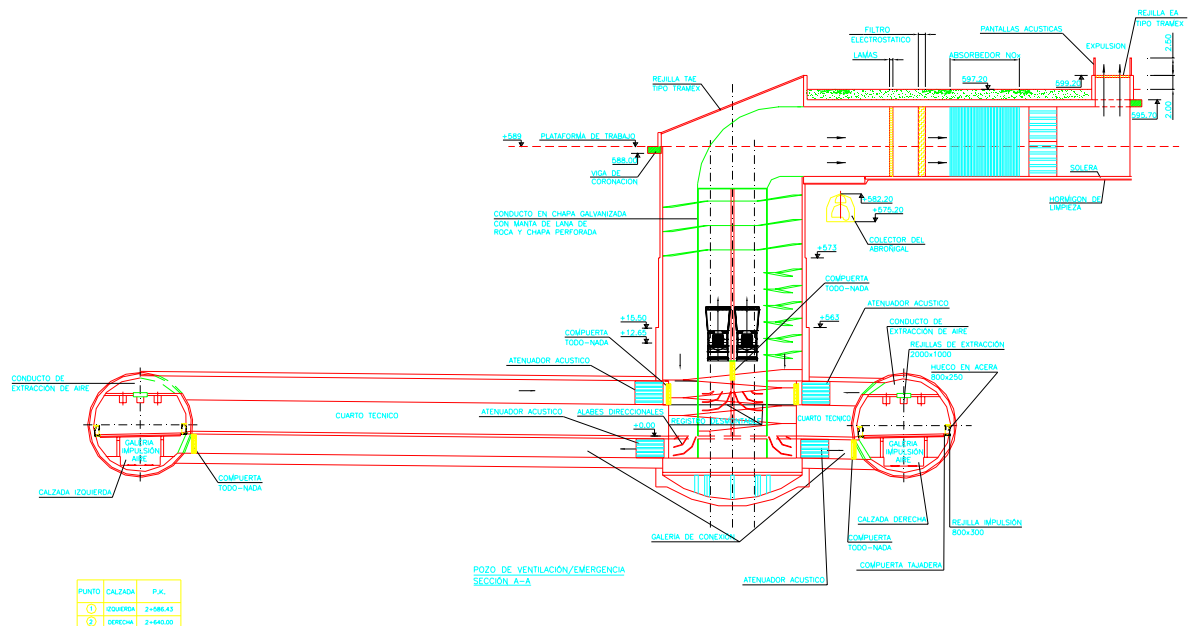
Sección conducto superior para aire de extracción (m²): 15 aprox.

Los túneles se realizan mediante tuneladora de 15.2 m de diámetro. En el nivel de rodadura se dispone de 3 carriles para circulación de 3,5 m de ancho cada uno, 2 arcones de 0.6m y 2 aceras de 0.75 m.

Existen dos espacios no destinados a tráfico, uno situado en la parte superior que se utiliza como galería de extracción de aire y otro situado en la parte inferior que se utiliza como galería de servicio y distribución de aire fresco.

Existen algunos tramos realizados entre pantallas. En este caso se divide el espacio situado en la parte superior para impulsión y extracción de aire.

Los túneles disponen de galerías de evacuación cada 200 m hacia el túnel contiguo. Se ha dispuesto una galería de vehículos cada 600 m.



4.1.3.- CRITERIOS DE DISEÑO

La ubicación de pozos de ventilación cada 600 metros plantea algunas dificultades en los tramos que transcurren bajo la montaña, por lo que se harán laterales.

Los principales problemas que tenemos son:

- No es fácil localizar las estaciones de ventilación, para los pozos de tomas de aire fresco y pozos de extracción de aire viciado.
- Debe cumplirse la normativa de Protección del Medio Ambiente, en la que las evacuaciones forzadas de aire enrarecido producto de ventilaciones forzadas, deben realizarse a través de chimenea exclusiva cuya altura supere al menos en 1 metro la del edificio propio y la de los existentes, sean o no colindantes, en un radio de 15 metros.
- Debe cumplirse con la normativa de Protección del Medio Ambiente, que indica que ningún nuevo foco emisor de ruido podrá instalarse en las áreas acústicas en las que se divide el suelo urbano, si su funcionamiento ocasiona un incremento mayor de 3 dBA en los niveles existentes, y en ningún caso superar los valores dados en una tabla que se adjunta. Como ejemplo, para un área tipo II, levemente ruidosa, que corresponde a un uso residencial, el nivel de ruido máximo que se admite es de 60 dBA. Teniendo en cuenta el volumen de aire que estamos moviendo, el dimensionamiento de rejillas de tomas de aire y expulsión se ve muy incrementado para conseguir estos valores de ruido, por lo que se hace todavía más difícil encontrar una ubicación adecuada.

Ante la imposibilidad física de ubicar los pozos de ventilación cada 600 m, se ha realizado un estudio de las zonas en las que sí se podrían situar pozos de ventilación, ya que hay posibilidad de sacar pozos lateralmente a la montaña.

En cada una de las bocas se dispone un conjunto de equipos y ventiladores para la impulsión de aire y otro para la extracción, independientes entre sí.

Se ubicarán los dos sistemas tanto el de extracción como el de impulsión y se conducirán mediante conductos a las embocaduras de los cantones, de esta forma de podrá conectar el túnel con los edificios.

Además contamos con el pozo de arranque de la tuneladora en el PK 0+000 (s.c.d) y el pozo de salida de tuneladora, donde también se van a situar ventiladores.

La distancia entre los pozos de ventilación así situados está en orden a 1.200 metros, por lo que la solución pasa por disponer en el mismo punto las tomas de aire y las expulsiones, manteniendo la misma longitud máxima de cantón de 600 metros.

El pozo de ventilación diseñado está formado por dos pozos concéntricos, el exterior de 20 m de diámetro y el interior de 10 m de diámetro. El pozo interior se utilizaría para expulsión de aire, y el espacio existente entre el pozo interior y el exterior se utilizaría para la toma de aire. Los ventiladores de toma de aire y expulsión se sitúan en la parte inferior del pozo junto a los túneles.

El diseño de este pozo de ventilación se ha realizado cumpliendo los siguientes criterios:

- Posibilidad de ubicación de los ventiladores, garantizando su acceso, mantenimiento, montaje y desmontaje desde los túneles.
- Posibilidad de ubicación de cuartos técnicos adecuados en la parte inferior del túnel, centros de transformación, salas de cuadros de mando de ventiladores, cuartos de comunicaciones, cuartos de control de incendios, etc.
- Diseño de toma de aire adecuada para garantizar un nivel de ruido adecuado.
- Diseño de expulsión de aire adecuado para garantizar que no van a producirse recirculaciones del aire o los humos expulsados hacia las tomas de aire.
- Diseño de una salida de emergencia al exterior, situando una rampa helicoidal en el perímetro del pozo exterior.

Para garantizar que no van a existir recirculaciones entre la toma de aire y la expulsión se han realizado las siguientes actuaciones:

- Diseñar la salida de extracción suficientemente alejada en vertical de la toma de aire. Para ello se ha previsto una altura total de la chimenea de 20 m sobre el nivel del suelo.
- Diseñar la salida de extracción de modo que la velocidad del aire sea de 10 m/s. De este modo, y de acuerdo a las fórmulas de Briggs, conseguimos que el aire expulsado alcance una altura de 342 m en caso de que no haya viento y de 75 m en

caso de existencia de viento.

La velocidad de expulsión de la chimenea debe ser siempre superior a 1,5 veces la velocidad del viento dominante en la zona, que en nuestro caso es de 4,4 m/s dirección Norte (NORMA UNE). De esta forma se garantiza que el viento no va a crear succiones del aire expulsado hacia la toma de aire.

Otro cambio que hemos incorporado al proyecto y que difiere de los criterios de CEMIM es la distancia entre las rejillas de extracción: 25 m en lugar de 50 m, siempre del lado de la seguridad. De este modo conseguimos que la distancia longitudinal que debe recorrer el aire desde la rejilla de impulsión hasta la de extracción sea lo menor posible y garantizamos un correcto sistema de ventilación transversal para los casos en que exista cogestión de tráfico.

4.1.4.- SOLUCION PROYECTADA

4.1.4.1.- Ventilación en los túneles.

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, se dispone de 4 estaciones de ventilación situadas en los siguientes PKs:

ESTACION VENTILACION	Pk calzada	TIPO VENTILADORES
PV1	0+000	Tipo 1 y 2
PV2	1+485	Tipo 2 y 3
PV3	2+633	Tipo 2 y3
PV4	3+633	Tipo 1 y 2

Los ventiladores tienen las siguientes características:

(*) Será responsabilidad de la empresa instaladora, el cálculo definitivo de la presión disponible del ventilador teniendo en cuenta las pérdidas de carga de los equipos realmente instalados.

Se ha dividido el túnel en 8 cantones de ventilación, tanto para calzada derecha (D) como para calzada izquierda (I), de las siguientes longitudes:

	TIPO VENTILADORES			
	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
Servicio	Extracción aire	Impulsión aire	Extracción aire	Impulsión aire
Posición	Horizontal	Horizontal	Vertical	Vertical
Potencia	355	355	355	355
RPM	750	750	1000	1000
Resistencia al fuego	400°/2h	200°/2h	400°/2h	200°/2h
Caudal diseño	170	170	170	170
Presión diseño (*)	1530	1530	1530	1530
Diámetro rodete	2800	2800	2500	2500
Diámetro ext. TOBERA	3300	3300	2800	2800
Long. Tobera	300	300	300	300
Diámetro ext. DIFUSOR	3300	3300	2800	2800
Long. Difusor	3150	3150	1850	1850
Damper cuadrado	3300	3300	NO	NO
Long. Damper	420	420	NO	NO
Válvula mariposa	NO	NO	SI	SI
Long TOTAL	7770	7770	5700	5700

(*) Será responsabilidad de la empresa instaladora, el cálculo definitivo de la presión disponible del ventilador teniendo en cuenta las pérdidas de carga de los equipos realmente instalados

Se ha dividido el túnel en 8 cantones de ventilación, tanto para calzada derecha (D) como para calzada izquierda (I), de las siguientes longitudes:

CANTÓN	Long. (m)	PK inicio	PK final	Pozo ventilación asociado
1 I	509	0+000	0+509	PV1

2 I	403	0+509	0+912	PV1
3I	573	0+912	1+485	PV2
4I	560	1+485	2+015	PV2
5I	561	2+015	2+606	PV3
6I	514	2+606	3+120	PV3
7I	513	3+120	3+633	PV4
8I	267	3+633	3+900	PV4
1D	500	0+000	0+500	PV1
2D	400	0+500	0+900	PV1
3D	600	0+900	1+500	PV2
4D	580	1+500	2+080	PV2
5D	580	2+080	2+660	PV3
6D	538	2+660	3+198	PV3
7D	537	3+198	3+730	PV4
8Da	2.770	3+730	6+500	PV4
8Db	2.770	3+730	6+500	PV4

4.1.4.2.- Sistema de presurización en las galerías de escape

Esta ventilación tiene los siguientes objetivos:

- Asegurar la no penetración de humos en las galerías de escape, manteniéndolas con una sobrepresión de 80 Pa aproximadamente con relación al tubo accidentado.
- Asegurar un intercambio de aire entre el túnel y las galerías, con el fin de evitar acumulaciones de gases nocivos.
- Inyectar un volumen de aire muy cerca de la entrada de cada galería de escape, con el fin de facilitar la localización y el acceso de estas galerías.

Cada galería de escape tendrá, en cada una de sus extremos, una puerta y tabique cortafuego de un nivel de resistencia RF 120 (curva de temperatura / tiempo HCM 120). En cada una de las extremidades de esta galería dispondrá un equipo conjunto de ventilación. Estos conjuntos estarán protegidos por los tabiques cortafuego.

Cada conjunto de ventilación dispondrá de dos ventiladores para dar sobrepresión a la galería según el principio de redundancia.

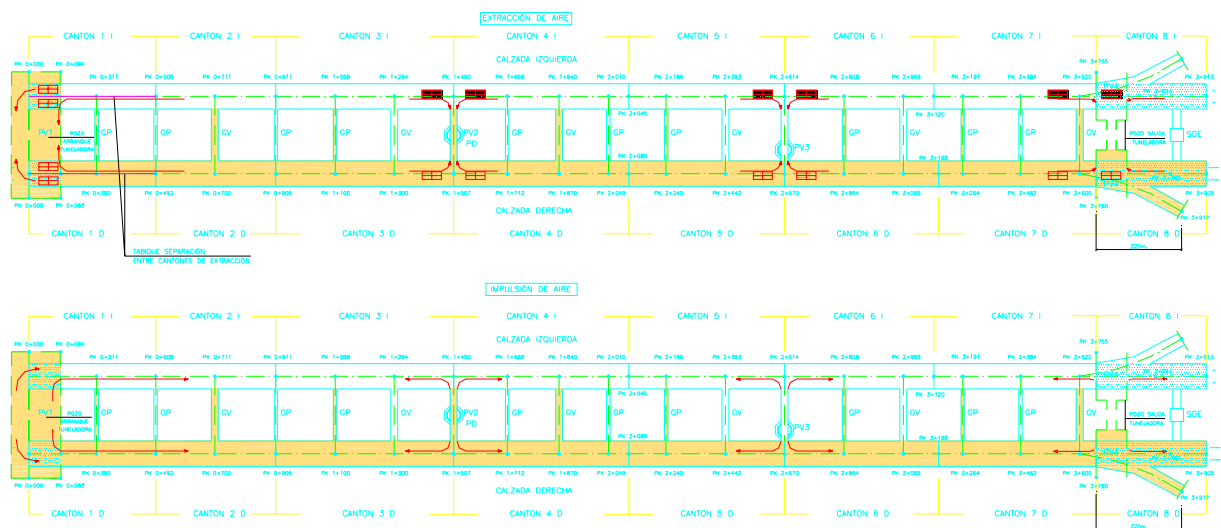
Cada ventilador estará provisto de una compuerta de mando cortafuego normalmente cerrada, y enclavada con el arranque del ventilador. Se dispondrá un variador de velocidad para la regulación del caudal del ventilador.

La descripción del funcionamiento que se hace a continuación se refiere a una galería que une un túnel A con un túnel B. Cuando se detecta un incendio en el túnel B, las compuertas cortafuego de mando de los ventiladores correspondientes a este tubo se

mantienen cerradas (no alimentadas) y los ventiladores correspondientes a este tubo (VB) no están en funcionamiento. Por el contrario, uno de los ventiladores (VA) está en funcionamiento, su compuerta cortafuego de mando está abierta, permitiendo la presurización de la galería.

El control de los elementos se realizará mediante un presostato diferencial tarado a dos niveles: 80 y 100 Pa. Los pasos ante una situación de emergencia serán los siguientes:

- Arranque del ventilador situado en la puerta que conecta con el túnel no incendiado a máxima velocidad.
- Si la presión no alcanza los 80 Pa (en el presostato diferencial galería-túnel incendiado) se procederá al arranque del ventilador homólogo.
- Cuando la presión supere los 100 Pa en el presostato diferencial, se irá regulando la velocidad con el variador de frecuencia asociado al motor del ventilador, de forma que se establezca entre 80 y 100 Pa.



4.1.5.- CAUDALES NECESARIOS PARA LA EXTRACCIÓN DE HUMOS.

El dimensionamiento del sistema de extracción de humos se realiza en función del caudal necesario extraer en caso de un incendio de 30 MW, que es del orden de 80 m³/s. Existen dos modos de funcionamiento:

MODO TRANSVERSAL

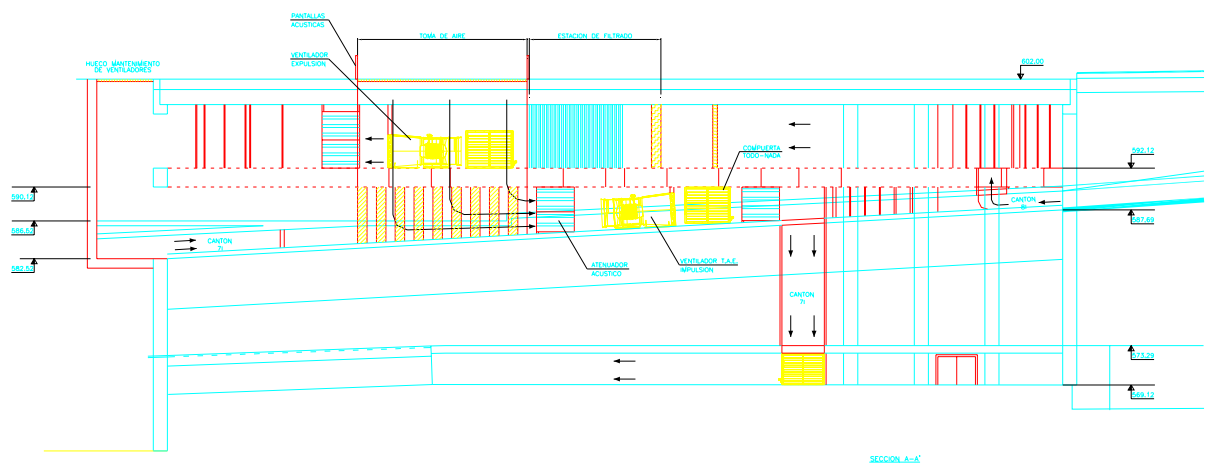
El sistema de ventilación será capaz de extraer un caudal capaz de absorber los humos generados más una velocidad adicional de 1,5 m/s en el túnel, lo que lleva a un

caudal total en los 600 m de cantón de 170 m³/s.

MODO POZO

El sistema debe ser capaz de garantizar una corriente longitudinal del aire en el sentido de circulación que evite el retroceso de la capa de humos hacia los vehículos situados aguas arriba del foco. Se adopta una velocidad crítica de 3 m/s, de modo que el caudal total necesario en modo pozo sería 320 m³/s. Este valor se obtiene extrayendo simultáneamente por los dos cantones situados aguas abajo del foco a través de los grandes exutorios telecomandados.

En ambos modos la impulsión de aire, en los cantones adyacentes al correspondiente al foco del incendio, es imprescindible. No sólo por dar aire fresco a los usuarios y servicios de emergencia, sino también por que es la única forma de controlar la velocidad del aire longitudinal.



4.1.5.1.- Elementos auxiliares.

A continuación se analizan los criterios para el dimensionamiento de los elementos auxiliares.

COMPUERTAS TODO NADA

Estas compuertas se instalan entre los cantones de extracción o de impulsión. Su finalidad es que si hay un fallo en el ventilador que extrae o impulsa aire a un cantón, se

pueda utilizar provisionalmente el ventilador destinado al cantón anexo del propio túnel o el ventilador destinado al otro túnel, realizando un juego de aberturas y cierres de compuertas.

Sus dimensiones vienen determinadas por la configuración de la sección disponible. Serán distintas en los tramos de tuneladora y en los tramos de pantallas. Se busca ante todo que no representen pérdidas de carga importantes ya que son adicionales a las del propio circuito previsto para los ventiladores por lo que se dimensionaran para velocidades bajas de paso de aire.

Considerando un caudal tipo de 170 m³/s y velocidades de paso de 10 m/s como máximo, resulta una sección de paso libre de 17 m². Una compuerta de lamas presenta una obturación de aprox 30 % por lo que la sección bruta de la compuerta será de 20 m² y las dimensiones tipo serán de 5.000 x 4000 mm. Esta es la dimensión teórica que hay que intentar instalar, pero será necesario adaptar las dimensiones a la geometría disponible en cada caso.

REJILLAS DE IMPULSIÓN

Las dimensiones de las rejillas vienen determinadas por la velocidad de paso que se ha definido en 6 m/s.

Caudal total a distribuir: 170 m³/s

Longitud del cantón: 600 m

Número de rejillas: 120

Velocidad de paso: 6m/s

Sección rejilla: 0.236 m², por lo que se deciden unas dimensiones de rejilla de 700 * 350.

El hueco que se precisa en el forjado que comunica la planta de rodadura con la galería de plenum de impulsión viene determinado por la velocidad de paso que se ha definido en 8 m/s.

Caudal: 170 m³/s

Longitud del cantón: 600 m

Número de huecos: $2 * 600/10 = 120$

Velocidad: 8 m/s

Sección= 0.177 m²

Con el fin de no interrumpir mucho el paso por la acera, se deciden unas dimensiones de hueco de 800*250 mm.

REJILLAS DE EXTRACCIÓN

Las dimensiones de las rejillas se determinarán de modo que la superficie total de la rejilla sea de 2 m². Tomando unas dimensiones de 2.000 * 1.000 mm, se obtienen las siguientes velocidades de paso:

Caudal: 170 m³/s

Número de rejillas: $600/25 = 24$ uds

Sección: 2m²

Velocidad: 3.5 m/s

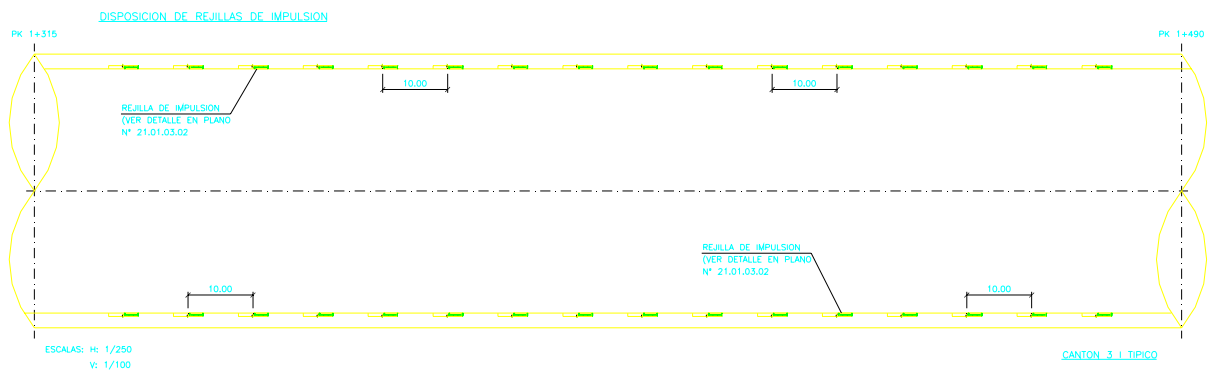
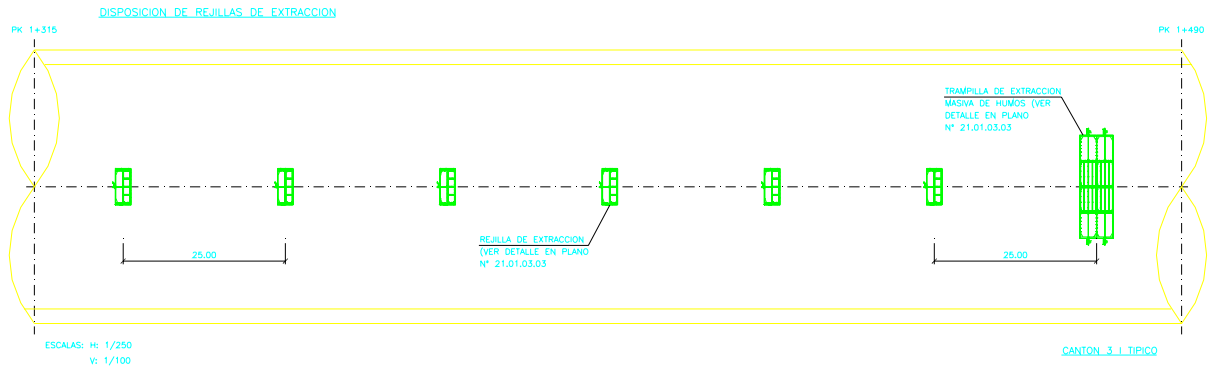
Longitud del cantón: 600 m

Número de huecos: $2 * 600/10 = 120$

Velocidad: 8 m/s

Sección= 0.177 m²,

Con el fin de no interrumpir mucho el paso por la acera, se deciden unas dimensiones de hueco de 800*250 mm.



4.1.5.2.- Presurización de galerías

CAUDAL DE PRESURIZACIÓN

Atendiendo a la norma UNE 100040:1996 el caudal de presurización se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q = C \times St \times (2 \times P/D) \text{ Exp } (1/N)$$

Donde:

- Q (m³/s): Caudal presurización
- C (ad): Coeficiente de flujo
- St (m²): Superficie efectiva ranuras
- N (ad): Coeficiente geometría de ranuras
- D (kg/m³): Densidad del aire presurizado
- P (Pa): Incremento presión

Tomando para C el valor de 0,65 que admite la norma; Para N el valor de 2 (ranuras no estrechas); Para St el valor de 0,24 m² (suma de los valores de las tablas anexas a la norma, considerando puerta de doble hoja y paredes exteriores de estanqueidad muy baja para estar del lado de la seguridad y en la galería de vehículos); Para el incremento de Presión el valor de 100 Pa y finalmente para la densidad 1,1 kg/m³ se obtiene:

$$Q = 2,10 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ante la posibilidad de que el vestíbulo se despresurice por la apertura discontinua de puertas, hecho que en una emergencia puede suceder, la norma establece una velocidad del aire mínima de 0,75 m/s. Considerando un área de apertura de puertas de 4 m² se obtiene:

$$Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}.$$

RENOVACIONES:

Las galerías de vehículos son las más voluminosas. Considerando una sección de 23,82 m² y una longitud de 45 metros (la más larga que conectan en el trazado), se obtiene un volumen de 1035 m³. Esto supone, para este caso más desfavorable, 10,08 renovaciones por hora, que garantizan la calidad de aire de las mismas.

Se añade que dicho aire, si bien procede del túnel no siniestrado y no directamente del exterior, tiene garantizada su calidad no solamente por garantizarse la ventilación sanitaria de dicho túnel, sino además por el bajo valor de 20 ppm de CO que se exigen para el arranque de la ventilación sanitaria.

PERDIDAS DE CARGA

A partir de los siguientes datos:

F (ad) Coeficiente de fricción: 0,03

L (m) Longitud galerías: 45

Sv (m²) Superficie galería vehículos: 23,82

Sp (m²) Superficie galería peatones: 5,57

Q (m³/s) Caudal: 3

Vv (m/s) Velocidad galería de vehículos: 0,13

Vp (m/s) Velocidad galería de peatones: 0,54

Pev (m) Perímetro galería vehículos: 18,45

Pep (m) Perímetro galería peatones: 9,14

Dhv (m) Diámetro hidráulico galería de vehículos: 5,16

Dhp (m) Diámetro hidráulico gal peatones: 2,44

Se obtiene como pérdida de carga en milipascales los valores de 90 en la galería de peatones y 3 para la de vehículos debido a su mayor sección.

Estos valores son insignificantes frente a los 100 Pa que deben aportar los ventiladores.

4.2- MODELIZACIÓN.

4.2.1.- LOS MODELOS NUMÉRICOS.

Dado que el fuego es un fenómeno destructivo, es imposible hacer pruebas reales para predecir el comportamiento del humo en un túnel, por otro lado debido al avance de la dinámica de fluidos computerizada y el grado tan alto de aproximación a la realidad, se ha decidido utilizar esta técnica como procedimiento de cálculo para predecir el comportamiento de la propuesta de soluciones objeto de la tesis.

Hoy en día existe una grande variedad de modelos numéricos desarrollados por y para la ingeniería del fuego. Es bastante difícil clasificar y compararlos porque pueden tener características y objetivos muy variados. Un examen publicado por Olenick y Carpenter en 2003, clasifica unos 170 modelos con campos de aplicaciones diferentes: modelos por zonas, mecánica computacional de fluidos, resistencia de estructuras, simulación de evacuación, etc... Los resultados de este examen están disponible en la pagina web <http://www.firemodelsurvey.com>.

El objetivo principal de este trabajo es la determinación de distintas variables tales como la evolución de partículas, CO, Temperaturas, visibilidad, velocidades, etc. de un fluido dentro de un recinto cerrado tal y como es un túnel, los modelos más idóneos son

los de mecánica computacional de fluidos – o modelos de campo-. Dentro de los 54 modelos por zonas y 20 modelos de campo se ha decidido trabajar con FDS (Fire Dynamics Simulator) como modelo de campo.

Los modelos de mecánica de fluidos computacional son los modelos más avanzados, esto modelos hacen muy pocas simplificaciones a priori respecto a los procesos de transferencia de masa y de calor. La mayoría de estos modelos están basados en soluciones, en tres dimensiones y dependiente del tiempo, de las leyes fundamentales de conservación. Las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas, sin simplificación, y en muchos puntos del espacio, mediante métodos de elementos finitos. Estos códigos necesitan intervalos de tiempo muy pequeños y una rejilla muy fina, lo que implica un tiempo de cálculo muy largo.

En la mayoría de los casos, el modelo de cálculo termodinámico y aerodinámico se dobla de un modelo especial para tratar el problema de las turbulencias, como el modelo k-e o el “Large Eddy Simulation”.

Los resultados, del hecho de la división del espacio en muchos elementos, son dados con mucho más detalles que en los modelos de zonas. Las variables como la temperatura, las concentraciones des especies químicas o la velocidad del flujo de aire, son dadas en todos los nodos de la jerilla. Por eso, los post-procesadores, que permiten la visualización de los resultados, son muy importantes para los modelos de MFC. Las figuras adjuntas son obtenidas con el programa SmokeView, post-procesador del Fire Dynamics Simulator (FDS).

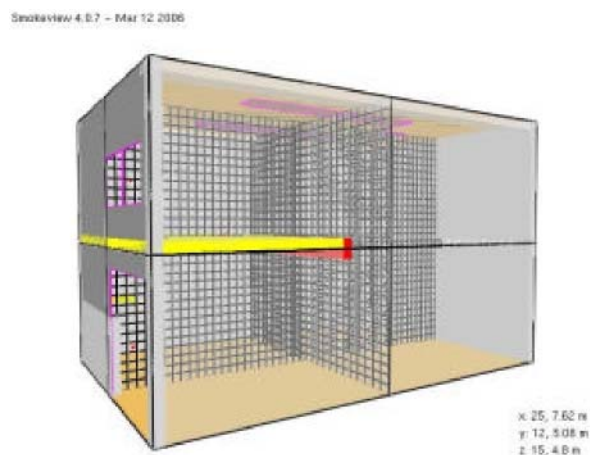


Fig. 1. Vista de la retícula en elementos finitos

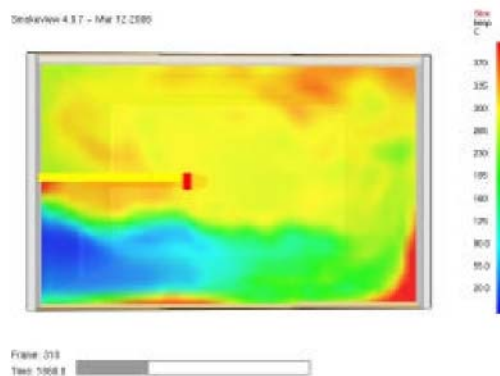


FIG.2.- Visualización del campo de temperaturas, en un plano determinado.

4.2.2.- FIRE DYNAMIICS SIMULATOR (FDS V.4.)

Para hacer este proyecto se ha elegido utilizar el programa “Fire Dynamics Simulator”, acompañado de su post-procesador SmokeView y una software llamado Pyrosim que facilita la entrada de datos al FDS.

La última versión de FDS, FDS.4 (julio 2004), y SmokeView se pueden descargar con toda su documentación técnica en la página web: <http://www.fire.nist.gov/fds/>.

4.2.2.1.- Presentación general

El FDS es un modelo de Mecánica de Fluidos Computacional (MFC) especializado para el estudio de flujos generados por fuego. Se apoya en la resolución de una forma de las ecuaciones de Navier-Stokes dichas de “low Mach number” apropiada para velocidades bajas. La velocidad de los gases en un incendio son del orden de unos 10-20m/s, lo que es muy lejos de la velocidad del sonido en el aire. Esta formulación es adaptada a los flujos creados por efectos térmicos y movimientos de humos. De hecho se eliminan directamente los efectos de compresión de los gases que crean fenómenos como ondas acústicas u ondas de choque.

Otra parte muy importante es el modelo utilizado para tratar las turbulencias que se encuentran en la zona de pirolisis al límite entre la llama y el aire. En el FDS, las turbulencias son tratadas por el modelo de Large Eddy Simulación (LES).

La eficacia del FDS es, por parte, debida a la elección de una geometría muy sencilla de los elementos. Cada plano del espacio (XY, XZ y YZ) tiene que ser dividido en una rejilla,

produciendo una red de elementos paralelepípedos. Esto permite utilizar métodos simplificados y directos para la resolución del campo de presión. Puede ser una limitación para tratar geometrías complejas, pero con rejillas suficientemente finas se puede aproximar cualquier geometría.

El tamaño de la rejilla es un punto fundamental para la precisión de los resultados. Para preguntas de homogeneidad, está mejor tener elementos de geometría cercana a un cubo, con sus tres dimensiones más o menos iguales. En general, más fina es la rejilla, mejor es la resolución numérica de las ecuaciones. FDS resuelve ecuaciones del segundo orden en tiempo y espacio. Dividiendo el tamaño de cada celda por dos, el error de discretización se divide por cuatro mientras que el tiempo de cálculo es multiplicado por $2^4 = 16$ (un factor 2 por cada dimensión más uno para el tiempo). Algunos estudios sobre la influencia del tamaño de rejilla han sido realizados. Los resultados enseñan que la precisión del análisis es función del ratio del diámetro característico del fuego D^* dividido por el tamaño de una celda. En estos estudios, la mejor precisión no siempre está obtenida con la rejilla la más pequeña. Desgraciadamente, los resultados de estos estudios son poco aplicables a otros escenarios y la mejor manera de encontrar el tamaño óptimo de rejilla es de hacer una serie de test propia al caso estudiado.

Las celdas así definidas permiten caracterizar toda la geometría del problema. De hecho, el usuario tiene la posibilidad de definir obstrucciones – es decir objetos – cuya geometría es obligatoriamente forzada de coincidir con las celdas de la rejilla. En cada elemento finito las propiedades son consideradas homogéneas.

Para elementos “vacíos”, es decir que no forman parte de un objeto, por lo tanto son llenos de gas, el programa calcula para cada intervalo de tiempo los parámetros siguientes:

- Temperatura del gas
- Velocidad del gas
- Concentración de la especies químicas
- Concentración de humos y factor de visibilidad
- Presión

- RHR por volumen unitario (si el volumen contiene combustible)
- Densidad del gas

Para los elementos llenos de material sólido, cuyas propiedades han sido descritas por el usuario, el programa calcula las cantidades siguientes:

- Temperatura de los límites y en el interior
- Flujo de calor, convectivo y radiativo
- Velocidad de combustión

Y finalmente, para todo el sistema, el programa devuelve:

- El RHR total
- Los tiempos de activación de los detectores de calor y humos
- Los flujos de masa y energía a través de las aberturas y límites

Estos resultados pueden ser registrados y salen en forma de planos coloreados y con animación, vectores o archivos delimitados por coma. El tamaño de los archivos de resultados puede alcanzar unos GB porque cada información está guardada en cada intervalo del tiempo de integración. Al principio de la simulación, el usuario tiene que posicionar sus detectores en el modelo y precisar para cada uno las cantidades deseadas. Hay que hacerlo con cuidado porque es imposible recuperar otros datos una vez la simulación hecha.

Según sus creadores, el campo de utilización de este programa sigue siendo los estudios de diseño con fuego predeterminado, es decir con $RHR_{total}(t)$ conocido. Aún que el FDS permite la definición de muchas características térmicas o químicas de los materiales, sigue muy difícil desarrollar un escenario de fuego realista incluyendo la ignición de un objeto por el otro. Faltan muchos datos y la modelización de la propagación del fuego sigue siendo un problema mal resuelto. Implica un gran número de fenómenos complejos como desplazamientos de flujos multi-fase, mezclas turbulentas, aerodinámica de baja velocidad, transferencias de calor,..etc...Además, la caracterización de los flujos de calor dentro de los materiales está bastante bien dominada, pero los datos sobre la combustión y la pirolisis de los materiales todavía no


son disponibles. Este campo de la ingeniería del fuego esta todavía en su inicio. Esto parece bien normal, dado que los objetos que forman el combustible en un incendio no son considerados como tal en su utilización normal.

El guía de referencia técnica de FDS provee una información muy completa sobre la teoría de base y las hipótesis del modelo.

4.2.2.2 ¿Como utilizar FDS?

FDS es un programa de Fortran 90 y su desarrollo empezó hace 25 años para llegar a una primera versión publica en 2000.

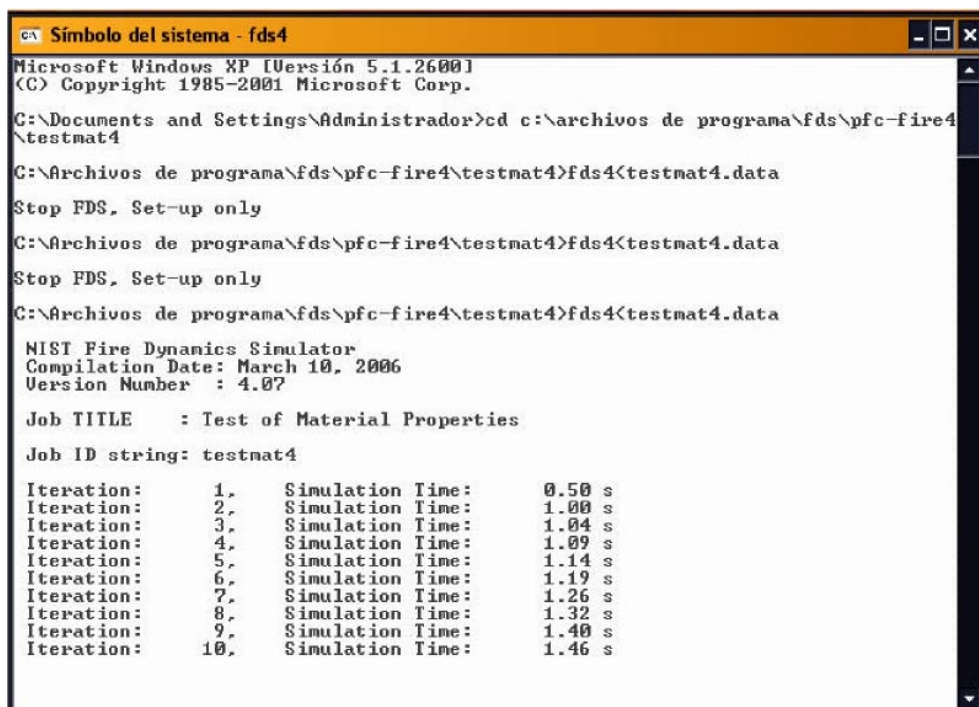
Para utilizar este programa, hay que redactar un archivo de datos en un editor de texto. Este archivo debe proveer todos los parámetros a tener en cuenta para desarrollar el escenario. También se precisan en el archivo de datos todo lo que concierna los puntos de medidas. Estos parámetros se organizan en grupos, cada grupo teniendo sus parámetros propios. Existen al total 24 grupos para describir familias de parámetros o datos. Por ejemplo, el grupo OBST permite crear obstrucciones, el grupo VENT permite definir las aberturas, el grupo THCP los puntos de medida,..etc.. todos los grupos existentes. Cada línea del archivo de data contiene datos que pertenecen al mismo grupo. La figura da una idea general de cómo se presenta un archivo de datos.



```
calibr4 - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
&HCAD CHID='calibr4',TITLE='calibración fds' / All output files will have names beginn
&GRID IBAR=20, JBAR=20, KBAR=15
&POINT XBAR=4, YBAR=4, ZBAR=3 /
&MISC REACTION='PROPANE' /
&TIME TWFIN=1000.0 / Time when finished (length of simulation)
&REAC ID='PROPANE'
FYI='Propane, C3 H8'
MW_FUEL=44
MU_O2=5.
MU_CO=3.
MU_H2O=4.
SOOT_YIELD=0.01 /
&SURF ID = 'CONCRETE'
FYI = 'test param'
C_P = 1
DENSITY=1800.
K3 = 1.13
DELTA = 0.1 /
&VINT XB= 0.2, 3.8, 0.2, 3.8, 0, 0, SURF_ID='BURNER', //
&SURF ID= 'BURNER', HRRPUA=100.0, TMPWAL=30., RAMP_Q='BURN_UP', //
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=0.0, F=0 /
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=10.0, F=0.04 /
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=20.0, F=0.16 /
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=30.0, F=0.40 /
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=45.0, F=0.80 /
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=50.0, F=1 /
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=300.0, F=1 /
&RAMP ID= 'BURN_UP', T=600.0, F=0 /
&OBST XB= 0, 0.2, 0, 4, 0, 3, RGB=0.7,0.7,0.7, SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 1
&OBST XB= 3.8, 4, 0, 4, 0, 3, RGB=0.9,0.9,0.9, SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 2
&OBST XB= 0.2, 3.8, 0, 0.2, 0, 3, RGB=0.9,0.9,0.9, SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 3
&OBST XB= 0.2, 3.8, 3.8, 4, 0, 3, RGB=0.7,0.7,0.7, SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 4
&OBST XB= 0.2, 3.8, 0.2, 3.8, 2.8, 3, RGB=0.9,0.9,0.9,0.7 / techo
&HOLE XB= 0.5, 2.5, 0, 0.1, 0.5, 1, /ventana1
&VENT XB= 0.5, 2.5, 0, 0, 0.5, 1, SURF_ID='OPEN' /vent ventana 1
&HOLE XB= 1.4, 2.6, 1.4, 2.6, 2.8, 3, /ventana2
&VENT XB= 1.4, 2.6, 1.4, 2.6, 3, 3, SURF_ID='OPEN' /vent ventana 2
&SLCF PBZ=1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=2, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PRY=2, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
```

Dado la complejidad de la redacción completa de unos de estos archivos de datos, se recomienda empezar modificando archivos de casos parecidos al caso estudiado. La definición de los puntos de medidas también requiere mucha atención: al final de la simulación sólo se pueden obtener las medidas de los puntos introducidos en el archivo de datos.

Después de la redacción bajo un editor de texto, hay que compilarlo y la simulación empieza. La ventana del Procesador de Comandos queda abierta y permite seguir la evolución del cálculo. Enseña el número de iteraciones y el tiempo de simulación correspondiente.



```
Símbolo del sistema - fds4
Microsoft Windows XP [Versión 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\Administrador>cd c:\archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4

C:\Archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4>fds4<testmat4.data
Stop FDS, Set-up only

C:\Archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4>fds4<testmat4.data
Stop FDS, Set-up only

C:\Archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4>fds4<testmat4.data

NIST Fire Dynamics Simulator
Compilation Date: March 10, 2006
Version Number : 4.07

Job TITLE      : Test of Material Properties
Job ID string: testmat4

Iteration:      1.      Simulation Time:      0.50 s
Iteration:      2.      Simulation Time:      1.00 s
Iteration:      3.      Simulation Time:      1.04 s
Iteration:      4.      Simulation Time:      1.09 s
Iteration:      5.      Simulation Time:      1.14 s
Iteration:      6.      Simulation Time:      1.19 s
Iteration:      7.      Simulation Time:      1.26 s
Iteration:      8.      Simulation Time:      1.32 s
Iteration:      9.      Simulation Time:      1.40 s
Iteration:     10.      Simulation Time:      1.46 s
```

Evolución de la simulación

Desde el principio de la simulación, los resultados dados bajo la forma de planes animados o colorados, o de vectores, pueden consultarse en el SmokeView mientras que sigue procesando la simulación. Para los resultados dados en formato de archivos de datos separados por coma, hay que esperar hasta el final del cálculo. La fecha final de la simulación es dada por el comando TWFIN (Time When Finish) seguido de una duración en segundos. En la fase de definición de la geometría del caso estudiado,

poner TWFIN=0.0 permite visualizar directamente la geometría en SmokeView sin calcular nada.

Desde que aparece el mensaje “STOP: FDS completed successfully “ se pueden consultar todos los resultados compilados.

Durante la simulación se escribe también un archivo de texto .OUT en el cual se registran todas las informaciones relativas a la simulación (lista de los datos, tiempo de computación, errores...)

4.2.3.-EVALUACIÓN DE LAS BASES DE CÁLCULO. VALIDACIÓN.

Para demostrar la validación del modelo, se adjuntan como **Anexo A**, dos modelos que han sido validados en la realidad y un informe de validación muy completo realizado por el U.S. Nuclear Regulatory Comisión y Electric Power Research Institute.

En primer lugar se adjunta un informe (enero 2006) completo de verificación y validación U.S. Nuclear Regulatory Comisión y Electric Power Research Institute. El objetivo de este informe es el de examinar las capacidades de predicción del modelo para que estos puedan ser utilizados en la práctica como herramientas válidas y dar conformidad a los requisitos que exigen las normas de los EEUU (Art. 50.48 de CFR y NFPA 805).

El segundo ejercicio fue realizado para validar la capacidad del modelo de predecir el movimiento del humo y los gases calientes de un fuego en un edificio relativamente grande, abierto. Se incluyen aquí como ejemplo de cómo el modelo es utilizado a menudo en la práctica por los ingenieros de la protección contra los incendios. Este modelo es utilizado por centenares de ingenieros alrededor del mundo, que lo validan constantemente para el uso en una variedad amplia de problemas. Estos ejercicios de la validación levantan el nivel de confianza en su aplicación.

Por último se adjunta un modelo de validación que se relaciona directamente con el actual estudio ya que se trata de un túnel. Los experimentos de fuego se realizaron en un túnel carretero en Virginia Occidental.

4.2.4.- SENSIBILIDAD DEL MODELO Y EXACTITUD DE LOS RESULTADOS.

Un análisis de la sensibilidad aportará el grado de incertidumbre del modelo, para ello intervienen distintas variables, tanto en las entradas del modelo como en la salida de resultados. Los parámetros del modelo serán las características físicas de sólidos y gases, las condiciones límites, las condiciones iniciales, etc. Los parámetros pueden también ser puramente numéricos, como el tamaño de la rejilla numérica. El FDS requiere que el usuario proporcione varios tipos de variables de entrada, que describan la geometría, los materiales, los fenómenos de la combustión, el etc. Por diseño, no se espera que el usuario proporcione parámetros numéricos además del tamaño de la rejilla, aunque los parámetros numéricos opcionales se describen en la Guía Técnica y de Diseño del FDS y éstos pueden ser variados.

El tamaño de la rejilla es el parámetro numérico más importante del modelo, pues condiciona la exactitud espacial y temporal de las ecuaciones diferenciales parciales individualizadas. El valor de lanzamiento y transmisión del calor es el parámetro físico más importante, pues es el término de la fuente en la ecuación de la energía. Los datos y características, como el conductividad termal, la densidad, el calor de la vaporización, la capacidad de calor, el etc., son determinantes. La validación debe demostrar que el FDS predice bien el transporte del calor y del humo. En tales casos, los cambios de menor importancia no tienen un impacto significativo en los resultados.

La mejor forma de analizar la sensibilidad de un sistema es generar un panorama o escenario dado, con todos los parámetros físicos y numéricos relevantes, y se realiza una simulación. Entonces, uno por uno, los parámetros son variados un porcentaje dado, y los cambios en los resultados se registran. Ésta es la forma más simple de análisis de la sensibilidad técnica más sofisticada, esto implica la variación simultánea de varios parámetros con un modelo del CFD ya que el tiempo de cálculo es demasiado largo y el número de parámetros demasiado grandes.

4.2.4.1.- El Tamaño de de rejilla.

La decisión más importante tomada por un usuario del modelo, es el tamaño de la rejilla numérica. En general, cuanto más fina es la rejilla numérica, mejor es la solución numérica de las ecuaciones. El FDS es exacto en el orden espacio y tiempo, significa que parte en dos el tamaño de célula de la rejilla, esto disminuye el error de la discretización en las ecuaciones que gobiernan el cálculo.

Debido a la no linealidad de las ecuaciones, la disminución del error de la discretización no se traduce necesariamente a una disminución comparable al error de una cantidad dada de la salida de resultados. Para descubrir qué efecto que tiene una rejilla más fina en la solución, los usuarios del modelo deben realizar un estudio de la sensibilidad de la rejilla en la cual se constate el grado de afinamiento necesario y cuales son las zonas en las que se necesita más precisión. Por supuesto, con cada partición en dos del tamaño de célula de la rejilla, el tiempo requerido para la simulación aumenta en un factor de $2^4 = 16$ (un factor de dos para cada coordenada espacial, más tiempo).

4.2.4.2.- Simulación de la turbulencia.

El FDS utiliza la forma de Smagorinsky para la simulación de la turbulencia Large Eddy Simulation (LES). Esto significa que el modelo no utiliza la viscosidad fluida real.

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 |S|^{1/2}$$

Donde C es una constante empírica, Δ es una longitud en el orden del tamaño de una célula de la rejilla, y el $|S|$ del término de la deformación se relaciona con la función de la disipación. Se relacionan con la "viscosidad turbulenta" las expresiones comparables para la conductividad termal y del material:

$$K_{LES} = (\mu_{LES} c_p) / Pr$$

$$(\rho D)_{LES} = \mu_{LES} / Sc$$

El número de Prandtl y el Sc del número de Schmidt se consideran valores "turbulentos". Así, el cs y el Sc son un sistema de constantes empíricas. La mayoría de los usuarios del FDS utilizan simplemente los valores prefijados de (0.2.0.5.0.5), pero algunos han explorado su efecto sobre la solución de las ecuaciones. En un esfuerzo de validar el FDS con datos simples de la temperatura ambiente, Zhang intentó diversas combinaciones de los parámetros de Smagorinsky, y sugirió los valores prefijados actuales. De los tres parámetros, el cs constante de Smagorinsky es el más sensible. Smagorinsky propuso originalmente un valor de 0.23, pero los investigadores sobre las últimas tres décadas han utilizado los valores que se extendían a partir de la 0.1 a 0.23. Hay también refinamientos del modelo original de Smagorinsky [26, 27, 28] que no requiere al usuario prescribir las constantes, pero las genera automáticamente como parte del esquema numérico.

4.2.4.3.- La transmisión térmica de la radiación.-

Se incluye en el FDS la solución de la ecuación de dispersión de la radiación para un gas, la solución de la ecuación se resuelve mediante una técnica similar a los métodos finitos del volumen para el transporte convectivo, así su nombre, método finito del volumen (FVM). Hay varias limitaciones del modelo.

Primero, el coeficiente de absorción para el humo es una función compleja y depende de su composición y temperatura. Debido al modelo simplificado de la combustión, la composición química de los gases, especialmente el contenido del hollín, puede afectar la absorción y la emisión de la radiación.

En segundo lugar, el transporte de la radiación está individualizado vía aproximadamente 100 ángulos sólidos. Lejos de una fuente localizada de radiación, como un fuego cada vez mayor, la discretización puede conducir a una distribución no uniforme de la energía radiante. Esto se puede ver en la visualización de las temperaturas superficiales, donde los "puntos calientes" demuestran el efecto del número finito de ángulos sólidos. El problema se puede disminuir por la inclusión de ángulos más sólidos, pero en un periodo de tiempos de cálculo más largos.

Hostikka examinó la sensibilidad de la radiación a los cambios de producción del hollín, el número de bandas espectrales, el número de los ángulos del control, y la temperatura de la llama. Algunos de los resultados más interesantes eran:

- Cambiar la producción del hollín a partir de 1 % a 2 % aumentó el flujo radiativo de una hornilla simulada del metano cerca de 15 %
- Bajar la producción del hollín a cero disminuyó el flujo radiativo cerca de 20 %.
- El aumento del número de los ángulos de control en un factor de 3 era necesario asegurar la exactitud del modelo en las localizaciones discretas de la medida.
- Cambiar el número de bandas espectrales de 6 a 10 no tenía un efecto fuerte en los resultados?

El número de los ángulos del control y espectral son parámetros numéricos sensibles a ser comprobados para saber si hay un escenario nuevo. Los valores prefijados en el FDS son apropiados para la mayoría de los panoramas del fuego de gran escala, pero pueden necesitar ser refinado para simulaciones más o fuegos más pequeños.

4.2.4.4.- Sensibilidad de las características termofísicas de los combustibles sólidos.

Una cantidad extensa del trabajo de verificación y validación con la versión 4 del FDS fue realizada por Hietaniemi, Hostikka, y Vaari en VTT, Finlandia, obteniendo algunas conclusiones.

- Los índices medidos de varios materiales ardiendo bajaron a dos predicciones del FDS en las cuales los focos fríos o aislados fueron asumidos por las superficies sólidas.
- El FDS carece un modelo sólido de múltiples capas.
- En la ignición de la tapicería es sensible y las características termales de la cubierta de la tela, es sensible a las características de la espuma.
- El contenido de agua en combustibles de madera es muy importante y difícil medir.
- La llama se extendió por objetos complicados, como los cables presentados en bandejas, puede ser modelado si el área superficial del objeto simplificado es comparable a la del objeto verdadero.

Esto sugiere una sensibilidad no solamente a las características físicas, sino también a la geometría. Es difícil cuantificar el grado de la sensibilidad geométrica. Hay poca cuantificación de las sensibilidades observadas en el estudio. Las curvas del crecimiento del fuego pueden pasar de ser lineales a exponencial en forma, y los cambios pequeños en las características del combustible pueden conducir a cambios de magnitud del calor para fuegos no confinados. El tema será revisado en el capítulo 6 donde se observa en muchos de los estudios que el crecimiento del fuego que predice es difícil.

En resumen la exactitud en base a la simulación del remolino aumenta mientras que se refina el acoplamiento numérico, es decir cuanto la malla es mas pequeña.

Para los casos con fuego, los estudios de la sensibilidad de la rejilla han demostrado que la exactitud del modelo es una función del diámetro característico D del fuego, dividido por el tamaño de célula de la rejilla.

Para los casos donde no existe el fuego, no hay medidas simples de evaluar la "buena resolución." En general, en simulaciones con resolución limitada las predicciones del FDS son más.

En algunos de los estudios de la sensibilidad, los autores concluyen que el modelo trabaja lo mejor posible con un tamaño de célula de un valor dado, y esta célula no es a menudo la más pequeña probada. En estos casos, los autores han encontrado un panorama del flujo donde al mezclarse convectivo sin resolver es compensado casi exactamente por la difusión numérica.

La desventaja de cualquier modelo de turbulencia, en simulaciones grandes, es que los buenos resultados no están garantizados en rejillas de resolución limitada.

La ventaja de LES sobre otros modelos de la turbulencia es que la solución temporal o espacial del promedio real de las ecuaciones que gobierna, no, está obtenida mientras que se refina el acoplamiento. Sin embargo, la resolución de la rejilla es más crítica para los fenómenos de campo cercano porque la difusión numérica cerca del fuego en rejillas gruesas no tiene el mismo efecto fortuito que hace en resultados de campos lejos.

En la resolución general, disminuirá temperaturas y velocidades manchando los valores sobre las células grandes de la rejilla. Esto puede afectar el flujo de la radiación, la convección a los sólidos circundantes, y en última instancia a la extensión de la llama y el crecimiento del fuego.

4.2.5.-CONSIDERACIONES DE LA SIMULACIÓN Y PARÁMETROS DE ESTUDIO.

En el **Anexo B** se adjunta el listado de parámetros numéricos que utiliza el FDS para la configuración del modelo, estos datos de entrada configuran la geometría del modelo, la ubicación de los ventiladores, rejillas, condiciones de contorno, variables, etc. y son utilizados por el FDS como entrada de datos. Estos datos se recogen en un fichero de texto y se genera en el programa Pyrosim (software que facilita la entrada de datos).

Este tipo de cálculos por elementos finitos tiene un problema informático asociado, el tiempo que se necesita para calcular. En nuestro caso se ha resuelto utilizando 6 ordenadores en paralelo y dividiendo las mallas, para que cada ordenador haga una parte del cálculo, cuando termina de calcular se procede a la integración de resultados entre los distintos ordenadores, aún así el tiempo medio de calculo por cada uno de los escenarios analizados ha sido de 50 horas.

4.2.5.1.- Configuración del modelo y datos de partida.

A continuación se describen los las consideraciones mas importantes que se han tenido en cuenta a la hora de configurar el modelo.

1°.- Todos los escenarios han sido analizados para el mismo periodo de tiempo 900 segundos. Se ha considerado que con 15 minutos se obtiene la información suficiente para extraer las conclusiones, elevar el tiempo implicaba retrasar más el tiempo del proceso de cálculo por modelo (50 horas).

2°.- La ignición es inmediata, es decir cuando comienza el modelo comienza la ignición del fuego en su potencia máxima. Se ha considerado como caso más desfavorable.

3°.- En el momento del comienzo del incendio la extracción del túnel está parada. Caso más desfavorable.

4°.- Los equipos de extracción e impulsión de aire del túnel, al igual que la cortina, se conectan a los 3 minutos y consiguen su máximo rendimiento al minuto, por lo que se considera que el sistema está a su máximo rendimiento a los 4 minutos.

5°.- Se han considerado 3 mallas que coinciden con los cantones 2D, 3D y 4D.

- La malla principal en el cantón 3D que integra las cortinas y el fuego, comienza en el PK 200 hasta el PK 800, se divide 1000 veces y el cubo de la rejilla es $x=0.6m$ $y=0.55m$ $z=0.46m$.
- La primera malla es para el cantón 2D y comienza en el PK-250 y termina en el 200 y el cubo de la rejilla es $x=0.6m$ $y=0.55m$ $z=0.56m$.
- La malla del final es para el cantón 4D y comienza en el PK 800 y termina en el PK 1.200 y el cubo de la rejilla es $x=0.6m$ $y=0.55m$ $z=0.56m$.

En las pruebas iniciales se intentó reducir el tamaño de cubo de la rejilla, para obtener unos resultados más exactos, pero el tiempo de cálculo se elevaba mucho y se decidió por tres mallas y con el tamaño anteriormente descrito para que coincidiera con la geometría del modelo.

6°.- Al modelo se le ha pedido que calcule las siguientes variables:

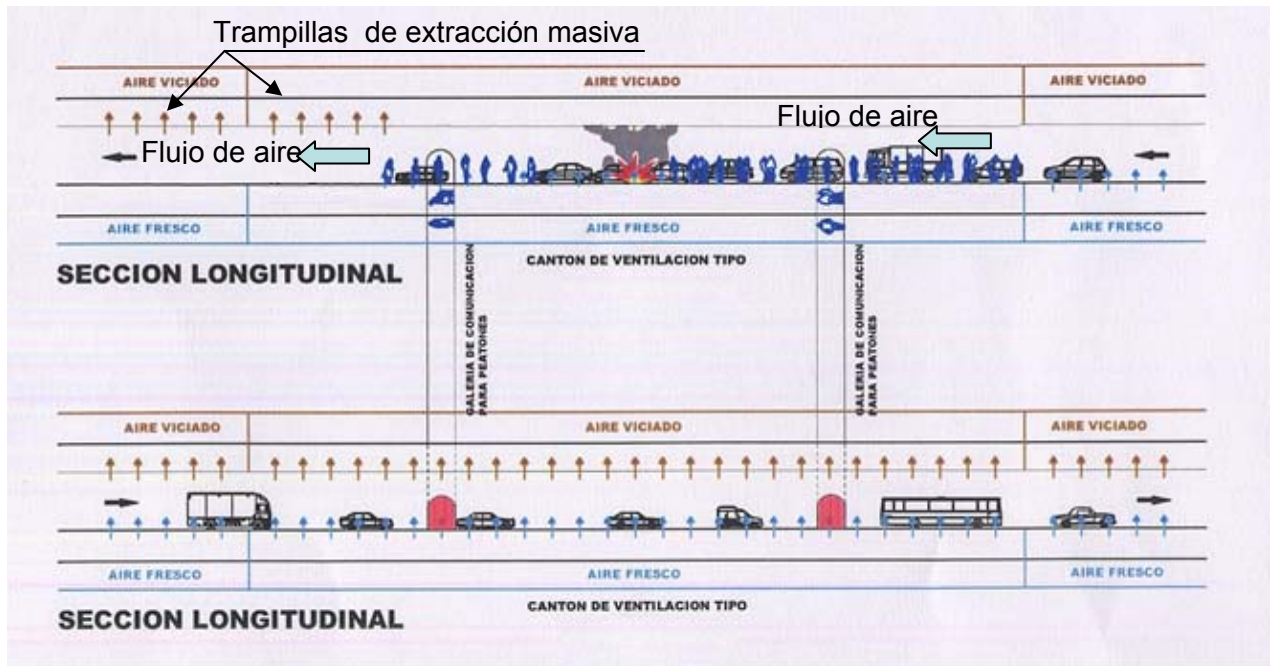
- *Evolución de la concentración de CO*
- *Densidad del humo*
- *Visibilidad*
- *Velocidades*
- *Temperaturas*
- *Evolución de las partículas de humo*

4.2.5.2.- Características de la localización del modelo y de los distintos escenarios.

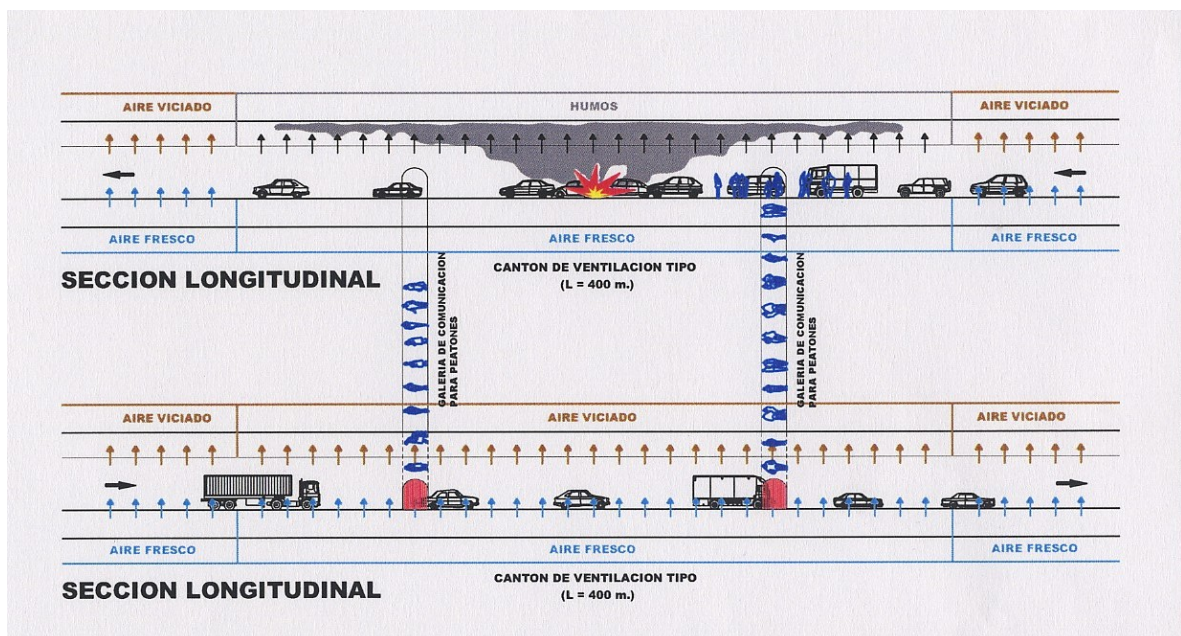
Tal y como se ha descrito en el capítulo anterior nuestro análisis se centrará en la calzada derecha del túnel, entre el PK +400 y el PK +2.100. Unos escenarios utilizan toda la longitud en cambio en otros se ha reducido la longitud para reducir el tiempo de cálculo.

Actualmente están previstos dos tipos de operación del sistema de ventilación en función del estado del tráfico:

- *Escenario de ventilación modo pozo (tráfico fluido).* El sistema genera una corriente longitudinal del aire en el sentido de circulación, que evite el retroceso de la capa de humos (back layering) hacia los vehículos situados aguas arriba del foco.



- *Escenario de ventilación modo transversal (tráfico congestionado).* Se utiliza cuando el túnel está colapsado y el sistema de ventilación tiene ser capaz de extraer un caudal capaz de absorber los humos generados más una velocidad adicional de 1,5 m/s en el túnel, lo que lleva a un caudal total en los 600 m de cantón de 170 m³/s.



La carga de fuego se caracteriza fundamentalmente por la potencia calorífica liberada (dada habitualmente en MW). En la tabla se muestran los resultados de los ensayos realizados en Europa denominados Proyecto EUREKA 499, con gran repercusión internacional.

En el túnel de Malo, han sido calculados para una carga de fuego de 30 MW, por lo que quedará prohibido el paso de camiones cisternas y por supuesto el Material Peligroso. Nuestro escenarios recogen las dos posibilidades 30 y 100 MW.

4.2.6.-TRATAMIENTO DE LAS VARIABLES Y RESULTADOS DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS.

4.2.6.1.- Consideraciones de los distintos escenarios y variables analizadas.

Se han analizado 8 modelos con distintas configuraciones, modo pozo y modo transversal con 30 y 100MW, estos escenarios se han modelizado para el estado original de proyecto y para la propuesta de soluciones, es decir con cortina.

- 1.-Modo pozo, 30MW. Escenario inicial.
- 2.- Modo pozo 30MW. Escenario con cortina.

- 3.- Modo pozo, 100MW. Escenario inicial.
- 4.- Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina.

- 5.- Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial.
- 6.- Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina.

- 7.- Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial.
- 8.- Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina.

En cada uno de los escenarios se han extraído las siguientes variables.

- 1.- Evolución de la concentración de CO
- 2.- Densidad del humo
- 3.- Visibilidad
- 4.- Velocidades
- 5.- Temperaturas
- 6.- Evolución de las partículas de humo

Por otro lado se ha extraído una comparativa de las distintas variables (con y sin cortina) en función del tiempo y con una localización variable en el túnel, por lo que podremos conocer que ocurre en un punto exacto con una variable determinada en los dos estados.

Con respecto a los valores límites de las variables hay que destacar distintas consideraciones marcadas por expertos, reglamentos y normas sanitarias.

Temperatura: Con respecto a esta variable hay que destacar que según recomendaciones de los expertos sanitarios, para valores superiores a 60 °C la respiración de los gases puede ser peligrosa, por lo que nuestro valor crítico lo fijaremos en 60 °C.

Visibilidad: Las recomendaciones que hace la PIARC de seguridad frente a un incendio en túneles en su artículo 1.5 recomienda un mínimo de 7 m de visibilidad para asegurar la evacuación y socorro de personas, por lo que nuestro valor crítico estará en los 10m.

CO: Con respecto a los niveles de CO la Organización Mundial de la Salud recomienda no superar unos valores máximos de exposición en función de los niveles de concentración y el ejercicio físico que la persona hace en ese momento.

Para valores de 90 ppm recomienda no exponerse más de 15 minutos, así como para 50 ppm no más de 30 minutos.

Por lo que haciendo un balance entre lo recomendado por la OMS y lo establecido en la PIARC, consideraremos un valor de 75 ppm como valor crítico.

Velocidad: Con respecto a las velocidades fijaremos como valor de referencia, no crítico, los 3 m/s que se necesitan para poder contrarrestar el avance de los humos derivados del back-layering provocado por un camión.

4.2.6.2.- Tratamiento de las variables.

Todos los resultados de las distintas variables se han obtenido de un plano longitudinal al túnel en toda su altura (coincidiendo con la altura de malla).

La toma de datos se ha obtenido cada 10 segundos y durante todo el periodo tiempo de análisis (15 minutos), por lo que de cada variable se han obtenido 90 resultados. Se han generado un total de 14.196 ficheros de Excel.

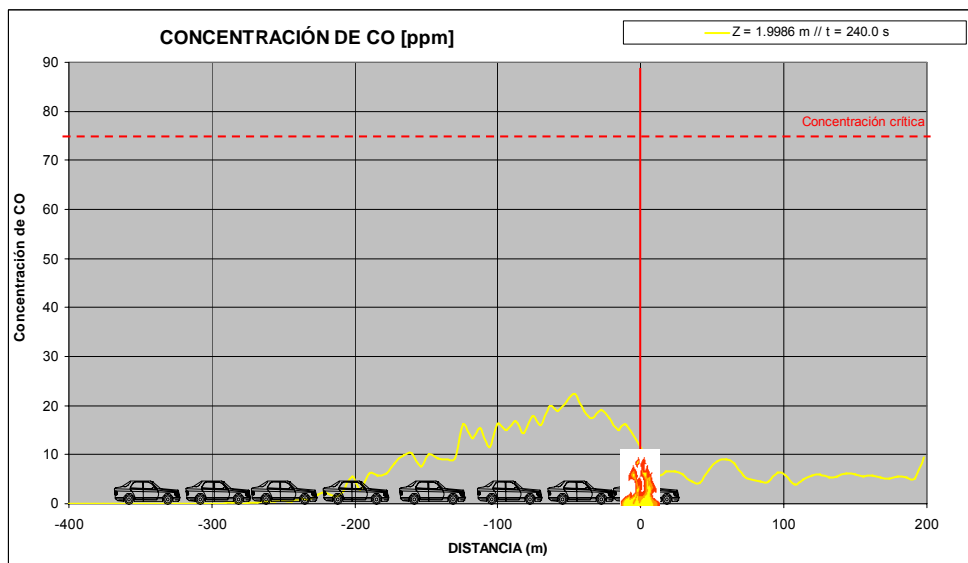
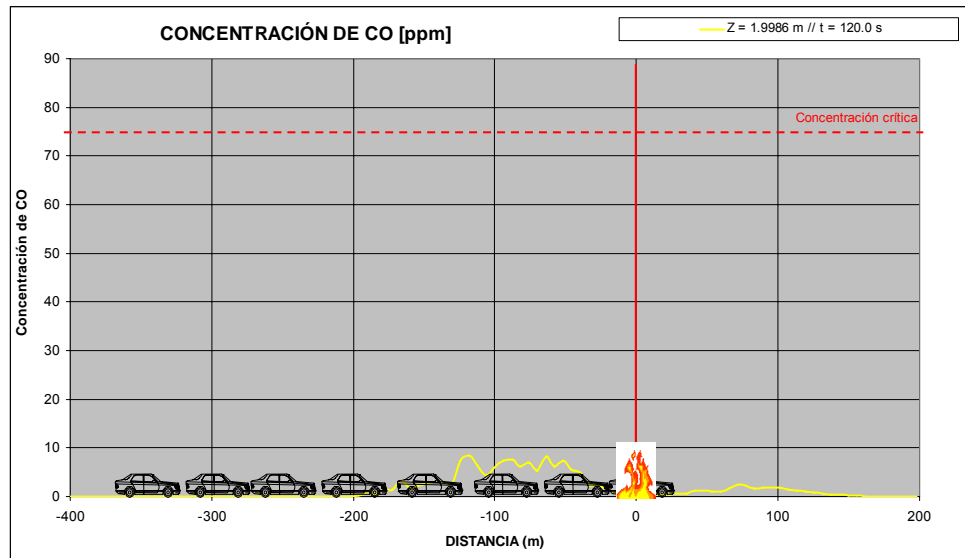
Para poder extraer esta cantidad tan grande de ficheros, se ha tenido que generar unas rutinas específicas en Fortran y para recoger esta información se ha hecho una aplicación den Visual Basic de forma que la recogida de datos se pudiera hacer de forma automática.

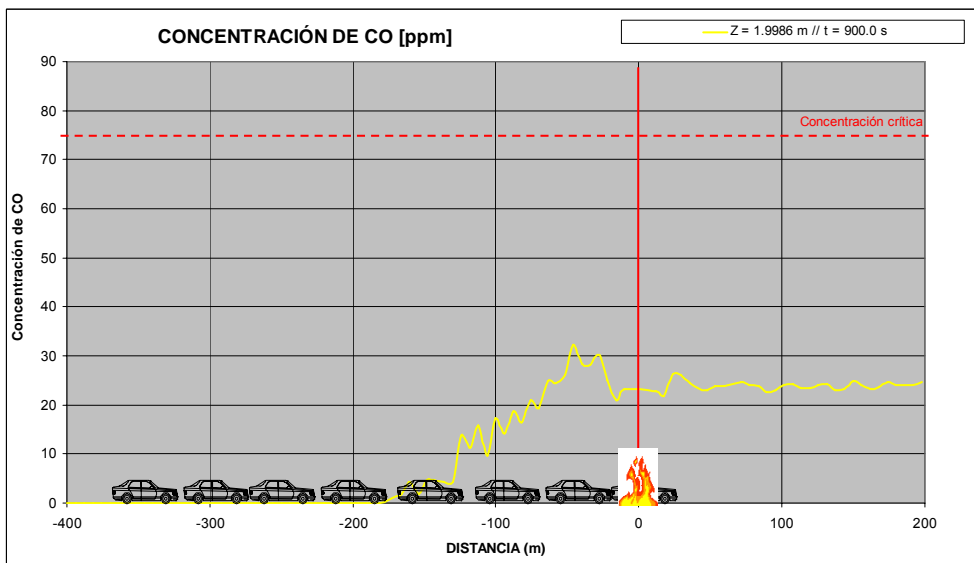
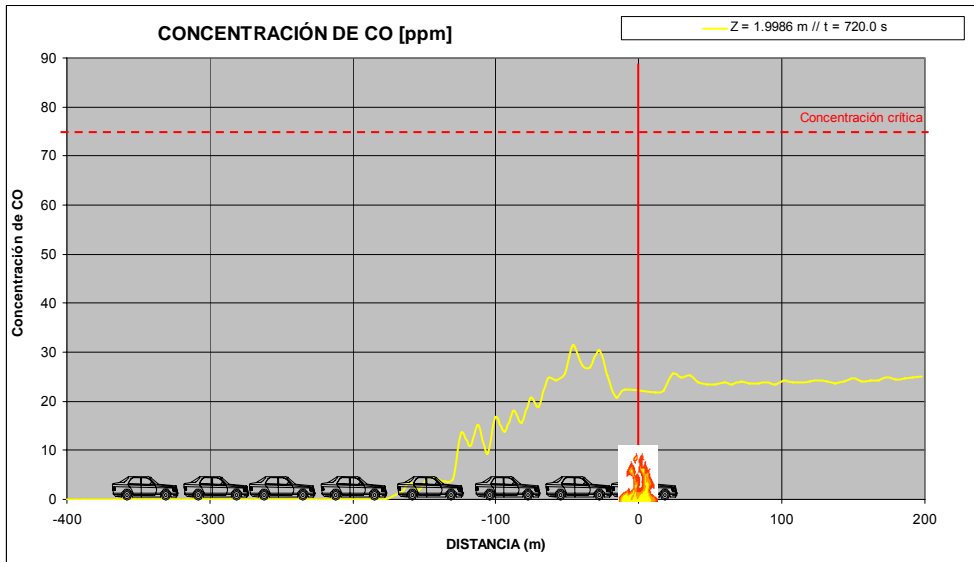
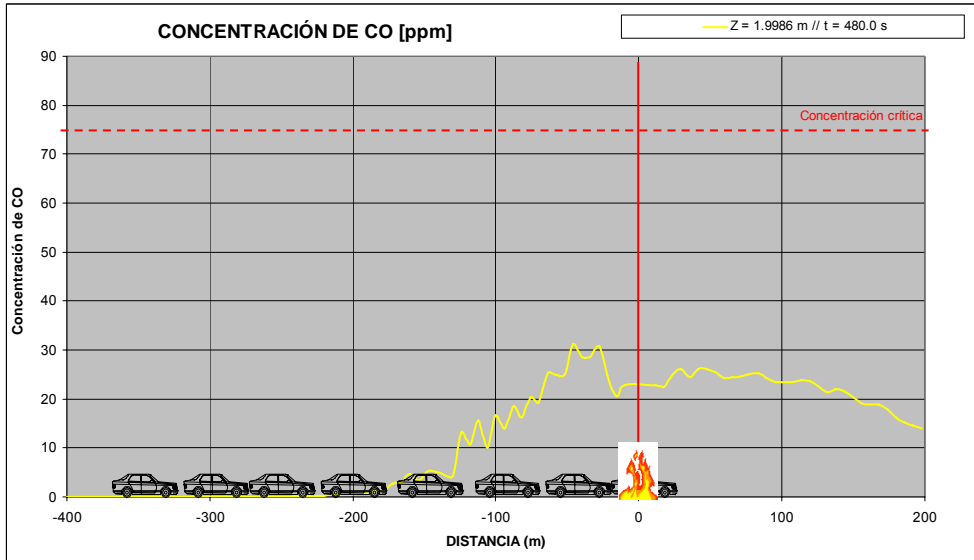
Para poder representar los distintos resultados, se han generado gráficos de cada una de las variables y sus distintas comparativas. Para no saturar la documentación gráfica que se adjunta, solo se representarán las gráficas que aportan información relevante en el tiempo.

4.2.6.3.- Modo pozo, 30MW. Escenario inicial.

4.2.6.3.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo, 30MW. Escenario inicial)

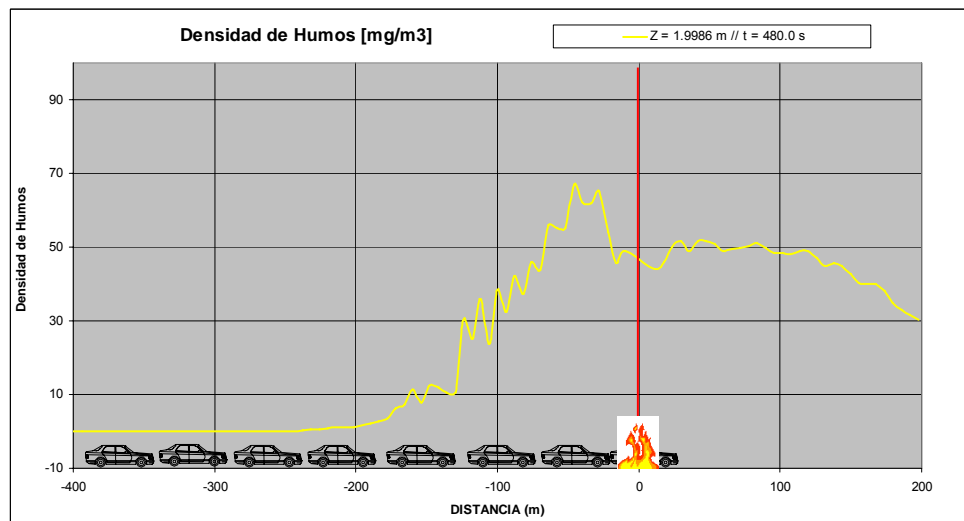
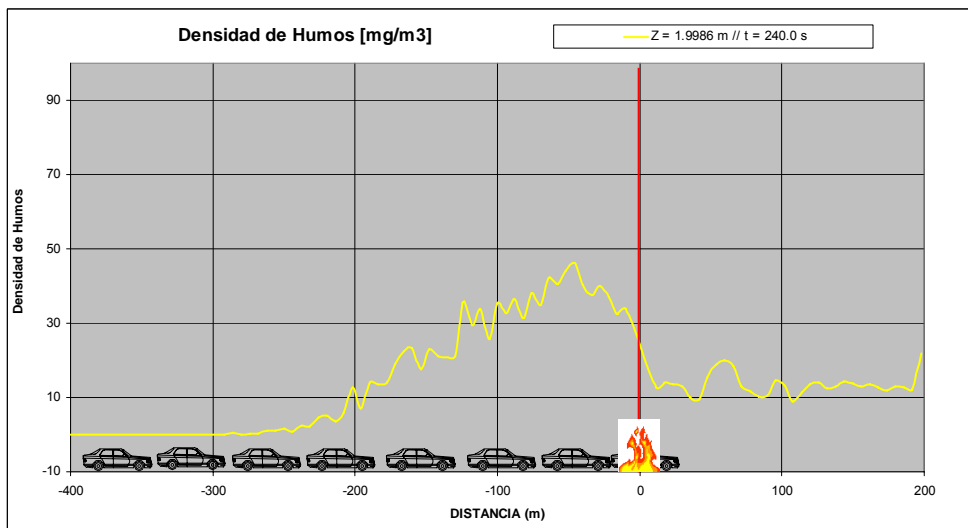
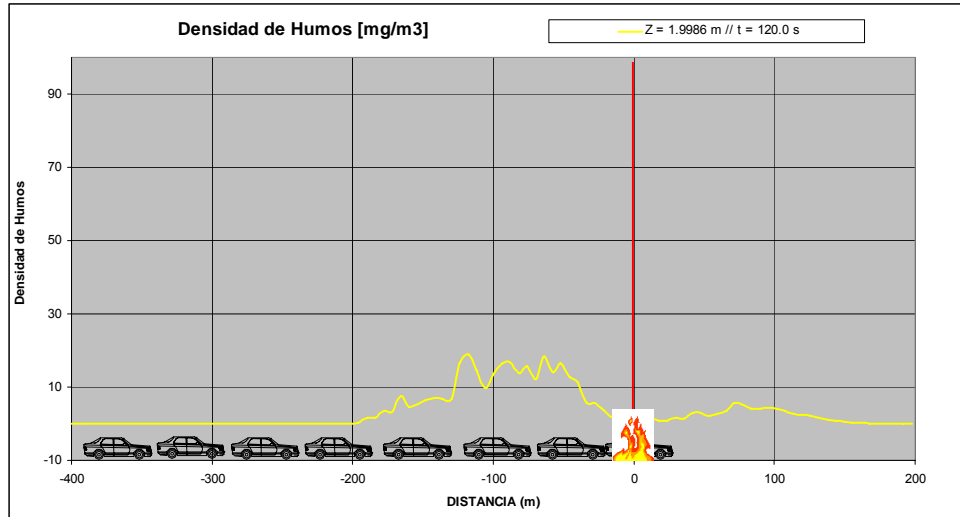
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

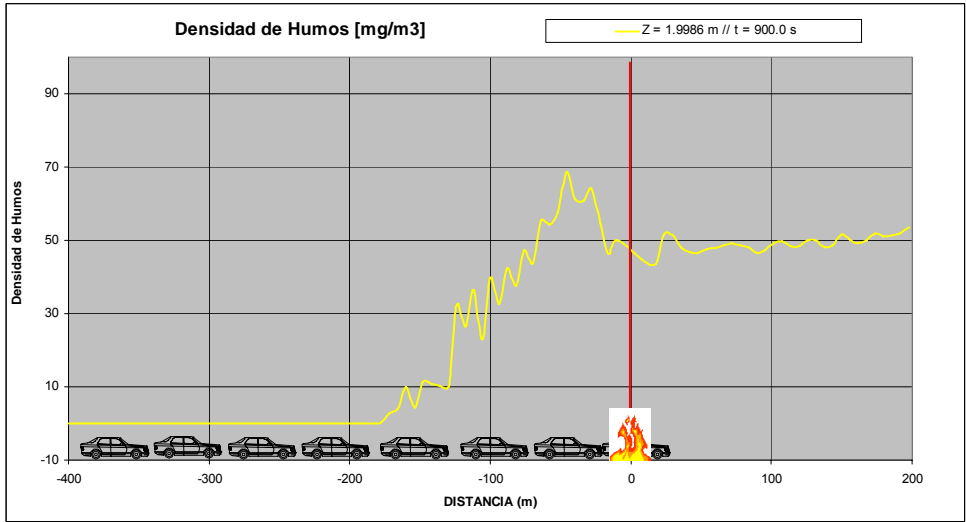
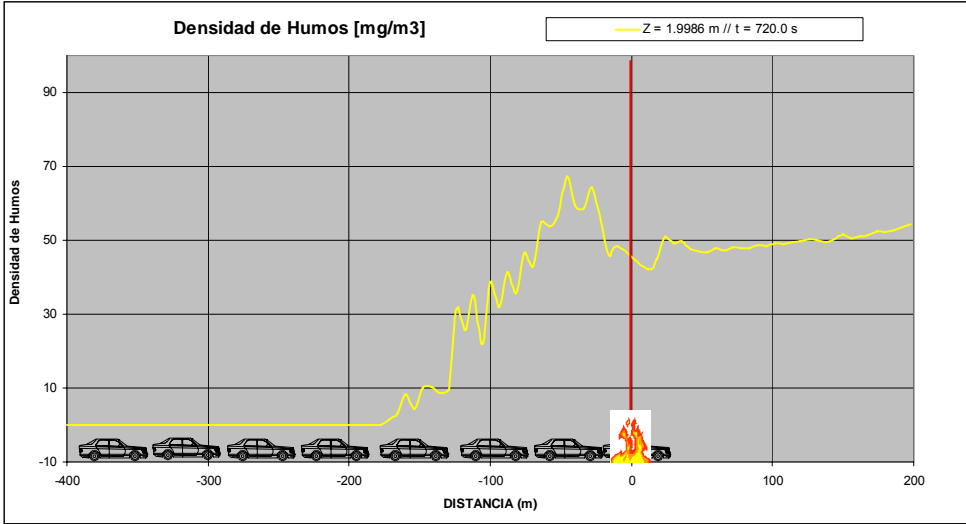




4.2.6.3.2.- Densidad de los humos. (Modo pozo, 30MW. Escenario inicial)

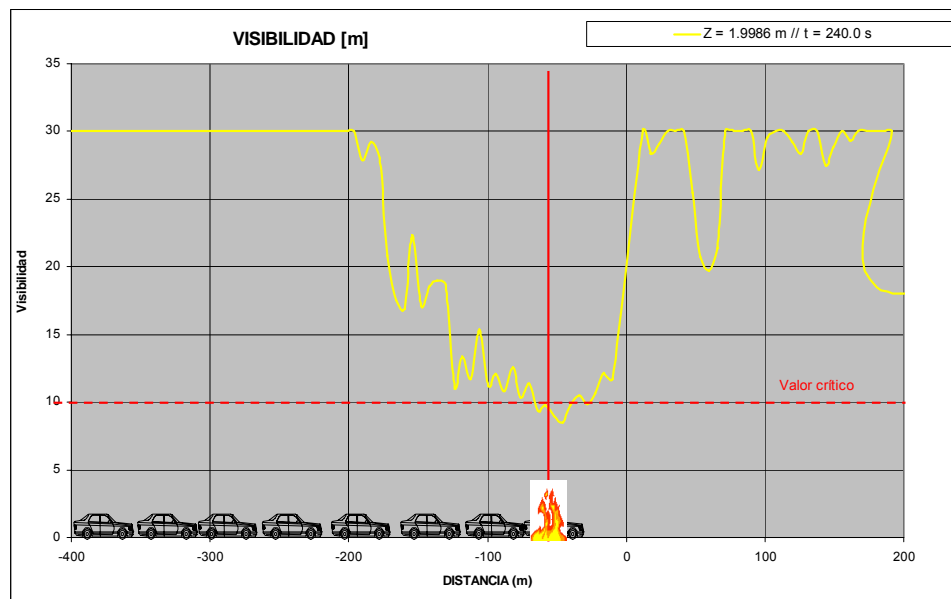
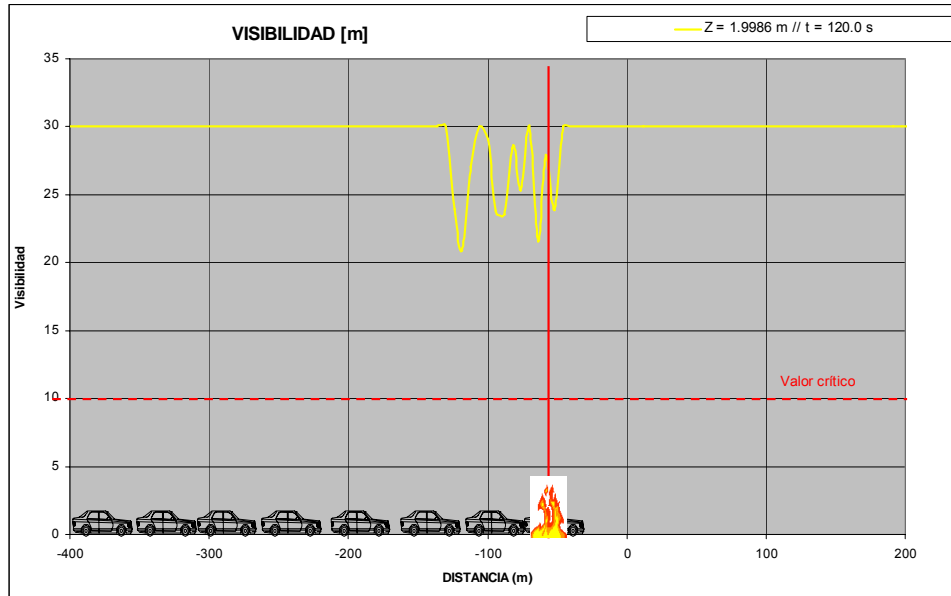
Se analiza las densidades de los humos a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

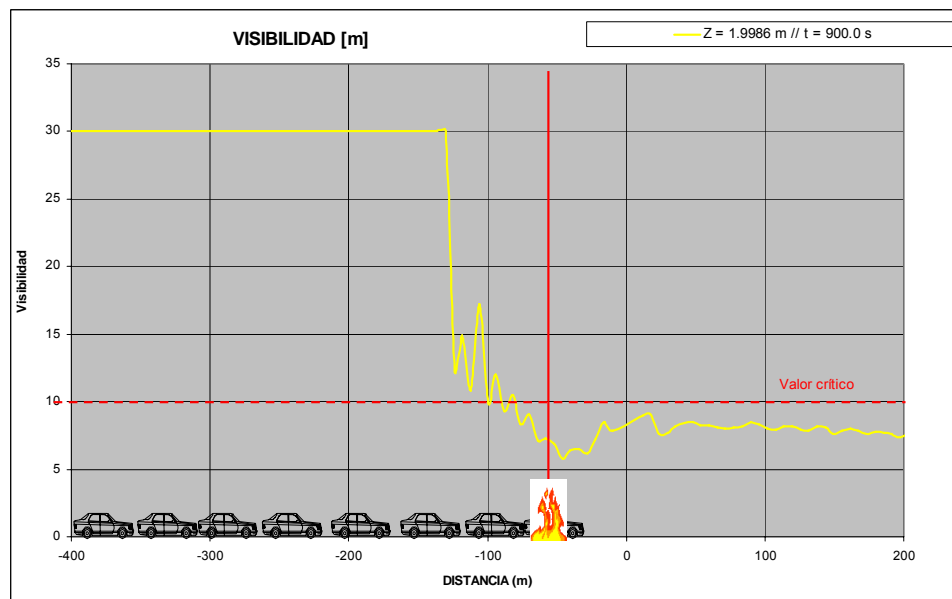
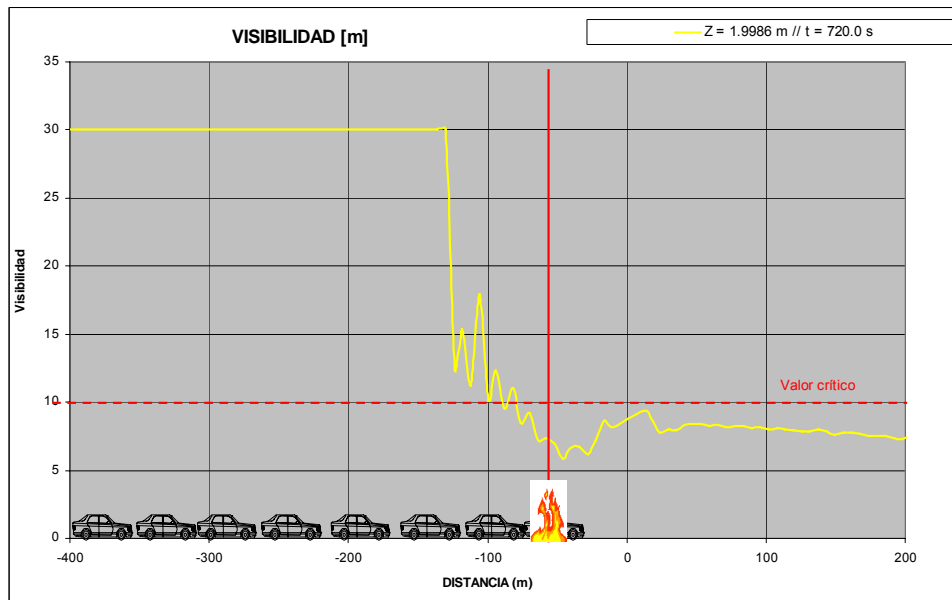
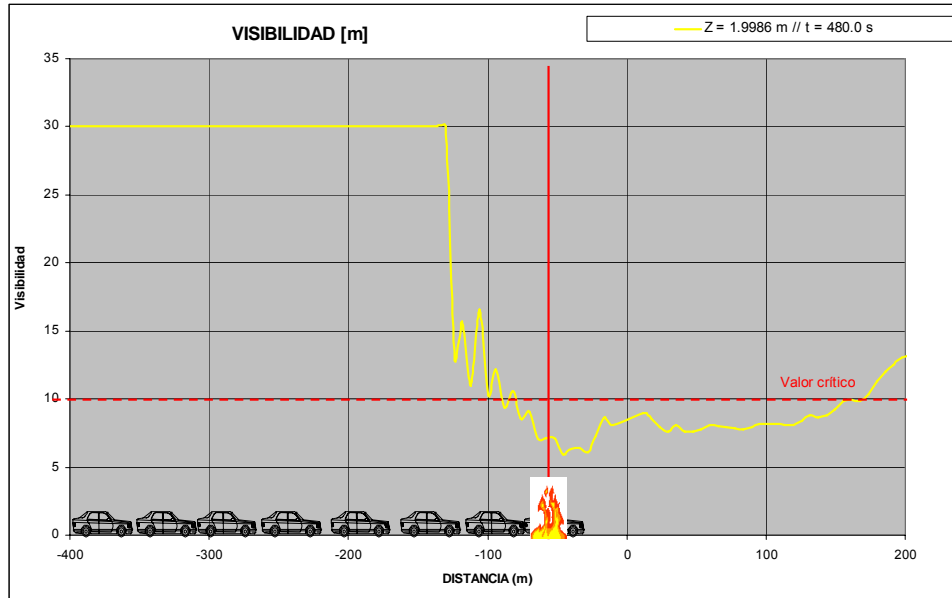




4.2.6.3.3.- *Visibilidad. (Modo pozo, 30MW. Escenario inicial)*

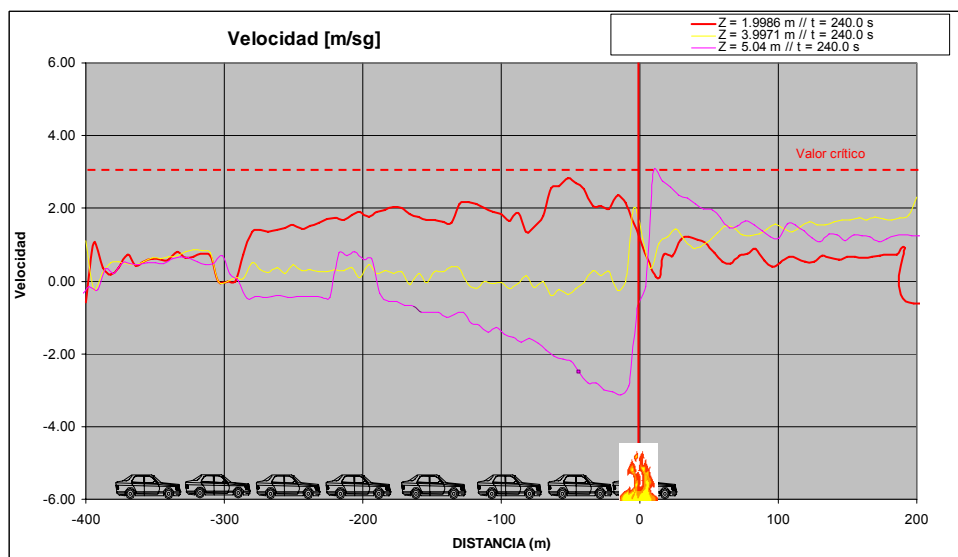
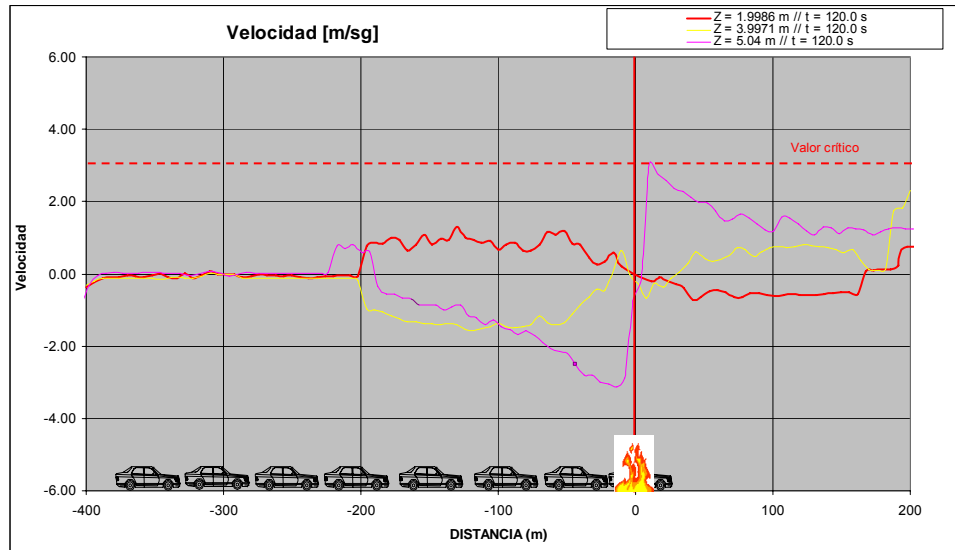
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

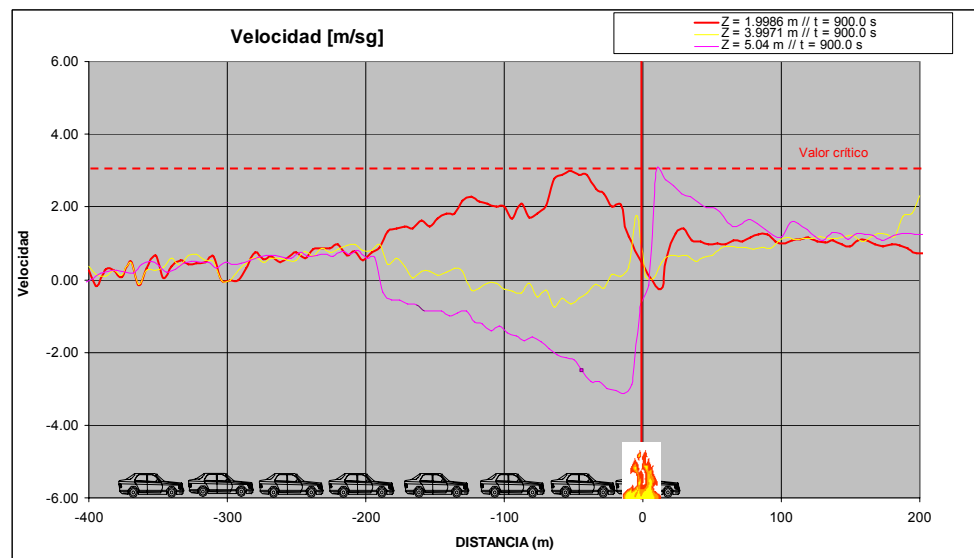
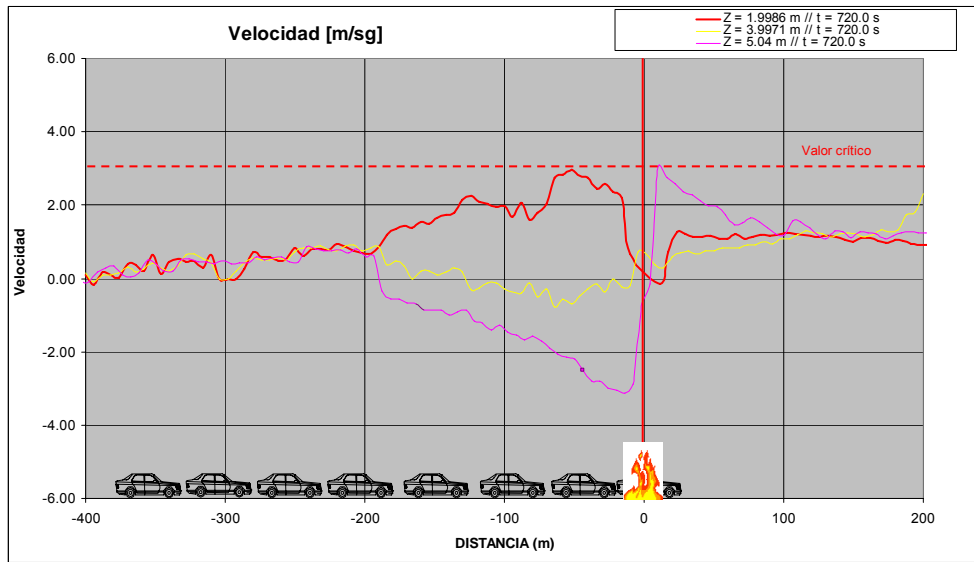
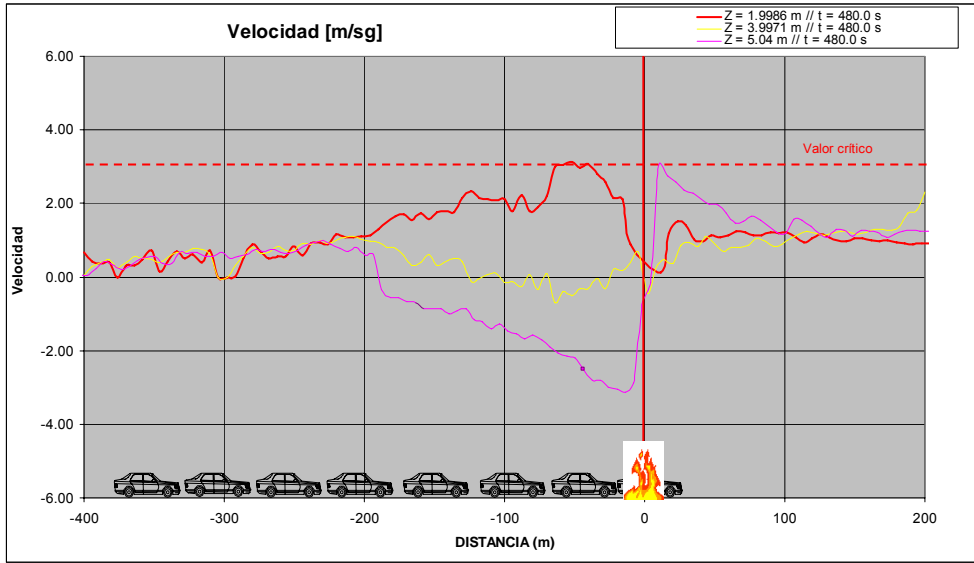




4.2.6.3.4.- Velocidades. (Modo pozo, 30MW. Escenario inicial)

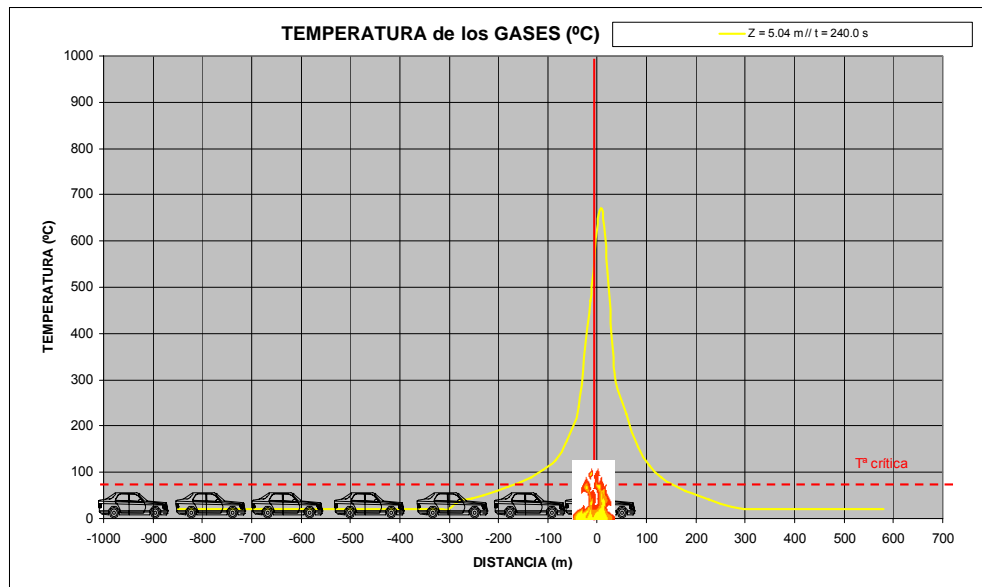
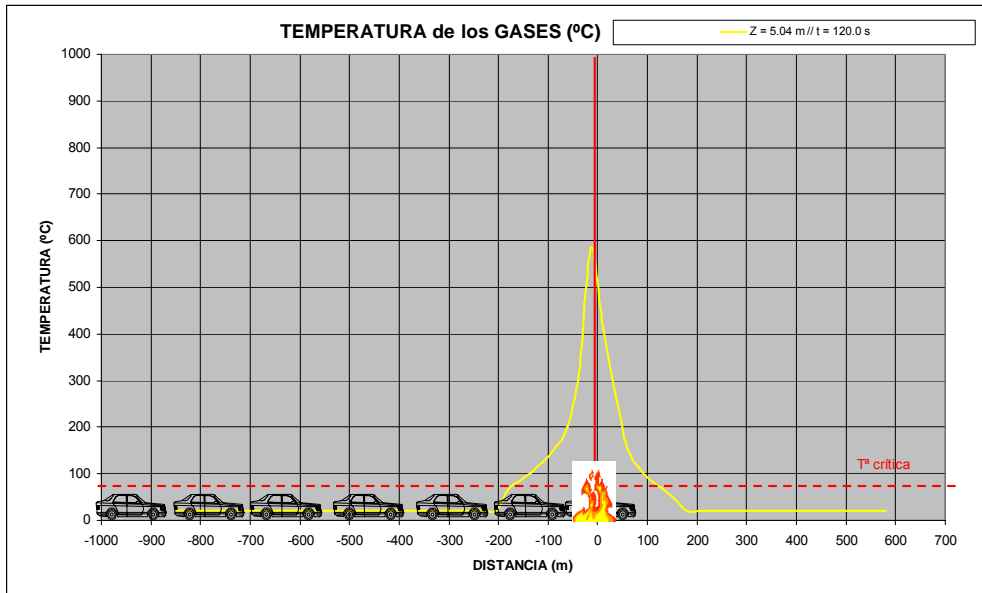
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

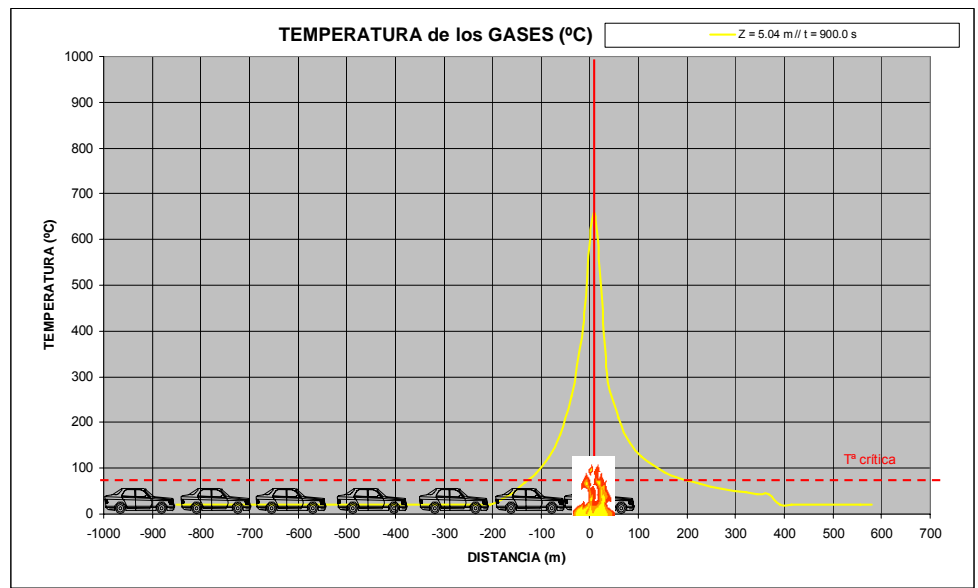
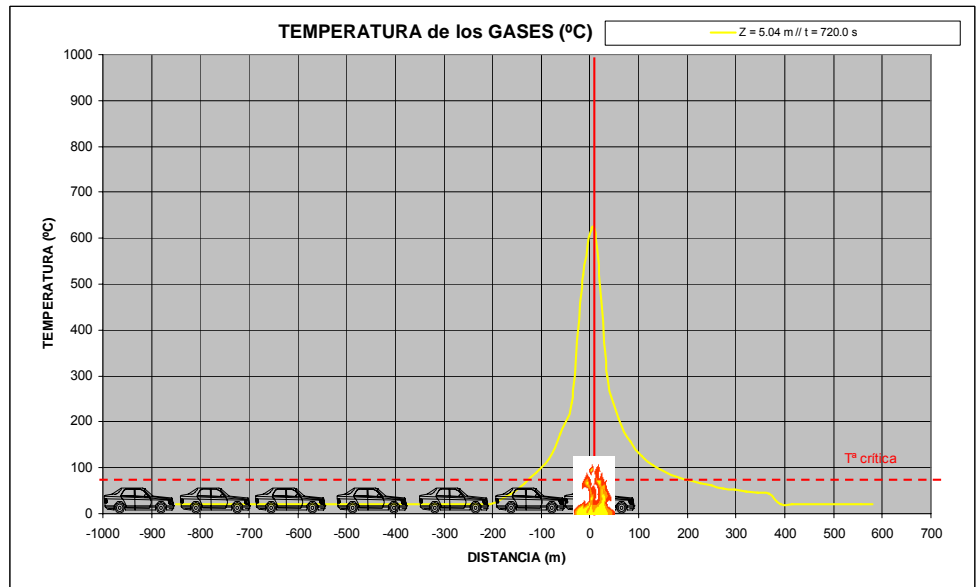
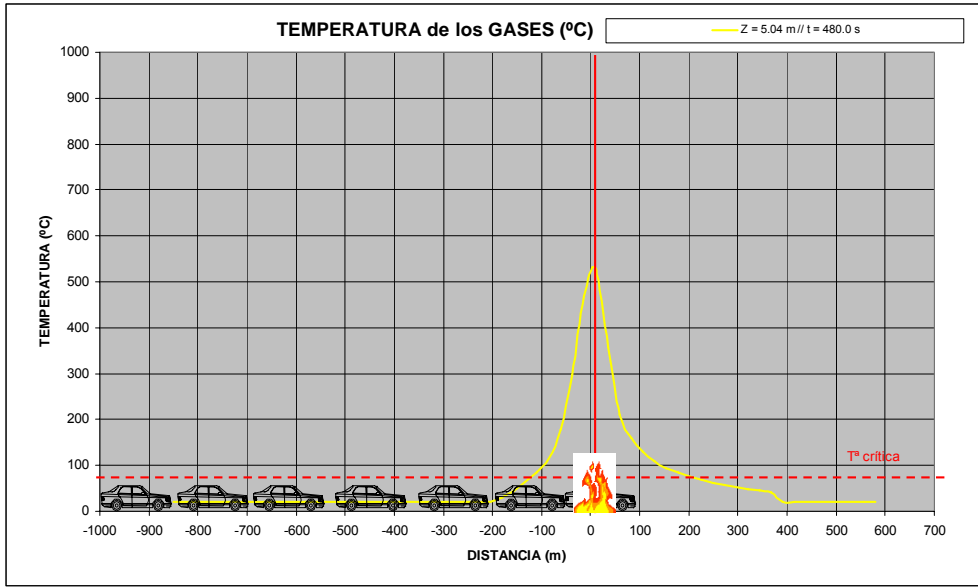




4.2.6.3.5.- Temperaturas. (Modo pozo, 30MW. Escenario inicial)

Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

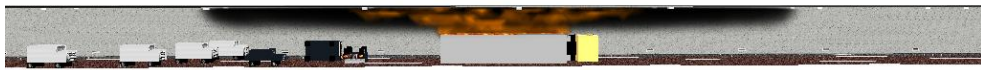




4.2.6.3.6.- Evolución de las partículas de humo. (Modo pozo, 30MW. Escenario inicial)

A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 121, 260, 486, 720 y 900 sg.

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 20
Time: 18.0
Frame rate: 1.1

mesh: 1

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 135
Time: 121.5
Frame rate: 4.2

mesh: 1

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 540
Time: 486.0



Frame rate: 3.7

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 800
Time: 720.0



Frame rate: 3.9

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

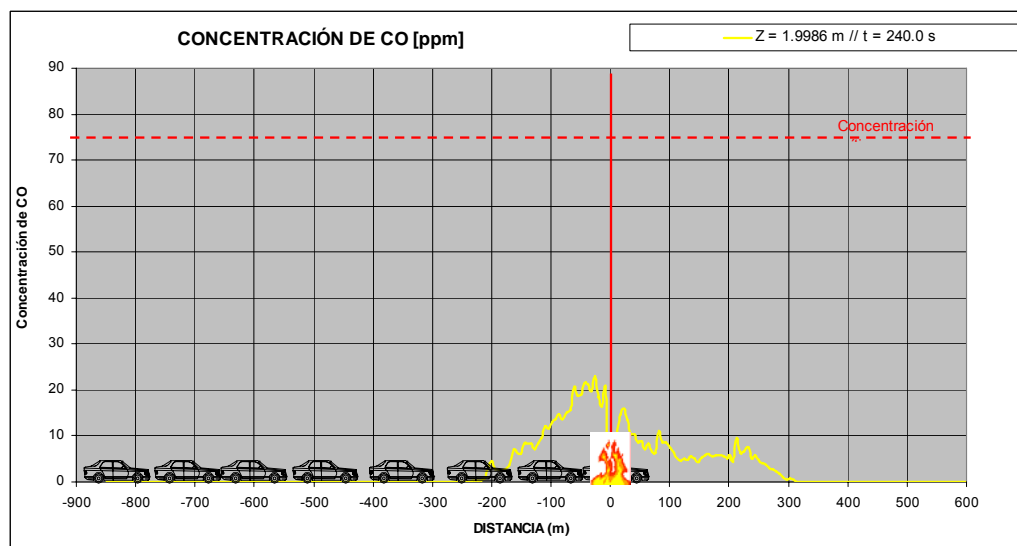
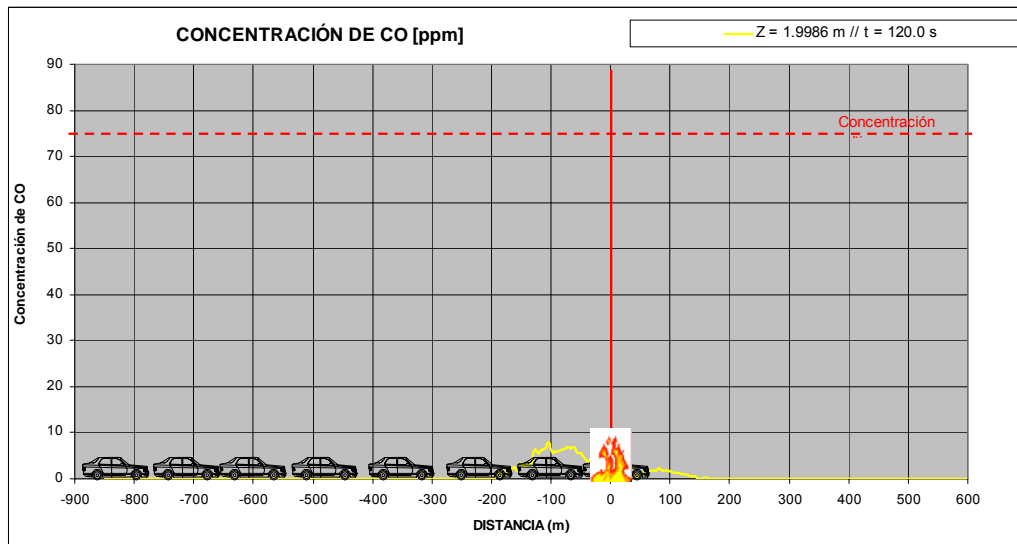
Frame: 1000
Time: 900.0

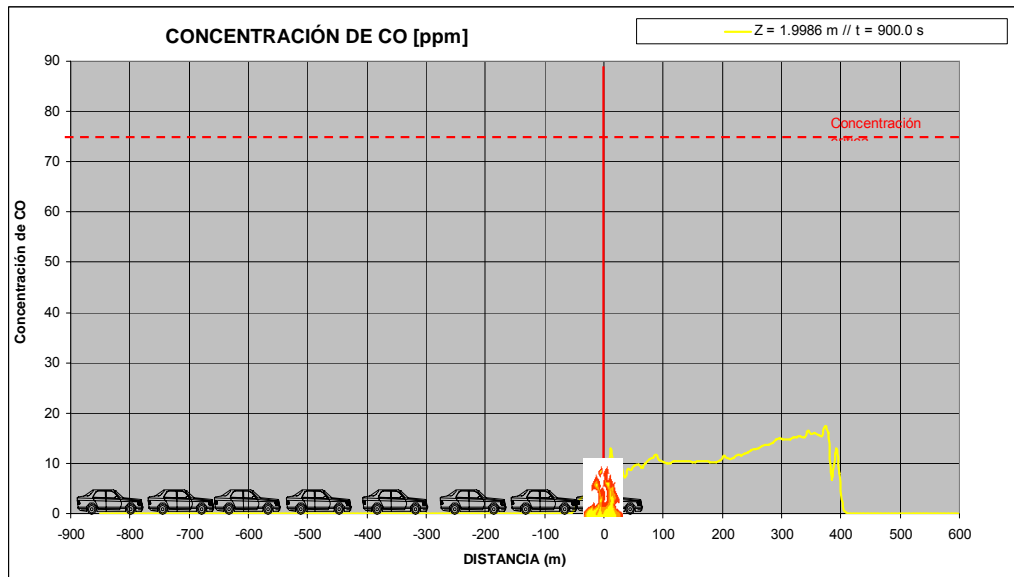
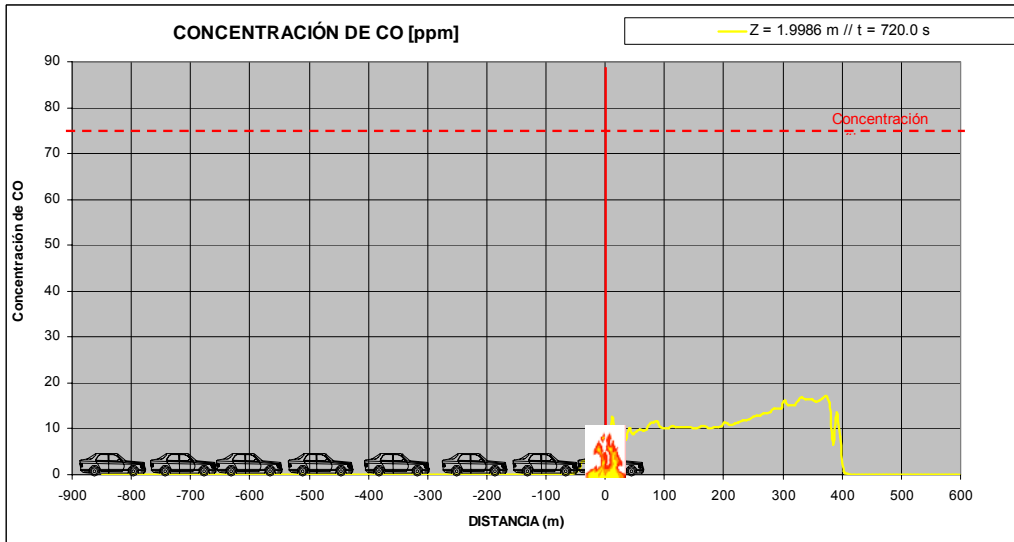
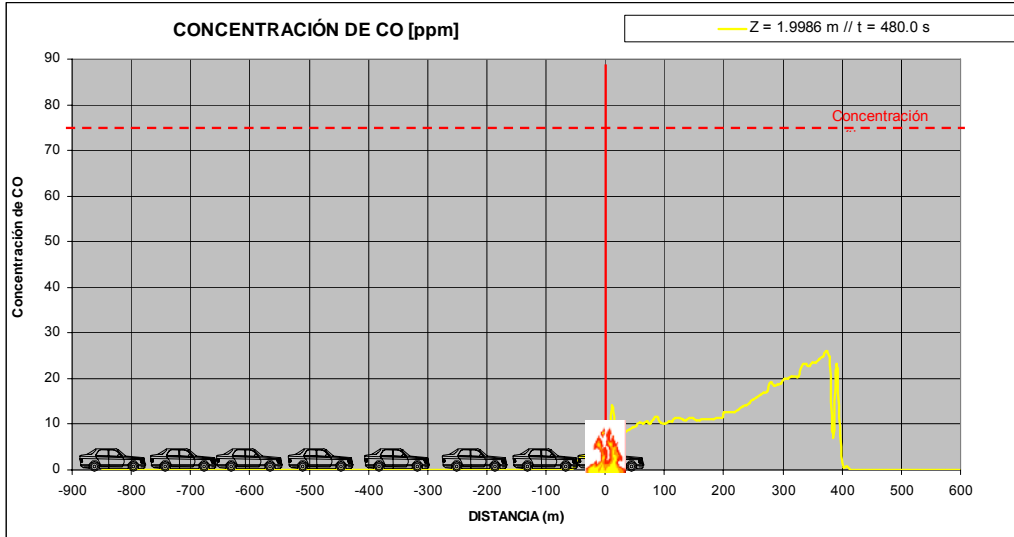
Frame rate: 3.9

4.2.6.4.- Modo pozo 30MW. Escenario con cortina.

4.2.6.4.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo 30MW. Escenario con cortina).

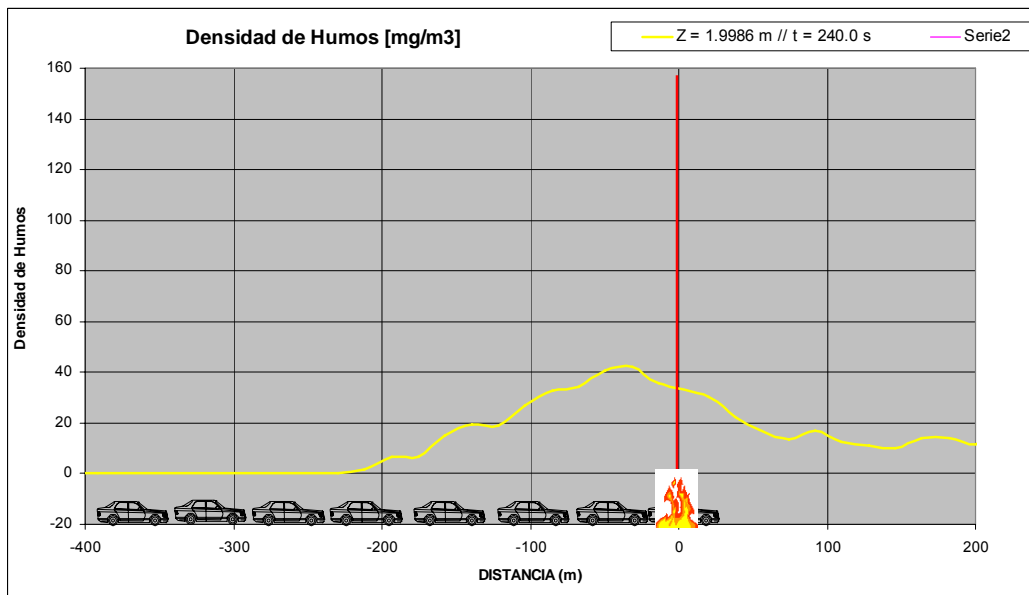
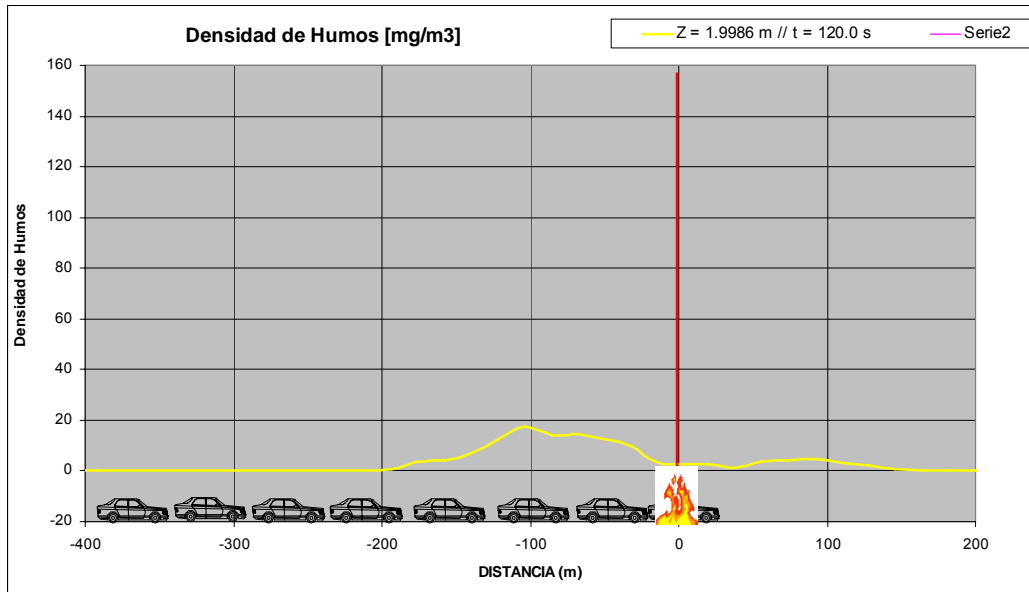
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

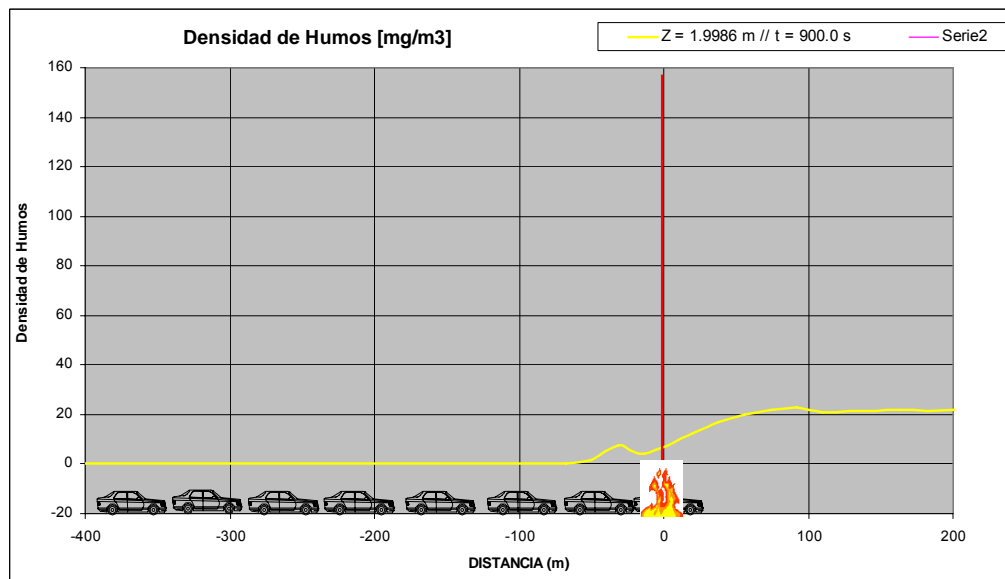
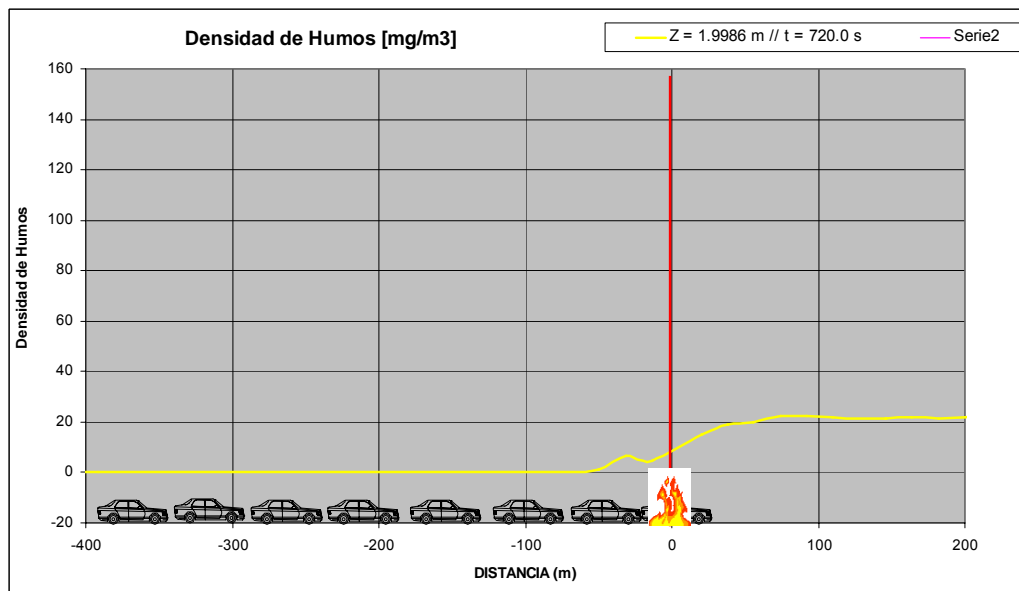
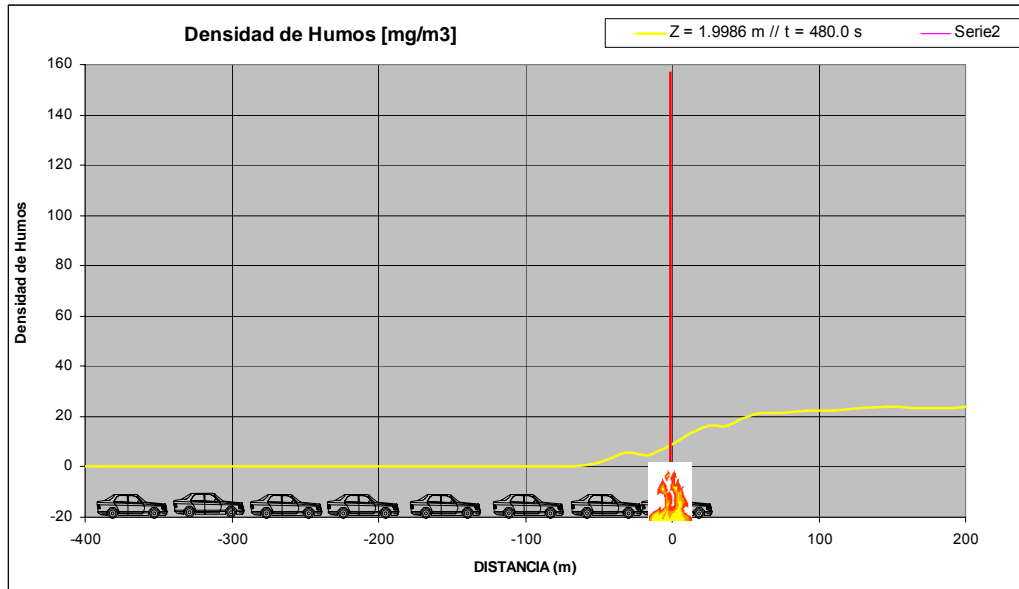




4.2.6.4.2.- Densidad de los humos. (Modo pozo 30MW. Escenario con cortina).

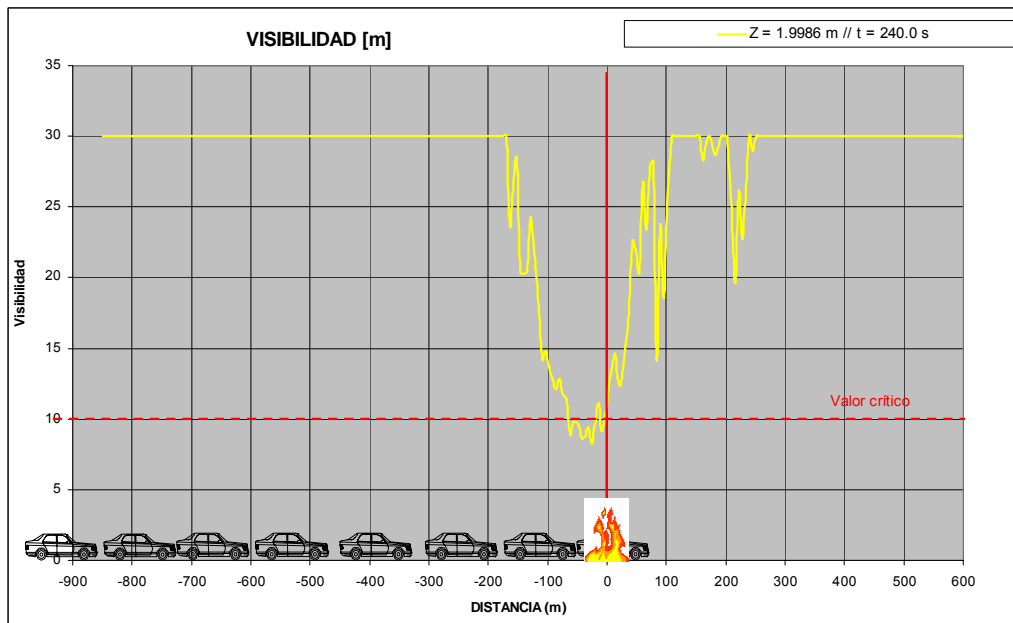
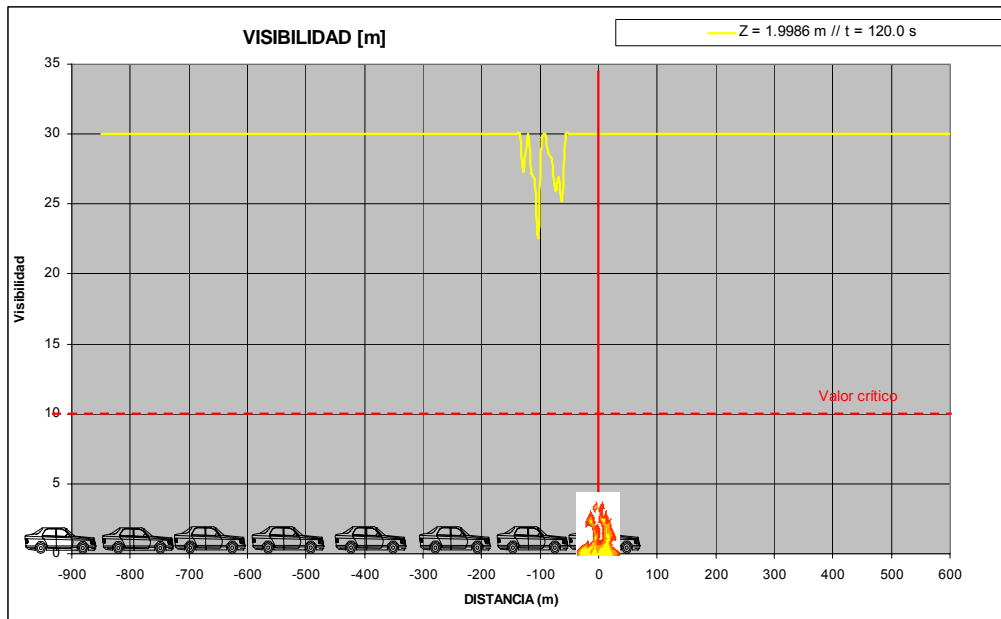
Se analiza las densidades de los humos a 2 m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

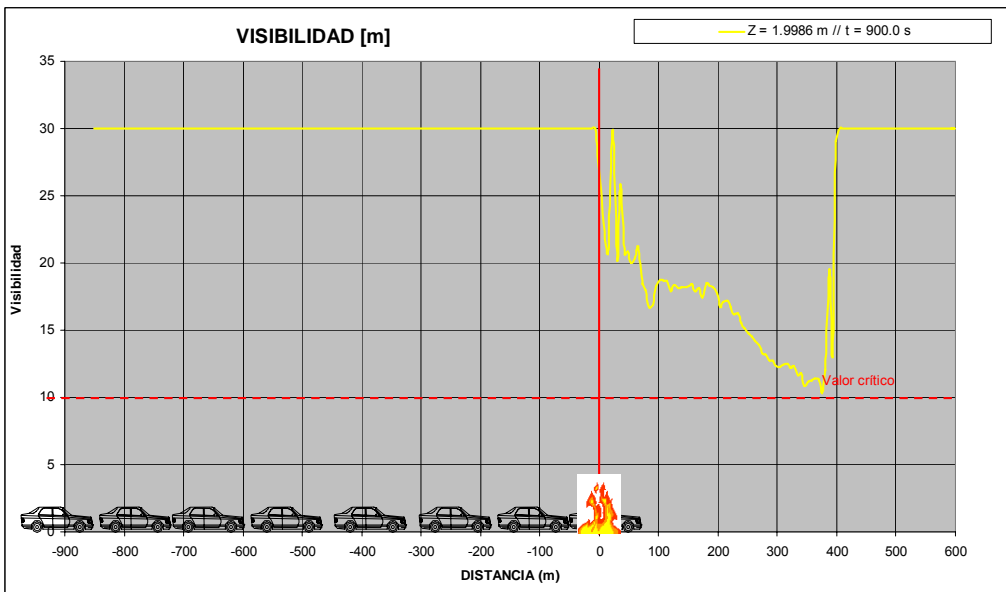
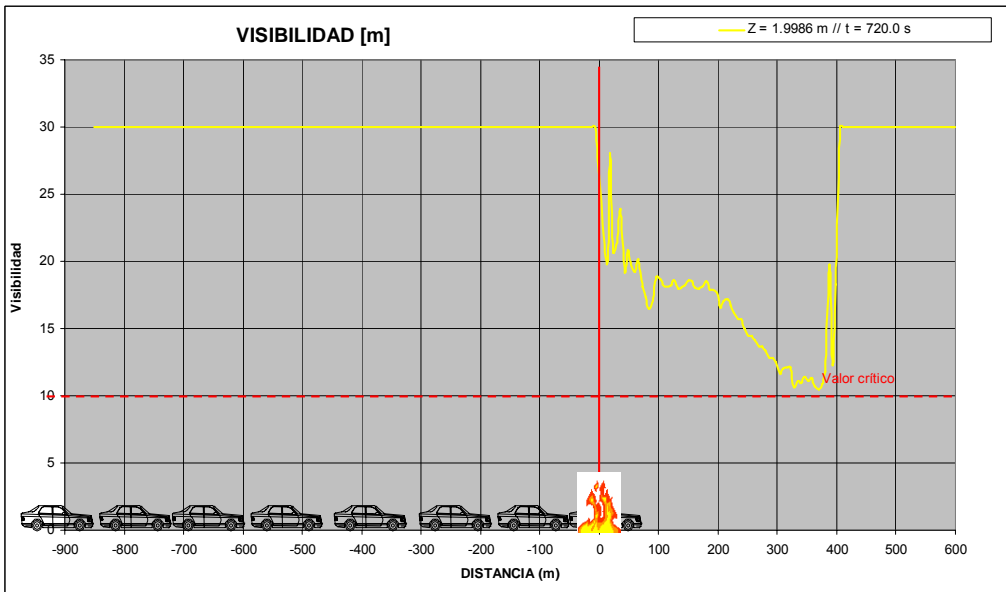
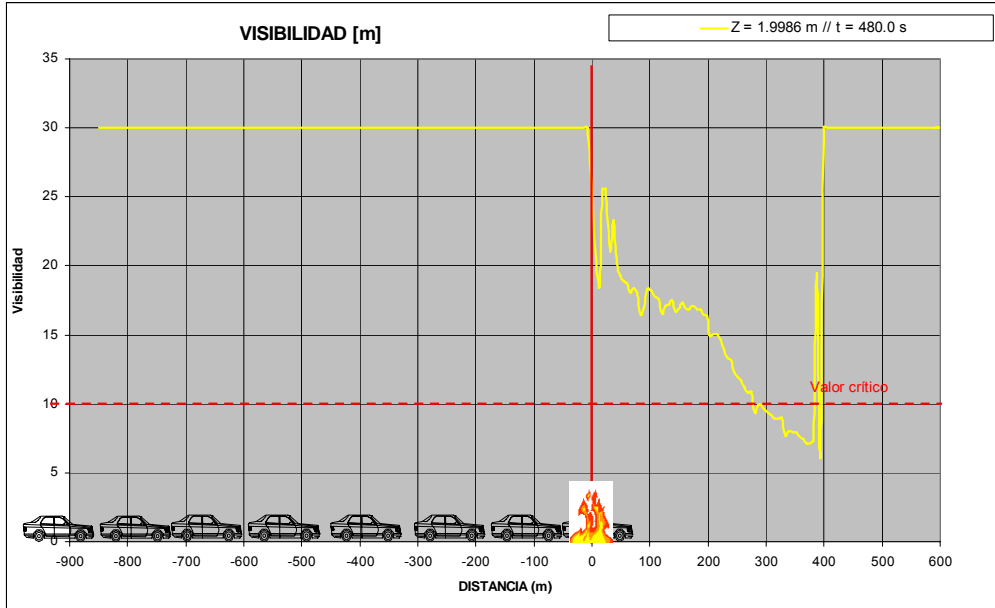




4.2.6.4.3.- *Visibilidad. (Modo pozo 30MW. Escenario con cortina).*

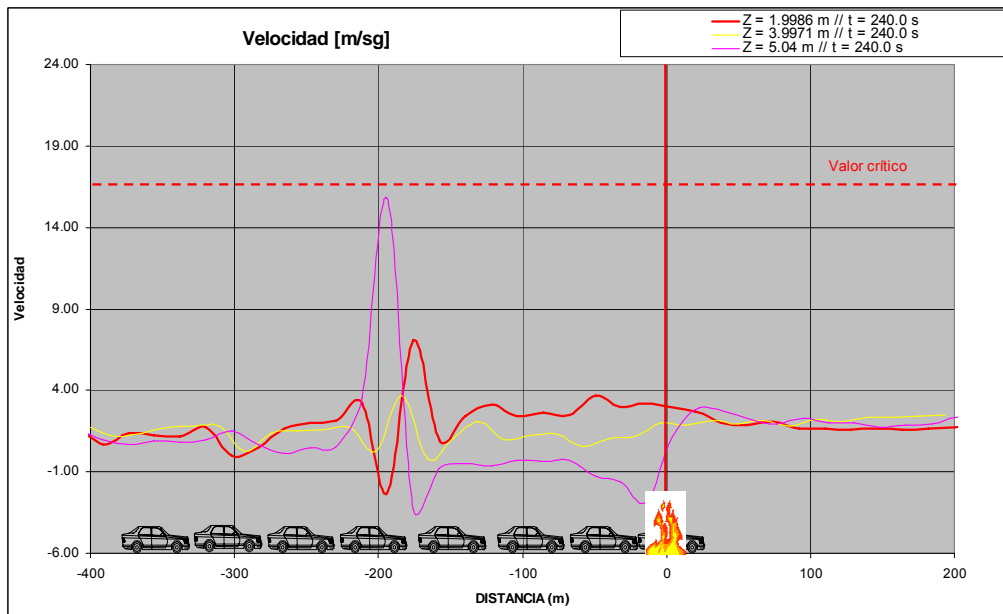
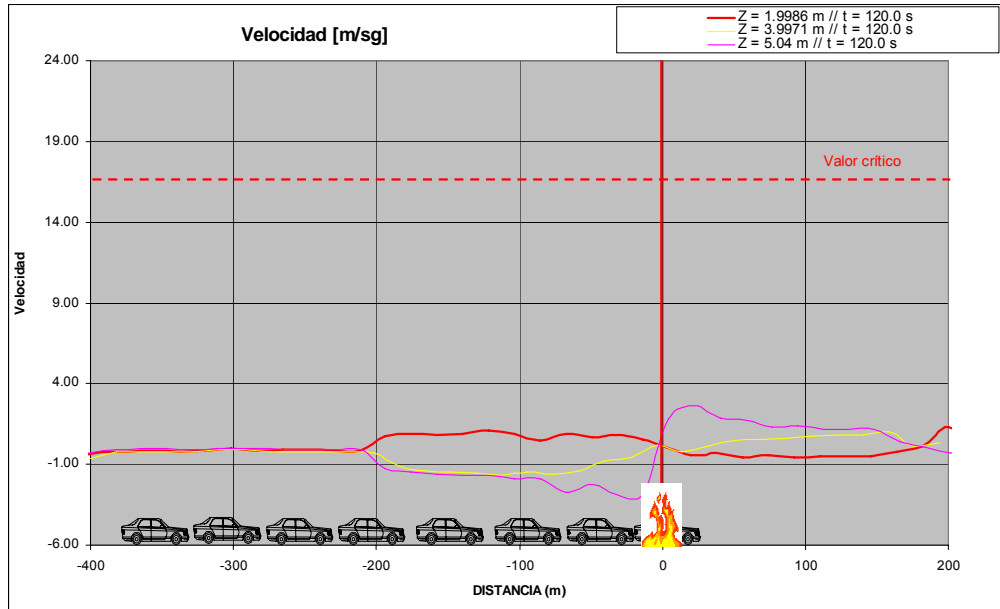
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

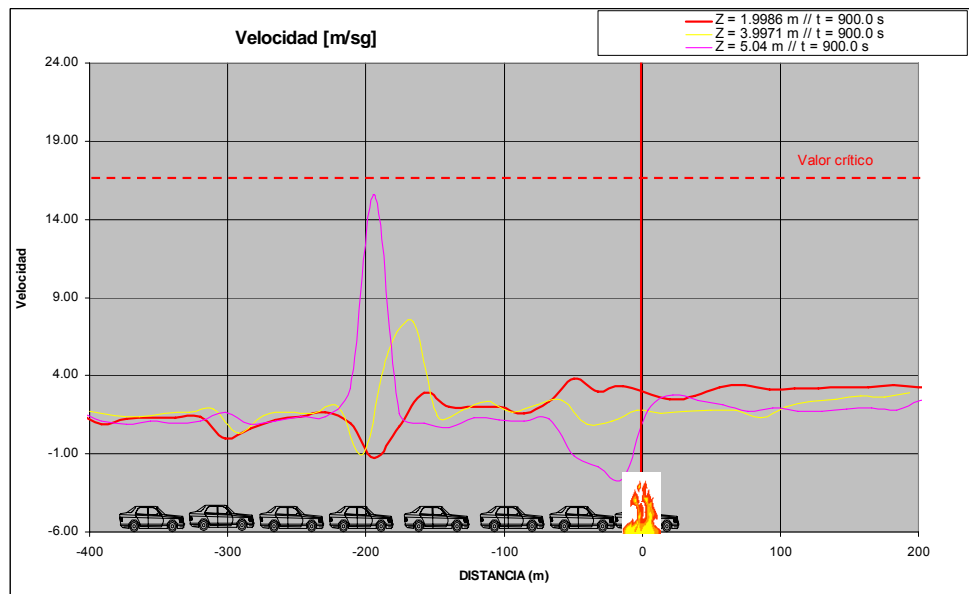
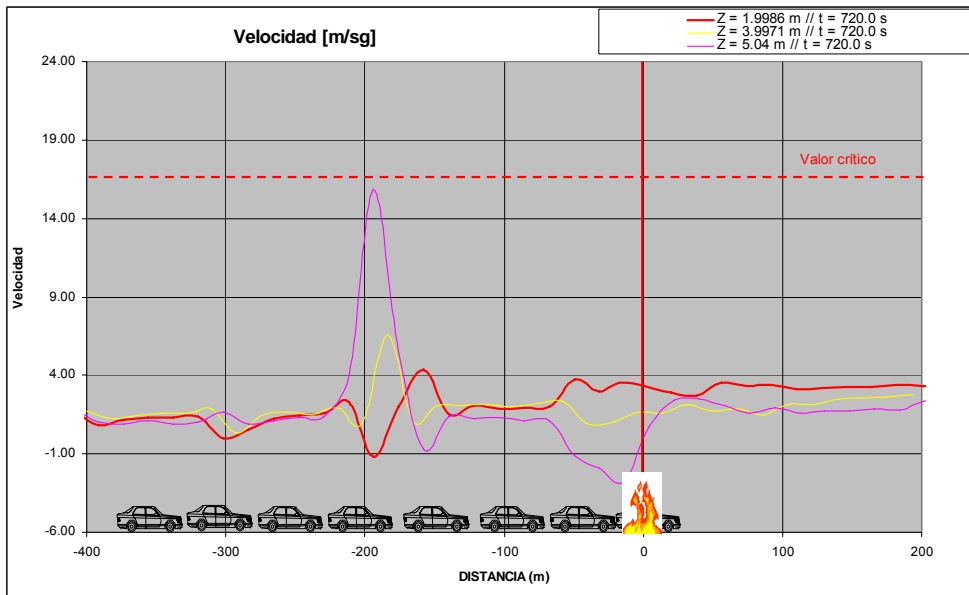
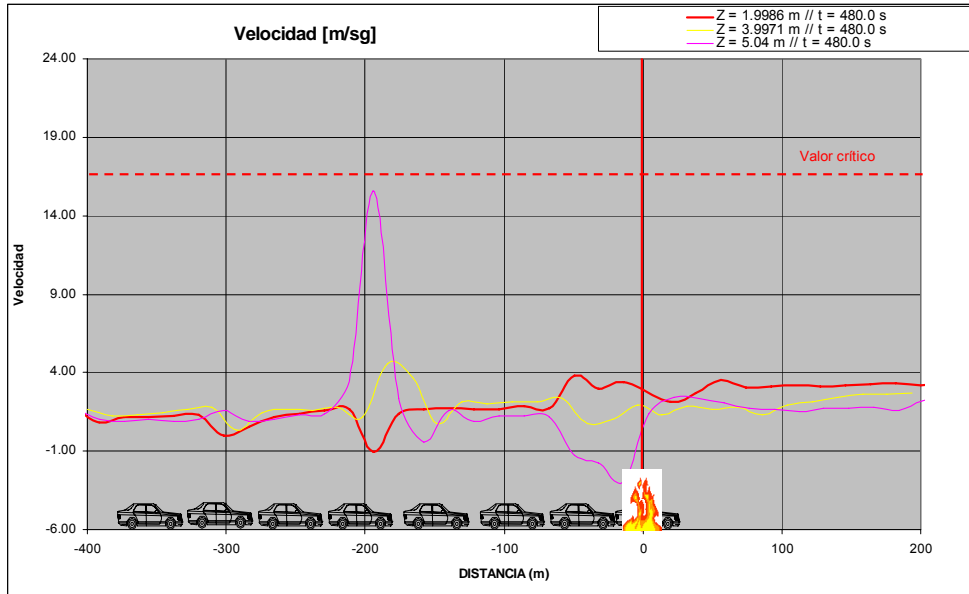




4.2.6.4.4.- Velocidades. (Modo pozo 30MW. Escenario con cortina).

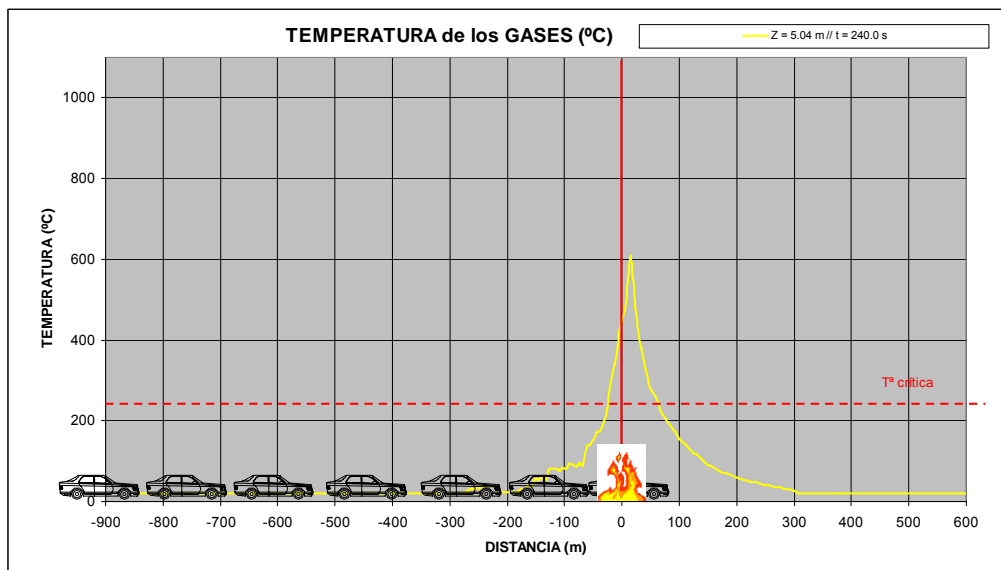
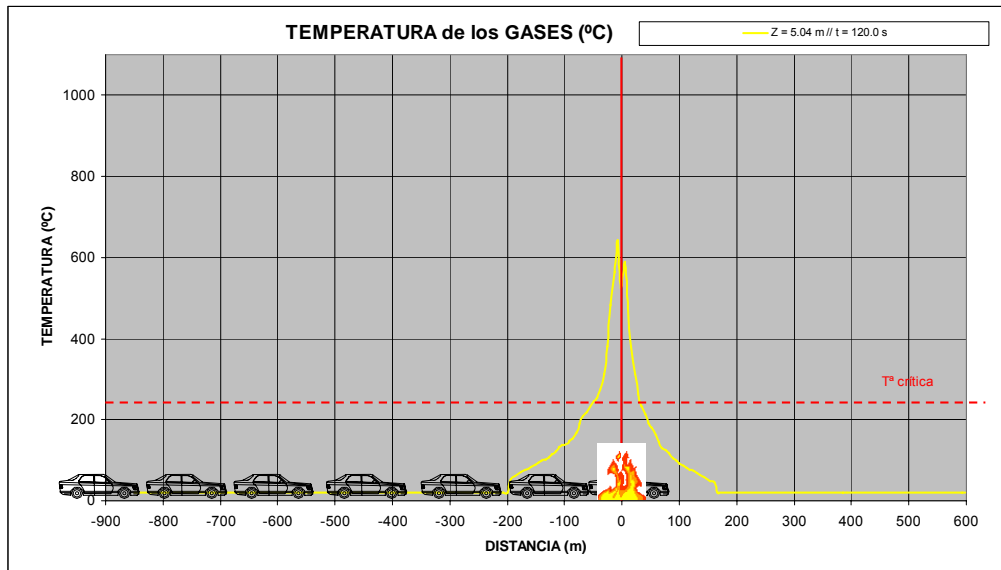
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

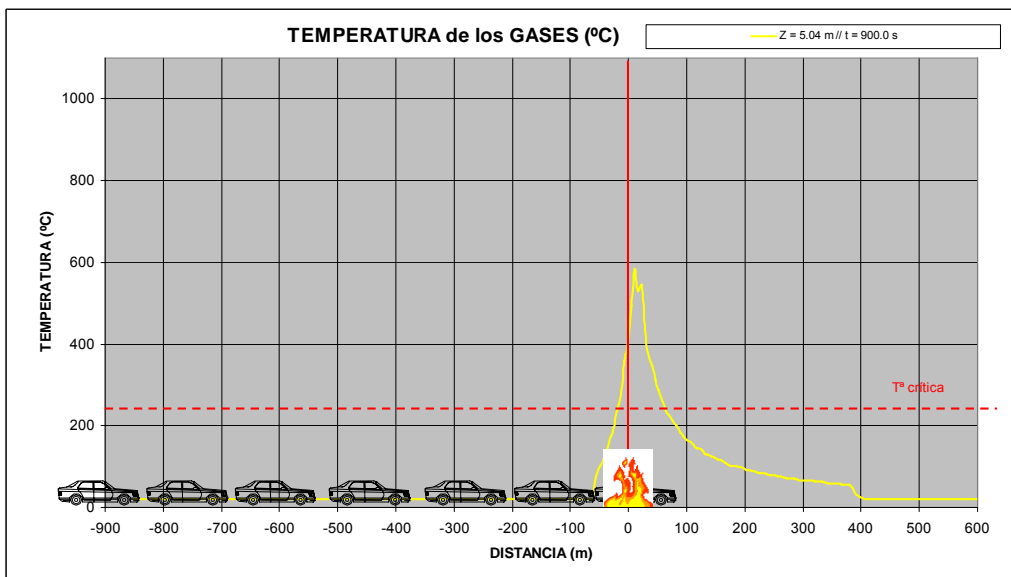
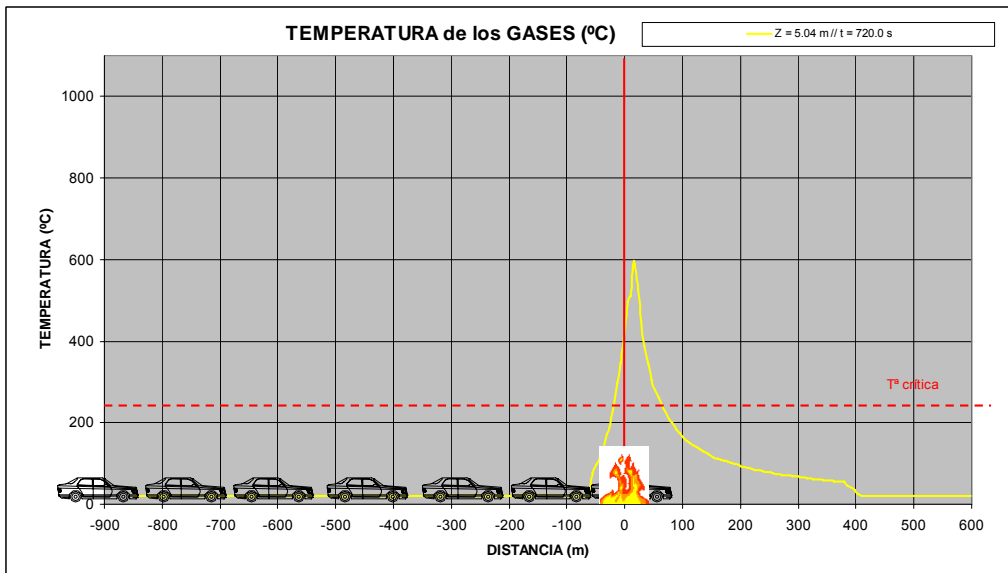
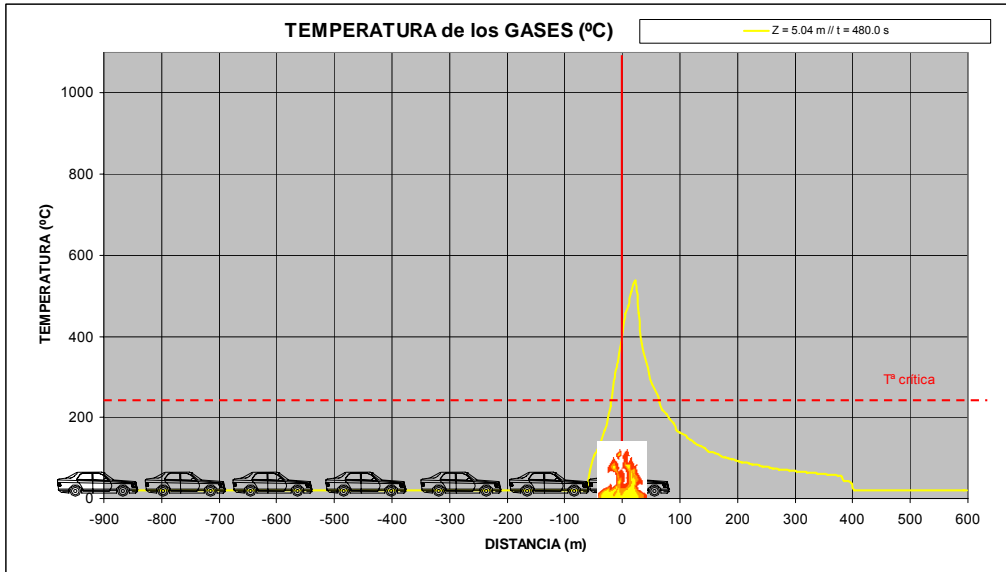




4.2.6.4.5.- Temperaturas. (Modo pozo 30MW. Escenario con cortina).

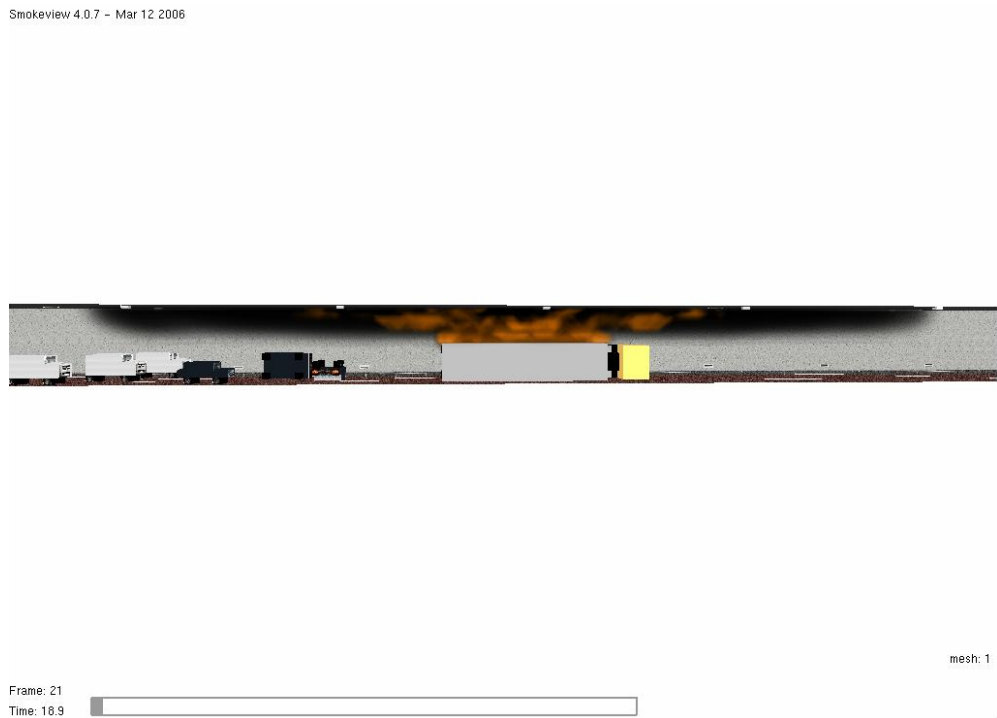
Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.





4.2.6.4.6.- Evolución de las partículas de humo. (Modo pozo 30MW. Escenario con cortina).

A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 120, 240, 480, 720 y 900 sg.



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 266
Time: 239.4



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 533
Time: 479.7





mesh: 1

Frame: 791

Time: 711.9



mesh: 1

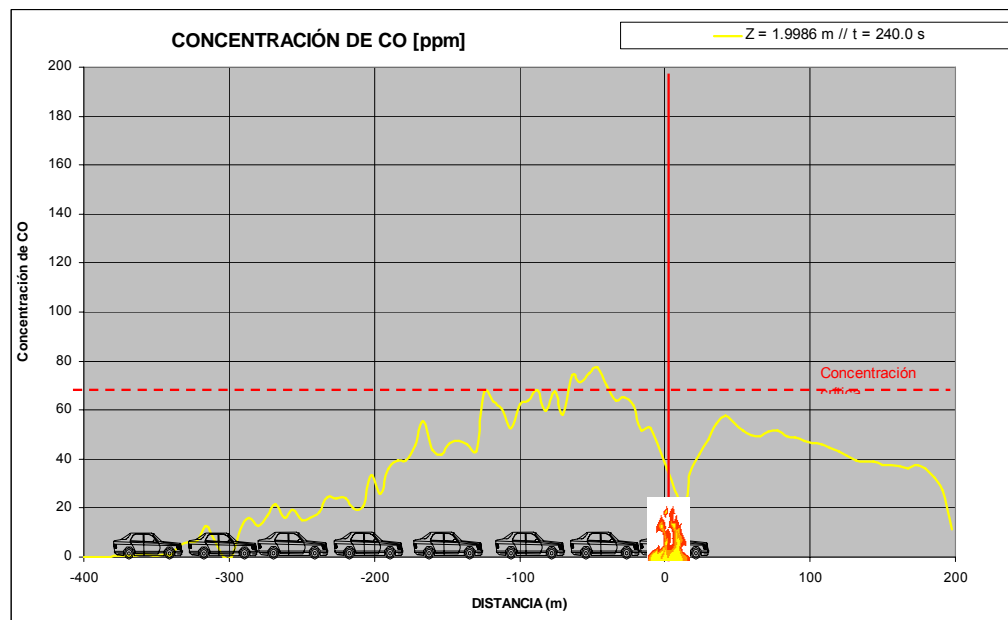
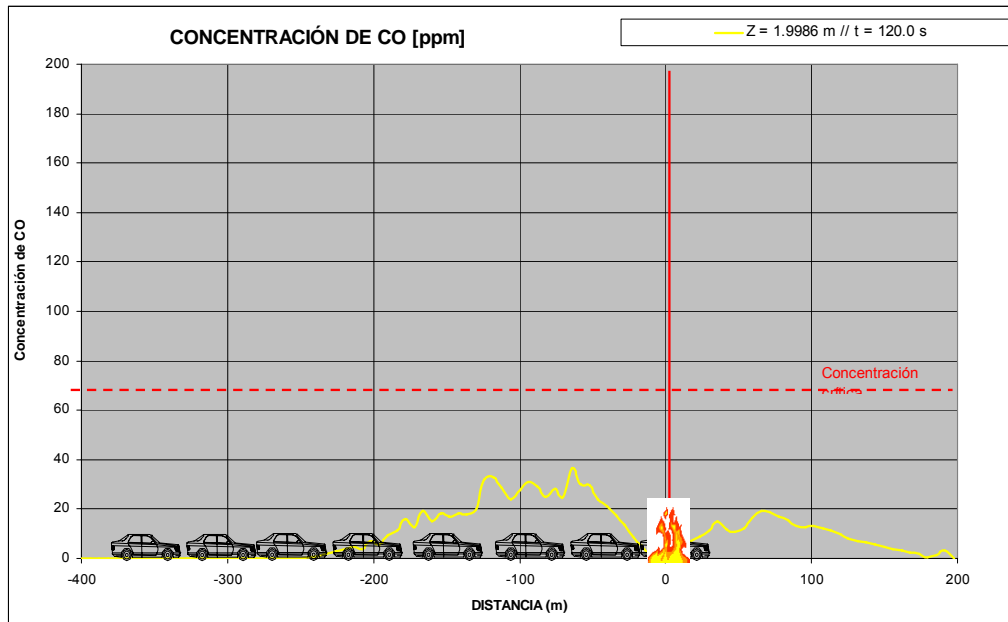
Frame: 1000

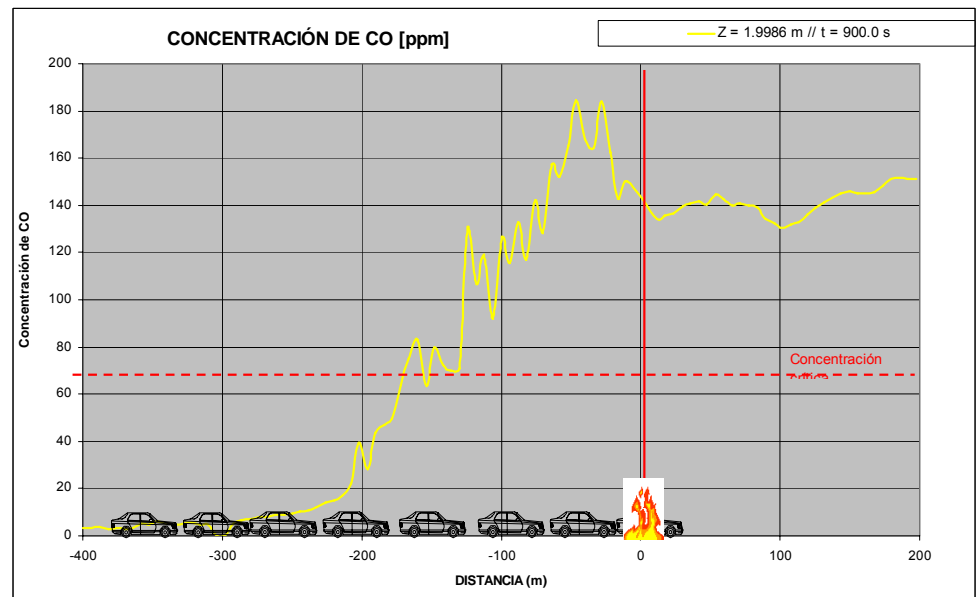
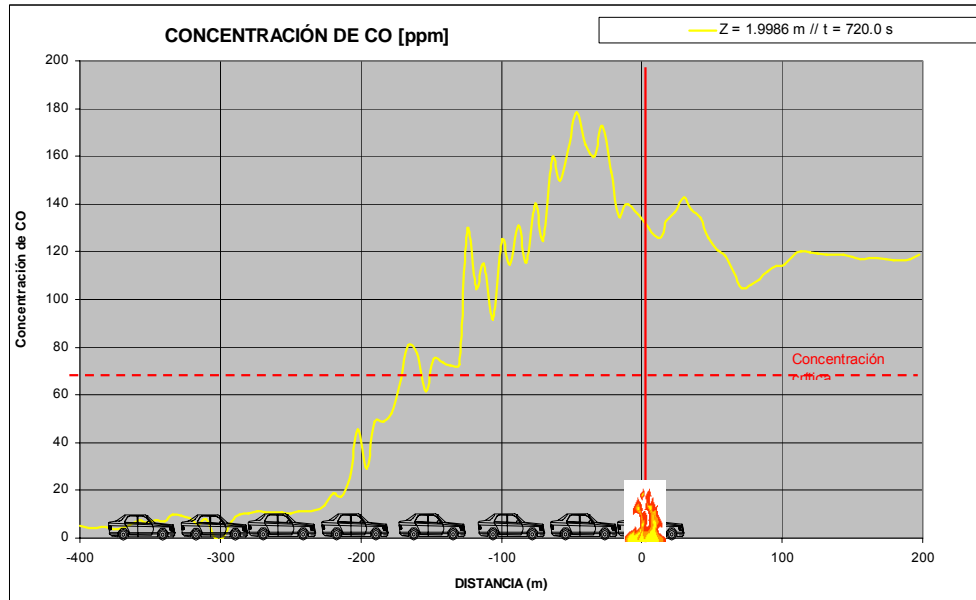
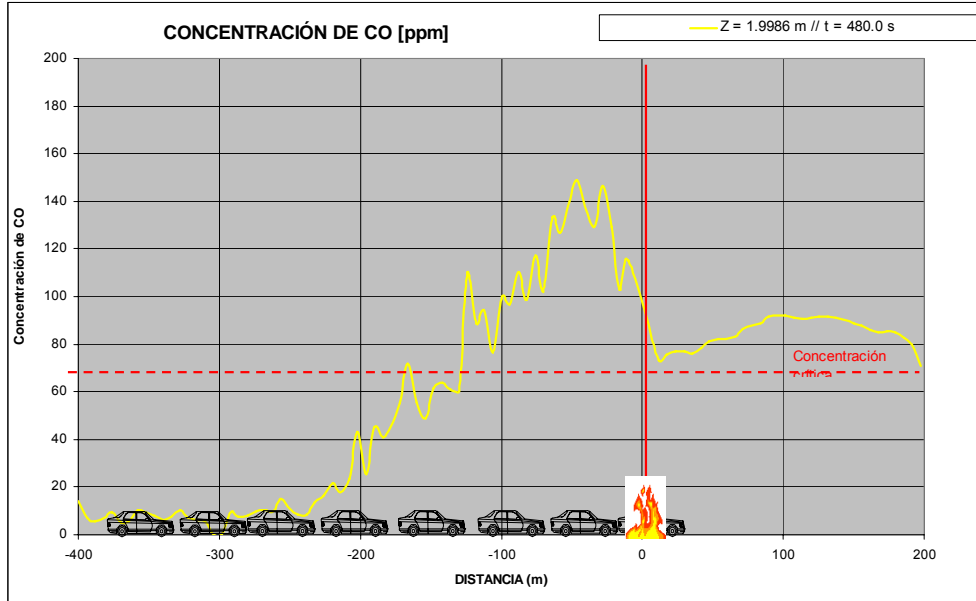
Time: 900.0

4.2.6.5.- Modo pozo, 100MW. Escenario inicial.

4.2.6.5.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo, 100MW. Escenario inicial).

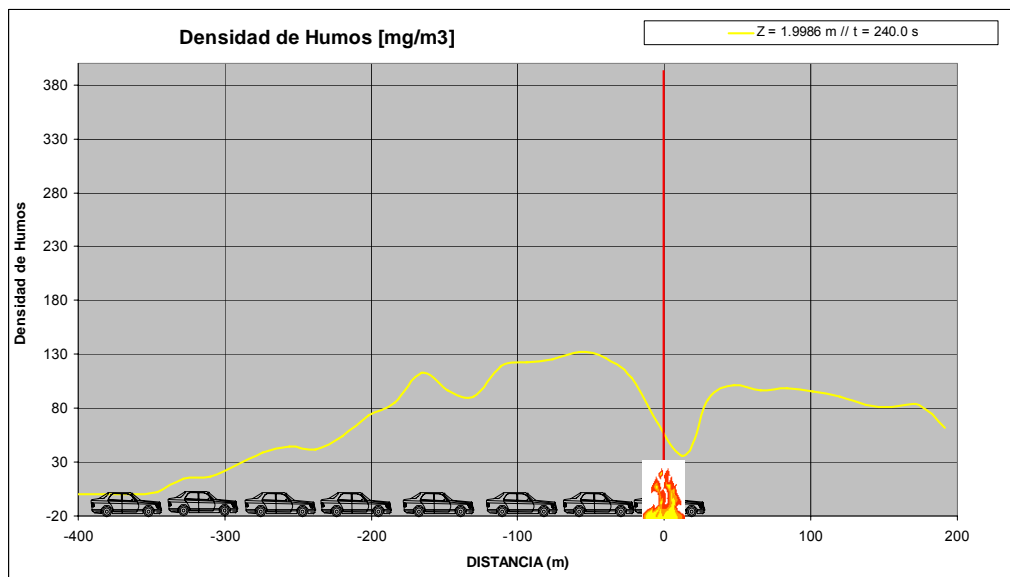
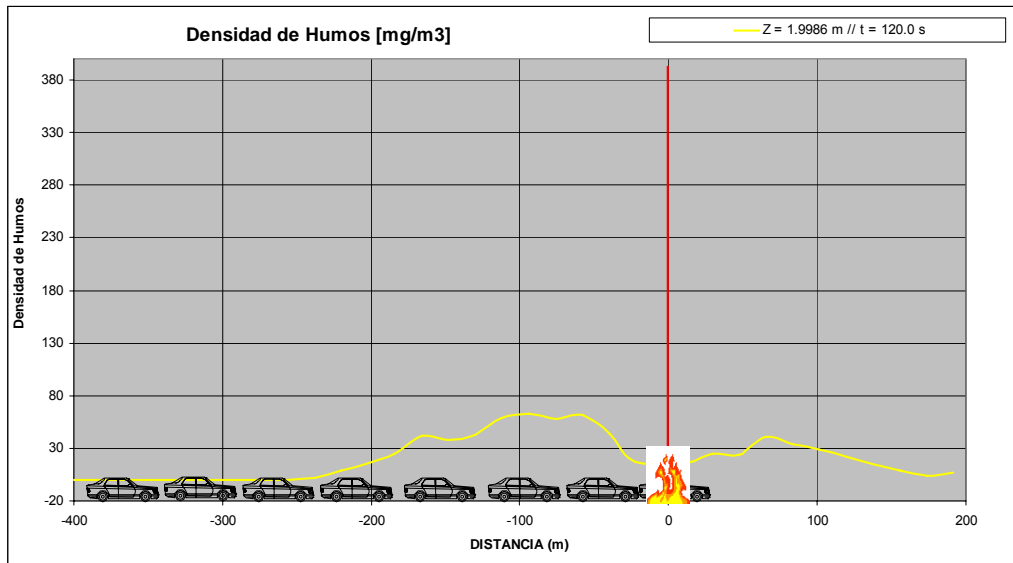
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

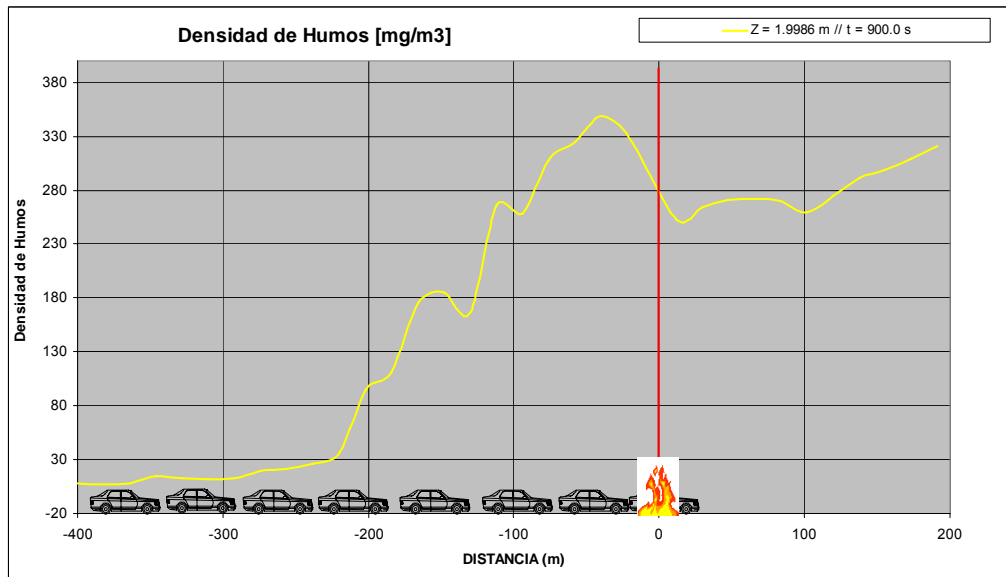
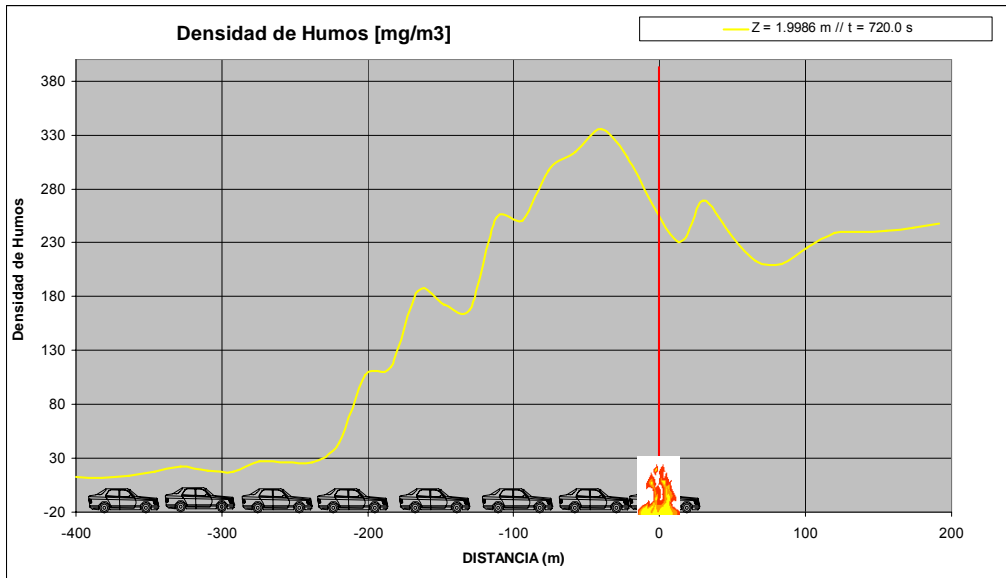
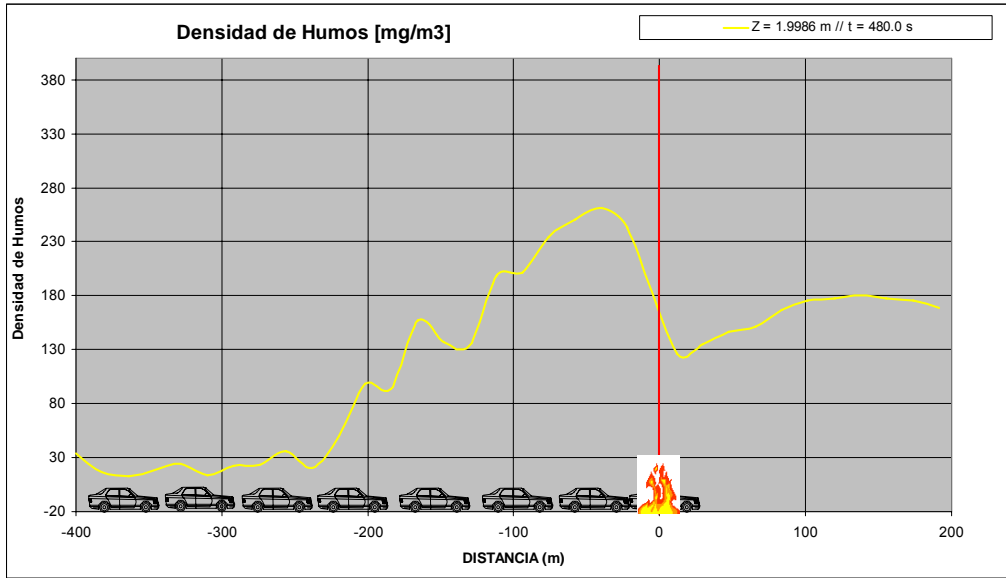




4.2.6.5.2.- Densidad de los humos. (Modo pozo, 100MW. Escenario inicial).

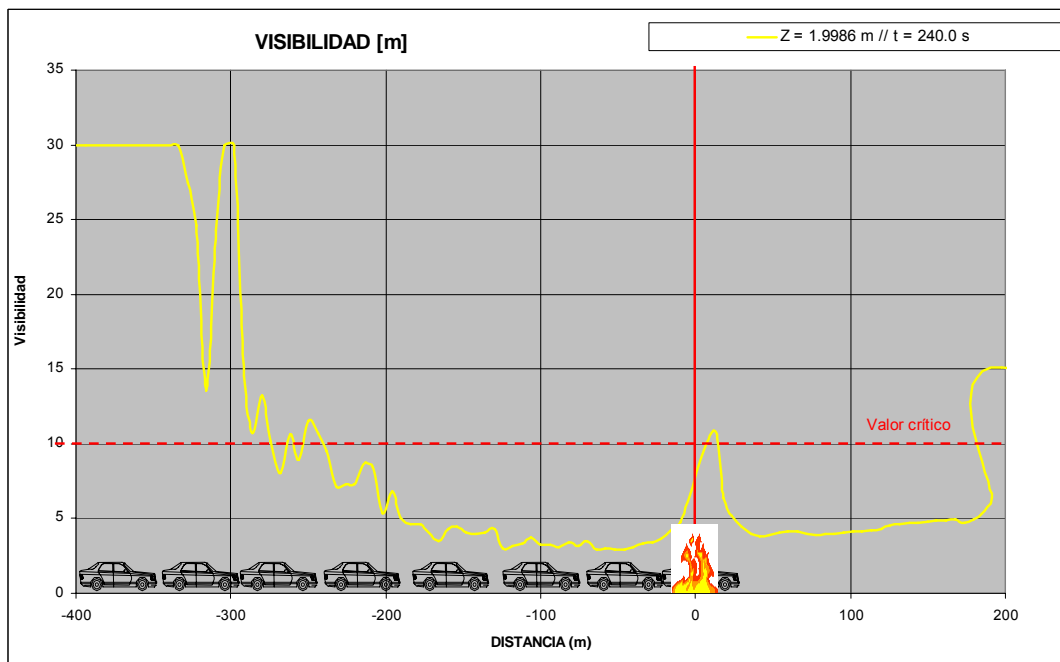
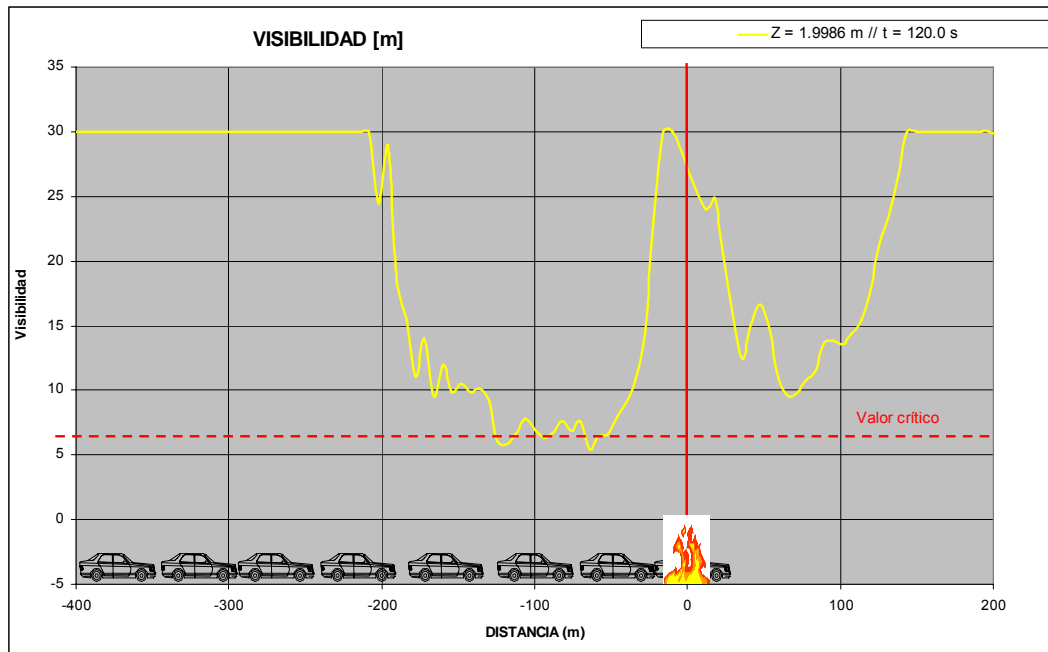
Se analiza las densidades de los humos a 2 m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

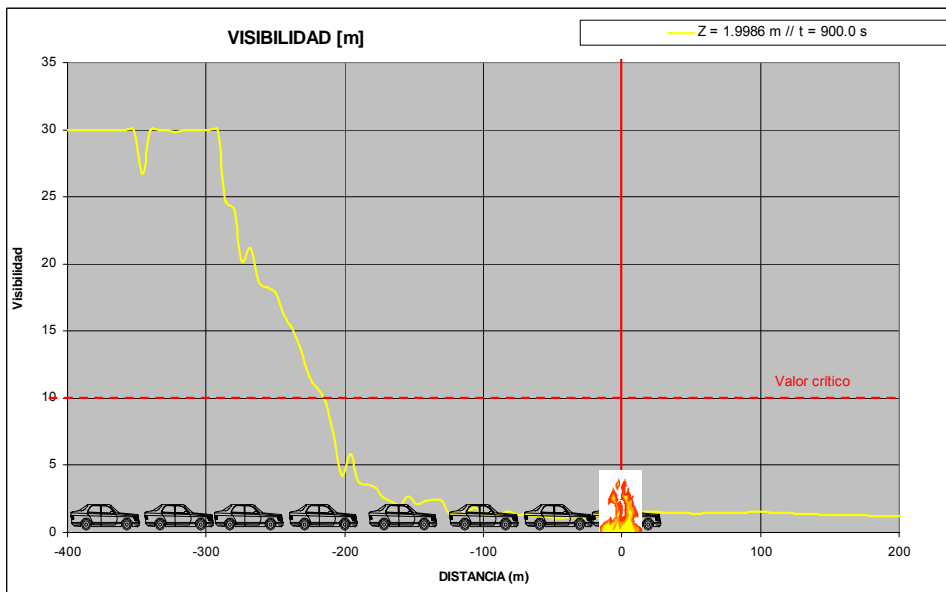
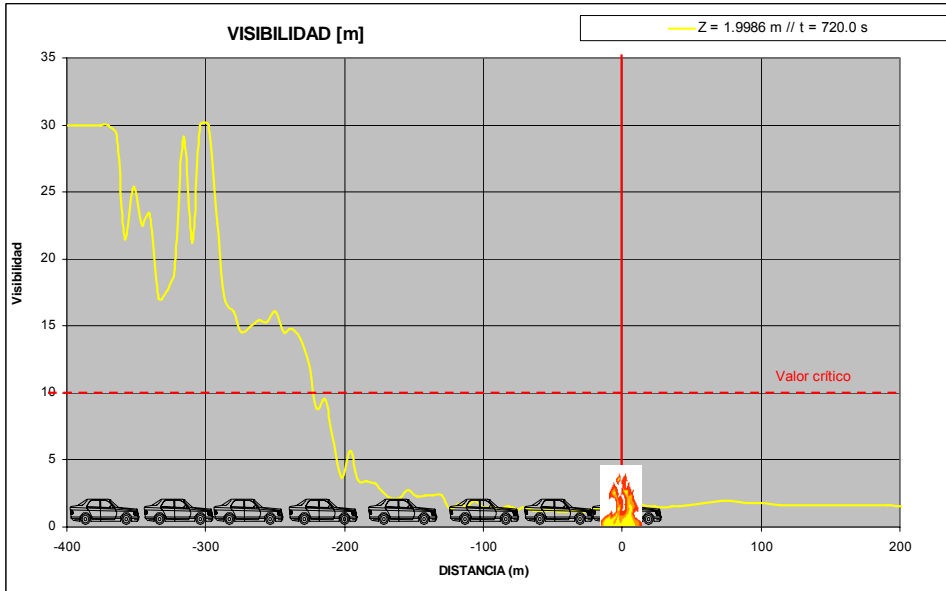
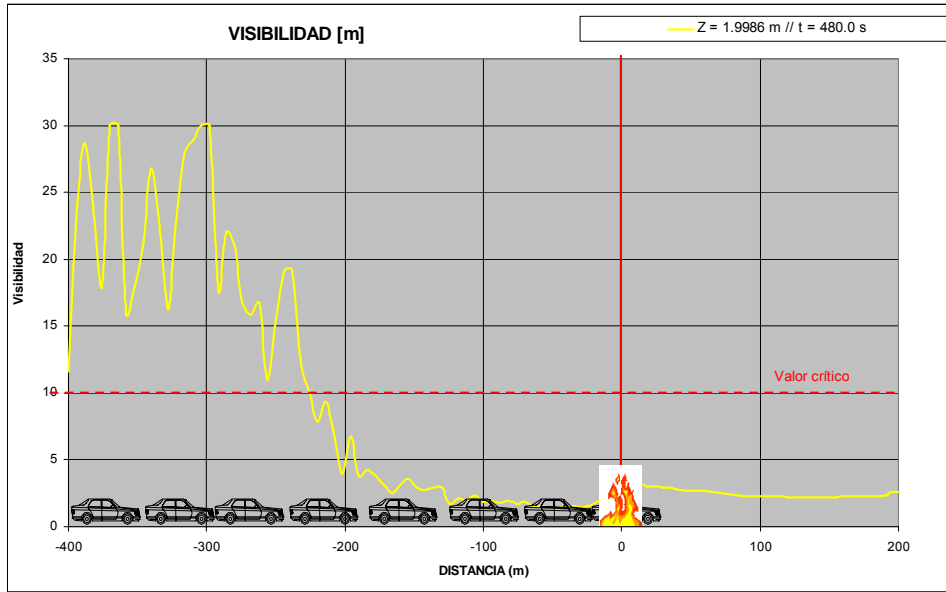




4.2.6.5.3.- Visibilidad. (Modo pozo, 100MW. Escenario inicial).

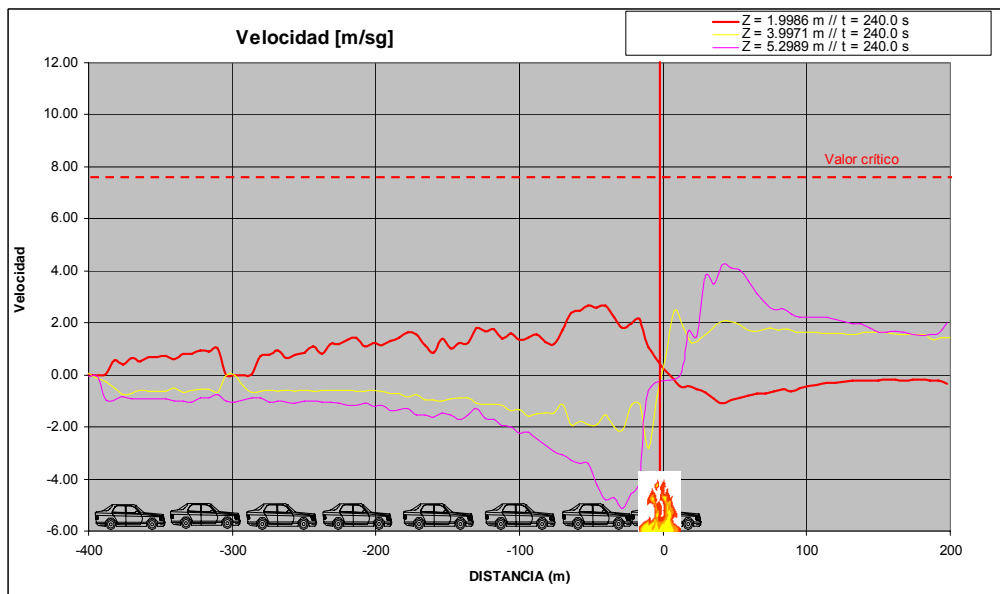
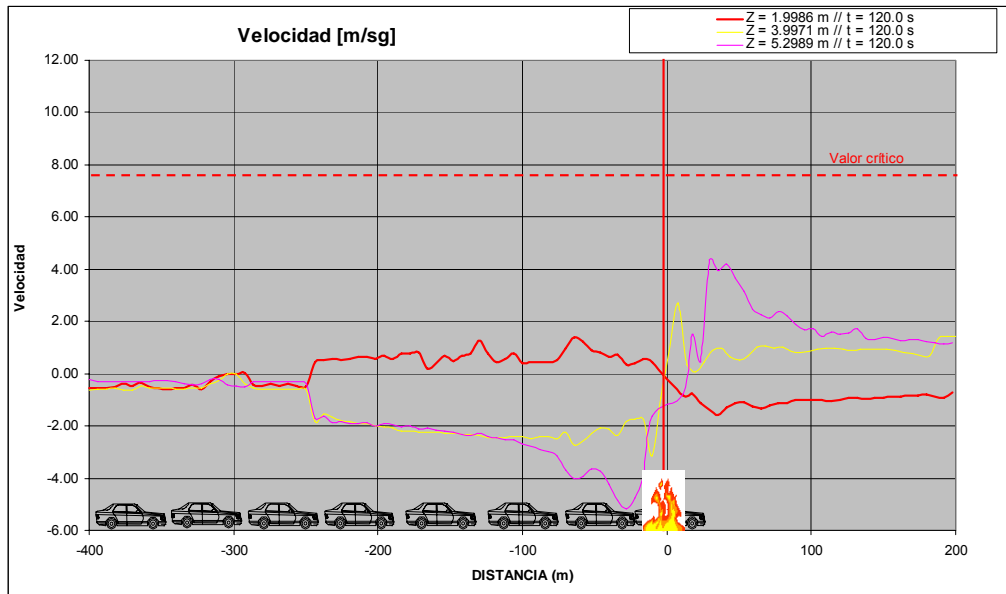
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

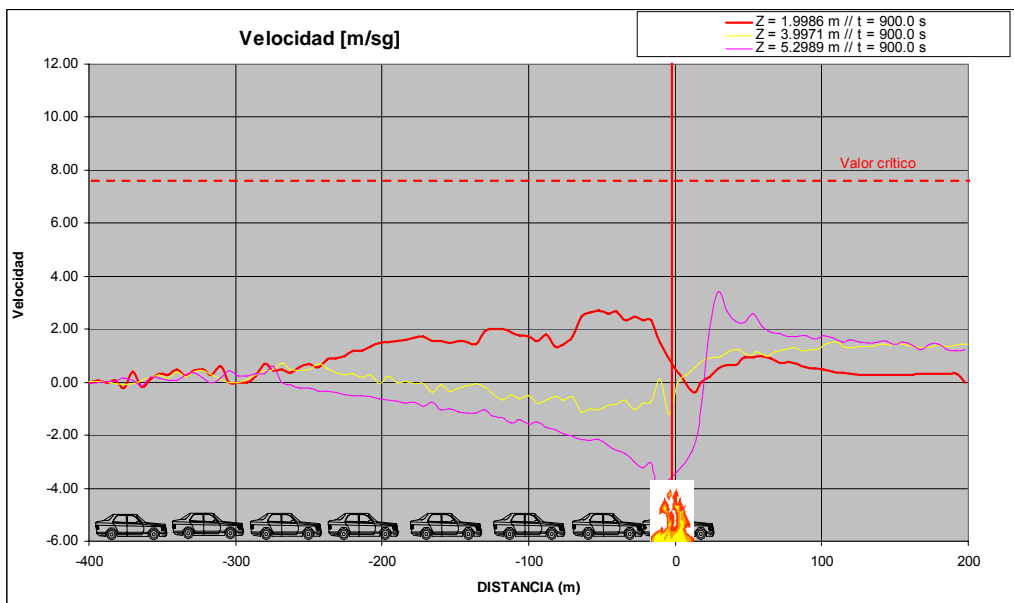
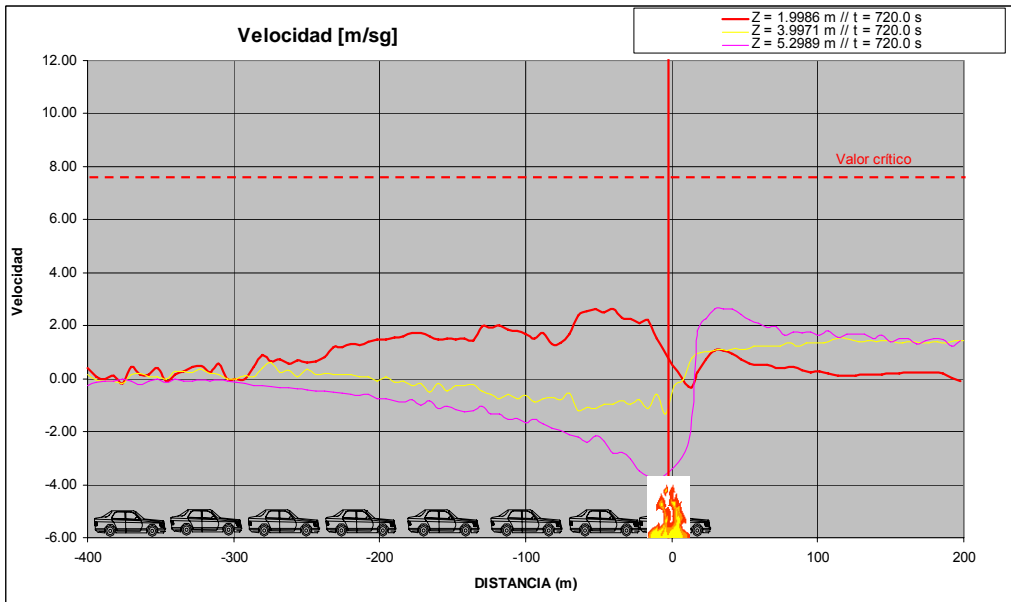
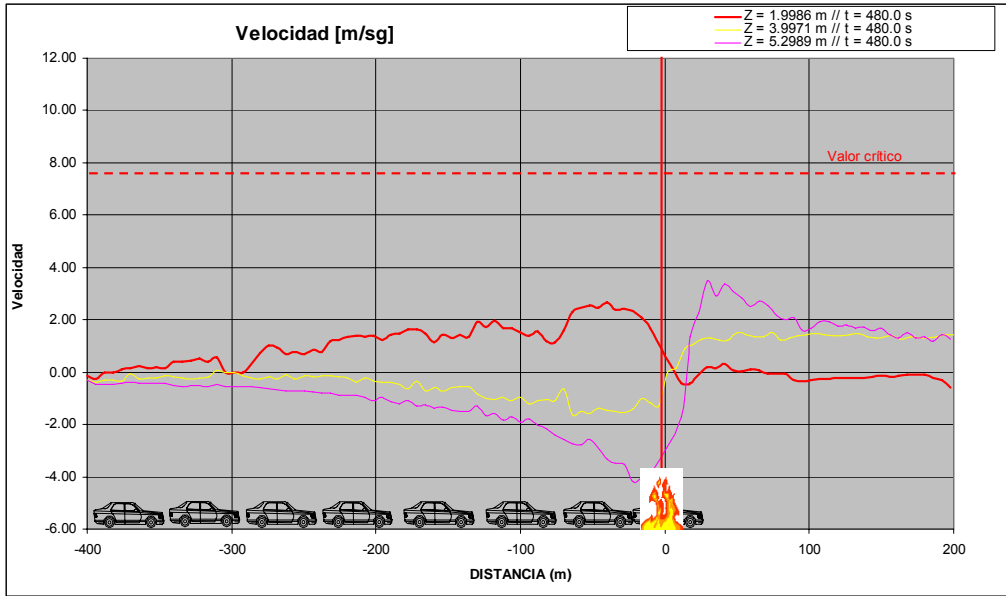




4.2.6.5.4.- Velocidades. (Modo pozo, 100MW. Escenario inicial).

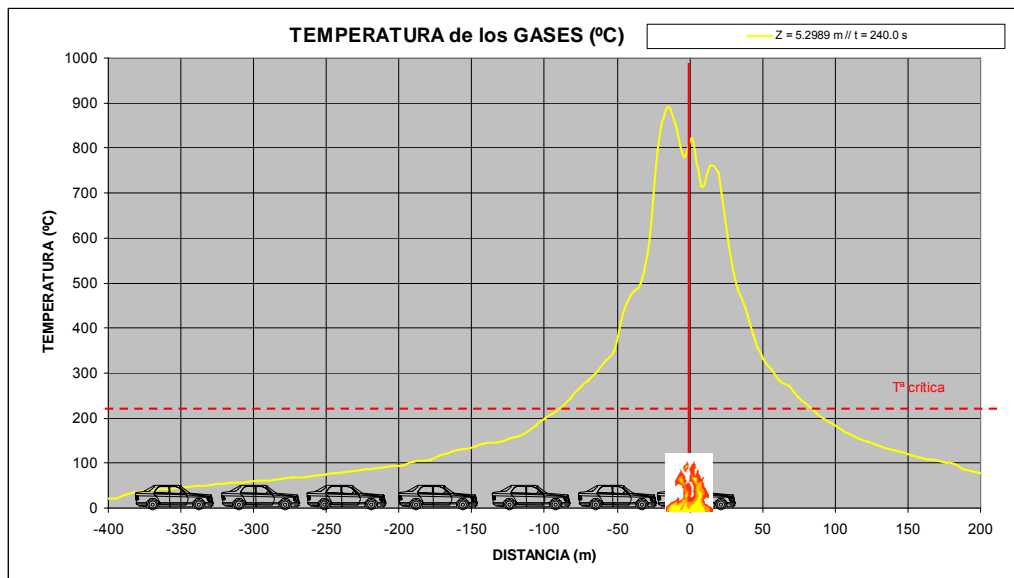
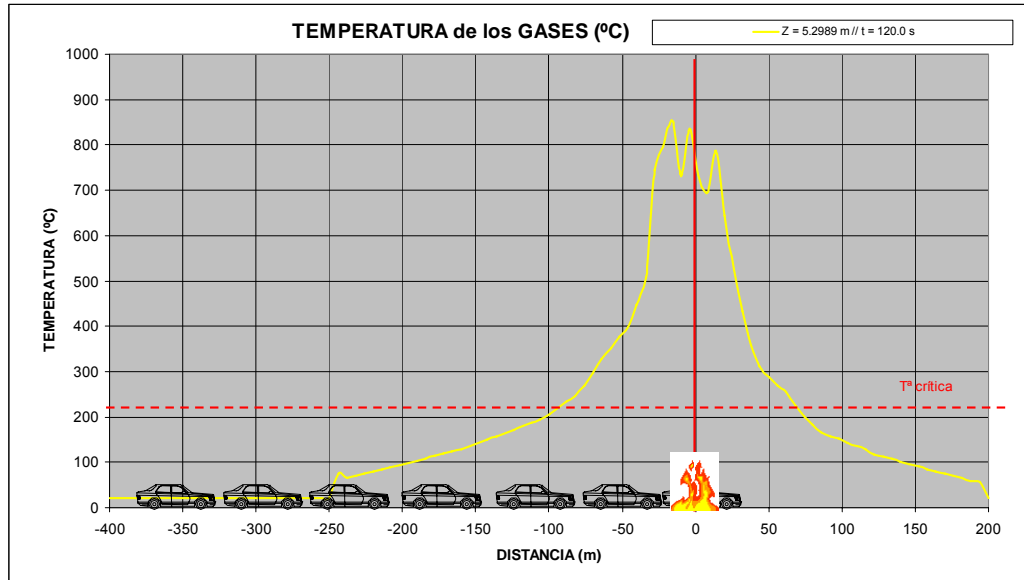
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

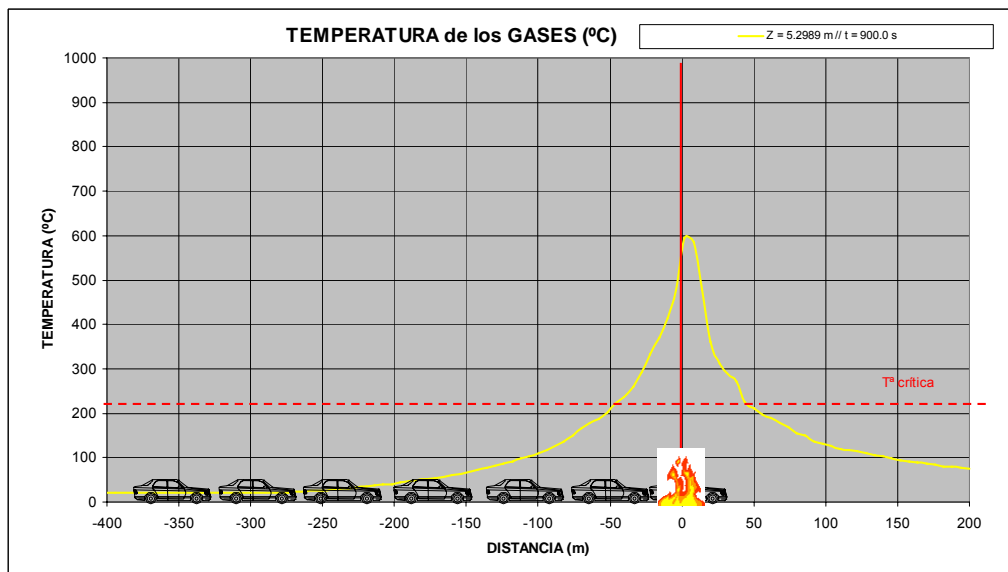
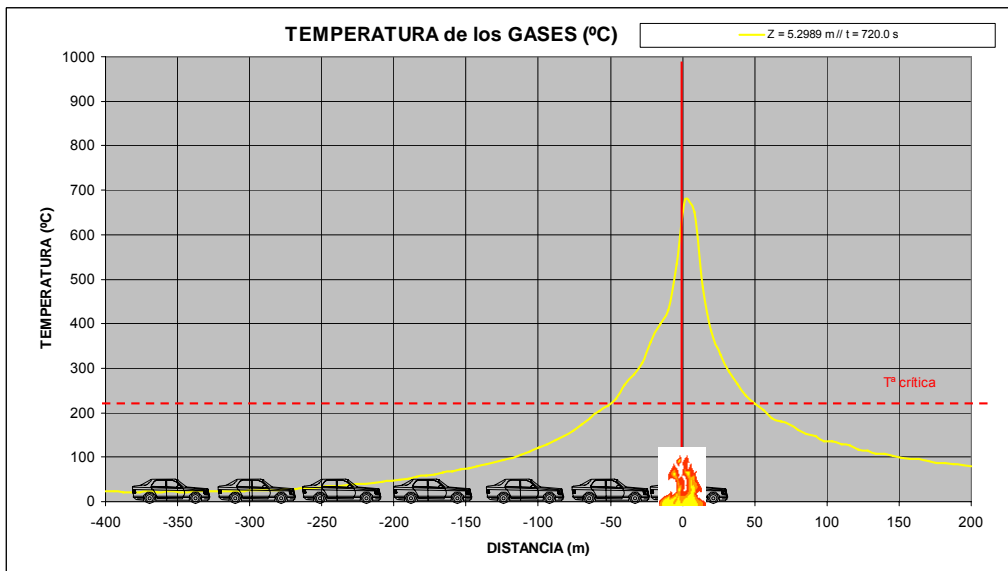
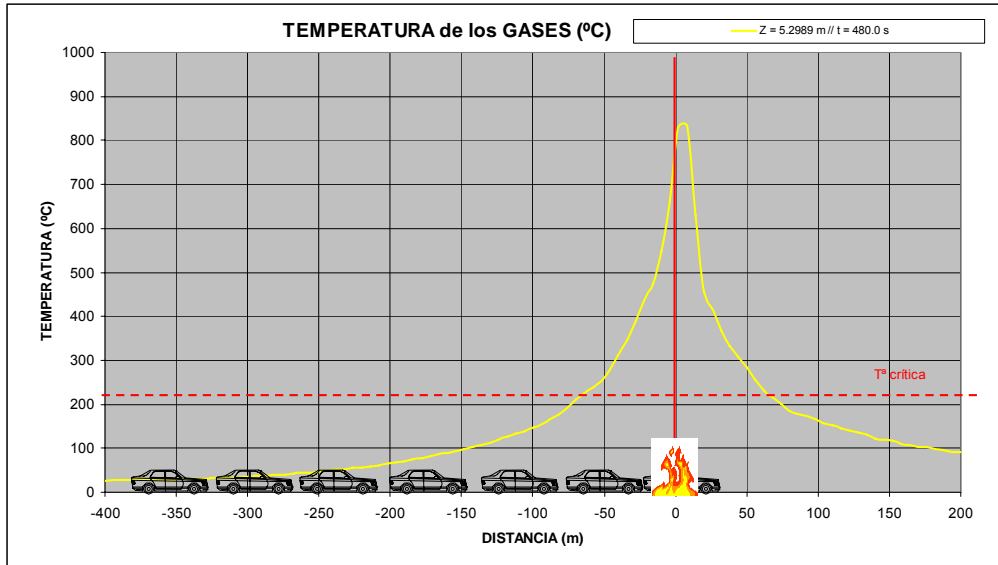




4.2.6.5.5.- Temperaturas. (Modo pozo, 100MW. Escenario inicial).

Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.





4.2.6.5.6.- Evolución de las partículas de humo. (Modo pozo, 100MW. Escenario inicial).

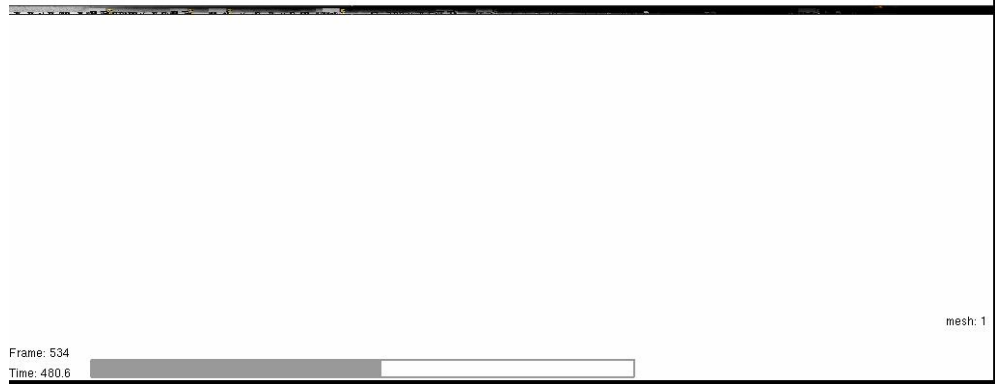
A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 120, 240, 480, 720 y 900 sg.



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



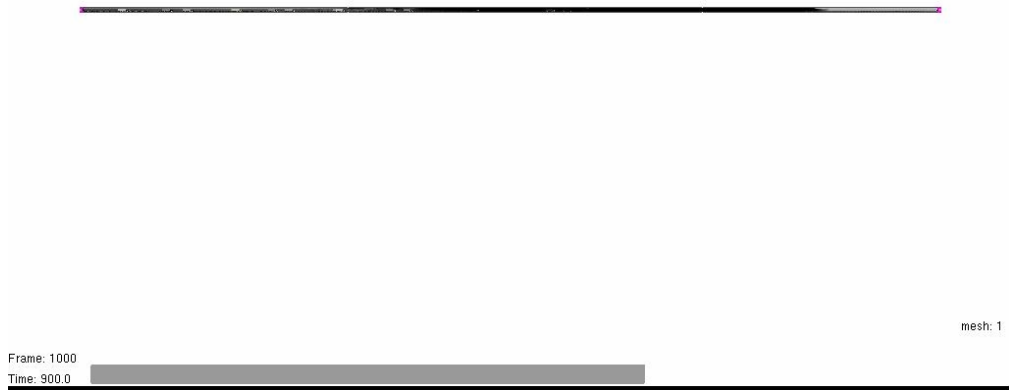
Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



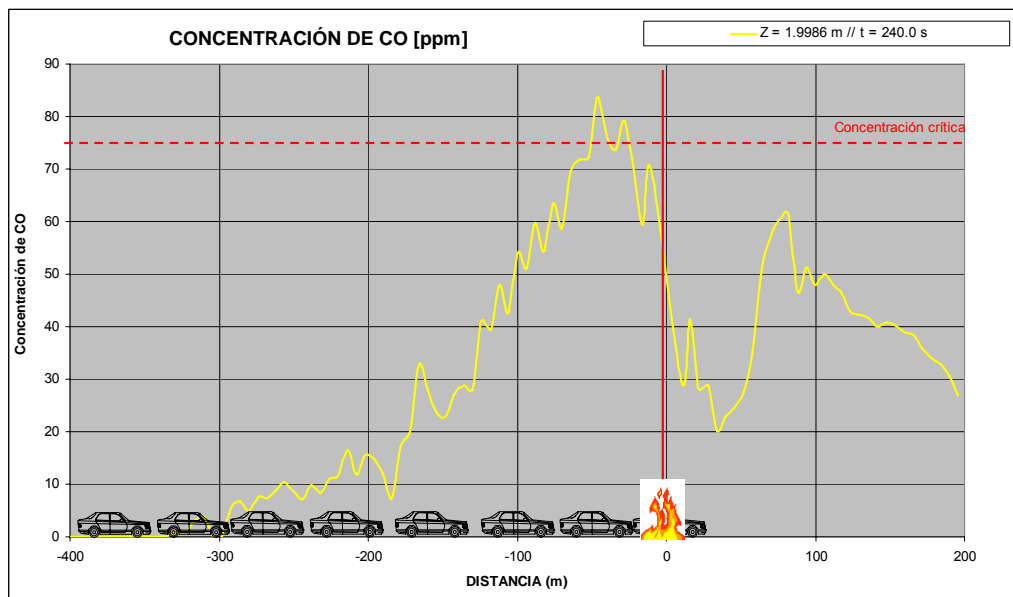
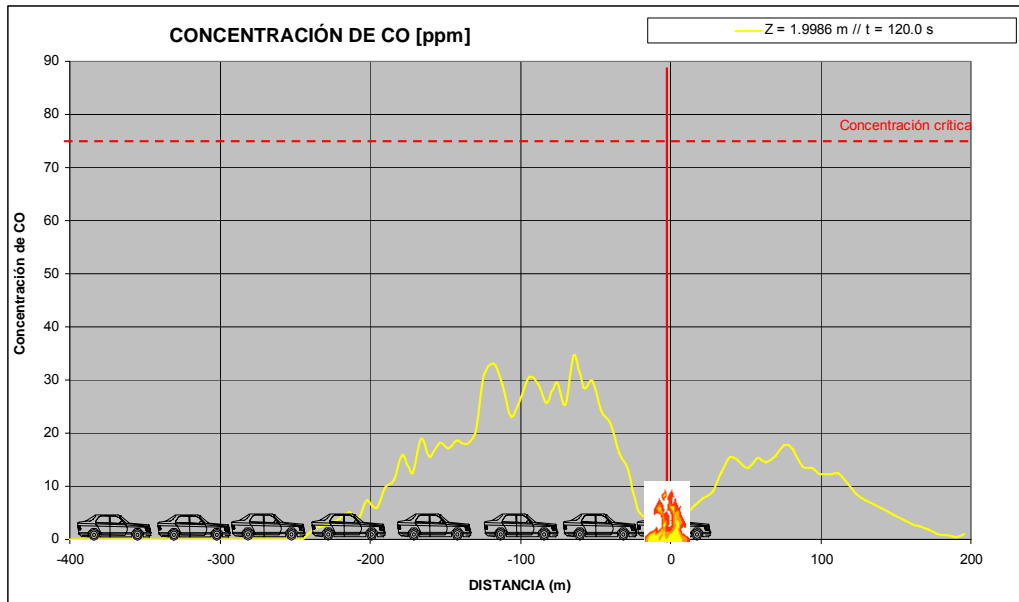
Smokeyview 4.0.7 - Mar 12 2006

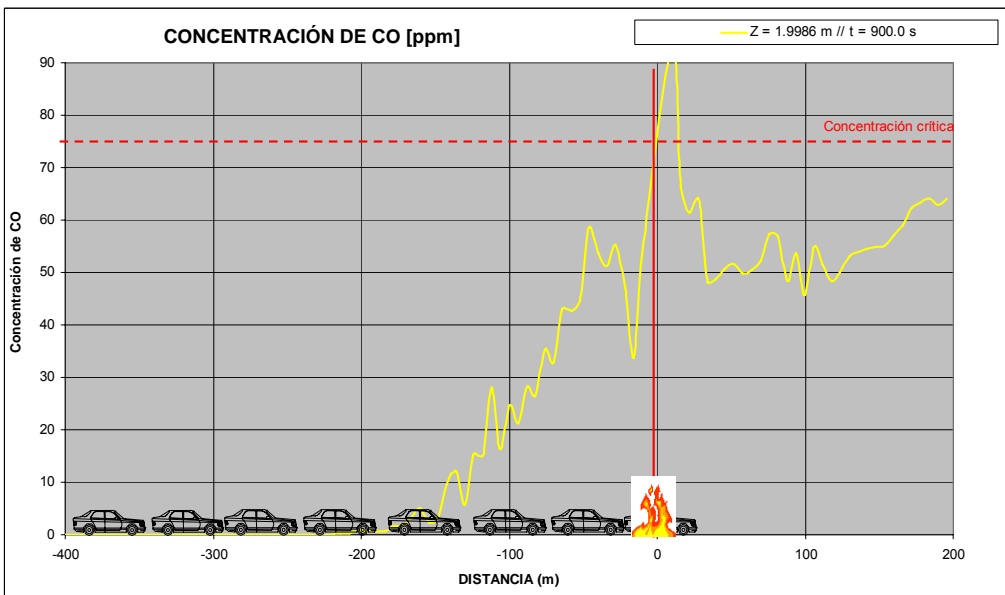
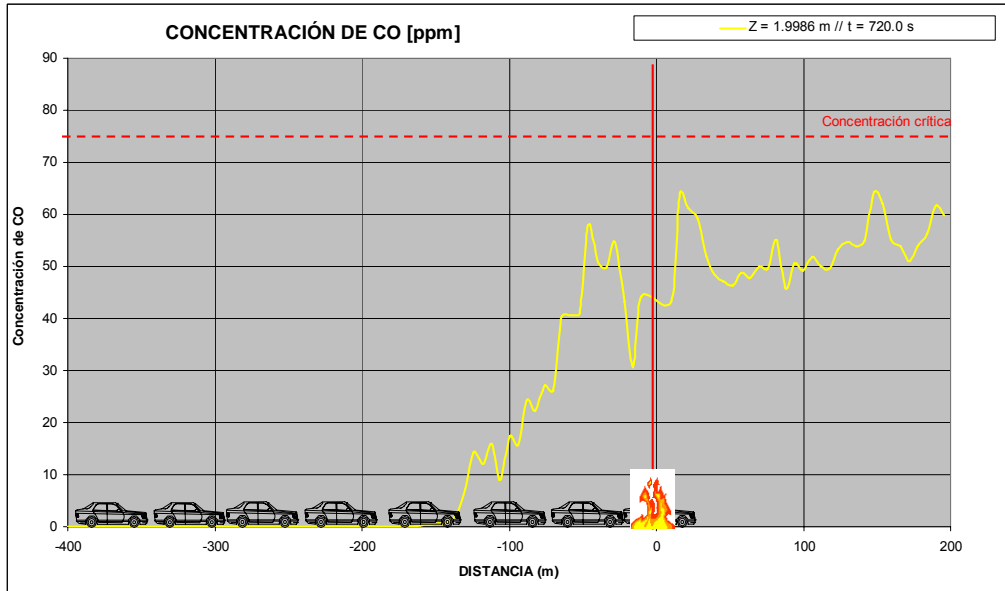
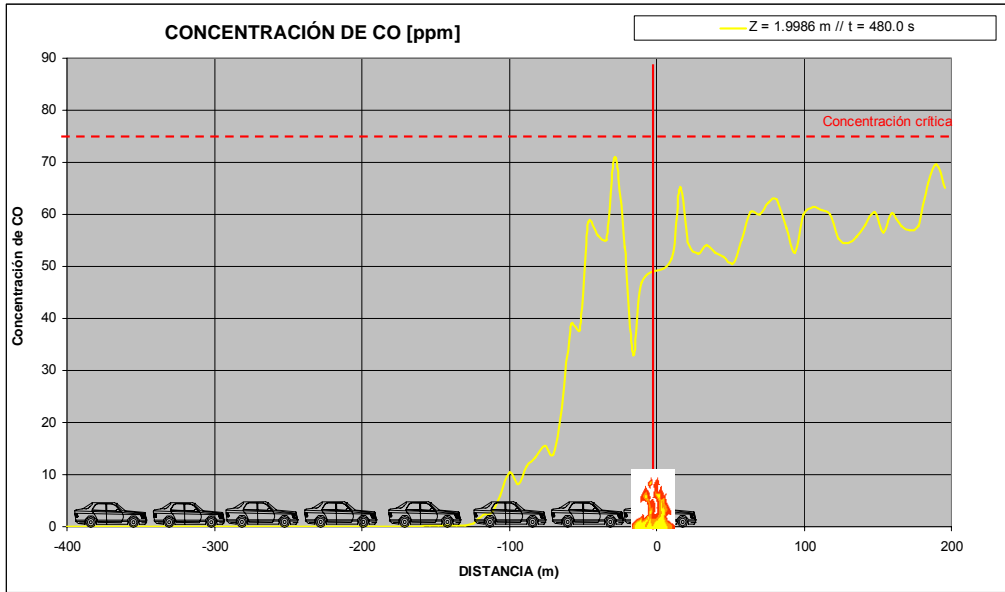


4.2.6.6.- Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina.

4.2.6.6.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina).

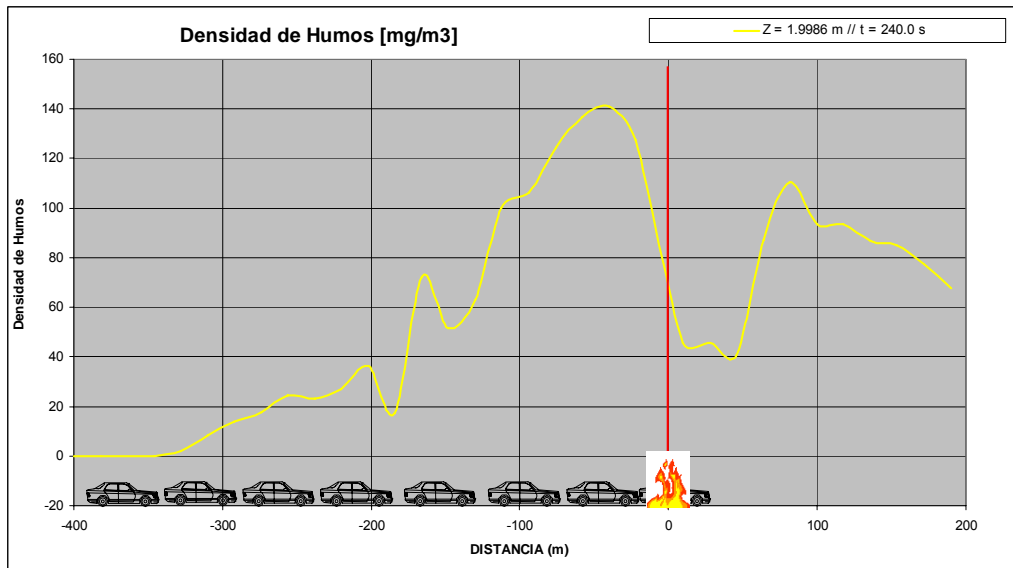
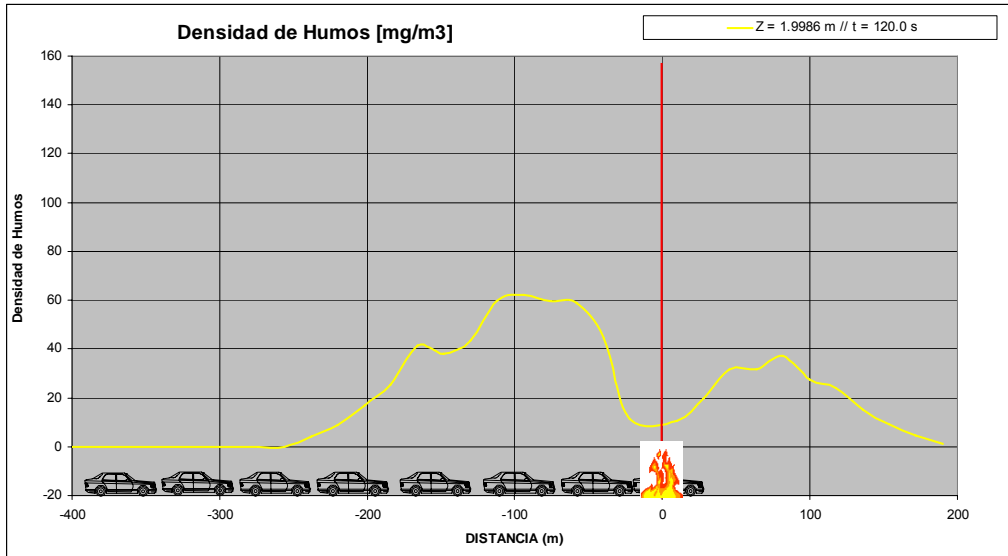
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

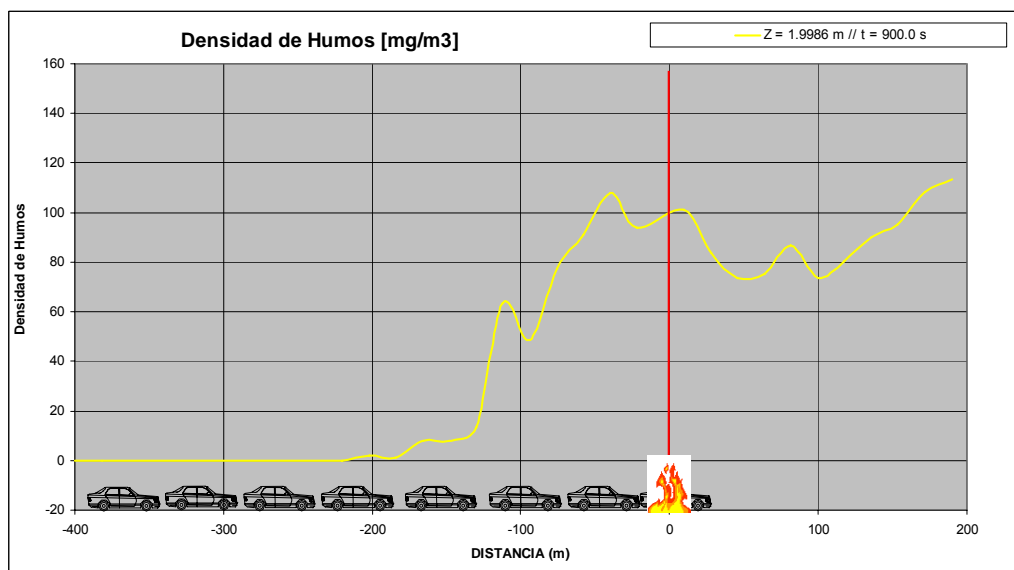
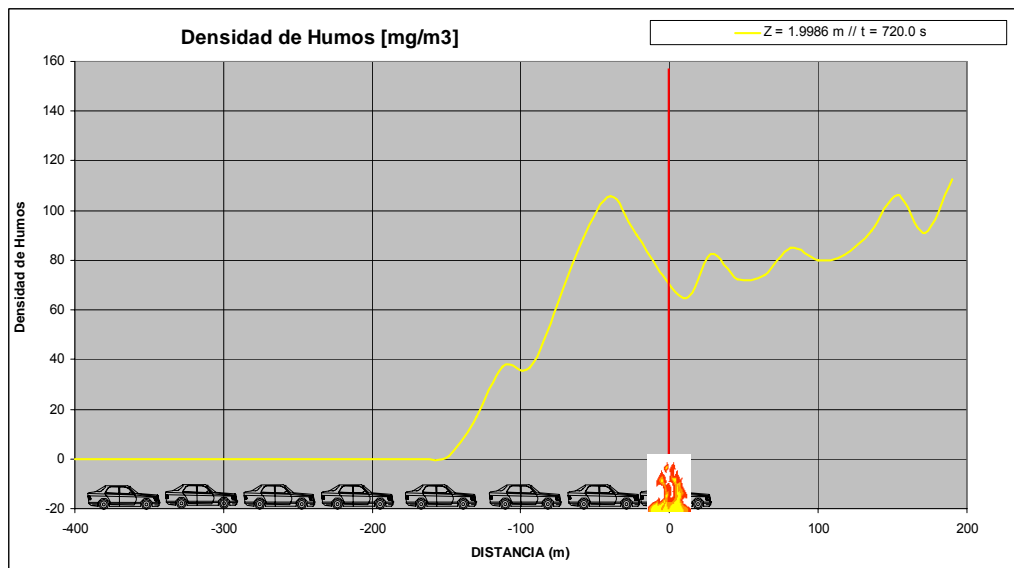
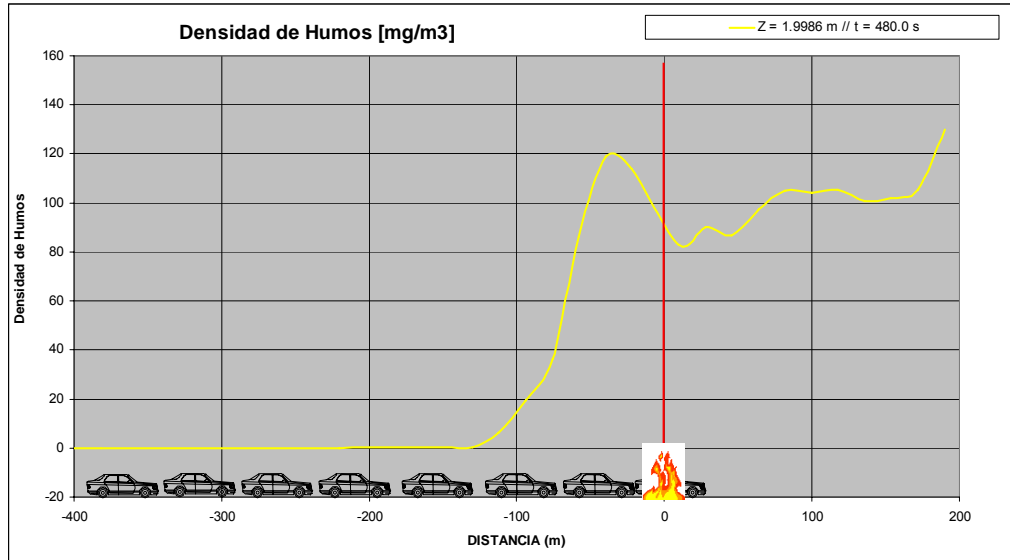




4.2.6.2.- Densidad de los humos. (Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina).

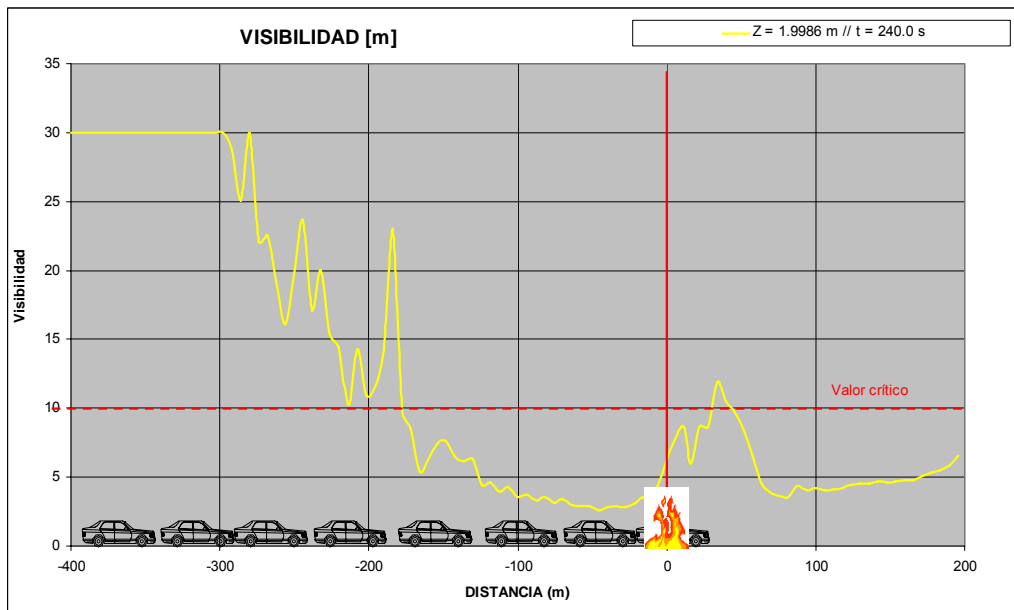
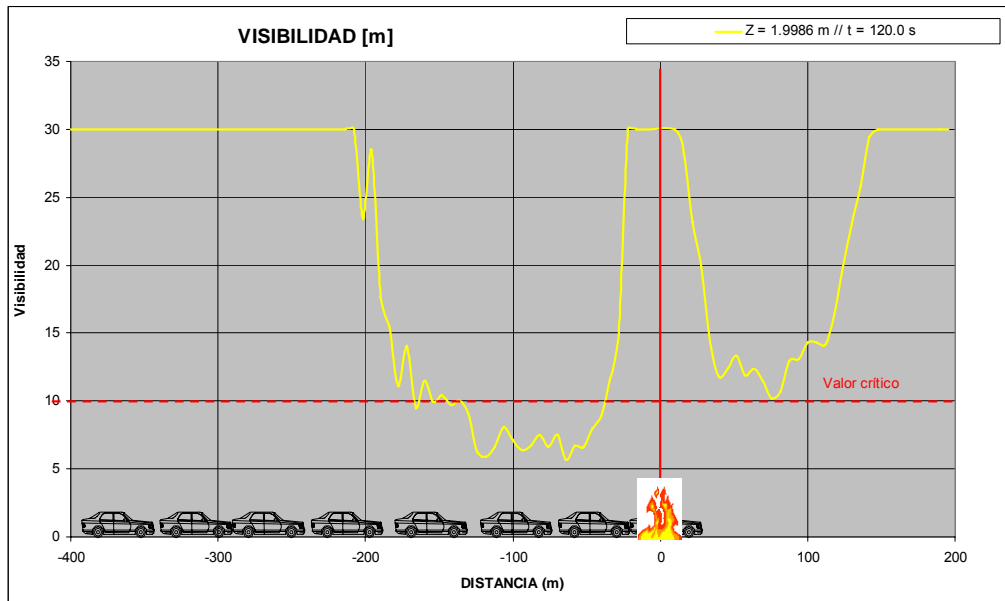
Se analiza las densidades de los humos a 2 m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

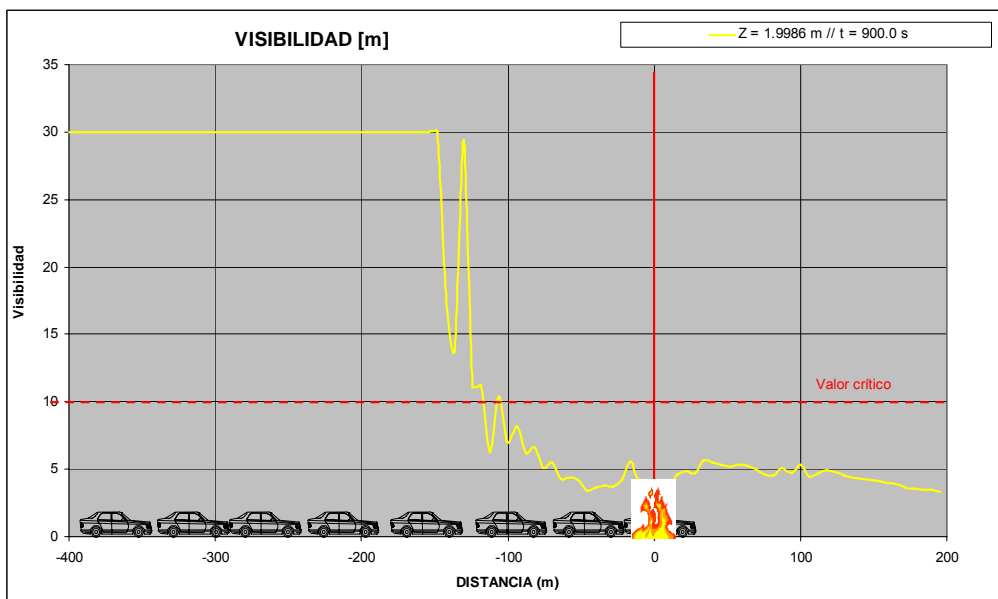
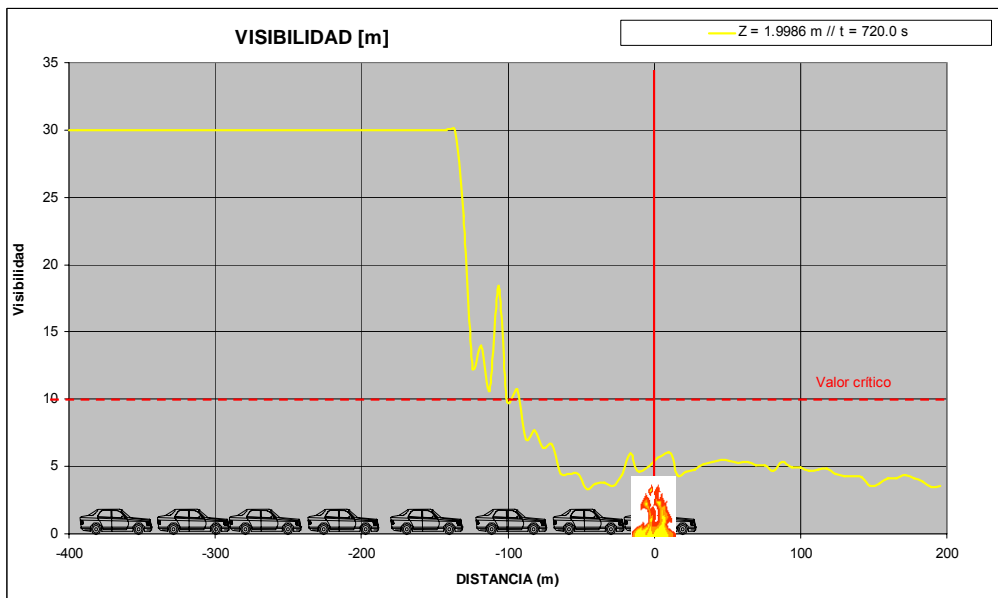
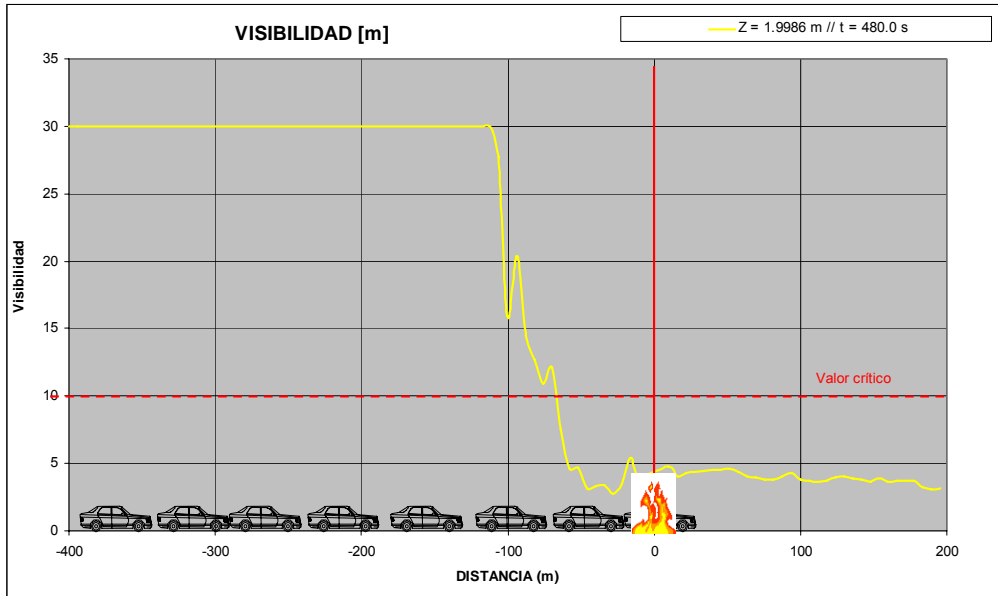




4.2.6.6.3.- *Visibilidad. (Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina).*

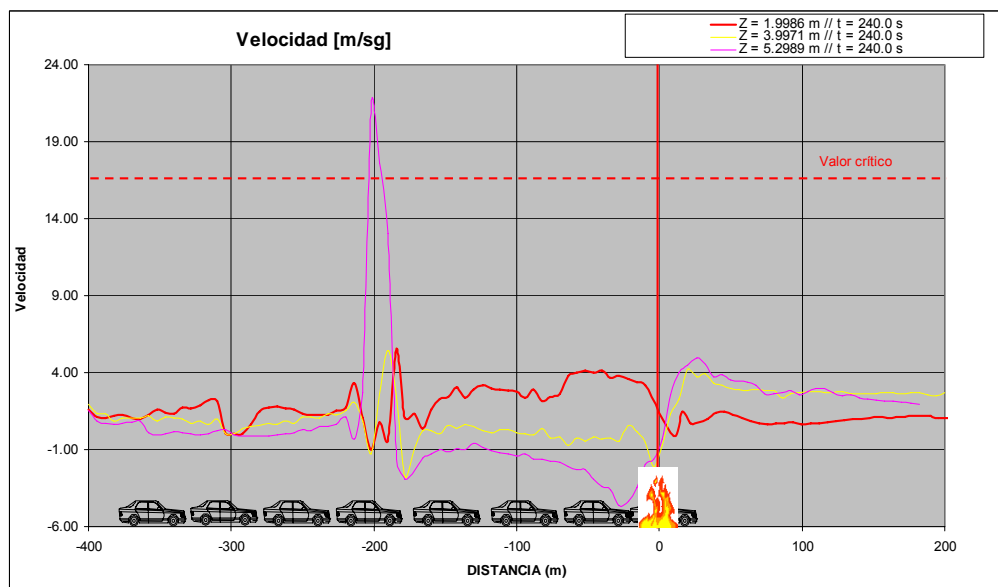
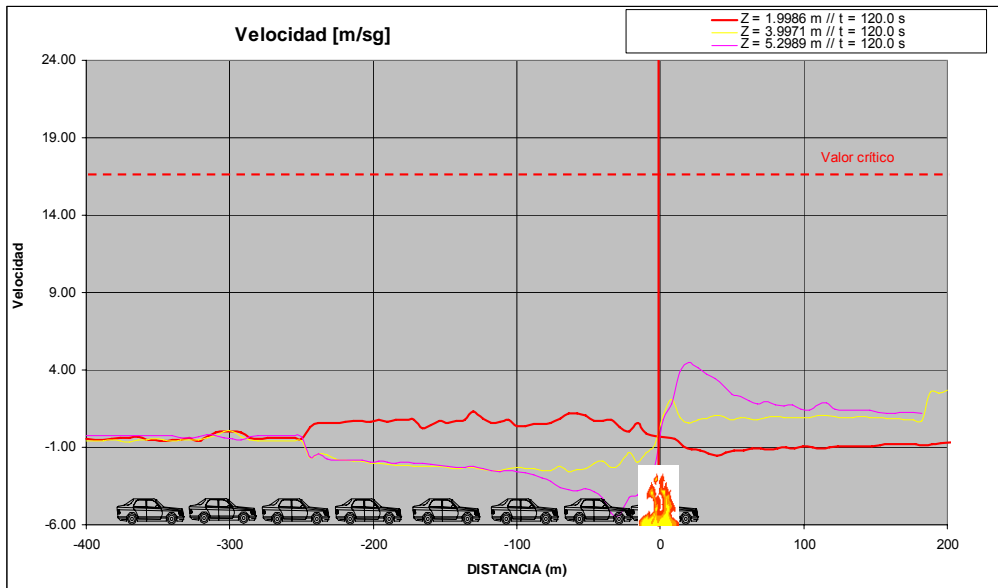
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

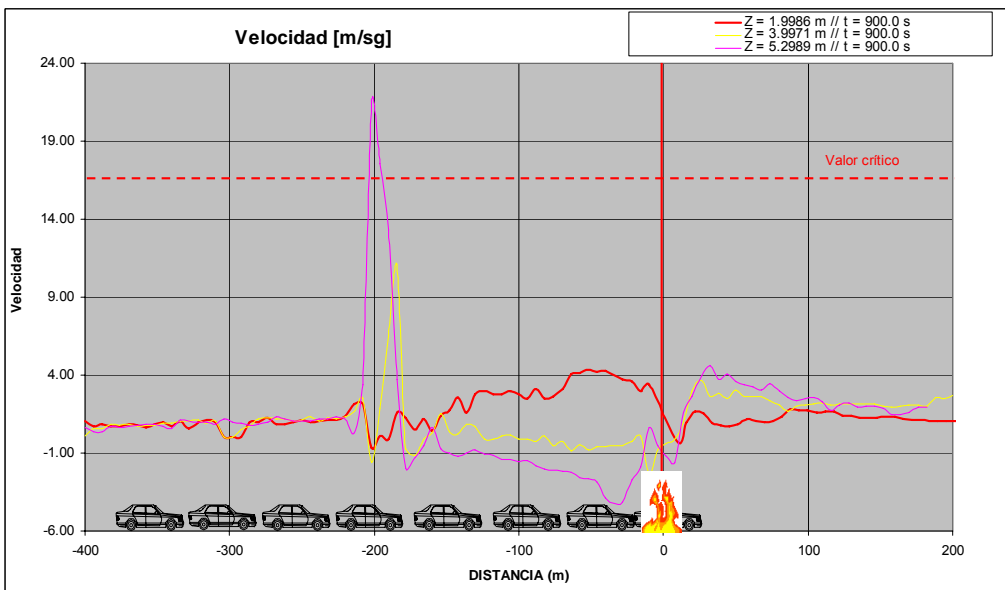
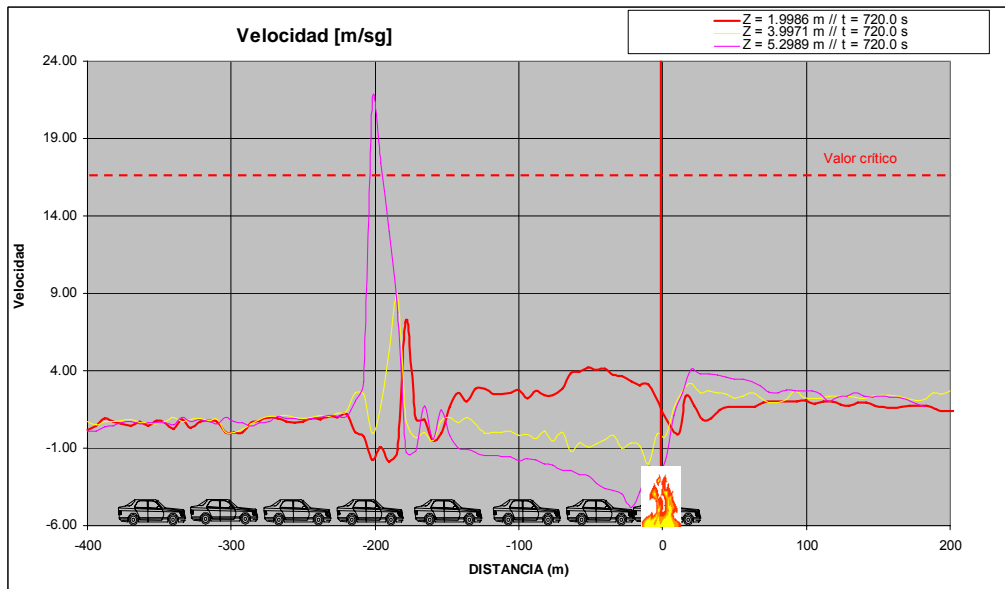
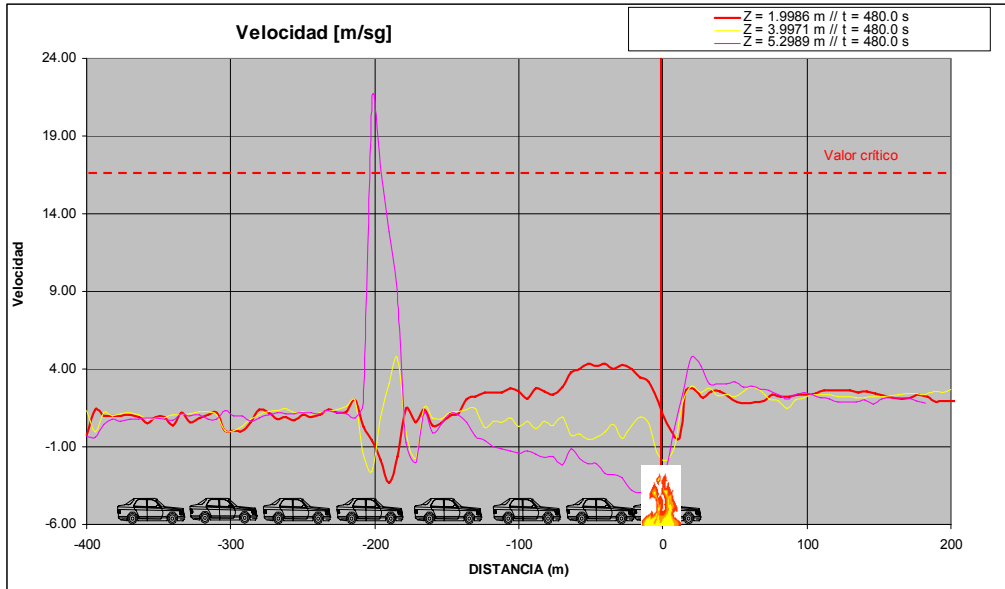




4.2.6.6.4.- Velocidades. (Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina).

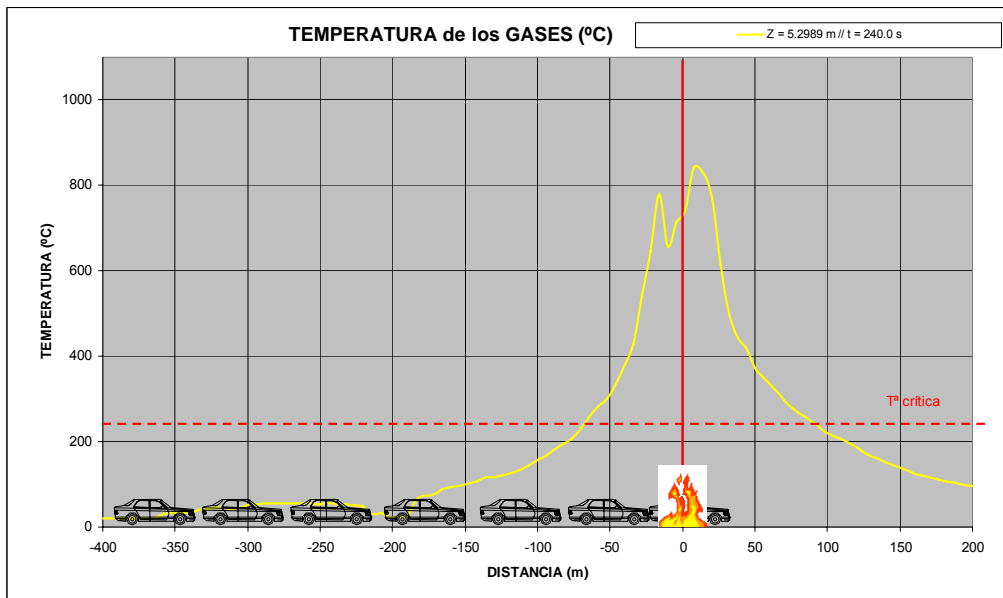
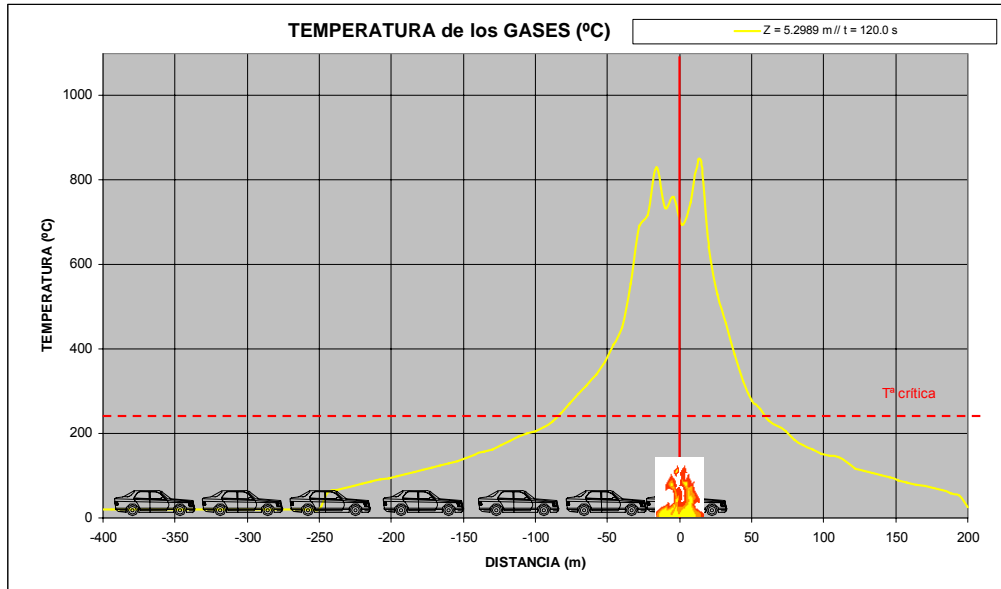
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

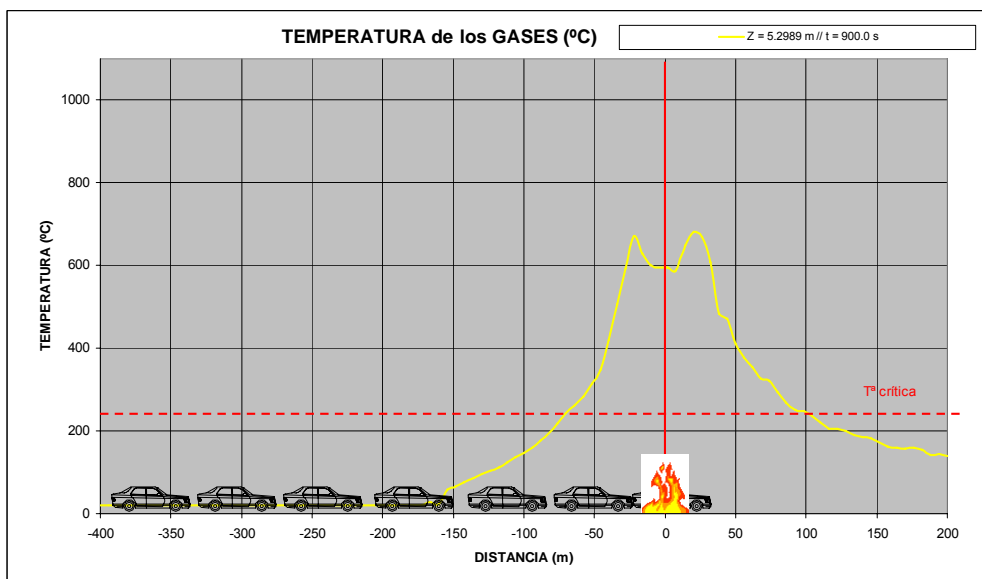
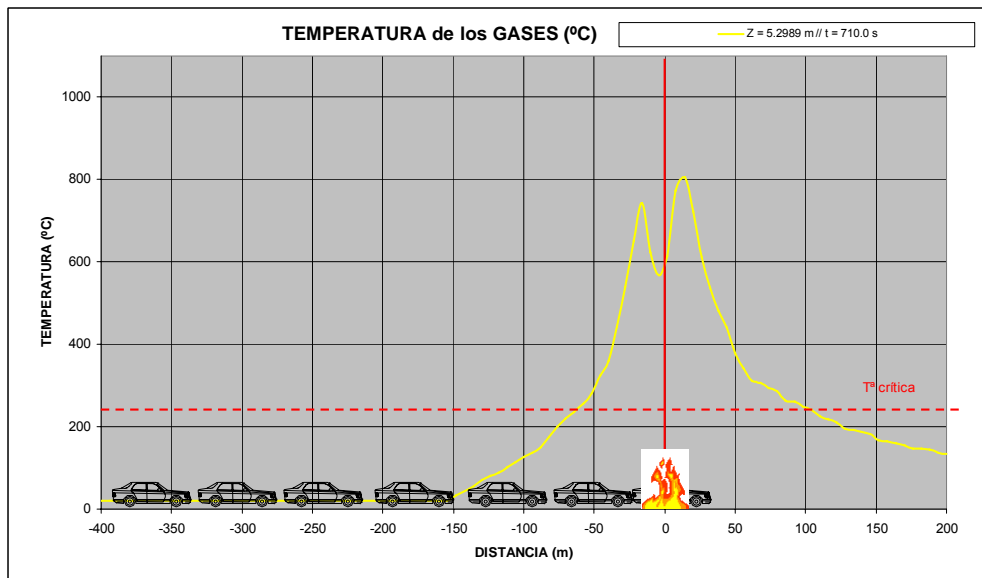
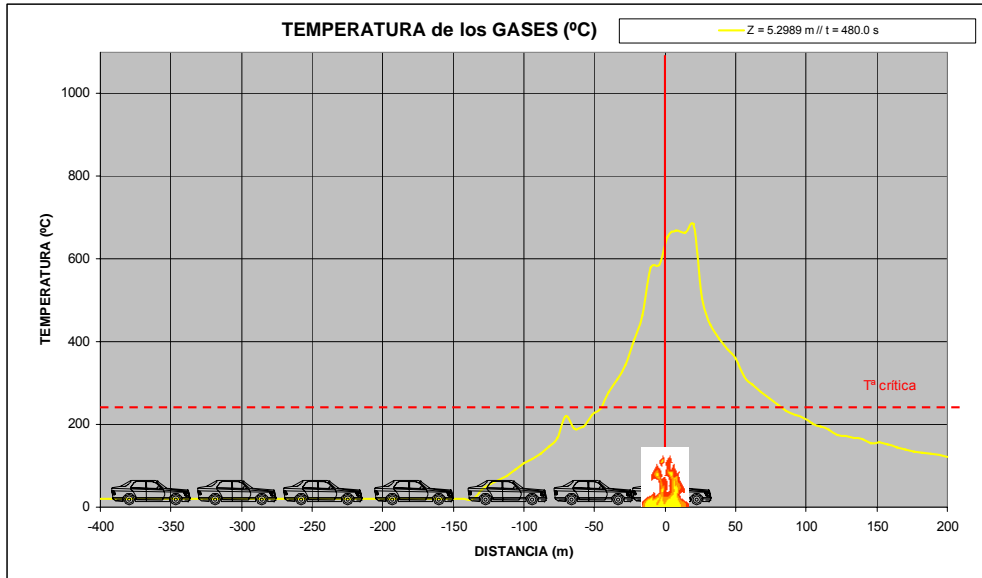




4.2.6.6.5.- Temperaturas. (Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina).

Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.





4.2.6.6.- Evolución de las partículas de humo. (Modo pozo 100 MW. Escenario con cortina).

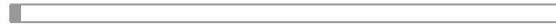
A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 120, 240, 480, 720 y 900 sg.

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 20
Time: 18.0



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 134
Time: 120.6

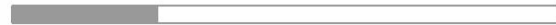


Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 266
Time: 239.4



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 533
Time: 479.7



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 791
Time: 711.9



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

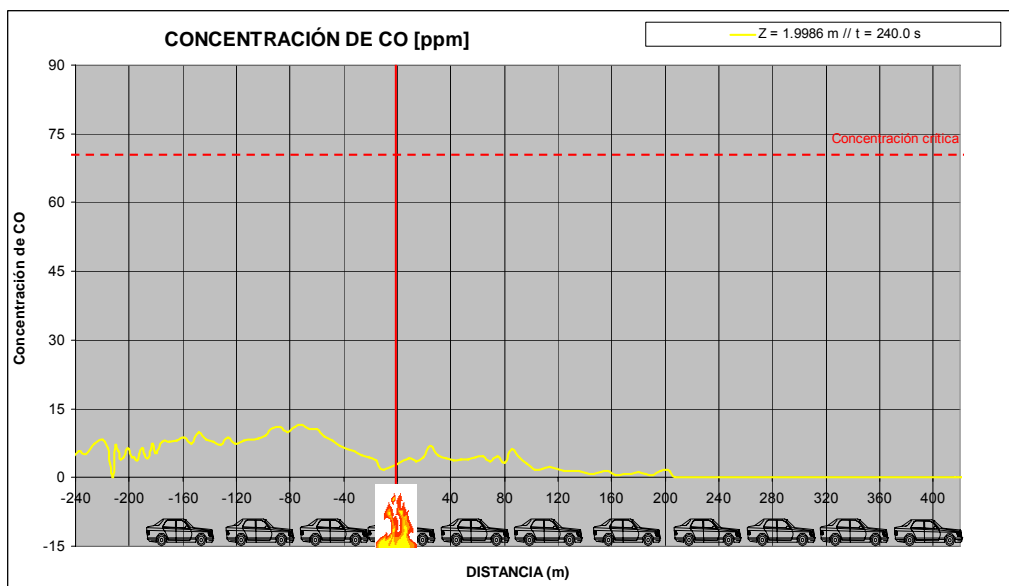
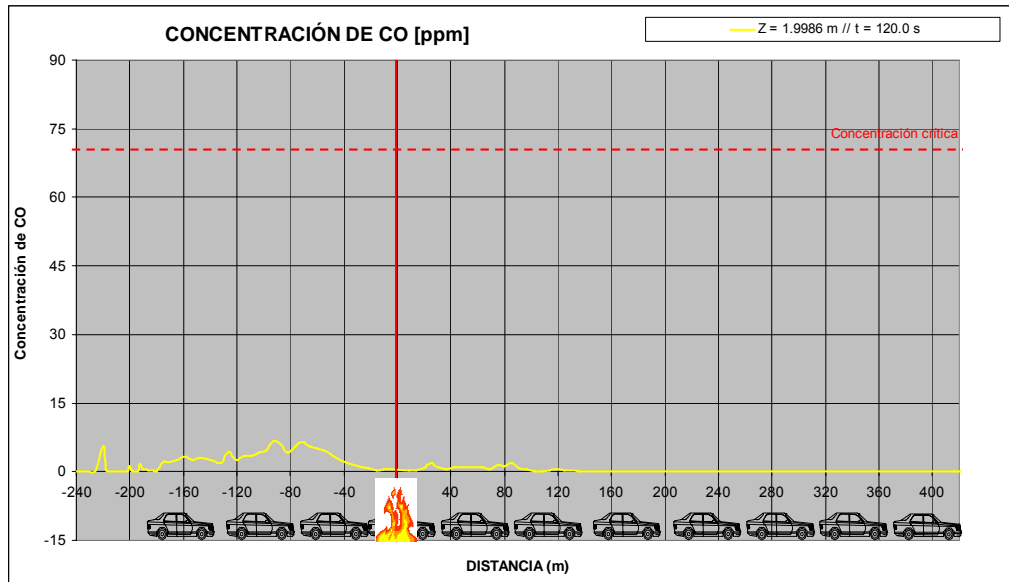
Frame: 1000
Time: 900.0

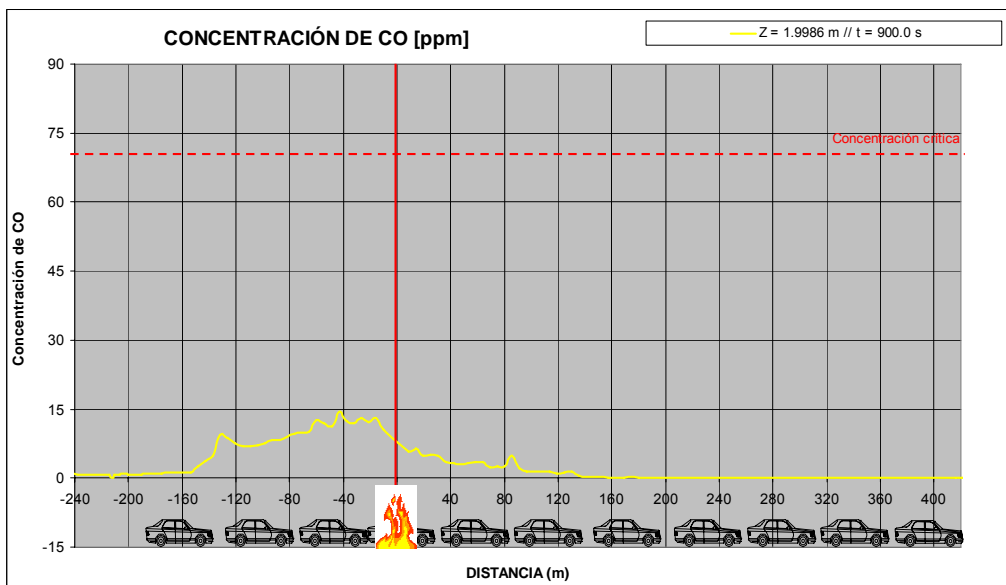
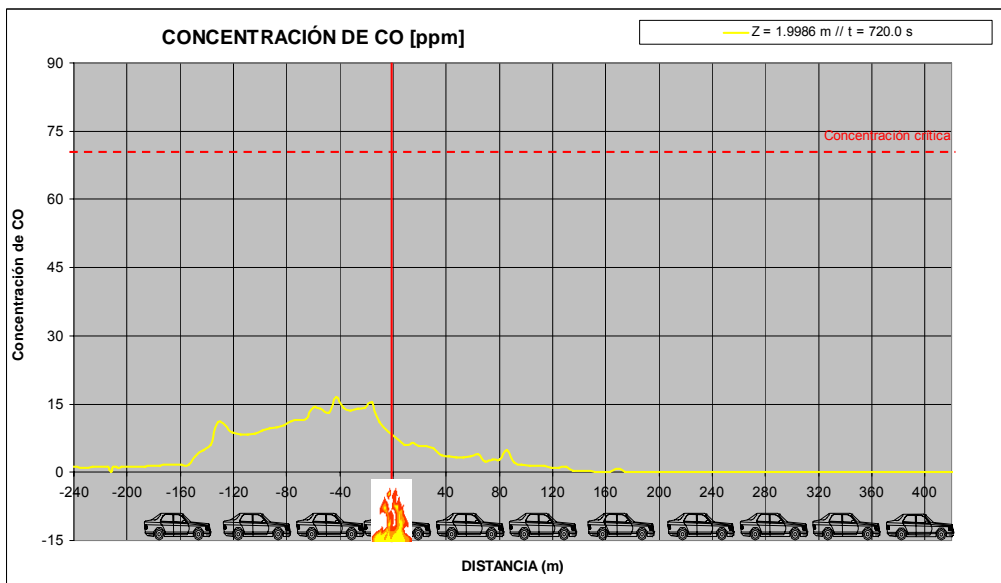
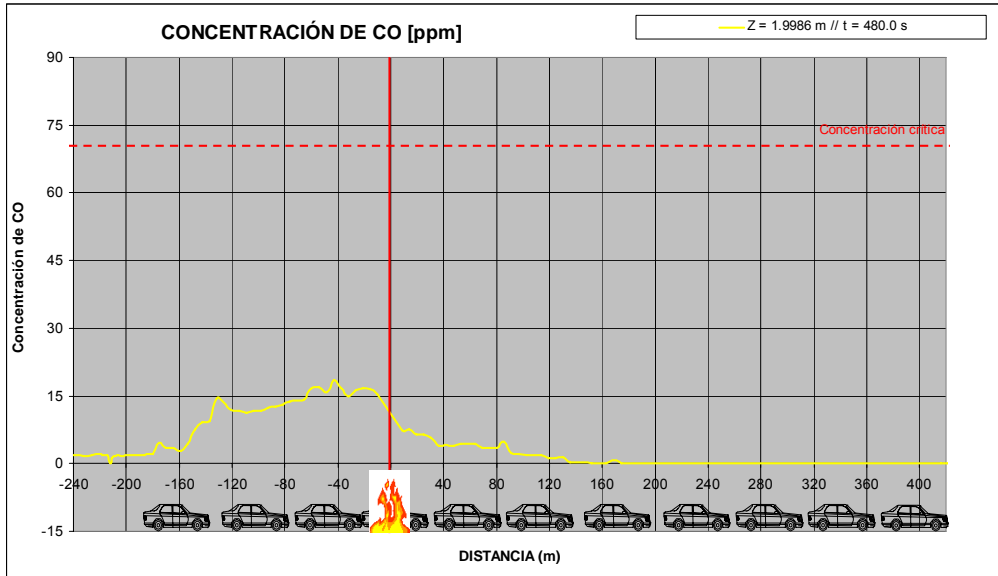


4.2.6.7.- Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial.

4.2.6.7.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial).

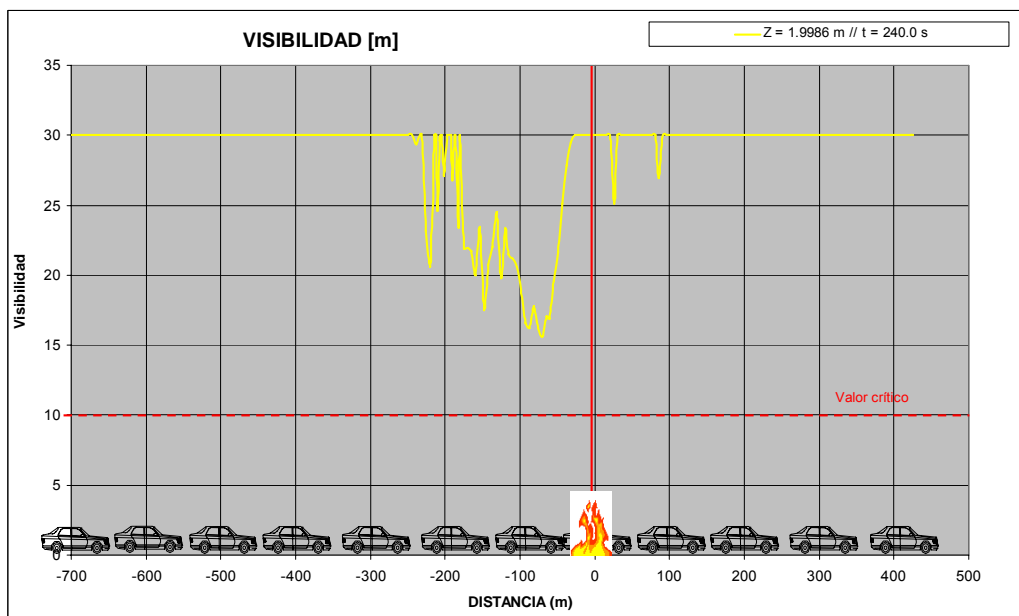
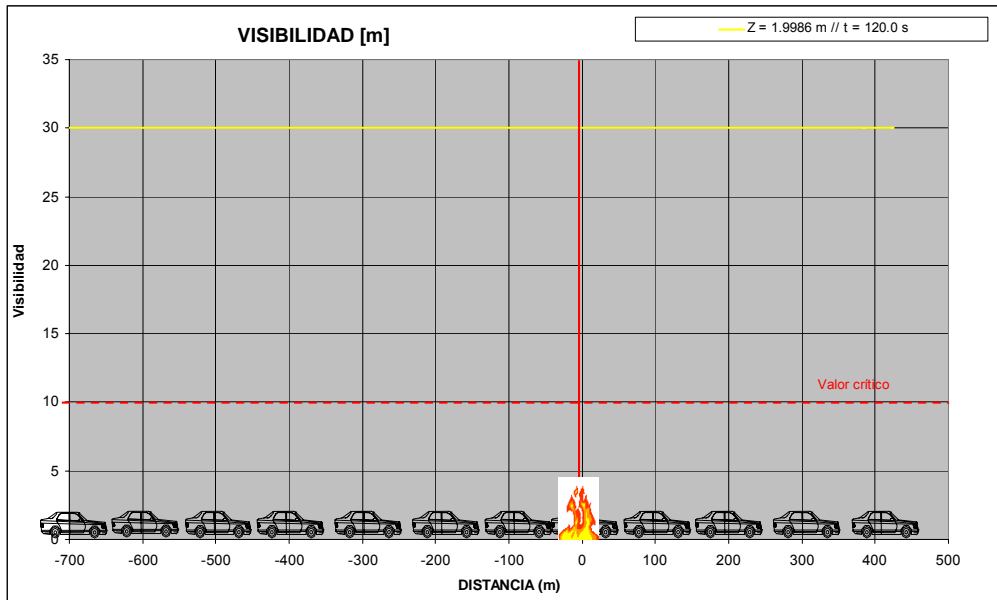
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

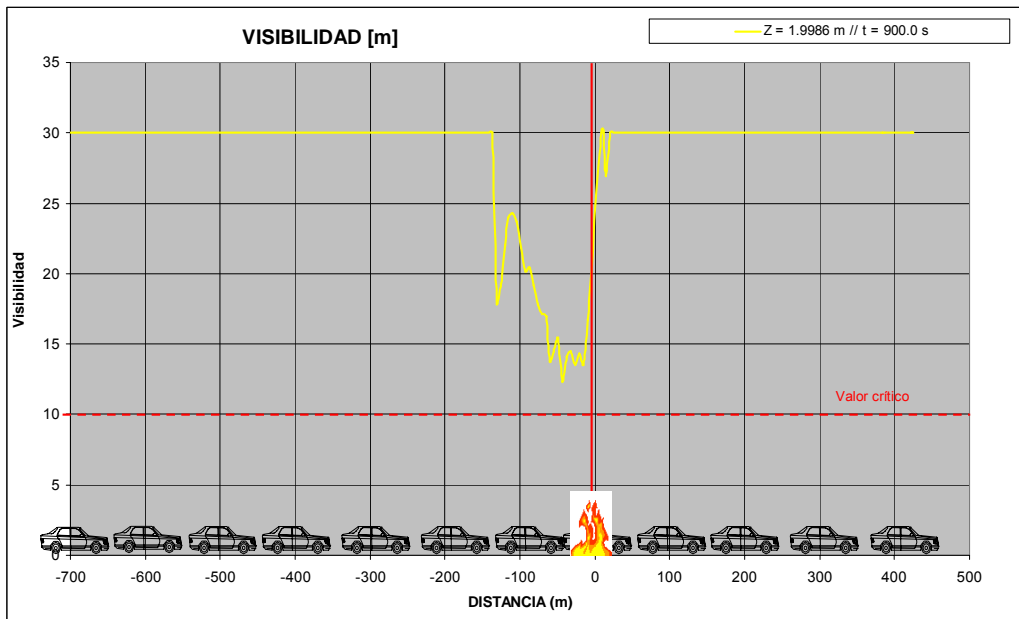
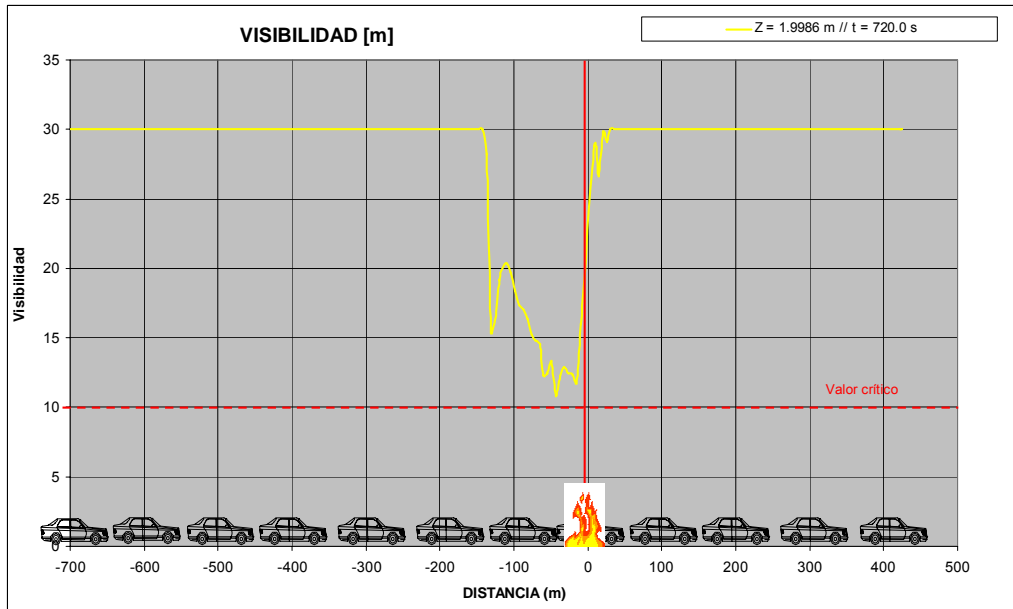
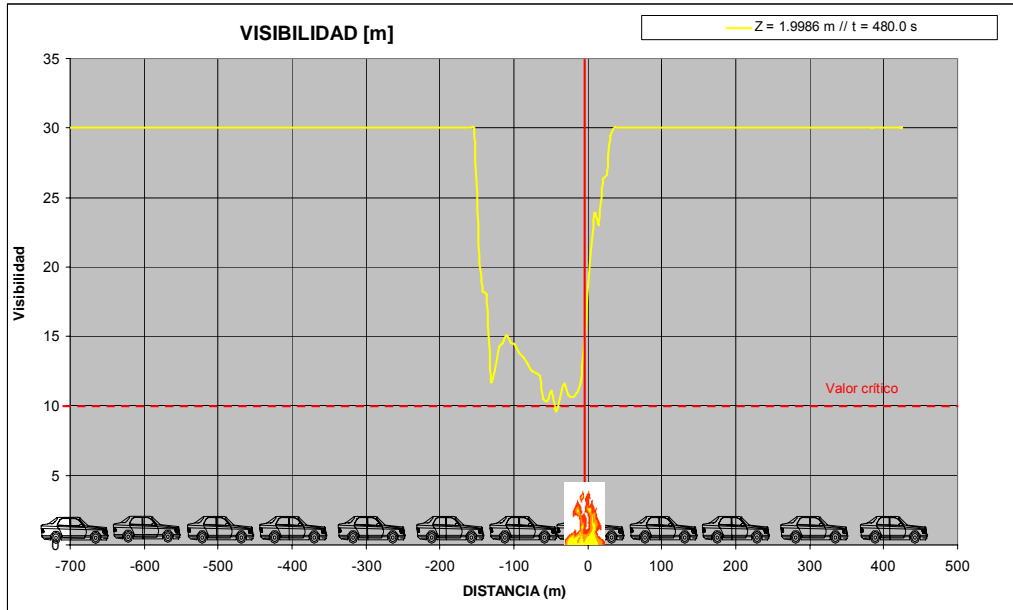




4.2.6.7.2.- Visibilidad. (Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial).

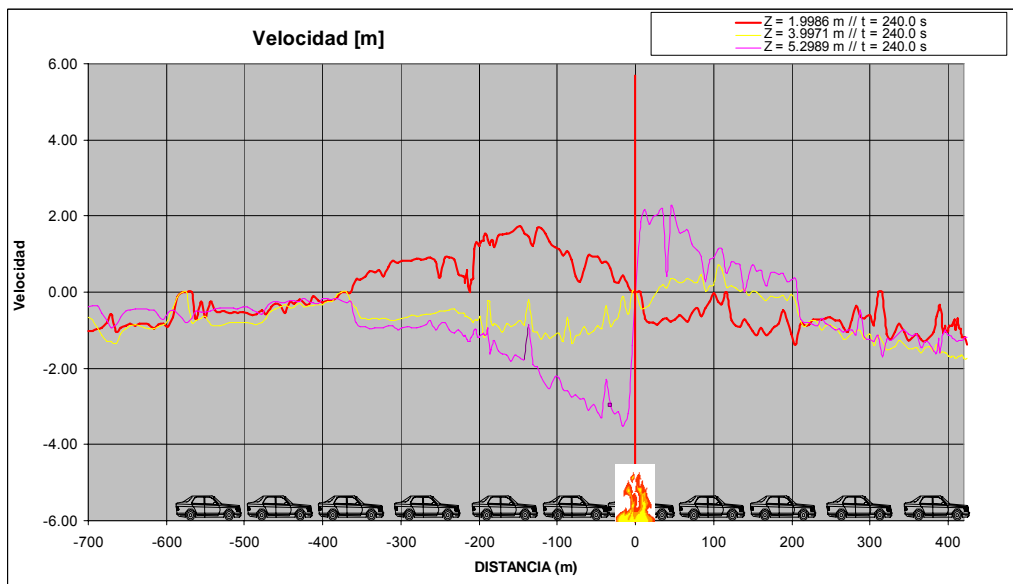
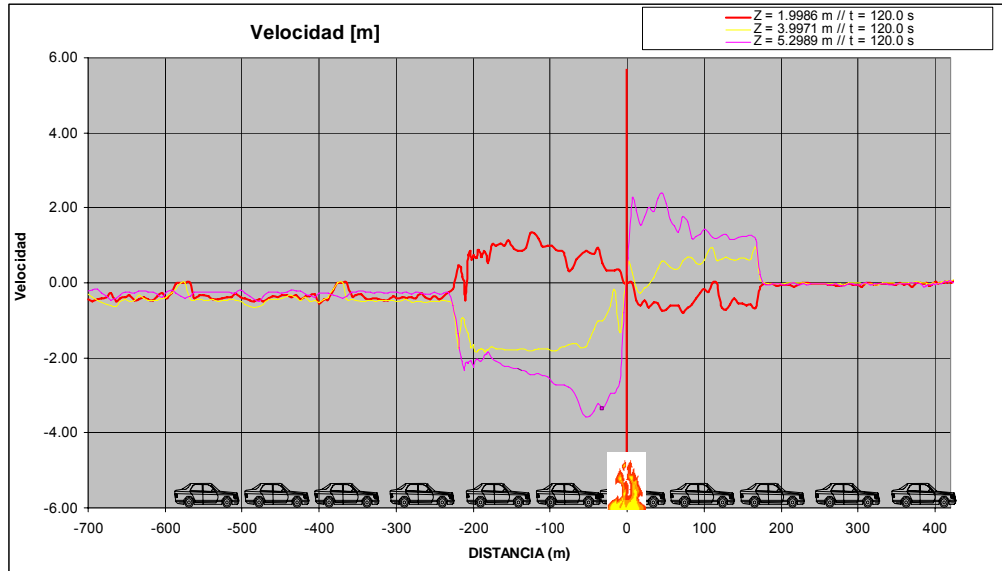
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

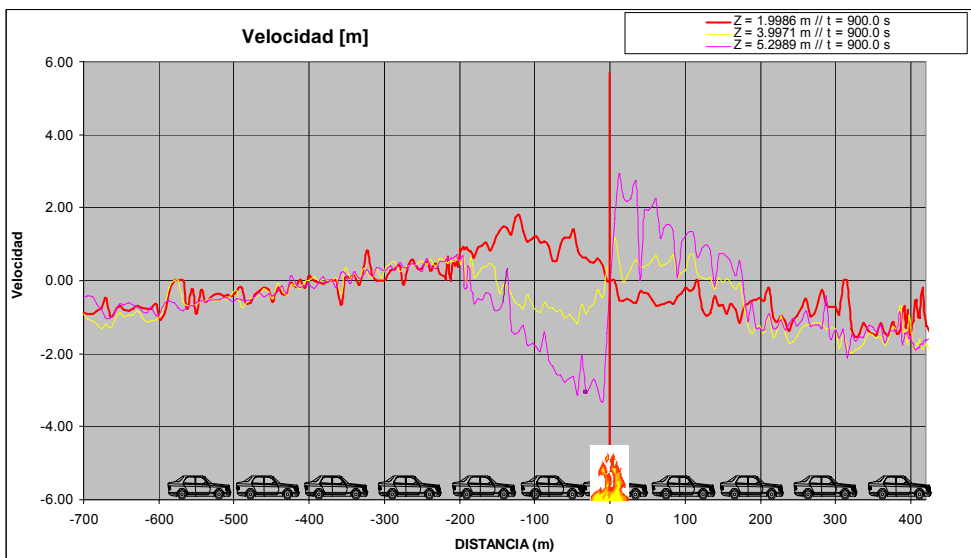
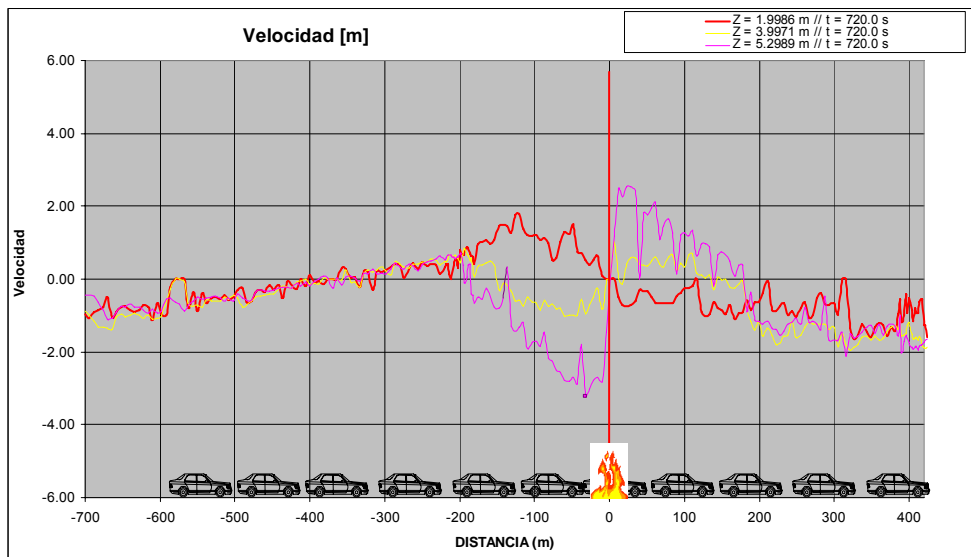
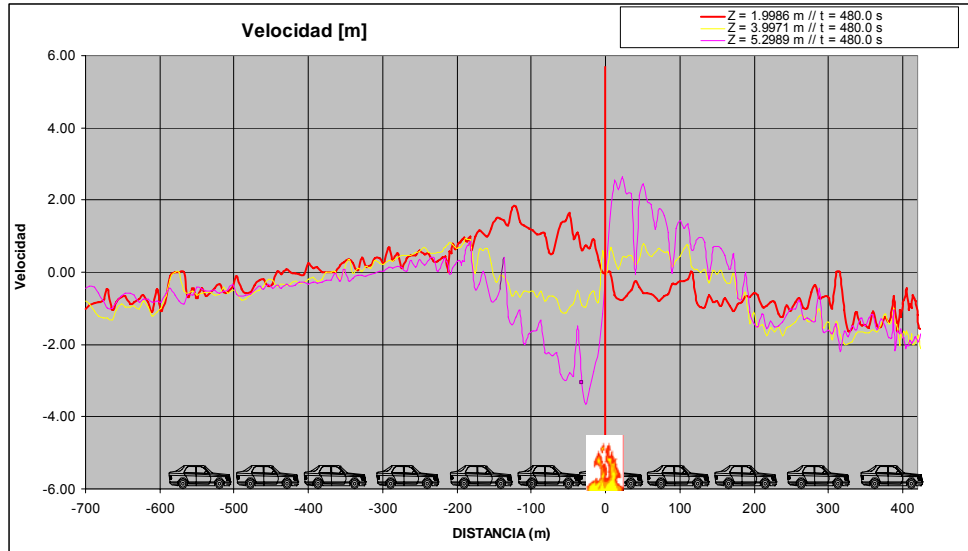




4.2.6.7.3.- Velocidades. (Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial).

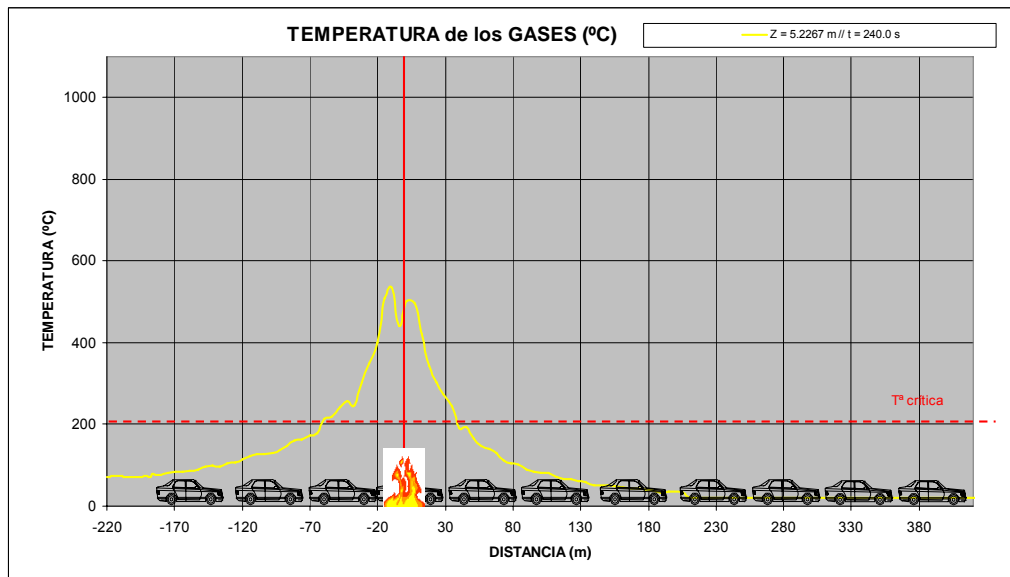
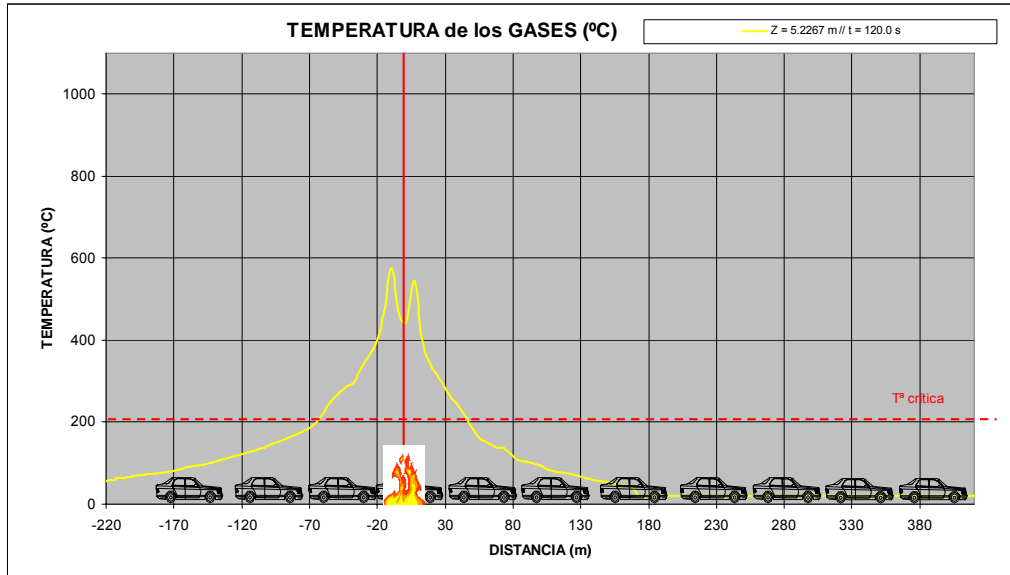
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

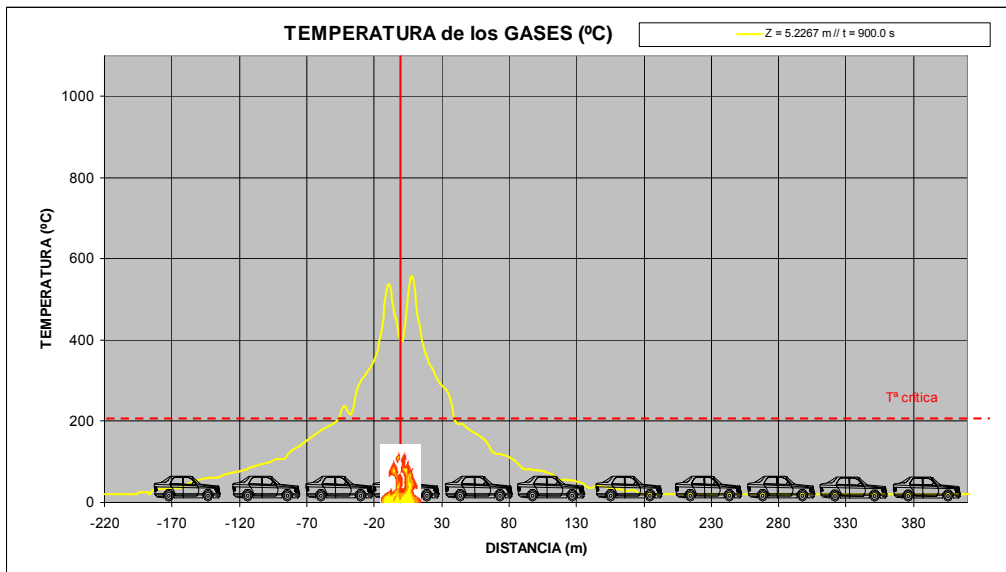
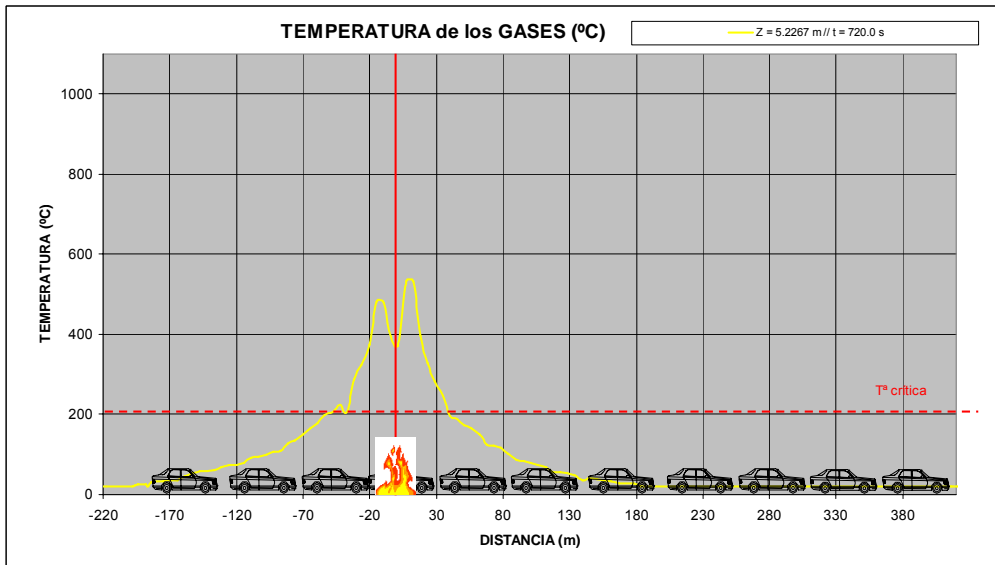
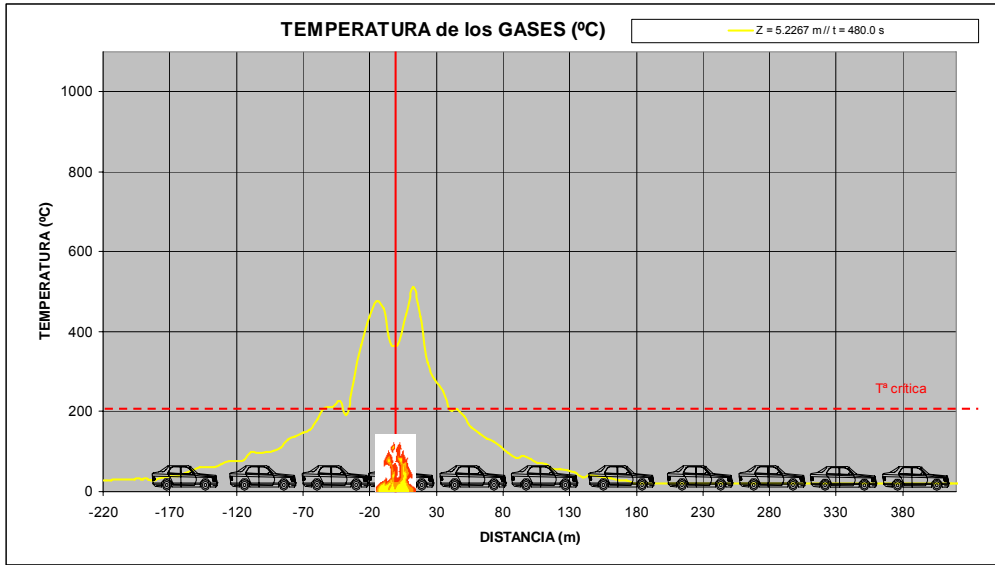




4.2.6.7.4.- Temperaturas. (Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial).

Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.





4.2.6.7.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo transversal, 30 MW. Escenario inicial).

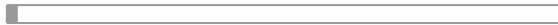
A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 120, 240, 480, 720 y 900 sg.

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 20
Time: 18.0



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 134
Time: 120.6

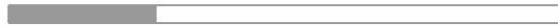


Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 266
Time: 239.4



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 533
Time: 479.7



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 791
Time: 711.9



mesh: 1

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 1000
Time: 900.0

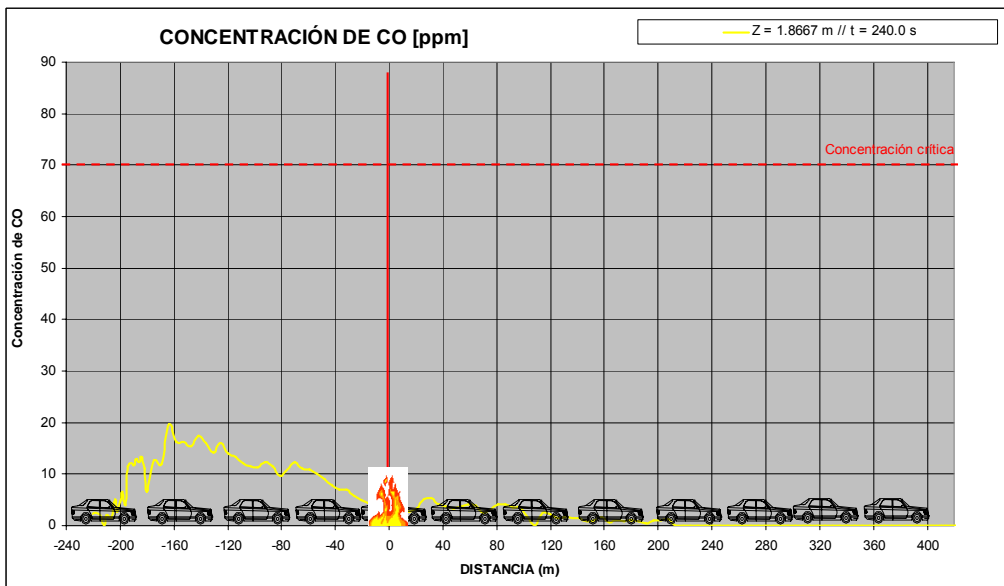
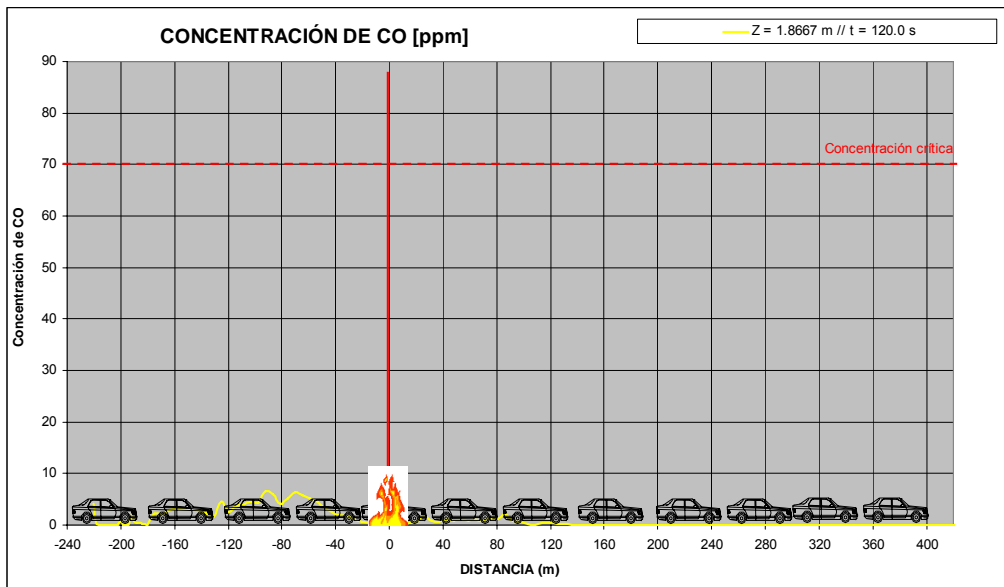


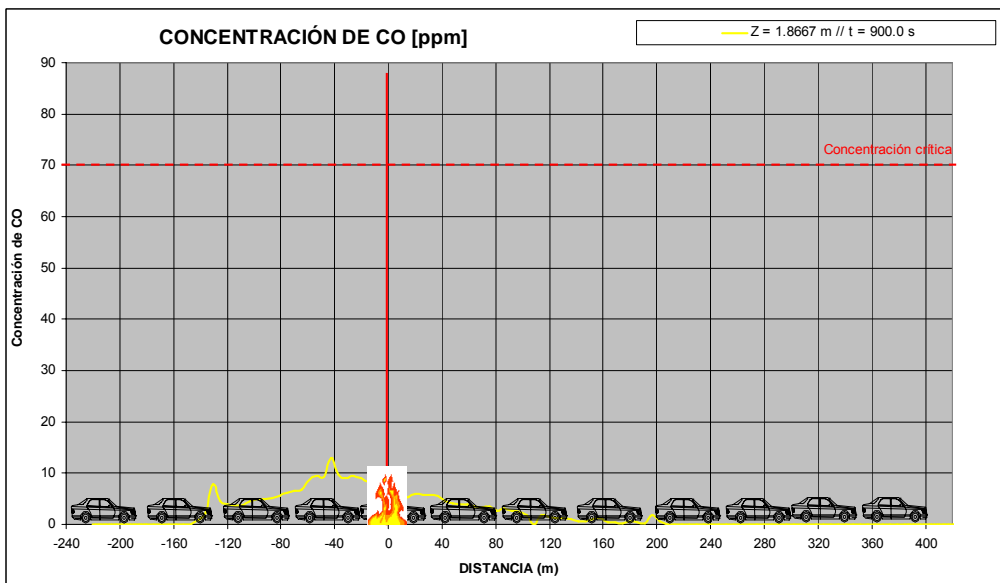
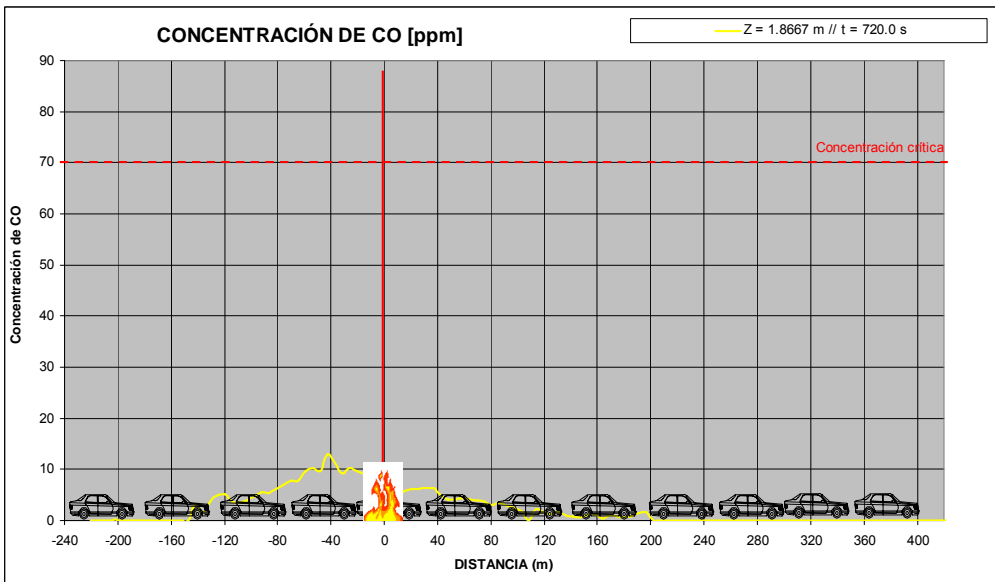
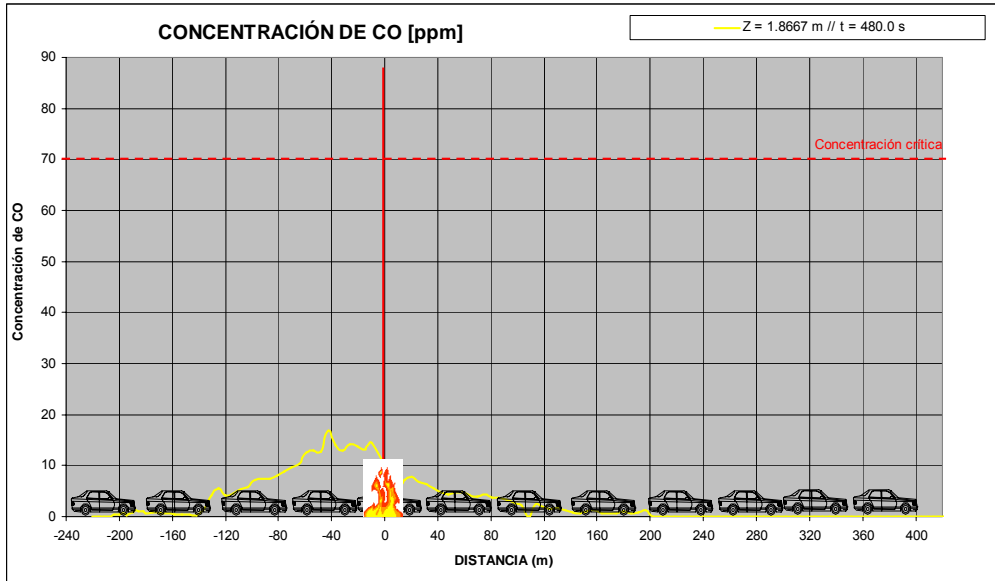
mesh: 1

4.2.6.8.- Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina.

4.2.6.8.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina).

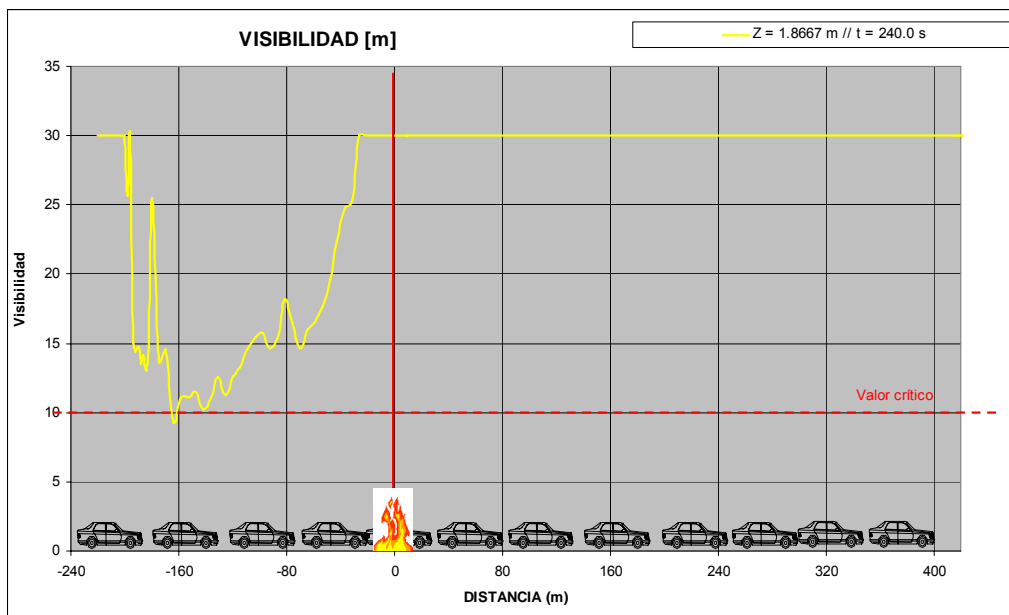
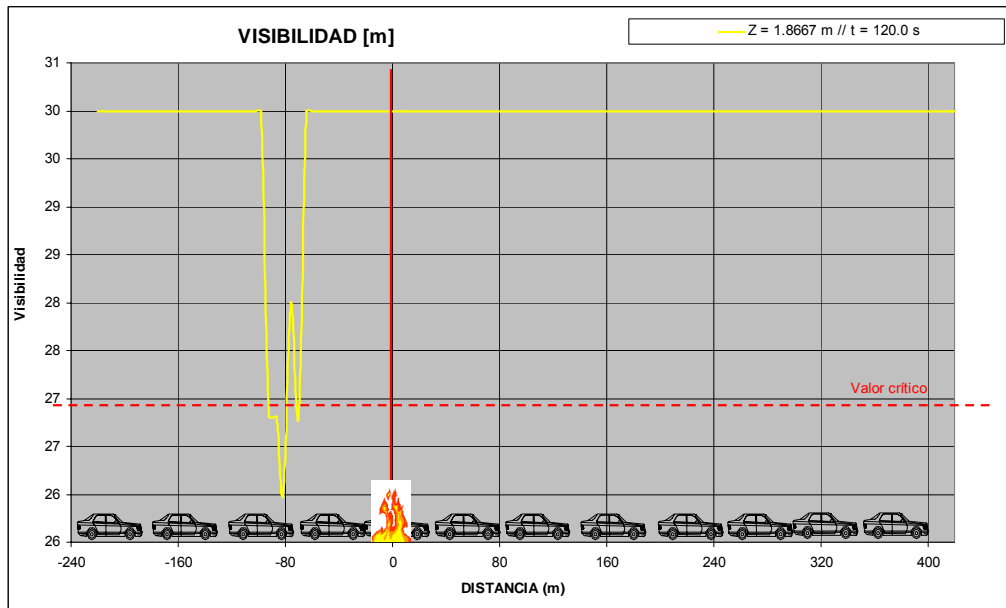
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

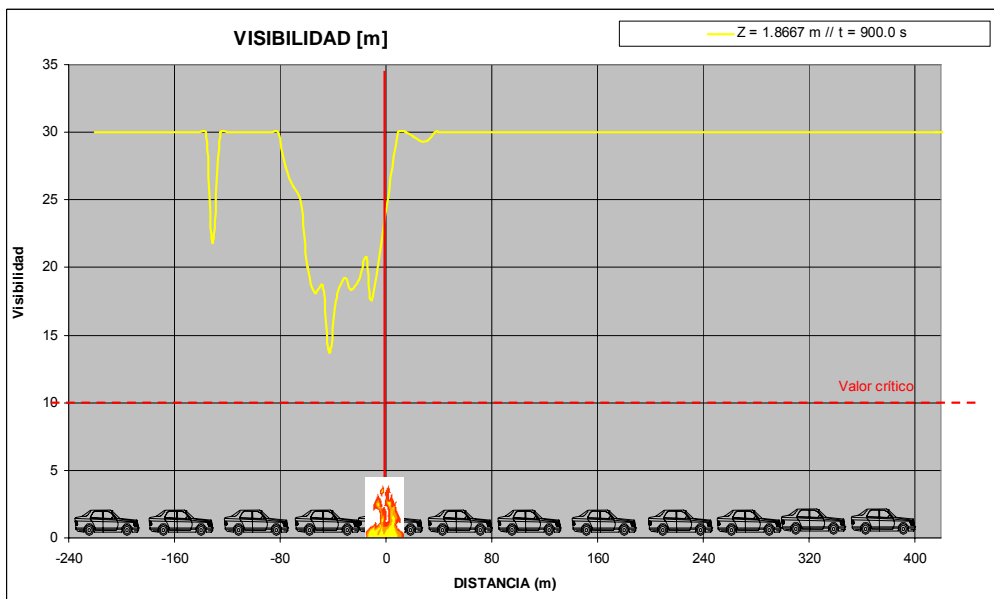
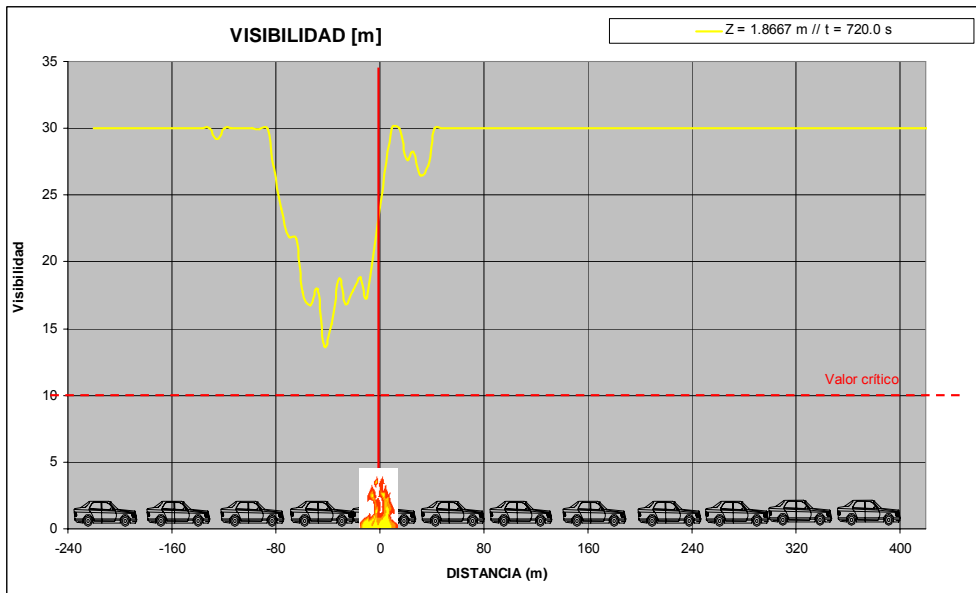
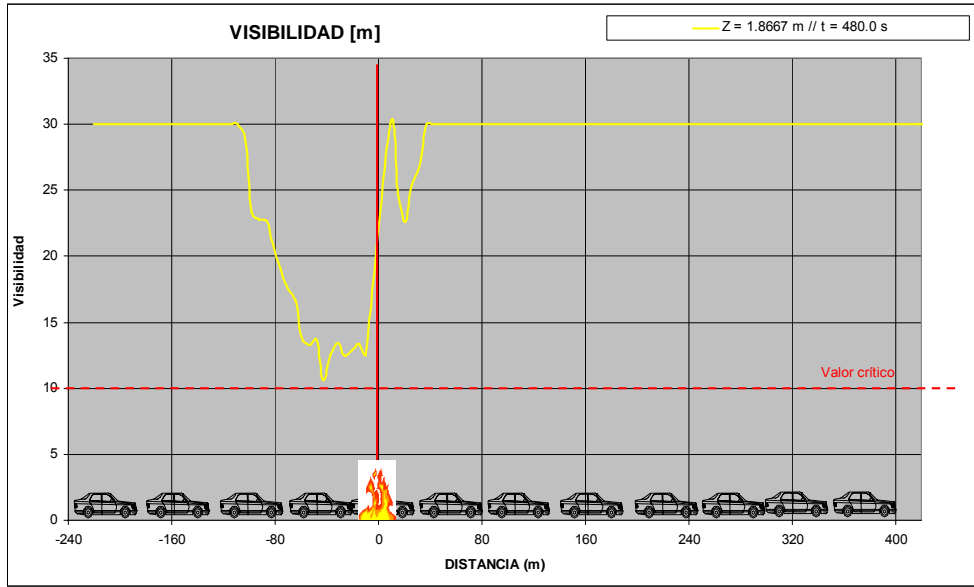




4.2.6.8.2.- *Visibilidad. (Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina).*

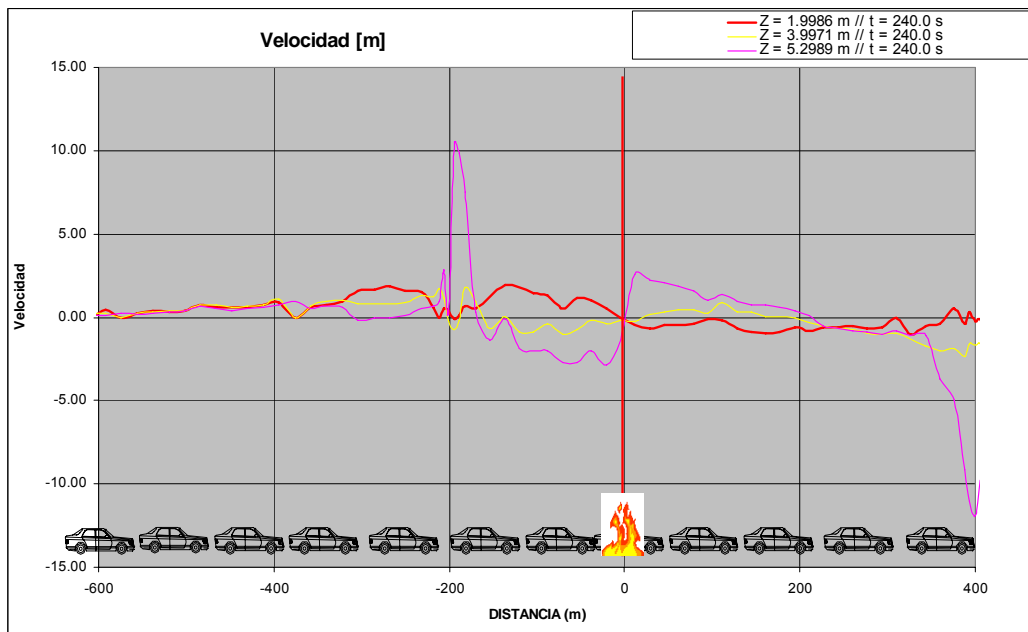
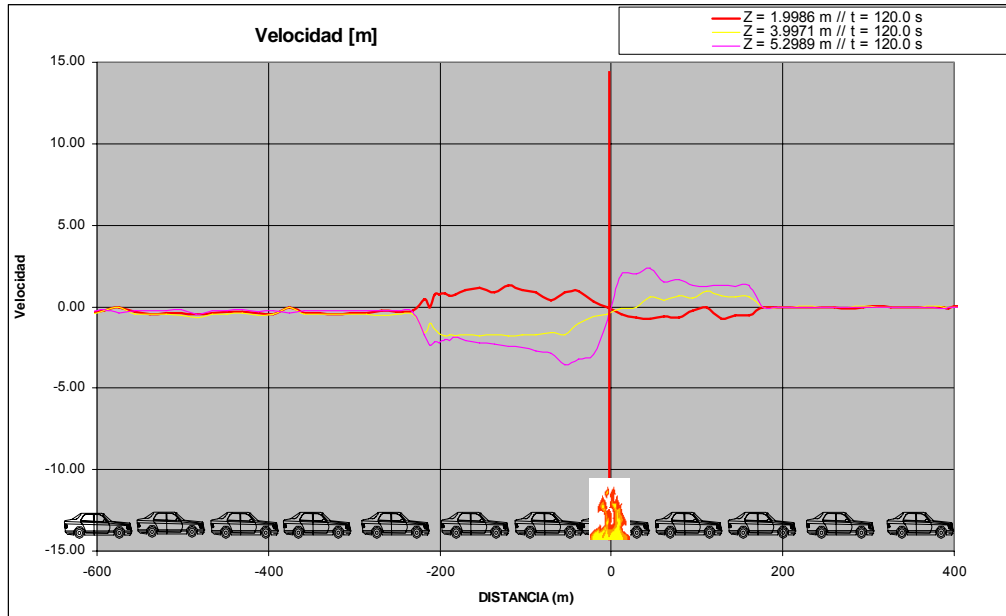
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

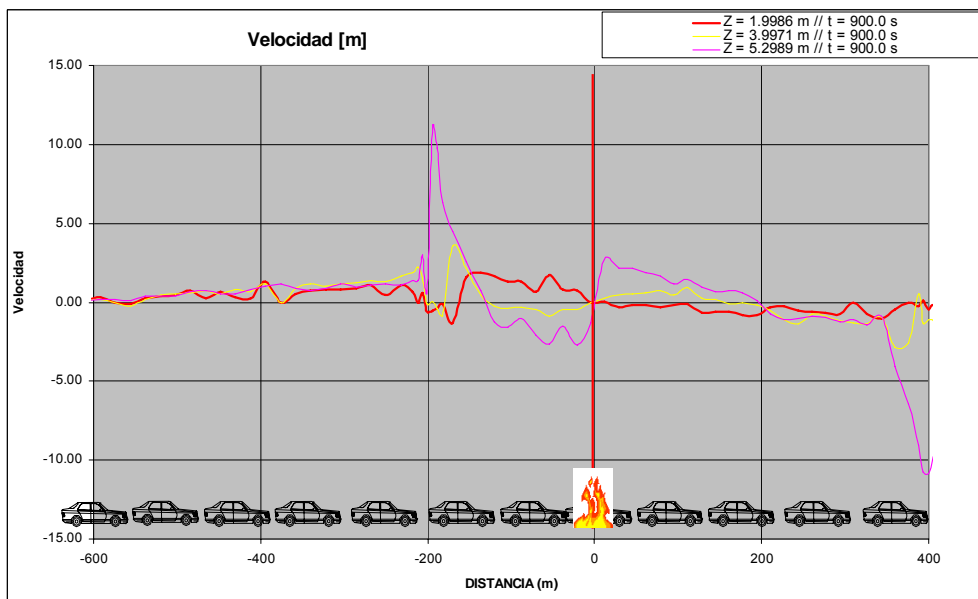
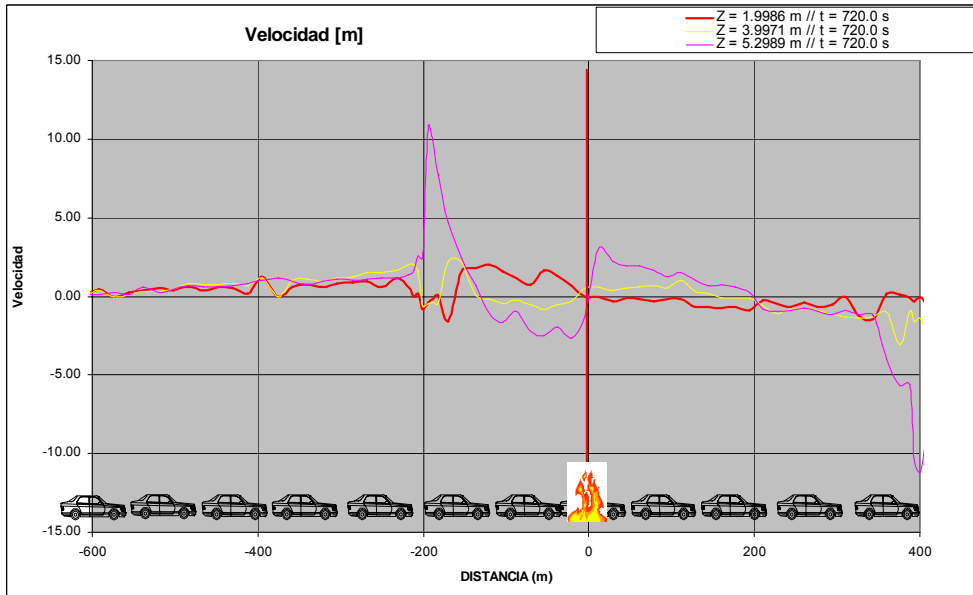
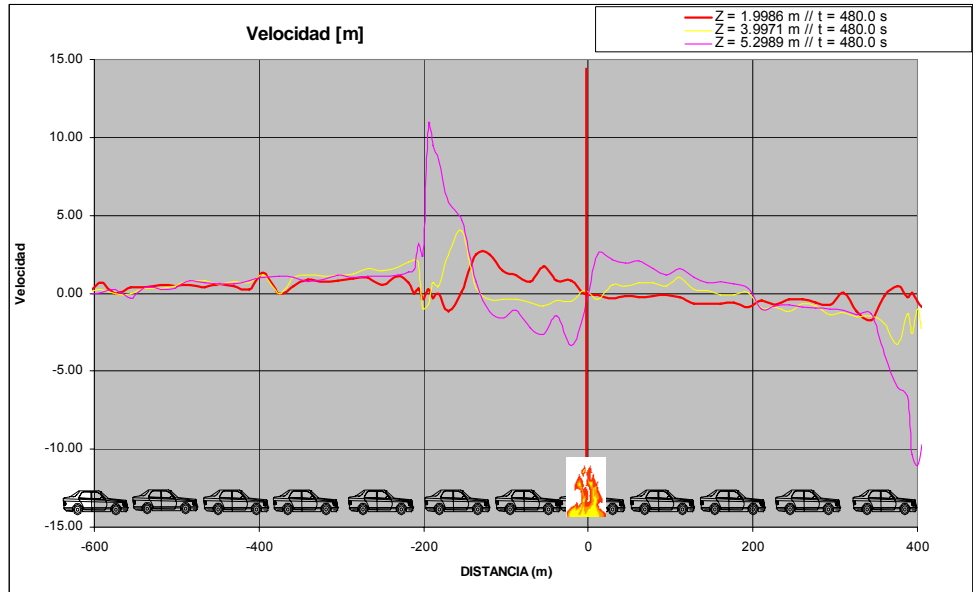




4.2.6.8.3.- Velocidades. . (Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina).

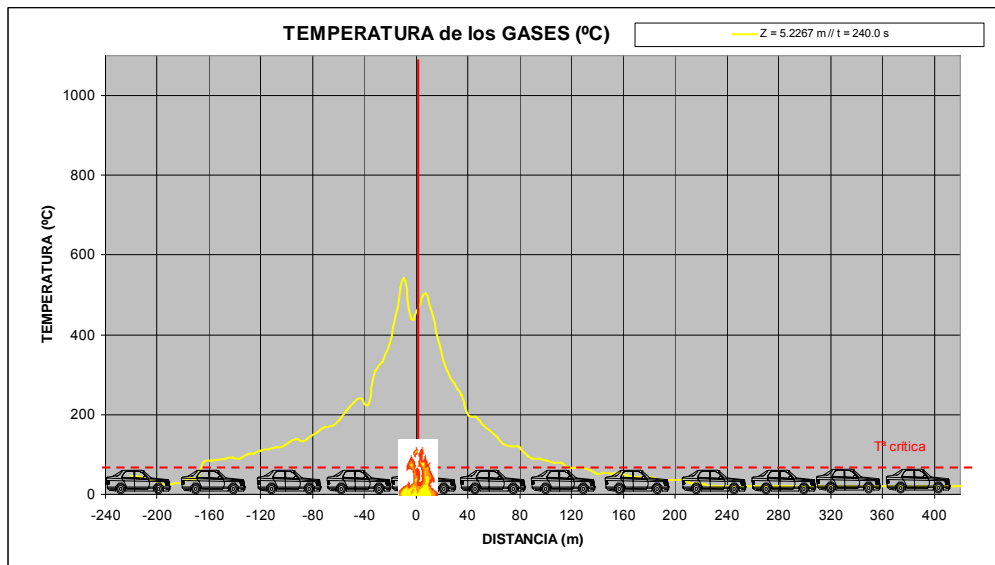
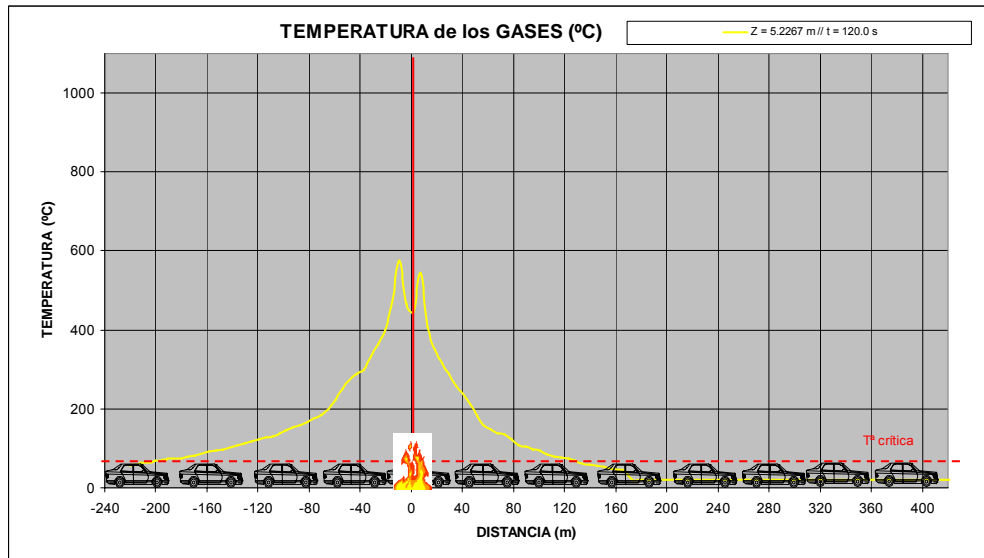
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

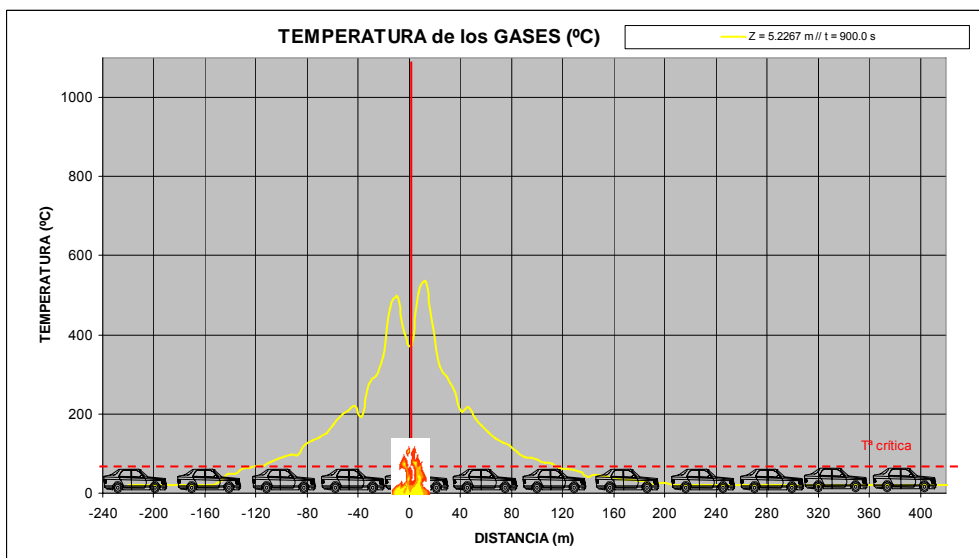
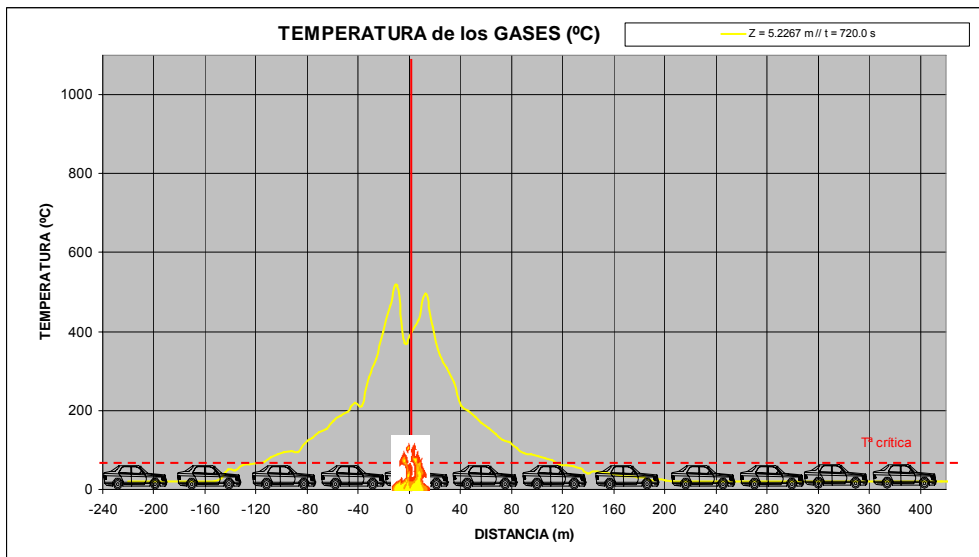
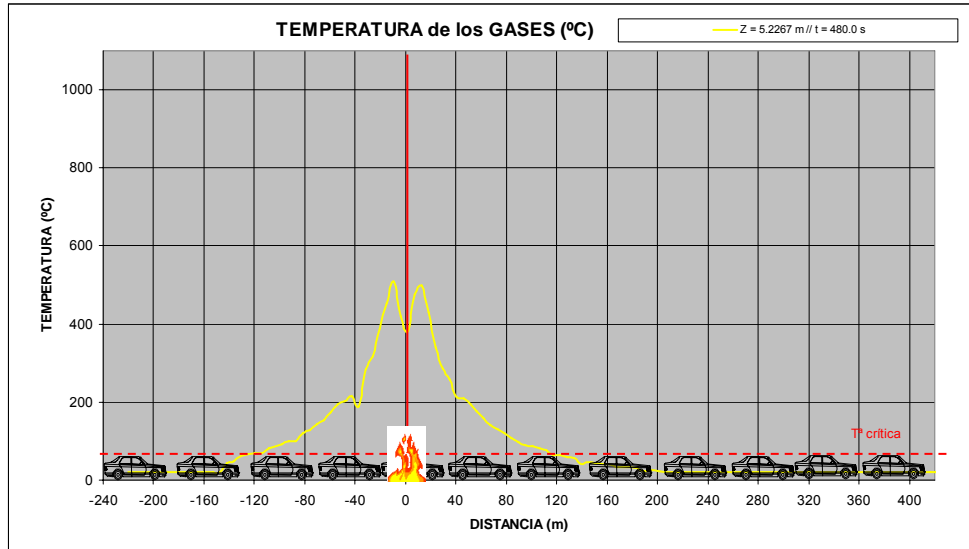




4.2.6.8.4.- Temperaturas. (Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina).

Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.



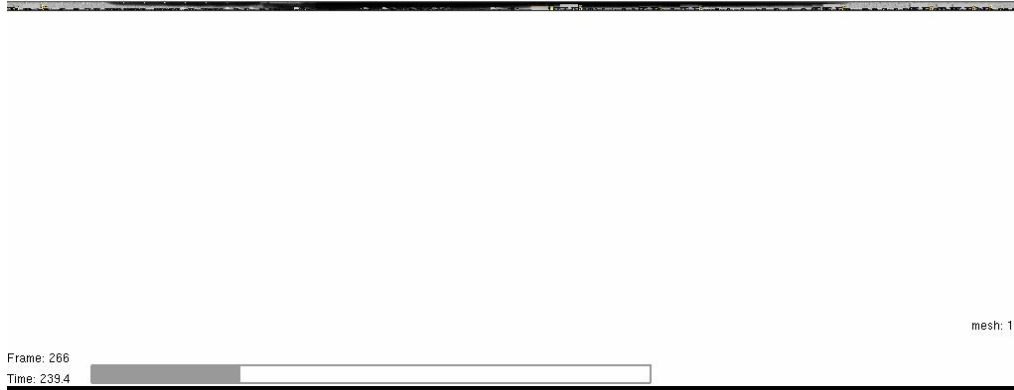


4.2.6.8.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo transversal 30 MW. Escenario con cortina).

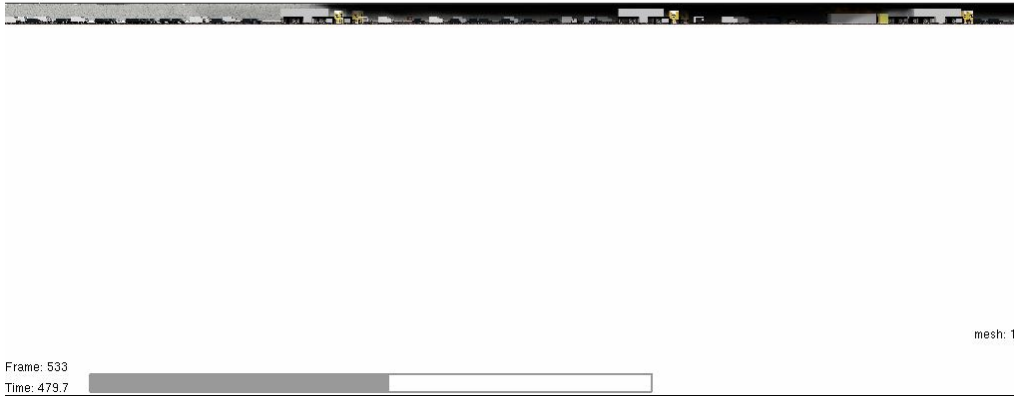
A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 120, 240, 480, 720 y 900 sg.



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 791

Time: 711.9



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 1000

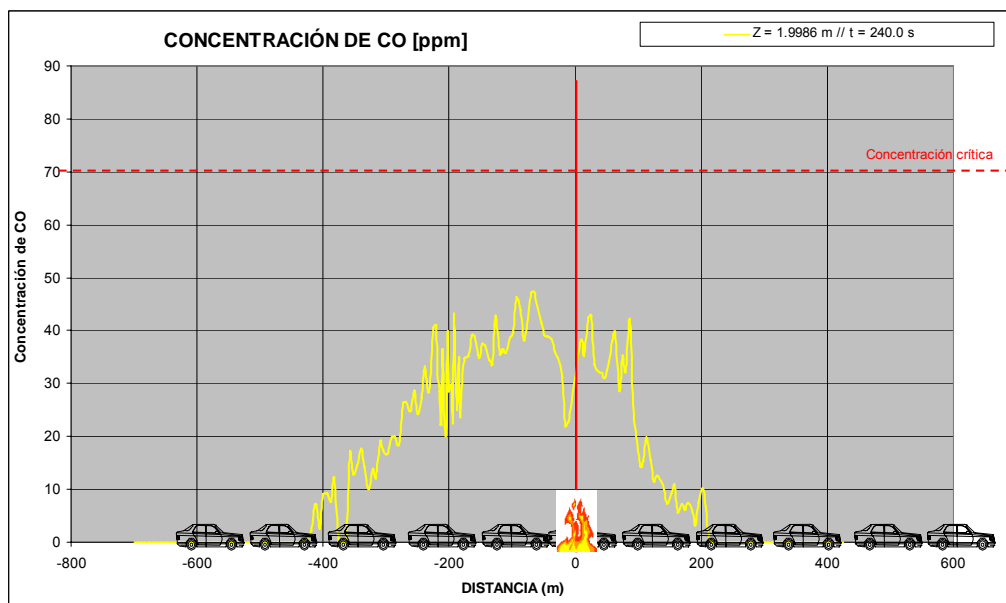
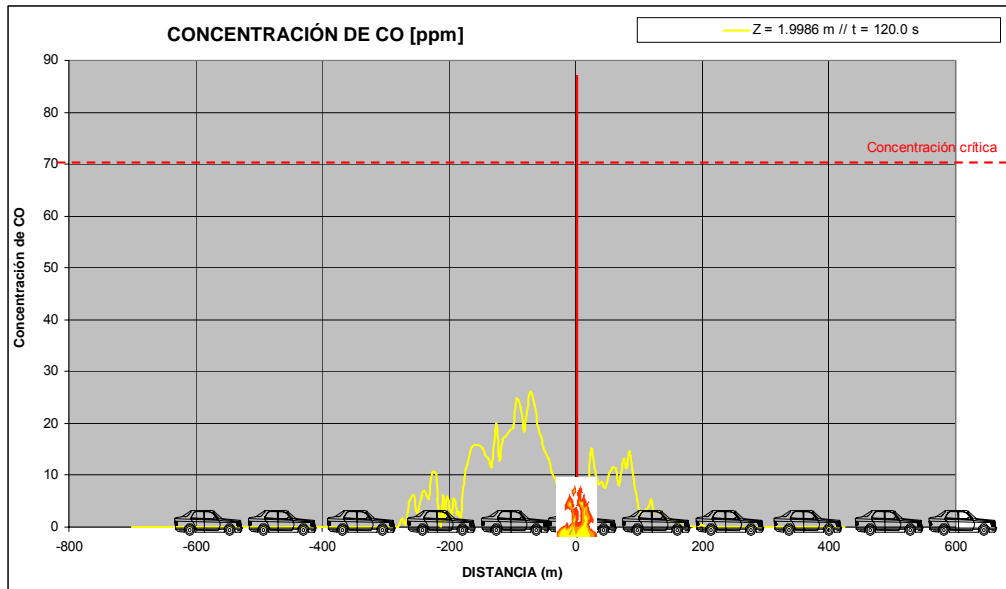
Time: 900.0

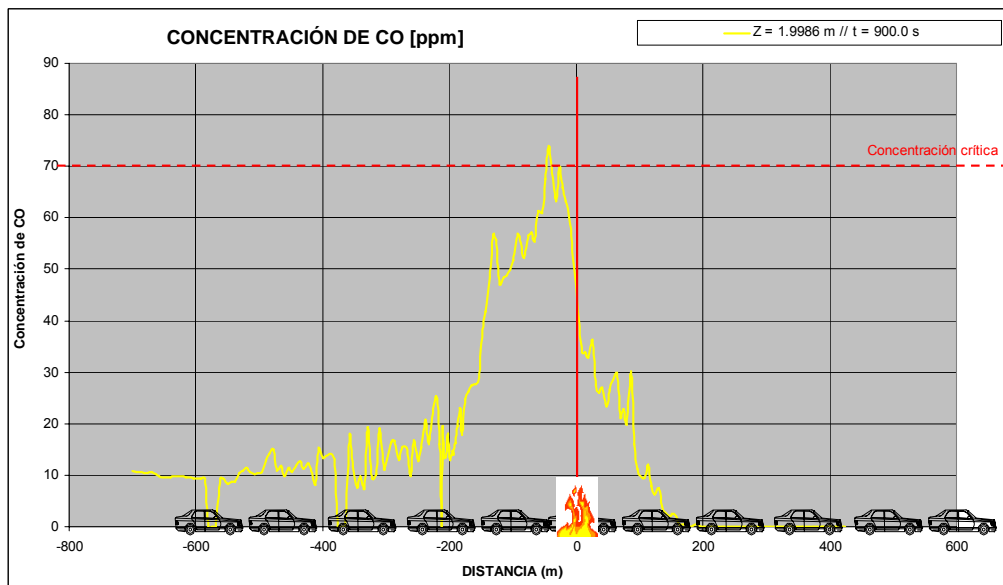
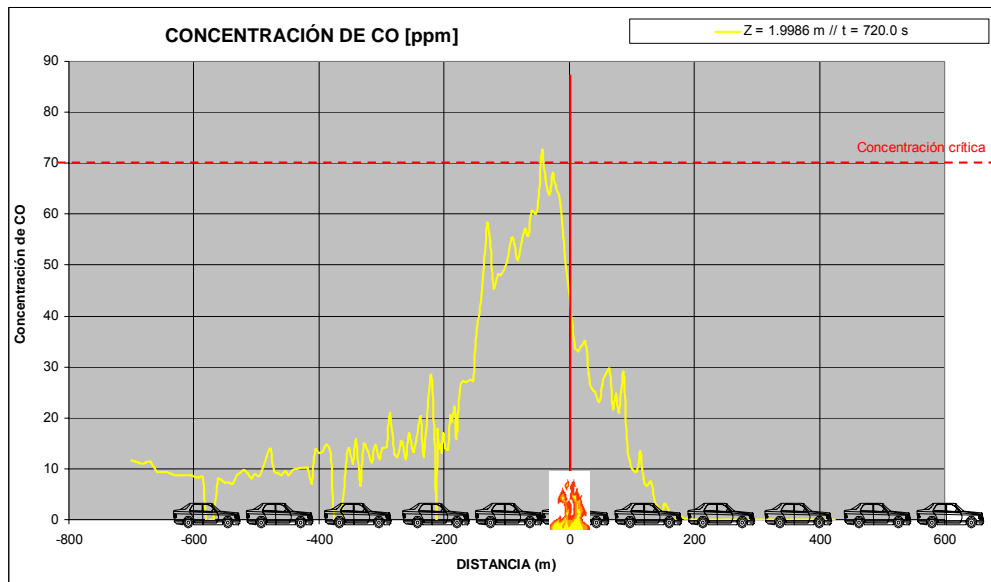
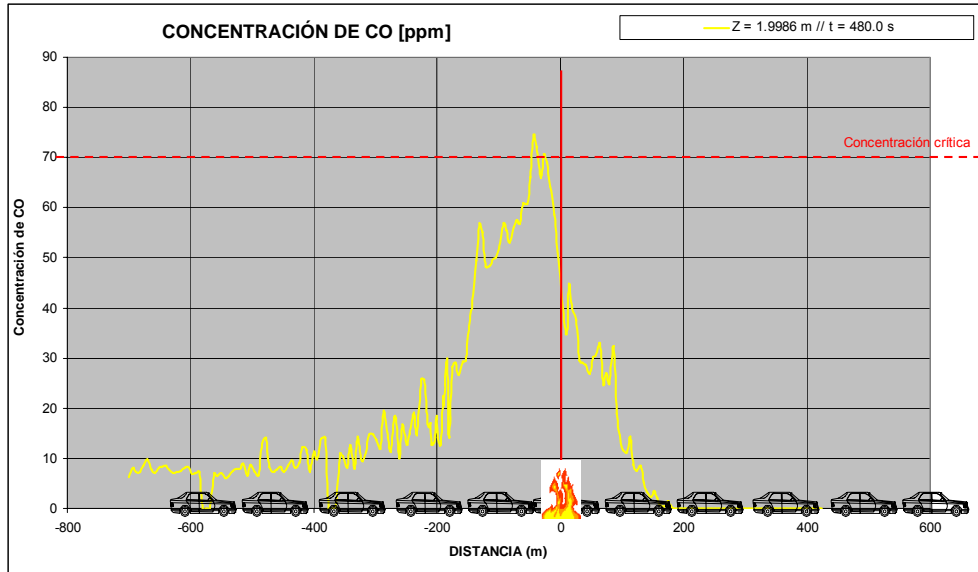


4.2.6.9.- Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial.

4.2.6.9.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial).

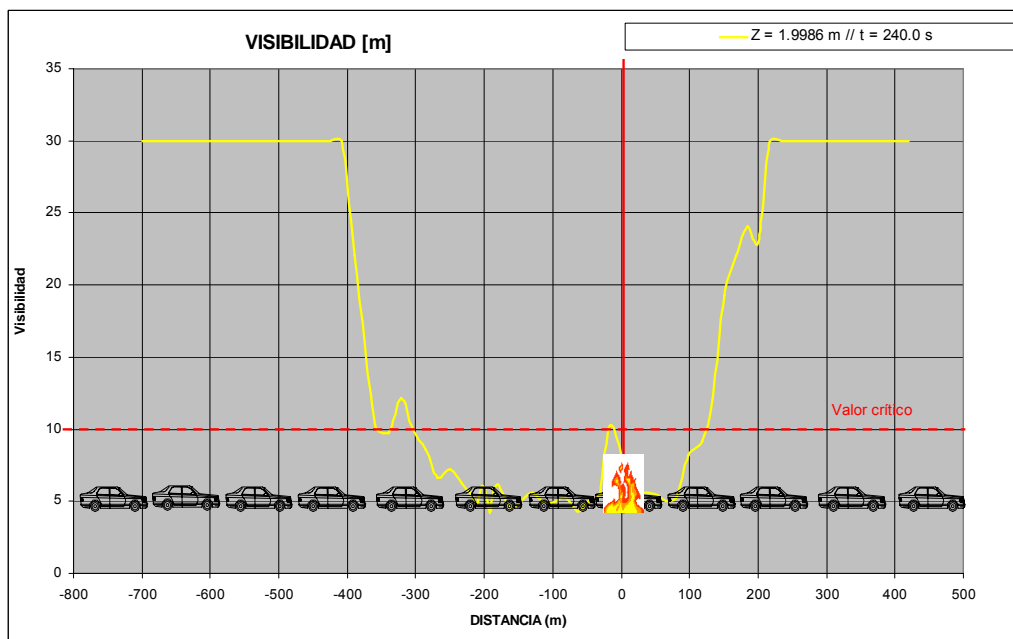
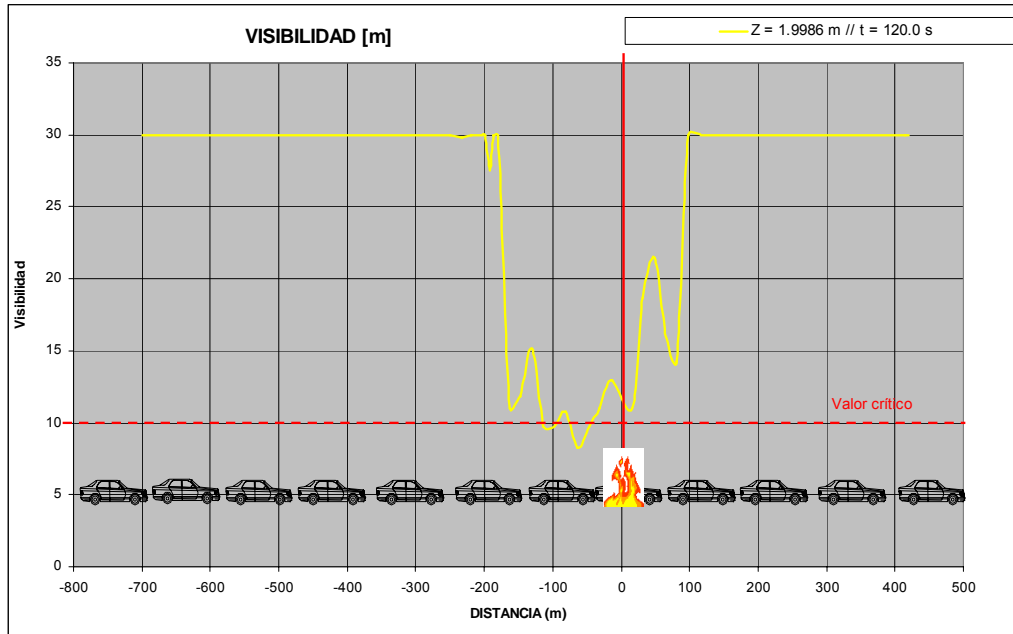
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

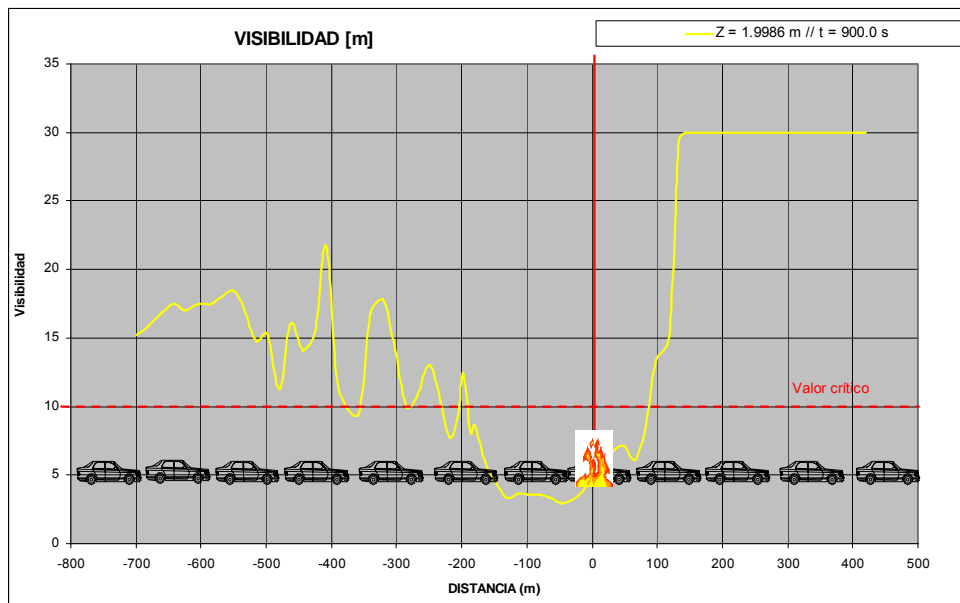
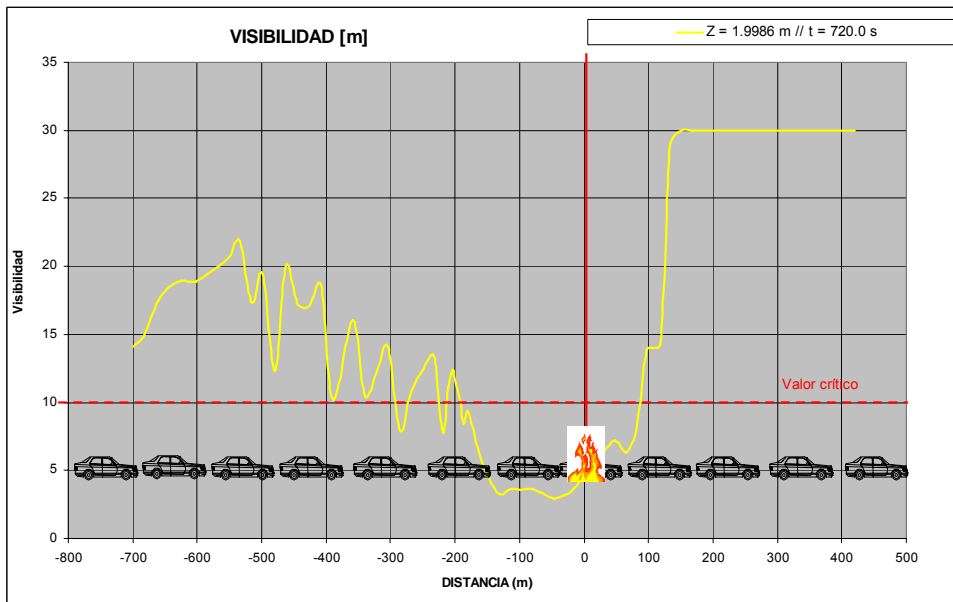
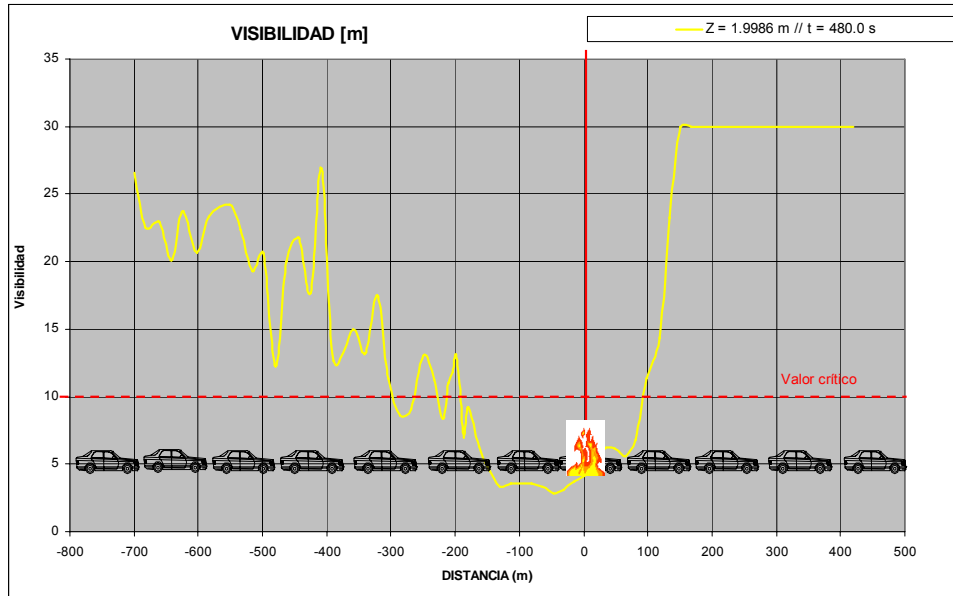




4.2.6.9.2.- *Visibilidad. (Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial).*

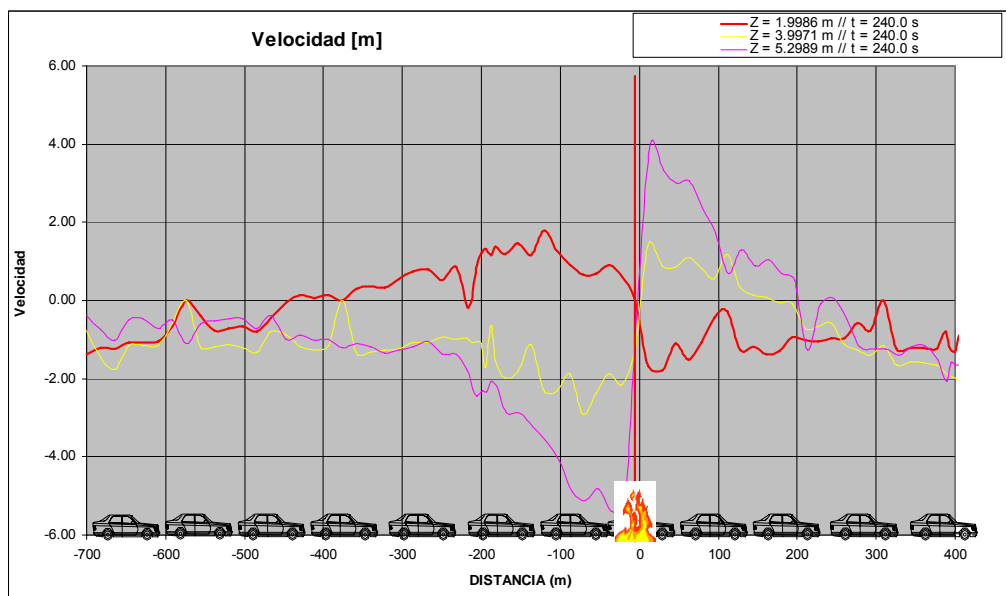
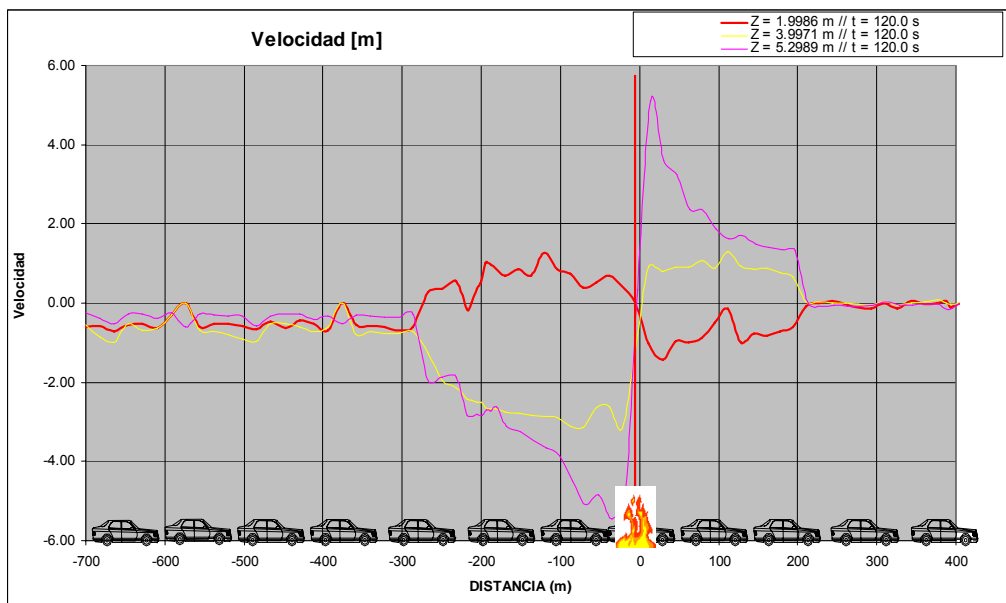
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

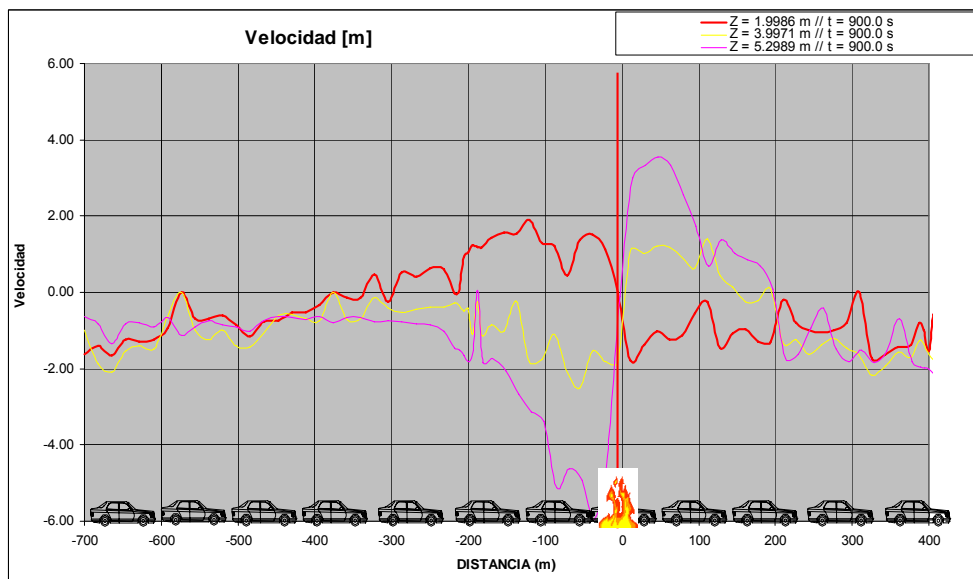
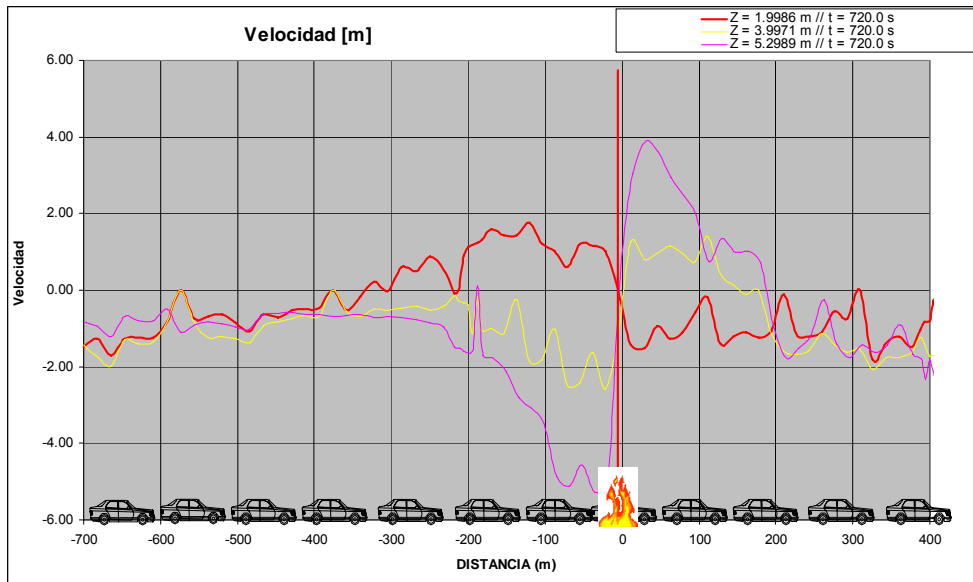
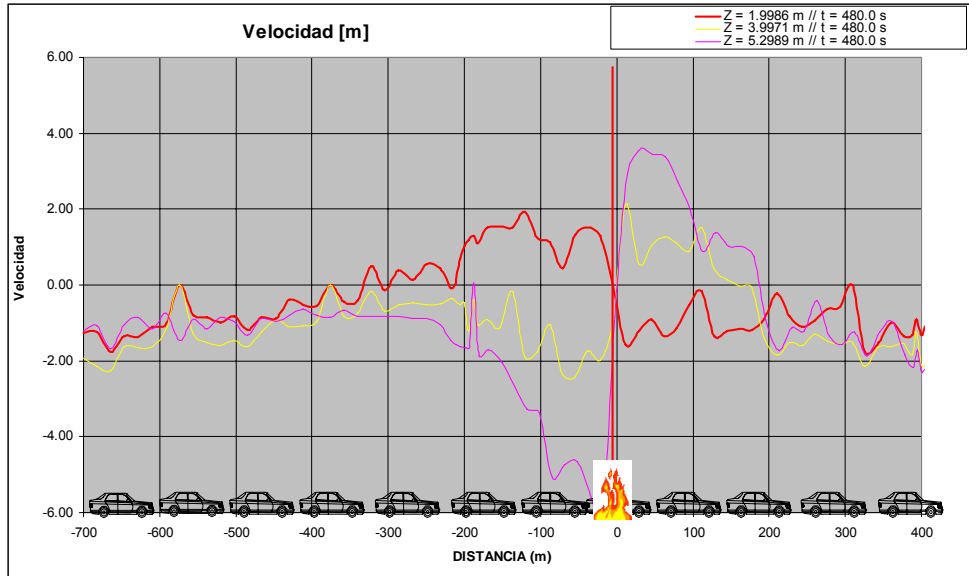




4.2.6.9.3.- Velocidades. (Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial).

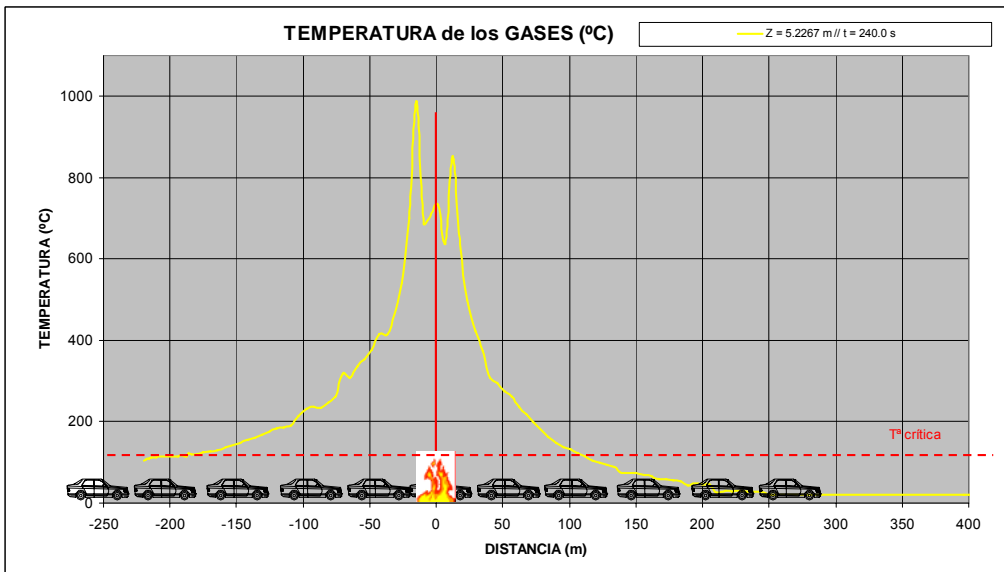
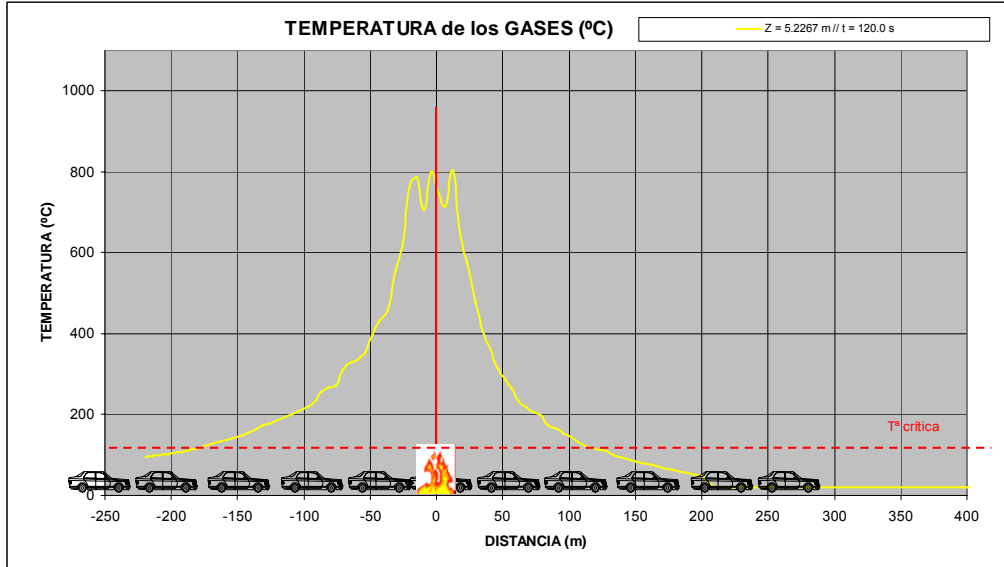
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

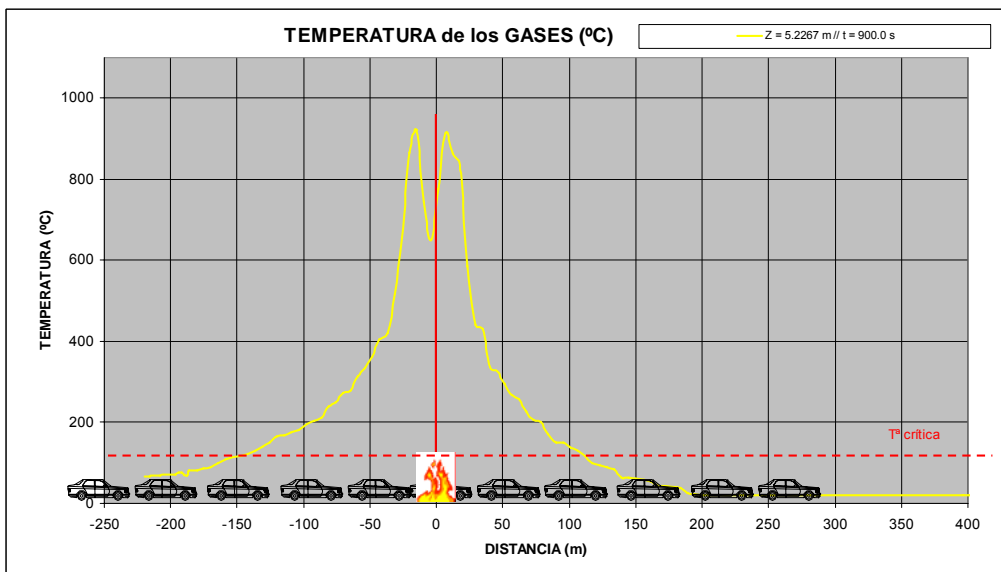
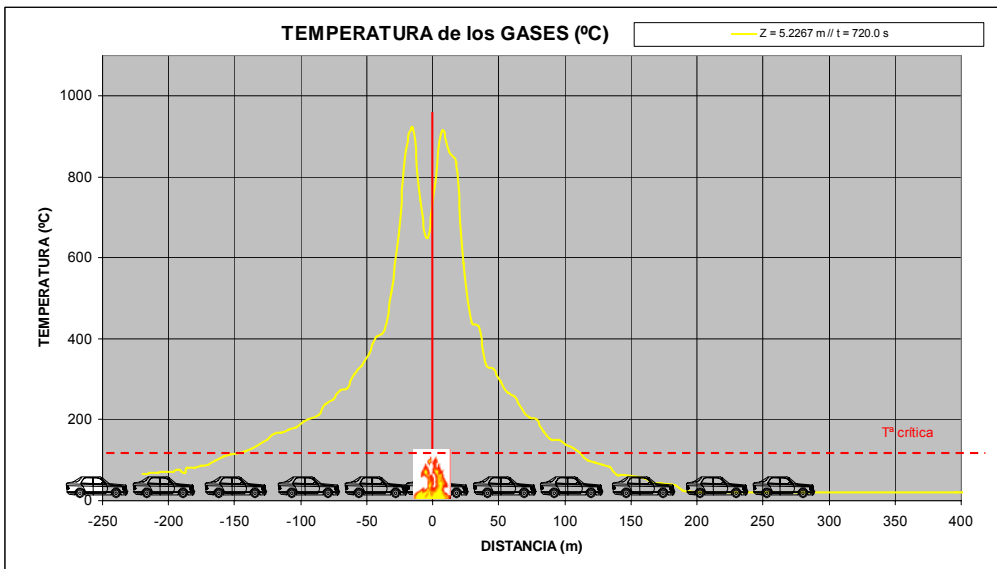
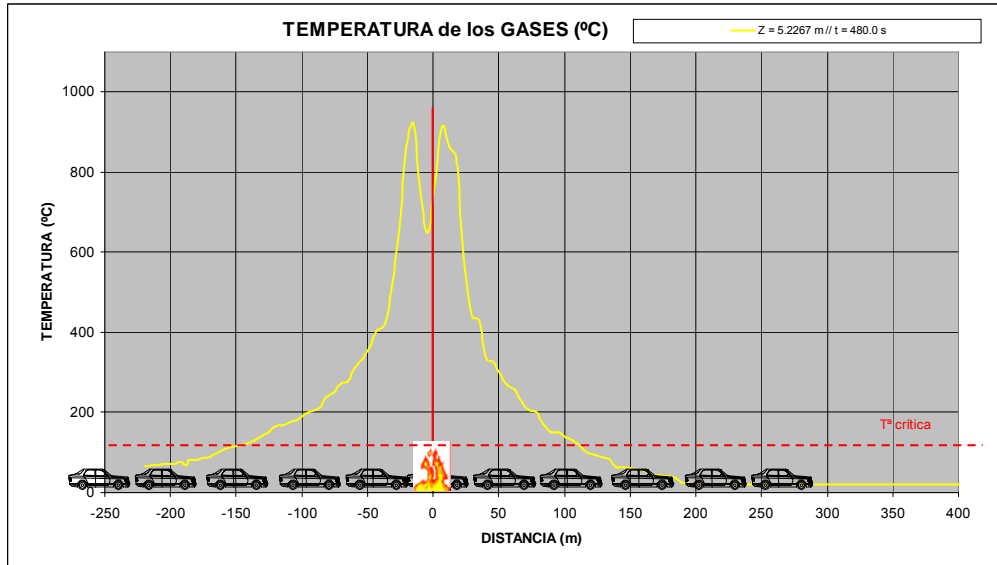




4.2.6.9.4.- Temperaturas. (Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial).

Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

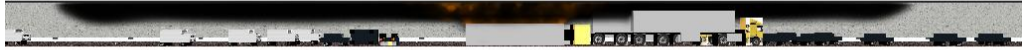




4.2.6.9.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo transversal, 100 MW. Escenario inicial).

A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 120, 240, 480, 720 y 900 sg.

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 20
Time: 18.0



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 134
Time: 120.6



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 266
Time: 239.4



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 533
Time: 479.7



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 791
Time: 711.9



Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

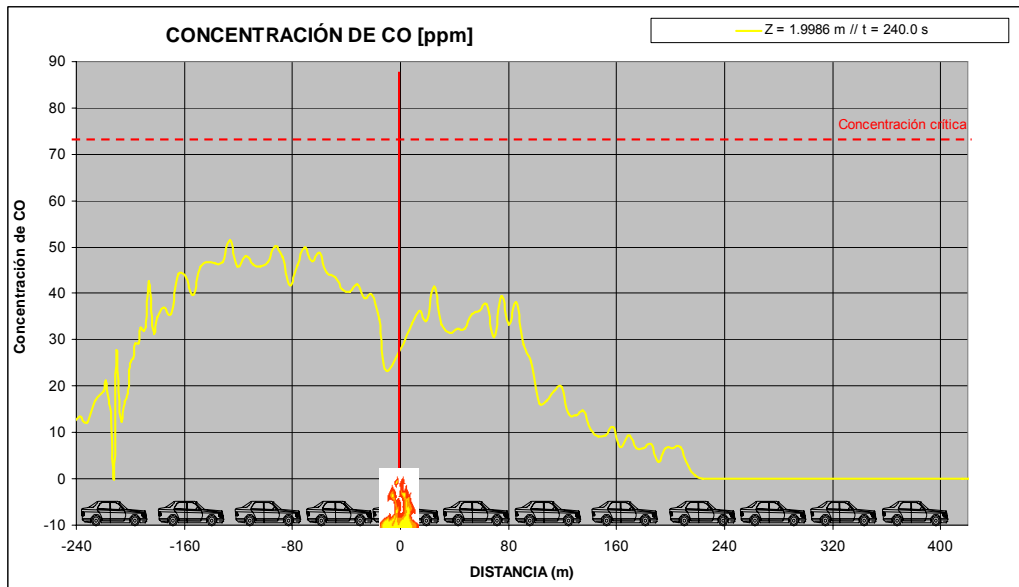
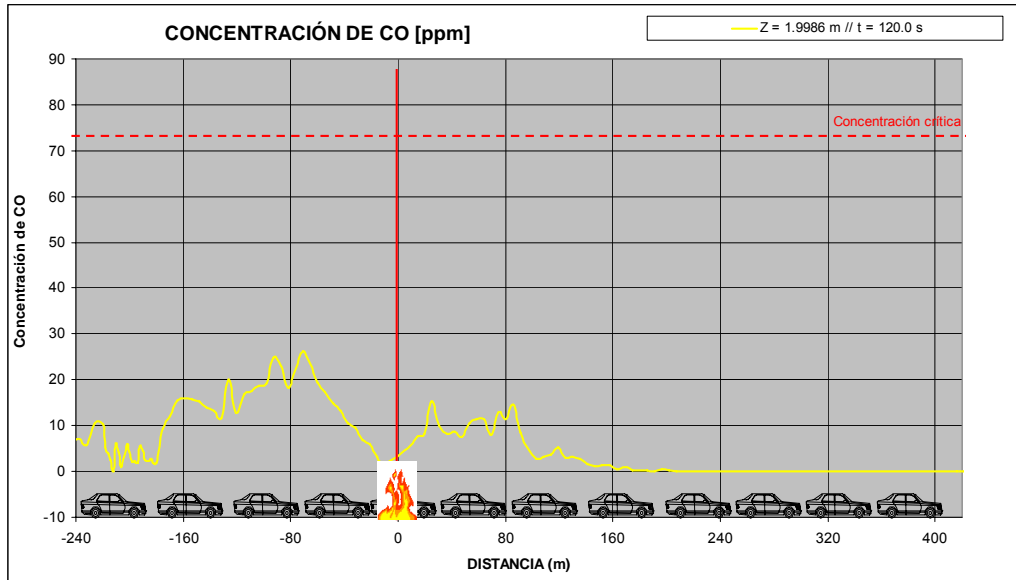
Frame: 1000
Time: 900.0

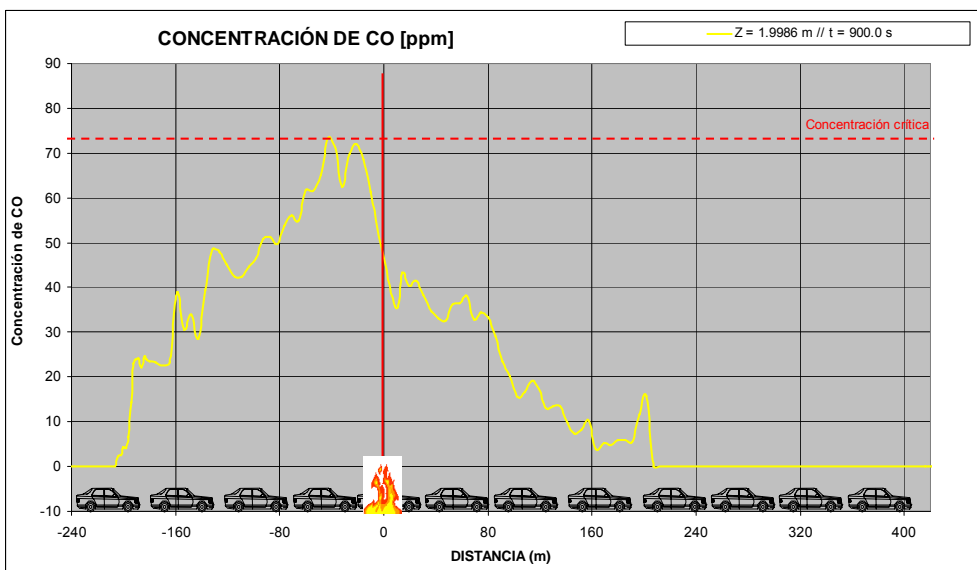
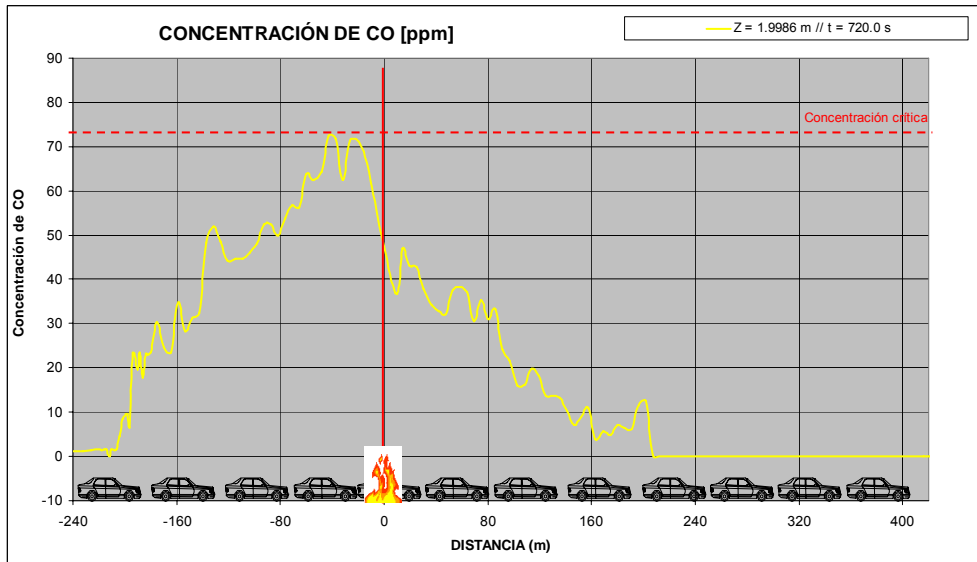
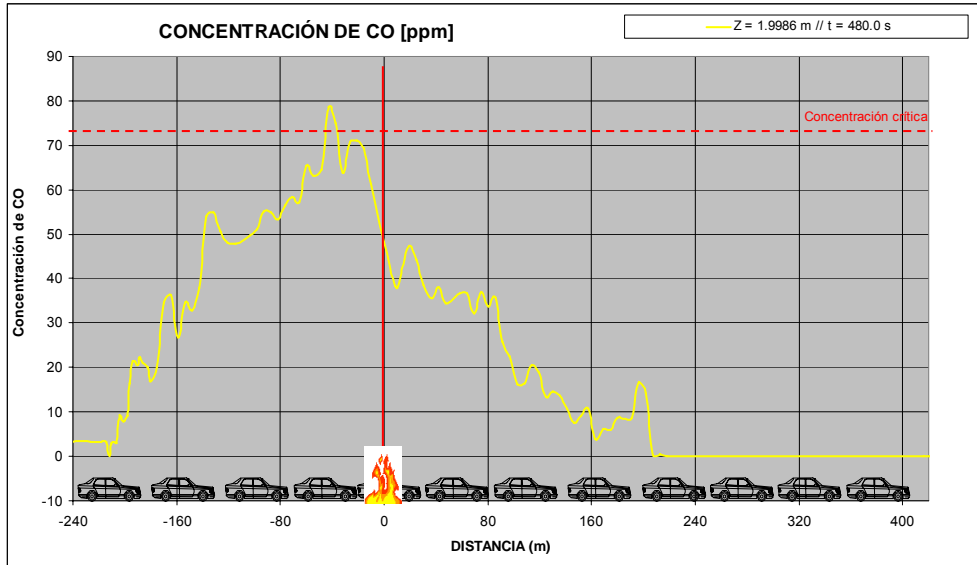


4.2.6.10.- Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina.

4.2.6.10.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina).

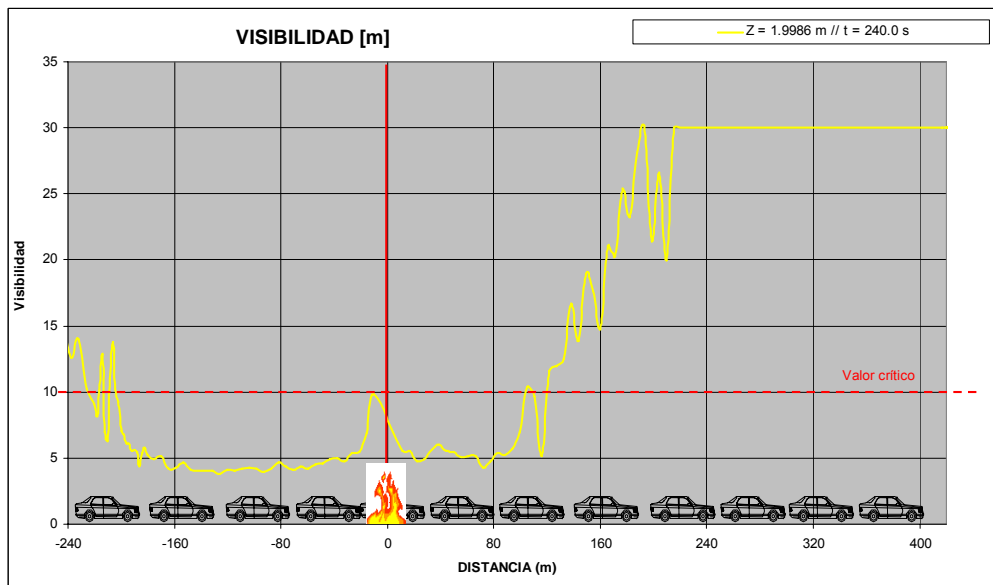
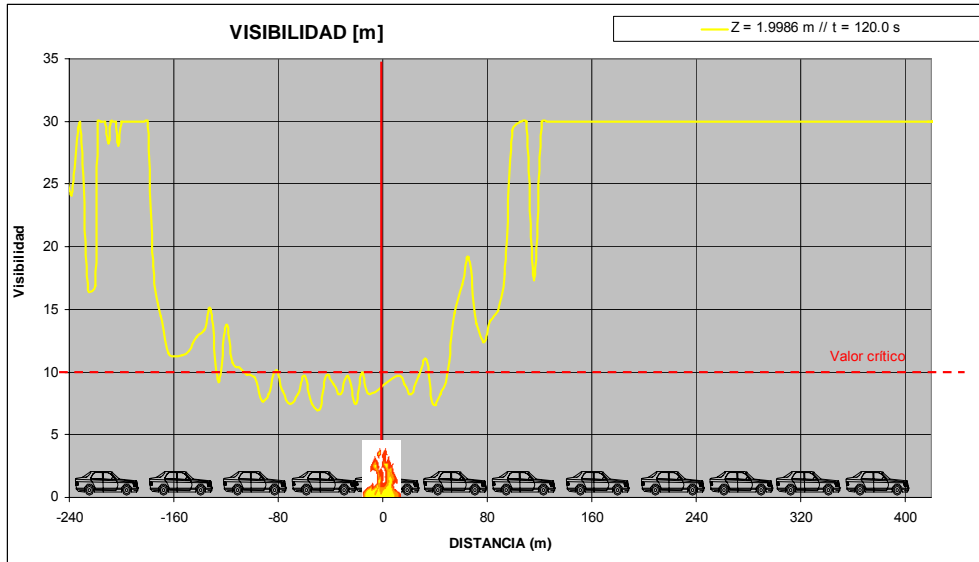
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

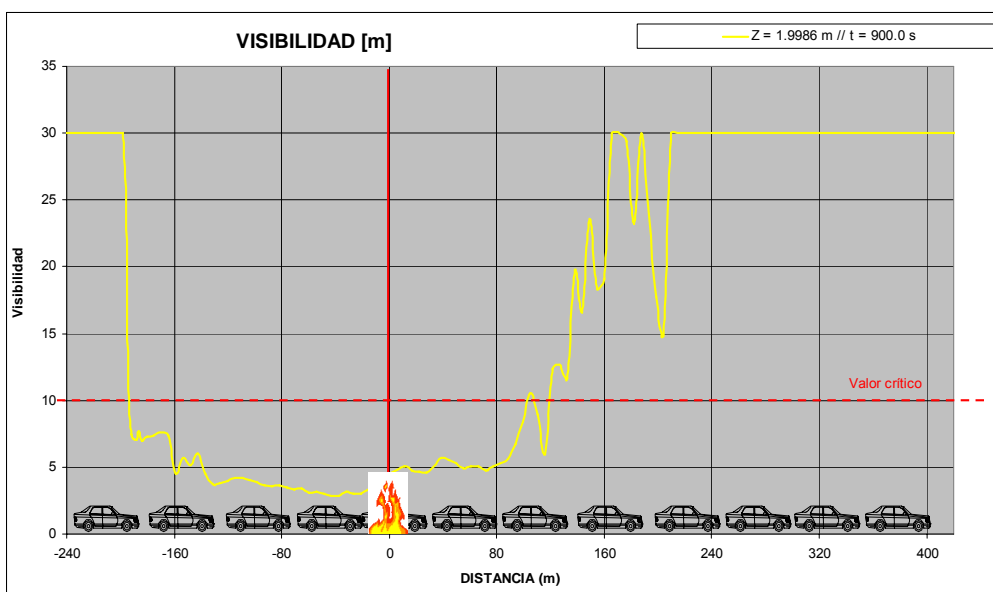
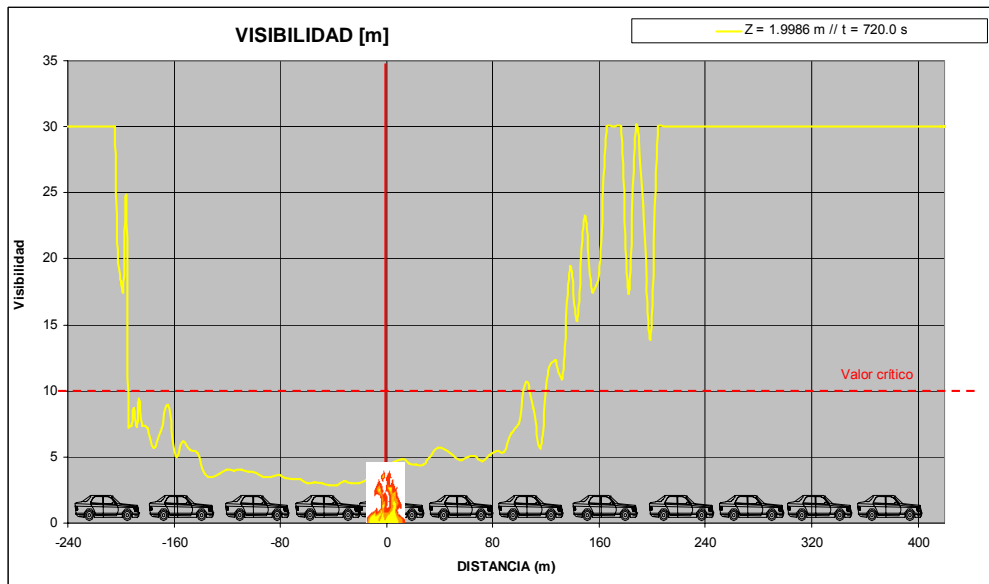
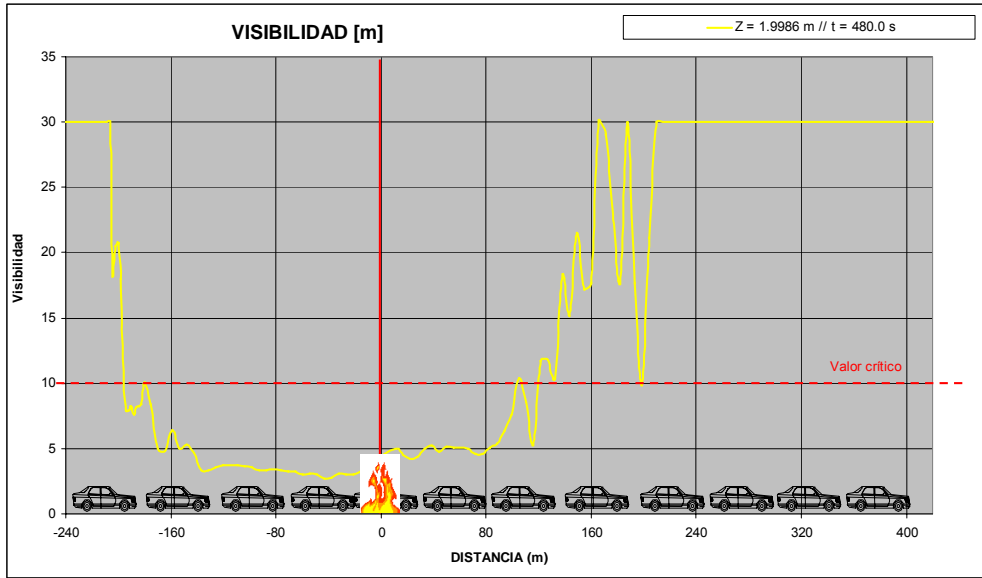




4.2.6.10.2.- Visibilidad. (Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina).

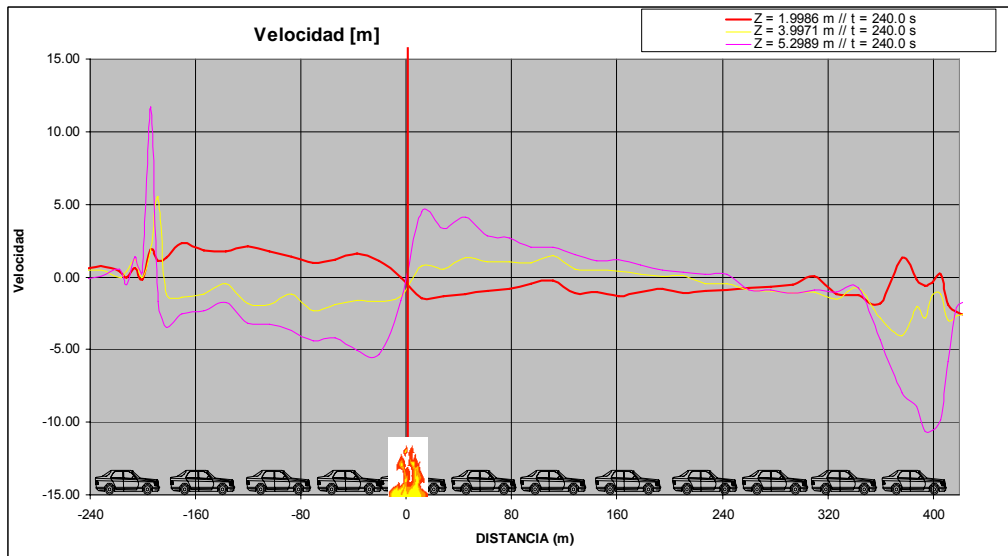
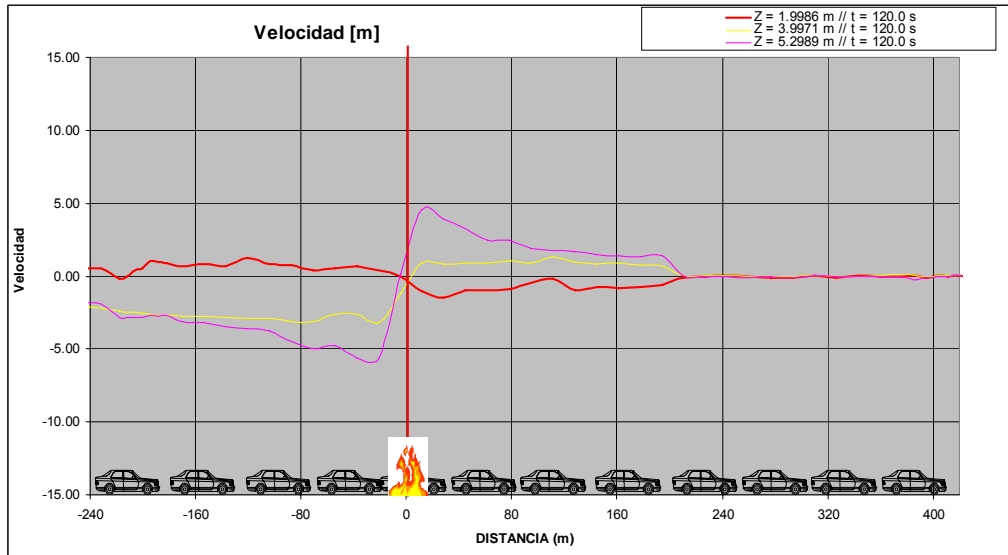
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

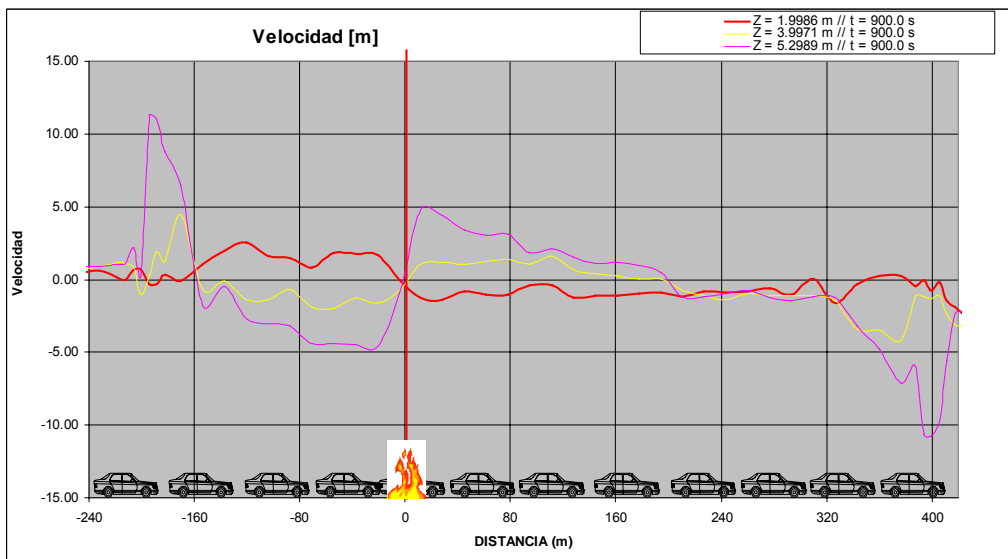
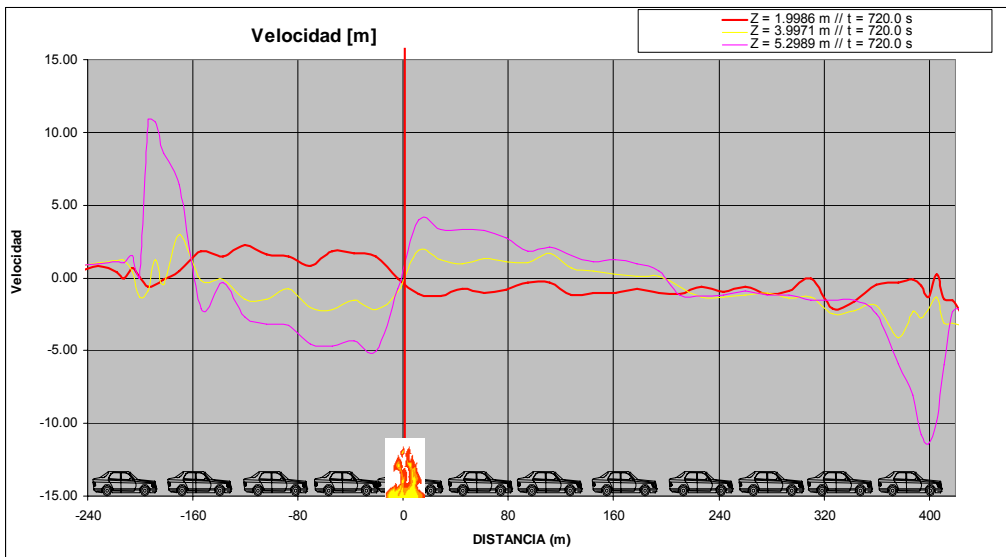
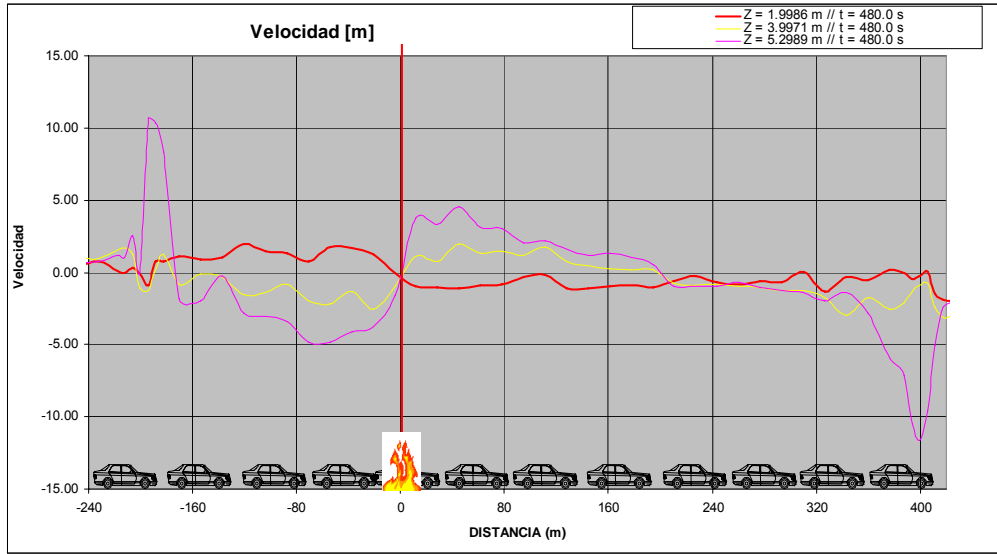




4.2.6.10.3.- Velocidades. (Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina).

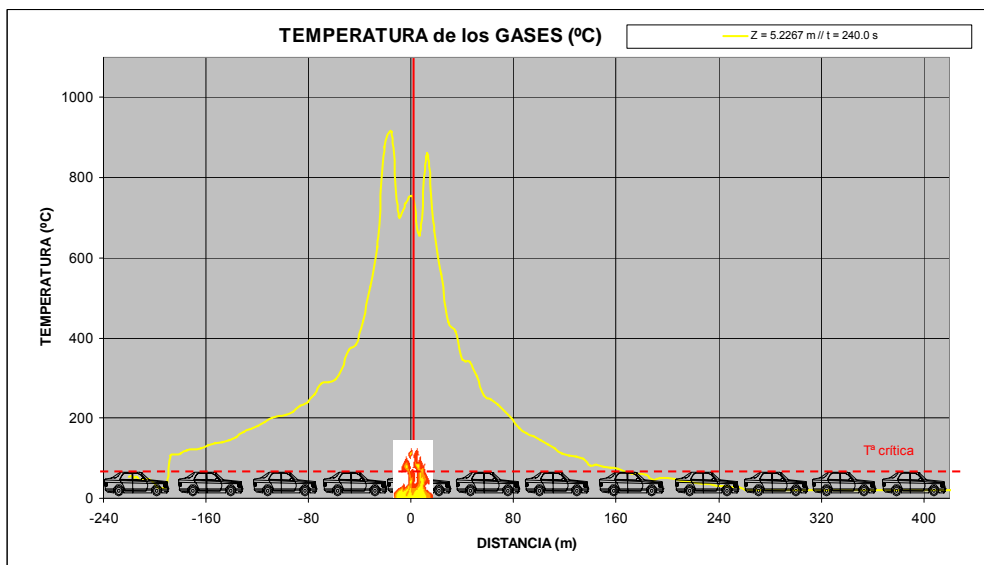
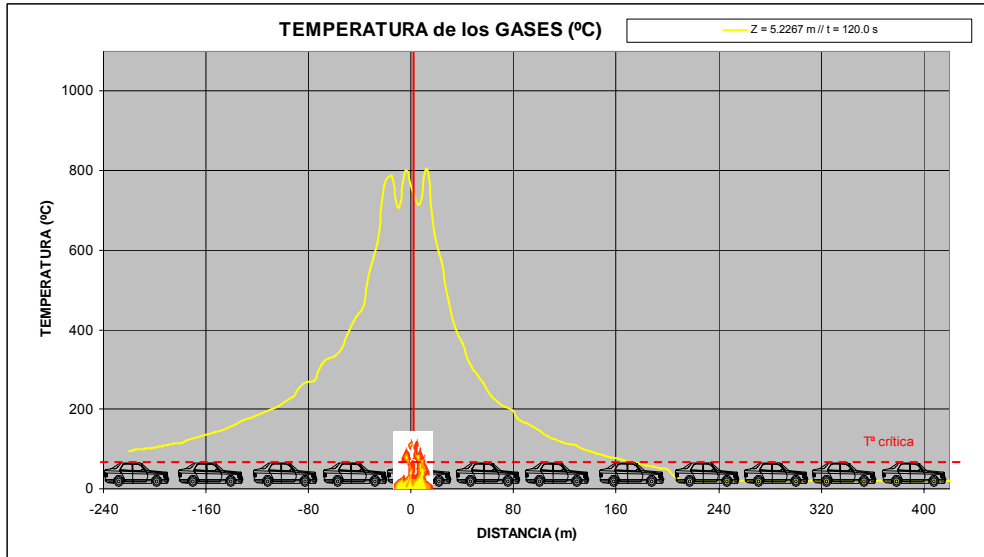
Se analiza las velocidades de los humos a 2, 4 y 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

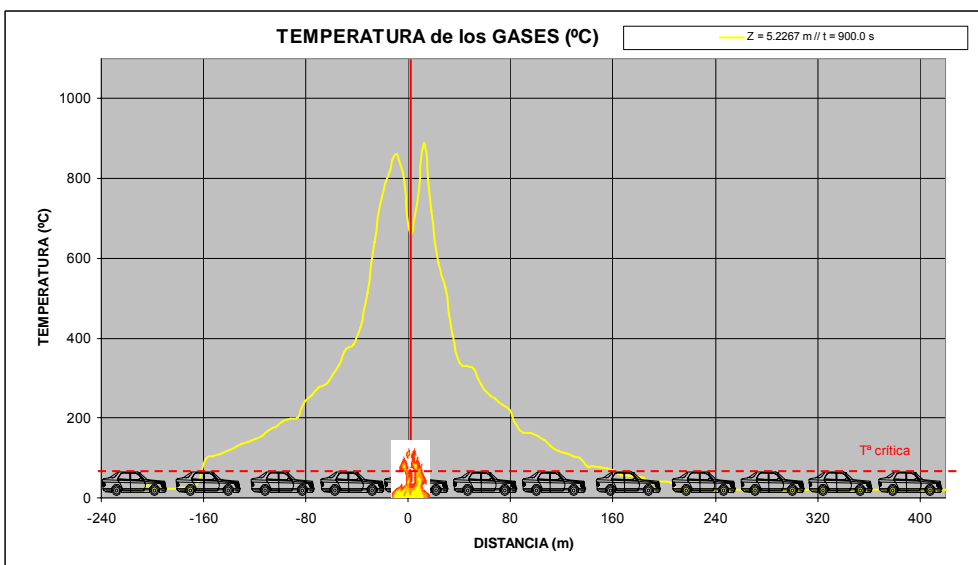
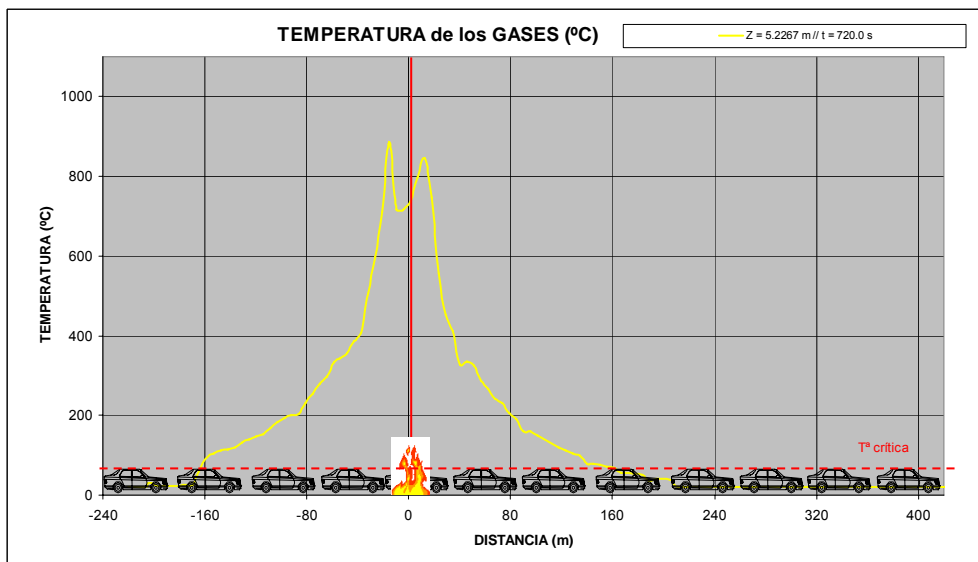
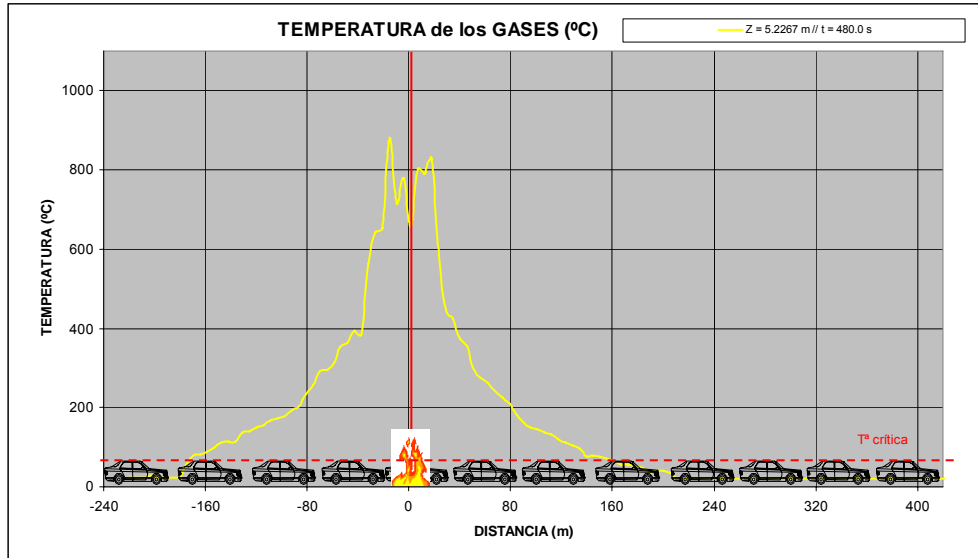




4.2.6.10.4.- Temperaturas. (Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina).

Se analizan las temperaturas de los humos 5m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

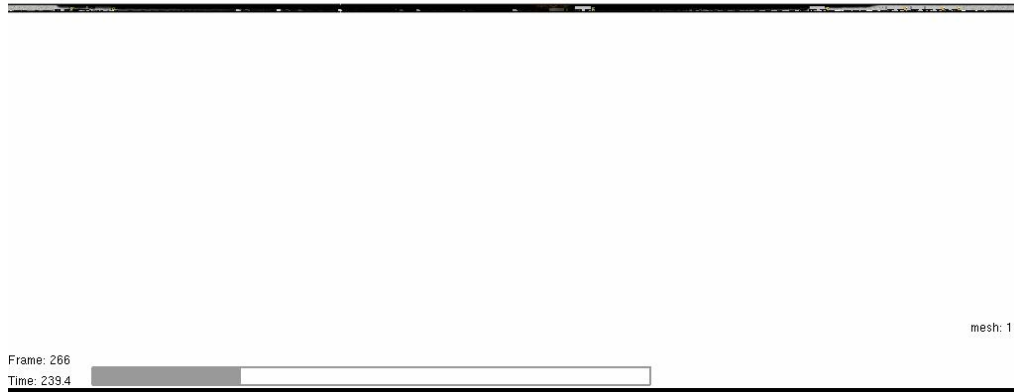




4.2.6.10.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo transversal 100 MW. Escenario con cortina).

A continuación se exponen unas fotos instantáneas de de la evolución de las partículas de humo, generadas en el FDS. Corresponden a los tiempos 18, 120, 240, 480, 720 y 900 sg.





Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 791

Time: 711.9

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 1000

Time: 900.0

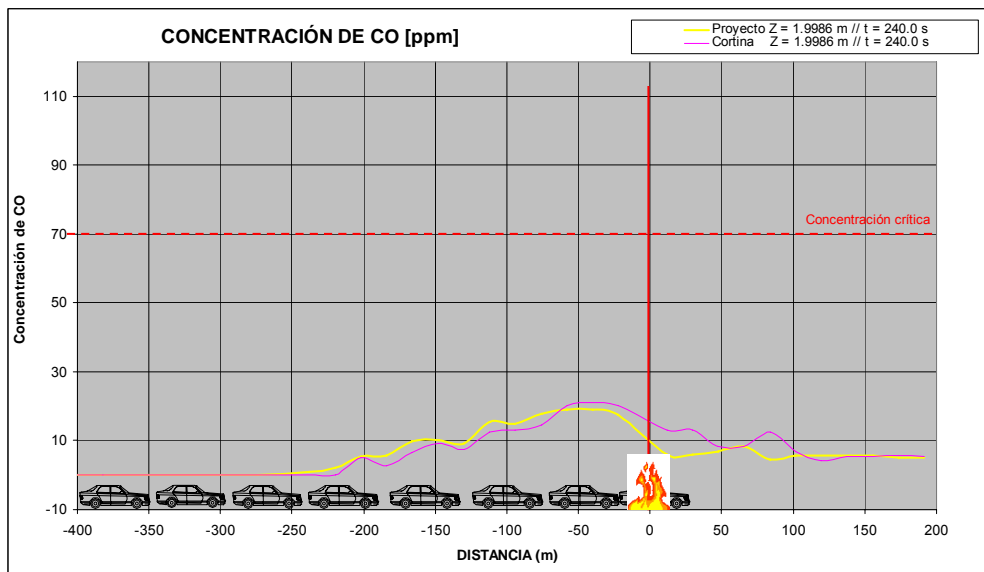
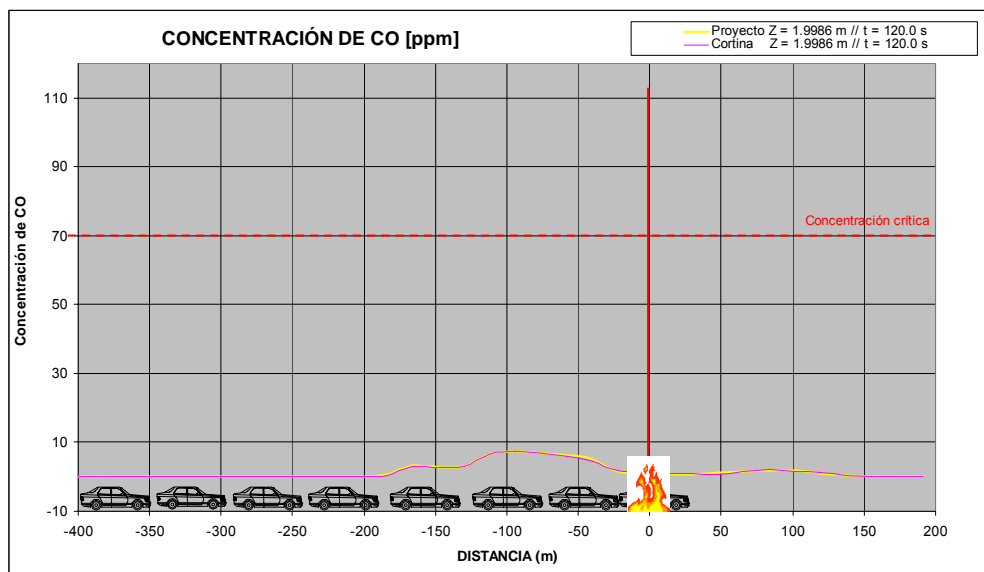
4.2.7.- COMPARATIVA DE RESULTADOS. PROYECTO-CORTINA.

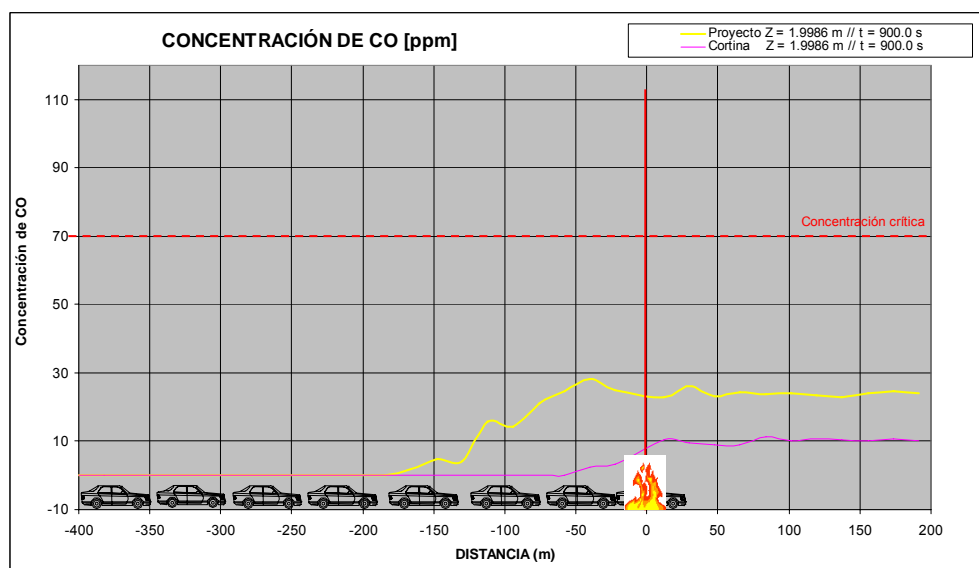
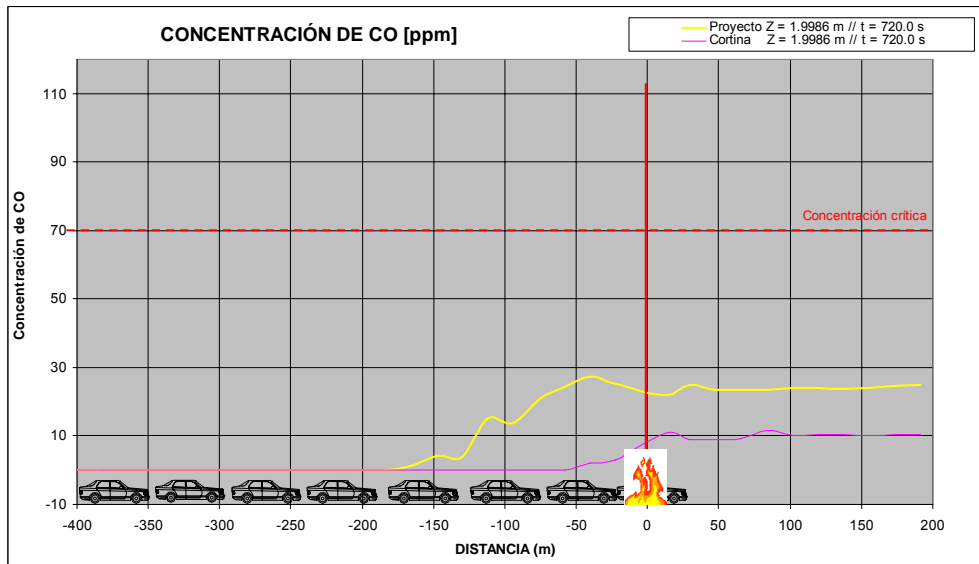
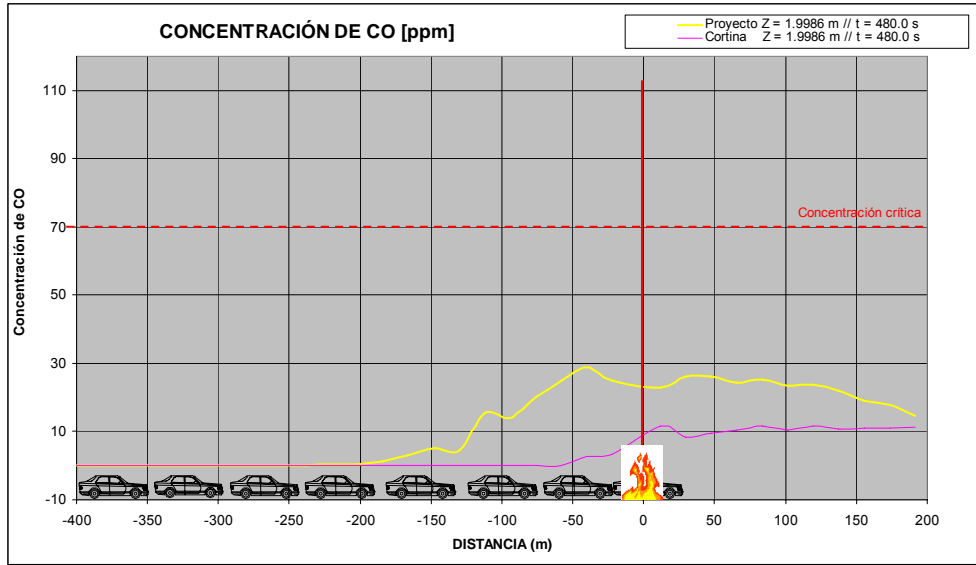
En las siguientes gráficas se representará un comparativo entre los dos estados, proyecto y cortina, en las que se podrán analizar como varían las distintas variables en ambos escenarios. Al igual que en gráficas anteriores, se representarán 5 estados en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 sg.

4.2.7.1.- Modo pozo, 30MW.

4.2.7.1.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo, 30MW).

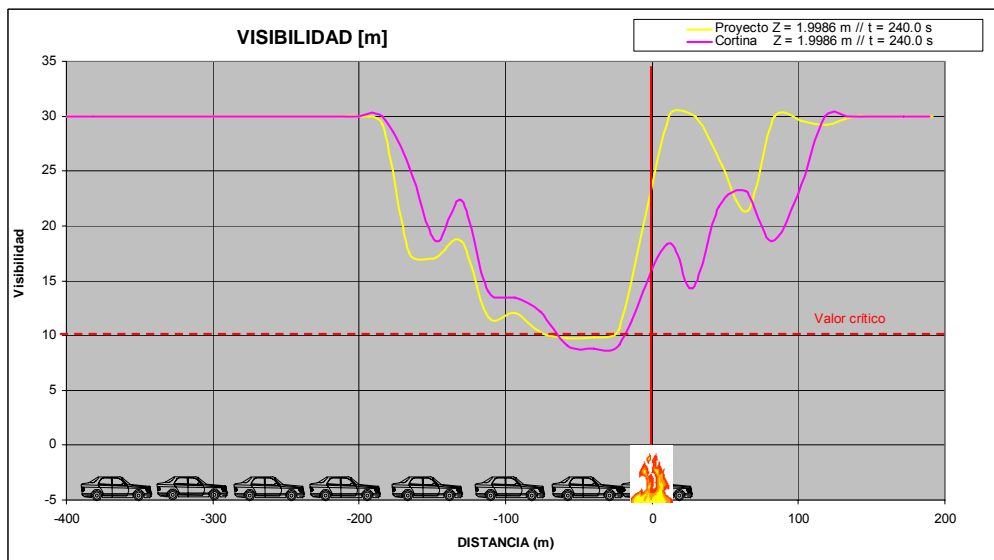
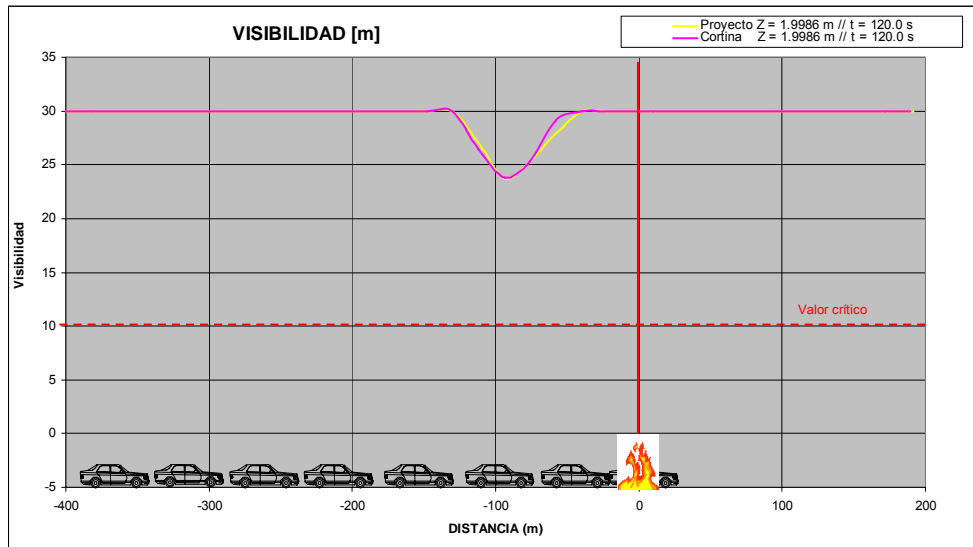
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

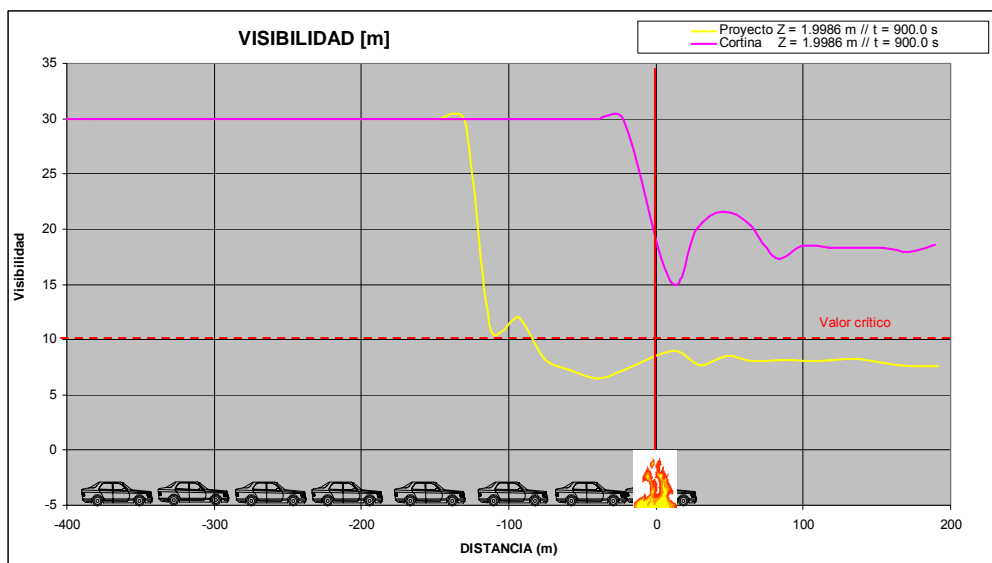
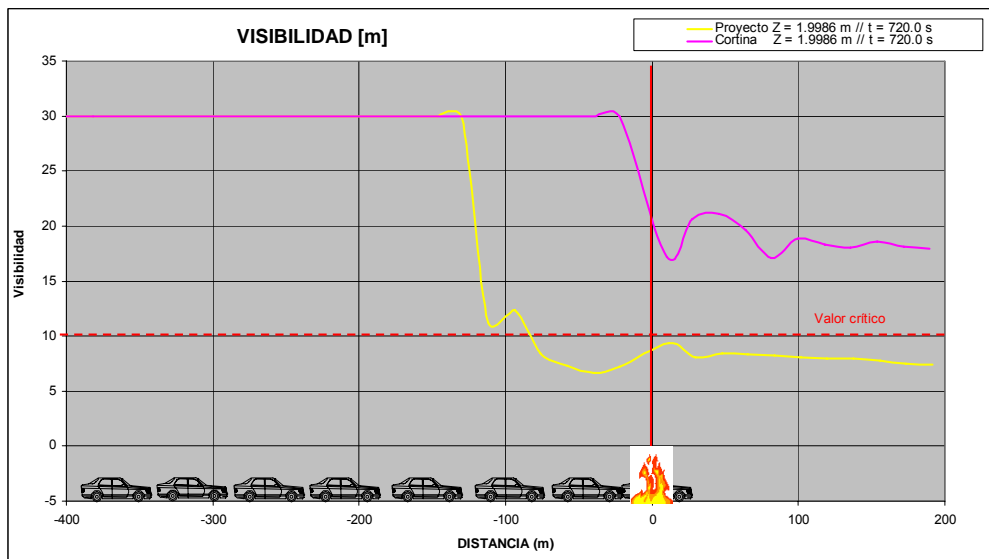
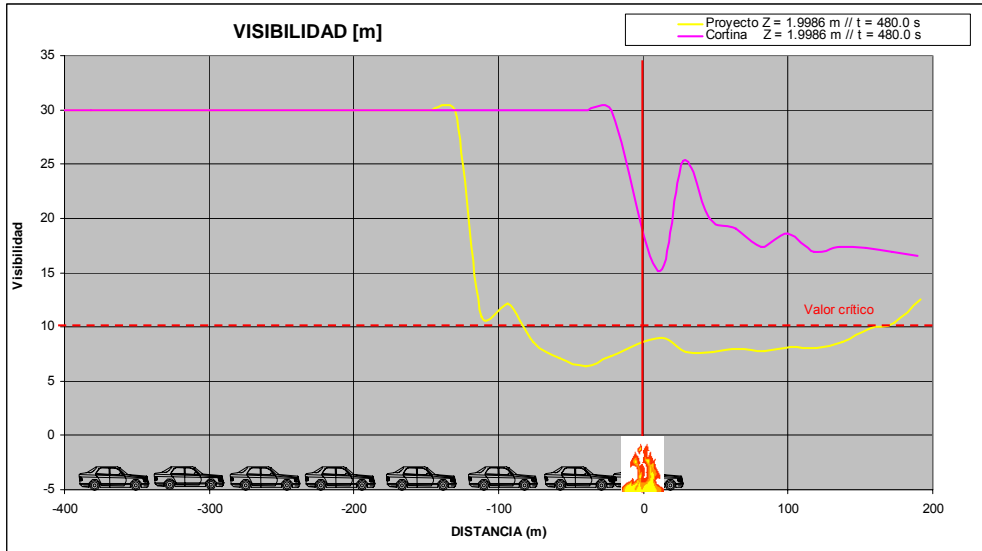




4.2.7.1.2.- Visibilidad. (Modo pozo, 30MW).

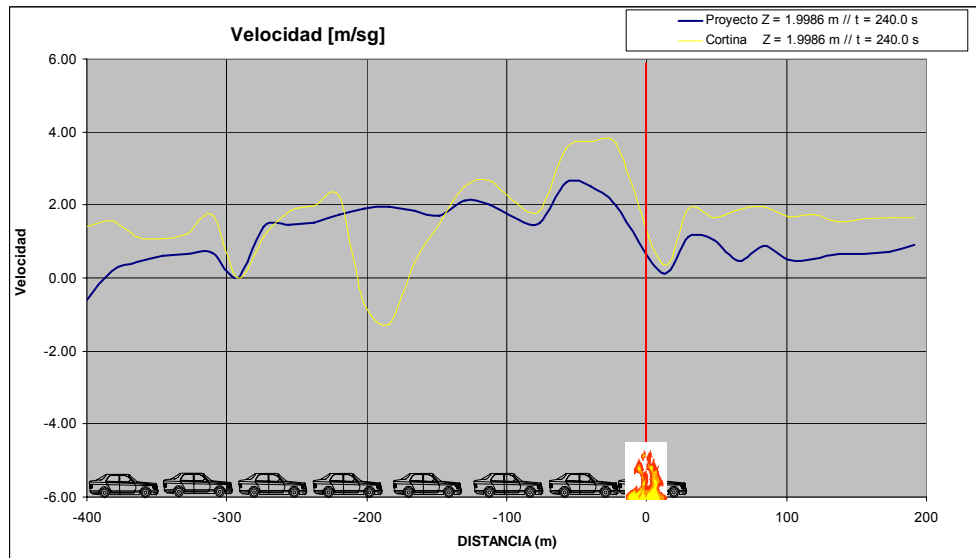
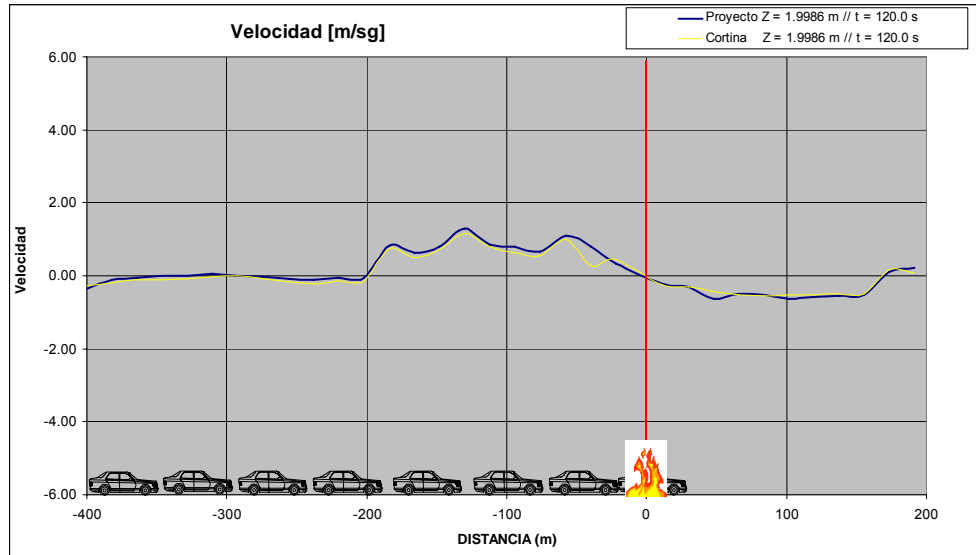
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

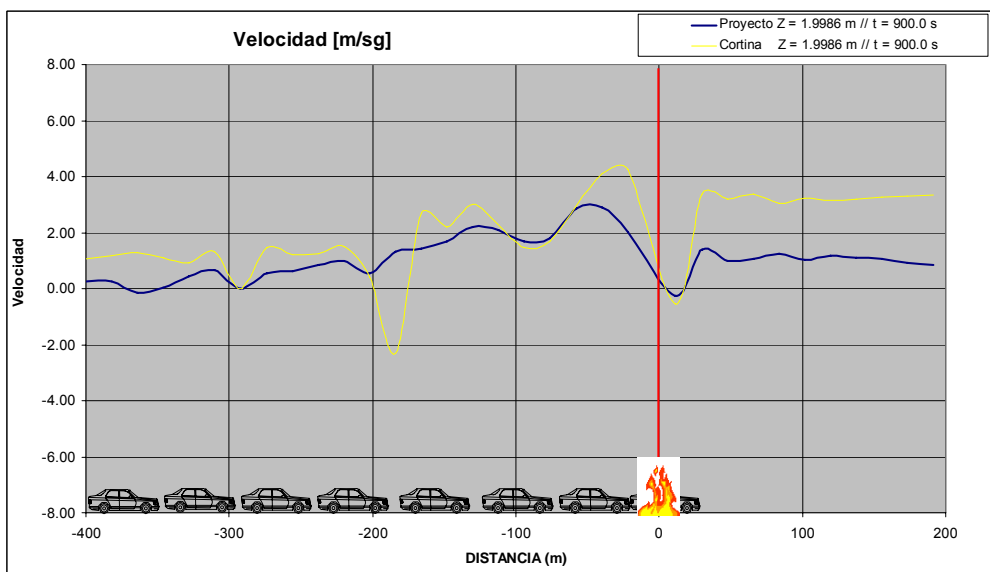
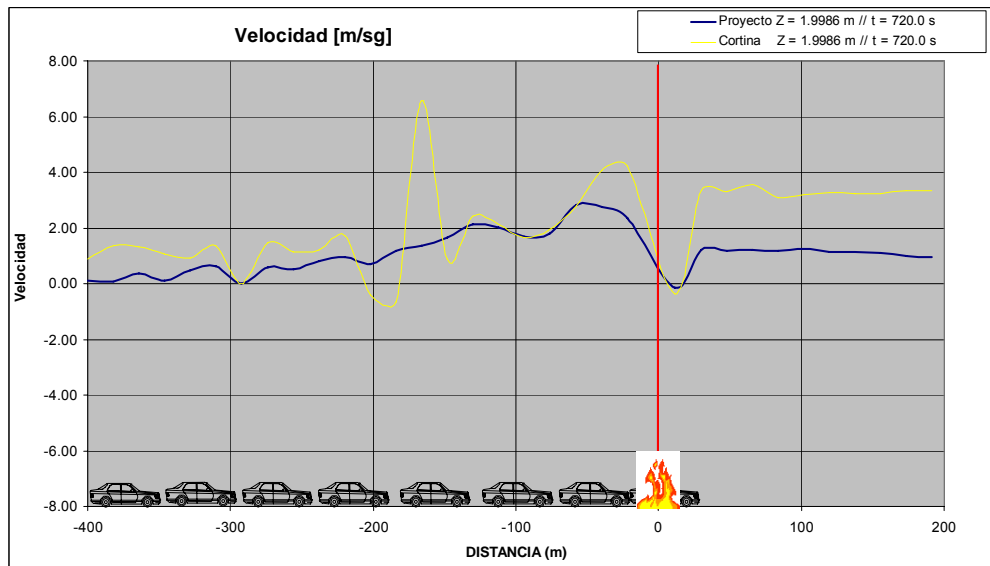
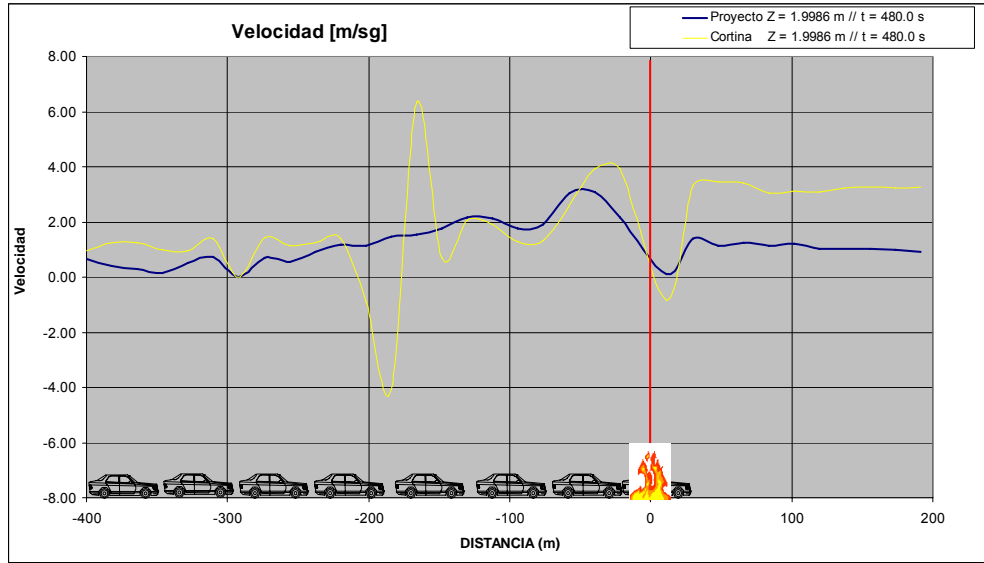




4.2.7.1.3.- Velocidades. (Modo pozo, 30MW).

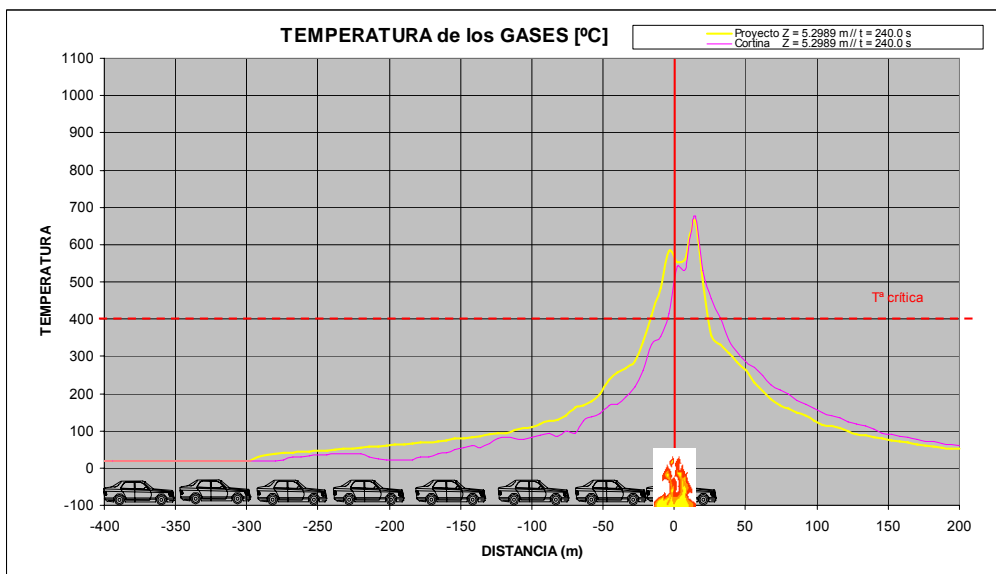
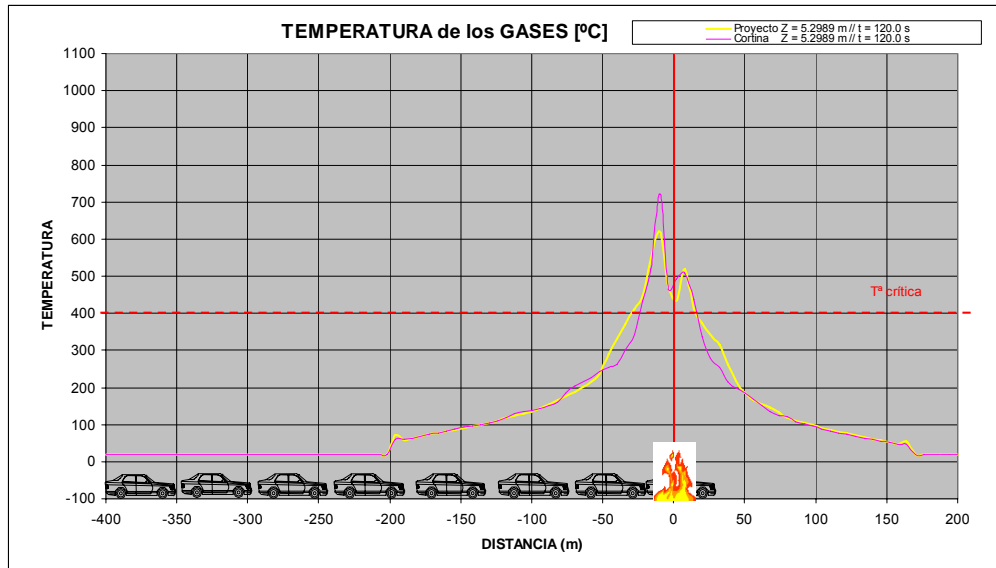
Se analiza las velocidades de los humos a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

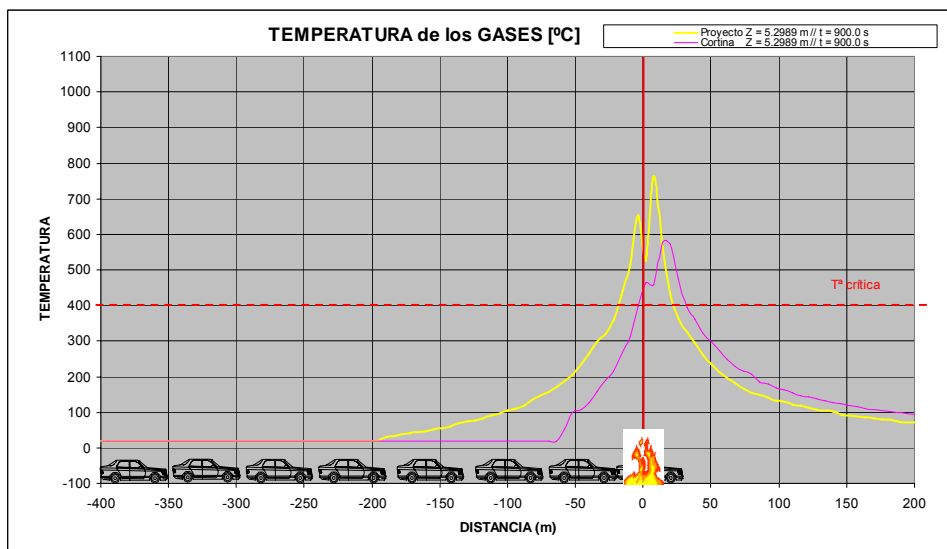
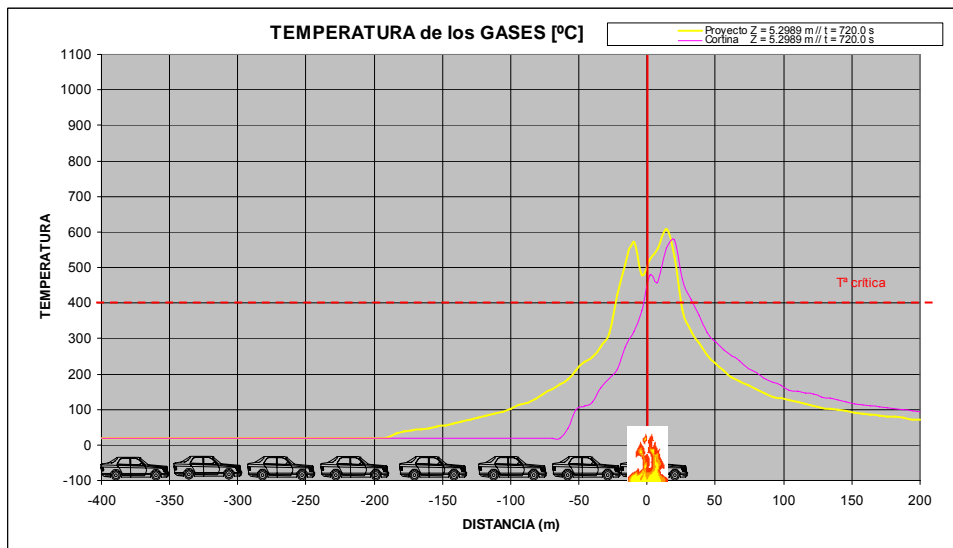
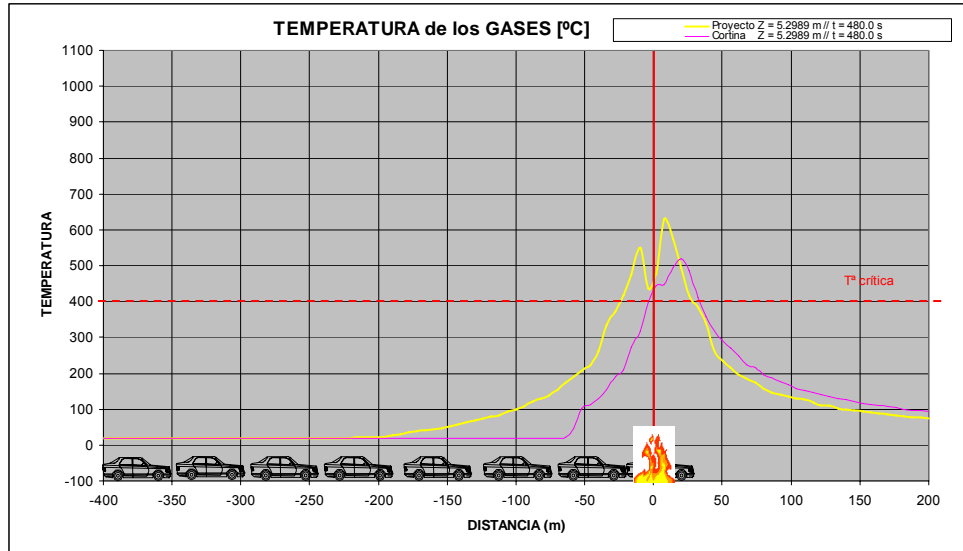


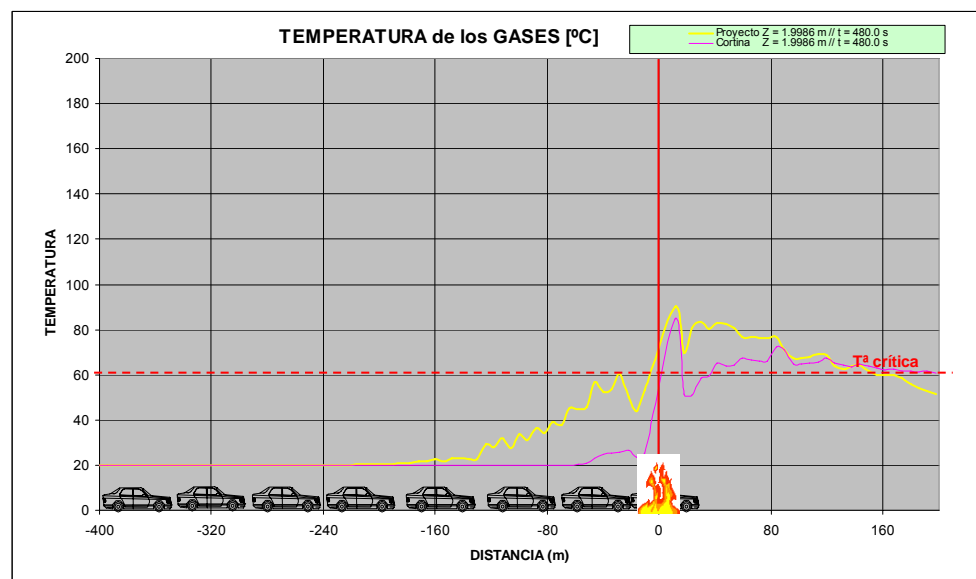
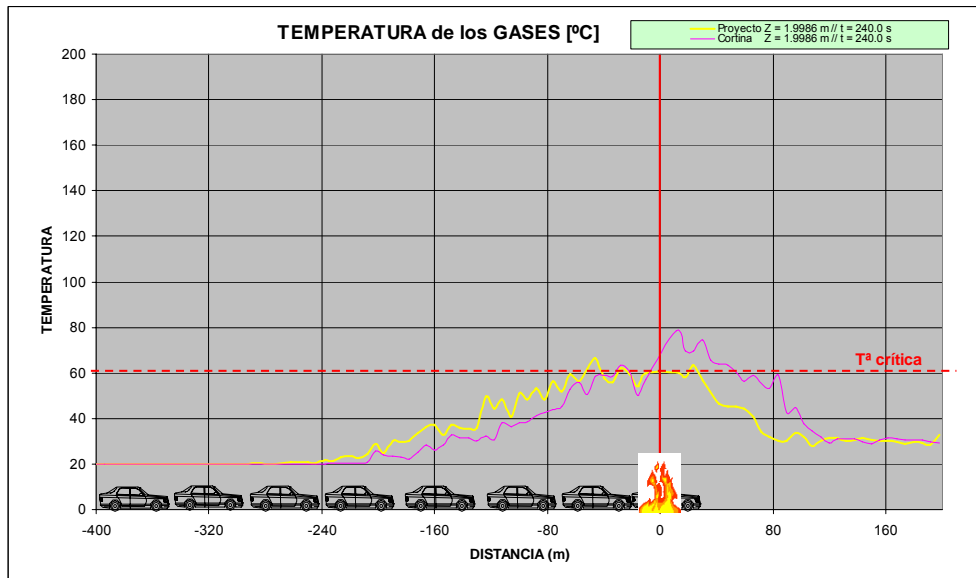
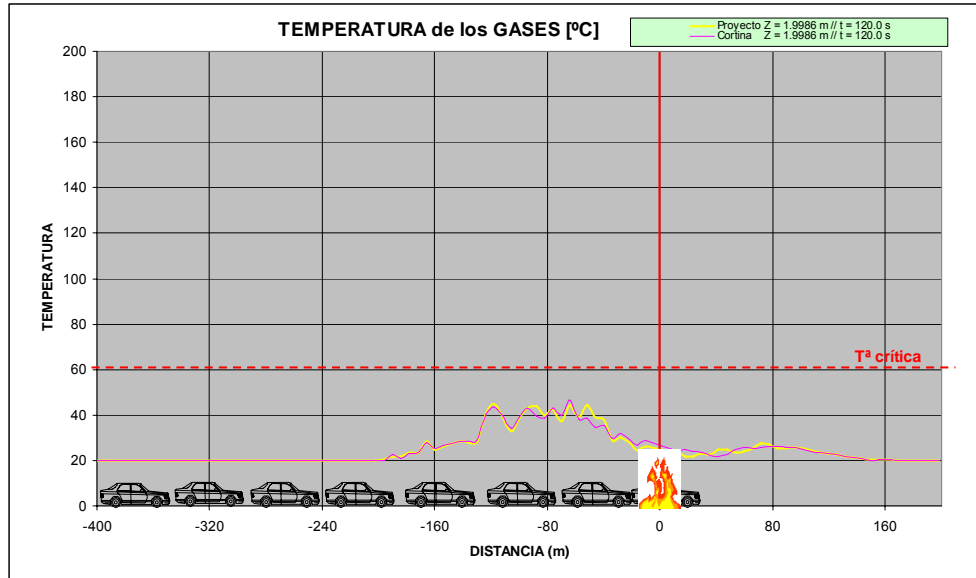


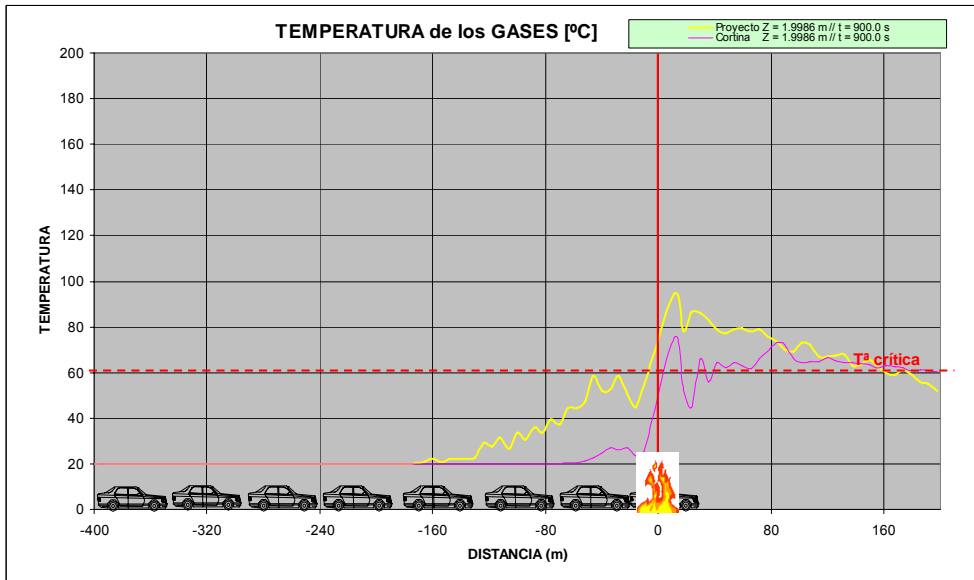
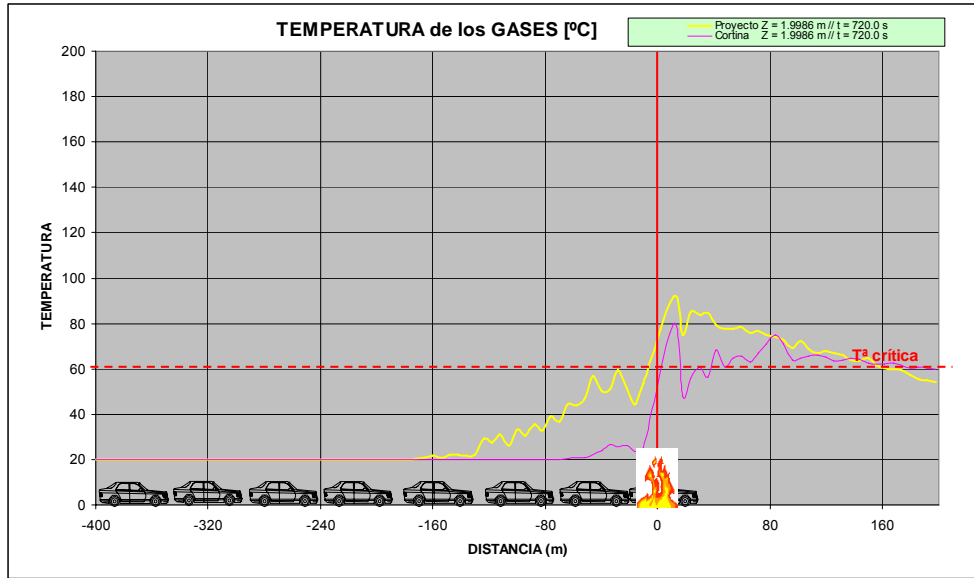
4.2.7.1.4.- Temperaturas. (Modo pozo, 30MW).

Se analizan las temperaturas de los humos 5 y 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.









4.2.7.1.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo pozo, 30MW).
A continuación se incorporan dos instantáneas en el segundo 900, en el que se puede comprobar la diferencia que existen entre los dos escenarios.

Escenario sin cortina

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



mesh: 1

Frame: 1000
Time: 900.0

Frame rate: 3.9

Escenario con cortina

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



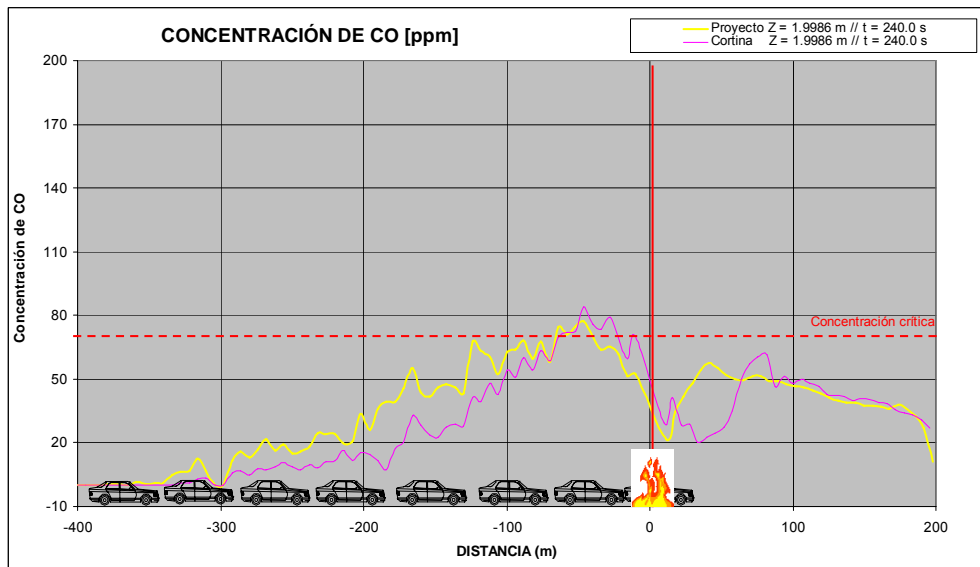
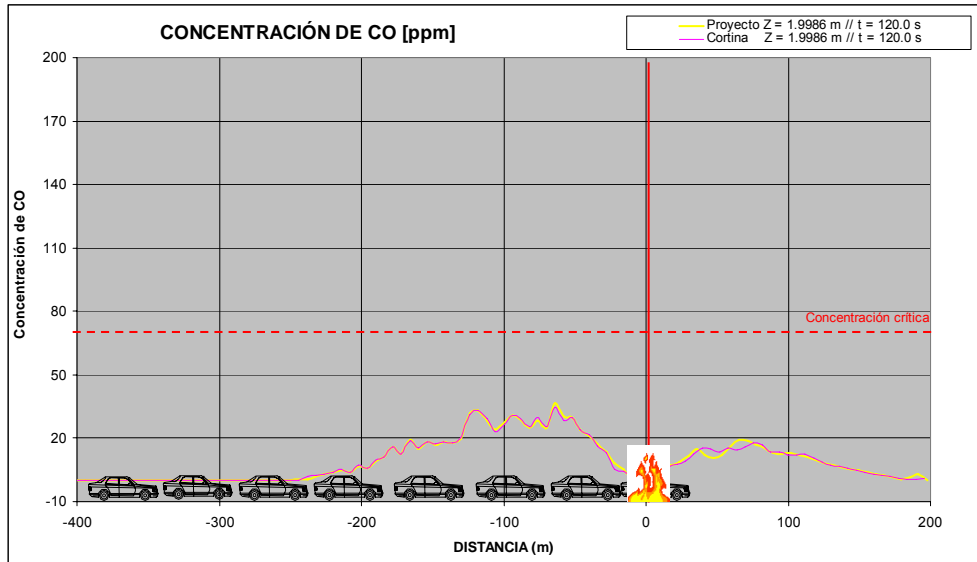
mesh: 1

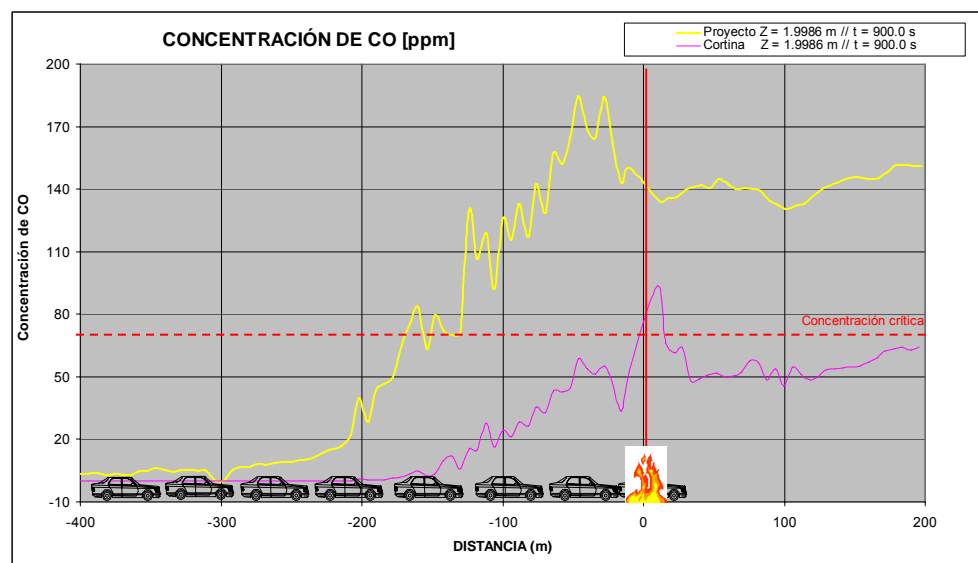
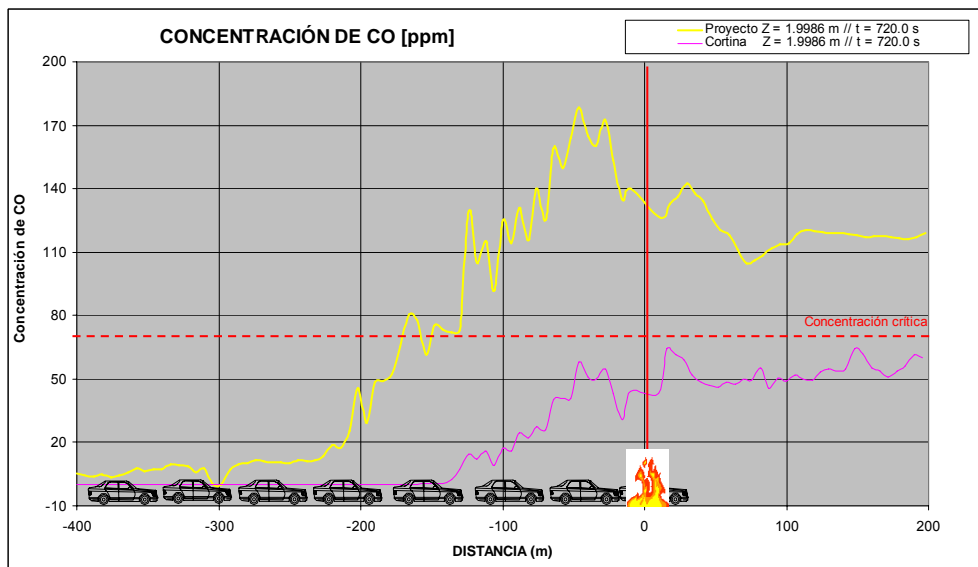
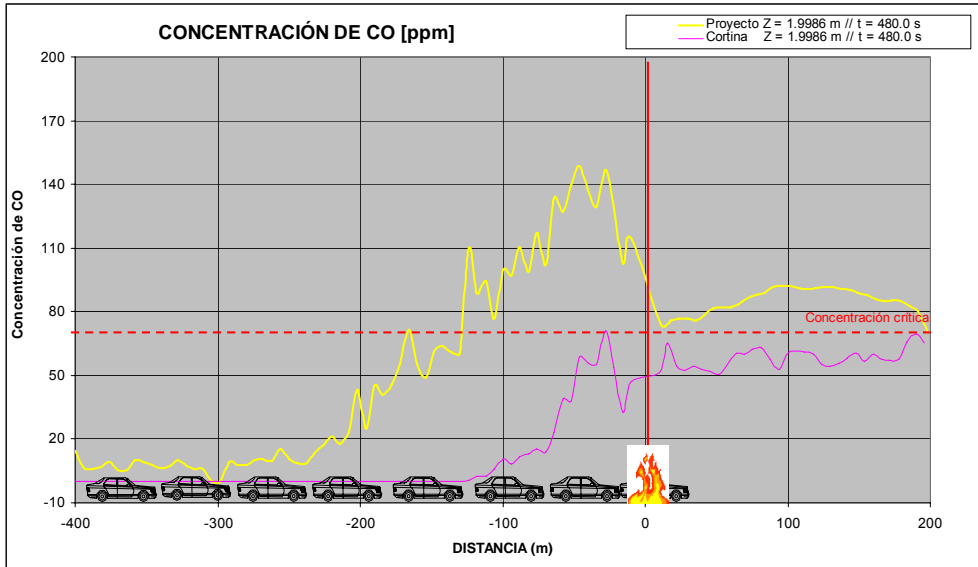
Frame: 1000
Time: 900.0

4.2.7.2.- Modo pozo, 100MW.

4.2.7.2.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo, 100MW).

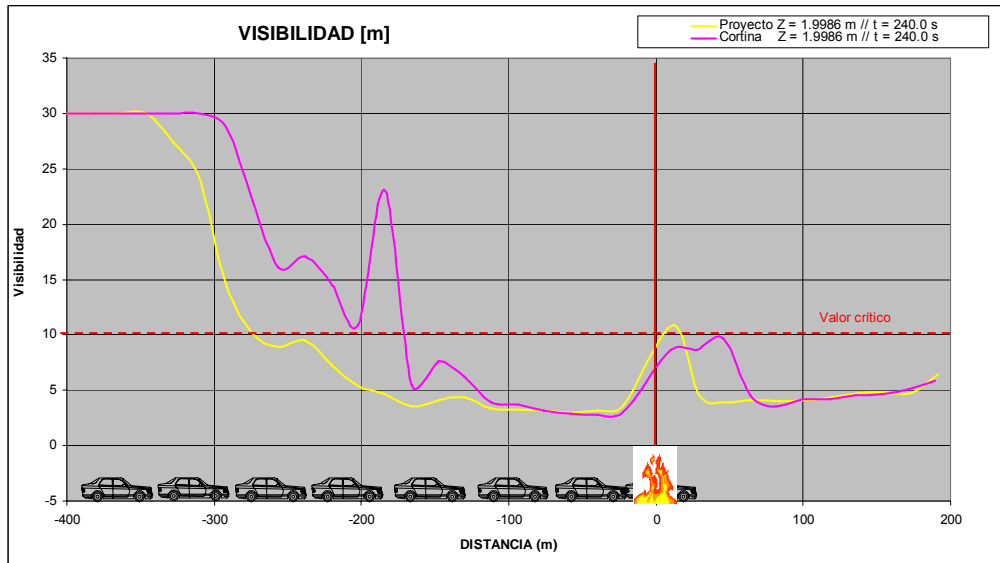
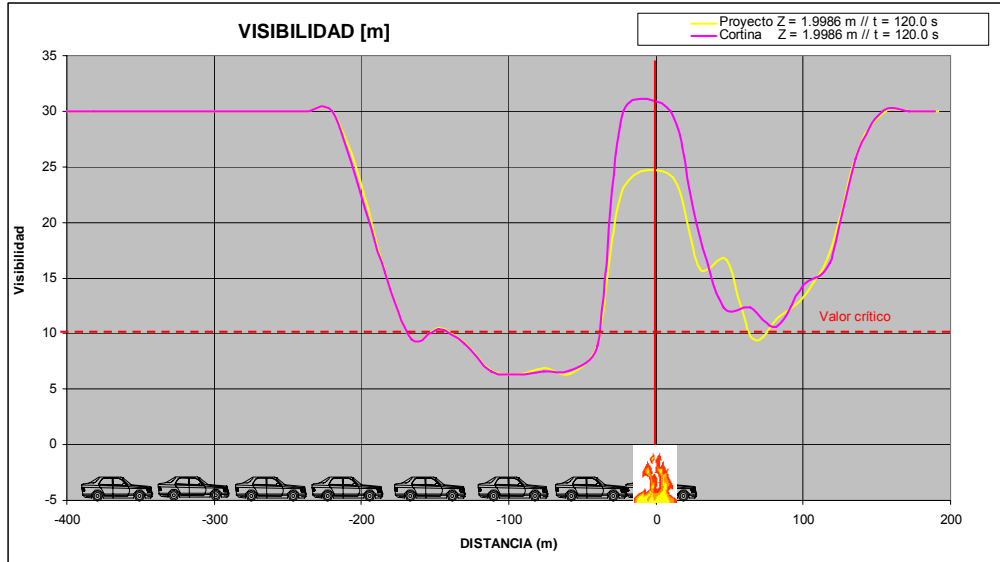
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

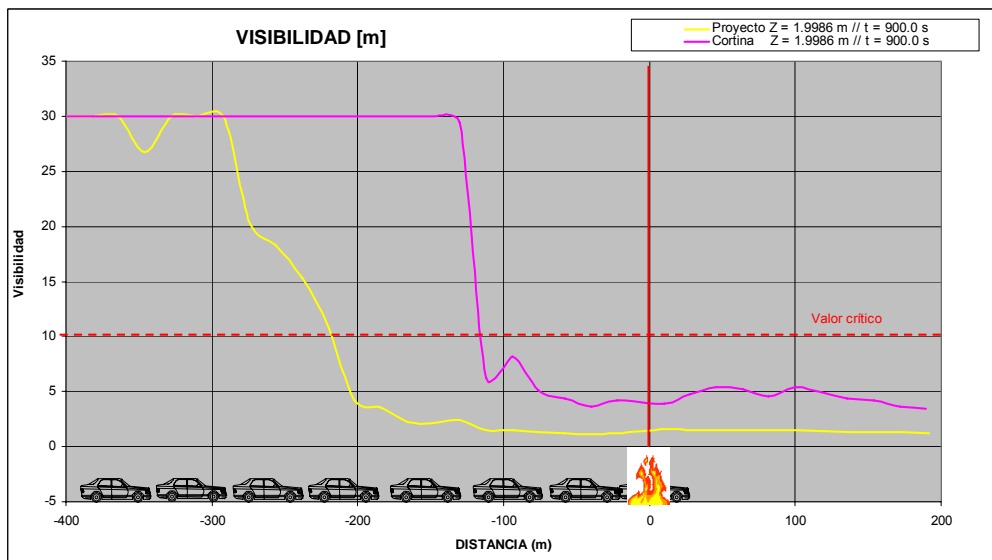
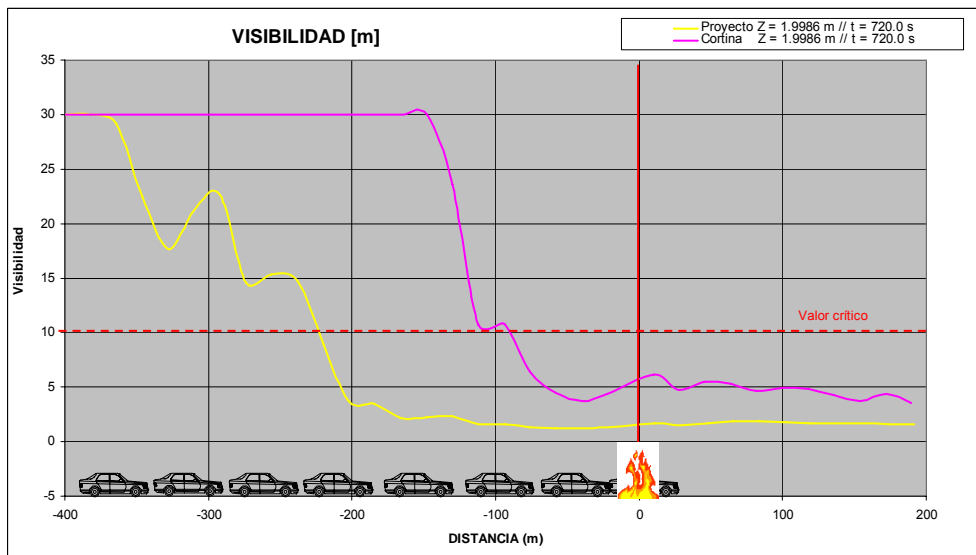
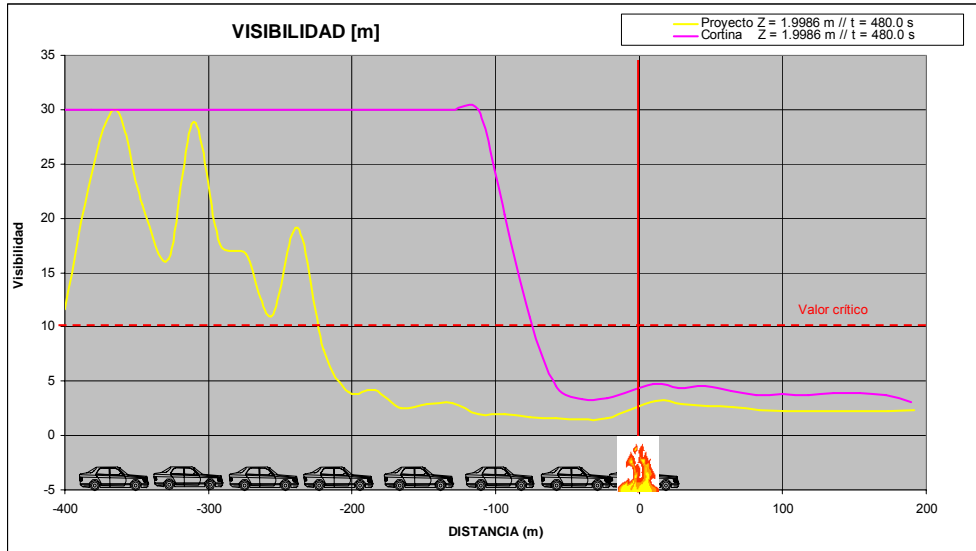




4.2.7.2.2.- Visibilidad. (Modo pozo, 100MW).

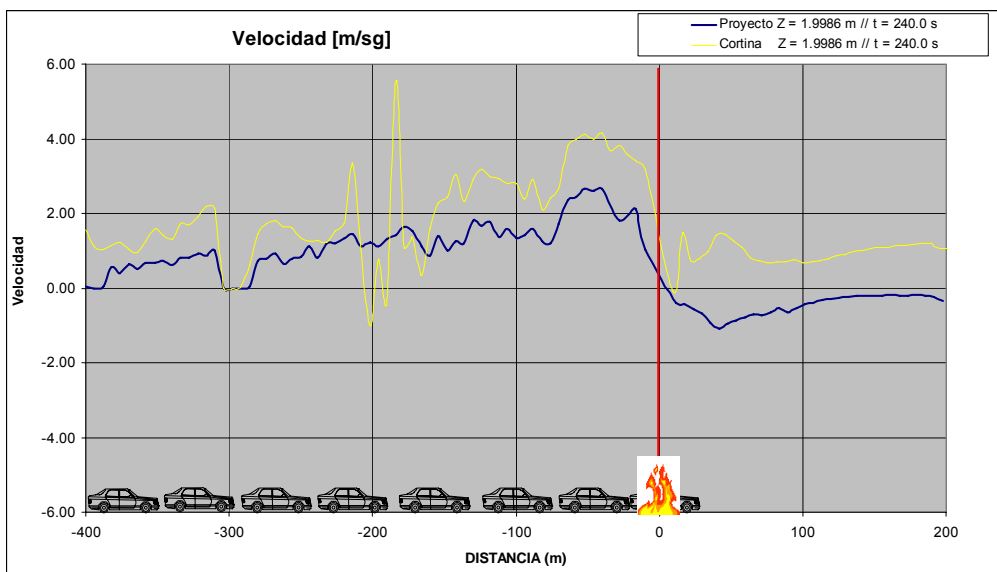
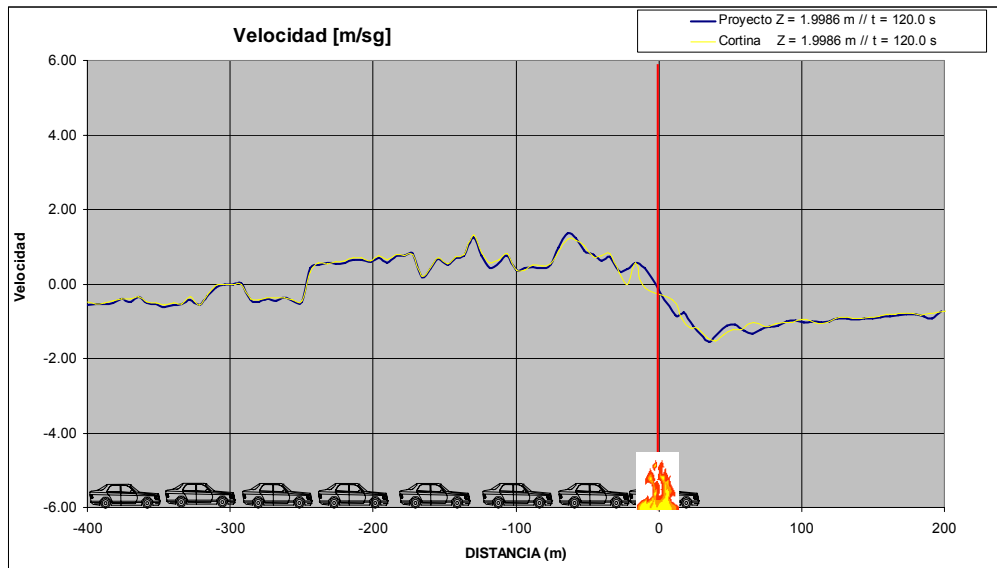
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

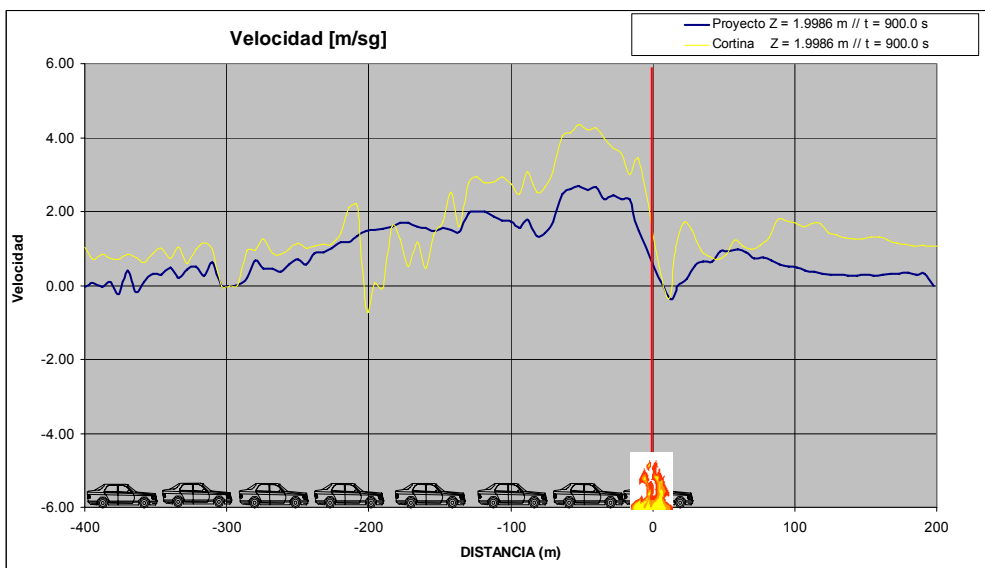
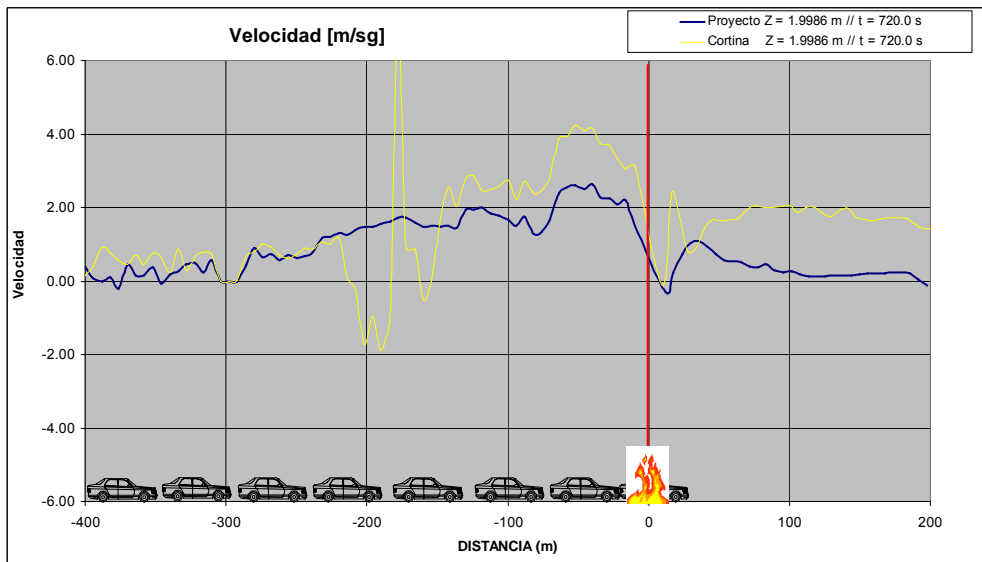
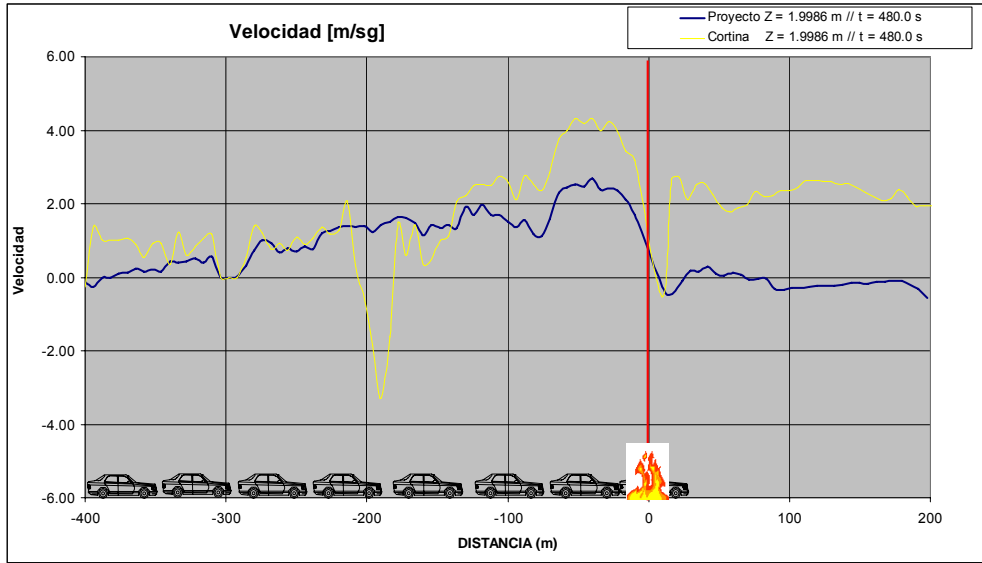




4.2.7.2.3.- Velocidades. (Modo pozo, 100MW).

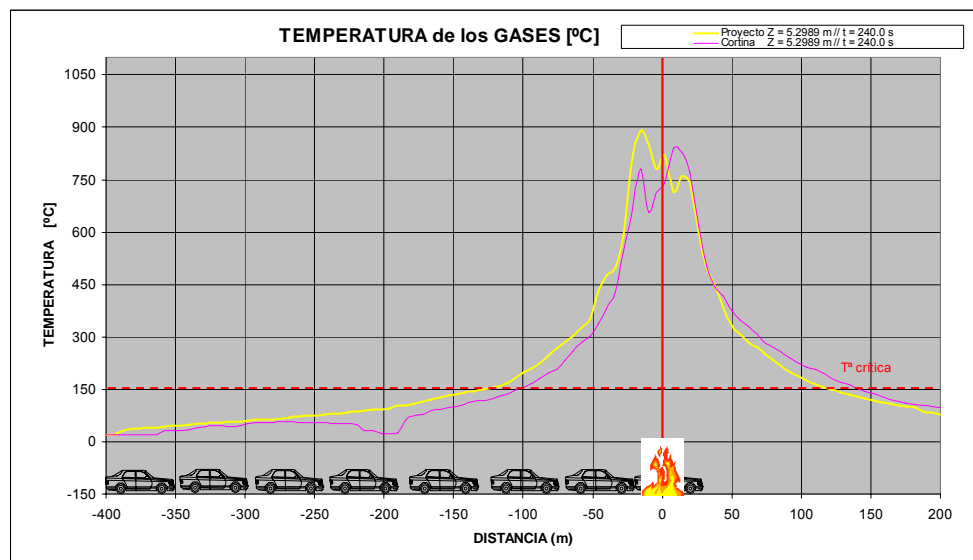
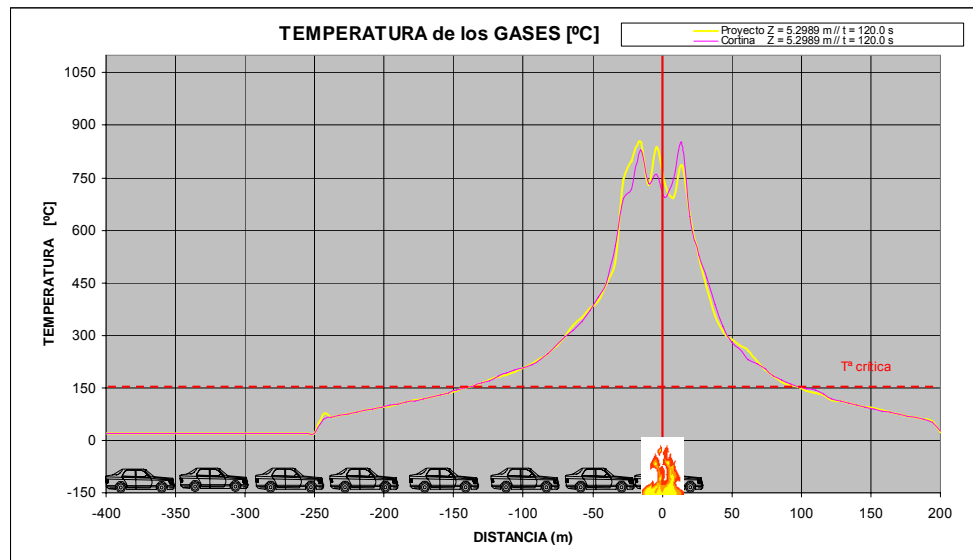
Se analiza las velocidades de los humos a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

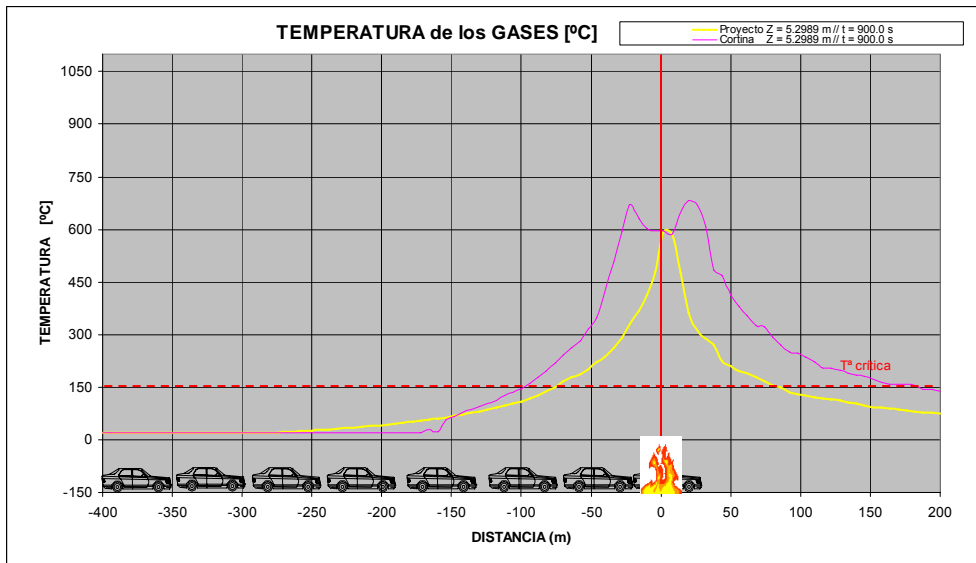
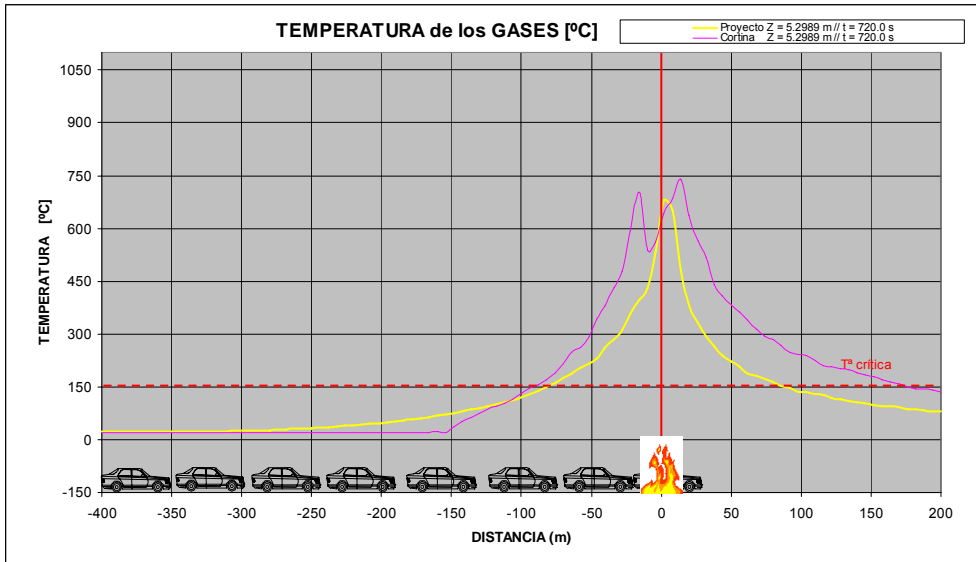
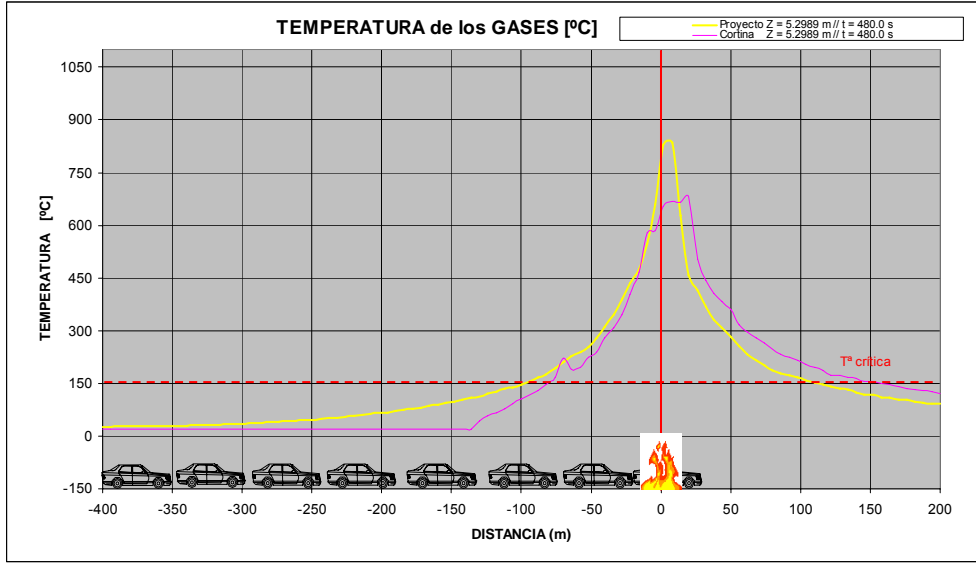


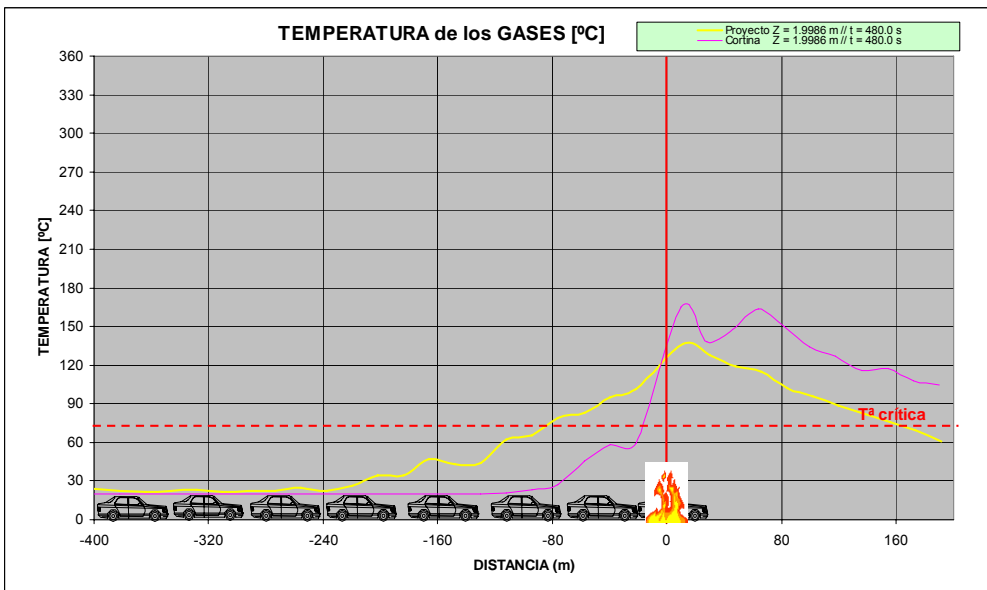
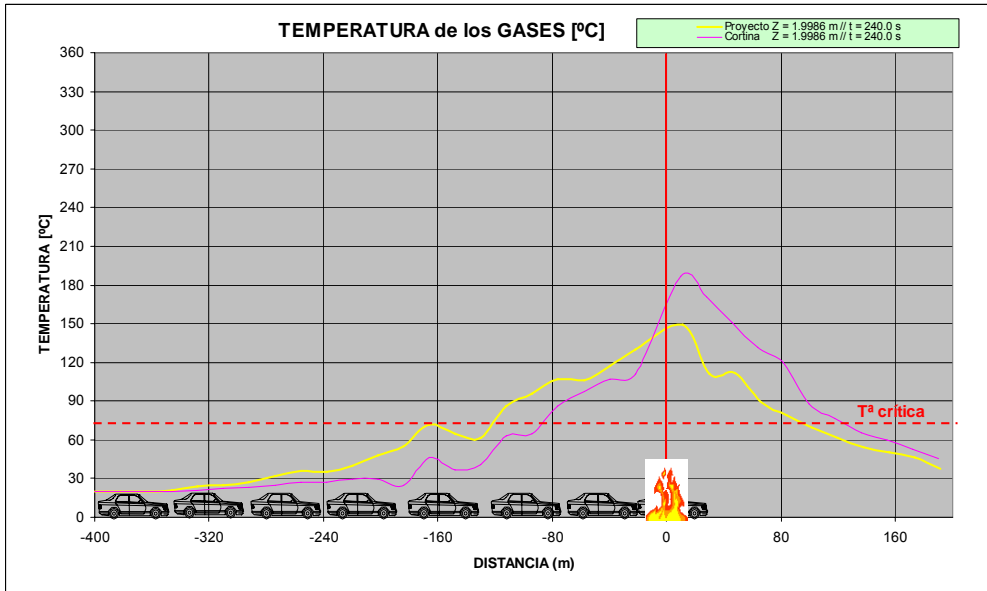
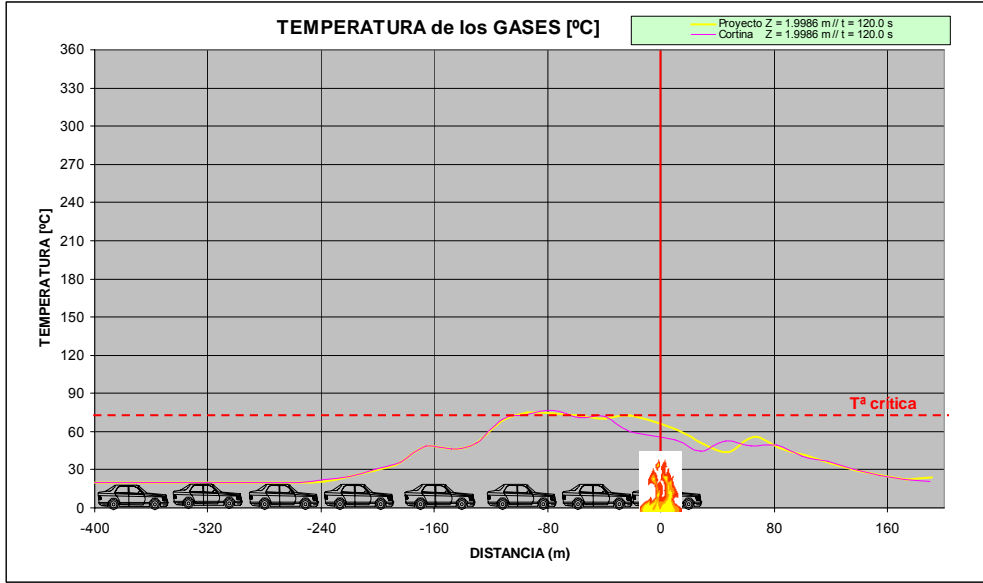


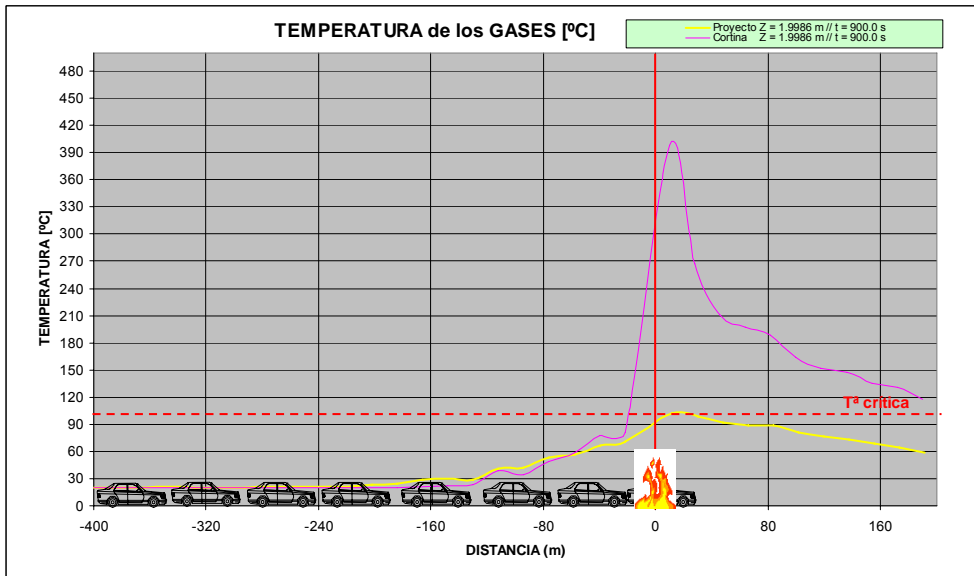
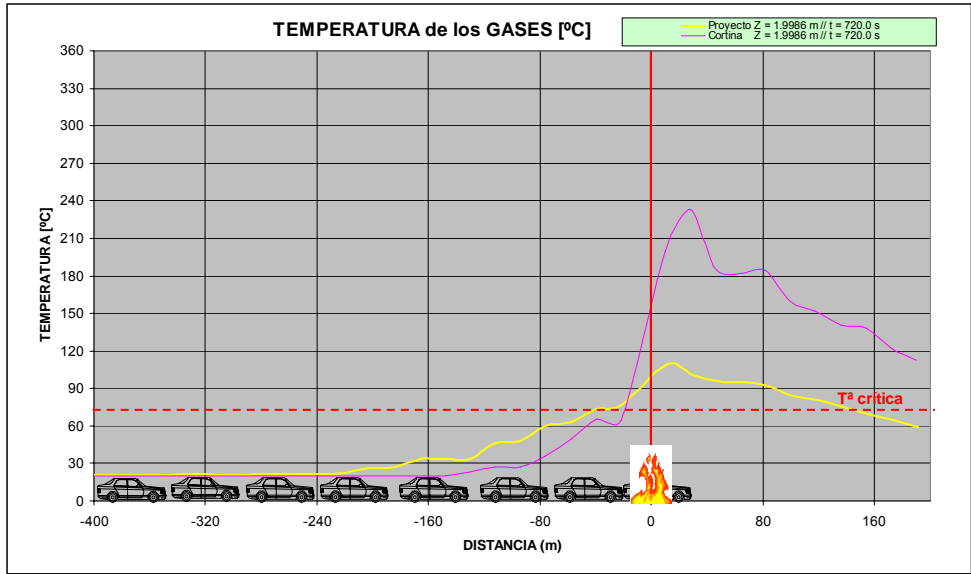
4.2.7.2.4.- Temperaturas. (Modo pozo, 100MW).

Se analizan las temperaturas de los humos 5 y 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.







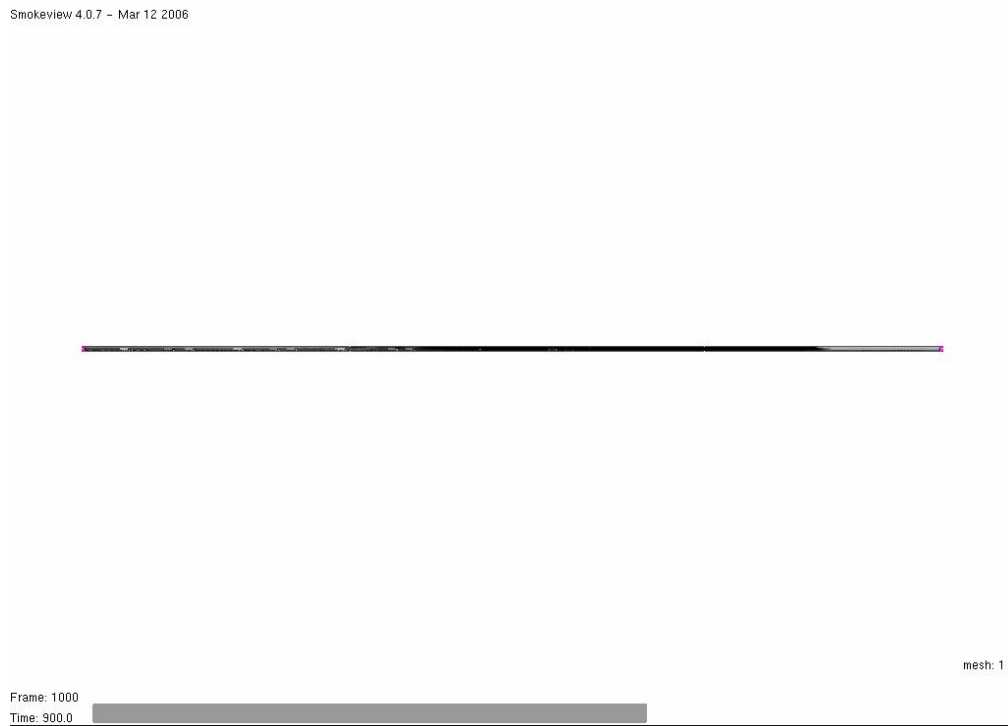


4.2.7.2.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo pozo, 100MW).

A continuación se incorporan dos instantáneas en el segundo 900, en el que se puede comprobar la diferencia que existen entre los dos escenarios.

Escenario sin cortina

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Escenario con cortina

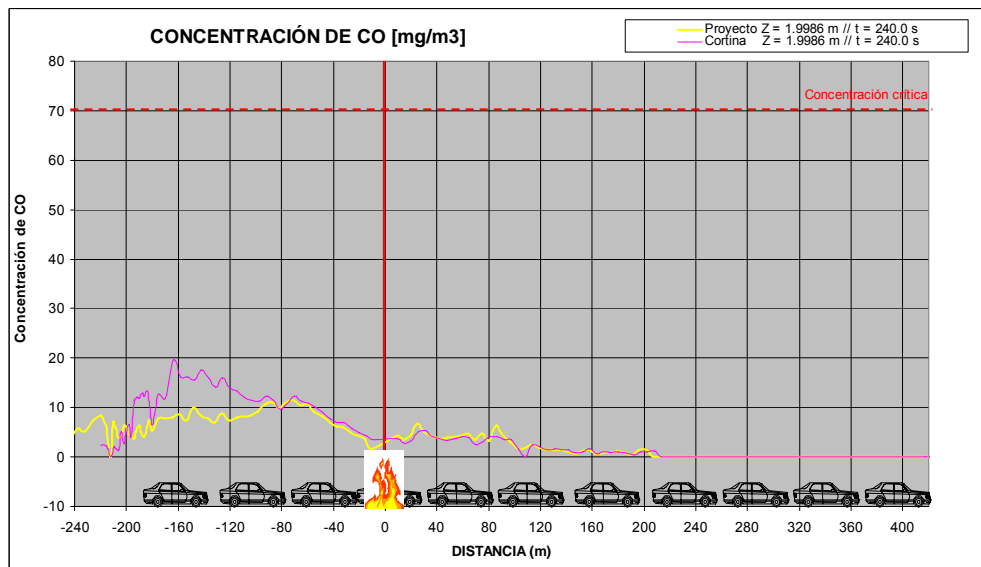
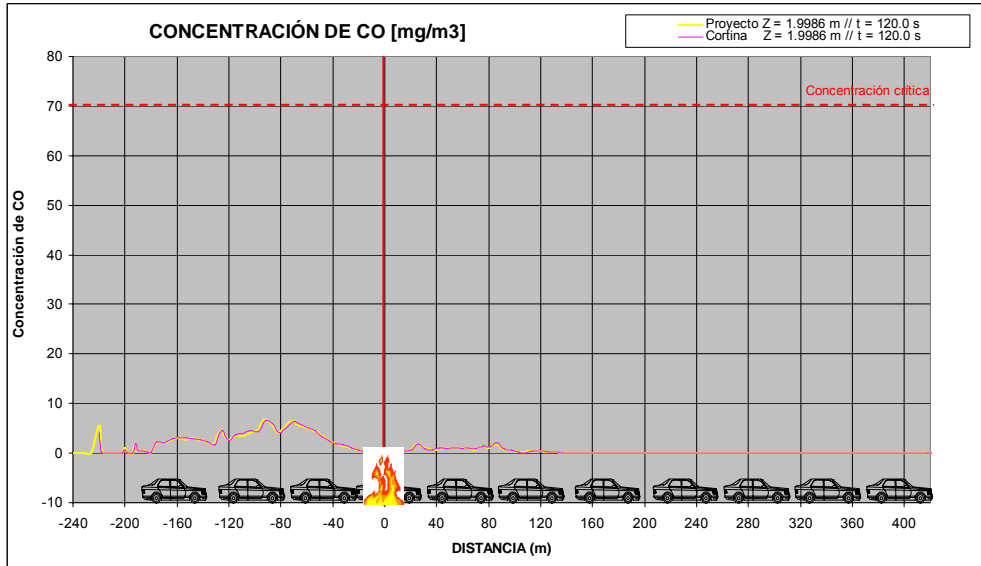
Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006

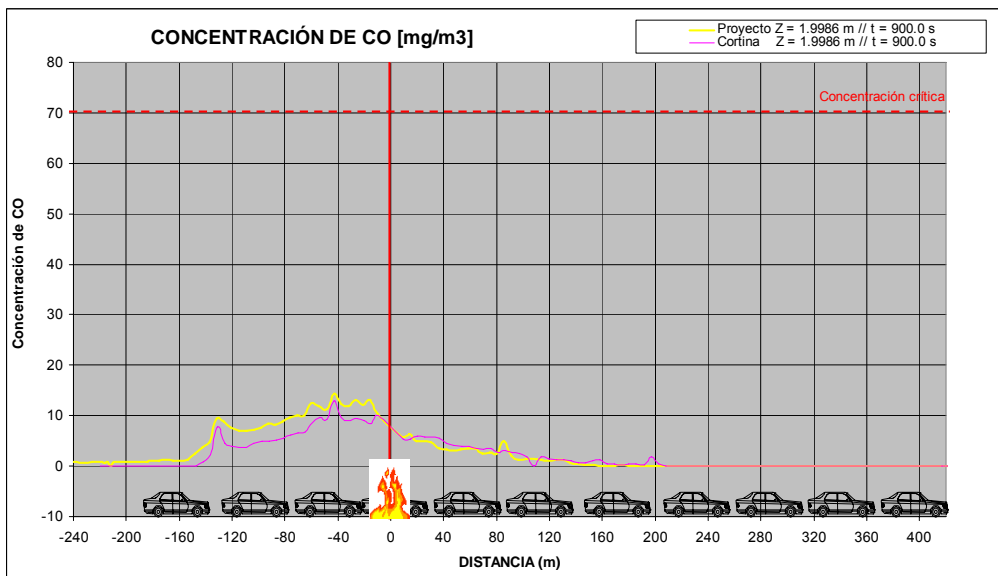
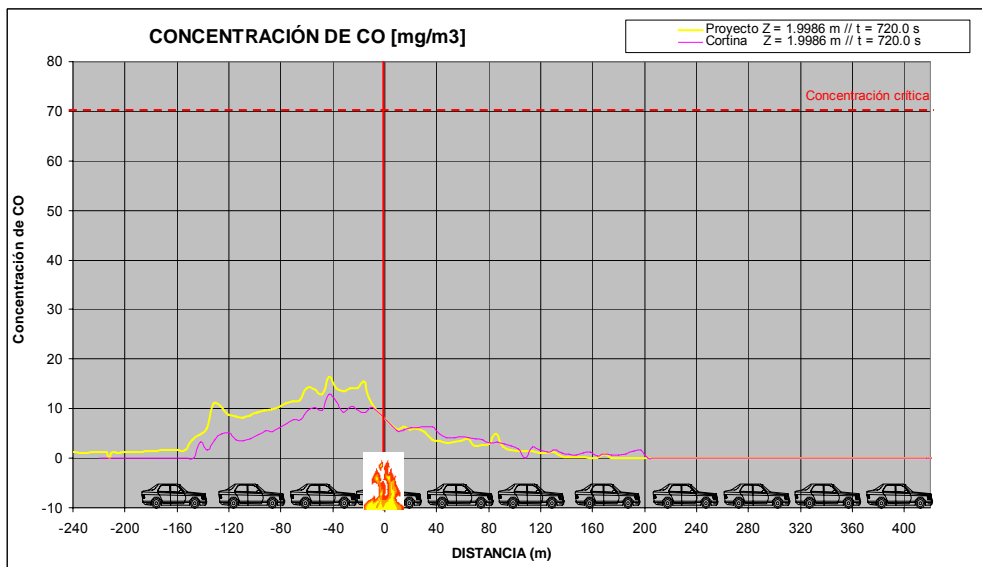
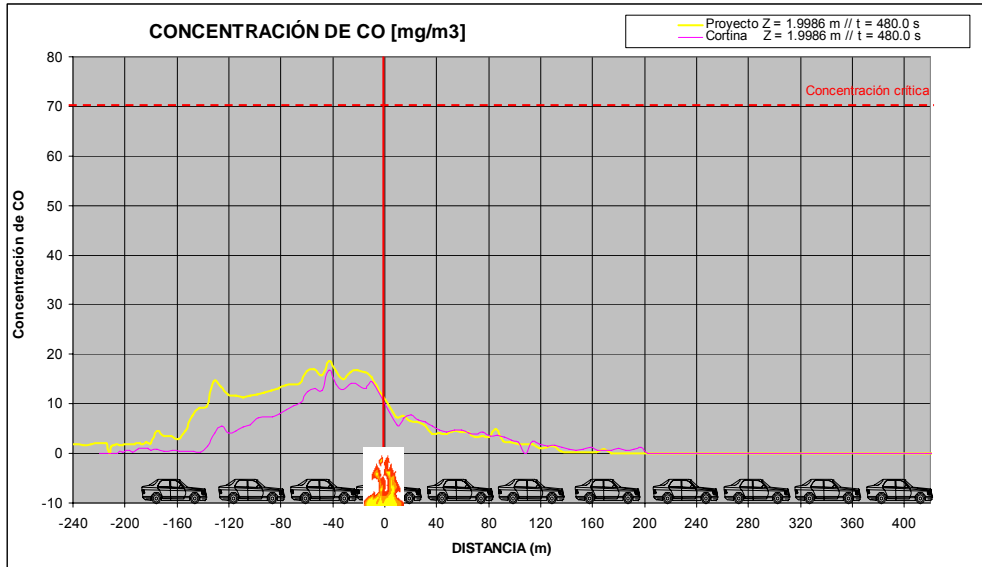


4.2.7.3.- Modo transversal, 30 MW.

4.2.7.3.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal, 30 MW).

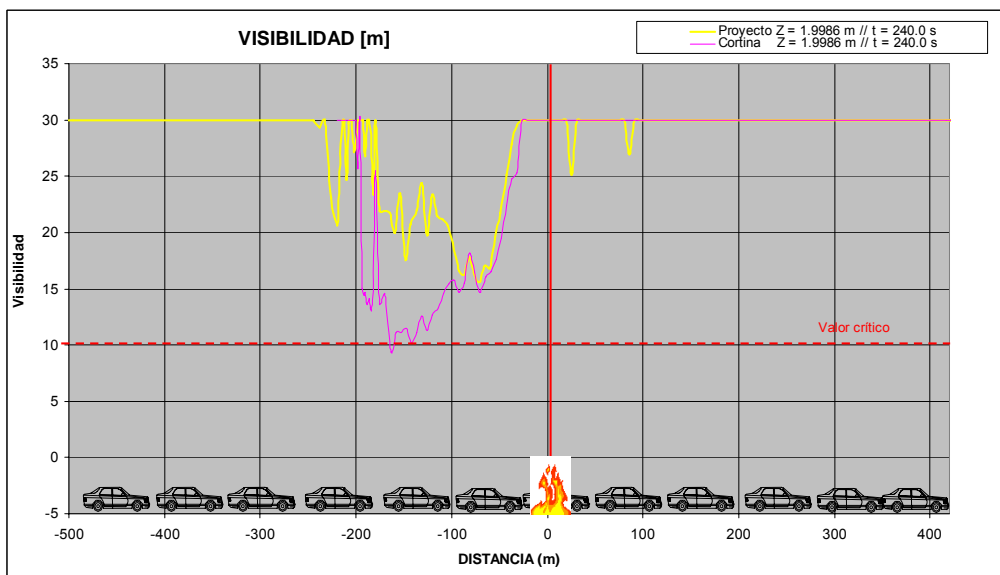
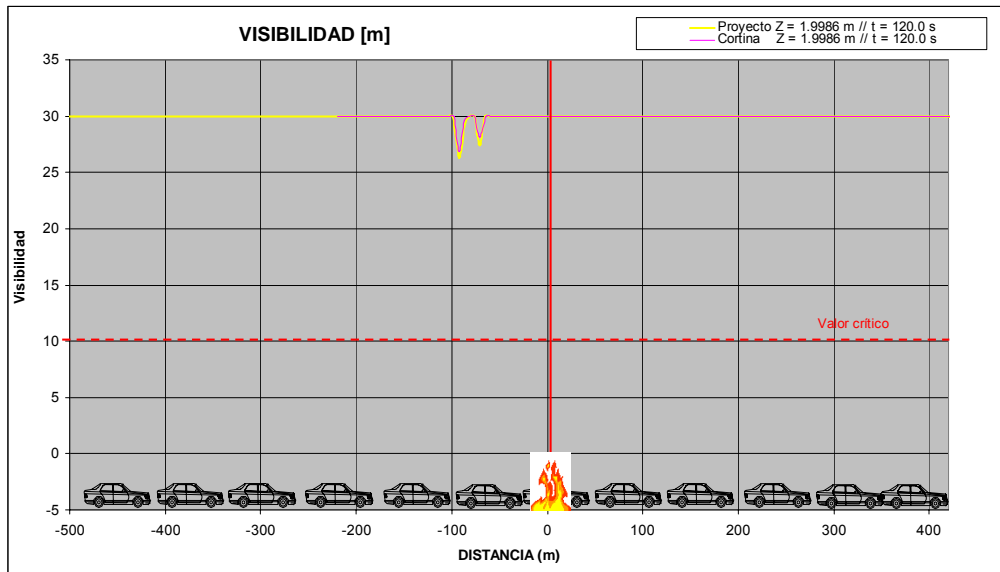
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

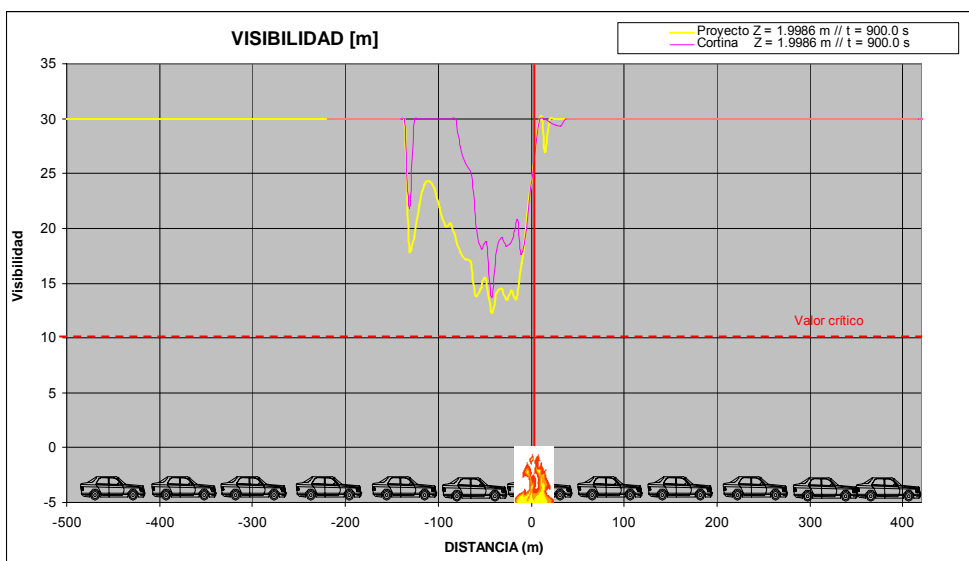
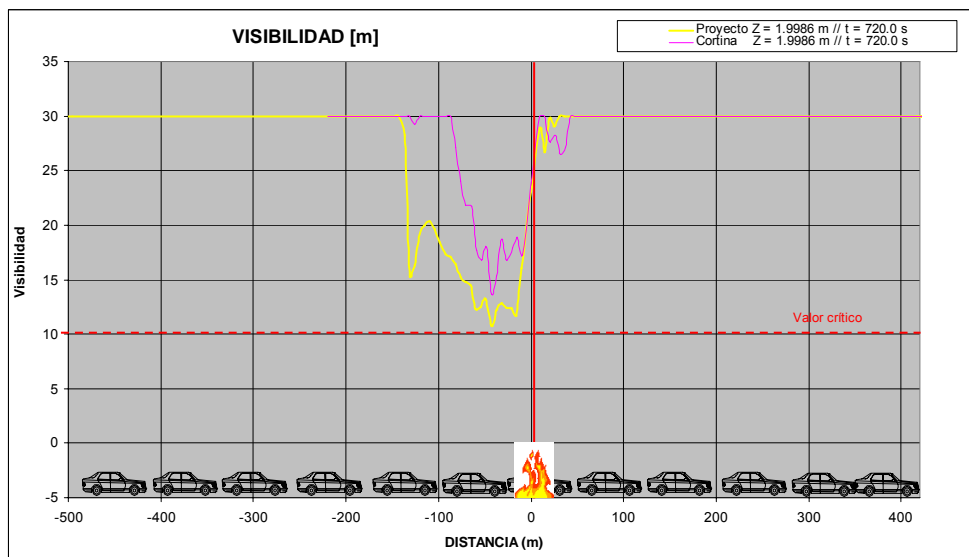
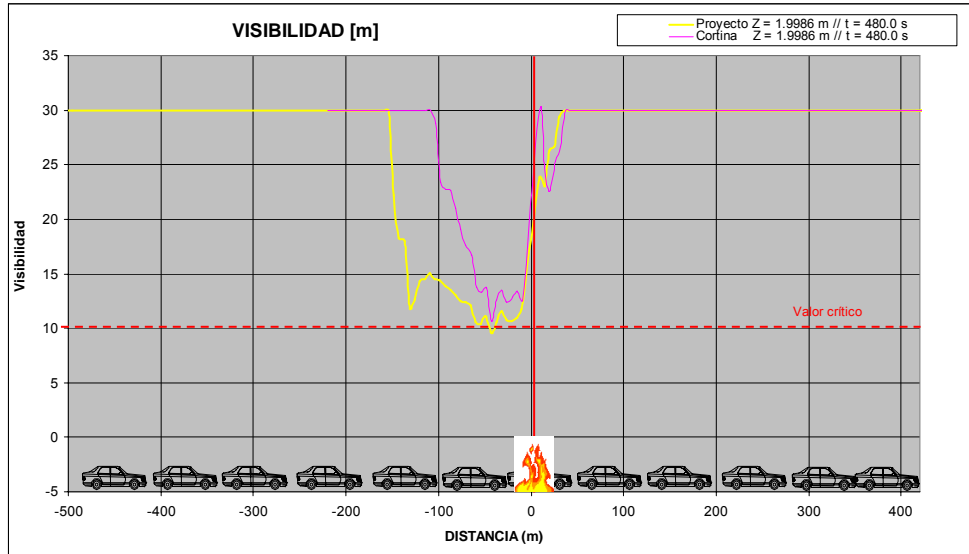




4.2.7.3.2.- Visibilidad. (Modo transversal, 30 MW).

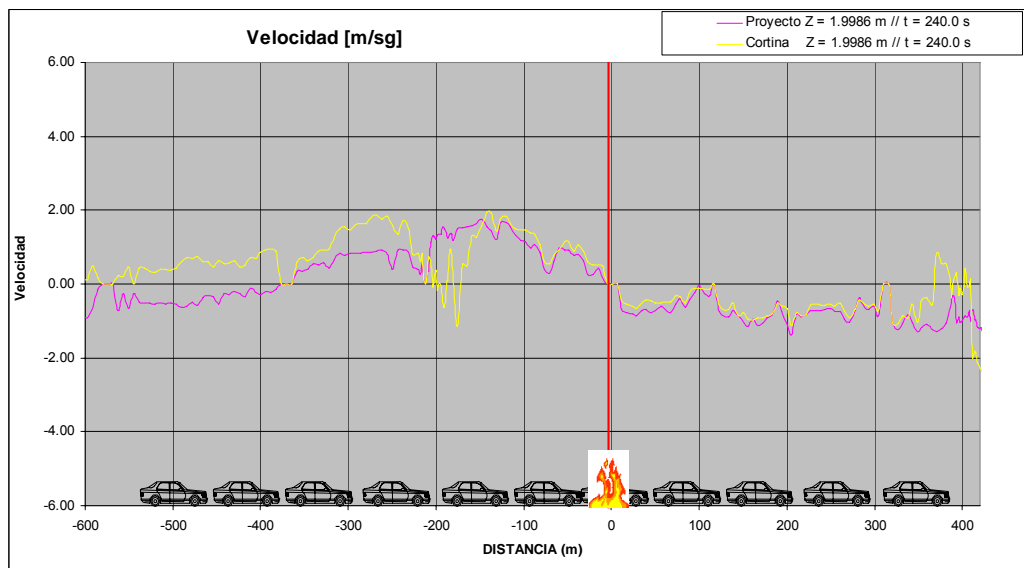
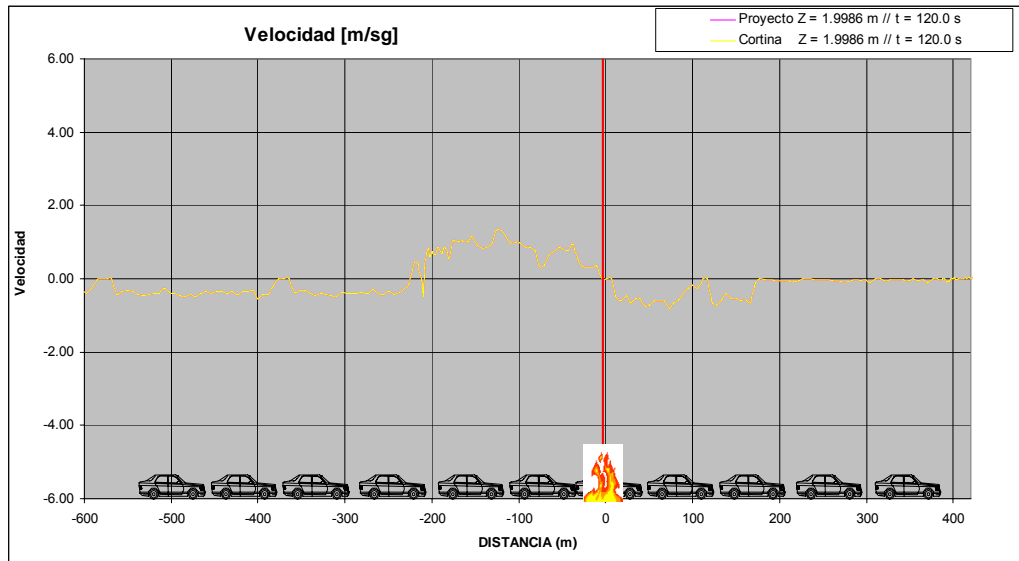
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

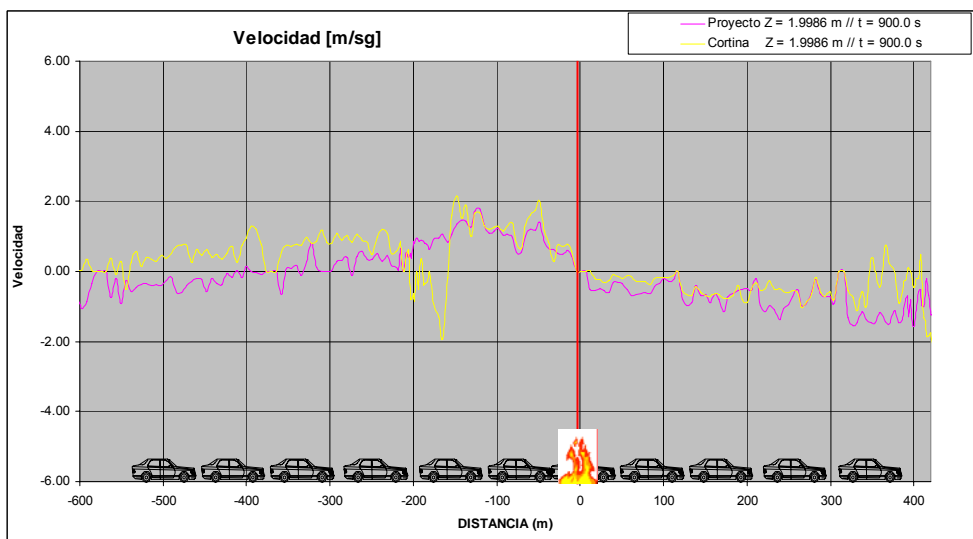
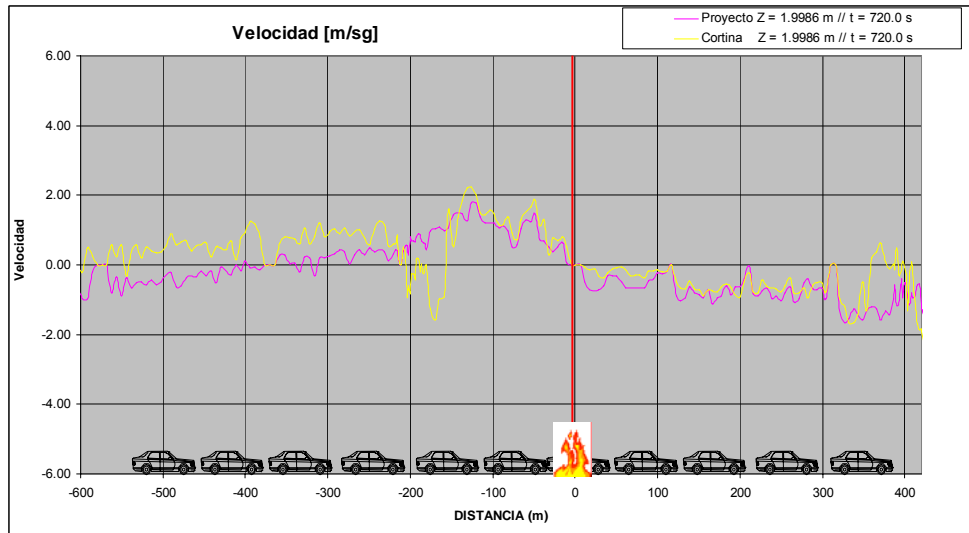
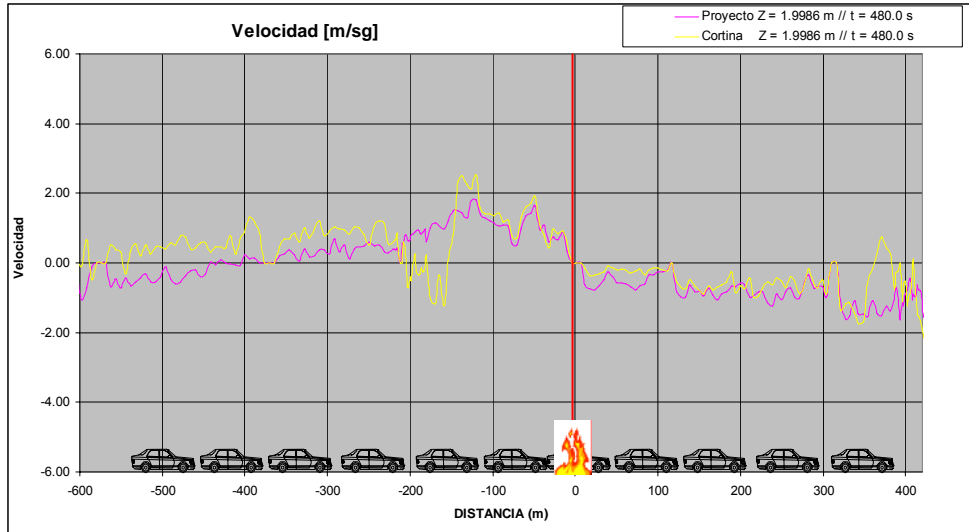




4.2.7.3.3.- Velocidades. (Modo transversal, 30 MW).

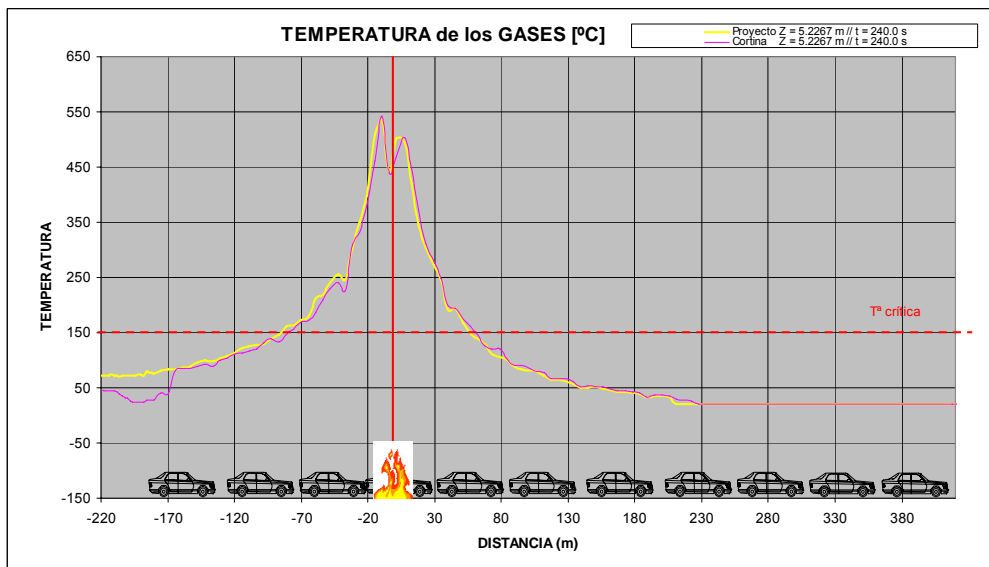
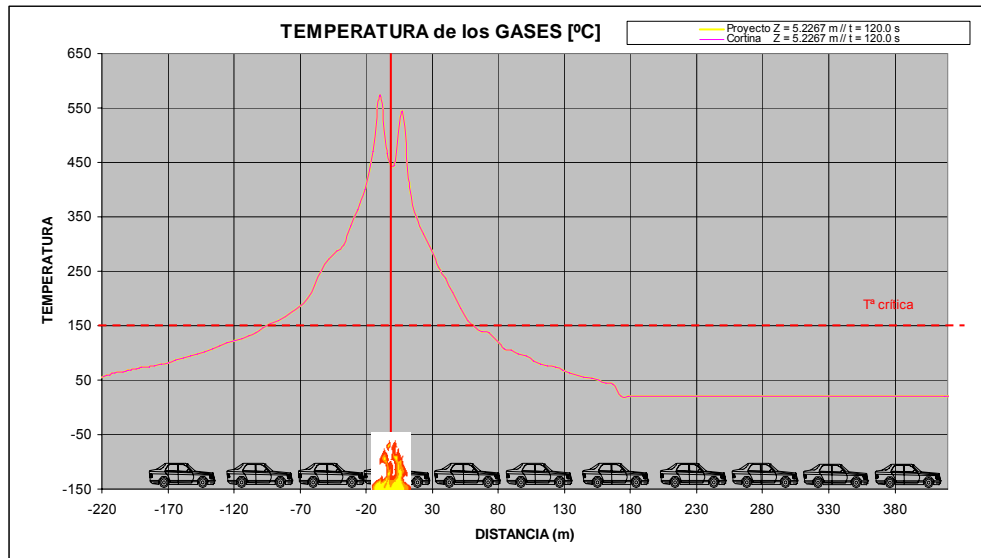
Se analiza las velocidades de los humos a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

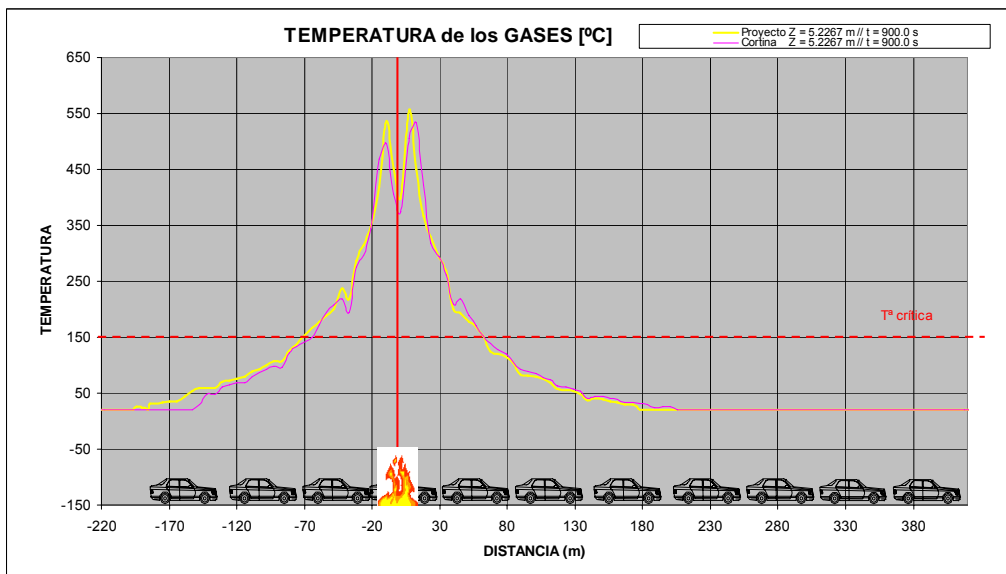
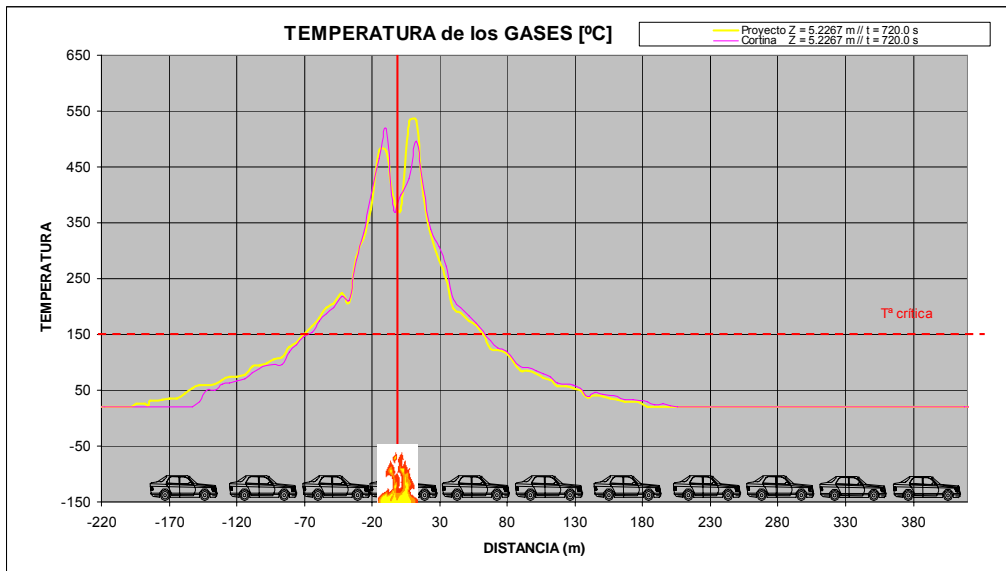
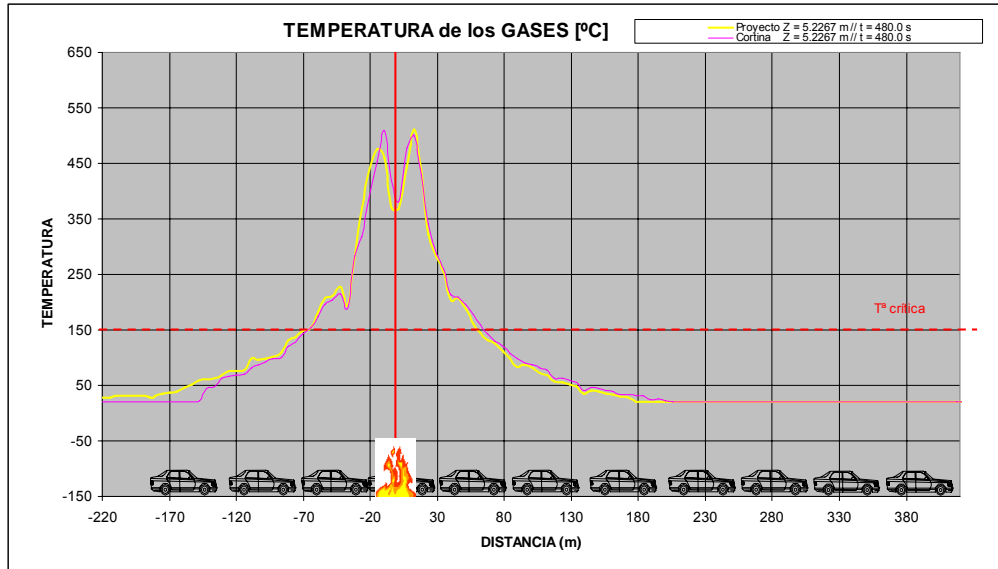


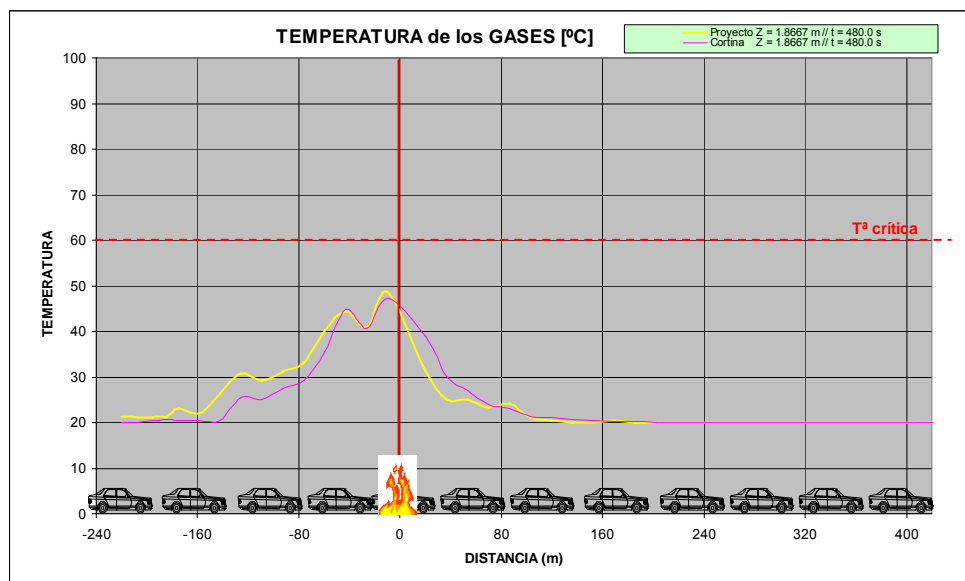
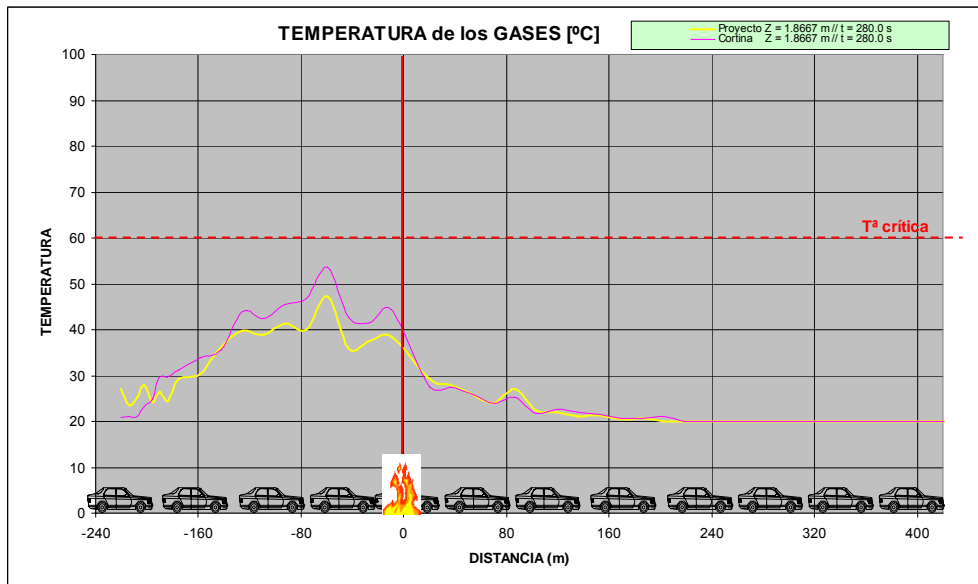
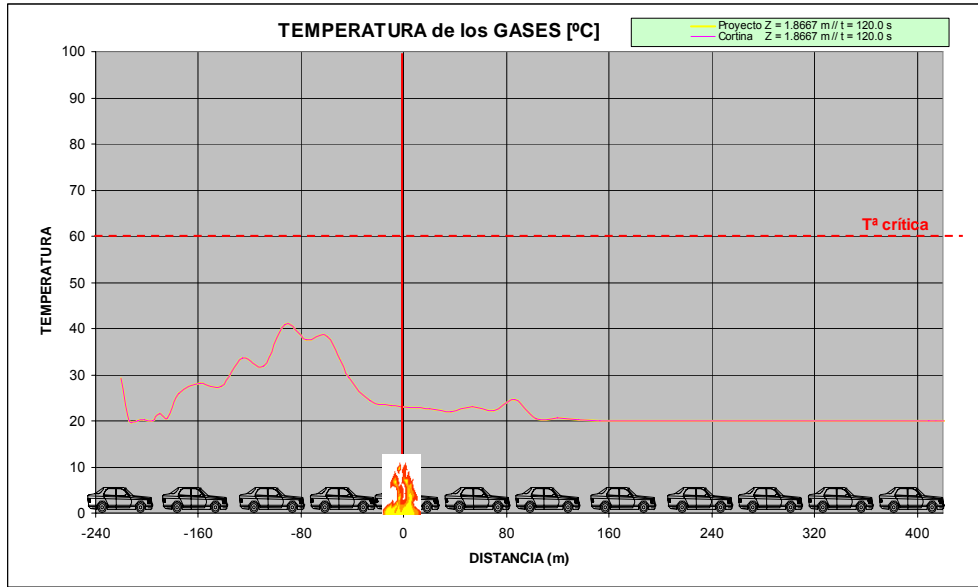


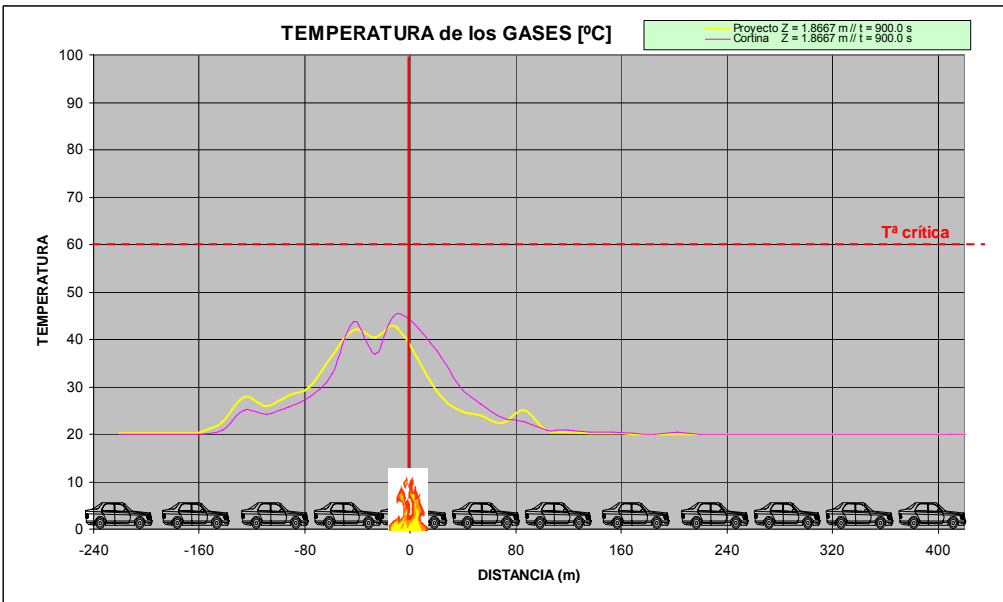
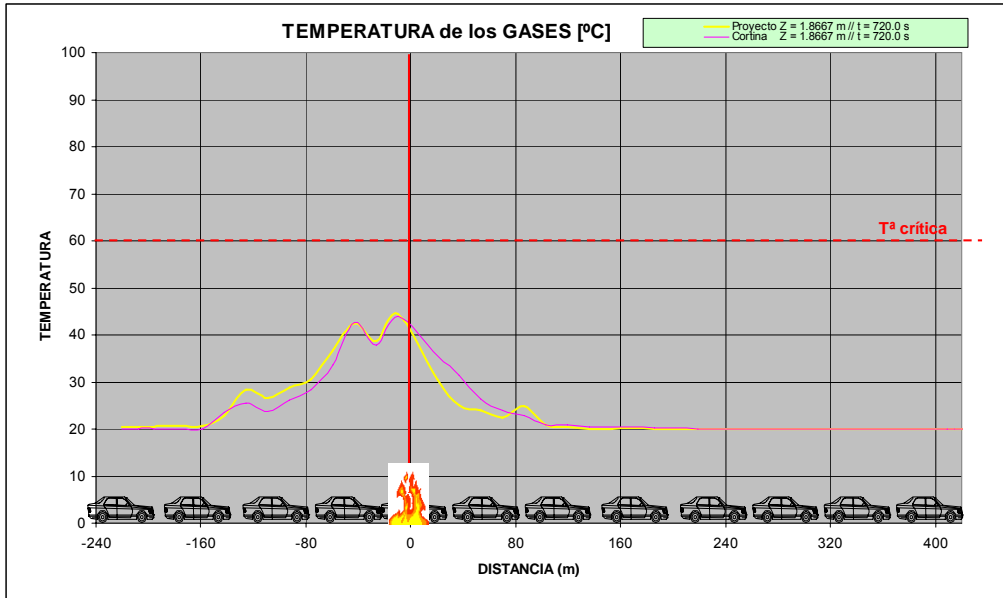
4.2.7.3.4.- Temperaturas. (Modo transversal, 30 MW).

Se analizan las temperaturas de los humos 5 y 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.









4.2.7.3.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo transversal, 30 MW).

A continuación se incorporan dos instantáneas en el segundo 900, en el que se puede comprobar la diferencia que existen entre los dos escenarios.

Escenario sin cortina

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Frame: 1000
Time: 900.0

mesh: 1

Escenario con cortina

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



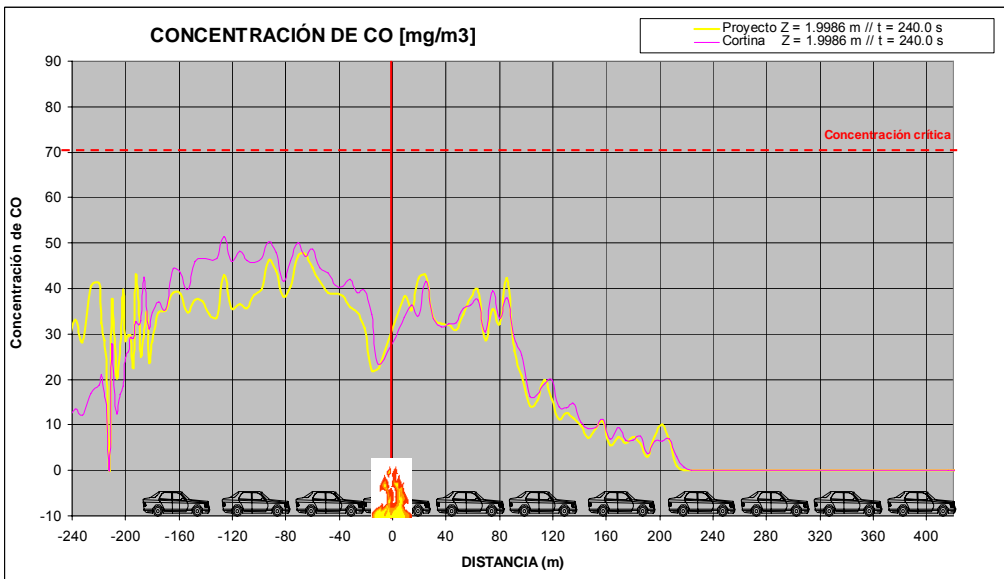
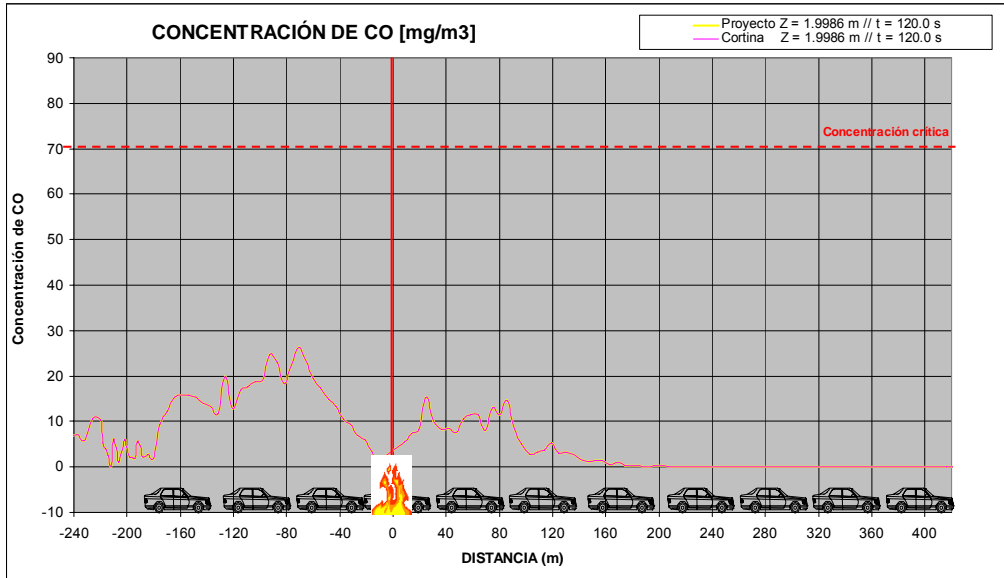
Frame: 1000
Time: 900.0

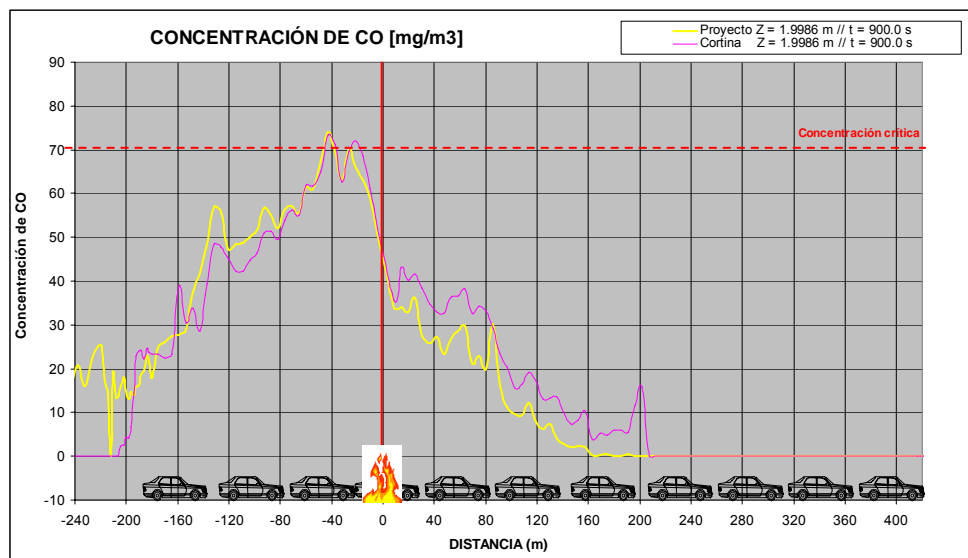
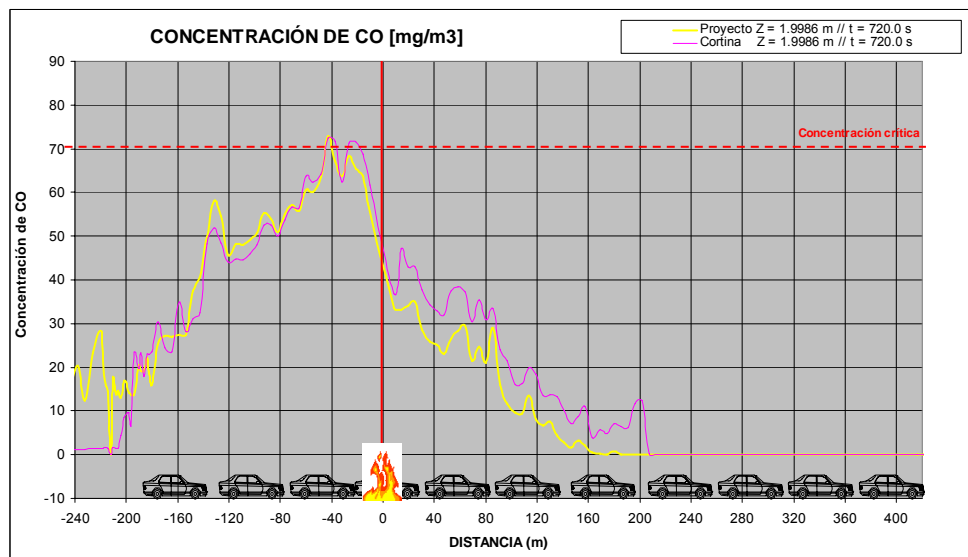
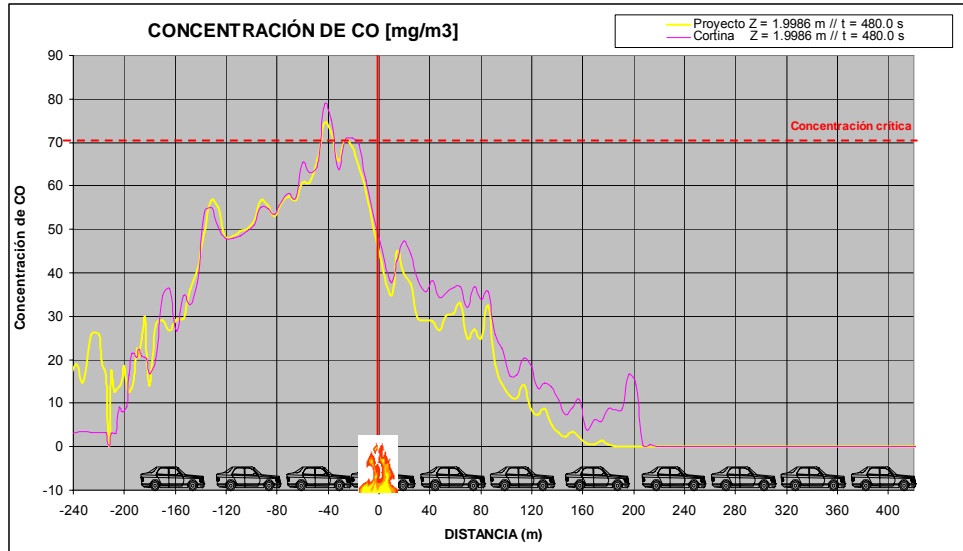
mesh: 1

4.2.7.4.- Modo transversal, 100 MW.

4.2.7.4.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal, 100 MW).

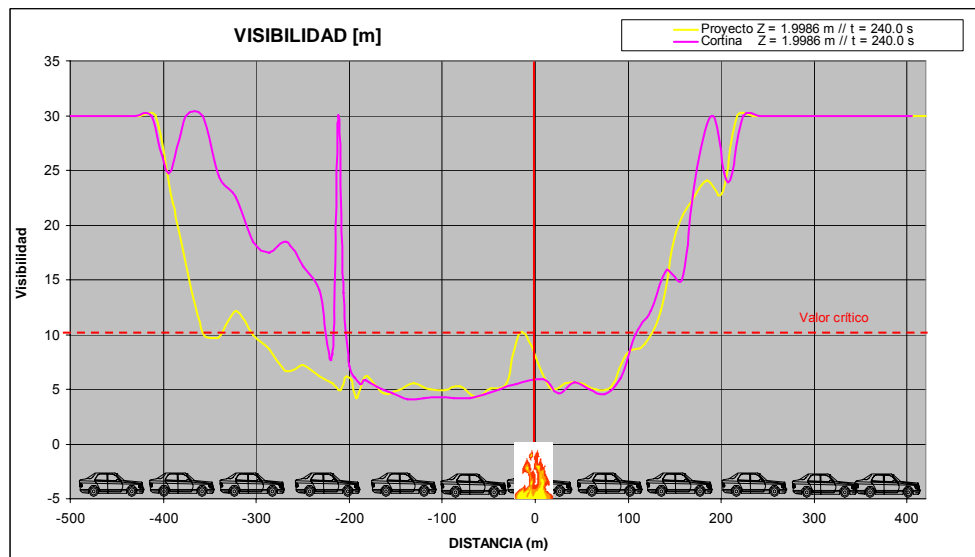
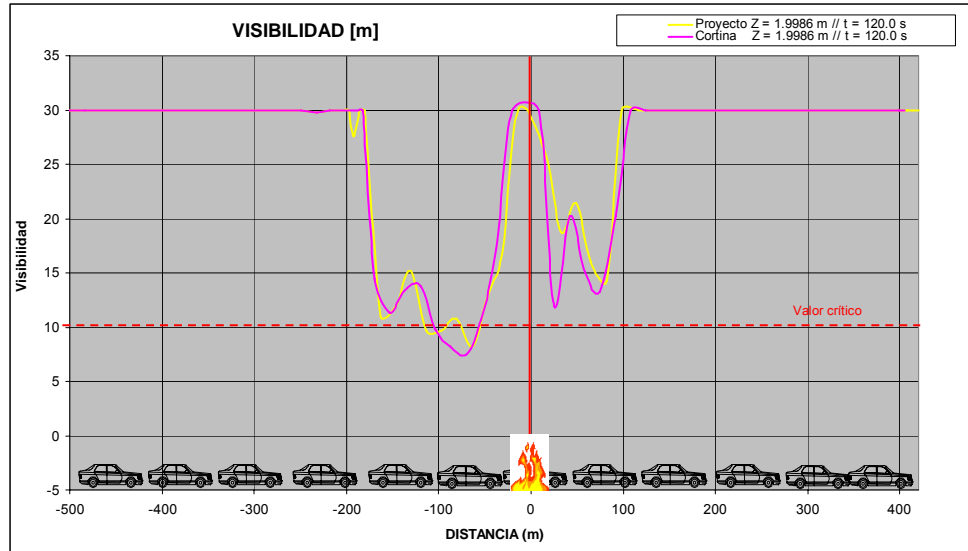
Se analiza las concentraciones de CO a lo largo de los 900 sg y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 minutos.

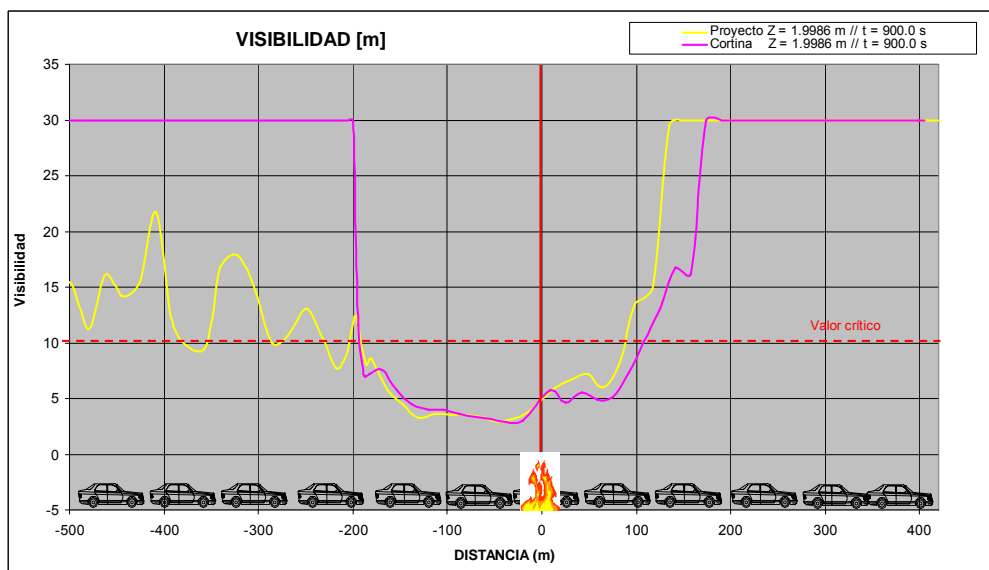
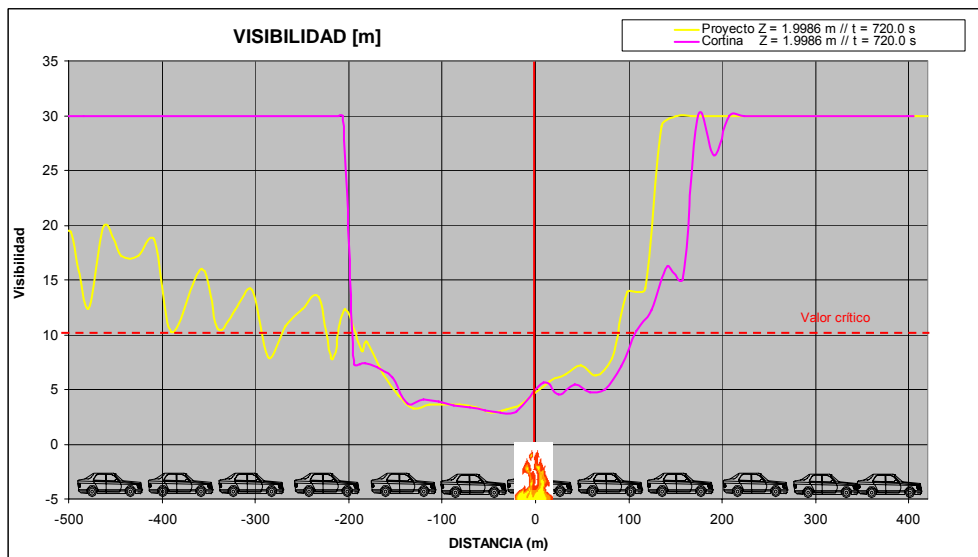
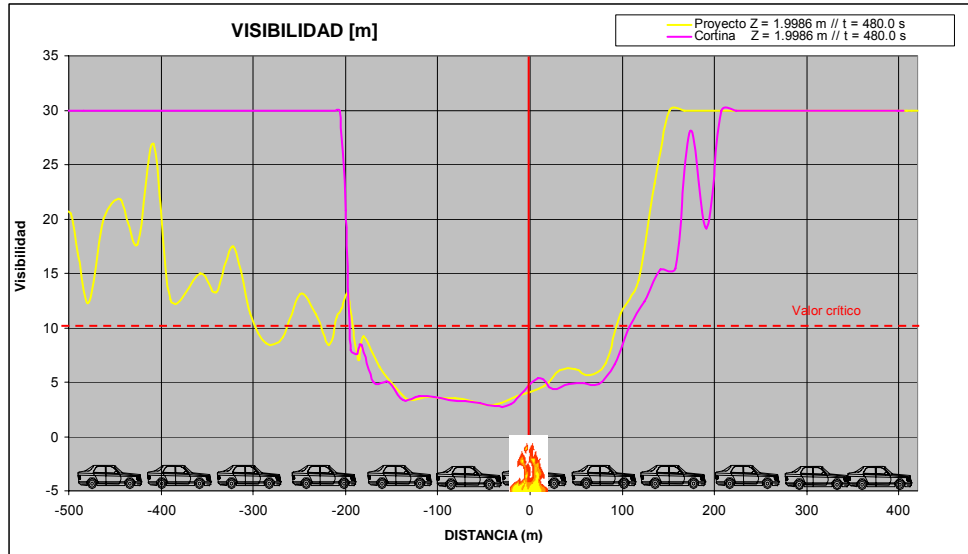




4.2.7.4.2.- Visibilidad. (Modo transversal, 100 MW).

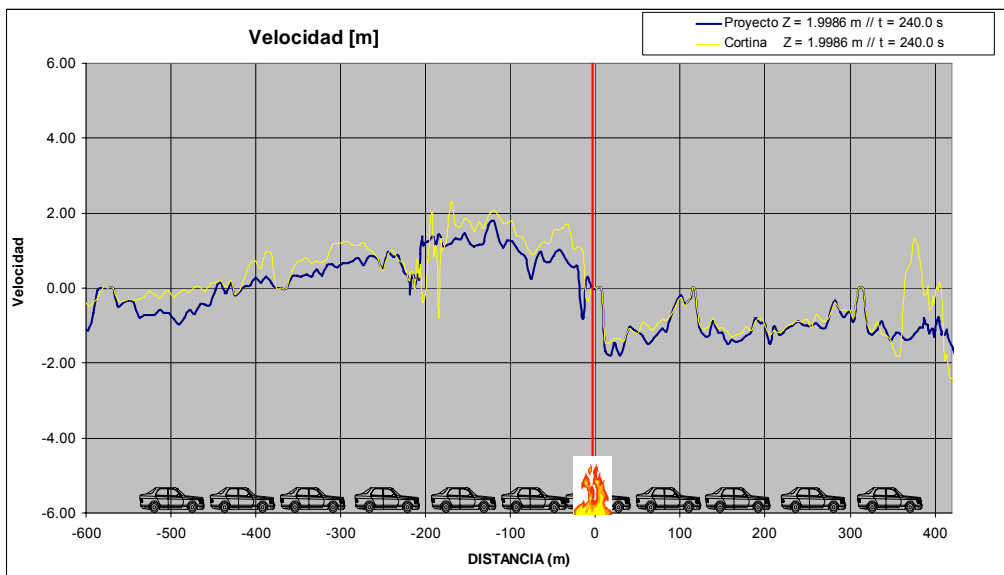
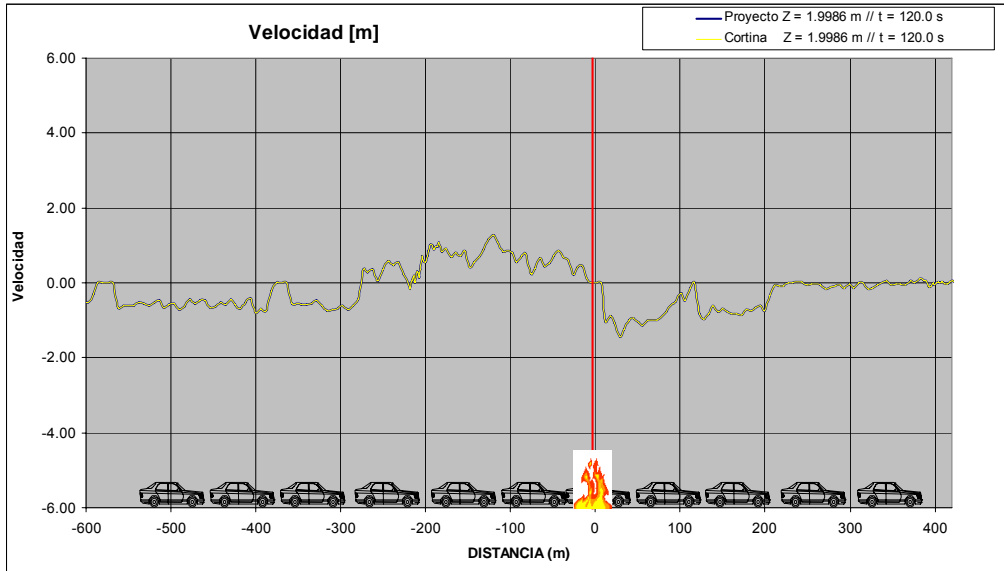
Se analiza la visibilidad a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

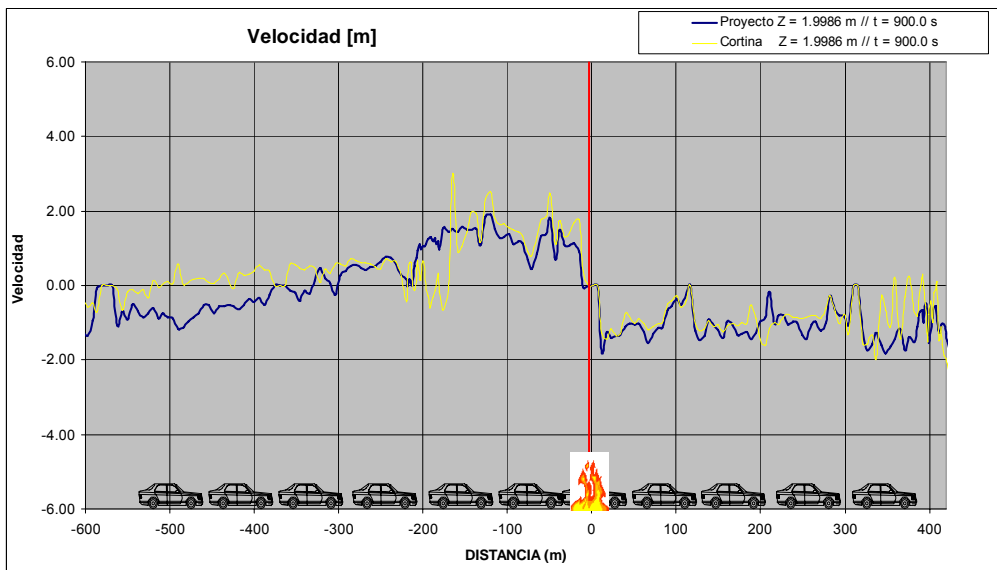
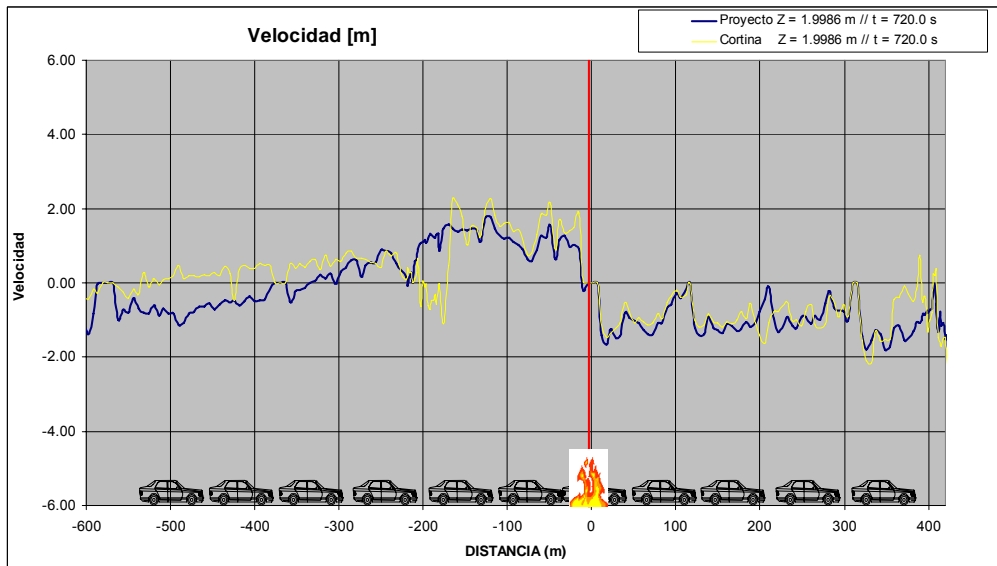
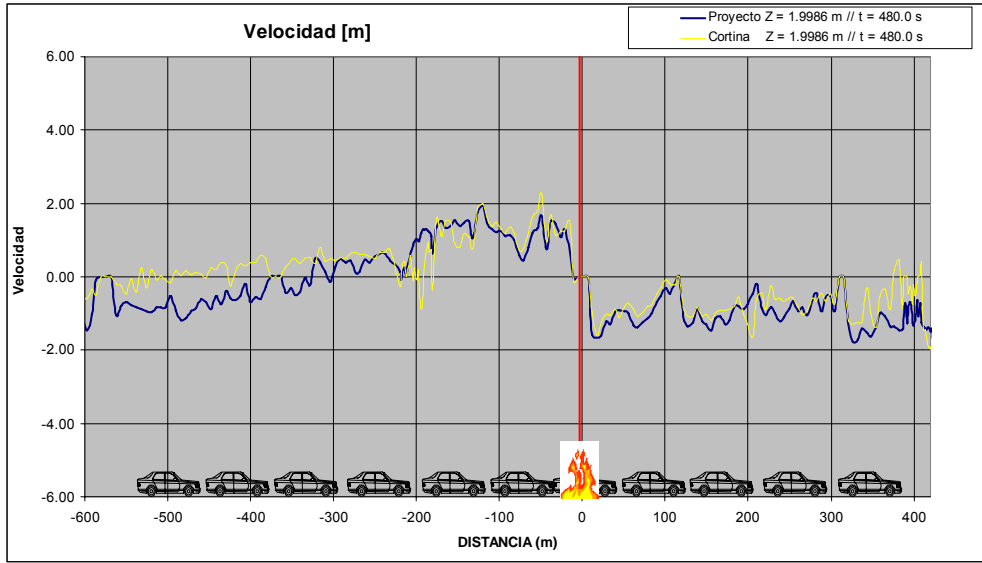




4.2.7.4.3.- Velocidades. (Modo transversal, 100 MW).

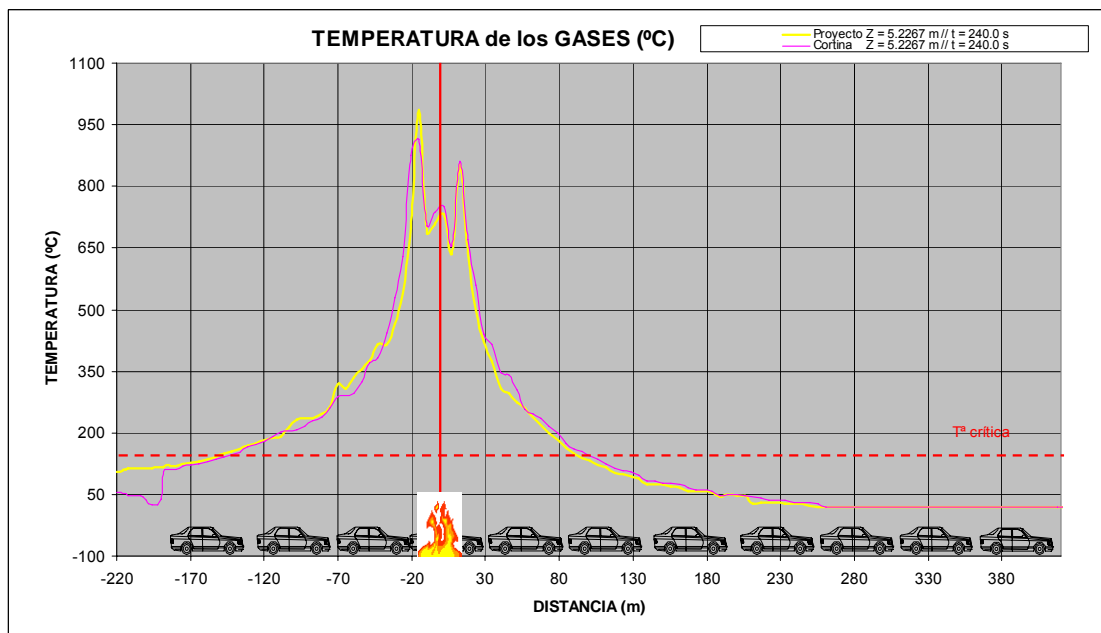
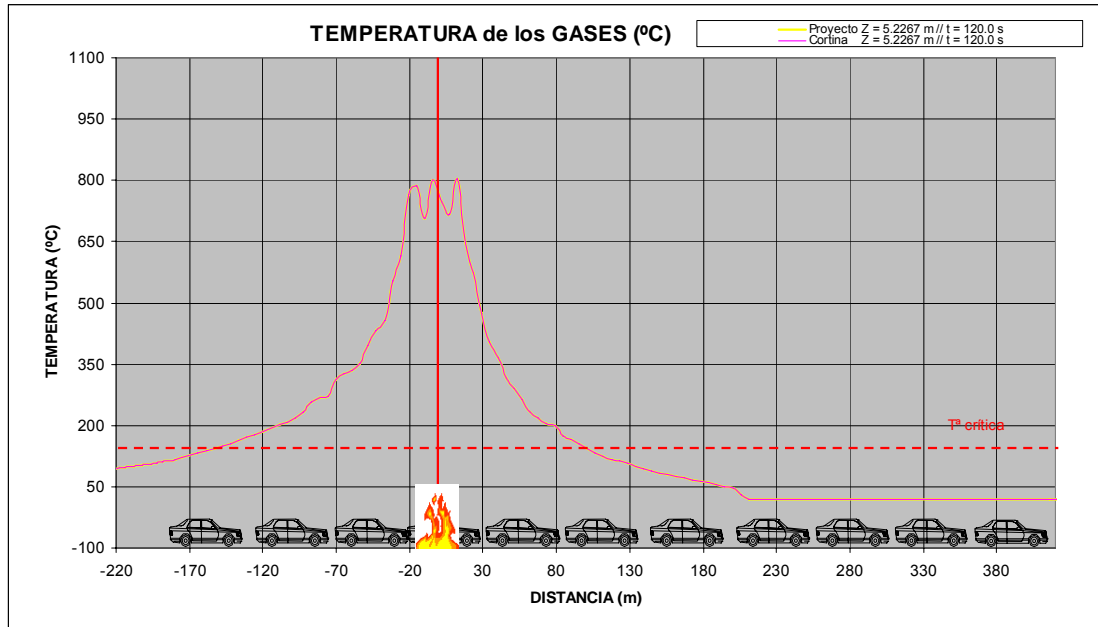
Se analiza las velocidades de los humos a 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.

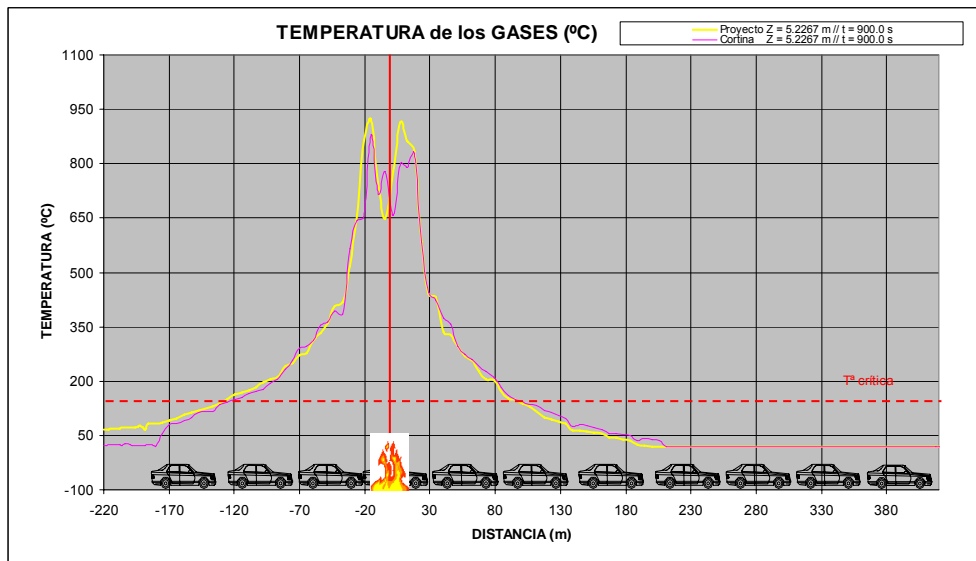
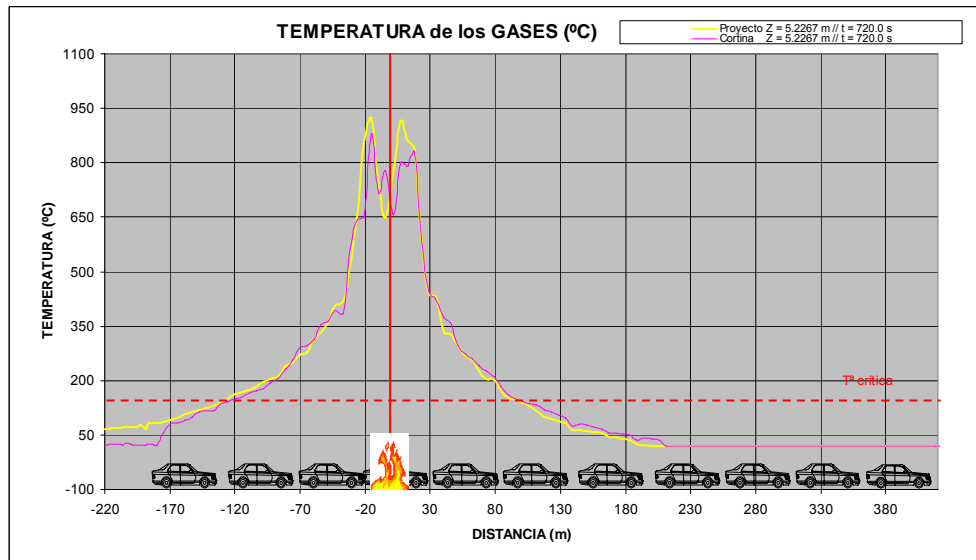
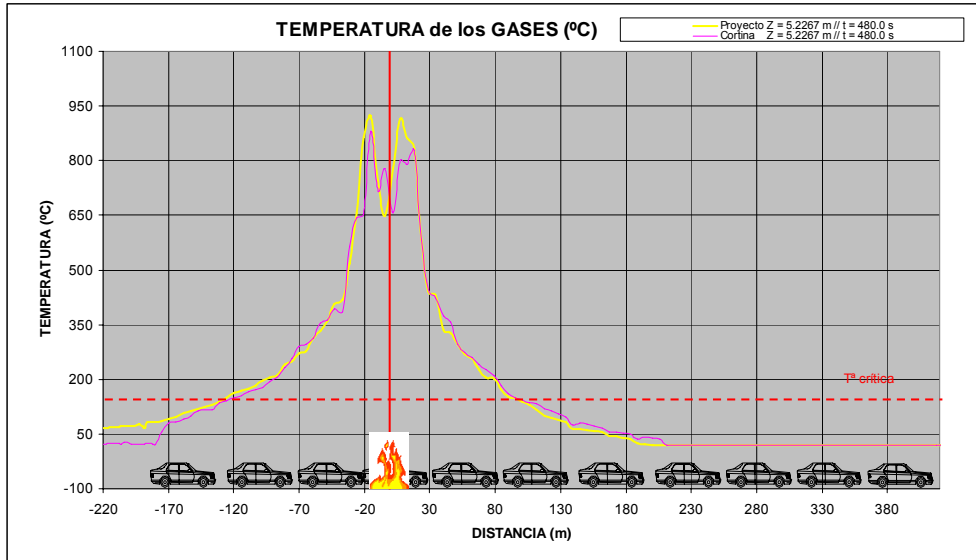


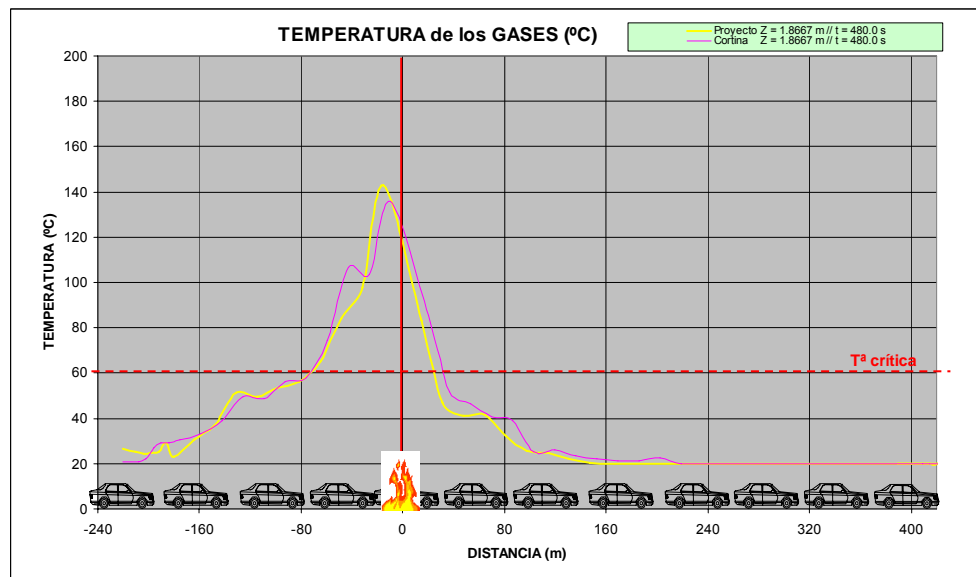
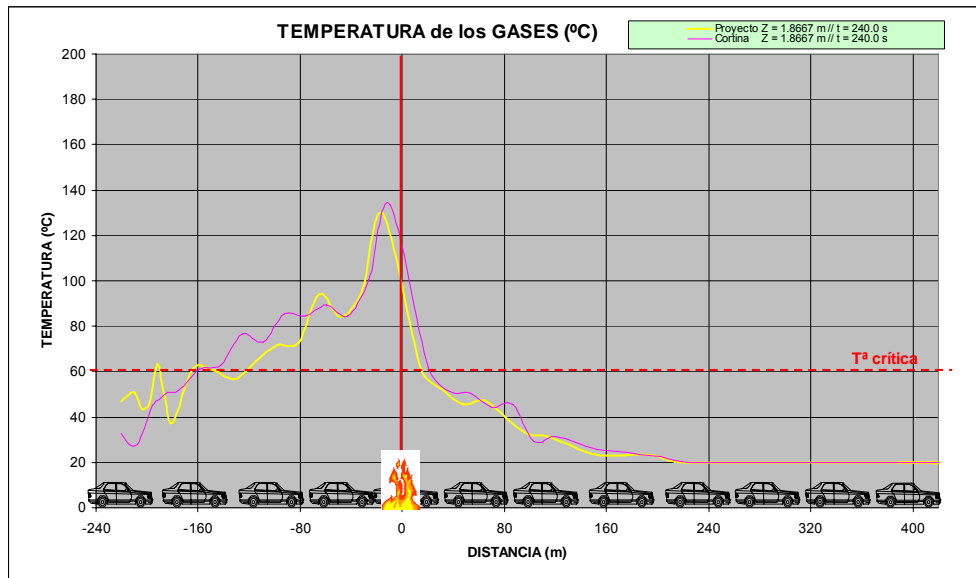
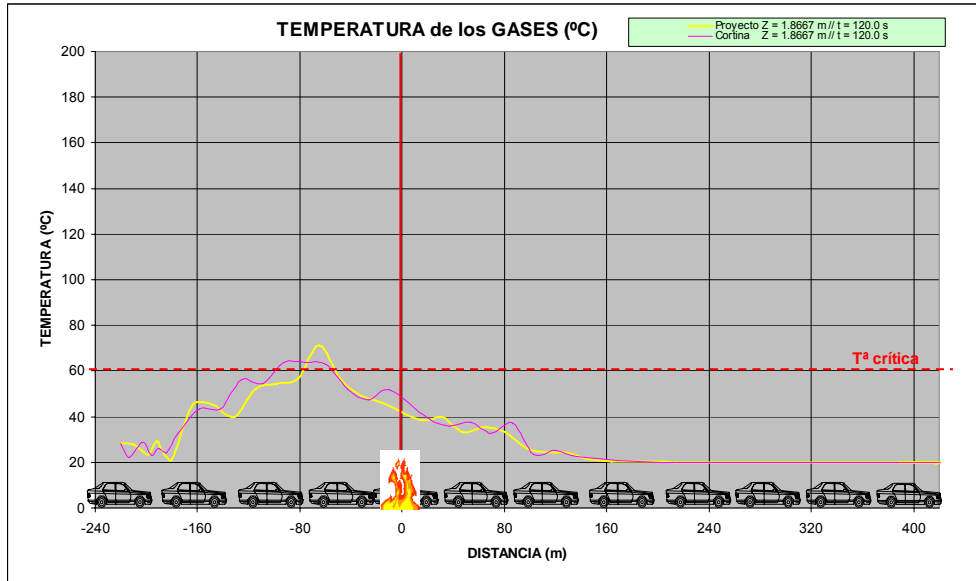


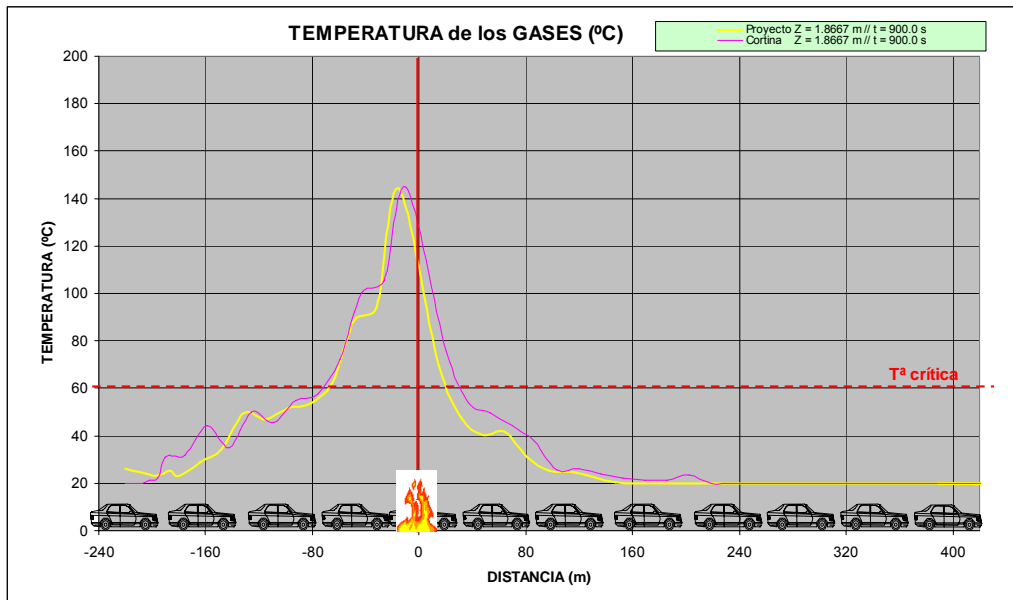
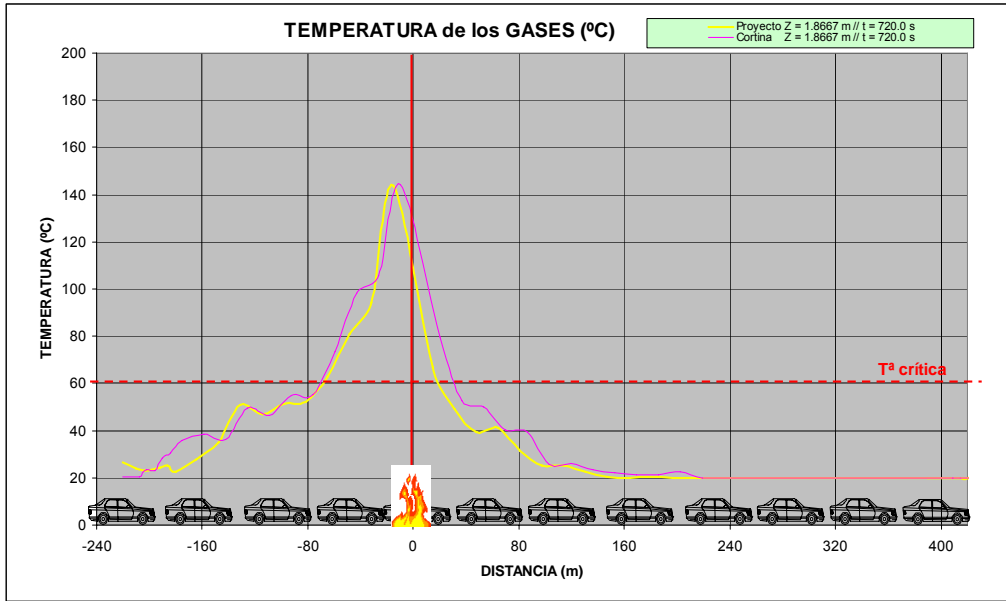
4.2.7.4.4.- Temperaturas. (Modo transversal, 100 MW).

Se analizan las temperaturas de los humos 5 y 2m de altura y se representan 5 gráficos en los tiempos 120, 240, 480, 720 y 900 segundos.









4.2.7.4.5.- Evolución de las partículas de humo. (Modo transversal, 100 MW).

A continuación se incorporan dos instantáneas en el segundo 900, en el que se puede comprobar la diferencia que existen entre los dos escenarios.

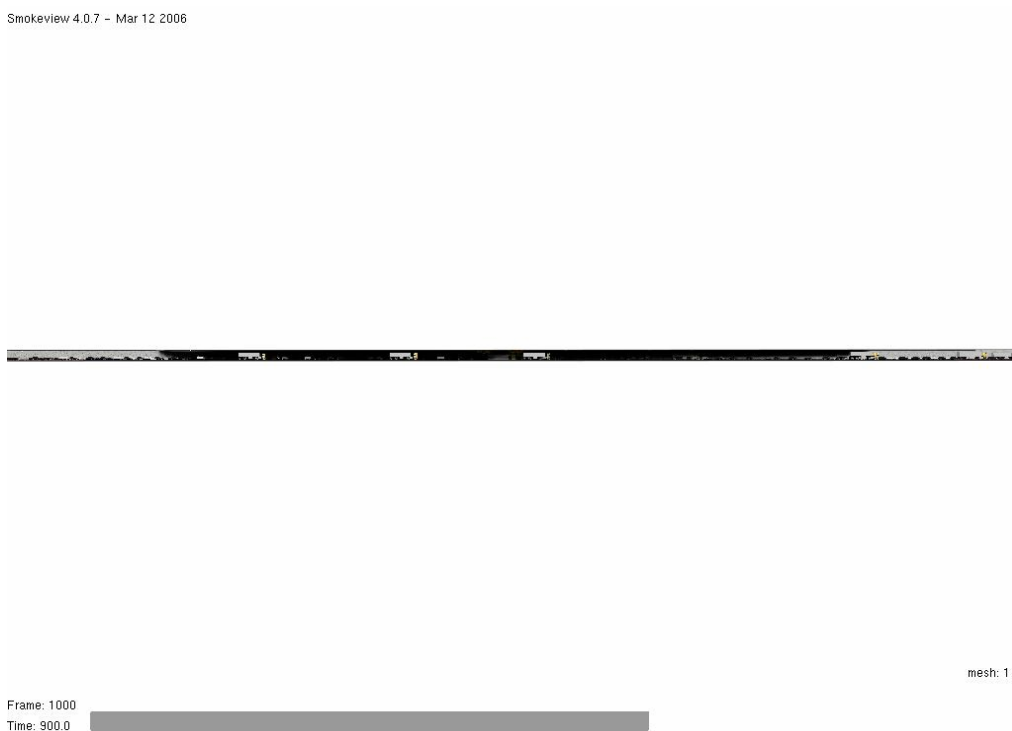
Escenario sin cortina

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



Escenario con cortina

Smokeview 4.0.7 - Mar 12 2006



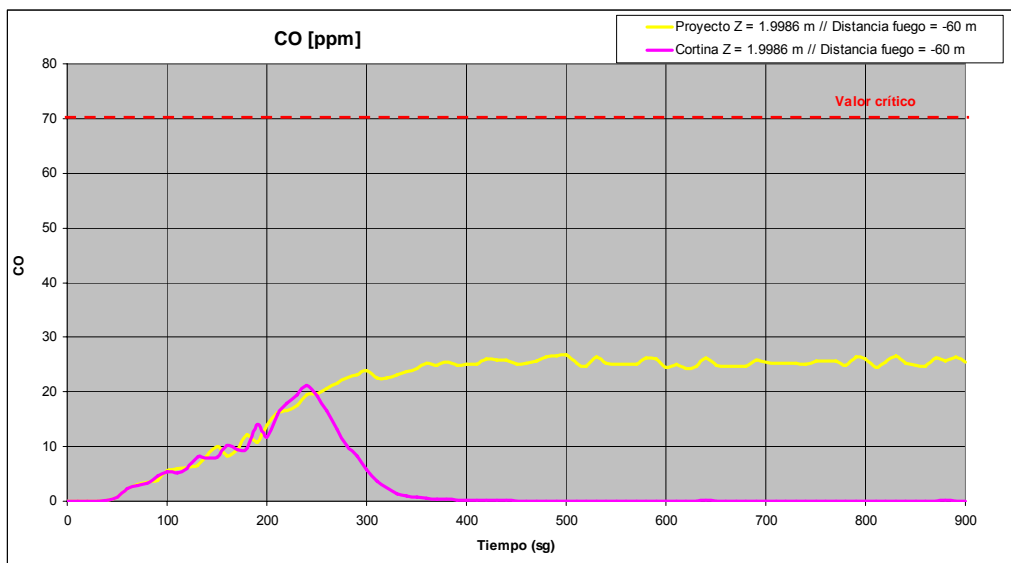
4.2.8.-EVOLUCIÓN DE LAS DISTINTAS VARIABLES EN EL TIEMPO.

A continuación se exponen las gráficas en las que se describe como evolucionan las distintas variables a lo largo de los 900 sg.

4.2.8.1.- Modo pozo, 30MW.

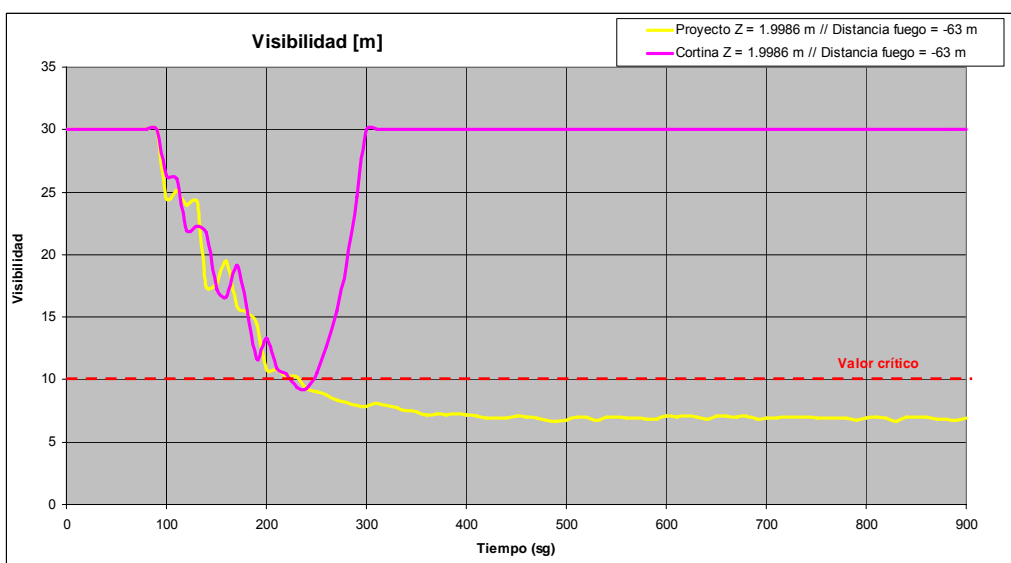
4.2.8.1.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo, 30MW).

Consideramos un punto fijo a 60 m del fuego.

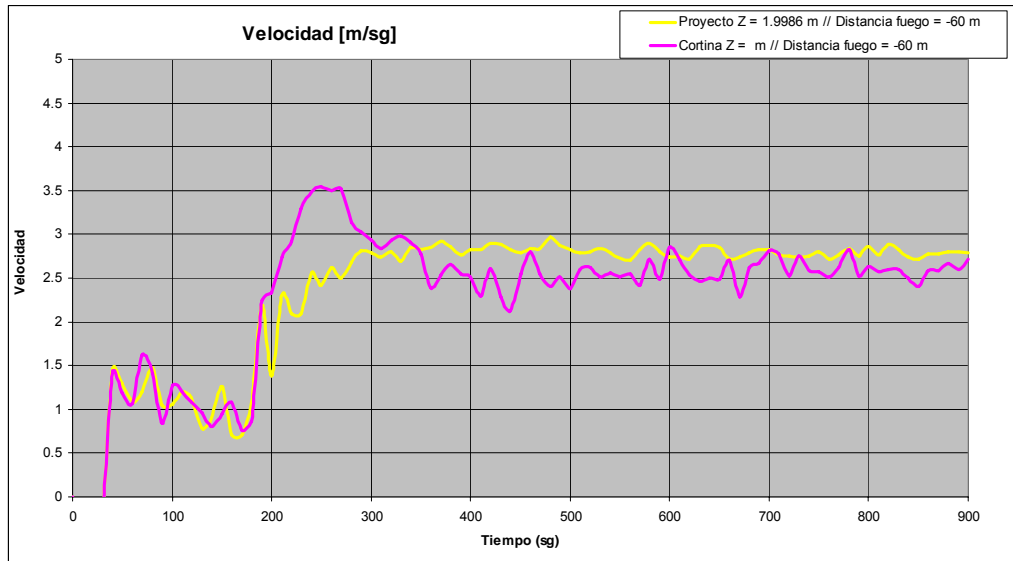


4.2.8.1.2.- Visibilidad. (Modo pozo, 30MW).

Consideramos un punto fijo a 63 m del fuego.

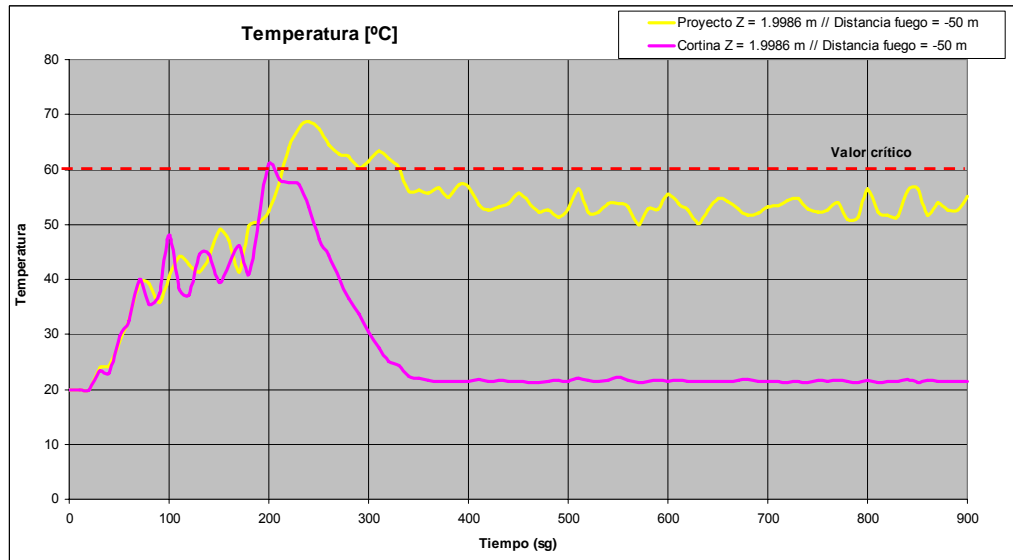


4.2.8.1.3.- Velocidades. (Modo pozo, 30MW).
Consideramos un punto fijo a 60 m del fuego.



4.2.8.1.4.- Temperaturas. (Modo pozo, 30MW).

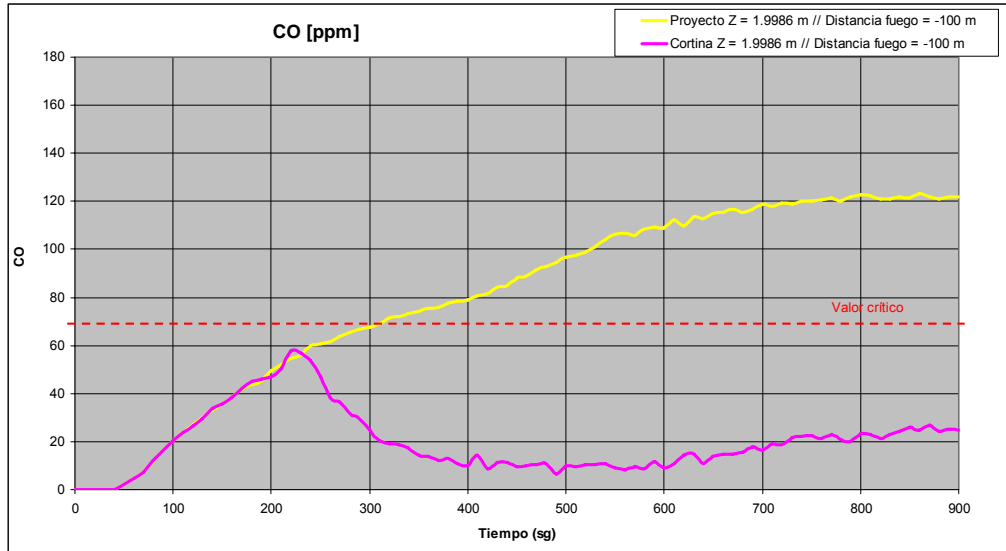
Consideramos un punto fijo a 50 m del fuego.



4.2.8.2.- Modo pozo, 100MW.

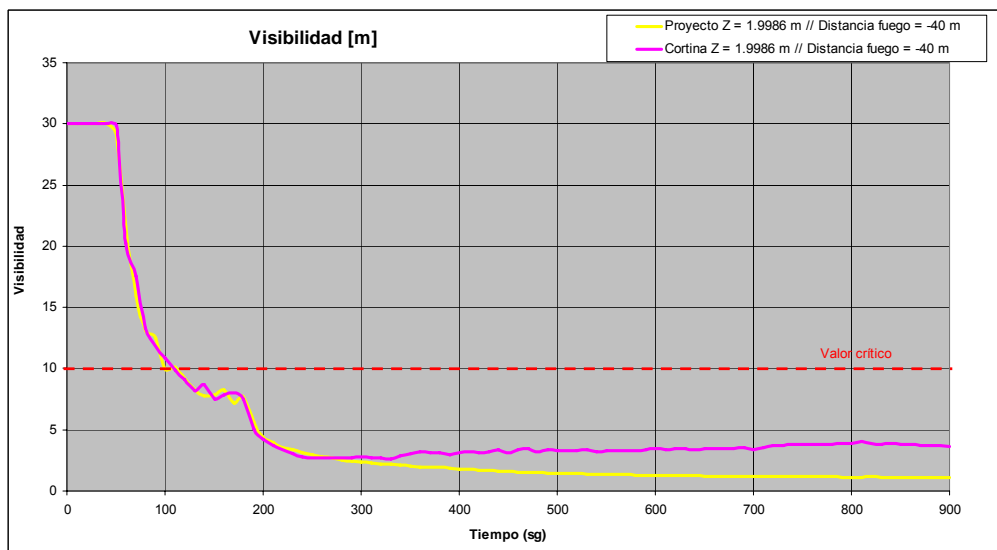
4.2.8.2.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo pozo, 100MW).

Consideramos un punto fijo a 100 m del fuego.

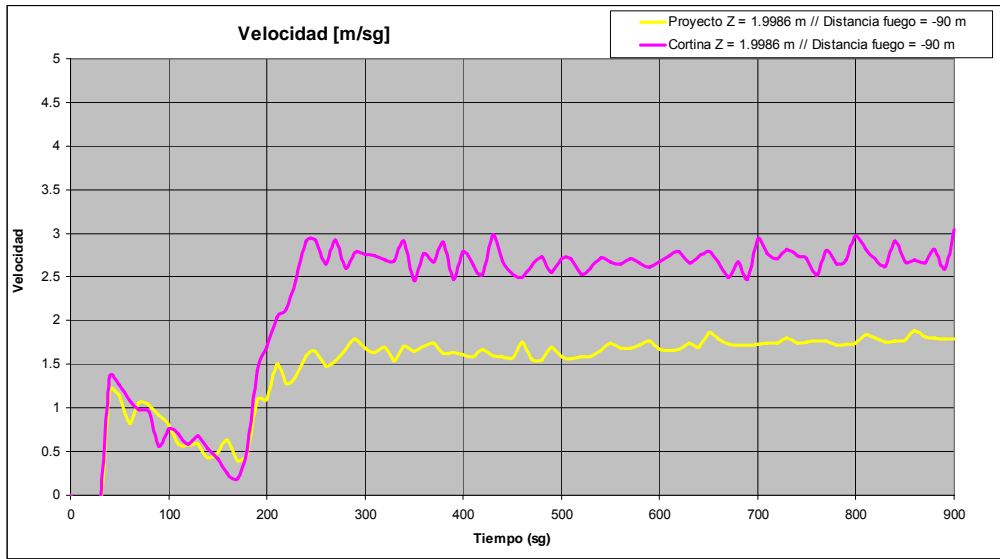


4.2.8.2.2.- Visibilidad. (Modo pozo, 100MW).

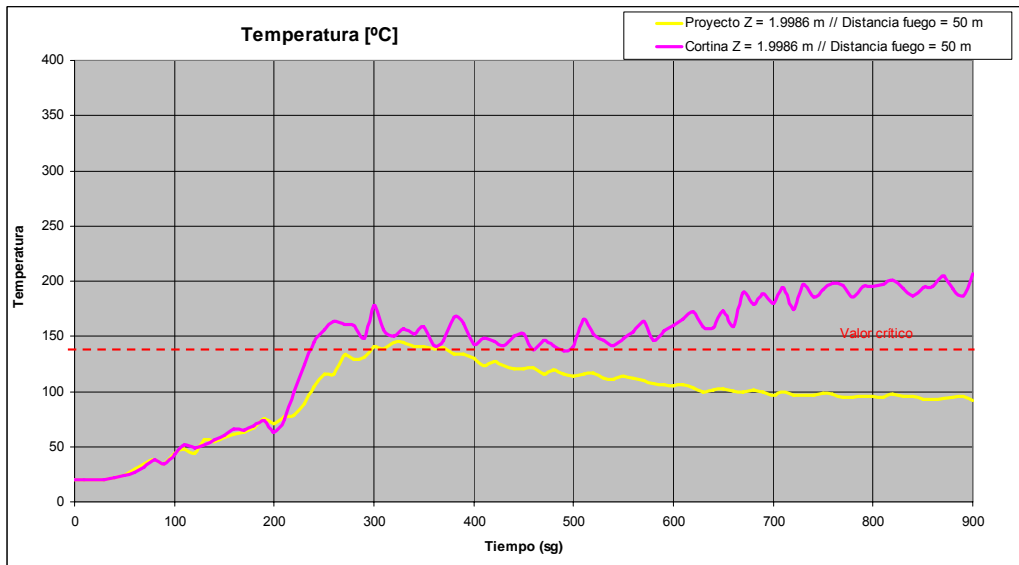
Consideramos un punto fijo a 40 m del fuego.



4.2.8.2.3.- Velocidades. (Modo pozo, 100MW).
Consideramos un punto fijo a 90 m del fuego.

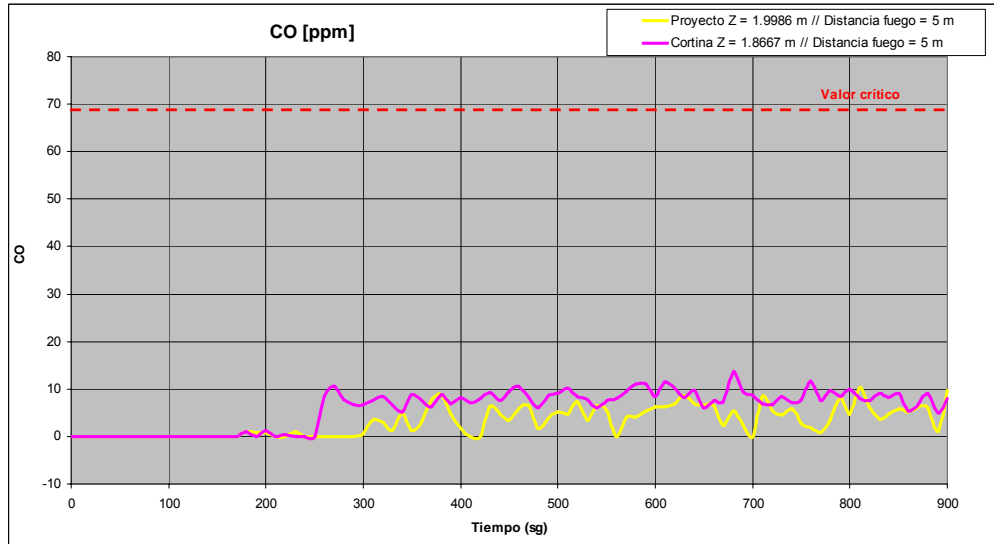


4.2.8.2.4.- Temperaturas. (Modo pozo, 100MW).
Consideramos un punto fijo a 50 m del fuego.

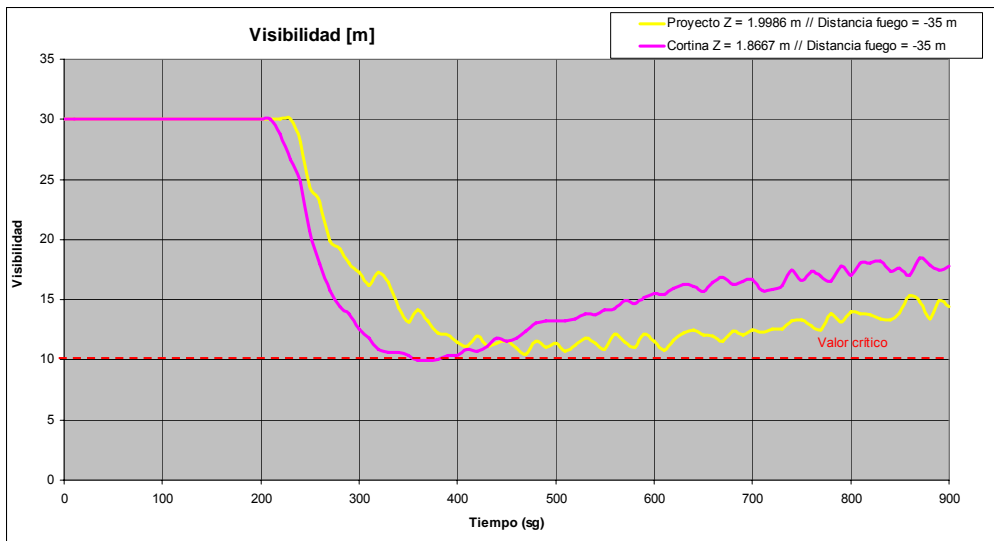


4.2.8.3.- Modo transversal, 30 MW.

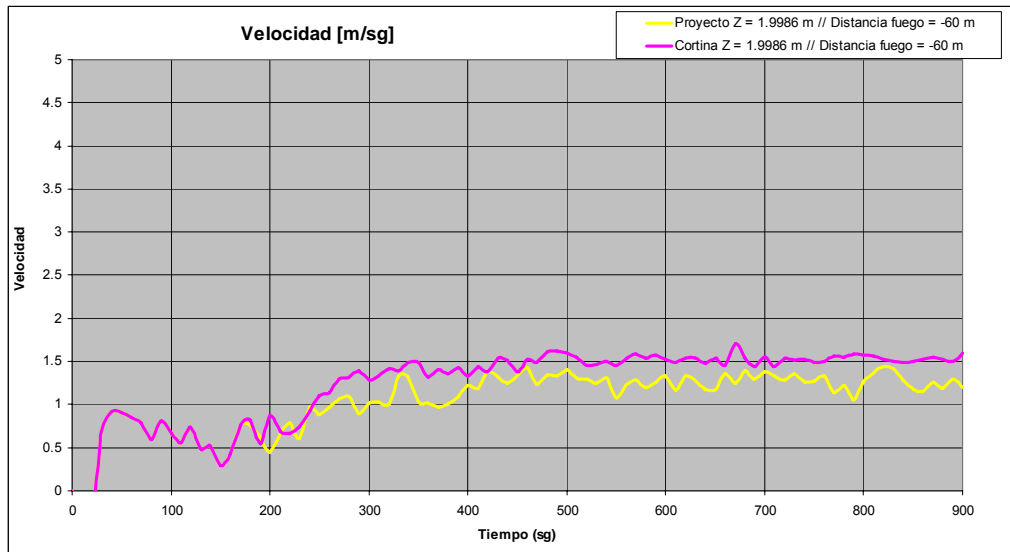
4.2.8.3.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal, 30 MW).
Consideramos un punto fijo a 5 m del fuego.



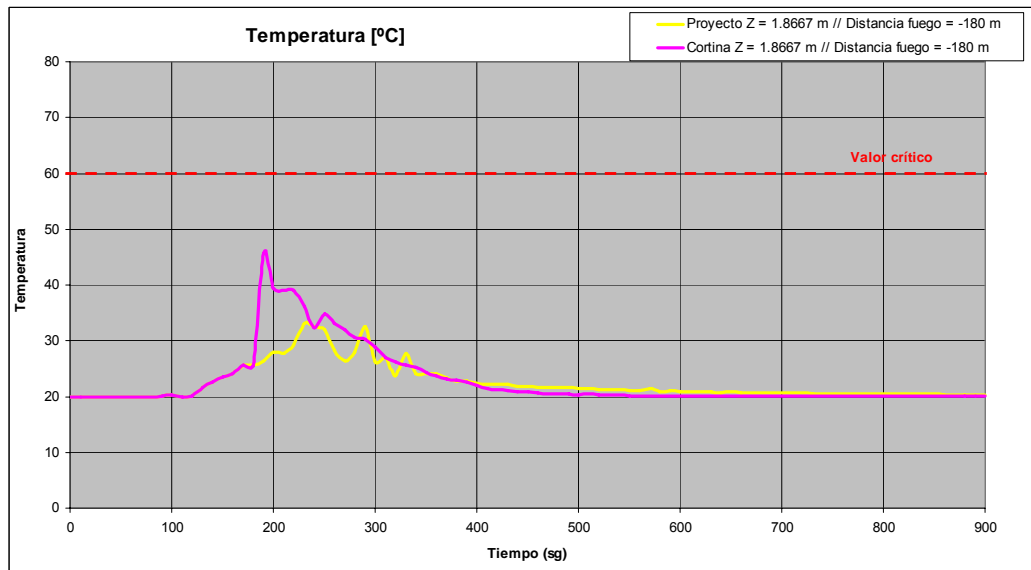
4.2.8.3.2.- Visibilidad. (Modo transversal, 30 MW).
Consideramos un punto fijo a 35 m del fuego.



4.2.8.3.3.- Velocidades. (Modo transversal, 30 MW).
Consideramos un punto fijo a 60 m del fuego.

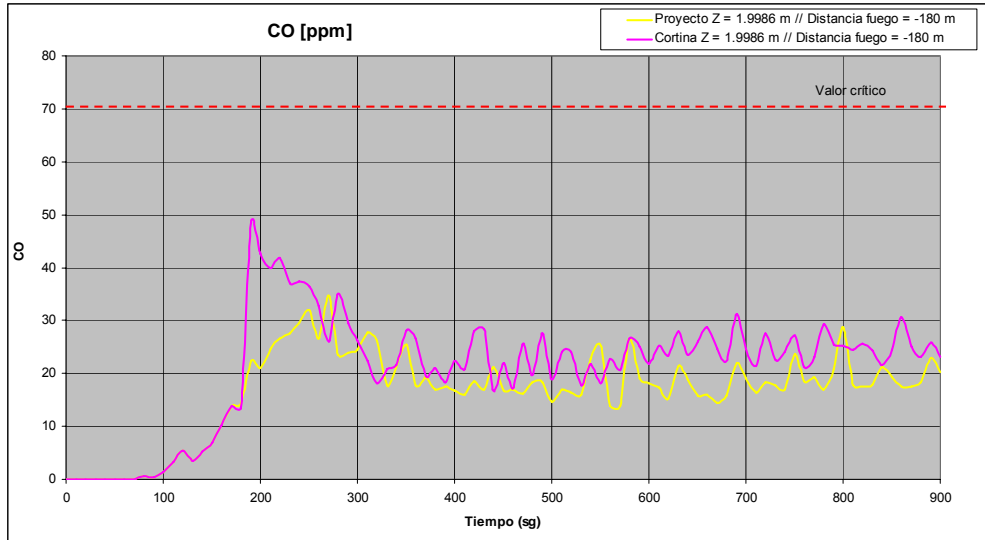


4.2.8.3.4.- Temperaturas. (Modo transversal, 30 MW).
Consideramos un punto fijo a 180 m del fuego.

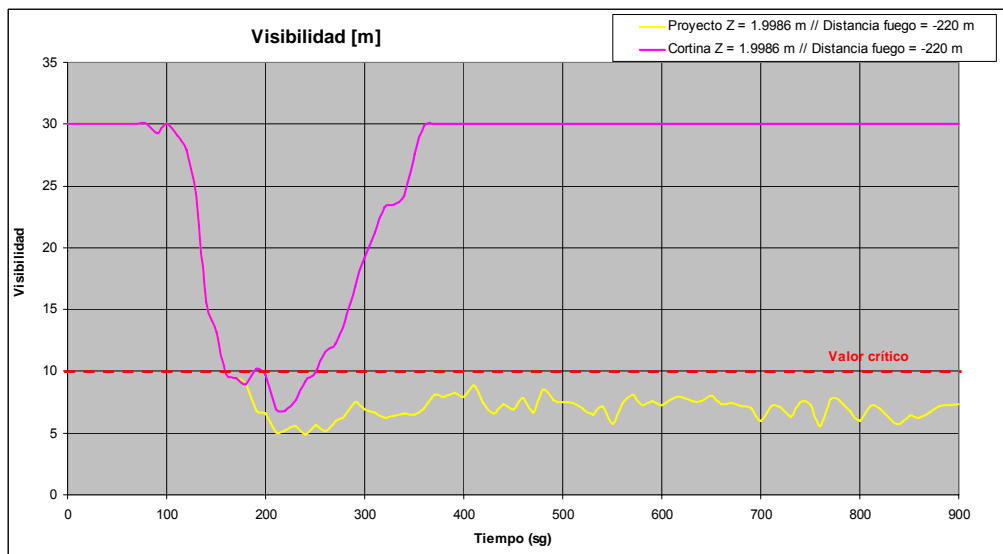


4.2.8.4.- Modo transversal, 100 MW.

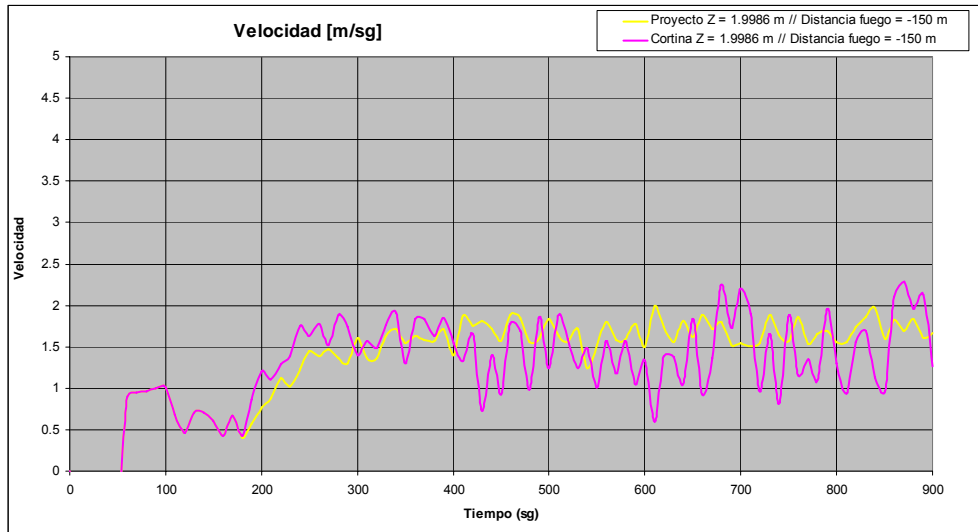
4.2.8.4.1.- Evolución de la concentración de CO. (Modo transversal, 100 MW).
Consideramos un punto fijo a 180 m del fuego.



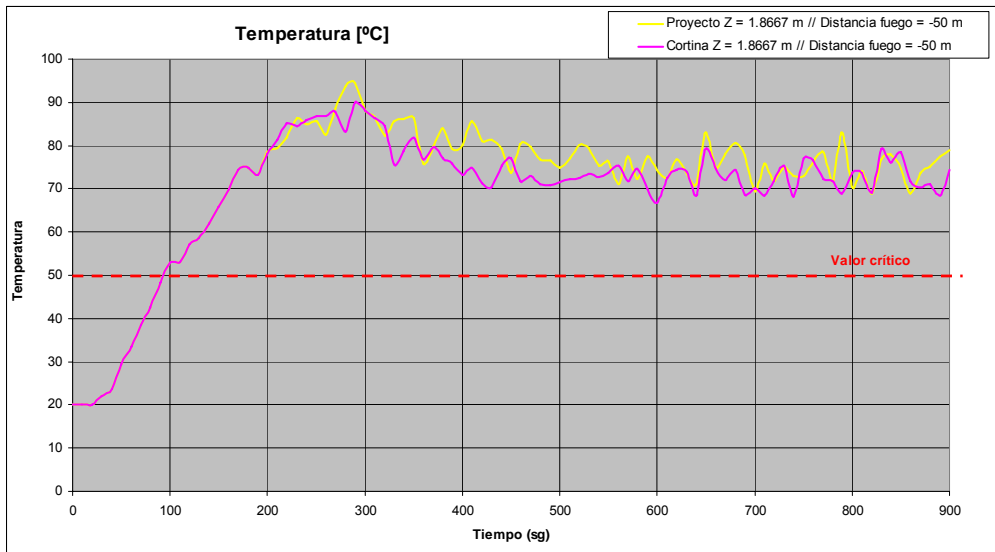
4.2.8.4.2.- Visibilidad. (Modo transversal, 100 MW).
Consideramos un punto fijo a 220 m del fuego.



4.2.8.4.3.- Velocidades. (Modo transversal, 100 MW).
Consideramos un punto fijo a 150 m del fuego.



4.2.8.4.4.- Temperaturas. (Modo transversal, 100 MW).
Consideramos un punto fijo a 50 m del fuego.



4.2.9.-INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

4.2.9.1.- Modo pozo, 30MW.

4.2.9.1.1.- Evolución de la concentración de CO

Si observamos las gráficas comparativas de resultados podemos observar que tanto en el escenario de inicial como en el de cortina, los resultados obtenidos no llegan a sobrepasar la concentración crítica, debido a que el aporte de oxígeno para la combustión es el adecuado (cuando la combustión carece de oxígeno, se produce mayor producción de CO).

Por otro lado podemos observar que en escenario con cortina se reduce la concentración de CO en un 50%, en las proximidades del incendio, debido a ese aporte de oxígeno comentado anteriormente.

4.2.9.1.2.- Visibilidad

En el gráfico del instante 120 sg, en el punto 100m, se observa que se produce una disminución de la visibilidad, debido al enfriamiento de los gases del back-layering. Esto se produce en la zona donde están los vehículos parados, debido al efecto de pendiente (tramo de bajada) provocado por el efecto chimenea.

En el instante de tiempo 240 sg, en las proximidades del incendio encontramos unos valores de visibilidad próximos al valor crítico, en ambos escenarios.

Una vez conseguido un régimen estacionario en ambos escenarios, podemos comprobar como existe una gran diferencia entre los modelos con cortina y la situación de proyecto, este último escenario supera los valores críticos de visibilidad de 10m en una distancia aproximada de 100m en las proximidades del fuego. En cambio en el modelo con cortina, los valores de visibilidad son correctos, de 30m en todo el recorrido de evacuación. Estos valores descienden a 15m, una vez pasado el fuego.

Por lo que podemos resumir que la visibilidad durante la fase de evacuación y actuación de los servicios de emergencia mejora de una forma significativa.

4.2.9.1.3.- Velocidades

Las velocidades del aire coinciden hasta el segundo 180, a partir de ese instante la gráfica comienza a diferenciarse. Hay que destacar que las velocidades varían en función de la altura en la que nos encontremos y el tiempo.

Existen dos zonas perfectamente diferenciadas la anterior y la posterior al fuego. En la zona anterior al fuego, donde se encuentran los vehículos parados podemos diferenciar distintos estados, en la parte superior de la sección se produce un avance de los humos debido al back-layering, una vez que comienza el funcionamiento de la cortina, se provoca una turbulencia hasta que el sentido de la dirección de los humos cambia de signo, en la parte inferior de la sección en la zona donde están los vehículos parados, el aire toma la dirección del fuego, ayudado por el empuje de la cortina. Con respecto a la zona intermedia de la sección se provocan distintos cambios en la dirección del aire, tal y como se puede comprobar en los gráficos comparativos de resultados.

En la zona donde no existen vehículos parados y una vez alcanzado en el régimen estacionario, se observa un valor constante en todo su recorrido. Podemos cuantificar una mejora en los parámetros la velocidad del 50% en el escenario con cortina.

Como resumen de lo anteriormente descrito, se puede decir que la cortina arrastra completamente los humos en la dirección correcta, dejando la zona en perfectas condiciones para su evacuación.

4.2.9.1.4.- Temperaturas

Con respecto a las temperaturas hay que destacar que los valores aportados corresponden a las temperaturas de los gases. Se han representado valores de temperaturas a 5 y 2 m de altura, para poder obtener mayor información de esta variable.

Las gráficas nos muestran un desplazamiento de la temperatura en la dirección de los vehículos, superando los valores críticos en la zona próxima al fuego. Si nos centramos en el aspecto de la seguridad de las personas, podemos decir que la temperatura de los gases que una persona respira, puede comenzar a ser peligrosa a partir de los 60°C.

Si observamos las gráficas podemos comprobar que la cortina provoca un desplazamiento de la temperatura de los gases en el sentido de los vehículos y resta mas de 100 m en las proximidades del incendio, en el que los valores se reducen en un 60 %.

A la altura de 2 m las temperaturas no superan el valor crítico, aún así mejora de una forma significativa, en el momento en el que la cortina consigue un régimen estacionario, debido a que los gases calientes se han desplazado en el sentido deseado.

4.2.9.1.5.- Evolución de las partículas de humo

En primer lugar hay que recordar que nos encontramos en una zona de bajada, por lo que los gases calientes tienden a desplazarse en el sentido en el que están detenidos los vehículos.

En el estado de proyecto el sistema no es capaz de desplazar la totalidad de los humos en toda su sección, por lo que en una zona aproximada a los 200 m la concentración de partículas de humos es muy alta, lo que dificulta la evacuación de las personas.

En el escenario con cortina, podemos comprobar que existe una zona de 50 m en la que hay una pequeña retención de humos en la parte superior del túnel, por encima de los 2,5 m, en cambio la parte baja está limpia en todo su recorrido, con unas condiciones aceptables para la evacuación de las personas.

Por lo tanto se puede concluir diciendo que existe una mejora considerable y que el sistema es capaz de desplazar los humos, aún encontrándose en el estado mas desfavorable de la pendiente.

4.2.9.2.- Modo pozo, 100MW.

4.2.9.2.1.- Evolución de la concentración de CO

Si observamos las gráficas podemos comprobar que en este supuesto las concentraciones de CO, si superan los valores críticos, debido a que existe una falta de oxígeno para hacer la combustión, lo contrario de lo que ocurría con los 30Mw.

En el estado inicial o de proyecto los valores de CO llegan a los 180 ppm, en cambio en el estado con cortina no superan el valor crítico, podemos comprobar que la concentración de CO se reduce en un 70%, en las proximidades del incendio, debido al efecto de la cortina.

4.2.9.2.2.- Visibilidad

En el instante de tiempo 240 sg, comenzamos a encontrar valores de visibilidad que superan al valor crítico, en ambos escenarios.

Una vez que comienza el funcionamiento de la cortina y una vez conseguido un régimen estacionario, podemos comprobar como existe una gran diferencia entre los modelos con cortina y la situación de proyecto, este último escenario supera los valores críticos de visibilidad de 10m en una distancia aproximada de 300m en las proximidades del fuego. En cambio en el modelo con cortina, los valores de visibilidad son correctos, de 100m en todo el recorrido de evacuación. Estos valores descienden a 5m, una vez pasado el fuego.

Por lo que podemos resumir que la visibilidad durante la fase de evacuación y actuación de los servicios de emergencia mejora de una forma significativa.

4.2.9.2.3.- Velocidades

Las velocidades del aire coinciden hasta el segundo 180, a partir de ese instante la gráfica comienza a diferenciarse. Hay que destacar que las velocidades varían en función de la altura en la que nos encontremos y el tiempo transcurrido.

Existen dos zonas perfectamente diferenciadas la anterior y la posterior al fuego. En la zona anterior al fuego, donde se encuentran los vehículos parados podemos diferenciar distintos estados, en la parte superior de la sección se produce un avance de los humos debido al back-layering, una vez que comienza el funcionamiento de la cortina, se provoca una turbulencia hasta que el sentido de la dirección de los humos cambia de signo, en la parte inferior de la sección en la zona donde están los vehículos parados, el aire toma la dirección del fuego, ayudado por el empuje de la cortina. Con respecto a la zona intermedia de la sección se provocan distintos cambios en la dirección del aire, tal y como se puede comprobar en los gráficos comparativos de resultados.

En la zona donde no existen vehículos parados y una vez alcanzado en el régimen estacionario, se observa un valor constante en todo su recorrido. Podemos cuantificar una mejora en los parámetros la velocidad del 60% en el escenario con cortina.

Como resumen de lo anteriormente descrito, se puede decir que la cortina arrastra los humos en la dirección correcta, encontrando una gran resistencia debida a la gran

cantidad de humo generado, aún así las velocidades no invierten el sentido y la dirección del humo es la correcta.

4.2.9.2.4.- Temperaturas

Con respecto a las temperaturas hay que destacar que los valores aportados corresponden a las temperaturas de los gases. Se han representado valores de temperaturas a 5 y 2 m de altura, para poder obtener mayor información de esta variable.

Las gráficas nos muestran un desplazamiento de la temperatura en la dirección de los vehículos, superando los valores críticos en la zona próxima al fuego. Si nos centramos en el aspecto de la seguridad de las personas, podemos decir que la temperatura de los gases que una persona respira, puede comenzar a ser peligrosa a partir de los 60°C.

Si analizamos las gráficas correspondiente a la zona de 5 m de altura en la sección, podemos observar que el comportamiento es muy parecido en ambos escenarios, en cambio a la altura de 2 m las temperaturas mejora de una forma significativa, el instante 480 sg, nos muestra una diferencia de 70m en la que se ve el efecto de desplazamiento de los gases. Una vez que la cortina consigue un régimen estacionario, las temperaturas con correctas para evacuar las personas.

4.2.9.2.5.- Evolución de las partículas de humo

En primer lugar hay que recordar que nos encontramos en una zona de bajada, por lo que los gases calientes tienden a desplazarse en el sentido en el que están detenidos los vehículos. En el supuesto de 100 Mw la generación de humos es muy alta.

En el estado de proyecto el sistema no es capaz de desplazar los humos, por lo que el túnel de llena de humos en su totalidad y la concentración de partículas de humos es muy alta lo que dificulta la evacuación de las personas.

En el escenario con cortina, podemos comprobar que existe una zona de 75 m en la que hay una retención de humos en la parte superior del túnel, por encima de los 2 m, en cambio la parte baja la concentración de humos es menor debido a la entrada de aire de la cortina, las condiciones no son las idóneas pero son aceptables para la evacuación de las personas.

Por lo tanto se puede concluir diciendo que existe una mejora considerable y que el sistema es capaz de desplazar los humos, aún encontrándose en el estado más desfavorable de pendiente y de generación de humos.

4.2.9.3.- Modo transversal, 30 MW.

4.2.9.3.1.- Evolución de la concentración de CO

Si observamos las gráficas comparativas de resultados podemos observar que tanto en el escenario de inicial como en el de cortina, los resultados obtenidos no llegan a sobrepasar la concentración crítica, debido a que el aporte de oxígeno para la combustión es el adecuado (cuando la combustión carece de oxígeno, se produce mayor producción de CO).

Por otro lado podemos observar que en escenario con cortina se reduce la concentración de CO en un 25%, en las proximidades del incendio, debido a ese aporte de oxígeno comentado anteriormente.

4.2.9.3.2.- Visibilidad

Con respecto a la visibilidad hay que destacar que es buena y no supera el valor crítico en ningún momento de ambos escenarios.

En el momento inicial en el que la cortina rompe la estratificación de los gases la visibilidad empeora en esa zona, una vez conseguido el régimen estacionario, podemos observar que se produce una mejora de la visibilidad aproximada al 30 %, obteniendo valores de visibilidad mayores a 20 m, siendo estos perfectamente válidos para la evacuación de las personas.

4.2.9.3.3.- Velocidades

En el sistema de ventilación transversal las velocidades longitudinales no deberían ser muy altas, para evitar romper la estratificación de los humos.

Como podemos comprobar en las gráficas correspondientes, este efecto se produce en el momento inicial de funcionamiento de la cortina, en cambio cuando el régimen es estacionario, el sistema funciona correctamente.

4.2.9.3.4.- Temperaturas

Las temperaturas son adecuadas en ambos escenarios y el la contribución del efecto de la cortina, provoca una mejora del 10% de los valores de la temperatura, debido al desplazamiento de los gases calientes.

Podemos destacar que si el estado inicial o proyecto, funciona correctamente, la incorporación del efecto de la cortina no influye negativamente en los resultados.

4.2.9.2.5.- Evolución de las partículas de humo

Con respecto a la evolución de las partículas de humo hay que destacar:

- Se asegura un confinamiento de los humos ya que las dos cortinas, la anterior y la posterior al incendio, actúan como barrera y evita que se extiendan los humos en el túnel.

- Al provocar un confinamiento de los humos, concentramos el humo hacia el incendio y ganamos espacio para la evacuación de las personas, si observamos las imágenes correspondientes podemos comprobar que el espacio libre de humos ha mejorado un 20%.
- Los humos confinados se concentran en la parte superior del túnel, ya que el aire aportado por las cortinas, de una forma direccionada hacia la parte inferior y con una temperatura de gases baja, favorece el efecto y limpia de humos la zona inferior del túnel.

4.2.9.4.- Modo transversal, 100 MW.

4.2.9.4.1.- *Evolución de la concentración de CO*

Si observamos las gráficas comparativas de resultados podemos observar que tanto en el escenario de inicial como en el de cortina, los resultados obtenidos no llegan a sobrepasar la concentración crítica, salvo en las proximidades al incendio en el que ambos escenarios ofrecen concentraciones de CO un poco elevadas.

4.2.9.4.2.- *Visibilidad*

En las gráficas de resultados comparativos podemos comprobar como la visibilidad evoluciona desfavorablemente muy rápidamente, en el momento que comienza a trabajar la cortina, la visibilidad mejora y comienza a limpiar de humos la zona de donde recoge los humos, provocando un confinamiento de los humos en la parte central, quedando las zonas exteriores a las cortinas con nivel de visibilidad adecuado para la evacuación de las personas. Con respecto a la zona interior a la cortina, la visibilidad queda igual en ambos escenarios con valores próximos a los 5m.

4.2.9.4.3.- *Velocidades*

En el sistema de ventilación transversal las velocidades longitudinales no deberían ser muy altas, para evitar romper la estratificación de los humos.

Como podemos comprobar en las gráficas correspondientes, este efecto se produce en el momento inicial de funcionamiento de la cortina, en cambio cuando el régimen es estacionario, el sistema funciona correctamente.

4.2.9.4.4.- *Temperaturas*

Las temperaturas se elevan por encima de la crítica, a los 5 m alcanzan valores próximos a los 1000 °C y a los 2 m de altura de 150 °C en una zona de 70 m cercana al fuego, por lo que la evacuación de las personas próximas al incendio debe ser rápida para evitar que estas respiren gases a esas temperaturas.

La evolución de las temperaturas es paralela en ambos escenarios, por lo que esta variable no sufre alteraciones significativas.

4.2.9.2.5.- *Evolución de las partículas de humo*

Con respecto a la evolución de las partículas de humo hay que destacar:

- Se asegura un confinamiento de los humos ya que las dos cortinas, la anterior y la posterior al incendio, actúan como barrera y evita que se extiendan los humos en el túnel.
- Al provocar un confinamiento de los humos, concentramos el humo hacia el incendio y ganamos espacio para la evacuación de las personas, si observamos las imágenes correspondientes podemos comprobar que el espacio libre de humos corresponde a toda la zona anterior a la cortina.

- Los humos confinados se concentran en la parte superior del túnel, ya que el aire aportado por las cortinas, de una forma direccionada hacia la parte inferior y con una temperatura de gases baja, favorece el efecto y limpia de humos la zona inferior del túnel.

4.2.10.-EVOLUCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES EN EL TIEMPO.

Se han obtenido una serie de gráficas de las distintas variables en los distintos estados analizados, en el que se describe la evolución que sufre a lo largo de los 900 sg. Para poder reflejar este parámetro se ha tenido que fijar un punto estratégico en el espacio interior. Por lo que observaremos lo que ocurre con la variable a lo largo del tiempo en ese punto.

4.2.10.1.- Modo pozo, 30MW.

4.2.10.1.1.- Evolución de la concentración de CO

Si observamos la gráfica correspondiente a la evolución del CO a lo largo de los 900 sg, podemos destacar que el efecto de la cortina en un punto fijado a 2m de altura y 5 m del fuego, en la zona de vehículos, mejora de una forma considerable a partir del instante 240 sg (comienza el funcionamiento de la cortina) y se mantiene en ese régimen estacionario hasta los 900 sg. Los valores de CO pasan de 25 ppm a prácticamente 0.

4.2.10.1.2.- Visibilidad

Para el análisis de la visibilidad en función del tiempo, se ha establecido un punto a 2 m de altura y 63 m del fuego, en el lado en el que se encuentran parados los vehículos.

Se puede observar en la gráfica correspondiente que a partir del funcionamiento de la cortina los valores de la visibilidad pasan de 7 m en el estado de proyecto a 30 m en el escenario de cortina, por lo que la diferencia es importante.

4.2.10.1.3.- Velocidades

En este caso se ha establecido como punto de referencia uno situado a 2 m de altura y 60 m del fuego, también en la zona de parada de vehículos.

Las velocidades llevan un comportamiento parecido hasta que comienza a funcionar la cortina, en ese momento los valores se incrementan, hasta que se convierten en un régimen estacionario y continúan con valores próximos a lo largo del tiempo.

4.2.10.1.4.- Temperaturas

Con respecto a las temperaturas, el punto se ha fijado a 2 m del suelo y 50 m anterior al fuego. En ese punto se observa que cuando comienza la cortina a funcionar la temperatura pasa de 55 °C a 22°C.

4.2.10.2.- Modo pozo, 100MW.

4.2.10.2.1.- Evolución de la concentración de CO

Si observamos la gráfica correspondiente a la evolución del CO a lo largo de los 900 sg, podemos destacar que el efecto de la cortina en un punto fijado a 2m de altura y 100 m del fuego, en la zona de vehículos, mejora de una forma considerable a partir del instante 240 sg (comienzo del funcionamiento de la cortina) y se mantiene de forma incremental a lo largo de los 900 sg. Los valores de CO pasan de 120 ppm a prácticamente 20.

4.2.10.2.2.- Visibilidad

Para el análisis de la visibilidad en función del tiempo, se ha establecido un punto a 2 m de altura y 40 m del fuego, en el lado en el que se encuentran parados los vehículos.

Se puede observar en la gráfica correspondiente que los valores de la visibilidad no son muy buenos debido a la cantidad de humo generado por los 100 Mw, los valores pasan de 2 m en el estado de proyecto a 4 con cortina. Hay que destacar que en puntos mas cercanos al suelo la visibilidad mejora considerablemente.

4.2.10.2.3.- Velocidades

En este caso se ha establecido como punto de referencia uno situado a 2 m de altura y 90 m del fuego, también en la zona de parada de vehículos.

Las velocidades llevan un comportamiento parecido hasta que comienza a funcionar la cortina, en ese momento los valores se incrementan, hasta que se convierten en un régimen estacionario y continúan con valores próximos a lo largo del tiempo, los valores de la velocidad pasan de 1,5 m/s a 3 m/s cuando se consigue un régimen estacionario.

4.2.10.2.4.- Temperaturas

Con respecto a las temperaturas, el punto se ha fijado a 2 m del suelo y 50 m anterior al fuego. Hay que destacar que la temperatura en este punto no mejora con el tiempo, al contrario, permanece paralela hasta 500 sg, a partir de ese momento empeora un poco. Esto ocurre debido al desplazamiento de los humos calientes que hace la cortina.

4.2.10.3.- Modo transversal, 30 MW.

4.2.10.3.1.- Evolución de la concentración de CO

Si observamos la gráfica correspondiente a la evolución del CO a lo largo de los 900 sg, en un punto fijado a 2m de altura y 5 m del fuego, en la zona de vehículos, comprobamos en los dos escenarios las concentraciones de CO son admisibles para la perfecta evacuación de las personas.

4.2.10.3.2.- Visibilidad

Para el análisis de la visibilidad en función del tiempo, se ha establecido un punto a 2 m de altura y 35 m del fuego, en el lado en el que se encuentran parados los vehículos.

Al igual que el anterior las distancias son aceptables para la evacuación, aún no siendo las óptimas, debido al confinamiento del humo.

4.2.10.3.3.- Velocidades

En este caso se ha establecido como punto de referencia uno situado a 2 m de altura y 60 m del fuego, también en la zona de parada de vehículos.

Las velocidades llevan un comportamiento parecido hasta que comienza a funcionar la cortina, en ese momento los valores se incrementan, hasta que se convierten en un régimen estacionario y continúan con valores próximos a lo largo del tiempo, con valores de velocidad algo mas elevados en el escenario de cortina.

4.2.10.3.4.- Temperaturas

Con respecto a las temperaturas, el punto se ha fijado a 2 m del suelo y 180 m anterior al fuego. En ese punto se observa que cuando comienza la cortina a funcionar la temperatura se eleva instantáneamente y cuando consigue el régimen estacionario se mantienen las dos en valores admisibles.

4.2.10.4.- Modo transversal, 100 MW.

4.2.10.4.1.- Evolución de la concentración de CO

Si observamos la gráfica correspondiente a la evolución del CO a lo largo de los 900 sg, en un punto fijado a 2m de altura y 180 m del fuego, en la zona de vehículos, comprobamos en los dos escenarios las concentraciones de CO son admisibles para la perfecta evacuación de las personas, no superando en ningún momento los valores críticos.

4.2.10.4.2.- Visibilidad

Para el análisis de la visibilidad en función del tiempo, se ha establecido un punto a 2 m de altura y 220 m del fuego, en el lado en el que se encuentran parados los vehículos.

En este punto hay una mejora considerable en los niveles de visibilidad, se produce una pequeña turbulencia entre los segundos 100 y 350 y una vez conseguido el régimen la visibilidad se eleva a 30m en el escenario con cortina, en cambio en el de proyecto se mantiene en 7 m, lo que indica que el túnel está completamente lleno de humo.

4.2.10.4.3.- Velocidades

En este caso se ha establecido como punto de referencia uno situado a 2 m de altura y 150 m del fuego, también en la zona de parada de vehículos.

Las velocidades llevan un comportamiento parecido hasta que comienza a funcionar la cortina, en ese momento los valores se incrementan, hasta que se convierten en un régimen estacionario y continúan con valores próximos a lo largo del tiempo.

4.2.10.4.4.- Temperaturas

Con respecto a las temperaturas, el punto se ha fijado a 2 m del suelo y 50 m anterior al fuego. En ese punto se observa que cuando comienza la cortina a funcionar la temperatura se eleva instantáneamente y cuando consigue el régimen estacionario se mantienen las dos en valores admisibles.

5.- CONCLUSIONES.

La propuesta de soluciones estudiada define un sistema de control de humos complementario a la herramienta que actualmente se utiliza en los túneles carreteros (sistema de ventilación), por lo que todos los resultados obtenidos son comparados con el estado original o de proyecto.

Haciendo un resumen de la interpretación de resultados del capítulo anterior, hay que decir que la propuesta de soluciones mejora la mayoría de las variables analizadas, y lo que es más importante, asegura el control del humo.

A continuación, se expone una tabla resumen en la que se puede comprobar el comportamiento de las distintas variables en cada uno de los escenarios:

MODO POZO 30 MW (Tráfico fluido)		
VARIABLES	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO CON CORTINA
Concentración de CO (ppm)	Resultados óptimos	Se reducen los niveles un 50%, aumentando la velocidad
Visibilidad (m)	Correcta	Mejora la visibilidad hasta los 30 m
Velocidad (m/s)	Suficiente para el desplazamiento de los humos	Aumenta en un 50% y reduce el tiempo de exposición
Temperatura (°C)	Por debajo de la T. crítica	Desplaza el humo caliente y reduce la temperatura un 60%
Partículas de humo	Existe un pequeño back-layering junto al fuego	Controla y desplaza las partículas de humo con rapidez
MODO POZO 100 MW (Tráfico fluido)		
VARIABLES	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO CON CORTINA
Concentración de CO (ppm)	Concentraciones elevadas	Se reducen los niveles un 75%
Visibilidad (m)	Mala en 300 m anteriores al fuego	Mejora la visibilidad en el 75 % del espacio a valores de 30 m
Velocidad (m/s)	Insuficiente para poder desplazar los humos	Aumenta en un 60% y reduce el tiempo de exposición
Temperatura (°C)	Por encima de la T. crítica en una zona de 100m próxima al fuego	Reduce la temperatura en una zona 70m por debajo de la T. crítica
Partículas de humo	La zona de retención de vehículos está saturada de humo	Desplaza las partículas, excepto una zona de 75m que hay retención de partículas en el techo
MODO TRANSVERSAL 30 MW (Tráfico congestionado)		
VARIABLES	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO CON CORTINA
Concentración de CO (ppm)	Resultados óptimos	Se reducen los niveles un 25%, aumentando la velocidad
Visibilidad (m)	Correcta	Mejora la visibilidad hasta los 20m
Velocidad (m/s)	Suficiente para el control de los humos	Aumenta la velocidad y reduce el tiempo de exposición
Temperatura (°C)	Por debajo de la T. crítica	La temperatura permanece en valores aceptables, sin alterar el sistema
Partículas de humo	Correcta, hasta que se produce el enfriamiento de las gases y estos descienden	Mejora en un 20% el espacio sin humos, garantiza el confinamiento de los gases y libera de humos la zona inferior del túnel

MODO TRANSVERSAL 100 MW (Tráfico congestionado)		
VARIABLES	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO CON CORTINA
Concentración de CO (ppm)	Resultados críticos en las proximidades al fuego	Resultados críticos en las proximidades al fuego
Visibilidad (m)	Incorrecta para la evacuación en todo el túnel	La zona anterior a la cortina queda con una visibilidad óptima y la interior junto al fuego permanece igual al estado actual con 5 m
Velocidad (m/s)	Suficiente para el control de los humos	Aumenta la velocidad y reduce el tiempo de exposición
Temperatura (°C)	Por encima de la T. crítica en un espacio de 70 m cercano al fuego	Por encima de la T. crítica en un espacio de 70 m cercano al fuego, igual al escenario actual
Partículas de humo	Correcta, hasta que se produce el enfriamiento de las gases y estos descienden	Libera de humos la zona anterior a la cortina y confina el humo entre las dos cortinas, dejando el resto de túnel limpio de partículas.

Como se puede comprobar en el cuadro resumen, la propuesta de soluciones está indicada para los dos estados de funcionamiento estudiados (modo pozo y modo transversal). En el estado modo pozo, se asegura y se agiliza el barrido de humos, reduciendo el tiempo de exposición y aumentando la visibilidad durante el periodo de evacuación de las personas.

Como ya se ha comentado anteriormente, el túnel de Malo ha sido diseñado para una carga máxima de fuego de 30 MW, por lo que quedará prohibido el paso de camiones cisternas con productos petrolíferos o similares y por supuesto el paso de material peligroso. Los modelos se han realizado, tanto para 30 MW como 100 MW, suponiendo que el fuego pueda tener una mayor carga, por cualquier otro motivo (accidentes múltiples, naturaleza de la carga del vehículo, etc.). Como podemos comprobar en la tabla comparativa, el sistema de extracción actual, con una carga de 100 MW, es incapaz de controlar el humo, debido a la cantidad de partículas emitidas, en cambio la incorporación de la cortina permite despejar la zona y confinar el humo en las proximidades del fuego, evitando su avance a lo largo del túnel.

En el escenario transversal con cortina se consigue dirigir y confinar el humo en la zona comprendida entre los dos equipos, evitando su propagación a lo largo del túnel, facilitando de esta forma la evacuación de las personas. Por otro lado, consigue reducir el espacio en el que se encuentra el humo, desplazando los humos a la zona próxima al fuego y, por último, consigue introducir aire menos contaminado en la parte inferior del tubo, aumentando la visibilidad en la zona de trabajo de los servicios de emergencia.

Es importante destacar que las variables que mejoran sus niveles son las que tienen una gran influencia en la evacuación de las personas, como la concentración de los niveles de CO, la velocidad, la visibilidad y la temperatura. La propuesta de soluciones consigue reducir estos niveles de una forma significativa con respecto al estado original o inicial.

Hay que subrayar que en el modo transversal también mejoran los niveles de las variables, tal y como se puede comprobar en los resultados gráficos y, lo que es muy

importante, que en el instante en que comienza a funcionar la cortina, en la zona próxima al equipo, se genera una pequeña turbulencia, pero una vez conseguido el régimen estacionario, el humo mantiene su estratificación, lo que permite no alterar el efecto del sistema de extracción transversal.

Otra variable que mejora sensiblemente es la velocidad de arrastre de los humos. La solución propuesta mejora de una forma significativa en todos los escenarios, disminuyendo la velocidad de exposición al contaminante y consiguiendo hacer una evacuación mas tranquila, evitando el pánico en instantes tan cruciales, como son los primeros momentos después de un accidente.

6º.- BIBLIOGRAFÍA.

- Retana, P. "Regímenes transitorios de ventilación. Aplicación a la seguridad frente a incendios". Universidad Politécnica de Madrid. Tesis Doctoral. 1999
- Safety criteria in tunnels on the M-30 ring road. Ventilation systems Rey Llorente, Ignacio del; Espinosa Antelo, Irene; Alarcón Álvarez, Enrique. Fuente: Revista de Obras Públicas 2005, 152, (3454): 59-70
- Técnicas de evacuación de humos y gases en túneles. Enrique Alarcón. Universidad Politécnica de Madrid. Dirección General de Protección Civil.
- Control de humos y gases en casos de incendio en túneles. Ignacio del Rey. Universidad Politécnica de Madrid. Dirección General de Protección Civil.
- PIARC Asociación mundial de la carretera. Road Tunnels, Vehicle Emissions and air Demand for Ventilation.
- PIARC Asociación mundial de la carretera. Fire and Smoke Control in Road Tunnels.
- PIARC Asociación mundial de la carretera. Traffic Incident. Management Systems used in Road Tunnels.
- PIARC Asociación mundial de la carretera. Good Practice for the Operation and Maintenance of Road Tunnels
- PIARC Asociación mundial de la carretera. Reduction of Operational Cost of Road Tunnels.
- FDS Technical Reference Guide
- FDS User's Guide (Version 4)
- Smokeview User's Guide (Version 4)
- Tunnel engineering handbook. Edited by John O. Bickel / T.R. Kuesel.
- Fundamentos de ventilación industrial. V.V. Batirin
- Civil Engineers, Third Edition by Frederick S. Merritt. Editor
- Manual del Curso sobre incendios en túneles del Servicio de Mecánica de Suelo de la ETSICCP. Año 2001.
- II Simposio internacional de Vulnerabilidad y seguridad en túneles, marzo de 2006. Madrid.

- III Simposio nacional de túneles. Febrero de 2003. Pamplona
- Congreso internacional sobre criterios e innovaciones en seguridad de túneles. Gijón Julio 2005.
- Safety in Road and Rail Tunnels. Fourth Internacional Conference. Madrid 2001.
- Manual de explotación de túneles de carretera. Alberto Pleite. Dirección General de Carreteras.
- Sistemas de ventilación en túneles. Bomberos de Navarra
- Emergency Ventilation of Park Avenue Railroad Túnel. Reno Giordano, Ian Ong, & Norman Rhodes.
- Application of CFD technique to model aerodynamic tests in road tunnels. Kashef A., Bénichou N., Loughheed G.
- Performance investigation of emergency ventilation strategies in road tunnel. NRC- Canada.
- Smoke Control in road tunnels. Ing. Petr Pospisil, M. Sc. Dr. Ing. Rune.
- Operating modes for a road tunnel ventilation system. S Levy & A. Bendeluis, Parsons Brinckerhoff, USA.
- Asociación Internacional Permanente de Congresos de la Ruta, AIPCR - Road Tunnel Committee: " Pollution - Ventilation, (Final Version)", 1987.
- Asociación Internacional Permanente de Congresos de la Ruta, AIPCR - Road Tunnel Committee, Congreso XVIII de Bruselas, 1987.
- Asociación Internacional Permanente de Congresos de la Ruta, AIPCR - Road Tunnel Committee, Congreso XIX de Marrakech, 1991.
- Hacar, F. et al: "Incendios en Túneles", MOPT, Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias, 1993.
- Vicente Luque Cabal: "Manual de Ventilación de Minas", Asociación de Investigación Tecnológica de Equipos Mineros, 1988.
- Ang, A.H-S. & Tang, W.H. 1975 "The Bayesian Approach" in "Probability concepts in engineering planning and design: Volume 1" John Wiley & Sons, New York. pp. 284-291
- Apte, V.B., Green, A.R. & Kent, J.H. 1991 "Pool fire plume flow in a large-scale wind tunnel" Fire Safety Science - Proc. 3rd Int. Symposium. University of Edinburgh, Scotland, 8-12 July 1991 pp. 425-434

- Babrauskas, V. & Peacock, R.D. 1992 "Heat Release Rate: The single most important variable in firehazard" *Fire Safety Journal* 18, pp. 255-272
- Beard, A.N. 1997 "A Model for Predicting Fire Spread in Tunnels" *Journal of Fire Sciences* 15 pp. 277-307
- Bettis, R.J., Wu, Y. & Hambleton, R.T. 1993 "Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models: Data from phase 2, Test 5" Section paper IR/L/93/09 (part 5) HSE, Buxton.
- Bettis, R.J., Jagger, S.F. & Moodie, K. 1994 "Reduced Scale Simulations of Fires in Partially blocked Tunnels" *Proc. Int. Conf. Fires in Tunnels, Borås, October 10-11 1994* pp. 162-186
- Carvel, R.O., Beard, A.N. & Jowitt, P.W. 1999a "The effect of forced longitudinal ventilation on a HGV fire in a tunnel" *Proc. Int. Conf. on Tunnel Fires, Lyon, France, May 5-6 1999*
- Carvel, R.O., Beard, A.N. & Jowitt, P.W. 1999b "The effect of forced longitudinal ventilation on a poolfire in a tunnel" *Proc. Interflam '99 – 8th Int. Conf. on Fire Science & Engineering, Edinburgh, Scotland, 29th June – 1st July 1999 Volume 2* pp. 1267-1272
- Danziger, N.H. & Kennedy, W.D. 1982 "Longitudinal Ventilation Analysis for the Glenwood Canyon Tunnels" *Proc. 4th Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 169-186. BHRA Fluid Engineering.
- EUREKA 1995 "Fires in Transport Tunnels: Report on Full-Scale Tests" EUREKA project EU499:FIRETUN. Pub. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. Düsseldorf.
- Haerter, A. 1994 "Fire Tests in the Ofenegg Tunnel in 1965" *Proc. Int. Conf. Fires in Tunnels, Borås, October 10-11 1994* pp. 195-214
- Hedefalk, J., Wahlstrom, B. & Rohlen, P. 1998 "Lessons from the Baku Subway Fire" *3rd Int. Conf. Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, France, March 9-11 1998* pp. 15-28
- Ingason, H., Nireus, K. & Werling, P. 1997 "Fire tests in a blasted rock tunnel" Report FOA-R—97-00581-990—SE. FOA, Sweden.
- Ingason, H. 1998 – personal e-mail communication regarding car fire test. Keski-Rahkonen, O., Holmjund, C., Loikkanen, P., Ludvigsen, H. & Mikkola, E. 1986 "Two full scale pilot fire experiments in a tunnel" Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT) Technical Research Centre of Finland, Research reports 453.
- Lacroix, D. 1999 "Fire in the Mont Blanc Tunnel: Facts and Lessons" This conference. MTFVTP 1996 "The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program" Interactive CD-ROM and comprehensive test report. Published by Parsons Brinckerhoff 4D Imaging, Massachusetts, USA.

- Nordmark, A. 1998 "Fire and Life Safety for Underground Facilities: Present Status of Fire and Life Safety Principles Related to Underground Facilities" *Tunnelling and Underground Space Technology* 13 no. 3 pp. 217-269.
- Oka, Y. & Atkinson, G.T. 1995 "Control of smoke flow in tunnel fires" *Fire Safety Journal*, 25 pp. 305-322 Perard, M. 1992 "Organization of fire trials in an operated road tunnel" 1st Int. Conf. Safety in Road and Rail Tunnels, Basel, Switzerland, 23-25 November 1992. pp.161-170.
- Pucher, K. 1999 "Fire in the Tauern Tunnel" This conference. Saito, N., Yamada, T., Sekizawa, A., Yanai, E., Watanabe, Y. & Miyazaki, S. 1995 "Experimental Study on Fire Behaviour in a Wind Tunnel with a Reduced Scale Model" 2nd Int. Conf. Safety in Road and Rail Tunnels, Granada, Spain 1995 pp. 303-310.
- Shipp, M. 1997 "Investigating the channel tunnel fire" Proc. one day seminar on Reducing Fire Risk in Trains, Heathrow, UK, 17 November 1997 pp. 19-29
- How to stop the longitudinal air velocity in case of fire in a long road tunnel by using a transverse ventilation system Pucher, Robert (Department Computer Science, University of Applied Sciences, Technikum Wien); Pucher, Karl Source: *WSEAS Transactions on Systems*, v 4, n 12, December, 2005, p 2403-2408
- Experimental study of temperature distribution in long-sized road tunnel Yan, Zhiguo (College of Civil Engineering, Tongji University); Yang, Qixin; Zhu, Hehua Source: *Dongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, v 35, n SUPPL., July, 2005, p 84-88.
- Upgrading the ventilation of the Gotthard road tunnel Bettelini, M.; Henke, A.; Steiner, W.; Gagliardi, M. Source: *International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, v 1, 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003, p 29-45
- CFD modelling of parameters for the fire source in a road tunnel Vachon, M.; Grippay, J.; Rebuffat, D. Source: *International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, v 2, 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003, p 645-656
- Validation of CFD calculations of full scale medium sized fires in a two lane road tunnel Den Boer, D.J.; Mertens, J.J.; Van Oerle, N.J.; Wijnia, J.F. Source: *International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, v 2, 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003, p 657-667.
- Road tunnel ventilation design and application Wood, David W. Source: *ASHRAE Journal*, v 33, n 10, Oct, 1991, 5p
- FANS FOR THE VENTILATION OF ROAD AND RAIL TUNNELS IN THE UNITED KINGDOM. Pursall, B. R. (Univ of Sheffield, Sheffield, Engl); Lowndes, J. F. L. Source: *BHRA Fluid Engineering*, 1982, p 91-100.

- Investigation of effectiveness of emergency ventilation strategies in the event of fires in road tunnels Kashef, Ahmed; Loughheed, Gary; Benichou, Nouredine; Debs, Alexandre Source: ASHRAE Transactions, v 111 PART 1, ASHRAE Transactions - Technical and Symposium Papers presented at the 2005 Winter Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005, p 1038-1048
- A methodology for assessment of visibility during road tunnel fires Liu, Yunlong (Fire Science and Technology Laboratory, CSIRO Manufacturing and Infrastructure Technology); Apte, Vivek; Luong, Yen; Liu, Xijuan; Yung, David Source: Journal of Fire Protection Engineering, v 17, n 1, February, 2007, p 65-79.
- Fire simulation in road tunnels Modic, Jurij (Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana) Source: Tunnelling and Underground Space Technology, v 18, n 5, November, 2003, p 525-530.
- Emergency ventilation control for a tunnel with longitudinal and transverse systems combined Mizuno, A. (Kogakuin University); Mon, F.; Imai, T.; Nakahori, I. Source: International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, v 2, 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003, p 893-906.
- Emergency ventilation control for a tunnel with longitudinal and transverse systems combined Mizuno, A. (Kogakuin University); Mon, F.; Imai, T.; Nakahori, I. Source: International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, v 2, 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003, p 893-906.
- Damper testing to new standards for road tunnel ventilation Peers, Richard S. Source: World Tunnelling, v 15, n 8, October, 2002, p 393-394.
- 11th international symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels Bradbury, W., ed. Source: International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, v 1, 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003, 501p.
- Memorial tunnel fire ventilation test program: test summary and comparisons Metsch, Werner W. Source: ASHRAE Transactions, v 103, n pt 2, 1997, p 714-722.

Bases de datos consultadas:

- ABI/Inform Global Internet
- Alejandro de la Sota
- Academic Search Premier
- ACM Digital Library (Association of Computing Machinery) Aerospace & High Technology Database
- Agricola
- Agris

- Aranzadi Westlaw
- Avery Index to Architectural Periodicals
- Bases de Datos CSIC
- Bibliography of the History of Art
- Boletín Oficial del Estado
- Computer Database
- Country Reports
- Dissertations and Theses
- Ei Compendex
- ESDU - Engineering Sciences Data Unit
- Geobase
- Grove Art Online
- Iconda
- IEL (IEEE/IEE Electronic Library)
- Inspec
- ISI Web of Knowledge
- ISSN on line
- Marine Technology Abstracts MARNA/SHIPDES
- MathSciNet
- NORWEB: Normas UNE
- Pascal
- PCI Full Text
- Pidgeon Audiovisual Collection
- Physical Review Online
- SportDiscus
- Transport

7º.- TESIS QUE SE PUEDEN PROPONER COMO CONSECUENCIA DE LA PROPUESTA.

Una vez analizado el resultado obtenido en la propuesta de soluciones, queda abierto un gran número de aplicaciones en el que las cortinas de aire puedan tener su utilidad, todas ellas basadas en la sectorización de una zona con respecto a otra.

Si continuamos en el sector de los túneles carreteros, se puede proponer la combinación de las cortinas en un sistema de ventilación semitransversal, en el que la extracción de humos se hace por cantones situados en la parte superior del túnel y el aporte de aire fresco por las bocas del túnel. Podría evitar el retroceso de los humos y ayudar al aporte de aire fresco.

Otra línea de investigación en la que podría aplicarse el sistema, sería en la bifurcación de tubos en túneles carreteros, existe una gran cantidad de túneles que se bifurcan en dos, estas confluencias quedan desprotegidas y el sistema de ventilación del tubo principal interfiere en el ramal. La instalación de cortinas de aire en la confluencia, podría sectorizar un tubo respecto al otro, evitando la propagación de los humos en caso de incendio.