

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
"COLEGIO POLITÉCNICO"

**DISEÑO DE UN TÚNEL DE DILUCIÓN GAS - GAS PARA
MOTORES A DIÉSEL**

José Francisco Fuentes Navarrete

Tesis de grado presentada como requisito para la
obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, Mayo de 2008

Universidad San Francisco de Quito

Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**DISEÑO DE UN TÚNEL DE DILUCIÓN GAS - GAS PARA
MOTORES A DIÉSEL**

José Francisco Fuentes Navarrete

Nombre, título académico*
Director de la Tesis

Nombre, título académico*
Miembro del Comité de Tesis

Nombre, título académico*
Miembro del Comité de Tesis

Nombre, título académico*
Miembro del Comité de Tesis

Nombre, título académico
Decano del Colegio.....

Quito - Abril de 2008

*Título académico opcional

© Derechos de autor
José Francisco Fuentes Navarrete
2008

Agradecimiento

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por su aporte y colaboración en este proyecto al ser partícipe mediante la prestación de sus laboratorios computacionales donde se encuentra el programa SolidWorks.

Resumen

Los automotores que trabajan a diésel emiten una amplia variedad de agentes contaminantes, entre los cuales el material particulado ocupa un lugar importante. Para el estudio detallado de este agente con miras a reducir sus efectos, es importante medir el nivel de emisiones de un determinado automotor. Para ello usualmente se emplean aparatos de medida que incluyen un túnel de dilución acoplado a un dispositivo de medición tipo PAS2000. En este trabajo se investigaron diferentes sistemas de dilución y se optó por el mini-túnel, el mismo que, con modificaciones en su diseño original fue sometido a varios estudios que permitieron diseñar un modelo más apropiado para el acoplamiento con el dispositivo PAS2000. El diseño del mini-túnel se encuentra detallado con los dispositivos necesarios de acuerdo con los requerimientos del PAS2000. En base a estos requerimientos se construyó un modelo computacional y se realizaron varias pruebas, las cuales fueron determinantes para la obtención de perfiles de temperatura, velocidad y sobre todo para determinar la dilución. Adicionalmente, se obtuvieron gráficos de líneas de flujo, los mismos que fueron fundamentales para la obtención de un nuevo diseño modificado, el cual cumple de mejor manera las expectativas de dilución. Según se pudo observar en la simulación, los resultados son alentadores en el sentido en que se cumple la dilución según se observa en las líneas de flujo. También se elaboraron planos del diseño final del túnel y de varios de sus elementos. Además de las simulaciones que detallan las líneas de flujo, se realizó una simulación de temperatura y velocidad para en diseño original y para el diseño nuevo propuesto.

Abstract

Diesel engine automobiles emit an ample variety of polluting agents. Among them, particulate matter occupies an important place. For the detailed study of this agent, with a view to reducing its effects, it is important to be able to measure the automotive emission level. For this purpose, the measuring instruments usually used include a dilution tunnel connected to a measurement device type PAS2000. In this work, different dilution systems were investigated and the mini-tunnel was selected. The original design of this device was modified and the changes performed were studied considering that the dilution tunnel will be used with the PAS2000 device. The design of the mini-tunnel is detailed with the necessary devices for its operation and therefore with the requirements of the PAS2000 measurement device. A computational model was constructed on the basis of these requirements and several tests were performed to obtain results of temperature, speed and specially to determine the dilution rate. Flow line charts were also obtained. The results were used to obtain a new modified design, which according to the simulations satisfies in a better way the dilution expectations. Constructive plots of the tunnel final design and its elements were also drawn.

Tabla de contenido

Capítulo 1		1
<hr/>		
	<u>Contaminación por material particulado</u>	
1.1.	Introducción	1
1.2.	Contaminación atmosférica	2
1.3.	Tipos de contaminantes atmosféricos	3
1.4.	Material particulado	5
	1.4.1 Formación de material particulado durante la combustión	5
	1.4.2 Propiedades y emisiones de material particulado	8
	1.4.3 Caracterización física y química del material particulado	8
<hr/>		
Capítulo 2		11
<hr/>		
	<u>Sistemas de dilución</u>	
2.1.	Introducción	11
2.2.	Tipos de sistemas de dilución gas - gas	12
	2.2.1 Túnel de dilución total	13
	2.2.2 Túnel de flujo parcial (micro-túnel)	14
	2.2.3 Dilución con eyector	15
	2.2.4 Dilución con disco rotatorio	16
2.3.	Técnicas de muestreo de partículas a volumen constante	17
2.4.	Sistemas de mediciones	17
	2.4.1 Sistema PAS 2000	18
	2.4.1.1 Principio de funcionamiento del dispositivo	18
	2.4.1.2 Proceso de medición	19
<hr/>		
Capítulo 3		22
<hr/>		
	<u>Diseño del mini-túnel</u>	
3.1	Alternativas de diseño	22
3.2.	Parámetros técnicos del mini-túnel	24
	3.2.1 Configuración del sistema de dilución	28
	3.2.2 Esquema de construcción	31
3.3.	Diseño del mini-túnel	32
	3.3.1. Datos importantes	32
	3.3.2. Tubo coraza	34
	3.3.3. Tubo interno	35
	3.3.4 Orificios en el tubo interno	35
3.4.	Materiales	41
<hr/>		

Capítulo 4 **42**

Simulaciones

4.1.	introducción	42
4.2.	Programas de simulación	43
4.3.	Resultados y análisis	43
4.4.	Alternativas de diseño del mini-túnel	56
4.4.1.	Entrada de gases y entrada de aire puro	59
4.4.2.	Posición de los orificios y cantidad de los mismos	60
4.4.3.	Posición del tubo de entrada de aire	61
4.4.4.	Cambio en longitud del mini-túnel	63

Capítulo 5 **66**

Conclusiones y Recomendaciones

5.1	Conclusiones	66
5.2	Recomendaciones	67

Bibliografía 69**Anexos**

Anexo 1. Planos de construcción

Anexo A. Presupuesto referencial para la construcción de los túneles

Anexo B. Listado de precios vía e-mail

Lista gráficos

Capítulo 1

Gráfico 1.1. Ciclo diésel.	7
-----------------------------------	---

Capítulo 2

Gráfico 2.1. Diagrama de bloque de un eyector.	15
Gráfico 2.2. Diagrama de bloque de un mini-dilusor.	15
Gráfico 2.3. Diagrama del disco rotatorio.	16
Gráfico 2.4. Diagrama del electrón emitido por la partícula.	18
Gráfico 2.5. Sistema PAS2000.	19

Capítulo 3

Gráfico 3.1. Diagrama de un mini-túnel de dilución.	26
Gráfico 3.2. Mini- túnel de dilución (modelo 7610) de Mott Corp.	28
Gráfico 3.3. Filtro de aire (HEPA).	29
Gráfico 3.4. Válvula de estrangulación de aire Honsberg GRV150AK0005G.	30
Gráfico 3.4. Fotomedidor de caudal.	31
Gráfico 3.6. Esquema del mini-túnel a construir.	32

Capítulo 4

Gráfico 4.1. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 1 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	46
Gráfico 4.2. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 1 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	47
Gráfico 4.3. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 5 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	48
Gráfico 4.4. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 5 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	48
Gráfico 4.5. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 10 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	49
Gráfico 4.6. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 10 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	50
Gráfico 4.7. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 20 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	51
Gráfico 4.8. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 20 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	51
Gráfico 4.9. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 50 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	52
Gráfico 4.10. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 50 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	53
Gráfico 4.11. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 100 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	54

Gráfico 4.12. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 100 y con los gases de escape ingresando a 353 K.	54
Gráfico 4.13. Líneas de flujo del aire en el túnel de dilución original a 293 K – Tasa de dilución = 100.	57
Gráfico 4.14. Líneas de flujo del gas en el túnel de dilución original a 353 K – Tasa de dilución = 100.	57
Gráfico 4.15. Líneas de flujo del aire y gas en el diseño original. Tasa de dilución = 100.	57
Gráfico 4.16. Líneas de flujo del gas en el túnel de dilución original a 353 K – Tasa de dilución = 100.	59
Gráfico 4.17. Líneas de flujo del aire en el túnel de dilución original a 293 K – Tasa de dilución = 100.	59
Gráfico 4.18. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución original. Tasa de dilución = 100.	59
Gráfico 4.19. Líneas de flujo del aire en el túnel de dilución original a 293 K – tasa de dilución = 100.	60
Gráfico 4.20. Líneas de flujo del gas en el túnel de dilución original a 353 K – tasa de dilución = 100.	60
Gráfico 4.21. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución original - tasa de dilución = 100.	60
Gráfico 4.22. Líneas de flujo del aire en el túnel de dilución modificando la posición de entrada a 293 K – Tasa de dilución = 100.	61
Gráfico 4.23. Líneas de flujo del gas en el túnel de dilución modificando la posición de entrada a 353 K – Tasa de dilución = 100.	61
Gráfico 4.24. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución modificando la posición de entrada. Tasa de dilución = 100.	61
Gráfico 4.25. Líneas de flujo del aire en el túnel de dilución modificando la posición de entrada a 293 K - Tasa de dilución = 100.	62
Gráfico 4.26. Líneas de flujo del gas en el túnel de dilución modificando la posición de entrada a 353 K – Tasa de dilución = 100.	62
Gráfico 4.27. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución modificando la posición de entrada. Tasa de dilución = 100.	62
Gráfico 4.28. Líneas de flujo del aire en el túnel de dilución modificando la longitud del mismo 293 K – tasa de dilución = 100.	63
Gráfico 4.29. Líneas de flujo del gas en el túnel de dilución modificando la longitud del mismo 353 K – tasa de dilución = 100.	63
Gráfico 4.30. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución modificando la longitud del mismo. Tasa de dilución = 100.	63
Gráfico 4.31. Distribución de temperaturas en el túnel modificado cuando la tasa de dilución es igual a 100, el tubo de ingreso del aire está a 293 K y el ingreso del gas es a 353 K.	64
Gráfico 4.32. Distribución de velocidades en el túnel modificado cuando la tasa de dilución es igual a 100, el tubo de ingreso del aire está a 293 K y el ingreso del gas es a 353 K.	65

Lista de tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1. Efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud humana.	4
---------------------------------------------------------------------------------	---

Capítulo 2

Tabla 2.1. Características del dispositivo PAS2000.	21
------------------------------------------------------------	----

Capítulo 3

Tabla 3.1. Comparación de los sistemas de dilución.	25
Tabla 3.2. Características de la válvula de estrangulación de aire.	30
Tabla 3.3. Características del medidor de caudal, a colocarse después del estrangulador de aire.	31
Tabla 3.4. Ejemplo de estructura de tablas.	36
Tabla 3.5. Velocidades, caudal y número de Reynolds, tomando en cuenta la tasa de dilución y el caudal para el dispositivo de medición.	37-39
Tabla 3.6. Pérdidas por fricción en el tubo interno. La densidad del aire se considera igual a 1.30.	40-41

Capítulo 4

Tabla 4.1. Ejemplo de los parámetros a usar en las simulaciones.	44
Tabla 4.2. Listado de tablas y gráficos de las simulaciones	45
Tabla 4.3. Parámetros a usar en la simulación 1. Tasa de dilución = 1.	46
Tabla 4.4. Parámetros a usar en la simulación 2. Tasa de dilución = 5.	47
Tabla 4.5. Parámetros a usar en la simulación 3. Tasa de dilución = 10.	49
Tabla 4.6. Parámetros a usar en la simulación 4. Tasa de dilución = 20.	50
Tabla 4.7. Parámetros a usar en la simulación 5. Tasa de dilución = 50.	52
Tabla 4.8. Parámetros a usar en la simulación 6. Tasa de dilución = 100.	53
Tabla 4.9. Cambios y modificaciones que se realizaron en el modelo original.	58

CAPÍTULO 1

CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO

En este capítulo se brinda una idea global de las características de los principales agentes contaminantes y las razones por las cuales deben ser estudiados. También se establece en que consiste la contaminación atmosférica desde un punto de vista enfocado al material particulado (particulated matter, PM). Además, se identifica las causas para la formación de PM en motores a diésel y sus características.

1.1. Introducción

En varias ciudades del mundo se tiene un problema muy grave que es el de las emisiones de automotores de tipo pesado que funcionan con motores que utilizan como combustible el diésel. Estas emisiones vienen acompañadas de materia particulada, misma que ha demostrado tener efectos adversos sobre la salud de los seres humanos. Quito, la localidad en la que se desarrolla el presente proyecto, sufre los efectos de estas perjudiciales emisiones, las cuales en los últimos años se han disparado y necesitan ser monitoreadas con miras a establecer políticas y planes que permitan reducirlas.

Para establecer estas políticas y planes es necesario caracterizar las emisiones de materia particulada de los motores a diésel. Los sistemas de muestreo y dilución son particularmente importantes dentro del proceso de caracterización. Estos sistemas permiten: (a) reducir la concentración de materia particulada existente en el escape de los motores de combustión interna a una concentración que pueda ser manejada por el equipo de medición, (b) reducir la temperatura a un valor adecuado, y (c) controlar los procesos de condensación y nucleación de manera que durante la caracterización se obtengan resultados fiables.

Para la dilución de las emisiones típicamente se emplean túneles de dilución. Estos túneles permiten, como su nombre lo indica, “diluir” las emisiones particuladas de los motores a diésel en relativamente grandes cantidades de aire.

La mezcla resultante entonces puede ser conducida a un equipo de medición que permita establecer la cantidad, masa, distribución de tamaños, etc. de partículas emitidas por un motor determinado.

Los túneles de dilución para las emisiones de motores a diésel juegan un papel importantísimo ya que gracias a su utilización se puede determinar las principales características de la materia particulada que emite un motor. Esto puede facilitar el establecimiento de estándares de emisión que reduzcan los efectos perjudiciales para el medio ambiente.

Existen varios tipos de túneles de dilución. En particular, para la caracterización de material particulado presente en las emisiones de un motor a diésel, se debe utilizar un túnel de dilución de gas (gases de escape de un motor) en gas (aire). Existen varias alternativas para el diseño de un túnel de dilución gas-gas. Es necesario entonces un estudio sistemático para determinar un diseño apropiado para el sistema antes mencionado.

1.2. Contaminación atmosférica

Hoy en día existen varios agentes contaminantes los cuales degradan al mundo y a la vida humana poco a poco. Los contaminantes se encuentran en nuestro aire y muchos de ellos son casi imperceptibles para nuestros sentidos, en especial para la vista y el olfato.

Estos contaminantes se caracterizan porque sus efectos se presentan a largo plazo, afectan a la piel y pulmones principalmente, provocando incluso cáncer cuando existe una exposición permanente. Los agentes más comunes son los que se encuentran en la atmósfera, entre los cuales están: ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), anhídrido sulfuroso (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM).

Estos agentes contaminantes son producidos por diversas fuentes, entre las cuales tenemos los buses urbanos y rurales que circulan por nuestras calles, los autos, las fábricas, etc. Además, no solo contaminan el aire, sino también

provocan erosión en el suelo y son los causantes de la baja visibilidad en el medio según sea el grado de contaminación.

1.3. Tipos de contaminantes atmosféricos

Ozono

El ozono (O_3) comprende tres partículas de oxígeno y se encuentra en nuestra atmósfera. En cierta manera, el ozono es beneficioso para los seres vivos, pero en ciertas circunstancias puede ser muy perjudicial. A nivel del suelo el ozono es un contaminante que se forma por la reacción de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles con la luz solar. El ozono se presenta en el smog en forma de una nube de un color café y por lo general en las zonas de alto tráfico como el centro histórico de la ciudad de Quito.

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) se forma particularmente en los motores de los vehículos cuando el carbono que se encuentra en el combustible no se combustiona completamente. Por otro lado, existen otras fuentes de emisión de este gas como son los incendios forestales o la quema de varios compuestos fósiles. El clima desempeña un papel importante ya que en un clima frío la combustión del carbono es menor y, por tanto, las concentraciones de CO son mayores.

Dióxido de azufre

El dióxido de azufre (SO_2) se produce por la quema de compuestos que contienen azufre, entre los cuales encontramos el carbón, o la fundición de varios metales. Las mayores concentraciones se registran en las zonas industriales.

Dióxido de nitrógeno

El dióxido de nitrógeno (NO_2) se produce por la reacción química en la que se combinan el óxido nítrico (NO) y el oxígeno del aire (O_2). Este es uno de los componentes principales para formar ozono a nivel del suelo. Este gas lo

producen principalmente los automóviles y cualquier fuente de combustión industrial.

En la siguiente tabla se exponen los problemas más comunes causados por varios de los agentes contaminantes; también se mencionan las zonas más afectadas del cuerpo humano.

Tabla 1.1. Efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud humana.¹

Contaminante	Sistema afectado	Síntomas
Ozono	Respiratorio	Tos, irritación de la garganta, infección
	Pulmones	Limitar capacidades de la persona, dañar el tapizado pulmonar interno
	Agravar asma	Alergias, ataques
PM	Pulmones	Obstrucción pulmonar crónica
	Corazón	Congestiones cardíacas, propensión a ataque
	Respiratorio	Disminuida capacidad de respirar, agrava asma, bronquitis
CO	Torrente sanguíneo	Dolor de cabeza, mareos, pérdidas del conocimiento, anemia
	Cardiovascular	Dolores de pecho
	Embarazos	Alto riesgo de problemas
	General	Mente y visión alteradas
NO ₂	Respiratorio	Asma, tos, dificultad para respirar
	Niños	Aumenta el riesgo de enfermedades respiratorias
	Pulmones	Infecciones

¹ CORPAIRE, Los contaminantes comunes del aire y sus efectos sobre la salud humana.

1.4. Material particulado

El objeto de este estudio es el material particulado (PM). Este comprende las partículas sólidas y en algunos casos gotas de agua que se encuentran en el aire. Este material se distribuye en el aire en varios tamaños. Nuestro interés se centra en las partículas con un diámetro inferior a 10 μm , conocidas como PM-10. Estas partículas pueden ser inhaladas por el sistema respiratorio del ser humano. Otras partículas que son objeto de estudio y que de igual forma pueden ser inhaladas por el ser humano son las partículas con diámetros inferiores a 2.5 μm (PM-2.5).

Estas partículas, tanto las PM-10 y las PM-2.5, son emitidas por todo tipo de combustión. Las partículas en el rango superior (PM-10) son emitidas por procesos de pulido o son simplemente polvo que se levanta generalmente en las vías por la circulación de los automotores.

En el caso de las emisiones de automotores, la tendencia actual es hacia el estudio de material particulado de cada vez menores tamaños. Esto se debe a que el uso de nuevos sistemas de inyección combinados con sistemas de postratamiento en algunos motores diésel modernos ha dado lugar a emisiones en las que se han virtualmente eliminado las partículas cuyo tamaño está en el orden de las micras. Estas emisiones, y especialmente aquellas compuestas de partículas nanométricas (cuyo tamaño es menor a 100 nm), pueden ser incluso más peligrosas que aquellas que contienen partículas de mayores tamaños. Esto se debe a que las partículas más pequeñas pueden pasar al torrente sanguíneo y cruzar la barrera sangre-cerebro, liberando subsecuentemente sustancias tóxicas en el cuerpo humano.²

1.4.1. Formación de material particulado durante la combustión

Varios procesos de formación de partículas todavía no han sido entendidos en detalle y dependen del tipo de combustión. Sin embargo, la formación de las partículas puede ser dividida en varios procesos básicos.

² E.M. Krommer, P.V. Puzinauskas & S.G. Buckley, "The fluid dynamics of a miniature dilution tunnel for internal combustion engine aerosol measurement", Journal: Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, Issue: 2, Elsevier Ltd. Nov 2007.

a) Formación de los precursores del hollín: Se forman relativamente grandes cantidades de moléculas reactivas, por ejemplo:

- Acetileno
- Fenil (C_6H_6)
- Iones ($C_3H_3^+$)
- Estructuras cíclicas

Por reacciones de polimerización estos precursores pueden crecer a macromoléculas.

b) Formación de partículas primarias por nucleación: Cuando las moléculas mencionadas llegan a una saturación suficiente, las partículas se forman por nucleación, y tienen un diámetro del orden de los nanómetros.

c) Crecimiento de la partícula: Inmediatamente después de la nucleación las partículas empiezan a crecer. Por un lado, este crecimiento se da debido a la coagulación, la cual es muy rápida debido a la alta concentración del número de las partículas de la nucleación. Otro proceso importante es el crecimiento de la superficie. Esto quiere decir que se junta material de la fase gaseosa. El crecimiento de la superficie determina la masa total de la partícula.

d) Deshidratación, combustión de la partícula: En el último paso, el proceso de oxidación es dominante. Esto reduce la masa de la partícula. El contenido de hidrógeno disminuye. Bajo ciertas circunstancias las partículas pueden consumirse por completo. Pero también existen varias razones por las que se produce la combustión incompleta, tales como:

- Carencia de oxígeno en el medio
- Temperatura muy baja
- Insuficiencia de tiempo para la combustión completa

Ciclo Diésel

En el gráfico 1.1 se presenta un diagrama de presión (p) vs. volumen (V) el cual de manera figurativa presenta el desarrollo del ciclo diésel a sus distintos tiempos.

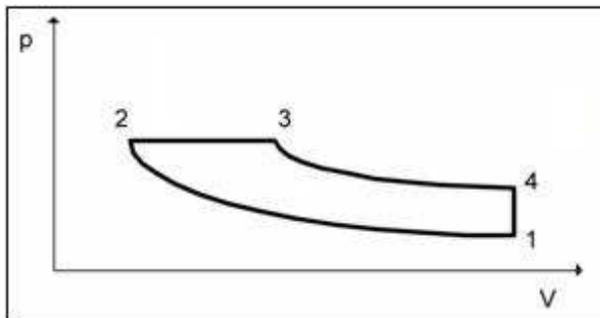


Gráfico 1.1. Ciclo diésel.

Como se ve en el gráfico 1.1, un motor a diésel utiliza un ciclo que se realiza en 4 tiempos: admisión (1), compresión (2), trabajo (3) y escape (4). En pocas palabras, el combustible entra, se comprime y explota por su alta presión y luego es expulsado.

Un motor diésel funciona mediante la ignición de la mezcla aire-gas sin chispa. Si esta ignición no se realiza en la totalidad del diésel, se producen desechos que forman parte del material particulado (PM). Este motor transmite la energía producida por la explosión del combustible hacia el pistón, el mismo que está conectado con una biela y a su vez un cigüeñal que transforma esta energía en rotación y así permite el movimiento.

El material particulado (PM) en general se forma en motores a diésel que, por la falta de oxígeno, producen una combustión incompleta que genera residuos que equivalen a material particulado. En el momento de la compresión es cuando la totalidad del diésel se encuentra sobre el pistón y es en este momento en el cual no se produce la combustión completa y se genera este material particulado PM.

El diésel es un producto que se obtiene por la destilación del petróleo, por lo que tiene gran cantidad de compuestos minerales y de azufre. Su contenido de carbono es muy alto por lo que no es sorprendente que al pasar por el proceso de combustión no lo realice en su totalidad y muchas partículas queden en el aire flotando en forma de material particulado.

Hidrocarburos poliaromáticos (PAH)

En el PM se encuentran los hidrocarburos poliaromáticos (PAH). Estos se encuentran principalmente en el hollín emitido como producto de la combustión

incompleta de los motores diésel. Naftaleno, acenaftaleno, acenafticeno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzantraceno, criseno, benzofluoranteno, benzofluoranteno, benzopireno, dibenz(a,h)antraceno, benzoperileno, indenopireno, son los más conocidos. Casi el 70% del total de los PAH, producen riesgo de cáncer en los seres humanos.

1.4.2. Propiedades y emisiones de material particulado

Las partículas de hollín son cadenas de aglomerados de las partículas primarias, con un diámetro en el orden de 20 nm. El tamaño de la partícula primaria es independiente de las condiciones de combustión. El tamaño de los aglomerados para el caso de los motores a diésel está típicamente comprendido en el rango de 50 a 150 nm. El tamaño de los aglomerados está determinado principalmente por el grado de aglomeración. Esto quiere decir, por la concentración de las partículas primarias y el tiempo disponible para la coagulación.

Las emisiones de PM se producen en un 18% dentro del límite urbano y son producto de los automóviles, buses y camiones. Un 11% se producen a las afueras del límite urbano y provienen de canteras, erosión eólica, polvo. Además, a pesar de que el parque automotor diésel se somete a controles semestrales y que apenas representa el 6% de la flota vehicular que circula en el DMQ, el inventario de emisiones más actualizado muestra que es responsable de más del 40% de las emisiones de PM.³

1.4.3. Caracterización física y química del material particulado

La caracterización del material particulado comprende la determinación de la concentración en masa y número, así como la composición química, para de esta manera ayudar a controlar los niveles requeridos por los controles de contaminación. En la ciudad de Quito, Corpaire ejecuta proyectos para la caracterización del material particulado y para ello tiene los siguientes equipos:

- Tres muestreadores de alto volumen (high volume samplers) para muestrear partículas totales en suspensión (PTS)

³ PROGRAMA RETROFIT QUITO. CORPAIRE-CCICEV. Fase II. Oct 2006. documento pdf.

- Cuatro muestreadores de alto volumen para muestrear partículas con tamaños menores a 10 micrómetros (PM-10)
- Treinta y cinco muestreadores preliminares para muestrear polvo sedimentable, cuya información servirá de base para la instalación de una red definitiva de depósito seco
- Seis analizadores automáticos para muestrear y analizar de manera continua material particulado menor a 2.5 micrómetros (PM-2.5), mediante la técnica de atenuación de rayos beta

Las propuestas de trabajo realizadas por Corpaire incluyen la clasificación por tamaño de las partículas e identificación de compuestos químicos principales, utilizando para ello microscopía electrónica, espectrofotometría de absorción atómica y cromatografía de gases.

En el caso de los automotores, factores tales como la temperatura, la humedad, el viento, la velocidad del vehículo y la carga del motor, influyen grandemente en el proceso de formación de partículas. Esto afecta directamente todo proceso de caracterización y cuantificación del material particulado presente en sus emisiones. De allí que sea necesario establecer métodos de muestreo y técnicas de caracterización que den una medida fiable y rápida del potencial de un motor para emitir partículas nocivas a la atmósfera. Dentro de estos métodos y técnicas, la utilización de túneles de dilución juega un rol fundamental. Por ello Corpaire ha propuesto el diseño de un túnel de dilución que pueda ser acoplado a un equipo de medida apropiado para la caracterización del PM presente en emisiones de automotores. Este diseño fue encargado al Centro de Control de Emisiones Vehiculares de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. El túnel que este equipo de personas diseñó es un túnel de disco rotatorio. Sin embargo, en ese trabajo no se consideraron algunas posibles opciones de configuración de túneles de dilución ni se llevó a cabo una simulación del diseño final. Con estos antecedentes, para este trabajo se han planteado los siguientes objetivos:

El objeto de estudio de esta tesis es:

Diseñar un mini-túnel de dilución que permita determinar la cantidad de material particulado que se emite junto con los gases de escape de los motores de combustión interna que utilizan diésel como combustible.

Como objetivos secundarios están:

- Determinar los requerimientos de funcionamiento del mini-túnel.
- Establecer las especificaciones requeridas para el diseño.
- Diseñar de manera detallada un túnel de dilución para un sistema de medición de emisiones particuladas.
- Simular el mini-túnel de dilución diseñado para determinar su comportamiento ante diferentes condiciones de operación.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE DILUCIÓN

En este capítulo se establecen algunos de los requerimientos del túnel de dilución a diseñar en este trabajo. Posteriormente se detallan las características particulares y comunes de varios sistemas de dilución que se pueden emplear en el monitoreo de emisiones de automotores a diésel. Para esto se ha considerado que el sistema de dilución pueda trabajar con varias tasas y sea graduable según la necesidad. Finalmente se describe el dispositivo de medición que se usaría en el caso de la construcción del túnel a diseñar. Esta descripción es muy importante para visualizar los requerimientos impuestos al diseño que se llevará a cabo.

2.1. Introducción

Existen sistemas de dilución para varios fines. Este trabajo se enfoca en el de gas – gas, que es el que se necesita para diluir en relativamente grandes cantidades de aire un poco de gas de escape de un motor y obtener una mezcla que pueda ser procesada para caracterizar el material particulado asociado a los gases de escape. También hay sistemas que permiten diluir líquido en líquido y otros también muy funcionales que permiten combinar varios elementos como: gas – líquido, sólido – líquido, gas – sólido – líquido, etc. En todos los casos, el principio es el mismo y estos dispositivos son utilizados comúnmente con fines de muestreo.

En el caso del monitoreo del material particulado presente en las emisiones de motores, el método actualmente aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA) especifica que una pequeña proporción de los gases de escape diluidos manteniendo constante la tasa de flujo volumétrico se haga pasar a través de un filtro gravimétrico de partículas, el cual se utiliza para cuantificar la masa de partículas acumulada. El flujo diluido con una tasa de flujo volumétrico constante comprende la totalidad de gases de escape más la cantidad necesaria de aire de dilución, con temperatura y

humedad controladas, para mantener una tasa de flujo constante y condiciones de dilución específicas. La tubería, los sopladores y los sistemas de control de flujo requeridos en esta técnica forman lo que típicamente se denomina sistema de dilución total. La técnica de muestreo empleada se denomina muestreo de volumen constante.

Si bien es cierto que los sistemas de dilución total satisfacen los requerimientos de reproducibilidad y representatividad de los resultados, los requerimientos de espacio, y el costo de ensamblaje y operación de estos sistemas son demasiado elevados. Esto ha conducido al desarrollo de túneles miniatura de dilución (mini-túneles), los cuales son el objeto de este trabajo. Por otro lado, la medición de la masa de las partículas acumuladas en un filtro impide el que la caracterización de las emisiones de un motor se realice en periodos cortos. De allí que en este trabajo se consideren sistemas de medición que permitan una rápida caracterización de emisiones.

Con estas consideraciones, es necesario indicar que entre los requisitos más importantes que debe cumplir el sistema de dilución que se busca diseñar en este trabajo están: el que sea de bajo costo, permita variar la tasa de dilución, sea portátil, permita una caracterización rápida de las emisiones muestreadas y que los requerimientos de mantenimiento no sean demasiado elevados. Estos requisitos se tratarán con mayor detalle en el siguiente capítulo.

2.2. Tipos de sistemas de dilución gas - gas

Los gases de escape de un automotor tienen que ser diluidos antes de entrar a un dispositivo de medición para:

- Manejar una concentración del gas en el rango permitido por el equipo de medición
- Enfriar a una temperatura óptima para el instrumento de medida
- Prevenir la condensación de los componentes del gas a caracterizar
- Disminuir el proceso de coagulación

La dilución no solo ayuda al muestreo de los gases sino también a simular las condiciones del mundo real. Nótese también que cuando las emisiones son tomadas en medios cerrados estas suelen tomar valores muy diferentes a los que normalmente podrían obtenerse ya que las condiciones atmosféricas los limitan. A continuación se presentarán diferentes tipos de túneles de dilución y se discutirán algunas de sus ventajas y desventajas.

2.2.1. Túnel de dilución total

Un túnel de dilución para caracterizar los gases de escape de un automotor a diésel consiste en un tubo de longitud al menos 10 veces mayor que el diámetro y que permite mezclar gases contaminantes del escape de un motor con aire del ambiente. Además, ayuda a disminuir la temperatura con la que el aire llega al equipo de medición, lo que permite simular condiciones reales y alcanzar datos más precisos en las mediciones. La dilución también promueve la condensación y la adsorción de hidrocarburos más pesados en el material particulado.

El túnel de dilución es un dispositivo de referencia, es decir, se utiliza para fines de investigación y monitoreo de emisiones de gas, por lo que algunos sistemas como el mini-túnel especialmente, cumple con características muy similares pero se diferencian en que sus medidas son mucho más pequeñas, en proporciones mucho menores. Dependiendo de los requerimientos y disponibilidad se puede mencionar varias características para este túnel. Así, este sistema toma todos los gases del escape y los diluye, opera a una tasa de dilución muy alta de gases de escape y permite la determinación directa de la masa total emitida durante el tiempo de adquisición de datos.

Entre algunas de sus características podemos destacar las siguientes:

- Costoso
- Muy largo
- Rango de dilución (< 1:10)
- Sin calentar el aire diluido
- Imposible de controlar la temperatura
- Imposible de controlar la tasa de dilución

- Las condiciones en un túnel ayudan a la formación de partículas por nucleación ya que la temperatura disminuye a rangos bajos a temperatura ambiente.

Una ventaja del túnel es que al disminuir la temperatura se evita la condensación de agua en la muestra. El retiro del agua es muy importante en las pruebas de emisiones, ya que puede interferir en las lecturas de algunos analizadores. Por otro lado, uno de los problemas más significativos que tiene este sistema es que el caudal varía dependiendo del flujo del escape del motor.

2.2.2. Túnel de flujo parcial (micro-túnel)

El principio de funcionamiento es el mismo de un túnel de dilución total pero en este caso se tiene un flujo parcial. Es decir, en lugar de enviar todos los gases del escape del motor al mini-túnel, solo se toma una pequeña cantidad la cual es proporcional al total que se emite por el motor. Por lo tanto, sus dimensiones son muy reducidas en comparación con el túnel original pero las características de funcionalidad se mantienen iguales. Diluye los gases solo que en cantidades mucho menores y con resultados muy parecidos en las comparaciones con el túnel de flujo completo.

El túnel toma grandes cantidades de aire y las inserta con el gas proveniente del escape. Este proceso simula las condiciones bajo las cuales los vehículos expulsan los gases al ambiente.

Los mini-túneles solo recogen cierta cantidad de gases y son muy parecidos al túnel de flujo completo o simplemente conocido como túnel de dilución. Entre sus principales características se destacan las siguientes:

- Menos costosos, aproximadamente un tercio del costo normal del túnel de flujo total
- Se calcula la tasa mediante el consumo de combustible
- Más usado en medios estacionarios
- Compacto y portátil

Como algunos fenómenos químicos y físicos se pueden dar en el proceso de dilución, esto puede cambiar propiedades de la partículas como su masa y sus fases de volatilizado. Por esto, es necesario mantener un flujo constante del caudal del muestreo y el caudal del gas de escape.

2.2.3. Dilución con eyector

Para este método se usa una tobera, la cual permite crear una caída de presión, la misma que succiona el aire del escape para posteriormente mezclarlo en una cámara de mezcla, como se muestra en el gráfico 2.1. En el gráfico 2.2 se muestra un diagrama para lo que podría ser un sistema de dilución usando los eyectores.

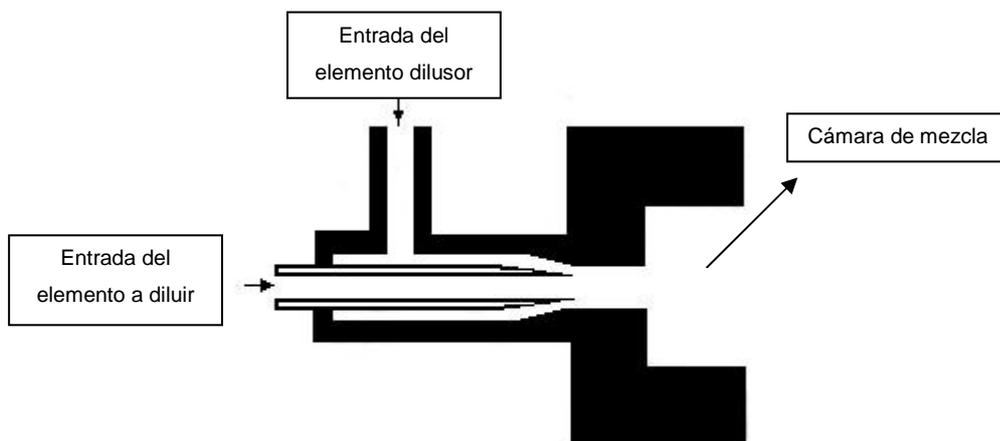


Gráfico 2.1. Diagrama de bloque de un eyector.

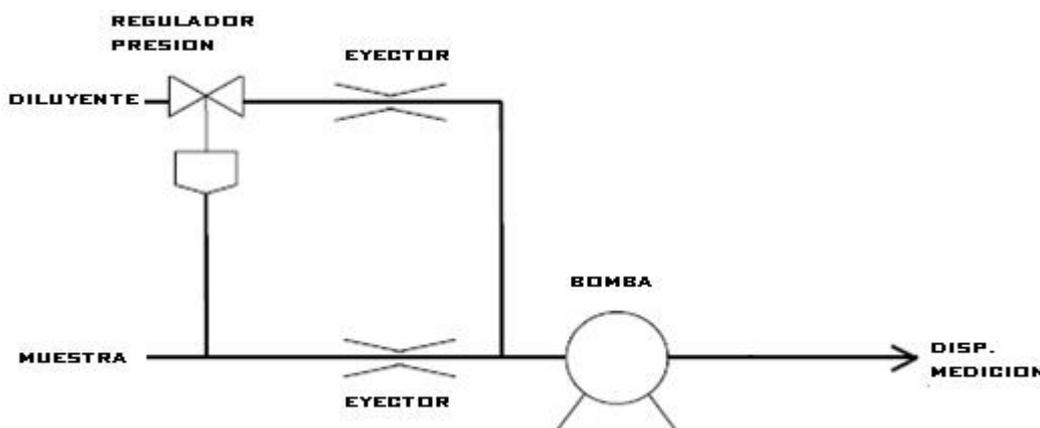


Gráfico 2.2. Diagrama de bloque de un mini-dilusor.⁴

⁴ EcoChem Analytics, User's Guide Realtime PAH Monitor PAS 2000, 2da Edición, Octubre 1998.

2.2.4. Dilución con disco rotatorio

Este método utiliza un disco con orificios que permite controlar los rangos de dilución mediante una frecuencia determinada para los giros del disco. Este dispositivo es pequeño y portable, también es muy usado para partículas con un tamaño menor a $1 \mu\text{m}$, ya que en partículas de mayor tamaño se puede obtener pérdidas.

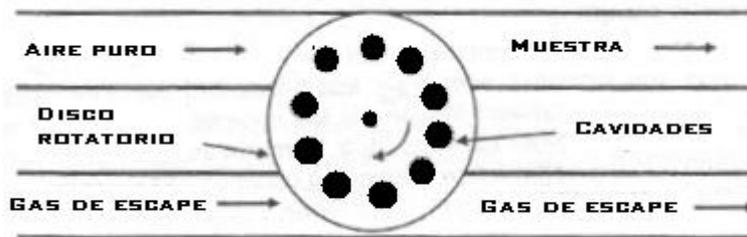


Gráfico 2.3. Diagrama del disco rotatorio.

El dilusor es un bloque macizo de acero que posee dos ductos, el primero por donde ingresa la muestra de gases de escape sin diluir y el otro para el aire de dilución (aire seco libre de partículas). Los dos ductos tienen la salida hacia una misma cara del bloque, en la cual está ubicado un disco que se soporta y rota axialmente en un eje que atraviesa el bloque de acero. Este disco es de material sintético autolubricante para que pueda rotar con un mínimo de fricción y tiene un número de alojamientos específicos, con forma de cono truncado, dispuestos en forma circular, además de fácil montaje y desmontaje. Se usa un motor de pasos con frecuencia variable para hacer rotar el disco. Las cavidades están pasando por las salidas de los ductos mientras el disco está rotando, de esta manera una cavidad se llena de la mezcla de gases de escape cuando pasa por la salida del primer ducto y cuando pasa por la abertura del segundo ducto la porción de gas es evacuada hacia el interior de este.

2.3. Técnica de muestreo de partículas a volumen constante

(Constant Volume Sample, CVS): Este sistema utiliza el flujo total de muestras que son proporcionadas por un medio a estudiar. Este método es muy útil para determinar la emisión total por distancia recorrida de un automotor, en unidades como g/km. Si se desea usar un mini-túnel de dilución con este método se tiene que controlar el flujo de entrada de los gases de escape para proporcionar una mezcla y dilución adecuada. También esta técnica mantiene las cantidades de agua en forma de vapor y no las pierde durante el proceso de muestreo.

2.4. Sistemas de mediciones

Existen muchos dispositivos con varias características que miden las emisiones de partículas, por ejemplo, de la marca “Rosemount Analytical, Inc.” existen modelos como: Model 958 y Model 955, medidores de concentración de NO_x, Model 402 medidor de concentración de HC, Model 868 NDIR medidor de concentración de CO₂, Model 880A NDIR medidor de concentración de CO, TEOM serie 1105 medidor de concentración de material particulado. Cada dispositivo posee un funcionamiento característico: unos utilizan el principio de fotoionización, otros utilizan mallas para detener una cierta cantidad de partículas en un flujo y tiempos determinados, otros la luz ultravioleta para determinar que luz expide la partícula y determinar de esta manera su concentración. Para este estudio se analizó las características y funcionalidad del sistema PAS2000 ya que es un sistema para el cual se dispone de información y es el que actualmente utiliza Corpaire en Ecuador.

2.4.1. Sistema PAS 2000

El sistema de medición “Photoelectric Aerosol Sensor” (PAS) es un dispositivo que mide en tiempo real las cantidades de partículas para una determinada muestra. Se puede usar para varios tipos de emisiones como: combustibles, refinerías, quemadores, emisiones de diésel y gasolina entre otros.

2.4.1.1. Principio de funcionamiento del dispositivo

Utiliza el método de fotoionización de la partícula de PAH. Este método consiste en irradiar a una partícula con luz ultravioleta de energía determinada, en este caso $h\nu$, y dependiendo del caso la partícula emitirá un fotoelectrón. Esto permitirá que la partícula cambie su carga positivamente.



Gráfico 2.4. Diagrama del electrón emitido por la partícula.⁵

Por sí mismas, las partículas no son capaces de producir fotoemisiones. Sin embargo, las partículas tienen una capa de PAH que están condensados o absorbidos en la superficie. Esta superficie de salto de las moléculas PAH puede ser fácilmente fotoionizada.

El fotoelectrón emitido desde una partícula puede ser atrapado por una molécula libre de gas o cualquier otra partícula cargada. La probabilidad de captura (por ejemplo, la posibilidad de que un fotoelectrón encuentre una partícula cargada o una molécula neutra de gas) es alta para partículas grandes. Por esto se sabe que la fotoemisión es especialmente efectiva para partículas pequeñas en una región ultrafina. Este grupo de partículas ultrafinas, sin embargo, es de particular interés, pues son capaces de alcanzar el tracto respiratorio inferior e implican un máximo riesgo para la salud.

La carga creada para la fotoemisión puede ser modelada así:

⁵ EcoChem Analytics, User's Guide Realtime PAH Monitor PAS 2000, 2da Edición, Octubre 1998.

$$\frac{dN}{dt} = f\{\Phi_{UV}, \pi(rp)^2, Y(h\nu), F, N\}$$

Ec 2.1.

Donde $N+$ es el número de partículas cargadas positivamente, t es el tiempo, Φ_{UV} es la intensidad de luz, $\pi(rp)^2$ es la sección transversal iluminada de las partículas, $Y(h\nu)$ representa el campo fotoeléctrico (depende de la energía de la luz), F es la fracción de la superficie de la partícula capaz de fotoemitir y N es el número de partículas.

Con Φ_{UV} , $\pi(rp)^2$, $Y(h\nu)$, N siendo constantes, la tasa de carga es medida directa de la concentración de PAH. Esta carga es medida por el sensor de PAH. Para una medida reproducible lo más importante es que la lámpara de energía, la geometría de la partícula y composición se mantengan esencialmente constantes. En estudios científicos previos, ha sido observado que la mayoría de fuentes de combustión tienen una única "característica PAH"; por ejemplo durante un rango específico de operación, una fuente de combustión producirá consistentemente iguales PAH junto con una específica distribución de tamaño de las partículas.

2.4.1.2. Proceso de medición

El principio de medición se ilustra en la siguiente figura:

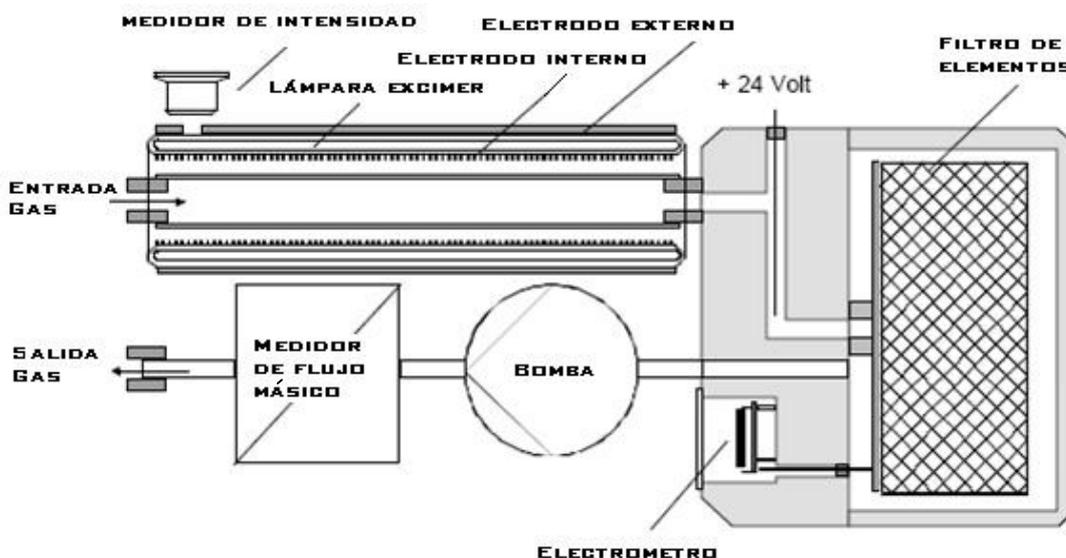


Gráfico 2.5. Sistema PAS2000.⁶

⁶ EcoChem Analytics, User's Guide Realtime PAH Monitor PAS 2000, 2da Edición, Octubre 1998.

El flujo de partículas cargadas pasa por un tubo de cuarzo. Alrededor del tubo de cuarzo está montada una lámpara excimer. La lámpara excimer es un tubo de cuarzo de doble pared hueco. El espacio hueco (2 mm de espesor) entre las paredes concéntricas es llenado con criptón (aproximadamente 300 mbar) y bajas concentraciones de cloro. Los electrodos son externos a la lámpara. El electrodo exterior de la lámpara es un tubo metálico reflector. El electrodo interior es transparente a la luz. La lámpara es operada a altas frecuencias y altos voltajes. La radiación de la lámpara ocurre a 222 nm con una desviación media aproximada de 2%. Un detector de silicio mide la intensidad de la radiación. Esta señal es usada para controlar la intensidad de la lámpara. El control de intensidad es alcanzado ajustando la frecuencia de la lámpara

Las partículas cargadas luego fluyen a través de un tubo corto antes de entrar al filtro. En el tubo un bajo voltaje es aplicado para remover las partículas cargadas negativamente. Subsecuentemente las partículas cargadas son recolectadas en un filtro que es montado en una jaula de Faraday. La corriente eléctrica asociada con la corriente del ión es desviada hacia un electrómetro y medida.

Los sensores PAH construidos en el pasado usaban una lámpara de mercurio que operaba en base continua. La lámpara de mercurio necesita un tiempo de calentamiento inicial y tenía que estar siempre encendida. La ventaja de las lámparas excimer es que estas pueden ser encendidas y apagadas sin necesitar tiempo de calentamiento inicial. El uso de las lámparas excimer se recomienda en un modo de pulsos. La señal de medida es obtenida por medio de la integración de la corriente de pulsos producida durante el tiempo de exposición. La ventaja de esta operación en modo de pulsaciones es que cualquier interferencia de fondo de la señal por partículas precargadas es evitada. Adicionalmente cualquier fluctuación de la línea base es suprimida.

La bomba antes del filtro es operada a un flujo constante con el objetivo de eliminar la dependencia de la corriente medida con la tasa de flujo total. Esto es alcanzado con el uso de un medidor de flujo másico. La tasa de flujo óptima es de 2 litros/min. En la tabla 2.1 se dan las especificaciones del PAS 2000.

Tabla 2.1. Características del dispositivo PAS2000.

Visualización	Panel LCD con 128 por 64 pixeles de resolución
Fuente de Poder	115 V AC / 60 Hz & 220 V AC / 50 Hz, Consumo máximo 35 VA
Rango	0 a 100 pA (seleccionables)
Sensibilidad	~ 0.3 - 1 g/m ³ PAH por pA (calibración por defecto)
Entrada mínima	3 ng/ m ³
Tiempo de Respuesta	< 10 s (ajustable)
Salida Análoga	(0 a 10 V) y (0 a 20 mA ó 4 a 20mA)
Salida Digital	RS – 232
Muestra del gas	Bomba con flujo controlado a 2 l/min
Temperatura Operación	40 a 104°F (5 a 40°C)
Dimensiones	(Alto x Ancho x Profundidad) 4.5 in x 9.3 in x 12.5 in (133 mm x 236 mm x 317 mm)
Peso	20 lb. (9 kg)
Almacenamiento	14000 Datos (Cada dato comparte: fecha, tiempo, valor)
Sistema de muestreo	El PAS 2000 puede modificarse para obtener pruebas calentadas en rangos de 40 a 570°F (5 a 300°C). Usando un controlador de flujo acoplado con un orificio crítico, se pueden obtener tasas de dilución de 0.05, 0.1 y 0.2.
Software	PC-Compatible software gráfico recolecta datos del PAS 2000. El software muestra en tiempo real tablas de datos y porcentajes. Los datos pueden ser almacenados en varios formatos. ASCII puede generarse para ser útil en hojas de cálculo (ej. Microsoft Excel).

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL MINI-TÚNEL

En este capítulo se determinan los parámetros y variables que se utilizarán para el diseño del mini-túnel. Para esto se toma en cuenta las alternativas de diseño, los parámetros técnicos y el dimensionamiento de varios componentes. También, mediante tablas, se encuentran varios valores que son fundamentales para el cálculo de variables como caudal y velocidad, que después serán consideradas para el análisis en la simulación. El dispositivo que se usará para la caracterización del PM es el PAS2000, cuyas características fueron especificadas en el capítulo 2. Las muestras serán tomadas en forma estacionaria y el muestreo será con un flujo parcial mediante un mini-túnel ya que los sistemas para muestreo de flujo total son muy costosos. Las tasas de dilución que acepta el sistema son: 1 (no dilución), 10, 20, 50 y 100. El dispositivo puede o no venir equipado con un sistema de dilución. En caso de que el sistema no esté equipado con un dilusor, el mini-túnel cumple las características de dilución y por lo tanto puede sustituirlo. En la tabla 3.1 se puede apreciar algunas características por las que se escogió este dispositivo.

3.1. Alternativas de diseño

Entre las alternativas de diseño se encuentran tres, que son las más comunes:

- Túnel de flujo parcial (mini-túnel)
- Eyector
- Dispositivo de disco rotatorio

Las alternativas tienen varios parámetros para su construcción, y se estimó por los componentes utilizados que las variables más comunes para determinar el costo son: tamaño, tipo de materiales, mano de obra, y componentes secundarios. Si bien es posible conseguir los componentes, sin embargo la dificultad para construirlos es significativa, Por el gran tamaño del túnel de flujo completo, el motor en el caso del disco rotatorio; los costos para la construcción pueden ser muy elevados y variar inclusive según la marca del fabricante. Además, comúnmente estos dispositivos incluyen los medidores de material

particulado, y se adquiere el conjunto completo, es decir, todo el laboratorio de análisis.

Con las características de cada una de las alternativas descritas en el capítulo anterior y tomando en cuenta los aspectos analizados en este capítulo, se llega a la conclusión que la alternativa que mejor cumple con los requerimientos de limpieza, costos, mantenibilidad y construcción es la del mini-túnel de dilución, por lo que este será el sistema de dilución a desarrollar. El mini-túnel tiene en comparación con las otras dos alternativas dos características fundamentales a favor: su construcción no es complicada y los materiales para su construcción son relativamente fáciles de encontrar.

Para el túnel de dilución de flujo total se estima el precio en base a que se necesita un tubo de un diámetro de 25 cm como mínimo y un largo de 3 a 4 metros y el material es acero inoxidable, además se necesita un tubo interno perforado de la misma longitud y un diámetro menor a 25 cm con especificaciones (numero de perforaciones y diámetro) para este tipo de túnel, esto más la manufactura, transporte, tiempo de construcción, costos indirectos como cortes, administración, imprevistos, etc., el costo estimado es de \$ 5.000 dólares. (Ver Anexo A)

En el caso del disco rotatorio la construcción es complicada y requiere de otros componentes que permitan que el disco pueda girar a determinadas revoluciones dependiendo el caso para realizar la dilución del gas, y el control de esta unidad resulta muy costoso porque requiere de un software especial. Un estudio realizado en la Politécnica Nacional estimó un precio solo para el dispositivo de alrededor de \$ 5000⁷, sin considerar el software de control y el sistema de adquisición de datos, No se puede justificar exactamente el costo por no tener un detalle de la construcción más que una simple información verbal.

En la tabla 3.1. se tienen varios parámetros que se utilizan para el diseño del túnel de dilución. Estas especificaciones sirvieron para escoger el diseño más

⁷ Ing. Carlos Mantilla, Director CICEV EPN 2007.

apropiado del dispositivo. En la tabla 3.1 comparativa se puede determinar con facilidad varias de las componentes más comunes que comparten los dispositivos.

3.2. Parámetros técnicos del mini-túnel

El túnel tiene varias características, tanto generales como particulares para cada diseño específico del mismo. Primero se toma en cuenta que es un mini-túnel de flujo parcial y no un túnel de flujo total. Con esto se pueden plantear muchas configuraciones, dependiendo de los requerimientos. En el siguiente listado se muestran varios de los criterios que se consideran para el diseño del túnel y que en este caso forman parte de las variables de la construcción del diseño:

- Volumen en el mini-túnel (l)
- Flujo total del aire (kg/min)
- Caudal del gas de escape
- Tiempo de prueba (min)
- Masa total del escape (kg)
- Masa total diluida (kg)
- Tasa de dilución (1-10-20-50-100)
- Temperatura de entrada de los gases al túnel (°C)
- Temperatura de salida de los gases del túnel (°C)

Como el dispositivo de caracterización del PM a utilizar es el PAS2000, se debe indicar que, según sus especificaciones, como son el caudal, la temperatura y la tasa de dilución, el mini-túnel cumple con los requerimientos característicos del sistema, estos fueron proporcionados en el capítulo anterior. El túnel debe mantener un flujo parcial fijo para el cual se utiliza una bomba que mantenga el caudal de aire para la dilución. Esto permite mantener una tasa de dilución constante y por el dispositivo de medición (PAS2000) que se usará, se tiene un flujo máximo de 2 l/min.

Tabla 3.1. Comparación de los sistemas de dilución.

	Túnel de flujo total	Mini-túnel	Eyector	Disco rotatorio
Volumen en el sistema (l)	Depende del diseño, Largo = 10 veces el diámetro, diámetro mínimo = 25 cm	Depende del diseño, Largo = 10 veces el diámetro, diámetro mínimo = 2.5 cm		
Caudal del gas de escape	completa	parcial	parcial	parcial
Tiempo de prueba (min)	1 hora	1 hora	1 hora	1 hora
Masa total del escape (kg)	completa	parcial	parcial	parcial
Masa total diluida (kg)	completa	parcial	parcial	parcial
Tasa de dilución (depende dispositivo)	fija - variable	fija - variable	fija	variable
Temperatura de entrada de los gases al túnel (°C)	Variable	Variable	Variable	Variable
Temperatura de salida de los gases del túnel (°C)	Depende tasa dil.	Depende tasa dil.	Depende tasa dil.	Depende tasa dil.
Portabilidad	No	Si	Si	Si
Limpieza Periódica	Si	Si	Si	Si
Costo en Dólares (\$) **	Alto (Más de 4500)	Medio (1000-2500)	Bajo (500-1000)	Alto (3000-5000)
Mantenimiento Permanente	No	No	No	Si

* El costo se estima por los componentes utilizados para la construcción del dispositivo. Las variables para determinar el costo son: tamaño, materiales, mano de obra, componentes.

** Ver Anexo A de precios unitarios.

Los gases del escape de los vehículos son trasladados al túnel mediante mangueras metálicas flexibles muy usadas en secadoras caseras. Posteriormente, antes de que el gas ingrese al túnel, se tiene un medidor de flujo que, además de regular la entrada de los gases a una determinada cantidad, mantiene la tasa de dilución que se haya escogido.

El túnel, además de diluir, previene las reacciones químicas que pueden darse en el proceso de poscombustión ya que varias partículas debido a la geografía de la ciudad no se combustionan en su totalidad en el proceso del ciclo diésel y estas a su vez pueden condensarse con el cambio brusco de temperatura.

Para el túnel de dilución se propone un diseño que comprende una coraza o tubo exterior (por donde circula el aire limpio) y un tubo interior (lugar por donde circula el gas de escape). Los tubos se encuentran en una disposición similar a la de un intercambiador de calor de coraza y tubos (ver Gráfico 3.1). El tubo interno debe permitir el paso del aire limpio al tubo interior de modo que este se mezcle y diluya efectivamente los gases del escape. El aire limpio entra de una manera perpendicular, luego se dirige hacia el tubo por el que pasa el aire de escape. Para que exista un flujo constante de aire limpio se usa una bomba y debido a que el aire ingresa en una dirección, este impide que la coraza se llene de aire de escape y la ruta del escape es solo por una vía, por la cual salen los gases diluidos. Según un diseño de Mott Corp. que se presenta en el gráfico 3.2 la configuración óptima está representada en el esquema presentado a continuación.

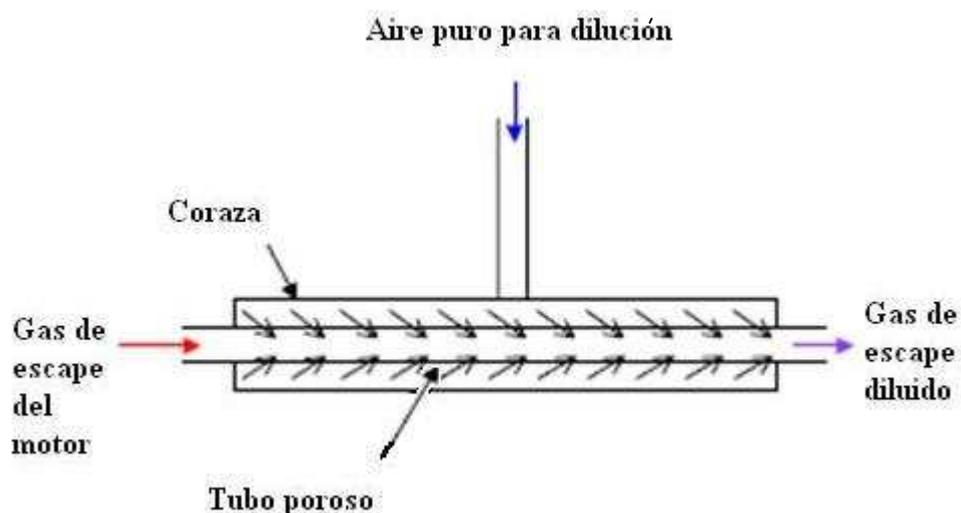


Gráfico 3.1. Diagrama de un mini-túnel de dilución.

La dilución es instantánea al mezclarse los dos gases. La tasa de dilución se mantiene constante mientras los volúmenes de aire tanto limpio como de escape que ingresan son constantes. Si alguno de estos parámetros cambia, la tasa de dilución también cambiará, por lo que es imprescindible regular las entradas de los dos gases al flujo deseado para mantener la tasa de dilución determinada (ver tasas de dilución en la tabla 3.5.). Para evitar un cambio brusco de temperatura, el aire limpio que ingresa al sistema tiene que ser previamente calentado para evitar cualquier tipo de anomalía en la adquisición de datos debido al fenómeno de condensación.

Para que el tubo interior permita el paso del aire, este tubo puede ser construido con un material poroso que se fabrica bajo especificaciones de porosidad, siguiendo un complicado proceso y que es extremadamente costoso para nuestro medio. Mott Corp.⁸ desarrolla este tipo de túneles con medios porosos como se puede ver en el gráfico 3.2. Existe también una alta probabilidad de que el túnel que se construya con este tubo poroso no alcance las especificaciones necesarias ya que se requiere de un estudio especializado y una tecnología de fundición en materiales para determinar un compuesto con características de porosidad similar a la original desarrollada por Mott Corp. Según su representante el costo del mini-túnel esta detallado en el anexo A. Por lo tanto, este tipo de tubo no se puede encontrar ni construir en el país y hay que importarlo, pero el hacerlo elevaría demasiado los costos del sistema y la propuesta no sería viable. Por esta razón se propone un diseño en el que al tubo interior del mini-túnel se le practican 100 agujeros de 5 mm de diámetro que representan para este caso la permeabilidad del material poroso y permite que el flujo se mantenga constante y a su vez que permitirán el paso de aire limpio y permitirán la dilución.

⁸ <http://www.mottcorp.com>

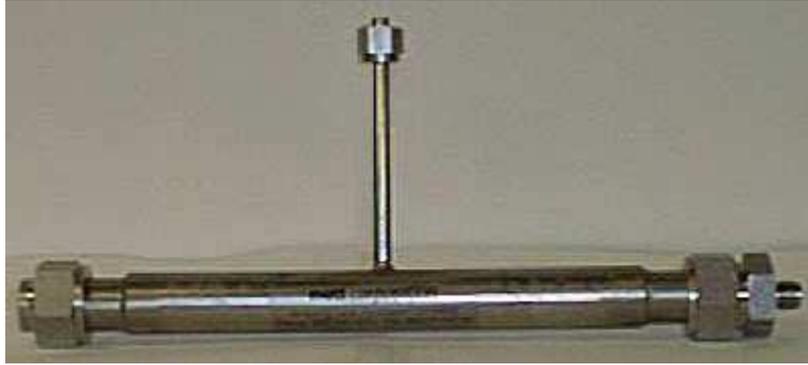


Gráfico 3.2. Mini - túnel de dilución (modelo 7610) de Mott Corp.

3.2.1. Configuración del sistema de dilución

Entre los dispositivos adicionales que se necesitan para el buen funcionamiento del túnel están los que se describen a continuación:

Filtro de aire: El dispositivo necesita de un filtro de aire para retener el material particulado, en lo posible un filtro que logre contener partículas PM2.5 y PM10 que se encuentra en el aire del ambiente y es necesario para que los resultados no se alteren. Este filtro solo se utilizará para el aire limpio y se necesitará de uno, en el caso de ser reutilizable. Si es desechable, será necesario cambiarlo periódicamente según las especificaciones del fabricante. Se recomienda que sea uno de tipo HEPA (High Efficiency Particulate-free Air), es decir, un filtro de alta eficiencia para liberar el aire de partículas según su significado en inglés, este tipo de filtros retiene hasta en un 99.97% las partículas PM2.5, este filtro se encuentra en varios tipos y tamaños dependiendo el fabricante, por lo general se ven como en el gráfico 3.3 y todos cumplen la misma función.



Gráfico 3.3. Filtro de aire (HEPA).⁹

Termómetros: los termómetros ayudan a controlar la temperatura de los gases. Se necesitan tres para controlar la entrada de los gases de dilución y la de los de salida del sistema para su posterior ingreso al medidor PAS2000. Los termómetros deben tener un rango de medición de entre 50°C y 100°C aproximadamente. Estos termómetros servirán para monitorear las temperaturas pero no son indispensables para el funcionamiento del sistema, entre los varios tipos de termómetros, se pueden usar desde los de vidrio o los digitales, también hay unos con resistencia variable, que también pueden ser adaptados al sistema.

Válvulas: las válvulas de estrangulación permiten aumentar o disminuir el caudal del aire proveniente del escape y del aire del ambiente. De igual manera, se puede colocar una válvula adicional que permita regular el paso de aire a la salida del mini-túnel como la válvula que se muestra en el gráfico 3.3. Se necesitan válvulas, con las siguientes características: un tipo de fluido gaseoso, temperatura de operación entre 0°C y 100°C, una presión de 0 a 5 bares y una regulación del paso de caudal muy baja, del orden de 0.01 l/min (10 cm³/min), este factor es muy importante porque este es el que nos permite regular la tasa de dilución, en especial para los gases, por ejemplo se puede usar en marca Honsberg el modelo GRV150AK0040G para el ingreso del aire del gas de escape y se puede utilizar GRV150AK0229G para la regulación del aire puro.

⁹ http://www.pyramidairsolutions.com/store/images/TRACS__EZ_Air_HEPA.jpg.



Gráfico 3.4. Válvula de estrangulación de aire Honsberg GRV150AK0005G.

Tabla 3.2. Características de la válvula de estrangulación de aire,

especificación	Modelo	
	GRV150AK0040G	GRV150AK0229G
Rango de regulación	10 - 400 Ncm ³ /min air	30 - 2290 Ncm ³ /min air
T. media op.	max. 180°C	max. 180°C
conexión	1/8"	1/8"
material	Acero inoxidable	Acero inoxidable

Reguladores de caudal: los reguladores o medidores de caudal son como se observa en el gráfico 3.4 y serán usados para monitorear la entrada de aire y de gases de escape, las características de este regulador se encuentran en la tabla 3.2. Este dispositivo es fundamental ya que con él se graduará la tasa de dilución del gas que se vaya a introducir al dispositivo de medición. Los rangos de caudal necesarios para controlar son de 0.01 a 2.00 l/minuto con una apreciación de 2 decimales. Una de las mejores opciones es el siguiente dispositivo de marca Kobold, presentado a continuación con sus características.



Gráfico 3.5. Fotomedidor de caudal.

Tabla 3.3. Características del medidor de caudal, a colocarse después del estrangulador de aire.

Rango de medición	0-0.01...0-200 NI/min. Aire. ¹⁰
Conexión	1/4..1/2 FNPT
Conexión tipo Clamp	1/8...1/2, 6, 8,12 mm
Material	Acero inoxidable
Max. Presión	35 bar
Max. Temperatura	180°C
Precisión	± 1 % v. ME
2 x salida	4-20 y 0-5,0-10,1-5 VDC
Indicación digital	

3.2.2. Esquema de construcción

En el gráfico 3.5 se muestra el esquema de construcción que se va disponer y también se enumera la siguiente notación: T1=Termómetro 1, T2=Termómetro 2, T3=Termómetro 3, RQ1=Regulador de caudal 1, RQ2=Regulador de caudal 2, RQ3=Regulador de caudal 3 (opcional). Además, se muestra la disposición del filtro de aire, el mini-túnel dilución y el PAS2000.

¹⁰ NI/min, donde "N" es caudal nominal y quiere el volumen que ocupa ese gas a 0°C y a la presión de una atmósfera.

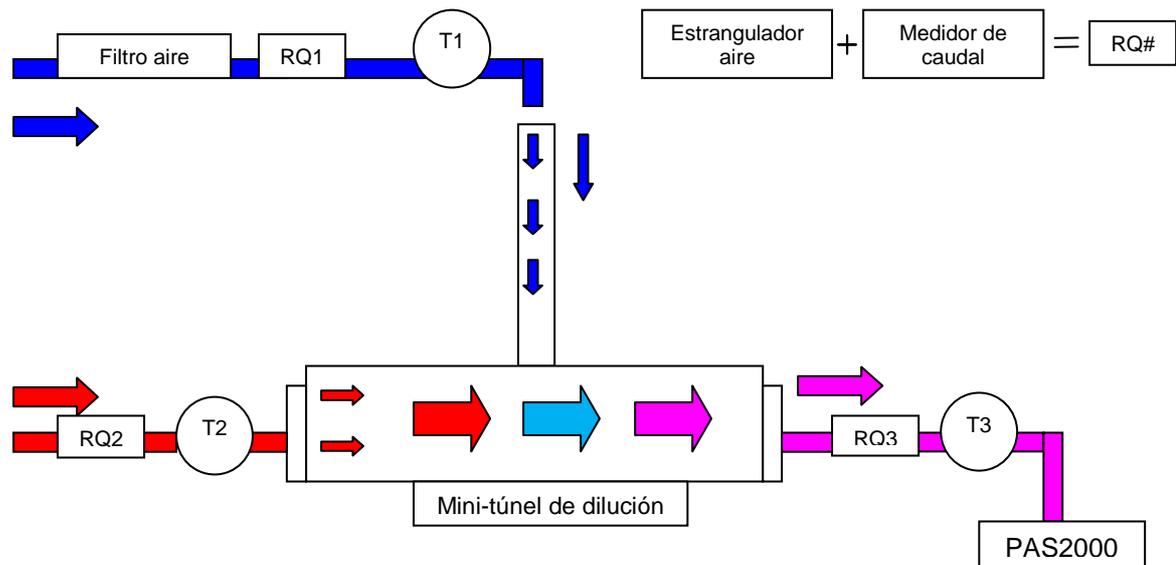


Gráfico 3.6. Esquema del mini-túnel a construir.

3.3. Diseño del mini-túnel

Para diseñar el mini-túnel se debe tomar en cuenta los parámetros descritos en el acápite 3.2. A continuación se analiza cada componente y se muestra los cálculos realizados para dimensionar el mini-túnel.

3.3.1. Datos importantes

A continuación se realizarán diferentes cálculos necesarios para la determinación de los parámetros del mini-túnel, tasa de dilución, número de Reynolds, después con los resultados obtenidos y mediante una hoja de cálculo presentada en la tabla 3.3, se pueden determinar las temperaturas y velocidades de las diferentes configuraciones de los parámetros que se utilizará para las simulaciones del túnel.

T_{dil} = Tasa de dilución

$$T_{dil} = \frac{Q_{tot}}{Q_{Exh}} = \frac{Q_{tot}}{Q_{Exh} - Q_{dil}}$$

Ec. 3.1

Donde Q_{tot} es el caudal total que atraviesa el túnel, Q_{exh} representa el caudal de gas de escape y Q_{dil} es el caudal de aire limpio. Vale la pena notar que la tasa de dilución puede tomar diferentes valores. En la tabla 3.5 se puede observar las

cantidades de aire y gas de escape que se deben alimentar al túnel para alcanzar una tasa de dilución específica. Por ejemplo, si se toma una tasa de dilución de 1 y un caudal total de 2 l/min, el caudal de aire limpio será 0 y el caudal del gas de escape será 2 l/min. Para una tasa de dilución más elevada como 50 y si se mantiene el flujo total de aire en 2 l/min por cada 50 partes de aire puro se tendrá 1 parte de gas: 1.96 l/min de aire y 0.04 l/min de gas de escape.

La tasa de dilución es afectada directamente por el flujo de entrada de los 2 gases. Por lo tanto, si cualquiera de estos parámetros cambia, la tasa también cambiará. En las siguientes tablas 3.5 se muestran diferentes tasas de dilución. Para este estudio se usaron las convencionales del sistema PAS2000 que son: 1 (no dilución), 10, 20, 50 y 100.

Los cálculos que se presentan a continuación permiten visualizar en la tabla 3.3 las pérdidas generadas por fricción a lo largo del mini-túnel. La información mostrada en esta tabla se ilustra en la tabla 3.4, que indica como está estructurada cada una de las partes de la tabla 3.5.

N_{re} = número de Reynolds (10200)

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde V es la velocidad, L representa la longitud y ν la viscosidad dinámica

medida en m^2/s (para el aire a $20^\circ C$ y 1 atm, se toma el valor de $1.51 \times 10^{-5} m^2/s$).

El número de Reynolds está relacionado con la superficie en la que se encuentra; por lo tanto, para el estudio del mini-túnel se dispone de 2 secciones, uno el Reynolds de diámetro, que toma el diámetro del tubo y otro el Reynolds de longitud que toma en cuenta la longitud del tubo. Esto quiere decir que al diámetro corresponde un número de Reynolds que difiere del que corresponde a la longitud del tubo. Este número viene asociado con el tubo que se use de acuerdo a las diferentes pérdidas por fricción, por lo que es importante tomarlo en cuenta.

Las siguientes ecuaciones se usan para encontrar las pérdidas por fricción que se pueden generar a lo largo del tubo interno y demás factores que son importantes porque influyen en las caídas de presión, también en los cambios de velocidad final que se generan en el túnel.

$$\frac{v^2}{2g} + y + \frac{P}{\rho g} = \text{constante} \quad \text{Ec 3.3}$$

$$\frac{p_{\text{in}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{in}}^2}{2g} + z_{\text{in}} = \frac{p_{\text{sal}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{sal}}^2}{2g} + z_{\text{sal}} + h_f \quad \text{Ec 3.4}$$

Donde V es la velocidad del fluido en la sección considerada, g es la aceleración de la gravedad, y representa la altura geométrica en la dirección de la gravedad, P es presión a lo largo de la línea de corriente, ρ es la densidad del fluido en nuestro caso aire, h_f representa las pérdidas.

En la tabla 3.5 se calculan varios factores a diferentes tasas de dilución y con diferentes flujos. Se calcula la velocidad, el caudal y el número de Reynolds tomando en cuenta el diámetro y posteriormente la longitud. Cabe observar que durante los cálculos se mantienen las medidas de cada tubo. Si se cambian estos datos de referencia, también cambian los valores de la tabla. Estos cálculos son la variación de las características que tiene el túnel en varios de sus parámetros finales cambiando las condiciones iniciales para diferentes tasas de dilución y cantidades de litros totales en el túnel, de esta manera se puede encontrar un valor representativo para las simulaciones posteriores.

3.3.2. Tubo coraza

El tubo que sirve de coraza es el componente que aísla el aire proveniente del exterior del gas que viaja por el tubo interior. Según estudios realizados en tubos de flujo total, el largo del tubo debe ser como mínimo 10 veces el diámetro. A manera de ejemplo ilustrativo, un túnel desarrollado por la marca Mott Corporation, correspondiente al modelo 7610, tiene las siguientes medidas, que se utilizan para el diseño preliminar del túnel.

D_{co} = diámetro externo = 2.5 in = 63.5 mm

d_{co} = diámetro interno = 2.25 in = ~57.15 mm

L_{co} = largo = 10 in = 25.4 cm

$A_{co} = 2\pi \left(\frac{d_{co}}{2} \right)^2$ Área transversal del tubo

$$A_{CO} = \pi * \left(\frac{\frac{57.15}{2}}{1000} \right)^2 = 2.5652 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

3.3.3. Tubo interno

El tubo interno es el componente por el cual el gas del escape ingresa al túnel. Nuevamente se toma como referencia el túnel desarrollado por Mott Corp. y se usan las siguientes dimensiones:

D_{in} = diámetro exterior = 51.15 mm

d_{in} = diámetro interno = 46.15 mm

l_{in} = largo = 10 in = 25.4 cm

A_{in} = Área transversal del tubo

$$A_{in} = \pi * \left(\frac{\frac{46.15}{2}}{1000} \right)^2 = 1.6728 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

3.3.4. Orificios en el tubo interno

Los orificios permiten el paso del aire que se utiliza para la dilución hacia el tubo interno que porta el gas de escape.

D_{or} = diámetro de los orificios = 5 mm

L_{or} = largo orificios = 6 mm

A_{or} = Área del orificio

$$A_{or} = \pi * \left(\frac{\frac{5}{2}}{1000} \right)^2 = 1.9635 \times 10^{-5} m^2$$

Posteriormente se utiliza una tasa representativa para la simulación, tabla 3.4. Nótese que se repite la parte superior de la tabla evitar cualquier malentendido en las continuaciones de las tablas por el hecho de que cada cálculo se realiza para una diferente cantidad de litros totales en el túnel y hace referencia a la parte superior de la tabla. En la tabla 3.5 se presentan los cálculos realizados para cada tasa de dilución.

Tabla 3.4. Ejemplo de estructura de tablas.

	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)
Diámetro interno (mm)	57.15	51.15
Diámetro exterior (mm)	63.50	57.15
Área interna (m ²)	2.565E-03	2.055E-03
Viscosidad dinámica (m ² /s)	1.51E-05	
Longitud del tubo (mm)	250.00	

Valores comunes para los tubos, tanto internos como externo

Caudal por el tubo exterior con una tasa de dilución de 50 y una cantidad en litros totales en el interior de 0.50 litros.

Tasa dilución	50.00
Cantidad de litros totales en el túnel (l/min)	0.50
Caudal Q (m ³ /s)	4.90E-04
Velocidad (m/s)	1.91E-01
Red	722.96
Re	3162.55

Velocidad por el tubo exterior con una tasa de dilución de 50 y una cantidad en litros totales en el interior de 0.50 litros.

Tabla 3.5. Velocidades, caudal que circula por cada tubo y número de Reynolds, tomando en cuenta la tasa de dilución y el caudal a ingresar al dispositivo de medición PAS2000. La longitud de los tubos es 250 mm.

	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)
Diámetro interno (mm)	57.15	51.15	57.15	51.15	57.15	51.15	57.15	51.15
Diámetro exterior (mm)	63.50	57.15	63.50	57.15	63.50	57.15	63.50	57.15
Área interna (m²)	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03
Viscosidad dinámica (m²/s)	1.51E-05							

Tasa dilución	1.00							
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50		1.00		1.50		2.00	
Caudal Q (m³/s)	0.00	5.00E-04	0.00	1.00E-03	0.00	1.50E-03	0.00	2.00E-03
Velocidad (m/s)	0.00	0.24	0.00	0.49	0.00	0.73	0.00	0.97
Red	0.00	824.25	0.00	1648.49	0.00	2472.74	0.00	3296.99
Re	0.00	4028.58	0.00	8057.16	0.00	12085.74	0.00	16114.32

Tasa dilución	5.00							
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50		1.00		1.50		2.00	
Caudal Q (m³/s)	4.00E-04	1.00E-04	8.00E-04	2.00E-04	1.20E-03	3.00E-04	1.60E-03	4.00E-04
Velocidad (m/s)	1.56E-01	4.87E-02	3.12E-01	9.73E-02	4.68E-01	1.46E-01	6.24E-01	1.95E-01
Red	590.17	164.85	1180.34	329.70	1770.51	494.55	2360.68	659.40
Re	2581.67	805.72	5163.34	1611.43	7745.01	2417.15	10326.68	3222.86

	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)
Diámetro interno (mm)	57.15	51.15	57.15	51.15	57.15	51.15	57.15	51.15
Diámetro exterior (mm)	63.50	57.15	63.50	57.15	63.50	57.15	63.50	57.15
Área interna (m²)	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03
Viscosidad dinámica (m²/s)	1.51E-05							

Tasa dilución	10.00							
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50		1.00		1.50		2.00	
Caudal Q (m³/s)	4.50E-04	5.00E-05	9.00E-04	1.00E-04	1.35E-03	1.50E-04	1.80E-03	2.00E-04
Velocidad (m/s)	1.75E-01	2.43E-02	3.51E-01	4.87E-02	5.26E-01	7.30E-02	7.02E-01	9.73E-02
Red	663.94	82.42	1327.88	164.85	1991.82	247.27	2655.76	329.70
Re	2904.38	402.86	5808.76	805.72	8713.14	1208.57	11617.51	1611.43

Tasa dilución	20.00							
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50		1.00		1.50		2.00	
Caudal Q (m³/s)	4.75E-04	2.50E-05	9.50E-04	5.00E-05	1.43E-03	7.50E-05	1.90E-03	1.00E-04
Velocidad (m/s)	1.85E-01	1.22E-02	3.70E-01	2.43E-02	5.56E-01	3.65E-02	7.41E-01	4.87E-02
Red	700.83	41.21	1401.65	82.42	2102.48	123.64	2803.31	164.85
Re	3065.73	201.43	6131.47	402.86	9197.20	604.29	12262.93	805.72

	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)	Tubo exterior (aire)	Tubo interno (gas escape)
Diámetro interno (mm)	57.15	51.15	57.15	51.15	57.15	51.15	57.15	51.15
Diámetro exterior (mm)	63.50	57.15	63.50	57.15	63.50	57.15	63.50	57.15
Área interna (m ²)	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03	2.565E-03	2.055E-03
Viscosidad dinámica (m ² /s)	1.51E-05							

Tasa dilución	50.00							
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50		1.00		1.50		2.00	
Caudal Q (m ³ /s)	4.90E-04	1.00E-05	9.80E-04	2.00E-05	1.47E-03	3.00E-05	1.96E-03	4.00E-05
Velocidad (m/s)	1.91E-01	4.87E-03	3.82E-01	9.73E-03	5.73E-01	1.46E-02	7.64E-01	1.95E-02
Red	722.96	16.48	1445.92	32.97	2168.87	49.45	2891.83	65.94
Re	3162.55	80.57	6325.09	161.14	9487.64	241.71	12650.18	322.29

Tasa dilución	100.00							
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50		1.00		1.50		2.00	
Caudal Q (m ³ /s)	4.95E-04	5.00E-06	9.90E-04	1.00E-05	1.49E-03	1.50E-05	1.98E-03	2.00E-05
Velocidad (m/s)	1.93E-01	2.43E-03	3.86E-01	4.87E-03	5.79E-01	7.30E-03	7.72E-01	9.73E-03
Red	730.34	8.24	1460.67	16.48	2191.01	24.73	2921.34	32.97
Re	3194.82	40.29	6389.63	80.57	9584.45	120.86	12779.27	161.14

En la tabla 3.3 se observa cómo cambian los parámetros de velocidad, caudal y el número de Reynolds en los dos casos, tanto el número a lo largo de la longitud del tubo (Re) y el número de Reynolds del diámetro (Red). Esto se debe al cambio de la tasa de dilución. Si se toma como ejemplo la tasa 1 para todas las cantidades totales de aire en el tubo, las cantidades de aire puro se mantienen en 0 ya que no se usa aire para diluir. A medida que se disminuye la cantidad de gas de escape y se aumenta la de aire puro, los valores de caudal de aire paulatinamente disminuyen para los gases de escape y aumentan para el aire puro. Este cambio es proporcional al aumento del caudal que se requiere ingresar al sistema de medición PAS2000. Si se toma como ejemplo una tasa de dilución muy alta, el caudal de los gases de escape serán mínimos y los de aire mucho mayores para mantener esta tasa. Como las velocidades están relacionadas con los caudales, estas cambian a medida que se aumenta o disminuye el caudal. En la siguiente tabla se muestran los cálculos de pérdidas por fricción, expresadas en un delta de presión obtenido por la fórmula de Bernoulli.

Tabla 3.6. Pérdidas por fricción en el tubo interno en función de la tasa de dilución y el caudal a ingresar al PAS2000. La densidad del aire se considera igual a 1.30 kg/m^3 .

Tasa de dilución	1.00			
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50	1.00	1.50	2.00
Delta Presión	-3.93E-03	-1.57E-02	-3.53E-02	-6.28E-02

Tasa de dilución	5.00			
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50	1.00	1.50	2.00
Delta Presión	1.46E-03	5.82E-03	1.31E-02	2.33E-02

Tasa de dilución	10.00			
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50	1.00	1.50	2.00
Delta Presión	2.00E-03	8.01E-03	1.80E-02	3.20E-02

Tasa de dilución	20.00			
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50	1.00	1.50	2.00
Delta Presión	2.26E-03	9.06E-03	2.04E-02	3.62E-02

Tasa de dilución	50.00			
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50	1.00	1.50	2.00
Delta Presión	2.42E-03	9.67E-03	2.18E-02	3.87E-02

Tasa de dilución	100.00			
Caudal total en el túnel (l/min)	0.50	1.00	1.50	2.00
Delta de presión	2.47E-03	9.88E-03	2.22E-02	3.95E-02

Como se observa en la tabla 3.5, las pérdidas generadas por fricción están en el orden de 10^{-3} , y aun cuando no son despreciables, en el cálculo y en la práctica no influyen para el fin de dilución. Como al final del mini-túnel se obtiene la misma cantidad de aire y gas que ingresaron para la dilución, el factor de pérdida influye exclusivamente en la velocidad, pero como los valores son de igual manera pequeños, este factor de pérdida no determina cambio alguno en el mini-túnel.

3.4. Materiales

La operación del túnel demanda la utilización de un material que facilite el mantenimiento del sistema, que se pueda limpiar fácilmente y cuyo desgaste sea el menor posible. Dadas estas condiciones, se ha escogido al acero inoxidable como principal material a emplear.

En el túnel se dispondrá de platinas, hechas igualmente de acero inoxidable, que deben ser soldadas a los extremos del tubo de mayor diámetro. En el medio de estas platinas debe perforarse un agujero del tamaño exacto del tubo de menor diámetro para que este a su vez pueda ingresar sin mayor dificultad. Se debe tomar en cuenta que es necesario que no exista ningún tipo de pérdidas de aire ya que esto ocasionaría errores durante la adquisición de datos por parte del dispositivo PAS2000.

Capítulo 4

SIMULACIONES

En este capítulo se presenta las simulaciones realizadas con el túnel cuya configuración y dimensiones se especificaron en el capítulo anterior. También se determinan las variables que se requieren para lograr una simulación lo más representativa posible de la realidad y en función de los resultados que se quiere obtener. Con cada simulación se busca, mediante el cambio de varios parámetros, obtener gráficas representativas de velocidad y temperatura principalmente. Posteriormente se determinarán los parámetros más representativos que influirán en la modificación del modelo original.

También se presentan los gráficos de líneas de flujo característicos para cada variación. Con estas modificaciones se puede determinar un modelo que cumpla con las expectativas de dilución de mejor manera que el modelo original.

4.1. Introducción

En todo proyecto de diseño los recursos son muy limitados, ya sea que se trate de tiempo, dinero, espacio, etc. Por la dificultad del manejo de estas variables, lo más conveniente es recurrir a herramientas que permitan encontrar una vía factible de solución del problema a mano y que permita reducir los limitantes existentes. El tiempo de diseño en particular se puede disminuir con la utilización de programas de computación, con los cuales se puede construir modelos computacionales que se asemejan a la realidad. Hoy en día con las simulaciones se pueden conseguir resultados equivalentes a los que se obtendrían al realizar pruebas con modelos físicos; además, las simulaciones ayudan a encontrar respuestas que pueden ser complejas de determinar en los modelos reales, como es el caso de las líneas de flujo en modelos de mecánica de fluidos. A continuación se detallan las pruebas realizadas para establecer la mejor configuración posible del túnel de dilución que se pretende diseñar en este trabajo.

4.2. Programas de simulación

Los programas que se usaron para la simulación del túnel son AutoCAD 2002 y SolidWorks 2007 con el paquete CosmosFloworks 2007. Estos paquetes permiten realizar análisis que no son posibles en otro software de similares características. Este es el caso de simulaciones para fluidos tomando en cuenta los parámetros y la cantidad de variables para representar de la mejor manera las condiciones de operación.

Con AutoCAD se construyeron los modelos tridimensionales del equipo, para lo cual fue necesario especificar las dimensiones del mini-túnel y sus componentes (Capítulo 3). Con SolidWorks se realizó las simulaciones del flujo de los fluidos. En este caso, ambos flujos se representaron en el programa como aire, el cual determinó las líneas de flujo a lo largo del túnel. También se simuló los cambios de temperatura. Para estas simulaciones se utilizó los sólidos generados virtualmente en AutoCAD, los cuales se exportaron a SolidWorks y posteriormente se unieron por piezas en un ensamblaje compatible con Solidworks. Una vez realizado el ensamblaje, se procedió a determinar las condiciones para la simulación. Para esto se considera una cara de un sólido para determinar la entrada de aire, una cara de un sólido para determinar la entrada del gas de escape y una última cara para determinar la salida de la mezcla diluida que se dirige al dispositivo de medición PAS2000.

4.3. Resultados y Análisis

Para la obtención de los resultados, es necesario un análisis y cálculos para los cuales se determinó los parámetros a usar. La tabla 4.1 describe los factores que influirán en el cálculo como:

- Tasa de dilución
- Temperatura
- Velocidad
- Cantidad de fluido, tanto de gas de escape como de aire puro

Cada parámetro que se determinó para el funcionamiento correcto del mini-túnel influye de manera importante en la simulación. Es necesario igualar estos parámetros de acuerdo a los requerimientos dados para obtener resultados más precisos. En este caso, los parámetros obtenidos en las tablas de cálculos mostradas en el capítulo 3, se usaron para realizar las simulaciones correspondientes.

Tabla 4.1. Ejemplo de los parámetros a usar en las simulaciones.

Tasa de dilución	1	
Temperatura de gas escape	353 K	
Caudal total en el túnel (l/min)	2	
Fluido	aire	gas de escape
Caudal Q (m ³ /s)	0	2.00E-03
Velocidad (m/s)	0	0.97
Red	0	3296.99
Re	0	16114.32

Para simular el comportamiento del mini-túnel de dilución se escogieron los siguientes parámetros:

- Caudal de aire puro y caudal del gas de escape
- Temperatura del aire puro y temperatura del gas de escape
- Tasa de dilución
- Cantidad total de mezcla diluida que ingresa al sistema de medición.

Los orificios que se usaron en las simulaciones tienen 5 mm de diámetro. Nótese que al utilizar software de elementos finitos para simular el túnel de dilución, es necesario crear una malla en todo el sólido. Por ello, si los orificios son muy pequeños (por ejemplo, de 1 mm de diámetro) el mallado se puede dificultar y podría ser necesario utilizar una estación de trabajo, una computadora multiprocesador o un equipo similar para realizar los cálculos. En este caso, el diámetro de 5 mm es apropiado no solo desde el punto de vista constructivo sino desde el punto de vista de la simulación.

Los resultados de las simulaciones realizadas que se obtienen de la mezcla que se realiza en el túnel serán la visualización de varios factores resultantes

mediante una escala de colores que cambiarán gradualmente en un rango determinado y que se encuentra especificado en el lado superior izquierdo del gráfico. La distribución de temperaturas en el túnel está determinada por el mismo patrón de colores (los resultados se muestran en grados Kelvin). La velocidad generada de los fluidos en el mini-túnel también estará representada por colores en diferentes rangos y escala. Las líneas de flujo son dibujadas por el programa, el mismo que determina automáticamente los lugares por los que puede pasar con más probabilidad cada fluido. A continuación se presenta las tablas con los parámetros correspondientes que se usan para cada una de las simulaciones.

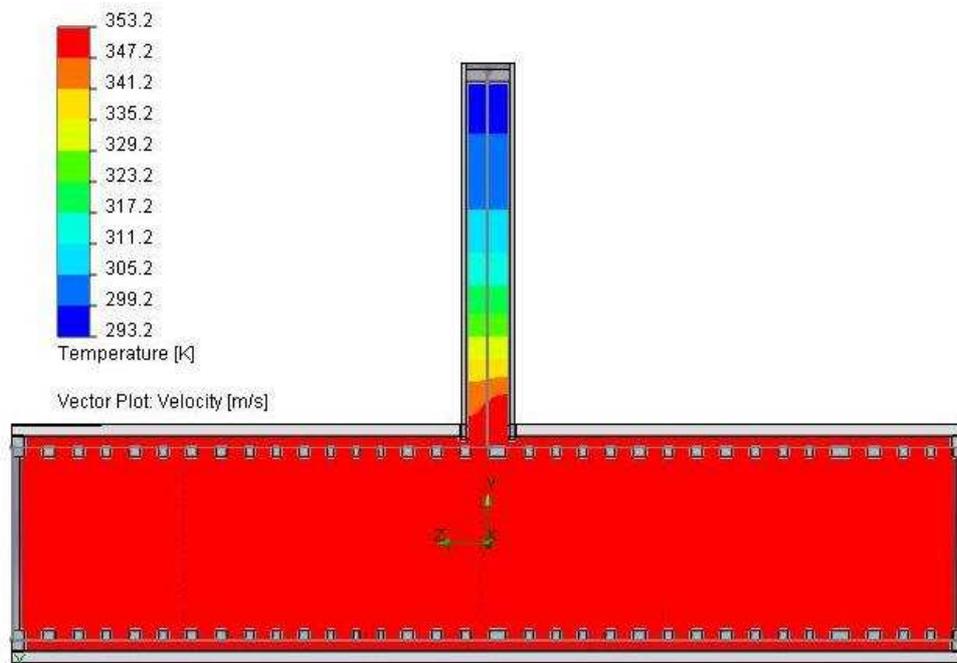
Al variar la tasa de dilución, en las tablas 4.3 a 4.8, se estudian los efectos tanto en la distribución de temperatura como en la velocidad de los gases a diluir en el mini-túnel. Los resultados obtenidos se muestran en los gráficos 4.1 a 4.12 que corresponden a cada una de las seis diferentes tasas de dilución que se usaron para la simulación de temperatura y velocidad respectiva. En todos los casos se consideró que el caudal del fluido a ingresar al dispositivo de medición es 2 l/min y que la temperatura de los gases de escape al ingreso al túnel es de 353 K (80°C). Se dispuso de 128 agujeros repartidos a lo largo del tubo en 4 ejes perpendiculares entre sí, la función de esta porosidad es realizar una mezcla uniforme a lo largo del mini túnel, es decir, se reparte el aire por todo el cilindro de coraza de esta manera garantizamos su funcionamiento. En cuanto a su cantidad, se escogió 130 aproximadamente por su diámetro, si este diámetro disminuía, la cantidad de agujeros tenía que ser mayor, pero por razones de simulación el diámetro de los agujeros no podía ser menor a 5 mm, por lo que este fue el diámetro que se escogió y se repartió a lo largo del mini-túnel.

Tabla 4.2. Listado de tablas y gráficos de las simulaciones

Numero de simulación	Tasa de dilución	Número de tabla	Número de gráfico
1	1	4.3.	4.1. y 4.2
2	5	4.4.	4.3. y 4.4
3	10	4.5.	4.5. y 4.6.
4	20	4.6.	4.7. y 4.8.
5	50	4.7.	4.9. y 4.10.
6	100	4.8.	4.11. y 4.12.

Tabla 4.3. Parámetros a usar en la simulación 1. Tasa de dilución = 1.

Tasa de dilución	1	
Temperatura de gas escape	353 K	
Caudal total en el túnel (l/min)	2	
Fluido	aire	gas de escape
Caudal Q (m ³ /s)	0	2.00E-03
Velocidad (m/s)	0	0.97
Red	0	3296.99
Re	0	16114.32

**Gráfico 4.1.** Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 1 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

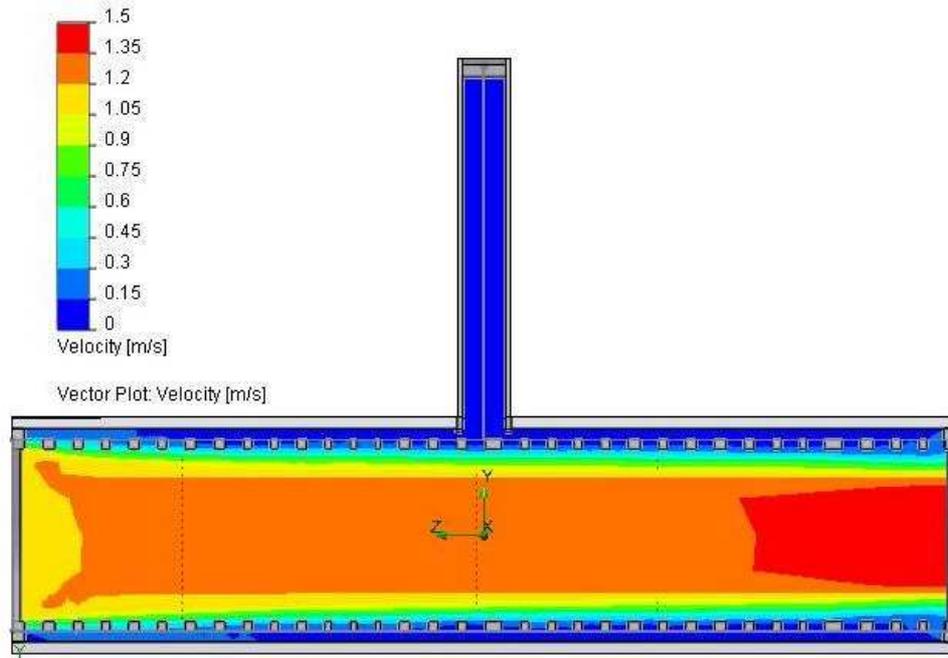


Gráfico 4.2. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 1 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

En los gráficos 4.1 y 4.2 se presentan las distribuciones de temperatura y de velocidad. Como la tasa de dilución es 1 los cambios para temperatura son prácticamente nulos porque no se hace uso del aire para diluir, por lo tanto a lo largo del túnel permanecen invariables la mayoría de las temperaturas y por esta razón se presenta el gráfico de color rojo. Para la velocidad se puede apreciar una pequeña variación en las velocidades del contorno del túnel ya que por rozamiento tienen que disminuir y se lo puede observar por el color azul que presenta el gráfico 4.2 y a medida que se acerca al centro del túnel la velocidad se aprecia que aumenta.

Tabla 4.4. Parámetros a usar en la simulación 2. Tasa de dilución = 5.

Tasa de dilución	5	
Temperatura de gas escape	353 K	
Caudal total en el túnel (l/min)	2	
Fluido	aire	gas escape
Caudal Q (m ³ /s)	1.60E-03	4.00E-04
Velocidad (m/s)	6.24E-01	1.95E-01
Red	2360.68	659.40
Re	10326.68	3222.86

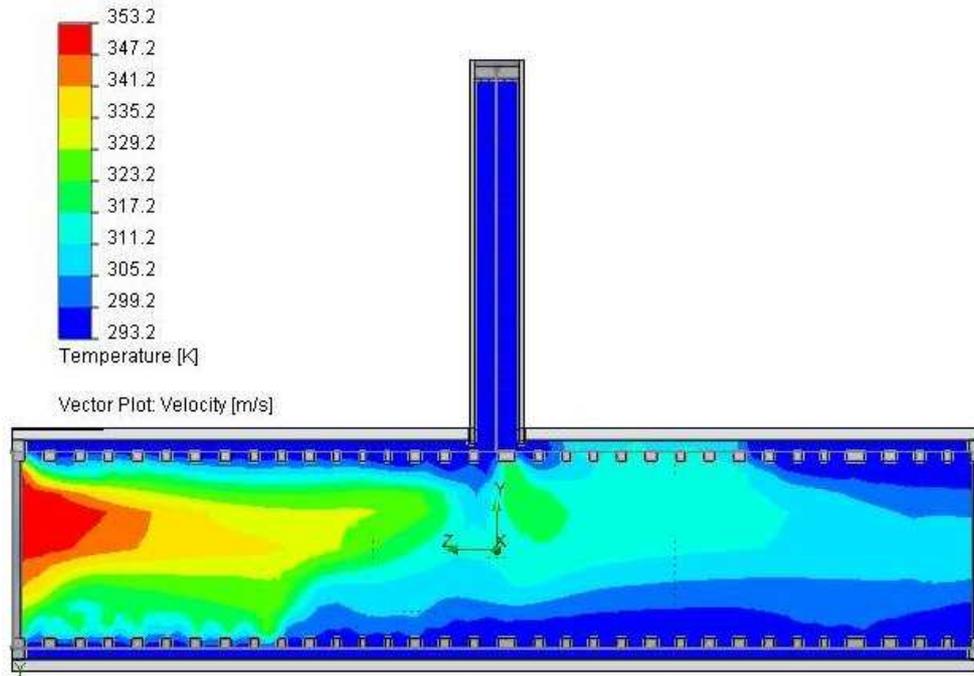


Gráfico 4.3. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 5 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

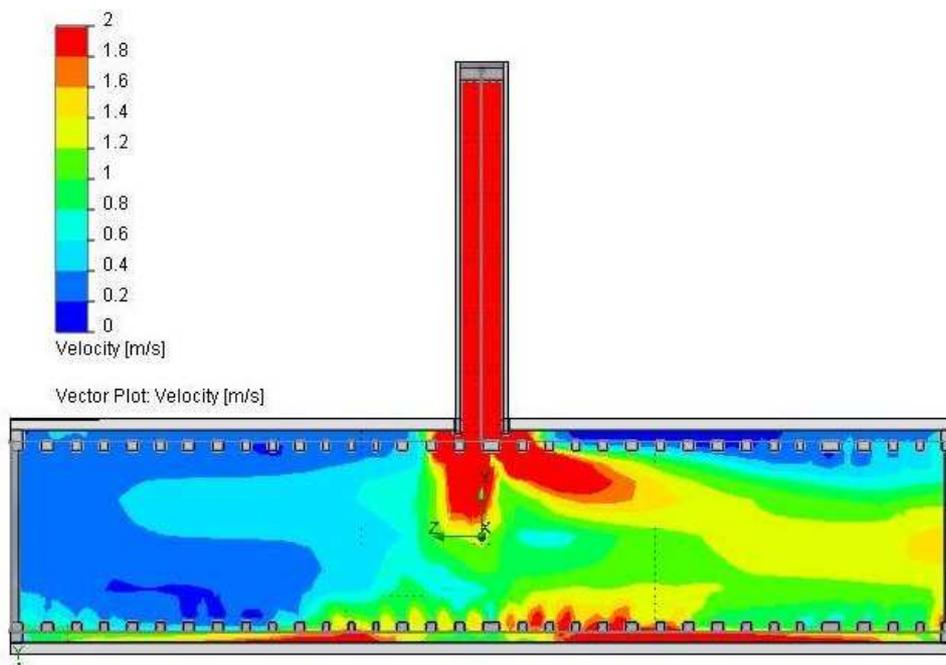


Gráfico 4.4. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 5 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

A diferencia de los gráficos 4.1 y 4.2 los gráficos 4.3 y 4.4 ya muestran cambios significativos que a simple vista permiten distinguir una variación en la gama de

colores del gráfico de distribución de temperaturas. Esto se debe a que la tasa de dilución aumentó, por lo tanto el aire que ingresa tiene otra temperatura y al mezclarse produce una caída de la misma. En la velocidad se aprecia de igual manera un cambio muy significativo en comparación con los otros gráficos.

Tabla 4.5. Parámetros a usar en la simulación 3. Tasa de dilución = 10.

Tasa de dilución	10	
Temperatura de gas escape	353K	
Caudal total en el túnel (l/min)	2	
Fluido	aire	gas escape
Caudal Q (m ³ /s)	1.80E-03	2.00E-04
Velocidad (m/s)	7.02E-01	9.73E-02
Red	2655.76	329.70
Re	11617.51	1611.43

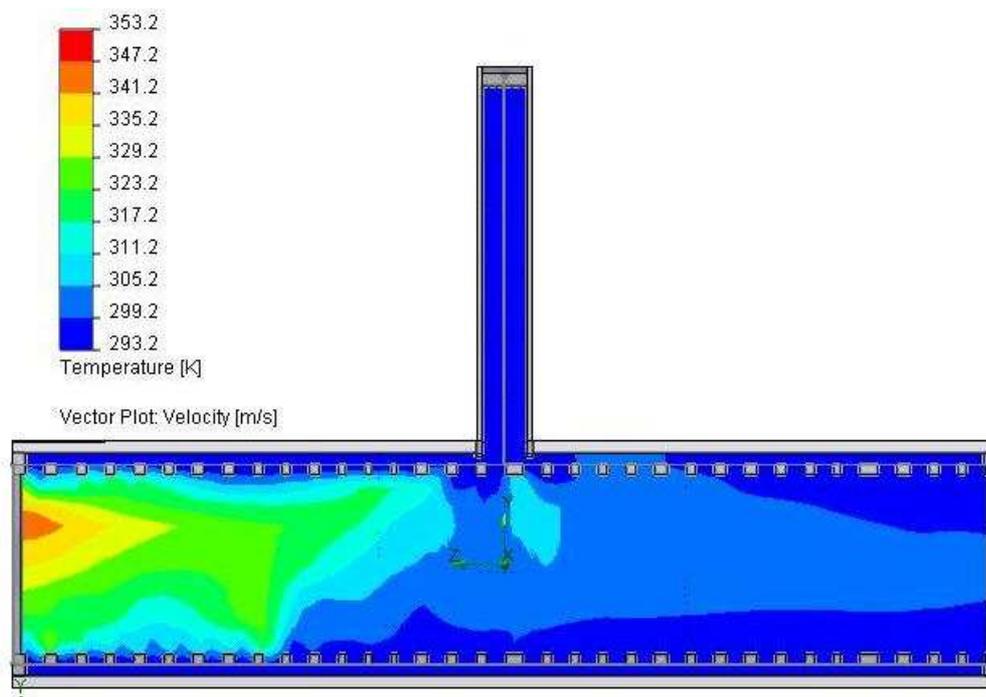


Gráfico 4.5. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 10 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

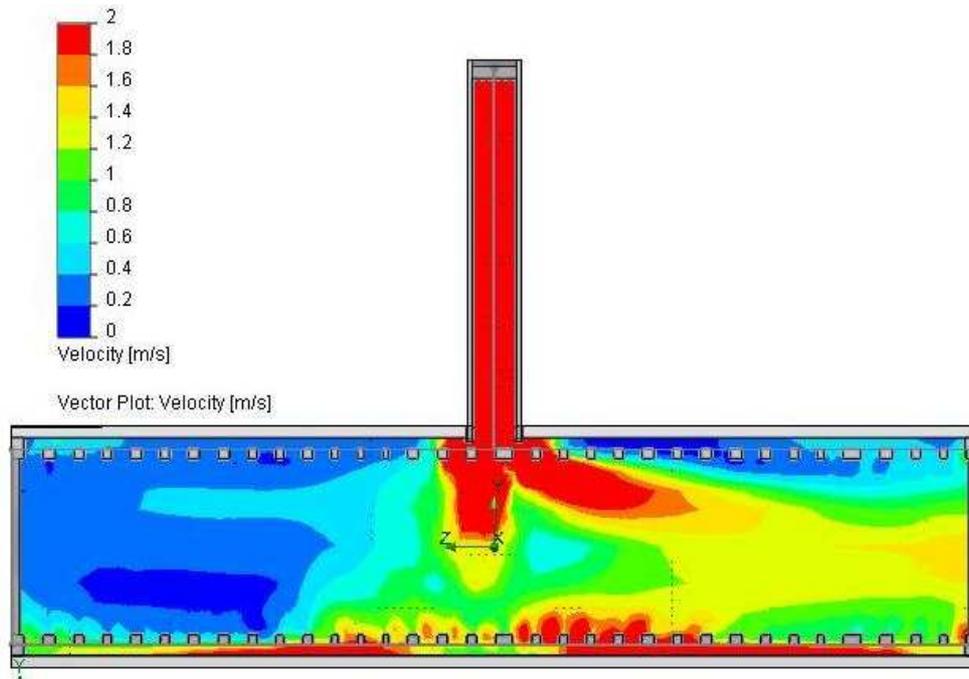


Gráfico 4.6. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 10 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

En los gráficos 4.5 y 4.6 se observa que los cambios son levemente significativos pero igual de importantes en comparación a los gráficos 4.3 y 4.4. El área de simulación se mantiene pero cambia los resultados en pocos milímetros, esto sucede porque la tasa de dilución no es tan alta como para realizar un cambio que se pueda diferenciar a simple vista pero es suficiente para notar la diferencia con el gráfico de temperatura principalmente.

Tabla 4.6. Parámetros a usar en la simulación 4. Tasa de dilución = 20.

Tasa de dilución	20	
Temperatura de gas escape	353K	
Caudal total en el túnel (l/min)	2	
Fluido	aire	gas escape
Caudal Q (m ³ /s)	1.90E-03	1.00E-04
Velocidad (m/s)	7.41E-01	4.87E-02
Red	2803.31	164.85
Re	12262.93	805.72

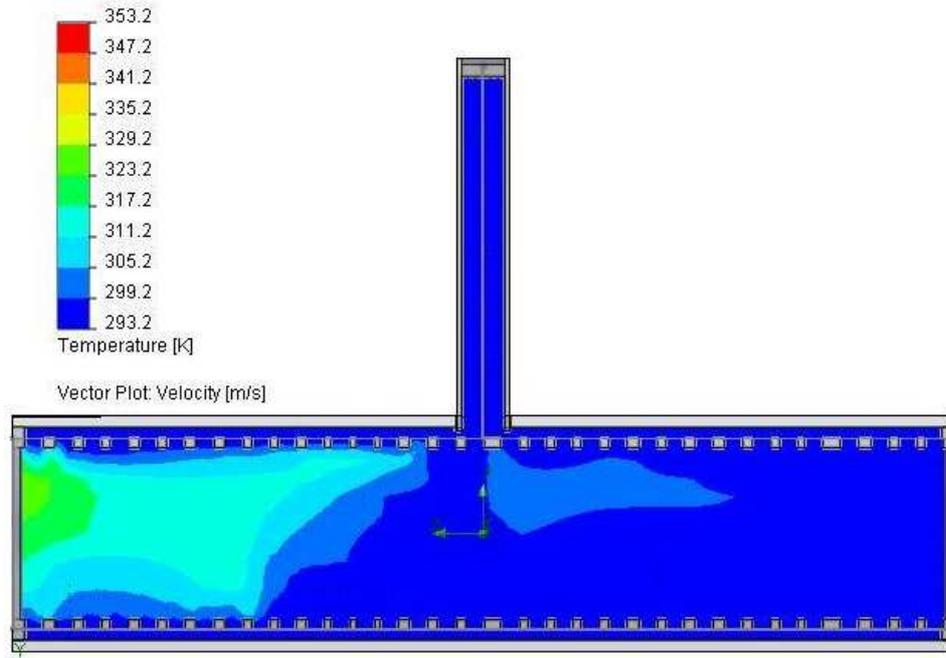


Gráfico 4.7. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 20 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

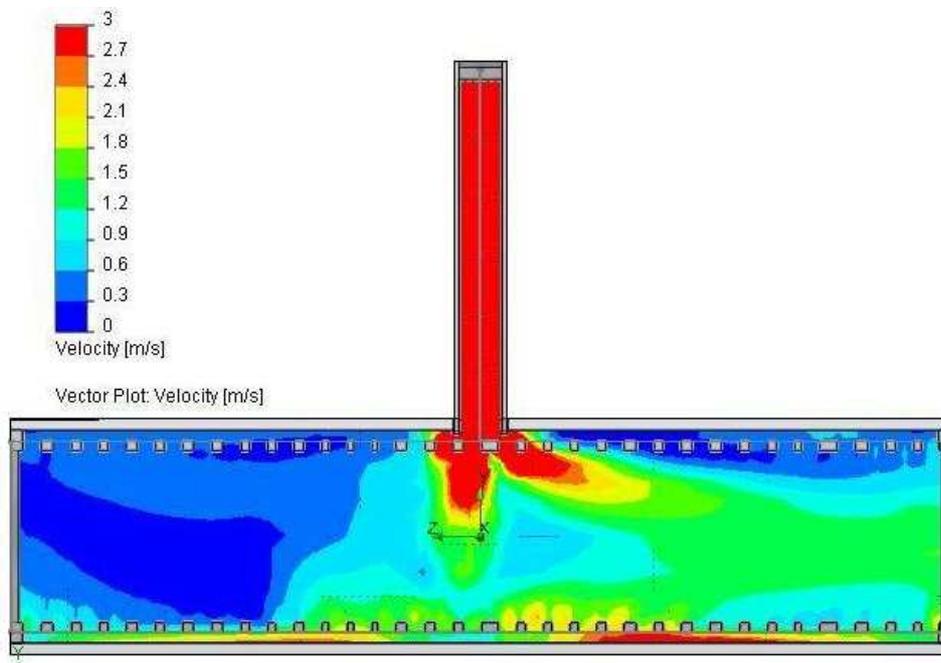


Gráfico 4.8. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 20 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

Nótese que en los gráficos 4.7. y 4.8. la velocidad en la zona cercana al ingreso de los gases de escape está bajando, este efecto sucede porque el aire puro se inyecta en una tasa de dilución mayor y, por lo tanto, el poco gas de escape tiende a sufrir una baja en su velocidad en comparación con los gráficos anteriores, pero en los gráficos que más se notan los cambios son los gráficos de temperatura.

Tabla 4.7. Parámetros a usar en la simulación 5. Tasa de dilución = 50.

Tasa de dilución	50	
Temperatura de gas escape	353K	
Caudal total en el túnel (l/min)	2	
Fluido	aire	gas escape
Caudal Q (m ³ /s)	1.96E-03	4.00E-05
Velocidad (m/s)	7.64E-01	1.95E-02
Red	2891.83	65.94
Re	12650.18	322.29

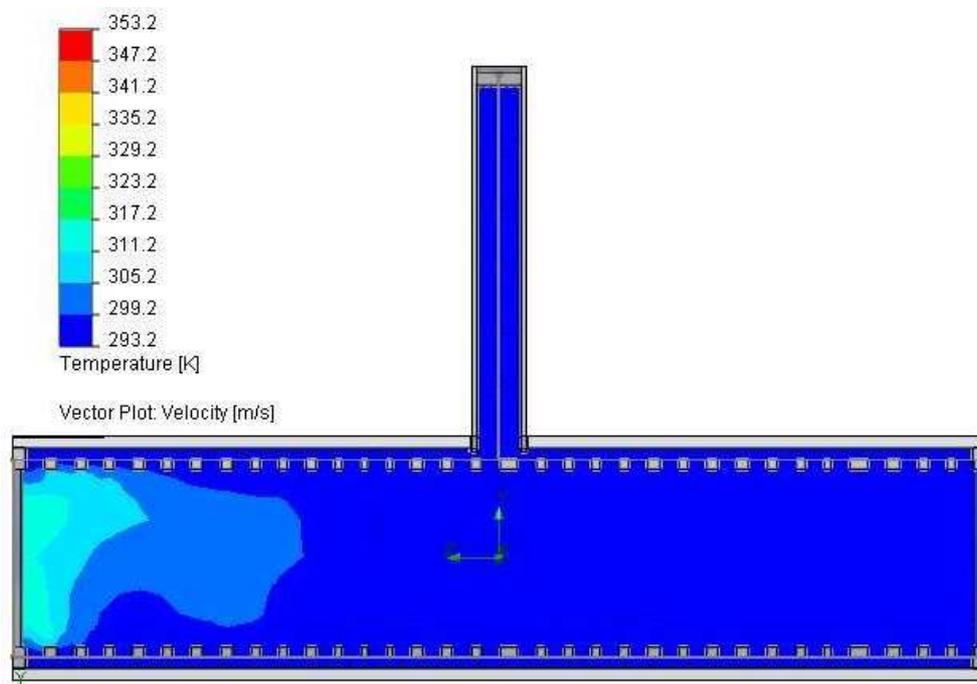


Gráfico 4.9. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 50 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

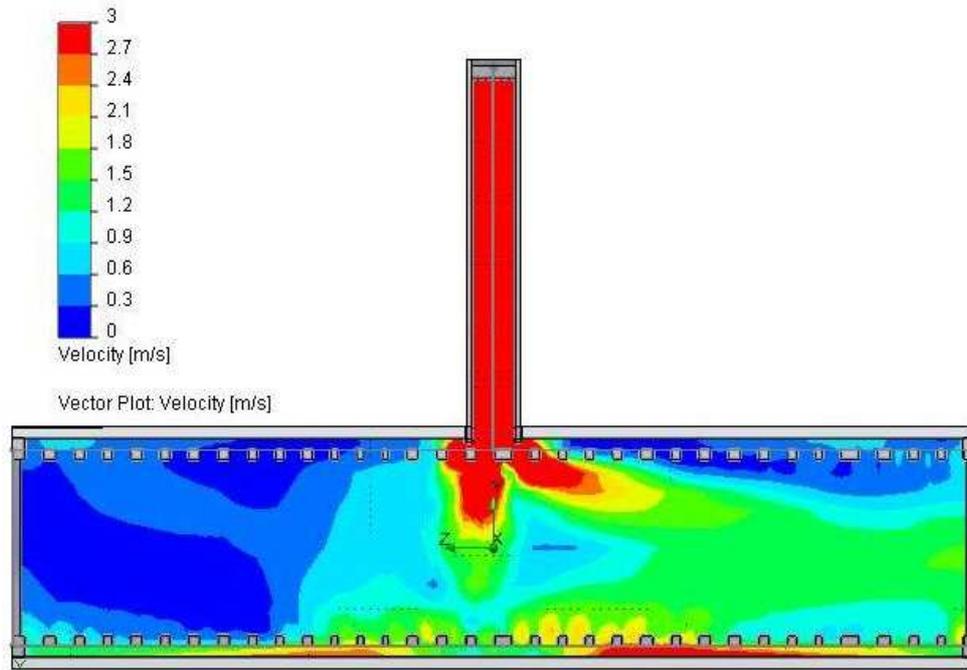


Gráfico 4.10. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 50 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

Para los gráficos 4.9 y 4.10 la velocidad que se presenta en las simulaciones es muy similar a las simulaciones anteriores, pero hay un cambio muy significativo con las temperaturas. En el gráfico 4.9, se observa claramente que poco a poco la superficie de temperaturas altas ha disminuido gradualmente. Claramente la tasa de dilución influye en la temperatura de los gases de escape.

Tabla 4.8. Parámetros a usar en la simulación 6. Tasa de dilución = 100.

Tasa de dilución	100	
Temperatura de gas escape	353K	
Caudal total en el túnel (l/min)	2	
Fluido	aire	gas escape
Caudal Q (m ³ /s)	1.98E-03	2.00E-05
Velocidad (m/s)	7.72E-01	9.73E-03
Red	2921.34	32.97
Re	12779.27	161.14

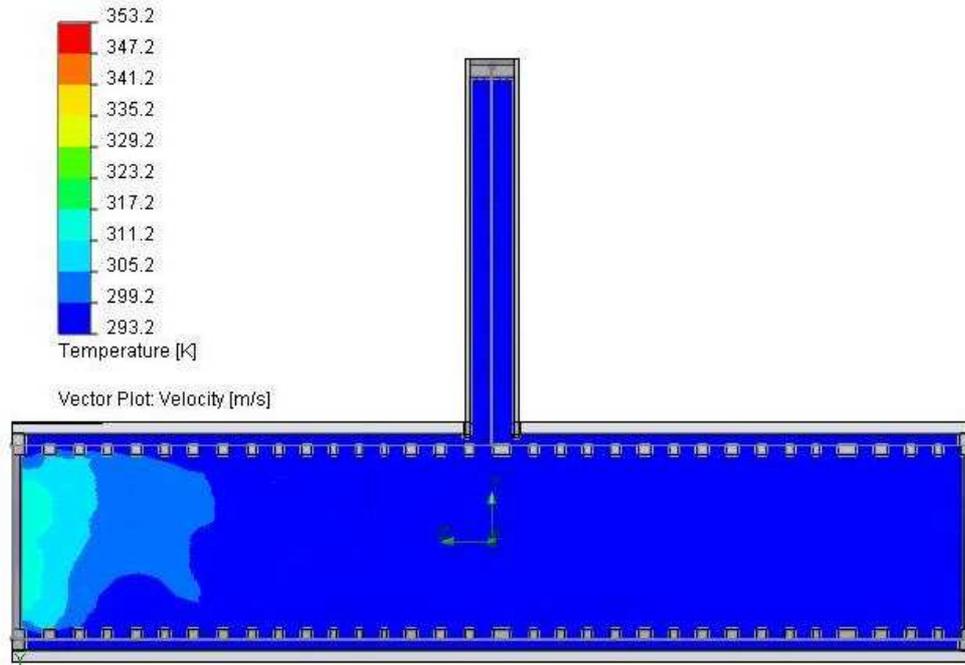


Gráfico 4.11. Distribución de temperaturas en el túnel para una tasa de dilución de 100 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

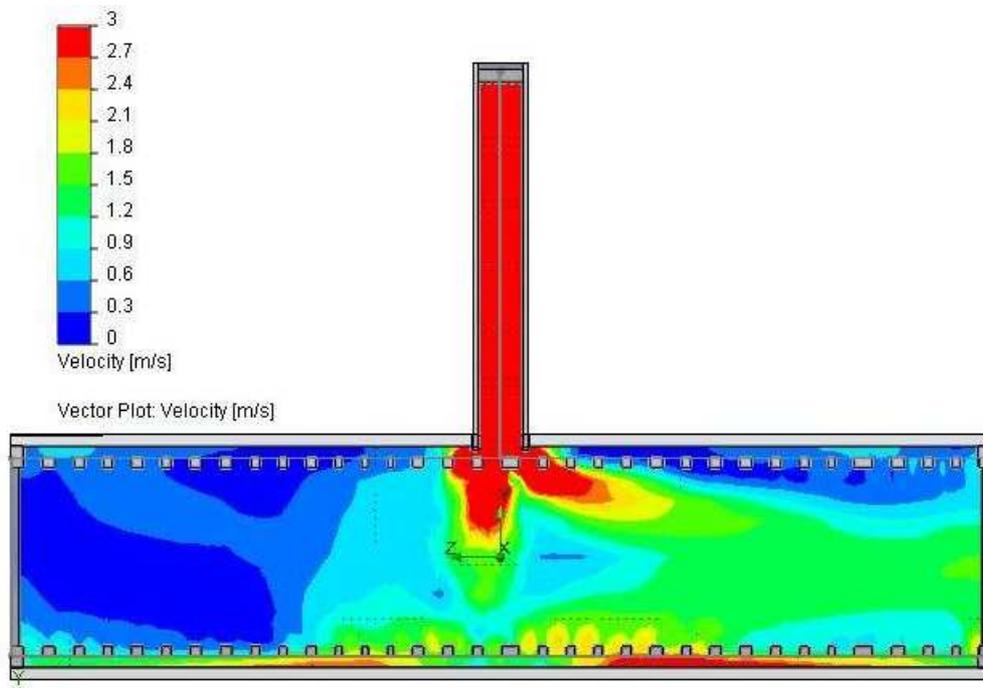


Gráfico 4.12. Distribución de velocidades en el túnel para una tasa de dilución de 100 y con los gases de escape ingresando a 353 K.

En los gráficos 4.1 a 4.12 se puede resumir lo siguiente:

Temperatura: La distribución de temperaturas en cada gráfico cambia significativamente dependiendo de la tasa de dilución que se usa. En el gráfico 4.1 no hay un cambio de temperatura drástico visible porque se mantiene la tasa de dilución en 1, pero a medida que se aumenta la tasa de dilución es más notorio este cambio. Si se compara el primer gráfico de temperatura, gráfico 4.1, con el de la última simulación, gráfico 4.11, se puede ver que la temperatura máxima llega a 317 K aproximadamente y esto se ve claramente por los cambios de colores, los cuales indican que no fluye el calor como en la primera simulación. Si se comparan los resultados mostrados en los gráficos 4.1 y el 4.3, se puede ver con claridad como la temperatura disminuye a lo largo del túnel. La zona roja representa el máximo de temperatura y la zona azul el mínimo de temperatura, y si se sigue comparando los gráficos impares que son los correspondientes a las temperaturas se encuentra que gradualmente en cada gráfico va disminuyendo el área de temperaturas altas. En simulaciones como la del gráfico 4.7. se observa que el cambio de temperatura no pasa de la parte media del túnel. Esto se debe a que la tasa de dilución en el túnel aumentó, por lo que más aire puro que se encuentra a temperatura ambiente ingresa al dispositivo y como la mezcla es en proporción, la cantidad de gas de escape no es lo suficiente como para mantener una temperatura elevada y esto genera esta caída. Una posible solución para que este fenómeno no se suceda es la colocación de un dispositivo para calentar el aire para que de esta manera el aire que ingresa al interior del túnel se mantenga a la misma o similar temperatura. En la siguiente tabla están los valores que se obtienen con el programa tomando los puntos de ingreso de cada gas,

En tasas de dilución más elevadas como 50 y 100 es más aparente la baja de temperatura y la zona de colores como el verde, amarillo y rojo no aparece en los gráficos porque la cantidad de gas de escape no es suficiente como para mantener una temperatura elevada a lo largo del túnel, pero si se amplifica esta zona derecha en la que no aparecen estos colores, se pueden observar pequeñas líneas de estos gases de escape.

Velocidad: en el gráfico 4.2 no existe cambio alguno para la velocidad, mientras no hay aire puro para la dilución, esta velocidad se mantiene y genera este gráfico representativo en el cual los gases al acercarse al tubo interno pierden velocidad y se representa por colores como el celeste y azul, mientras en el centro es un color naranja que indica la constancia de la velocidad a lo largo del mini-túnel.

Los cambios en la velocidad son notorios a partir de la segunda simulación, gráfico 4.4. Esta difiere mucho de la primera porque en esta ya existe una tasa de dilución y esto genera un cambio en la trayectoria de las líneas de flujo y por lo tanto un cambio en la velocidad.

Los gráficos pares, que son los que corresponden a las distribuciones de velocidad, son muy parecidos entre sí. Los cambios en los gráficos 4.4 y 4.6 son difíciles de distinguir pero los hay, para gráficos posteriores como el 4.8, 4.10 y 4.12 el cambio de colores es mínimo y a simple vista permanecen iguales. La velocidad del fluido es consecuencia directa de la posición del tubo de entrada del aire y el tamaño de los orificios, pero éstos orificios influyen en un grado mucho menor a tal punto que las líneas de flujo permanecen iguales.

4.4. Alternativas de diseño del mini-túnel

Del análisis anterior a las tablas y gráficos se consideró la simulación seis como la más conveniente y en base a los datos de esta simulación se cambió el diseño original del mini-túnel de Mott Corp. Como el modelo original tiene un comportamiento diferente al esperado, es necesario modificar el diseño preliminar introduciendo los siguientes cambios que mejorarán los resultados obtenidos, en especial la visualización de las líneas de flujo.

En la tabla 4.9 se proponen varios cambios y diferentes estructuras de mini-túneles de dilución. Cada modificación tiene su descripción característica que es en lo que cambiará con el diseño original.

Primero presentamos el diseño original y su comportamiento con los parámetros establecidos, mediante estas simulaciones comprobamos que el diseño original

no desempeña un buen trabajo de dilución acorde con las líneas de flujo establecidas por la simulación, por lo cual es necesario modificarlo.

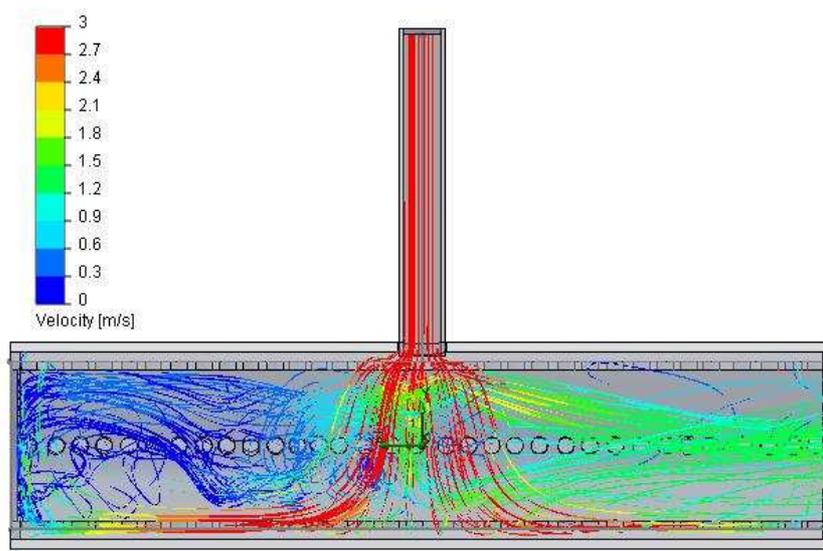
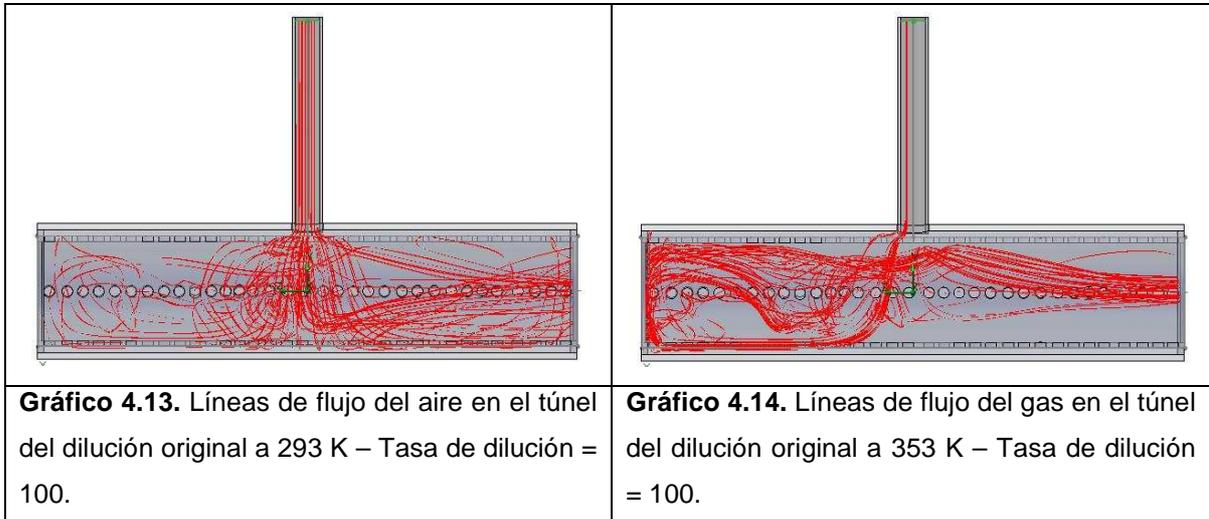


Gráfico 4.15. Líneas de flujo del aire y gas en el diseño original. Tasa de dilución = 100.

Como se observa en el gráfico 4.15, las líneas de flujo del diseño original no cumplen con una buena dilución, se observa claramente una dilución pero no necesariamente se puede asegurar que esta se dé o se esté dando en buenas proporciones. Cada fluido toma su trayectoria y llega al final. Este resultado no es alentador y de realizarse este dispositivo con estas características, podría variar los resultados y demostrar falsas mediciones que no concuerden con la realidad.

Tabla 4.9. Cambios y modificaciones que se realizaron en el modelo original.

Número de modificación	Tipo de cambios	Descripción de cambios
1	Entrada de los gases y entrada de aire puro	Se intercambiaron los puntos de ingreso de los gases manteniendo la geometría original
2	Posición de los orificios	Manteniendo la geometría original, los orificios que antes estaban a lo largo de todo el tubo interno se dispusieron solo en el primer cuarto de este tubo.
3	Posición del tubo de la entrada de aire	La posición del tubo de entrada del aire puro fue modificada. En primera instancia se encontraba en el centro del tubo coraza, ahora se movió al inicio del tubo coraza, en una posición más cercana a la entrada de gases.
4	Longitud del mini-túnel	La longitud original de todo el dispositivo se aumentó para mejorar la dilución a lo largo del mismo. Este diseño resultó muy favorable y en consecuencia cumplió las expectativas de dilución

Estos cambios mostraron un desempeño diferente para cada uno de los diseños propuestos. Con esto se escogió el diseño más apropiado y que cumpla con las condiciones de dilución, de alguna manera se pueden realizar varias modificaciones que satisfagan las necesidades, es decir, realizar varias modificaciones a la vez y usarlas en conjunto como así se realizó en el último modelo el que se presenta en el gráfico 4.30.

En cada modelo se realizó pruebas y se observó la distribución de las líneas de flujo, lo cual permitió visualizar si se cumple con el objetivo principal de diluir el gas de escape proveniente del motor con el aire puro. En el modelo del túnel se

fijó una transparencia de 75% para poder observar de mejor manera como se comporta el aire y el gas. Para cada modificación las líneas de flujo de cada fluido se muestran en gráficos separados. También se determinaron varias líneas de flujo cuando la simulación comprende los 2 elementos, gas de escape y aire.

4.4.1. Entrada de los gases y entrada de aire puro

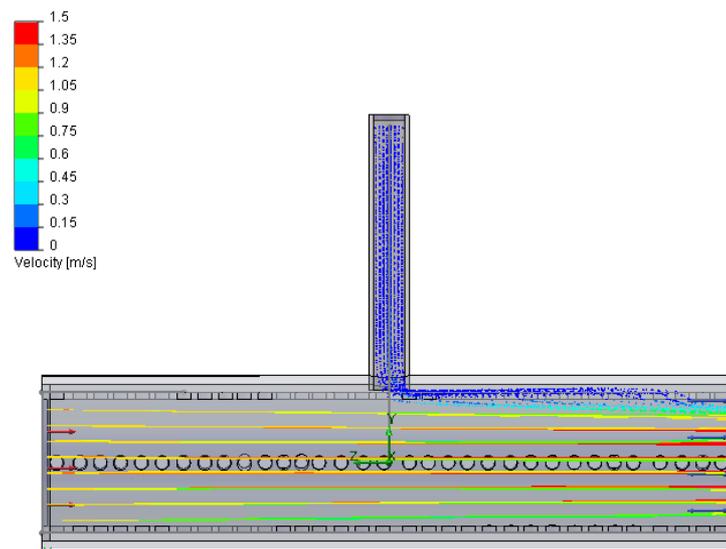
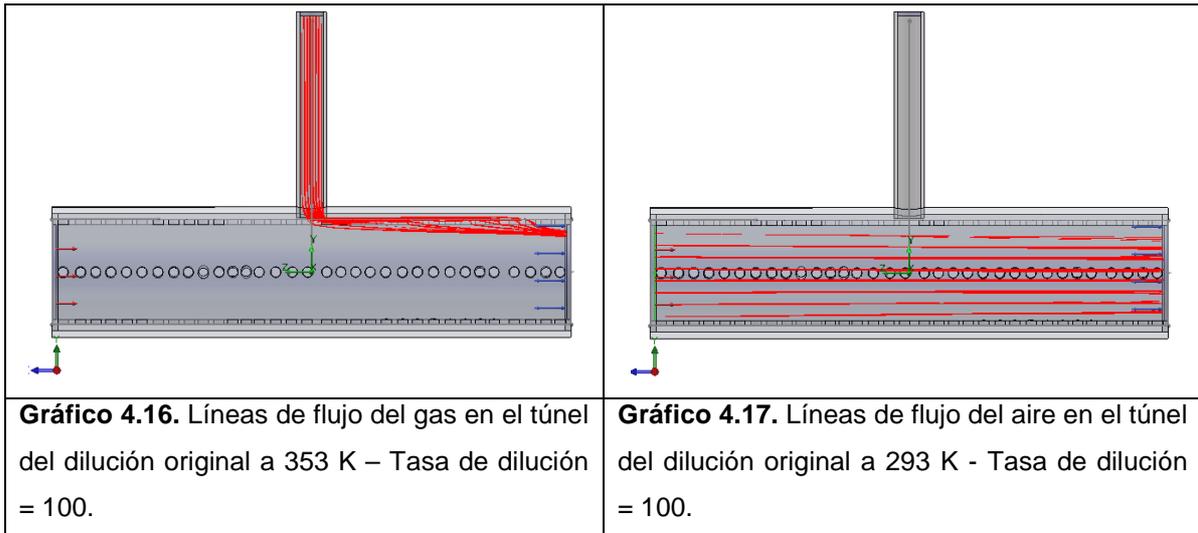


Gráfico 4.18. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel del dilución original. Tasa de dilución = 100.

Manteniendo la geometría original, se intercambió la entrada del gas de escape con la del aire puro para la dilución y se obtuvo el gráfico 4.18 el cual a simple vista no es alentador ya que no se realiza la mezcla necesaria para alcanzar la

tasa de dilución. Es más, parecería que el gas de escape nunca llega a ponerse en contacto con el aire puro destinado para la dilución.

4.4.2. Posición de los orificios y cantidad de los mismos

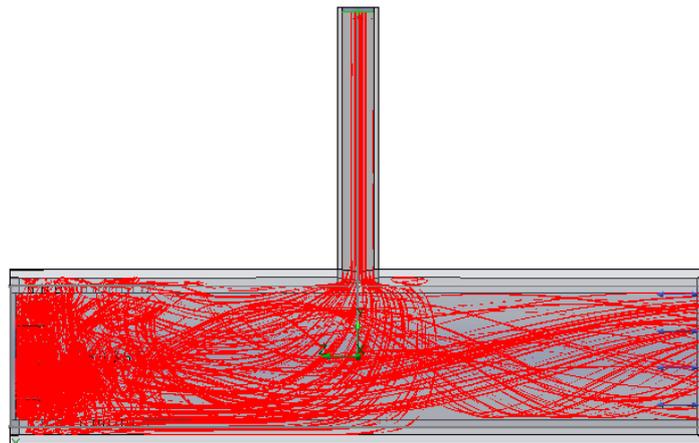
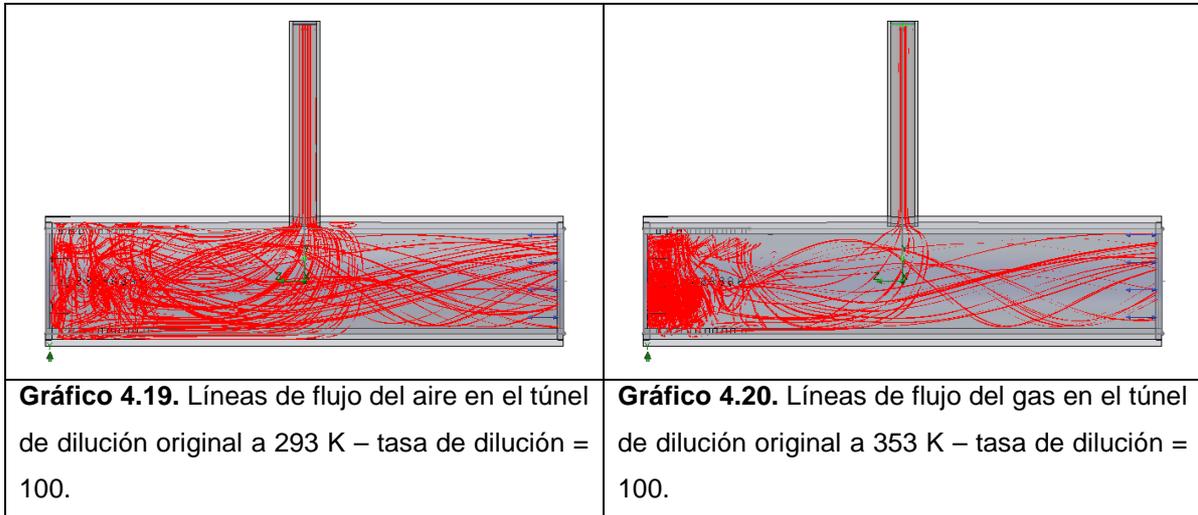


Gráfico 4.21. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución original - tasa de dilución = 100.

Este cambio de los orificios es muy significativo en el túnel ya que permite uniformizar la mezcla. Al tener orificios solo en la parte izquierda del gráfico 4.21, se logra el efecto que se obtiene al modificar la posición del tubo de ingreso de aire, a diferencia de que ya no existen tantos orificios a lo largo del túnel. Nótese que el mantener una cantidad menor de orificios puede de alguna manera abaratar costos. Los orificios permiten una mejor distribución del aire pero al aumenta los orificios, llegará a un punto en el que el aire ya no se distribuirá, de igual manera al reducirlos el aire no será suficiente para la dilución.

4.4.3. Posición del tubo de la entrada de aire

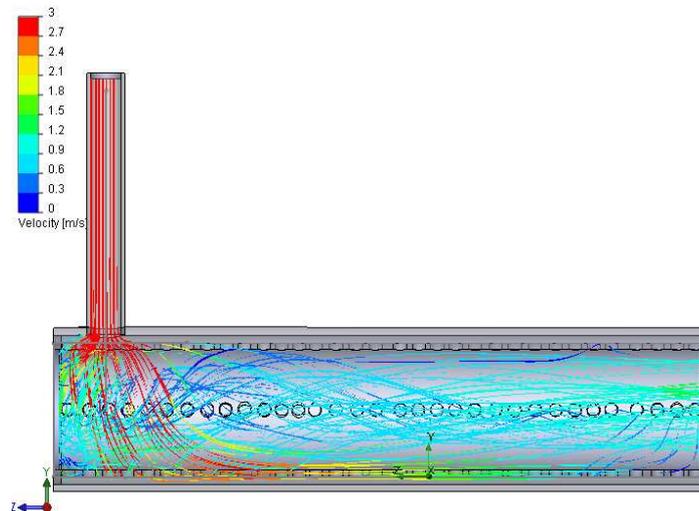
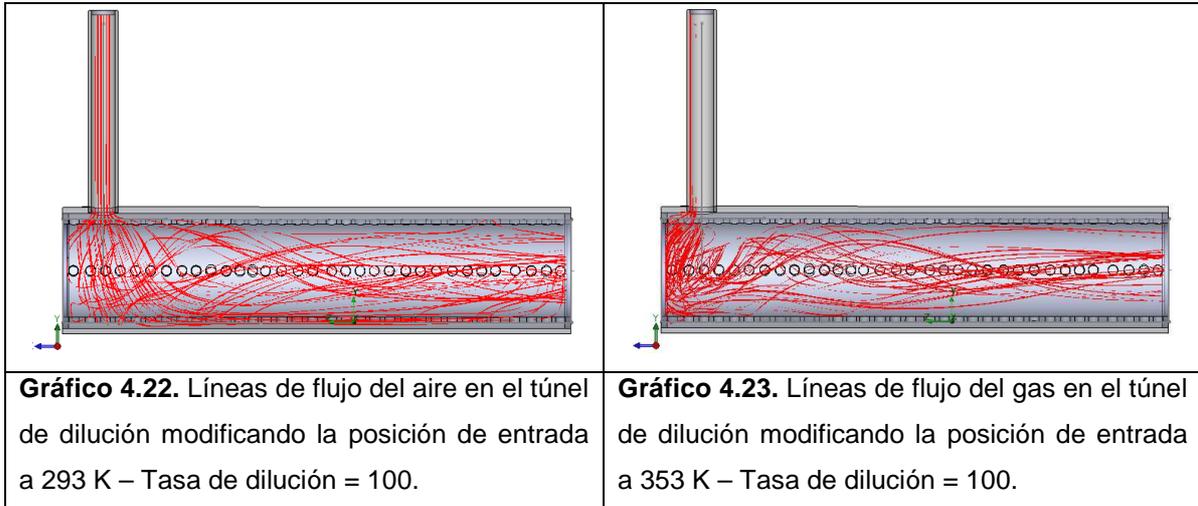


Gráfico 4.24. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución modificando la posición de entrada. Tasa de dilución = 100.

En el gráfico 4.24. se observa claramente como las líneas de flujo se distribuyen mejor a lo largo del tubo interno, lo cual hace pensar que esta es una mejor configuración que la original. El aprovechamiento del espacio es fundamental ya que de esto depende el grado de dilución que se obtenga. Por lo observado, esta modificación cumple mejor con la dilución y mantiene la tasa por lo que se puede observar en la gráfica 4.24, además, como se observa la distribución de aire se realiza de mejor manera.

Cambio de entradas de aire y gas de escape manteniendo el diseño

Tomando el diseño anterior se intercambi6 la entrada de gas de escape con la de aire puro. En las simulaciones se pudo observar lo siguiente:

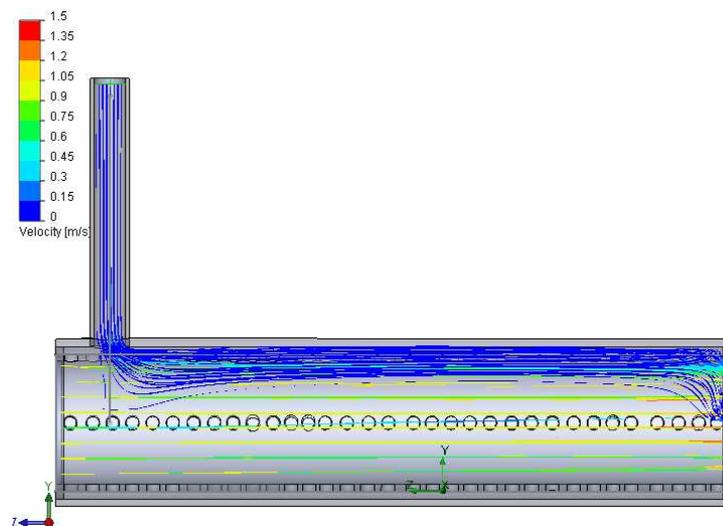
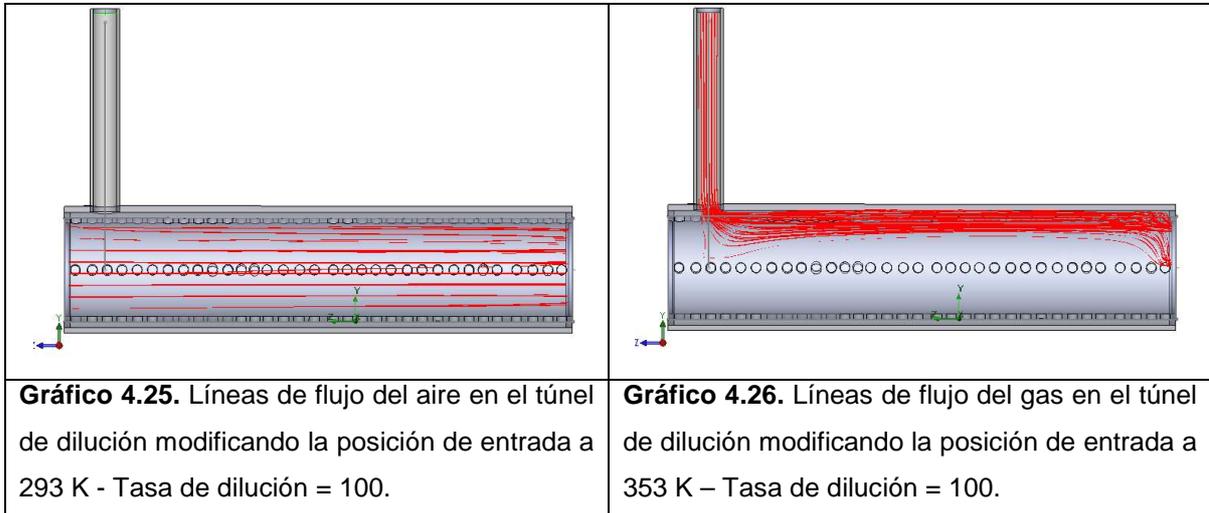


Gráfico 4.27. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución modificando la posición de entrada. Tasa de dilución = 100.

Cambiando el sitio de entrada de los gases se puede observar como el gas de escape (en azul) no entra en contacto con el aire de dilución, por lo que esta modificación queda descartada. Al no mezclarse el gas de escape con el aire, el túnel no cumple con su función principal que es diluir. El gas de escape se mantiene al margen superior de la coraza y sale pero no se puede determinar con precisión de que realmente se haya logrado la dilución y peor a una tasa determinada.

4.4.4. Cambio en longitud del mini-túnel

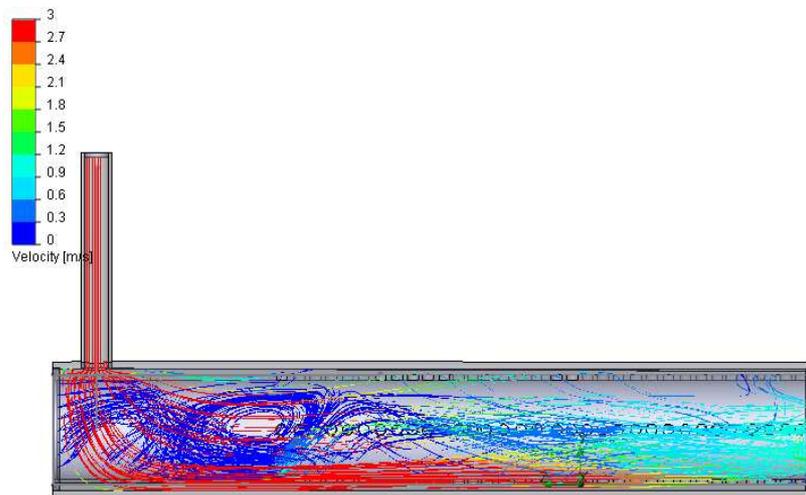
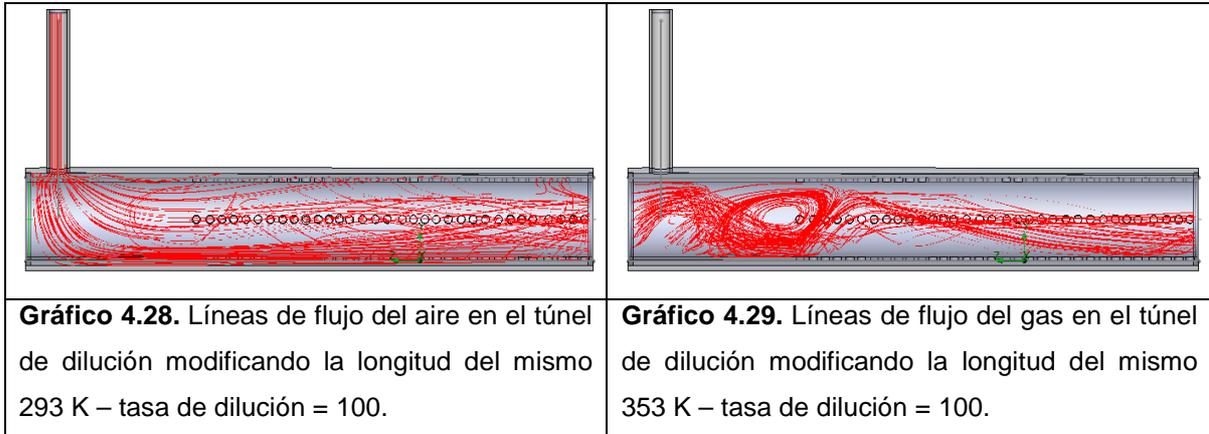


Gráfico 4.30. Líneas de flujo del aire y gas en el túnel de dilución modificando la longitud del mismo. Tasa de dilución = 100.

La modificación de 10 cm en su longitud hace que este, gráfico 4.30., sea el mejor diseño ya que según se observa en los gráficos 4.28, 4.29 y el gráfico combinado 4.30, el tener un tubo de mayor longitud permite la permanencia del aire en el interior garantizando de mejor manera la mezcla. Además, el tener los orificios a una distancia de 10 cm de las entradas también permite que se genere una turbulencia antes de llegar al punto donde el gas es disuelto por el aire. Como se observa, hay un torbellino de color azul en forma de un anillo ovalado situado en el primer tercio del tubo. Se estima que esto ayudaría a que se disuelvan de mejor manera los gases, el costo de este aumento es del 40%, pero solo en el tubo interno, tomando en cuenta que este es el porcentaje de aumento de la longitud,

en relación al costo total el tubo interno representa alrededor del 1%, por lo que el cambio afecta 0.4% al costo total.

La idea de aumentar la longitud surgió debido a que en el tubo interior en el lugar por el que ingresan los gases de escape, se generaba una cámara muy pequeña de aire que se lograba observar cuando se aumentaba el zoom del diseño, por lo que se aumento en primera instancia 5 cm a la longitud del túnel, pero posteriormente a 10 cm, quedando este resultado como el más óptimo como se demostró en las simulaciones de los gráficos anteriores 4.28., 4.29., 4.30.

A continuación se presenta el gráfico 4.31. de la distribución de temperaturas a lo largo del túnel y, también el gráfico 4.32. de la distribución de velocidades para el modelo modificado en la longitud del túnel y la posición de entrada de aire.

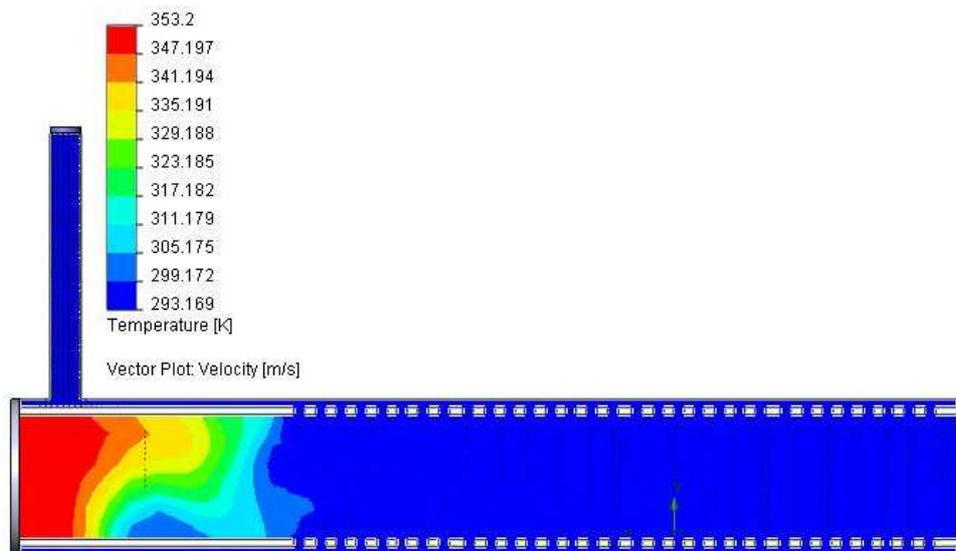


Gráfico 4.31. Distribución de temperaturas en el túnel modificado cuando la tasa de dilución es igual a 100, el tubo de ingreso del aire está a 293 K y el ingreso del gas es a 353 K.

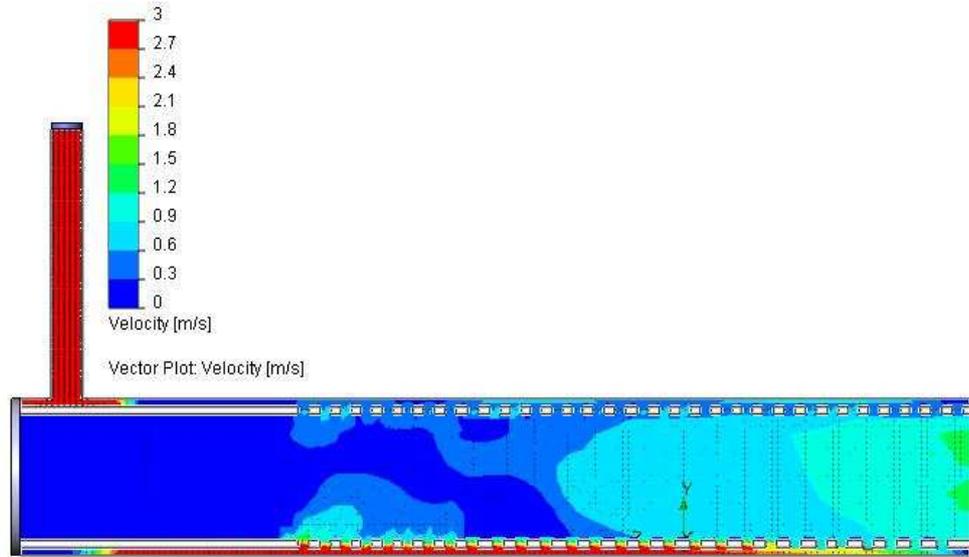


Gráfico 4.32. Distribución de velocidades en el túnel modificado cuando la tasa de dilución es igual a 100, el tubo de ingreso del aire está a 293 K y el ingreso del gas es a 353 K.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

- El material particulado es un elemento que influye de manera trascendental en el grado de contaminación de las emisiones de automotores, las cuales representan uno de los mayores contaminantes atmosféricos. Con miras a determinar el nivel de emisiones de un motor en particular es necesario diseñar un túnel de dilución apropiado para el sistema de medición de emisiones particuladas de vehículos que trabajan a diésel. Este fue el objetivo principal de esta tesis, y fue cumplido de manera satisfactoria.
- Con el diseño original del túnel que se propuso, se pudo observar mediante las líneas de flujo obtenidas mediante el método de los elementos finitos que no se cumplía el objetivo del diseño. Por ello fue necesario modificar el diseño propuesto para alcanzar un mejor rendimiento, lo cual se notó claramente con el cambio de posición del tubo de entrada de aire y el cambio de longitud del túnel. Este cambio fue notable por las líneas de flujo, las cuales se muestran dibujadas de mejor manera en el rendimiento del mini-túnel. Gracias a esta modificación se puede decir que el sistema de mini-túnel es muy efectivo, y funciona de manera acorde al requerimiento que es la dilución de los gases de aire de escape
- Por las simulaciones realizadas, se pudo determinar que los componentes del mini-túnel no son complicados de encontrar y son muy simples de ensamblar para la construcción. En el caso de realizarse la misma, se recomienda tomar muy en cuenta las uniones ya que una pequeña fuga puede alterar de manera drástica los resultados obtenidos. Este problema se suscitó en la simulación porque no se realizaron los ajustes necesarios a los ensambles y en algunas partes se obtuvieron fugas de aire y los cálculos no se lograron realizar en esos casos y fue necesario reconstruir el ensamble del túnel.

- El diseño original fue modificado, porque no cumplía las expectativas de dilución según los diagramas realizados como se representó por las líneas de flujo en las simulaciones, por lo tanto se realizó el diseño del mini-túnel con los requerimientos específicos para el sistema PAS2000.
- En Los gráficos de distribución de velocidades y temperatura que se realizaron con las simulaciones respectivas, se observó que gradualmente se realizan cambios por efecto de la tasa de dilución, por lo tanto, se concluye que un factor determinante en el análisis del sistema es la tasa de dilución.
- La variable del cambio de longitud represento que los gastos so sean significativos como para realizar este cambio, al contrario, por los resultados obtenidos, se puede determinar que a simple vista que los resultados son mucho más eficientes en comparación con el diseño original.
- Para los gráficos 4.31 y 4.32, se observa que las simulaciones en comparación con los gráficos 4.11 y 4.12, representan un cambio de toda su distribución, tanto de temperatura como velocidad, se concluyó que cualquier cambio que se realice en el diseño original representara un cambio en distribución en cualesquiera de las propiedades del túnel ya sea velocidad, temperatura o líneas de flujo.
- El tiempo fue optimizado por los programas que se usaron para las simulaciones, esto se reflejo en el software ya que sin construir un modelo a escala real, se pudo determinar el funcionamiento de algunas variantes en el diseño, de esta manera no solo ahorramos tiempo, también optimizamos costos de construcción.

5.2. Recomendaciones

- Al ser una análisis computacional y semejante en lo más posible a la realidad, se recomienda en la práctica realizar varias pruebas acorde los requerimientos del equipo de medición PAS2000 para determinar si el

sistema cumple con los objetivos, ya que en la mayoría de casos los programas emulan las condiciones del medio pero pueden llegar a diferir del medio real.

- Para que un modelo computacional refleje la realidad del medio se debe introducir todas las variables posibles para evitar cualquier diferencia muy distanciada con los modelos reales, el software que se uso fue el único que pudo brindar el tipo de características que se buscaba, por lo tanto es muy recomendable su estudio, practica y posteriormente su utilización para aplicaciones de simulación con cualquier tipo de fluidos.

Bibliografía

Ajtay D. "Towards accurate instantaneous emission models". Atmospheric Environment 39 (2005) 2443–2449.

Alvarado M. "Emisiones de material particulado en motores de combustión interna ciclo diesel". Santiago de Chile: Universidad de Chile. 2001.

Austin, T.C. y Caretto, L.S. "Improving the Calculation of Exhaust Gas Dilution During Constant Volume Sampling." SAE Technical Paper No. 980678, 1998.

Bukowiecki Nicolas P., "Mobile pollutant measurement laboratories – spatial distribution and seasonal variation of aerosol parameters in the Zürich (Switzerland) and Minneapolis (USA) area", Swiss federal institute of technology Zurich, 2003.

Black, F. y L. High. "Methodology for Determining Particulate and Gaseous Diesel Hydrocarbon Emissions." SAE Technical Paper No. 790422, 1979.

Burtscher H. "Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review". Journal of Aerosol Science 36 (2005) 896–932.

Burtscher, H.; Siegmann, H. C. "Dynamic Field Measurements of Submicron Particles from Diesel Engines". Environ. Sci. Technol. 1999.

K. Przybilla, et al. "Monitoring diesel particulates in working areas with the photoelectric aerosol sensor". Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 62 (2002).

Cirillo, Emily D. "Development of a Micro-Dilution Tunnel System for In-Use, On-Board Heavy Duty Vehicle Particulate Matter Emissions Measurement" Morgantown, West Virginia: West Virginia University 2001.

Corpaire. "Manual revisión técnica vehicular". 2005 (May - 2007).
<http://www.corpaire.org/siteCorpaire_v1.61/infoPublica.jsp>.

Corpaire. "Informativo de CORPAIRE-julio 2006". (Nov - 2005).
<http://www.corpaire.org/siteCorpaire_v1.61/infoPublica.jsp>.

Corpaire. "Norma ecuatoriana de calidad del aire". (Dic - 2006).
<http://www.corpaire.org/siteCorpaire_v1.61/infoPublica.jsp>.

Chih Chang M., "Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas-fired combustion systems", Irvine, 2004.

Diviš M., "Diesel particulates measurement using mini dilution tunnel" Czech Republic. 2002.

"Determinación de los factores de emisión para fuentes vehiculares circulando en la zona metropolitana del valle de México en unidades de gramos por kilómetro, vmas", México, 2003.<http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/calair_estudios.html>

Duleep, K.G., "Analysis of Automotive Particulate Sampling Techniques." SAE Technical Paper No. 800184, 1980.

E.M. Krommer, P.V. Puzinauskas & S.G. Buckley, "The fluid dynamics of a miniature dilution tunnel for internal combustion engine aerosol measurement", Journal: Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 32, Issue: 2, Elsevier Ltd., Nov 2007.

EcoChem, "BROCHURE PAS2000STD". (Oct - 2006)
<<http://www.ecochem.biz/PAH/PAS2000.htm>>

EcoChem Analytics, "User's Guide Realtime PAH Monitor PAS 2000", Edition 2.0, USA. October 1998.

Essig, G., et. al., "Diesel Engine Emission Reduction - The Benefits of Low Oil Consumption Design," SAE Paper 900591, 1990.

Farrar, J.R., et. al., "Quantitative Diesel Particulate Analysis using Gas Chromatography/Mass Spectrometry," Proc. Instn. Mechanical Engineers, Vol 207, 1993.

Gautam, M., et al., "Measurement of Real-World Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles: The State-of-the-Art", Department of Mechanical and Aerospace Engineering West Virginia University, National Research Center For Alternative Transportation Fuels, Engines And Emissions, 2003.

Heywood, J.B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.

Hirakouchi, N. – Fukano, I. – Shoji, T., "Measurements of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Tunnel", SAE Paper 890181.

Kittelson David B., "Review of diesel particulate matter sampling methods", Minneapolis: University of Minnesota, 1998.

Kittelson D.B., "Recent measurements of nanoparticle emissions from engines, Japan association of aerosol science and technology, Tokyo, 2001.

M. André, "Driving Cycles Development: Characterization of the Methods", SAE Technical Paper Series 961112.

Metal Powder Industries Federation. "Porous", documento pdf, Princeton, USA, <<http://www.mpif.org>>.

Mi, H. H., et al, "Effect of fuel aromatic content on PAH emission from a heavy-duty diesel engine", Chemosphere, 41: 1783-1790, 2000.

Ming C. C., England G. C., "Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas-fired combustion systems", American Petroleum Institute, February 12, 2004.

Mott Corporation, "Porous Metal Products catalogue", Mott corp. (Nov - 2007)
<<http://www.mottcorp.com/media/default.htm>>

Mott Corporation, "Continuous, particle-free gas sampling, even in harsh extremes", Brochure Mott corp. <<http://www.mottcorp.com/media/default.htm>>

Nicholas P., "Locomotive Emissions Effects Due to Engine Configuration" Morgantown, West Virginia, 2003.

Pertl, Emily D. et Al. "Design of a micro-dilution tunnel particulate matter emissions measurement system". SAE Technical paper N° 2005-01-3795.

Radloff E., "Diesel engine NO_x reduction using charge air water injection", ASME N° ICEF2005-1235, Ottawa, Canada. 2005.

Pramila S., et al., "Sample Characterization of Automobile and Forklift Diesel Exhaust Particles and Comparative Pulmonary Toxicity in Mice", Environmental Health Perspectives, VOLUME 112, NUMBER 8, June 2004.

Shigley, Joseph. E., "Diseño en ingeniería Mecánica", McGraw-Hill, sexta edición, México, 2002.

Thomas C. Miller, et Al., "Prevention of Air Pollution from Ships: Diesel Engine Particulate Emission Reduction via Lube-Oil-Consumption Control".

Thomas D. Durbin, "Particulate Matter Mass Measurement and Physical Characterization – Techniques and Instrumentation for Laboratory Source Testing", University of California, July 2004.

Umland J., "Química General", 3^a Edición, International Thomson Editores, México, 2000

White F., "Fluid Mechanics", e-Text, fourth edition, McGraw-Hill, 2002

Yamagishi Yutaka, "The MDLT-1302T Partial-Flow Dilution Tunnel for Transient Test Cycle PM Sampling", Horiba, Ltd.

Yang H., et al., "Effect of Fuel Properties on Particulate Matter and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emission from Diesel Engine in Taiwan", International Journal of Applied Science and Engineering, 3, 1: 27-36, 2005.