

83  
24.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MINITUNEL DE  
DILUCION PARA ANALIZAR EMISIONES DE  
MOTORES A DIESEL DE SERVICIO PESADO"**

**T E S I S      P R O F E S I O N A L**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
( AREA MECANICA )

**P R E S E N T A N :**

**MIGUEL      HERRERA      CALLEJAS**  
**ALEJANDRO      PALMA      VELASCO**  
**JOSE      LUIS      VARGAS      ORTEGA**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. ALEJANDRO F. ROMERO LOPEZ.**

**INSTITUTO DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,  
TERMICA Y DE FLUIDOS**

**U.N.A.M. MEXICO.**

**1997.**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A G R A D E S C I M O S

*En este trabajo he puesto todo mi mejor empeño, en el cual aplico parte de mis conocimientos adquiridos en mi estancia en esta gran institución, con el cual se dan por terminados mis estudios de licenciatura que es parte de una meta planeada.*

*Por todo lo anterior agradezco por todo el apoyo recibido principalmente por mi novia Lupita, de Silvia y Juventino, así como de mis queridos padres y hermanos que siempre estuvieron al pendiente del desarrollo de mis estudios.*

*Así mismo agradezco particularmente al Doctor Alejandro E. Romero por darnos la oportunidad de realizar este proyecto y de haber obtenido una agradable experiencia en el campo de la investigación. Por último quiero hacer mención del apoyo que hemos tenido entre los compañeros de equipo José Luis y Alejandro.*

*Atto. Miguel*

*Dedico este trabajo a mi mamá Simona Velasco M., a mi papá Francisco Palma L., a mi novia Verónica Avila B., quienes siempre me han brindado todo su cariño, dedicación y conocimiento, sin su apoyo no hubiera sido posible culminar mis estudios.*

*A mis hermanos (Armando, Flora, Araceli y Francisco J.) por su grata compañía y su apoyo incondicional.*

*A mi novia (Verónica) por su magnífica orientación y excelente apoyo brindado a lo largo de todos estos años de formación profesional, pero sobre todo por su gran calidad humana.*

*A mi segunda familia (Fra. Maximina Bravo H., Fra. María del Rocío Avila B. y Fr. Jesús Avila L.) por darme todo en la vida, enseñanzas, apoyo, cariño y comprensión incondicional.*

*Especialmente agradezco al Dr. Alejandro E. Comero Lopez por la confianza que deposita en nosotros, su paciencia, apoyo, orientación, asesoría y conocimientos brindados para la realización de este trabajo.*

*Atte. Alejandro*

*A mis padres Carolina y José Luis.*

*Por darme la oportunidad de superarme, en confiar en mí y en apoyarme, con la esperanza de ver juntos los frutos para el futuro.*

*A mi hermano Hector.*

*Que las metas que te fijes se realicen, por el bien de todos.*

*A los costañitos Carlos y Oscar.*

*Que sus travесuras se han una manifestación por sobre salir en la vida.*

*Para Carmen, Didi, Gemma y Carlos.*

*Como un aliciente para seguir adelante.*

*Para Miguel, Alejandro, Alfredo, Armando, Francisco y Raúl.*

*Cada virtud sólo necesita a un hombre; pero la amistad necesita dos.*

*El que sabe corresponder a un favor recibido es un amigo que no tiene precio.*

*Para M. en Ing. Javier Cervantes:*

*Gracias por darme la oportunidad de aprender durante la realización del Servicio Social.*

*Para Dr. Alejandro E. Romero López:*

*Por depositar la confianza en nosotros por su apoyo, asesoría, orientación y los conocimientos brindados en dicho proyecto; y por darnos la oportunidad de demostrar que somos individuos capaces en resolver los problemas que nos encomiendan.*

*Atto. José Luis*



**ÍNDICE TEMÁTICO**

	<b>PAGINA</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>PLANTEAMIENTO DE LA TESIS</b>	<b>7</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>FACTORES QUE ORIGINAN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA</b>	<b>9</b>
I.1 El Problema Ambiental	10
I.1 Efectos Fisiológicos	13
<b>CAPITULO II</b>	
<b>DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS DIESEL</b>	<b>16</b>
II.1 Definiciones	16
II.2 Comportamiento Dinámico de las Partículas	18
II.3 Tamaño de las partículas	19
II.4 Composición de las Partículas	19
II.5 El Hollín	20
II.6 Otros Componentes	21
<b>CAPITULO III</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS DE LAS EMISIONES EMITIDAS POR LOS MOTORES A DIESEL</b>	<b>23</b>
III.1 Las Emisiones Contaminantes en Motores de Combustión Interna Alternativos	23
III.2 Las Emisiones Emitidas por los Motores a Diesel	25
III.3 Motor a Diesel Típico	26

---

**CAPITULO I V****CONTROL DE LAS EMISIONES EMITIDAS POR LOS MOTORES A DIESEL**

IV.1 Medidas para el Control de las Emisiones de Partículas Diesel	29
	29

**CAPITULO V****DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MINITÚNEL**

V.1 Túneles de Dilución	40
V.2 Minitúneles de Dilución	42
V.3 Diseño Conceptual del Minitúnel	43
V.4 Consideraciones Teóricas del Diseño	44
V.4.1 Relaciones Empíricas	45
V.4.2 Cálculos	48
V.4.2.1 Cámara Mezcladora	49
V.4.2.2 Tubo Venturi	50
V.4.2.3 Tubo con Rejillas	51
V.4.2.4. Cámara Estabilizadora	52
V.5 Desarrollo del Diseño del Minitúnel de Dilución de Gases	52

**CAPITULO V I****PRINCIPIO DE OPERACIÓN**

VI.1 Operación con Dilución Parcial	55
VI.2 Operación con Dilución Total	58
VI.3 Principio de Operación del Minitúnel	59
VI.4 Operación de una Sonda de Muestreo	61

**CAPITULO V I I****ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL MINITÚNEL DE DILUCIÓN**

VII.1 Ventilador	64
VII.2 Cámara Mezcladora	64
VII.3 Venturi	65
VII.4 Tubo con Rejillas	66
VII.5 Cámara Estabilizadora	67
VII.6 Sistema de Medición de Partículas	68
VII.7 Sistema de Medición de Flujo	68
VII.8 Bomba de Succión	70
	70

**CAPITULO V I I I**

<b>INSTRUMENTACIÓN DEL MINITÚNEL</b>	71
VIII.1 Tipo de Instrumentos	71
VIII.2 Función de los Instrumentos	72
VIII.2.1 Medidores de Flujo Másico	72
VIII.2.2 Medidores de Presión	73
VIII.2.3 Termómetros	73
VIII.2.4 Válvulas Analógicas y Digitales	74

**CAPITULO I X**

<b>SISTEMAS DE MEDICIÓN DE PARTÍCULAS</b>	76
IX.1 Métodos de Medida y Caracterización de las Partículas	76
IX.2 Métodos de Medida sin Recolección	77
IX.3 Esparcimiento de Luz Láser	78
IX.4 Analizador Dinámico de Partículas	78
IX.5 Sistemas de Medición que Recomienda la EPA	80
IX.5.1 Detector Infrarrojo no dispersivo (DIRND)	80
IX.5.2 Detector por Ionización de Flama (DIF)	80
IX.5.3 Detector de Luminiscencia Química (DLQ o REDOX)	81
IX.5.4 Partículas Sólidas	83

<b>CONCLUSIONES</b>	84
---------------------	----

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	87
---------------------	----

<b>APÉNDICES</b>	90
------------------	----

<b>APÉNDICE A ( NORMAS PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES)</b>	A
--	---

<b>APÉNDICE B (PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL MINITÚNEL)</b>	O
--	---

<b>APÉNDICE C (DIAGRAMAS DE DISEÑO)</b>	P
---	---

<b>APÉNDICE D (EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS EMISIONES EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO)</b>	S
--	---

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se basa en las Normas de la Comunidad Económica Europea (CEE - R49) para la implementación de un minitúnel de flujo parcial bajo las cuales es posible cuantificar los gases producto de la combustión del motor a Diesel<sup>1</sup> en estado estable. El procedimiento para las pruebas es el siguiente, se requiere tomar una muestra de gases a la salida del escape del motor a Diesel, que se llevan a una cámara de dilución para lograr una mezcla gases-aire, el aire se toma de la atmósfera, se pasa por un filtro colocado a la entrada del ventilador, tomando en consideración una relación aproximada 4:1 de aire-gases respectivamente, pero el criterio de diseño implica mantener una temperatura de la mezcla diluida máxima de 51.7°C. Después la mezcla se pasa por un venturi, con el propósito de lograr una mezcla homogénea. A la salida del venturi se tiene una cámara estabilizadora de flujo con el objeto de tener un flujo laminar de la mezcla, antes de proceder a tomar las muestras, por último se realiza el monitoreo de los gases. La CEE-R-49 indica que la toma de la muestra se debe de realizar en un intervalo de tiempo de 6 minutos como máximo, con esto se logrará una mejor medición de la muestra.

---

<sup>1</sup> En respetuoso homenaje al Dr. Rudolph Christian Karl Diesel, todas las referencias a este tipo de motor y al combustible mismo, se escriben con mayúscula y en su ortografía original.

El objetivo principal es cuantificar las ppm de los diferentes contaminantes para poder establecer a partir de esto normas más estrictas para que en el futuro se produzcan mejores combustibles; o en su defecto exponer a la opinión pública la calidad de los combustibles que se producen en el país, además se someterán a prueba con las normas internacionales. Los contaminantes sujetos a control según la Norma oficial Mexicana son hidrocarburos sin quemar (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas carbonáceas producto de la combustión incompleta en los cilindros del motor (PM hollín).

El objetivo fundamental del proyecto es medir y analizar los gases de combustión del motor y verificar que éste satisfaga los límites de emisión establecidos para 1998 por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los EUA (EPA en lo sucesivo por sus siglas en inglés) y para el Estado de California del mismo país, aunque debido a limitaciones monetarias no es posible por el momento invertir en un túnel de dilución total con celda para análisis transitorio, por lo que el minitúnel sólo es capaz de llevar a cabo mediciones en estado estable (CEE-R-49) y no en estado transitorio como marca la EPA.

Bajo este marco de referencia, se procedió, con el patrocinio de la Dirección General de Asunto del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA) a llevar a cabo una investigación, para desarrollar un sistema capaz de medir emisiones de motores a Diesel de servicio pesado que operan en las diversas regiones del país, pero sobre todo en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) y otros conglomerados urbanos de importancia en el país como Guadalajara, Monterrey, Puebla, León, etc.

## ANTECEDENTES

A pesar de que el motor de combustión interna fue inventado hace más de 120 años, llamado comúnmente motor Otto o de gasolina, predecesor del motor a Diesel, de mejor diseño y con características mucho menos contaminantes que el motor de gasolina, los procesos que se llevan a cabo durante la combustión a alta presión en las cámaras respectivas, siguen desafiando una descripción formal, por lo que las técnicas de análisis conservan, a pesar de los avances tecnológicos y científicos en el umbral del siglo XXI, una fuerte componente de empiricismo, esto es de técnicas experimentales de ensayo y error.

En igualdad de circunstancias, (sin convertidor catalítico), el motor Diesel es mucho menos contaminante que el motor Otto o de gasolina, e.g., tienen una combustión mucho más completa, la emisión de hidrocarburos sin quemar (HC), de monóxido de carbono (CO) e incluso de óxidos de nitrógeno (NOx) es mucho menor que en el motor de gasolina. Esta es una razón por la cual durante muchos años no se desarrollaron dispositivos anticontaminantes para el motor Diesel, a pesar que, desde hace varias décadas existía la preocupación por los efectos dañinos para la salud humana de las emisiones tóxicas. Estas emisiones, si no son controladas, pueden llevar los niveles de contaminación hasta límites intolerables para el ser humano, poniendo en serio riesgo su salud.

Sin embargo, la introducción del convertidor catalítico en la industria automotriz norteamericana, a partir de 1974 y de gasolina sin tetraetilo de plomo, marcaron el camino para prácticamente eliminar la emisión de sustancias tóxicas en los motores de tipo Otto, aunado al perfeccionamiento de técnicas, como el uso de microprocesadores electrónicos para el control de los procesos de combustión en este tipo de motores, dejando al motor Diesel con su capacidad inherente de baja contaminación competir en situación desventajosa con el motor Otto. No ha sido sino hasta épocas recientes (Década de los 80's) cuando se empezó a legislar, principalmente en los EUA, acerca de los problemas que representa la emisión de partículas sólidas del motor a Diesel.

A pesar de sus ventajas intrínsecas, a saber ; alta relación potencia/peso, mayor eficiencia en la combustión, mayor resistencia al desgaste, etc., tiene las desventajas de ser muy ruidoso, generar humo y hollín (partículas) y producir un olor que no es agradable al olfato humano. Todas estas características lo han hecho impopular, especialmente entre grupos de ecologistas y de personas morales y físicas preocupadas por la conservación del medio ambiente.

La emisión de partículas sólidas de carácter carbonáceo generadas durante la combustión de motores a Diesel, ha sido catalogada como "potencialmente cancerígena", por organismos de tanto renombre y prestigio como la "Environmental Protection Agency" (EPA) y el "National Institute for Occupational Safety and Hazards" (NIOSH), ambos de los Estados Unidos de Norteamérica. La preocupación con respecto al potencial cancerígeno de los gases de escape del motor a Diesel, no es nueva, Abundan estudios médicos y epidemiológicos, sin embargo aún no se ha podido establecer con precisión, una correlación que establezca el riesgo a personas sujetas a emisiones de gases de escape en motores a Diesel. Esto se debe sin lugar a dudas al efecto sinérgico que diversos contaminantes ambientales, además de los gases Diesel, ejercen sobre los seres humanos.

Con fundamento en los posibles riesgos de salud pública y presionado por la negociaciones intensas de promoción del Tratado de Libre Comercio (TLC) de Norteamérica, el Gobierno de México legisló en el sentido de adoptar prácticamente los estándares límite de emisiones de gases de motores a Diesel, establecidos por la EPA para 1998 y años posteriores, para lo cual se emitió la Norma Oficial Mexicana (NOM\_PA-CCAT-007/93), publicada en el Diario Oficial de la Federación. La norma en sí es aceptable para limitar legalmente la emisión de partículas sólidas a la atmósfera y otros contaminantes como NOx y CO, sin embargo no existe hasta el momento ningún mecanismo de revisión y control, para poner en práctica la norma. Desafortunadamente no existe en el país un laboratorio equipado que sea capaz de llevar a cabo la medición de emisiones de combustión en régimen transitorio, como lo especifica el Código de Reglamentos Federales (CFR-40, por sus siglas en inglés) de la EPA.

Dadas las condiciones actuales del país, no existe el financiamiento de una celda transitoria con todo el equipo necesario que establece el CFR-40 (inversión aproximada de \$ 2.5 millones de dólares, solo en equipo), es objetivo primordial de este proyecto, diseñar y desarrollar con medios propios una instalación que permita llevar a cabo mediciones cuantitativas de la emisión de partículas y otras sustancias tóxicas. Hasta el momento, dichas emisiones sólo se pueden apreciar cualitativamente, sin ninguna posibilidad de asignarles un valor de medición directa. La motivación fundamental de la presente propuesta, es desarrollar tecnología propia para el análisis de mediciones, con los recursos disponibles.

Con base en lo anterior un minitúnel de dilución de gases para motores a Diesel permite llevar a cabo mediciones en estado estable, para evaluar cuantitativamente las emisiones contaminantes, aún cuando el procedimiento establecido por el CFR-40 de la EPA, no se puede homologar con esta técnica. No obstante, las determinaciones de valores en estado estable, si bien no pueden competir con los procedimientos del CFR-40, sí pueden dar la pauta para probar diseños propios o extraños y tener una



herramienta de control, que no existe actualmente en el país. La celda transitoria del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), se ve retrasada cada vez más por la crisis financiera de la Nación, además de que hace falta un laboratorio independiente que coadyude a resolver problemas tan serios como el de emisiones tóxicas, que pueden representar un problema de salud pública.

## PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

Se ha comentado que las fuentes móviles contribuyen en gran parte al problema de la contaminación atmosférica. Al respecto, cada país realiza investigaciones para controlar esta situación, en la medida que sus recursos económicos, tecnológicos y sociales se lo permitan.

El área metropolitana de la Ciudad de México, es una de las más contaminadas del mundo. En ella, se encuentran asentados más de 20 millones de habitantes (aproximadamente el 23% de la población total del país) y mantiene un parque vehicular, superior a 4 millones de unidades (10).

El problema es complejo, su dificultad reside en la gran variedad de factores que intervienen en el problema. No obstante, como en el área metropolitana las fuentes móviles llegan a producir hasta un 70-75% del volumen de la contaminación del aire (caso de la Ciudad de México) (11), se hace evidente que las acciones a seguir, deben incidir sobre las emisiones contaminantes de los Motores a Diesel. Los límites de la normativa que actualmente está vigente en México, son los mismos que impone la EPA en los Estados Unidos. Sin embargo, debido a que las unidades que ya se encuentran en servicio no necesitan aprobación para su operación, se tiene poco control sobre sus emisiones, el problema es grave para los seres vivos.

El presente trabajo surge como una necesidad creciente y apremiante de participar en la solución de la contaminación ambiental, provocado por los motores a Diesel.

En este sentido, una de las medidas que se pueden adoptar para disminuir dichas emisiones, es la de mantener un control exhaustivo sobre este parque vehicular (el cual puede usar dispositivos para medir las emisiones) y sobre los combustibles que se producen en el país.

Con esta idea, se pretende establecer un punto de inicio para enfrentar el problema y buscar soluciones a mediano y largo plazo.

El contenido del presente trabajo plantea de forma general un sistema para cuantificar las emisiones provocadas por los motores a diesel. Se abordan la teoría de formación de las partículas, antecedentes teóricos, diseño conceptual, construcción, instrumentación del sistema y lo más importante el método de medición, concluyendo con un análisis de la emisión de partículas en un motor de servicio pesado.

Como se puede observar, este tema de tesis obedece a una serie de necesidades bien identificadas, por un lado, ha permitido que la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México promueva las inquietudes de investigación en este campo y por otro, el desarrollo de proyectos en estos temas.

## CAPITULO I

### FACTORES QUE ORIGINAN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Actualmente el mundo, experimenta procesos de contaminación atmosférica serios. A diferencia de otros problemas relacionados con el medio ambiente, la contaminación del aire es un fenómeno de localización restringida, especialmente en zonas metropolitanas.

Es el problema al que quizá, la población en general le da mayor importancia. La notoriedad ésta, relacionada a los padecimientos comunes que causa, ha traído como consecuencia una creciente conciencia de su peligrosidad y la necesidad por resolverla. (10)

## I.- El Problema Ambiental

El problema de la Contaminación Ambiental, es una consecuencia "natural" del desarrollo de las grandes ciudades y del empleo de una tecnología que nunca consideró las repercusiones ecológicas que causaría su uso[10].

Todas las grandes metrópolis están amenazadas por los mismos problemas: montañas de basura, falta de servicios públicos, problemas de contaminación atmosférica y de todo tipo.

La contaminación atmosférica repercute en el agua, en el suelo y en general en la biosfera que es el sistema que engloba a los elementos mencionados anteriormente y todos los seres vivos del planeta.

Partiendo de estos principios generales, se debe considerar al aire como un recurso común limitado y, su utilización debe estar sujeta a normas que eviten el deterioro de su calidad.

Se entiende por contaminación atmosférica, **"la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgos, daños o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza"**[11].

En cuanto a las formas de energía, se consideran contaminantes el ruido y las radiaciones ionizantes, emitidas por radionúclidos que pueden ser de 3 tipos: núcleos de helio (partículas  $\alpha$ ), electrones (radiación  $\beta$ ) y ondas electromagnéticas (radiación  $\gamma$ ), debido a que tienen una gran importancia en determinados procesos de degradación ambiental[10].

En cuanto a las sustancias, se distinguen contaminantes primarios y secundarios, los primarios se vierten directamente a la atmósfera desde los focos contaminantes, generalmente como partículas (sólidas y líquidas) o como gases. Los contaminantes secundarios se producen como consecuencia de las transformaciones, reacciones químicas y fotoquímicas de los contaminantes primarios dentro de la misma atmósfera<sub>110</sub>.

La atmósfera es la envoltura gaseosa, de aproximadamente 200 km. de espesor en promedio, que rodea la tierra y constituye el principal mecanismo de defensa de las distintas formas de vida; filtra las radiaciones ultravioleta de alta energía que la tierra recibe del sol y que, de no ser por el ozono y el oxígeno, terminaría con todo tipo de vida existente sobre la superficie. La atmósfera ha necesitado miles de millones de años para alcanzar su composición actual y estructura que la hacen apta para la respiración de los seres vivos que la habitan.

Existen diversas clasificaciones de las capas atmosféricas atendiendo a las variaciones de temperatura, altura, composición química, propiedades magnéticas y eléctricas, etc. La de interés para este trabajo es la llamada **troposfera**, en ella se mueven y respiran los seres vivos, además se producen los fenómenos meteorológicos que determinan el clima. Tiene un espesor medio de 12 km. y está compuesta de 2 grandes grupos de componentes químicos: los que representan proporciones constantes y los que aparecen en proporciones variables<sub>110</sub>.

Los que aparecen en proporciones constantes son el Nitrógeno (N<sub>2</sub>), Oxígeno (O<sub>2</sub>) Y los gases nobles. Los compuestos que aparecen en proporciones variables son, el dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), el vapor de agua y diversos contaminantes.

La proporción aproximada, en volumen, en que aparecen el aire limpio y seco es la que se muestra en la tabla I.11<sub>21</sub>.

COMPONENTES	(%)
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78,1
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20,9
Argón (Ar)	0,93
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0,03
Monóxido de Carbono (CO)	0,00001
Ozono (O <sub>3</sub> )	0,000002
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	0,00000002
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0,0000001
Oxido Nítrico (NO)	0,00000006

Tabla I.1 Composición del Aire Limpio[12]

Todas las actividades del hombre, los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la tierra, van acompañados de emisiones de gases, vapores y polvos. Éstos al difundirse en la atmósfera, se integran en los distintos ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en la tierra, siguiendo los caminos por los que llegan del medio a los organismos y de éstos de nuevo al medio. De estos ciclos biogeoquímicos, algunos ejemplos son: el del agua, del carbono, de azufre y del nitrógeno que, por salir de la competencia del tema no se describen[10].

Las investigaciones que sobre contaminación atmosférica han realizado algunos países en los últimos años, revelan situaciones alarmantes lo cual, ha obligado a imponer normativas de emisiones (tanto a fuentes fijas como fuentes móviles) cada vez más estrictas.

En ciudades como Los Angeles , El Cairo, México, Atenas, Madrid, Río de Janeiro... el aire presenta una calidad inaceptable, según los últimos informes de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

A pesar de los esfuerzos que se realizan hoy en día para producir motores cada vez más eficientes, existe un parque vehicular en el mundo de más de 500 millones cuyos niveles de emisiones, no corresponden al de los nuevos diseños.

Por otra parte, la actividad industrial además de ser la gran responsable del cambio climático, es también la causa del deterioro del aire limpio; especialmente algunos sectores como son las industrias químicas, papeleras, siderúrgicas, cementeras y centrales térmicas.

Una de las grandes reivindicaciones de las organizaciones ecologistas no es el cierre de las industrias, sino que las empresas empleen sistemas para controlar las emisiones de los contaminantes.

La contaminación va tomando nuevas formas. Una de las más conocidas últimamente, y que más ha servido para difundir imágenes apocalípticas, son las lluvias ácidas. Estudios realizados en Estados Unidos y Suecia, indican que la lluvia es ahora 10 veces más ácida que cuando se detectó el fenómeno y que, ha producido desde la deforestación de los bosques, hasta la muerte de los peces en lagos<sup>(10)</sup>.

## **1.2.- Efectos Fisiológicos**

El punto de contacto entre el hombre y las partículas Diesel está en el medio ambiente, después de los procesos de mezcla y dilución conocidos. No sólo afecta al cuerpo humano mediante una multitud de vías, sino que también alcanza a los animales y plantas que constituyen su alimento<sup>(10)</sup>.



El efecto de la materia de las partículas que son inhaladas y depositadas en el sistema respiratorio, depende de su interacción con el tejido pulmonar, los mecanismos biológicos de defensa y la transportación y retención del material dentro del cuerpo humano.

El gas irritante puede ser adsorbido sobre la superficie de la partícula que viene a tener contacto con la superficie de los tejidos del sistema respiratorio. La concentración de gas en el punto de contacto es tan grande como si estuviese el gas solo.

Se pretende adoptar un control muy estricto de emisiones (gases y partículas) no sólo por el riesgo de cáncer, sino por el amplio rango de enfermedades respiratorias que se pueden evitar y el deterioro ambiental correspondiente.

Las emisiones de los motores Diesel han sido, desde los últimos 20 años, objeto de un considerable número de estudios sobre animales y en menor medida sobre hombres a fin de conocer su grado de peligrosidad.

El enfoque epidemiológico sobre las partículas distorsiona la idea de que en ausencia de éstas, desaparece todo riesgo de peligrosidad, sin embargo, los hidrocarburos policíclicos pueden estar presentes en forma de vapores, gases y otros productos de condensación que, no solamente son emitidos por los motores Diesel.

Los estudios directos sobre el hombre son difíciles de interpretar debido a que existen otras muchas causas potenciales de cáncer como el alcohol, tabaco, comida, riesgos profesionales o particulares, medicamentos y radiaciones de tratamientos médicos.

En 1989, el CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) clasificó las emisiones Diesel en el grupo 2A de los cancerígenos potenciales, admitiendo que las pruebas cancerígenas no son determinantes sobre los hombres pero sí suficientes sobre los animales, debido a los productos de condensación y no por las emisiones totales.

El profesor Bruce Ames de la Universidad de California ha hecho estudios de la influencia que tienen las partículas Diesel en la actividad de mutación genética, aunque sólo se basa en comparaciones sin demostración. Si las partículas muestran actividad positiva sobre una bacteria-salmonela, se infiere que también tendrá efecto cancerígeno en seres humanos (silogismo sin demostración). Por su supuesto, hay mucha controversia en el tema y sobre todo, los fabricantes de motores Diesel se niegan a aceptar el carácter cancerígeno de las partículas.

El método utilizado para medir las partículas emitidas por los motores Diesel, trata de reproducir las condiciones en que éstas se expulsan a la atmósfera. Dicho procedimiento se realiza con aire que previamente se ha filtrado y desecado. De esta forma, se toman en cuenta los efectos dinámicos que sufren las partículas en su trayecto desde el cilindro hasta la atmósfera.

Una vez que se recolectan dichas partículas, se les puede analizar mediante microscopía electrónica, cromatografía, espectrometría y otras técnicas, a fin de obtener información de su comportamiento físico y químico.

Una de las principales características de las partículas emitidas por los motores Diesel, es su elevada inestabilidad que depende no sólo de las condiciones en que se efectúe la combustión, sino de la fase y composición del combustible, de las condiciones de lubricación y de la trazas de impurezas o aditivos, que también tienen implicaciones considerables.

Por estas consideraciones, es necesario conocer las características a que obedecen dichos términos.

## CAPITULO II

### DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS DIESEL

#### II.1.- Definiciones

Se considera *partícula*, en el ámbito de las emisiones contaminantes por motores de combustión interna alternativos, a:

*"Cualquier materia, sólida o líquida, con excepción del agua en fase líquida o gaseosa (vapor) que esté presente en los gases de escape diluidos, en condiciones aproximadamente ambientales o bien, que se hayan recolectado en un filtro especificado tras de haber diluido los gases de escape a una temperatura inferior o igual a 325 K (52°C) con aire limpio filtrado; (10).*

El propósito de realizar el muestreo de partículas a esa temperatura tope y a la cual obedece la definición anterior, es el de aproximarse a las condiciones atmosféricas en las que dichas partículas alcanzan equilibrio con la atmósfera al completar los procesos, físicos y químicos, de su formación.

El concepto de dilución tiene especial importancia por la gran inestabilidad que tienen las partículas respecto a la variabilidad de sus características, a medida que los gases de escape van mezclándose con el aire, difundiendo el calor del escape desde su salida de la cámara de combustión, hasta que alcanzan el equilibrio térmico en la atmósfera.

Por ello, para medir la masa de partículas emitidas por un motor Diesel, se requiere de un proceso de dilución, simulando lo que ocurre durante su formación en la atmósfera.

Algunas partículas, como las que se forman sobre una base de nitrógeno o azufre pueden no estar totalmente desarrolladas hasta que los gases estén "fríos".

Una descripción amplia de las partículas Diesel, requiere el uso de términos relacionados con su formación y con otras de sus características. Con esta idea, parece adecuado definir los siguientes conceptos:

**Agregados**, son partículas o grupos de partículas unidas por fuerzas intermoleculares o fuerzas atómicas de cohesión. Son muy estables.

**Aglomerados**, son dos o más partículas unidas por fuerzas de cohesión relativamente débiles.

**Aerosoles**, dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas en un medio gaseoso, generalmente menores de  $50\mu\text{m}$  de diámetro.

## II.2 Comportamiento Dinámico de las Partículas

Las emisiones gaseosas contaminantes (HC, NO<sub>x</sub>, CO y CO<sub>2</sub>) se pueden medir, directamente en los gases de escape crudos debido a que, a la temperatura a la que son medidos, las reacciones de formación o descomposición están congeladas, en cambio, las partículas tienen una dinámica de formación totalmente diferente<sup>[18]</sup>.

Obedeciendo por una parte a la dinámica de formación y por otro, a la separación entre los contaminantes primarios y secundarios, las partículas se han clasificado en **primarias** y **secundarias**.

**Las partículas primarias**, son aquellas que resultan de los procesos que ocurren en el motor mismo, es decir, se forman directamente en la combustión.

**Las partículas secundarias**, se forman como consecuencia de las interacciones de nucleación, agregación, etc. en la fase gas-vapor o gas-vapor-sólido, en el sistema de escape del motor o, finalmente en la atmósfera.

Las trayectorias de formación que siguen las partículas Diesel pueden ser distintas, desde la composición del combustible hasta los procesos que se dan en el escape y así mismo, las interacciones que existen entre ellas: sedimentación, difusión, evaporación, condensación, crecimiento y colisión, ganancia o pérdida de carga eléctrica en la superficie, reacciones en las fases líquida y sólida, adsorción, procesos fotoquímicos etc., que pueden ocurrir en algunas de ellas en forma simultánea y en otras, en forma secuenciada.

Algunos fragmentos de combustible sólido o líquido, pueden pasar a través del sistema de combustión virtualmente inalterados, o bien, pueden evaporarse y subsecuentemente condensarse como partículas sólidas o líquidas. Así mismo, las cenizas y otros fragmentos no combustibles pueden emitirse como partículas muy finas.

### II.3.- Tamaño de las Partículas

El tamaño de una partícula es la dimensión más representativa que mejor describe el grado de subdivisión de la partícula misma. Si la partícula es esférica, el diámetro puede ser llamado su tamaño. Si la partícula es muy irregular o bien es un aglomerado, se tiene que especificar el diámetro significativo<sub>(10)</sub>.

Se utilizan diversos métodos para determinar el tamaño promedio de las **partículas**, desde la media aritmética hasta un manejo estadístico más completo de los datos.

El tamaño de las partículas emitidas por un motor Diesel oscila en un rango de 0.005 a 30  $\mu\text{m}$ , es decir desde una magnitud molecular hasta magnitudes visibles.

El efecto del tamaño sobre el cuerpo humano es especialmente importante ya que, las partículas finas (menores de 10  $\mu\text{m}$ <sub>(25)</sub>) se mantienen en suspensión en el aire atmosférico por largos períodos de tiempo, su comportamiento aerodinámico facilita su inhalación y deposición en el sistema respiratorio.

### II.4.- Composición de las Partículas

La composición de las partículas que emite un motor Diesel depende del tipo de motor, de sus condiciones de funcionamiento y del combustible utilizado. La fig. II.4 corresponde a un promedio de las muestras tomadas en un motor de inyección directa, potencia media y un cierto ciclo de utilización<sub>(32)</sub>.

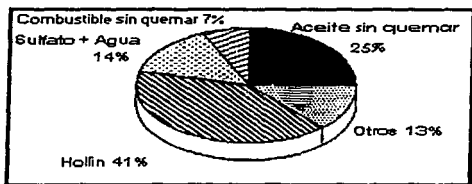


Fig. II.4.1 Composición Media de las Partículas Emitidas por un Motor Diésel[32]

## II.5.- El Hollín

Se puede observar que el componente mayoritario es el hollín, el cual, propiamente dicho, es carbón con una parte mínima de hidrógeno (aproximadamente el 1% en peso). Esta composición corresponde a la fórmula empírica  $C_8H_{12}$ .

Mucha gente ha utilizado las palabras "carbón" y "hollín" para describir un amplio rango de materiales procedentes de la combustión de combustibles fósiles, sin embargo, éstos contienen además, considerables cantidades de hidrógeno y otros elementos y compuestos[10].

La combustión de las partículas de hollín participa notablemente en el calor liberado durante la combustión puesto que, las nubes de partículas sólidas tienen una emisividad muy alta comparada con un sistema gaseoso puro.

El hollín se quema instantáneamente a una temperatura de 550 °C, por debajo de este valor (500°C por ejemplo) también puede quemarse pero, de manera incompleta y exponiéndose por un cierto tiempo a dicha temperatura[13].

## II.6.- Otros Componentes

Existen otros componentes, distintos de los que ya se han mencionado y que, a la vez que se incluyen como parte de las partículas recolectadas o que salen a la atmósfera, también participan en la formación de ellas.

Como ejemplo, se pueden mencionar **las cenizas** que resultan de compuestos orgánicos e inorgánicos. Algunas de ellas, se forman desde los crudos que son refinados y constituyen la mayoría de las trazas metálicas contaminantes.

El aceite lubricante, así como los aditivos con que son tratados tanto el mismo aceite como el combustible para mejorar sus prestaciones, también influyen en la formación de estas fracciones.

Los aditivos que se utilizan para mejorar el número de cetano o la ignición, para inhibir la corrosión, para suprimir el humo, etc. , son componentes orgánicos y orgánicos-metálicos incluyendo algunos con nitrógeno o azufre.

El azufre, además de los sulfatos formados, puede combinarse químicamente con el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno formando una amplia variedad de compuestos.

El nitrógeno, de forma análoga al azufre, está ligado al combustible y contribuye no sólo a la emisión de NO<sub>x</sub>, sino también como una fuente de emisión de partículas (nitratos y sulfatos).



El Aluminio, Calcio, Hierro, Magnesio, Níquel, Sodio, Silicio, y Vanadio se pueden encontrar en una proporción de 0.01 a 0.05% de las cenizas mientras que, Estaño, Potasio Manganese, Cromo, Cobalto, Plata, Litio, Estroncio, Titanio, Bismuto, Cadmio y Molibdeno se encuentran en cantidades de 0.001 a 0.01%<sub>121</sub>.

**CAPITULO III****CARACTERÍSTICAS DE LAS EMISIONES EMITIDAS  
POR LOS MOTORES A DIESEL****III.1.- Las Emisiones Contaminantes en Motores de  
Combustión Interna Alternativos**

En los últimos años los vehículos automotores han irrumpido de forma masiva en las ciudades, contribuyendo sensiblemente a la contaminación atmosférica.

De acuerdo con los datos registrados en algunas ciudades, las emisiones de las fuentes móviles son muy variadas, se estima desde un 15 hasta un 80% dependiendo de las características del lugar, de la distribución de sus industrias y del tipo de contaminante: **CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, Pb, SO<sub>2</sub>, Partículas<sub>(10)</sub>**.

Actualmente, la normativa que sobre emisiones se impone a los fabricantes de motores y las exigencias del usuario en cuanto a las prestaciones del vehículo, hacen que los diseños tanto del motor como de los equipos de postratamiento de los gases de escape, sean cada vez más sofisticados.

No todos los vehículos automotores producen la misma cantidad de contaminantes ni en la misma proporción. Anteriormente los Diesel emiten más partículas y dióxido de azufre mientras que, los de gasolina producen mayores emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar, actualmente compuestos de plomo se han reducido considerablemente con las gasolinas Magna Sin y Premier.

En los motores de encendido provocado se ha podido tener un control significativo en la emisión de óxidos de nitrógeno (generalmente NO y NO<sub>2</sub>), de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos sin quemar (HC). Esto mediante el sistema de inyección de combustible, en el cual, un microprocesador indica la cantidad de combustible que se debe inyectar para mantener una relación **aire / combustible** en un entorno, muy cercano al valor estequiométrico<sub>112</sub>.

Por otra parte, los automóviles que funcionan con gasolinas que contienen plomo, emiten partículas a razón de 0,1 a 0,15 (g/km.) de las cuales, del 25 al 60% es plomo. La tasa de emisión es considerablemente mayor cuando el motor está frío.

Solamente una fracción (entre el 10 y el 50%) del plomo contenido en el combustible sale por el escape, el resto se queda en el interior del motor y en el sistema de escape<sub>112</sub>.

En cuanto al motor Diesel, existen hoy en día centros de investigación tratando de reducir, principalmente, la emisión de partículas; ya sea mediante el diseño adecuado del motor, el postratamiento de los gases de escape y mediante sistemas para medir las emisiones que emiten los motores.

### **III.2.- Las Emisiones Emitidas por los Motores a Diesel**

Las emisiones del motor Diesel comprenden una gran variedad de compuestos, algunos de los cuales salen a la atmósfera en fase gaseosa y otros, que forman parte de la partícula se pueden condensar y sumar en la fase líquida o sólida. Dentro de las emisiones gaseosas se encuentran los HC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc [ 10 ].

En fase líquida, los sulfatos y agua ligada e hidrocarburos. En fase sólida, el hollín, compuestos metálicos, cenizas, etc.

Las características que engloba el proceso de combustión en los motores Diesel (mezcla heterogénea, altas temperaturas, compuestos hidrocarburos pesados, azufre, etc) favorecen la formación de óxidos de nitrógeno y de los elementos que constituyen las partículas, uno de los principales contaminantes que emiten estos motores.

Los procesos, tanto físicos como químicos que se desarrollan para la formación de partículas, se inician tan pronto como se inyecta el combustible en el cilindro y continúan en la atmósfera durante y después de la dilución de los gases de escape.

Socialmente, el motor Diesel no ha sido aceptado debido al ruido y al humo del escape, su olor es muy fuerte y desagradable. Se ha dicho que causa náusea y dolor de cabeza, irritación en los ojos, nariz y garganta, sin embargo, en la medida en que se pueda controlar la emisión de contaminantes, también se reducirán estos efectos nocivos [ 13 ].

El problema del motor Diesel son sus partículas, algunas fuentes señalan considerables ventajas con respecto al motor de encendido provocado, entre otras, su alto rendimiento térmico y bajo consumo específico de combustible.

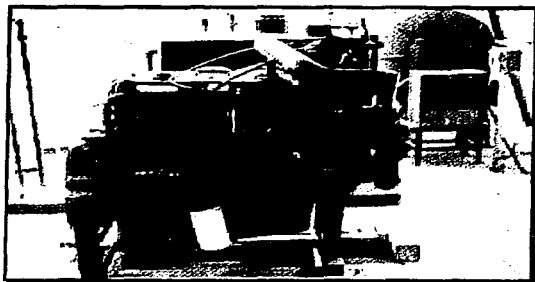
Dichas características han motivado el desarrollo de nuevos y mejores diseños y, al mismo tiempo, se realizan esfuerzos con el fin de controlar de una manera efectiva, sus emisiones.

En la actualidad, los sistemas que parecían más prometedores de posttratamiento de gases de escape (trampas de partículas autorregenerables) no han reportado éxitos comerciales.

### **III.3.- Motor a Diesel Típico**

Para este proyecto se seleccionó un motor Diesel turbocargado de la marca Mercedes-Benz (fig. III.3.1), cuyas características principales de operación pueden apreciarse en la Tabla III.3.1. La razón para seleccionar un motor Mercedes-Benz con las características que se describen en la tabla III.1, se debe a que un porcentaje muy alto de estos motores se utilizan como fuente de energía para el desaparecido Sistema de Autotransporte Urbanos Ex-Ruta 100 del Departamento del Distrito Federal, Sistemas Metropolitanos de Transporte, y en las rutas restructuradas del Sistema de Transporte Colectivo Concesionado que realizan las autoridades del gobierno del Distrito Federal. Esto hace peculiarmente atractivo este tipo de motor pues puede llegar a obtenerse una solución que limite considerablemente la emisión de partículas sólidas a la atmósfera del Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM en lo futuro para abreviar).

Las pruebas base correspondientes al motor seleccionado, fueron hechas en la planta. Es decir la fuente de información de la Tabla III.1, es precisamente el fabricante del motor, en este caso Mercedes-Benz México, S.A. de C.V.



Potencia máxima a 2600 r.p.m., kW	126.8
Par máximo a 1450 r.p.m., Nm	600
Presión media efectiva a 1100 r.p.m., kPa	1937
Consumo específico de combustible (g/kWh), a potencia máxima a par máximo	221.2 198.7
Volumen desplazado, seis cilindros en línea, m <sup>3</sup>	5.96X10 <sup>-3</sup>
Relación de compresión	16:1

TABLA II.1.- Propiedades del motor Mercedes-Benz Tipo UM366LA

El motor Diesel tiene futuro aunque en la medida que se reduzcan las partículas y en este sentido, ha adquirido recientemente una importancia fundamental la medición y control de dichas partículas (fig. III.3.2) .



**figura III.3.2 motor Mercedes-Benz Tipo UM366LA**

**CAPITULO IV****CONTROL DE LAS EMISIONES EMITIDAS POR LOS  
MOTORES A DIESEL****IV.1.- Medidas para el control de las Emisión de Partículas  
Diesel**

Debido a que las partículas Diesel participan en el deterioro ambiental y pueden ocasionar severos problemas a la salud, se han adoptado ciertas normas que controlan las emisiones de los motores Diesel.

Dichas normas se han establecido en casi todo el mundo, siendo unas de las de mayor importancia, la de la Comunidad Económica Europea, la de los Estados Unidos y la de Japón.



Se comenta la normativa de la Comunidad Económica Europea debido tanto a su importancia tecnológica, como al contexto en el que se desarrolla este trabajo. Además, para establecer algún contraste, también se hace referencia a la de los Estados Unidos, que es la más estricta hasta la fecha.

En Europa, la adopción de estas normativas inicia en junio de 1985, con el "Compromiso de Luxemburgo" aunque, debido a la falta de requisitos legales, no es sino hasta finales de 1987 cuando la Directiva 88/77/CEE<sup>14</sup> instituye por primera vez las normas de emisiones de gases contaminantes, procedentes de motores Diesel destinados a la propulsión de camiones y autobuses.

En junio de 1988, la directiva 88/436/CEE establece 2 etapas en la aplicación de la norma. La primera se resume en la tabla IV.1 y, los valores límite para la segunda etapa, los decidió el Consejo a finales de 1989.

Cilindrada	Fechas de Aplicación de las Nuevas Normas		Masa de Partículas Diesel	
	Nuevos modelos de vehículos	vehículos nuevos	Normas de Recepción tipo	Normas de Homologación de serie
para toda cilindrada	1º oct. 89	1º oct. 90	1.1(g/kWh)	1.4(g/kWh)

Tabla IV.1.- Normas de Emisión de Partículas de Vehículos Diesel (1a Etapa).

La evolución de estas normas a través de cambios y modificaciones, ha dado como resultado la reglamentación actualmente vigente:

Directiva 91/441/CEE<sup>[1]</sup>. Define las características de homologación de vehículos mediante el ciclo transitorio, partes I y II que se muestra en la figura IV.2.

Directiva 88/77/CEE<sup>[1]</sup>. Define las características de homologación de vehículos mediante un ciclo de 13 modos de operación a régimen estabilizado, que se muestra en la figura IV. 1.

Para la interpretación de que vehículos deben someterse a una u otra reglamentación, se especifican las categorías de interés consideradas en la CEE<sup>[1]</sup>.

Categoría M<sub>1</sub>.- Transporte de personas con capacidad de 8 plazas como máximo además de la del conductor y no exceda de 2840 kg.

Categoría M<sub>2</sub>.- Transporte de personas con capacidad de más de 8 plazas además de la del conductor y que no exceda de 5 toneladas.

Categoría M<sub>3</sub>.- Transporte de personas con capacidad de más de 8 plazas además de la del conductor y con un peso superior a las 5 toneladas.

Categoría N<sub>1</sub>.- Transporte de mercancías, con un peso que no exceda de 3,5 toneladas.

Categoría N<sub>2</sub>.- Transporte de mercancías, con un peso superior a 3,5 toneladas sin que exceda de 12 toneladas.

Categoría N<sub>3</sub>.- Transporte de mercancías, con un peso superior a 12 toneladas.

El ciclo de ensayos transitorio para vehículo toma en cuenta las características de éste y no sólo las del motor. Es aplicable principalmente para los vehículos ligeros destinados al transporte de personas. Si su peso no excede de 2840 Kg. (categoría M<sub>1</sub>) se aplicarán las partes I y II. Si su peso es igual o menor a 3.5 toneladas (categoría M<sub>2</sub>), se aplicará la parte I(10).

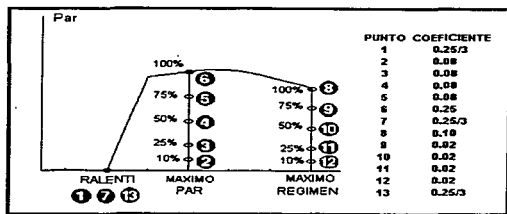


Fig.IV.1.- Ciclo 13 Modos Para Ensayos en Motor.

Las categorías N<sub>1</sub> y N<sub>2</sub> pueden optar para ser similares en banco de rodillos en vez del banco de motor, si su peso no excede de 2840 kg.

Fecha de Aplicación	Vehículos de la categoría correspondiente	Límite
1º de enero de 1993	Principalmente M <sub>1</sub> y M <sub>2</sub>	0.14 (g/km.)

Tabla IV.2.- Normativa de Emisión de Partículas para Ensayos con Vehículos mediante Ciclo Transitorio.

Fecha de Aplicación	Potencias menores de 85 kW	Potencias mayores de 85 kW
1º de enero de 1993	0,63 (g/kW-h)	0,36 (g/kW-h)
1º de enero de 1996	0,30 (g/kW-h)	0,15 (g/kW-h)

Tabla IV.3.- Normativa de Emisión de Partículas para Ensayos en Motor mediante el Ciclo 13 Modos.

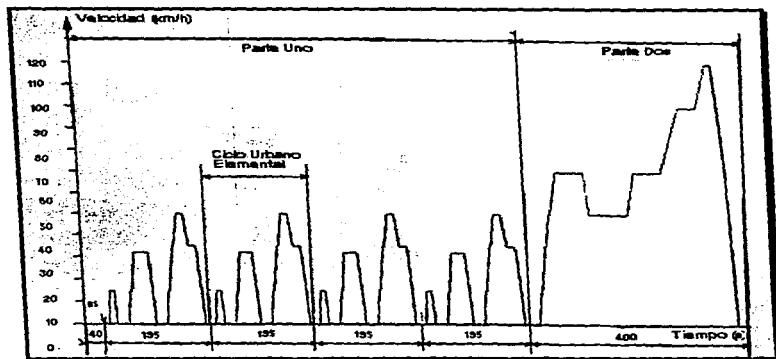
A su vez, la categoría M<sub>2</sub> puede optar por el banco de motor. Esta flexibilidad para la homologación de los vehículos se basa en la aplicación de incentivos fiscales y en que, los niveles de emisiones sean inferiores a los previstos en la normativa vigente.

En cuanto a los motores que se homologan en banco de motor, son principalmente de servicio pesado que corresponden a las categorías: M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, N<sub>2</sub> y N<sub>3</sub> respectivamente.

La masa de partículas que se obtenga en la prueba de ciclo transitorio (en dinamómetro de rodillos) y en banco de motor, se definen en las tablas IV.4 y IV.5 respectivamente.

En lo que respecta a la política de los Estados Unidos, el ciclo 13 modos para emisiones gaseosas fue desarrollado en los años 60's, al tiempo que se establecen los estándares para el nivel de humos.

En los años 70's se desarrolló el ciclo transitorio para evaluar las emisiones y se establecen los factores de vida útil. En esta misma década, se establecieron 2 políticas, la de la Environment Protection Agency (EPA) y la del California Air Resources Board.



## CARACTERÍSTICAS DEL CICLO

PARTE I	PARTE II
velocidad promedio : 19 km/h	velocidad promedio : 62,6 km/h
tiempo efectivo de rodaje : 195 s	tiempo efectivo de rodaje : 400 s
distancia recorrida por ciclo : 1,013 km	distancia recorrida : 6,955 km.
por 4 ciclos : 4,052 km	máxima velocidad : 120 km/h
	máxima aceleración : 0,833 m/s <sup>2</sup>
	máxima deceleración : -1,389 m/s <sup>2</sup>

Fig. IV.2.- Ciclo Transitorio Partes Urbana y Extraurbana Directiva 91/441/CEE.

En los 80's ambas instituciones aplicaron los estándares particulares que habían definido.

Las normas que ya han entrado en vigor son las llamadas U.S. 87 y que contemplan 4 categorías de vehículos<sup>[10]</sup>:

- Los automóviles.
- Camiones de servicio ligero de menos de 1700 kg.
- Camiones de servicio ligero de más de 1700 kg.
- Los grandes camiones (heavy duty) y los autobuses de pasajeros.

La tabla IV.5 condensa las características del vehículo, las fechas de aplicación y los niveles de emisión.

La evolución de los estándares de los motores de servicio pesado, se pueden observar en la figura IV.3. En dicha figura, además de señalar los límites de la emisión de partículas, así como las fechas de su aplicación, se observan los valores "objetivo" relacionados con la producción. A ese respecto se toman en cuenta, la variabilidad de unos motores respecto a otros y el deterioro que sufren éstos durante su vida útil.

La industria manufacturera de motores Diesel de este país ha declarado que, estos motores alcanzarán estos niveles no sólo cuando estén nuevos, sino también durante su vida útil que, son períodos de rodaje de 177000 kilometros para motores de servicio ligero-pesado y de 322000 kilometros para motores de servicio pesado<sup>[12]</sup>.

En este sentido se han definido políticas muy concretas como por ejemplo, fijar un límite de deterioro de 0.05 g/km, al transcurrir 5 años o 80450 km. Aplicable para los años 2004/2007.

Fecha de Aplicación	Características del Vehículo	Partículas (g/km.)
desde 1987	automóvil	0.124
desde 1987	camión de servicio ligero, hasta 1700 kg.	0.16
1987 a 1989	camión de servicio ligero, más de 1700 kg.	0.31
desde 1990	camión de servicio ligero, más de 1700 kg.	0.28

Tabla IV.4.- Normativas de la Emisión de Partículas en U.S.A[10].

En este caso, la puesta a punto de dispositivos de postratamiento (trampas de partículas y catalizadores) será definitiva.

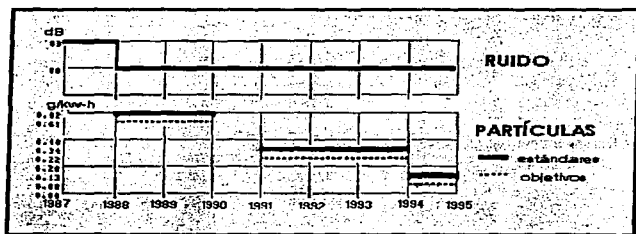


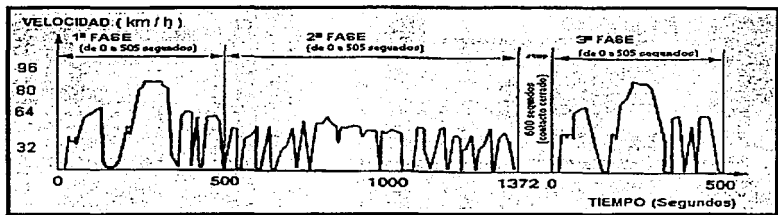
Fig. IV.3. Regulación de Emisiones en los Motores Diesel Según EPA y Desarrollo de Objetivos[10]

El ciclo de procedimiento de pruebas para vehículos, es el denominado: Ciclo US Federal Test Procedure (FTP) 75, diseñado para simular condiciones de manejo en zonas urbanas y en autopista (fig.1.4). Para pruebas de motores en banco de ensayos, se utiliza un ciclo de 13 modos de operación cuyas características se resumen en la tabla 101.

Modo	Régimen	% Carga	Tiempo en (min) de cada modo	
			Mínimo	Máximo
1	ralentí	-	4.5	6.0
2	intermedio	2	4.5	6.0
3	intermedio	25	4.5	6.0
4	intermedio	50	4.5	6.0
5	intermedio	75	4.5	6.0
6	intermedio	100	4.5	6.0
7	ralentí	-	4.5	6.0
8	nominal	100	4.5	6.0
9	nominal	75	4.5	6.0
10	nominal	50	4.5	6.0
11	nominal	25	4.5	6.0
12	nominal	2	4.5	6.0
13	ralentí	-	4.5	6.0

Tabla IV.5.- Características del Ciclo de Prueba 13 Modos, USA<sub>(101)</sub>





## CARACTERÍSTICAS DEL CICLO

Longitud	Duración	velocidad	Fases
17.7 km.	1887 segundos	34 km./h	1.- Transitoria en frío 2.- Estabilizada 3.-Transitoria en caliente

Fig.IV.4.- Ciclo U.S. Federal Test Procedure (FTP) 75[10].

Aunque no se pretende hacer un desglose minucioso de las políticas europea y americana, en materia de emisión de partículas, se hace una comparación muy somera de ambas:

- Existe una cierta convergencia en cuanto a intenciones sin embargo, no hay similitud entre las normas.

- En las unidades de medida ya existe una mayor convergencia, se ha pasado de los (g/prueba) a los (g/km.) o (g/milla) para pruebas en vehículos y, (g/kW-h) o (g/hp-h) para pruebas en motores.

El ciclo FTP 75 es sensiblemente diferente al ciclo ECE + EUDC europeo y desemboca en resultados generalmente inferiores del primero. En contraposición, el ciclo 13 modos para la prueba de motores de ambas normativas, es básicamente el mismo.

**CAPITULO V****DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MINITÚNEL.****V.1.- Túneles de Dilución.**

Para la medición de partículas emitidas por MCI se han diseñado ciertos dispositivos, llamados túneles de dilución, en los cuales se propicia un mezclado homogéneo entre los gases de escape y aire limpio. En principio, estos túneles se construyeron para muestrear partículas procedentes de los motores de encendido provocado y posteriormente, se han usado para motores Diesel.

El propósito de diluir dichos gases es simular las condiciones atmosféricas en las que se completan los procesos de formación, antes de su recolección.

Existen túneles de dilución que, dependiendo de su tamaño, cumplen este cometido con mayor o menor capacidad. Los grandes túneles (fig. V.1) pueden diluir íntegramente o parcialmente el caudal de gases de escape, dependiendo del tamaño del motor, siendo su característica fundamental la de poder diluir dichos gases, también en condiciones transitorias.

Las dimensiones de un túnel de dilución no son fijas, existen tantos diseños como necesidades se tengan de diluir y muestrear los gases de escape de un motor dado. La figura V.1 muestra las dimensiones de 2 túneles de un mismo modelo, de la firma Pierburg.

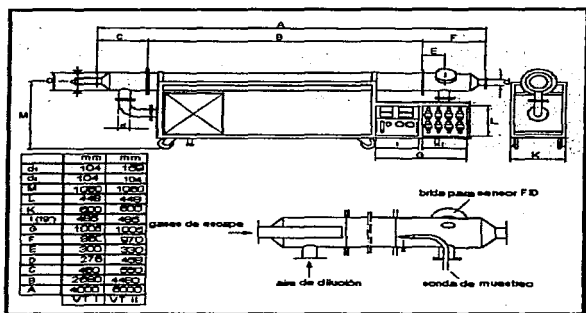


Fig V.1. Túnel de Dilución Cuyas Dimensiones Corresponden al Utilizado por la EPA(10).

Otros túneles de dimensiones más reducidas, denominados **mintúneles** de dilución (figura V.2) realizan esta función aunque, sólo en condiciones estables del motor. No son capaces de realizar una dilución adecuada en pruebas de ciclos transitorios. No obstante, presentan ciertas ventajas que se comentan más adelante.

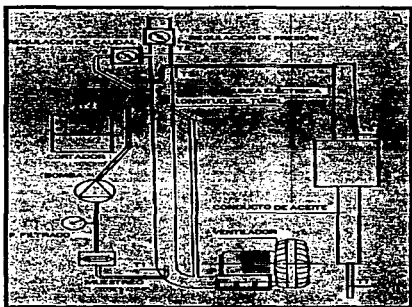


Figura V.2. Esquema de un Minitúnel de Dilución.

## V.2.- Minitúnel de Dilución.

El minitúnel de dilución puede considerarse como un caso particular de túnel de dilución, trabajando siempre con dilución parcial y con unas dimensiones más reducidas (y como consecuencia menor costo), que lo invalidan para homologación aunque no para trabajos de investigación y desarrollo. Encuentran la dificultad de encontrar un *split ratio* independiente de las condiciones de funcionamiento del motor. Esto se puede conseguir si, previamente a la extracción, se canaliza el gas de escape por muchos tubos delgados en los que se controla la presión, algunos investigadores aseguran haber encontrado con este sistema diferencias menores del 5% respecto a las medidas realizadas con el túnel de dilución de flujo total [10].

Al usar un minitúnel de dilución se puede controlar, entre otros factores: la temperatura de muestreo (que no debe ser mayor de 52°C), la humedad relativa y la tasa de dilución, la cual se define como:

$$\tau = \text{gasto de gases diluidos/gasto de gases crudos (} m_{gd} / m_{gc} \text{)}$$

o bien

$$\tau = \text{caudal de gases diluidos/caudal de los gases crudos (} q_{gd} / q_{gc} \text{)}$$

Otro parámetro de interés, es la relación entre la fracción de los gases de escape que se diluye y el gasto total de éstos:

$$f_{gc} = m_{gc} / M_{gc}$$

### V.3.- Diseño Conceptual del Minitúnel.

En el presente trabajo se utiliza la norma CEE - R49 (Comunidad Económica Europea) para la implementación del minitúnel, con ella es posible cuantificar los gases producto de la combustión del motor a Diesel en estado estable. El procedimiento para las pruebas es el siguiente: se toma una muestra de gases a la salida del escape del motor a Diesel, que se lleva a una cámara de dilución para mezclar con aire atmosférico, previamente filtrado en la entrada del ventilador, tomando en consideración una relación aproximada 4:1 de aire-gases respectivamente, después la mezcla se pasa por un venturi, con el propósito de lograr una mezcla homogénea. A la salida del venturi se tiene una cámara estabilizadora de flujo con el objetivo de controlar la mezcla, por último se realiza una cuantificación de los gases. La CEE-R-49 recomienda que la recolección de partículas se debe de realizar en un intervalo de tiempo de 4.5 minutos como mínimo y 6 como máximo.

Los contaminantes sujetos a control según la Norma Oficial Mexicana (NOM) son hidrocarburos sin quemar (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas carbonáceas producto de la combustión incompleta en los cilindros del motor (PM u hollín).

El objetivo fundamental del proyecto es medir y analizar los gases de combustión del motor y verificar que éste satisfaga los límites de emisión establecidos para 1998 por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los EUA (EPA en lo sucesivo por sus siglas en inglés) y para el Estado de California del mismo país, aunque debido a limitaciones monetarias no es posible por el momento invertir en un túnel de dilución total con celda para análisis transitorio, por lo que el minitúnel sólo es capaz de llevar a cabo mediciones en estado estable (CEE-R-49) y no en estado transitorio como marca la EPA.

Es importante cuantificar los ppm de los diferentes contaminantes para poder establecer, a partir de ésto, normas más estrictas para que en el futuro se produzcan mejores combustibles: o en su defecto exponer a la opinión pública la calidad de los combustibles que se producen en el país, además de someterlos a prueba bajo normas internacionales.

#### **V.4.- Consideraciones Teóricas del Diseño**

Como lo establecen las normas internacionales (EPA y CEE), el minitúnel se calcula para construirse de un material resistente como lo es el acero inoxidable cédula 40, tipo AISI SS-316. Este material tiene una excelente resistencia a la corrosión, con un contenido de 12% de Cr., lo cual es importante ya que al exponerse con el oxígeno a altas temperaturas evita la formación de óxidos de hierro, de acuerdo a las condiciones de operación del mismo.

Una de las principales características del diseño del túnel de dilución, es su facilidad para desmontar cada uno de sus elementos que lo componen, para darle mantenimiento.

Además las bridas de unión entre los elementos del minitúnel se fabricaron del mismo material. Para evitar fugas entre uniones se utilizaron O-rings (sellos) de Neopreno, resistente a temperaturas altas con un rango de  $-54^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$  con una dureza shore A(70) ASM 3209.

#### **V.4.1.- Relaciones Empíricas.**

Entre las relaciones empíricas más importantes utilizadas para el diseño propio del Minitúnel son las Ecuaciones de Transferencia de calor por Convección Forzada para conductos con flujo-turbulento estas ecuaciones se deducen de las Ecuaciones generales de Conservación de Energía[13].

Una técnica convencional que se usa en la correlación de datos experimentales es el análisis dimensional, en el que, se deducen grupos adimensionales adecuados, tales como los números de Reynolds y Prandtl, a partir de consideraciones exclusivamente dimensionales y funcionales. Por supuesto, existe la suposición de similitud de campo de flujo y perfil de temperatura, para superficies de enfriamiento geoméricamente similares.

Los sistemas de flujo en donde las propiedades del flujo varían ampliamente con la temperatura y sistemas de flujo turbulento son mucho más complicados, pero son de un gran interés práctico en el diseño de intercambiadores de calor y equipo similar de transferencia de calor.



Estos problemas más complicados pueden resolverse algunas veces en forma analítica.

Para propósitos de diseño e ingeniería las correlaciones empíricas son casi siempre de enorme utilidad práctica.

Para el desarrollo del diseño del minitúnel se consideran las siguientes relaciones empíricas tomando en cuenta las características a las cual se nos plantean en las normas internacionales antes mencionadas.

La temperatura global que representa promedio de energía o condiciones. Por tanto para el flujo en tubo que se muestra en la siguiente figura, la energía total adicionada puede expresarse en términos de la diferencia global de temperatura por:

13):

$$q = m c_p (T_2 - T_1) \quad (5.1)$$

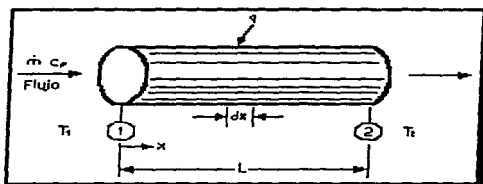


Fig. V.4.1 Transferencia de calor total en términos de diferencia global de temperatura [13].

Siempre y cuando  $C_p$  (Calor específico) sea razonablemente constante a través de la longitud diferencial  $dx$  el calor adicionado  $dq$  puede expresarse ya sea en términos de una diferencia global de temperatura o en términos del coeficiente de transferencia de calor.

$$dq = mc_p dT_b = h(2\pi r) dx(T_w - T_b) \quad (5.2)$$

En donde  $T_w$  y  $T_b$  son las temperaturas de pared y global en el lugar particular  $x$ . La transferencia de calor total también puede expresarse como:

$$q = hA(T_w - T_b)_{av} \quad (5.3)$$

En donde  $A$  es el área total de superficie para la transferencia de calor, debido a que tanto  $T_w$  como  $T_b$  pueden variar a lo largo de la longitud del minitúnel, se deberá adoptar un proceso promedio adecuado para utilizarse en la ecuación anteriormente mencionada  $q_{13.1}$ .

Para tubos lisos con flujo turbulento completamente desarrollado, Dittus y Boelter recomiendan la siguiente relación  $q_{13.1}$ :

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5.4)$$

En esta ecuación (5.4) las propiedades se evalúan a la temperatura global del fluido y el exponente  $n$  tiene el valor de 0.4 para calentamiento del tubo.

La experiencia física, basada en la experiencia adquirida con los análisis de los conocimientos de transferencia de calor por convección indicarían sin lugar a dudas una dependencia del proceso de transferencia de calor con el campo de flujo y por consiguiente, con el número de Reynolds. Las rapidezces relativas de difusión de calor y momento están relacionadas por el número de Prandtl, de manera que se espera que este número sea un número significativo en la solución final.

Es evidente la dependencia de transferencia de calor con los números de Reynolds y Prandtl. Hace falta generalizar los resultados de estos experimentos para llegar a una ecuación empírica que represente todos los datos.

La ecuación (5.4) es válida para el flujo turbulento totalmente desarrollado dentro de tubos lisos, para fluidos con números de Prandtl comprendidos entre 0.6 y 100 y diferencias moderadas de temperatura entre la pared y las condiciones del fluido (13)..

#### V.4.2.- Cálculos

Además de los requerimientos antes mencionados se deben considerar los siguientes datos:

- Flujo total de la muestra	$F_r = 3.4 \text{ m}^3/\text{min}$	
- Flujo de aire	$F_a = 13.25 \text{ m}^3/\text{min}$	
- Temperatura de la mezcla diluida	$T_m = 150^\circ\text{C}$	
- Densidad	$\rho = 0.501 \text{ Kg}/\text{m}^3$ .	
- Número de Prandtl	$Pr = 0.684$	
- Viscosidad dinámica	$\eta = 33.3 \times 10^{-5} \text{ Kg}/\text{m.s.}$	
- Conductividad térmica	$k = 0.0523 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$	
- Diámetro nominal	$D_{nom} = 0.1016 \text{ m}$	
- Número de Reynolds	$Re = \rho Vd/\eta = 4250$	(5.5)

La mezcla se realiza bajo una corriente turbulenta por lo que el coeficiente obtenido por el calor que se transfiere a una temperatura y concentración uniforme en el núcleo turbulento de enfriamiento es (13).

$$Nu = hd/k = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad Nu = 17\,507 \text{ (Nusselt)} \quad (5.6)$$

$$h = k/d \cdot Nud \quad h = 93.72 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.7)$$

Los gases de combustión en la cámara de dilución, crean un gradiente de temperatura a la pared<sub>(13)</sub>.

$$\nabla t = -3u \cdot \nabla T/4(1+\pi a/8)T \quad (5.8)$$

$$\text{Viscosidad cinemática} \quad u = 66.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

T= temperatura

a = Coeficiente térmico de alojamiento.

La fracción masiva de partículas en la mezcla se presume debe de tener una posición radial dentro del núcleo turbulento<sub>(13)</sub>.

$$\nabla T = (dT/dr)_w \quad (5.9)$$

La conservación de energía se define<sub>(13)</sub>:

$$hA(T-T_w) = kA(dT/dr)_w$$

(5.10)

$$(dT/dr)_w = -h/k(T-T_w) \quad (5.11)$$

#### V.4.2.1.- La Cámara Mezcladora.

Se hizo con la finalidad de realizar una mezcla de aire-gases de acuerdo a las normas de la CEE, se observa de acuerdo a las características del diseño y además los cálculos realizados para estos elementos se obtienen de las ecuaciones de Conservación de Energía y de transferencia de calor<sub>(13)</sub>.

Al inicio del minitúnel se utilizaron principalmente las referencias del diseño realizado por Sierra Instrument de U.S.A. (11), que muestra los parámetros y las relaciones que necesarias para el desarrollo de su propio diseño.

#### V.4.2.2.- Tubo Venturi

Es otro de los elementos del minitúnel y el más complicado en su diseño de acuerdo a las características que se presenta, debido a las necesidades propias del equipo.

Esta parte del diseño se lleva a cabo de la siguiente manera con la finalidad de obtener una mezcla totalmente homogénea de los gases y aire en la cámara mezcladora, por lo tanto se realizan los cálculos utilizando las ecuaciones de Conservación de Energía, y de transferencia de calor generales(13), esto considerando y calculando para el minitúnel en general, pero particularmente se utilizan las ecuaciones propias del diseño de un Venturi a base de las gráficas de coeficientes de descarga,  $C_D$ ,  $\beta_{(33)}$ , etc.. referidas en el Apéndice.

Se calcula el diámetro de la garganta, velocidad del flujo entre otros, dado que para el diseño de estos elementos todos deben considerarse.

El tubo Venturi es uno de los elementos más importantes en el diseño del minitúnel, cuya función es lograr una mezcla homogénea a través del flujo turbulento producido por éste, entre la muestra de los gases de combustión y el aire generado por el ventilador y a su vez provoca a la salida una elevación de presión o ganancia estática ("static regain", en la literatura en lengua inglesa).

Los cálculos realizados para el diseño del venturi son(33):

$$Q = C_n A_1 [2(\Delta P/p(1-\beta^4))]^{1/2} \quad (5.12)$$

$$D_{\text{nominal}} = 0.1016 \text{ m}$$

$$Q = 0.275 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = 50 \text{ m/s}$$

$$\Delta P = 1.47 \text{ kPa.}$$

$A_1$  = garganta del venturi

Coficiente de descarga

$$C_n \approx 1$$

$$\beta = d/D$$

(5.13)

densidad de la mezcla

$$\rho = 0.501 \text{ Kg/m}^3$$

diámetro de la garganta del venturi

$$d = 0.0509 \text{ m}$$

#### V.4.2.3.- Tubo Con Rejillas.

Este elemento realiza una función de primordial importancia y en especial a las características del flujo que se obtiene después del tubo venturi con un flujo totalmente turbulento. Por lo tanto se hace necesario de provocar un flujo laminar que se requiere posteriormente para la toma de muestras (aire-gases).

Por lo mismo para el diseño de este elemento del minitúnel se le insertan algunas rejillas dentro del tubo en posición paralela provocando un flujo laminar necesario al final para la toma de muestras. Es decir en el flujo laminar las partículas fluidas se mueven en trayectorias paralelas formando entre ellas capas o láminas. El flujo laminar esta gobernado por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular es decir la tensión cortante es igual al producto de la viscosidad del fluido por el gradiente de velocidades o bien donde este es de una longitud calculada con las ecuaciones de Conservación de Energía y las ecuaciones que intervienen en un flujo laminar con las características de separación suficiente entre ellas para obtener las condiciones necesarias que se requieren(33).

$$\tau = \mu \cdot dv/dy$$

(5.14)

Con estas características principales de este elemento del minitúnel, se puede obtener el flujo laminar necesario a la salida para tomar las muestras de la mezcla anteriormente mencionada, de tal manera que se cumplan las normas Europeas.

#### V.4.2.4.- Cámara Estabilizadora

Por ultimo se tiene en el diseño una cámara más denominada estabilizadora, que sirve para obtener las muestras y como su nombre lo indica el estabiliza el flujo. Como puede apreciarse únicamente se utilizan las ecuaciones de Conservación de Energía y de transferencia de calor para calcular de esta manera su longitud y respetar el diámetro de acuerdo a la relación que debe existir según las normas de la Comunidad Económica Europea (CEE) [Apéndice A].

Por lo tanto de esta manera queda totalmente calculado y teniendo las características del flujo al final de la mezcla como son temperatura, tipo de flujo o sea laminar, Etc.

### V.5.- Desarrollo del diseño del minitúnel de dilución de gases

La tubería para transportar la muestra de gases del tubo de escape del motor al minitúnel es de acero inoxidable, para disminuir el riesgo de contaminar las partículas con óxidos de hierro ( $Fe_xO_y$ ) y a su vez tiene la función de disminuir la temperatura de los gases mediante intercambio térmico a través de las paredes con la atmósfera, de tal forma que al final del minitúnel donde se realicen las tomas de gases diluidos se tenga una temperatura máxima de  $52^{\circ}C$ . Considerando que en la toma de gases la distancia no exceda de 1000 mm. Cabe hacer mención que la muestra descarga en dirección del flujo y en la línea media del tubo de dilución.

El control de la presión en el interior del minitúnel, se regula mediante una bomba de succión debido a que se mantienen constantes las revoluciones del motor del ventilador de aire para dilución. Las variaciones de presión en el túnel de dilución bajo este esquema de control no van a exceder de  $\pm 250$  Pa.

La señal de mando para el control de flujo de masa de dilución, se toma de la alimentación del combustible. un medidor digital envía una señal a la válvula de entrada de gases de escape y a la válvula del ventilador para cumplir la relación aproximada 4:1 de la mezcla aire-gases respectivamente.

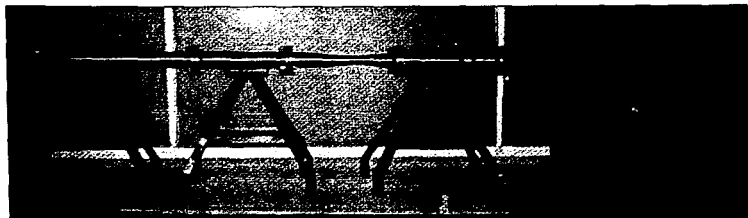
El aire accionado por el ventilador debe filtrarse para eliminar partículas mayores a  $1\mu\text{m.}$ , que pudiera haber en la atmósfera y además este aire deberá tener una temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ .

De acuerdo al presente diseño el túnel de dilución tiene un diámetro suficientemente pequeño para que se produzca turbulencia y así obtener una mezcla homogénea de aire-gases, considerando un número de Reynolds mayor a 4250.

El sistema de toma de muestra de gases opera continuamente durante las pruebas que se realicen. Por lo que se tendrá una válvula unidireccional tipo check que permite la entrada de la muestra de gases, pero no así el retorno de estos. En la fotografía V.4.1 se presenta el Minitúnel.

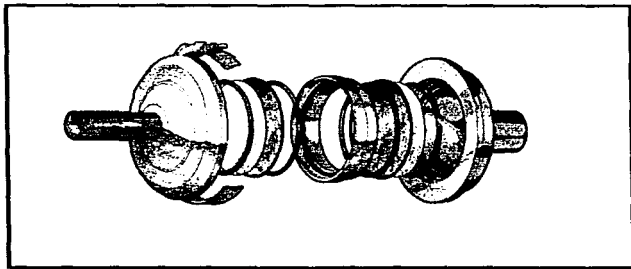
La toma de salida tiene un diámetro de 50.8 mm para la obtención de muestras de dicha mezcla diluida, para cuantificar la cantidad de partículas sólidas suspendidas en los gases de combustión, se utilizan dos filtros conectados en serie llamados primario y secundario para garantizar la recolección total de dichas partículas.





fotografía V.4.1. Minitúnel

Los filtros son de material plástico de teflón con marca comercial Micropore®. Los portafiltras al igual que el resto de la tubería se construyen de acero inoxidable con un mecanismo que permite el cambio de los filtros de manera rápida y fácil, además cuenta con conexiones rápidas para facilidad de manejo del sistema como se muestra en la fotografía V.4.2.



fotografía V.4.2. Portafiltro

**CAPITULO VI.****PRINCIPIO DE OPERACIÓN**

De acuerdo al tamaño del motor, se conduce hacia el túnel ya sea el caudal íntegro de los gases de escape o una fracción de éste. Ya en su interior, se mezcla con aire limpio y fresco que se suministra por medio de un ventilador.

El lapso de tiempo que se requiere para que se diluya la muestra, desde el punto de inyección hasta el punto de filtrado, depende del caudal de gases, la longitud y diámetro del túnel.

Ese tiempo de residencia, permite que se desarrollen los procesos físicos y químicos mediante los cuales las partículas crecen, se aglomeran y se completan las reacciones entre las fases.

El túnel debe calibrarse para asegurar una medida confiable. Una vez calibrado, el flujo puede variarse usando válvulas calibradas y medidores de gases secos.

Un balance de masa, haciendo referencia a la figura VI.1. permitirá determinar la fracción de los gases de escape que se diluyen[21].

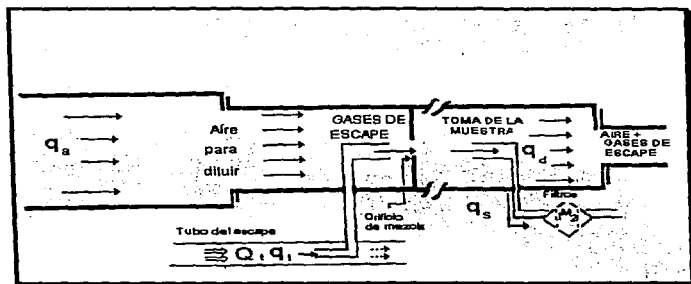


figura VI .1. Dilución de una Fracción de los Escape.

El gasto total en el túnel es,

$$m_a + m_e = m_s + m_d \quad (6.1)$$

y cuyos caudales respectivos son,

$$q_a + q_e = q_s + q_d \quad (6.2)$$

donde los subíndices indican:

- a representa el aire de dilución
- e gases de escape crudos
- s muestra de gases diluidos
- d gases diluidos no muestreados

El caudal  $q_1$  se conoce mediante el medidor de flujo del sistema de muestreo,  $q_2$  midiendo los gases diluidos no muestreados Y  $q_3$  mediante un orificio calibrado u otro dispositivo. De esta manera,  $q_0$  puede determinarse con:

$$q_0 = q_1 + q_2 - q_3 \quad (6.3)$$

Los gases que constituyen la muestra, se filtran para recolectar las partículas. Dichos filtros se pueden clasificar en 2 tipos principales: de **fibras** y de **membrana**.

Los de fibras, pueden recolectar un amplio rango de tamaños de partículas y provocan bajas caídas de presión. Sin embargo, las partículas se incrustan profundamente y no son fácilmente accesibles al microscopio.

Las membranas están hechas normalmente de fluorocarbono, con un tamaño de poro muy regular, recolectan partículas de un cierto tamaño dependiendo del diámetro de dicho poro. Originan una caída de presión relativamente elevada.

El tamaño de los filtros puede variar, siendo común el de 70mm de diámetro con superficie neta de 60 mm de diámetro. Dichos filtros deben acondicionarse en una cámara de humedad controlada, antes y después de la recolección de partículas para pesarse y así, con la diferencia, se obtiene la masa de partículas de la muestra ( $m_p$ ).

La emisión total de partículas ( $M_p$ ) se calcula a partir de la masa diferencial de partículas ( $m_p$ ) y extrapolando linealmente la fracción muestreada. La secuencia, para determinar la emisión de partículas se muestra a continuación:

## VI.1 Operación con Dilución Parcial

En caso de que el túnel opere con dilución parcial se toma la masa de partículas recolectada con referencia a la fracción de gases muestraea,

$$m_p / q_s$$

este resultado se extrapola a la masa que se recolectaría en todo el caudal diluido,

$$m_o = (q_s + q_d) (m_p / q_s) \quad (6.4)$$

análogamente al primer paso, se toma esta masa con respecto a la fracción de gases de escape del motor,

$$m_o / q_e$$

y se multiplica por el caudal total de gases de escape del motor

$$M_p = (m_o / q_e) Q_e \quad (6.5)$$

donde  $q_e$  se determina mediante  $q_e = q_s + q_d + q_o$  y  $Q_e$  por:

$$Q_e = (m_{comb} + m_{ake}) / \rho_{gas\ esc.} \quad (6.6)$$

Esto es :

$$M_p = [m_p Q_e (q_s + q_d)] / (q_e q_s) \quad (6.7)$$

## VI.2 Operación con Dilución Total

En el caso que se diluya el total de los gases de escape

$$Q_e = q_e \text{ por tanto, } M_p = [m_p Q_e (q_i + q_e)] / (q_e q_i)$$

se reduce a:

$$M_p = (m_p/q_i) (q_i + q_e) \quad (6.8)$$

Existe otro método para calcular indirectamente el caudal de gases de escape que se diluye; mediante gases trazadores como los  $\text{NO}_x$  o el  $\text{CO}_2$  que prácticamente están "congelados" en las condiciones que salen por el escape del motor.

Se mide la concentración de alguna de estas especies tanto en el escape como en el túnel de dilución (propiedad intensiva) y a partir de estos datos, se puede determinar la fracción de gases de escape que se diluye:

$$q_e = ([\text{NO}_x]_{\text{tun}} / [\text{NO}_x]_{\text{esc}}) (q_d + q_e) \quad (6.9)$$

## VI.3 Principio de Operación del Minitúnel

Existen diferentes diseños de minitúneles de dilución y por tanto, algunas características pueden variar de un modelo a otro (dimensiones, control de la tasa de dilución, acondicionamiento de la muestra, etc.). Sin embargo, el principio básico de operación es común.

El equipo que se describe está representado por el esquema de la figura Vi.2. en el cual, el ventilador aspira simultáneamente una fracción de los gases de escape (a través de la línea de muestreo) y el aire para diluirlos.

Un ventilador suministra el aire y la válvula (V1) ajusta la tasa de dilución para obtener una temperatura de filtrado  $T_1 = 50^{\circ}\text{C}$ . Además, para garantizar que dicha temperatura se mantiene en el rango adecuado, se cuenta con una calefacción eléctrica para evitar todo riesgo de condensación de agua dentro del portafiltras o sobre los filtros.

Una bomba de vacío aspira una fracción de los gases diluidos a través de 2 filtros que se colocan en serie sin hacer contacto entre ellos, y mediante un contador volumétrico se puede preseleccionar el volumen muestreado.

La forma de calcular la masa de partículas emitida, es la misma que se ha descrita para los túneles de dilución parcial.

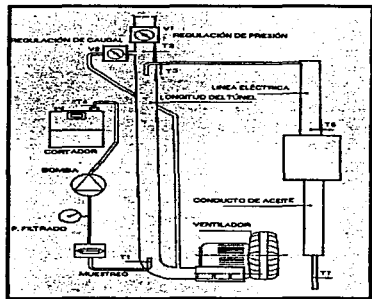


Figura Vi.2. Esquema de un Minitúnel de Dilución.

## VI.4 Operación de una Sonda de Muestreo

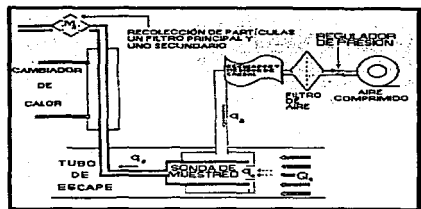


Figura VI.3. Esquema de la Operación de una Sonda de Muestreo.

La figura VI.3. muestra un esquema de la sonda de muestreo utilizada en los ensayos experimentales del presente trabajo.

Dicho sistema permite succionar y diluir simultáneamente una fracción de los gases de escape. El mezclado se inicia propiamente en la zona de muestreo de manera que se evita trasladarla hasta un túnel o minitúnel de dilución. Esta característica constituye la principal peculiaridad de la sonda.

El gas de dilución proviene de un depósito de aire comprimido, aguas arriba de la boquilla que toma la muestra, y su caudal se ajusta manualmente de manera que se puede elegir una tasa de dilución, adecuada al punto de funcionamiento del motor o a la duración.

La temperatura a la que se realiza el filtrado ( $T_f < 52^\circ\text{C}$ ) se mide con un termopar situado en el portafiltros. Dicha temperatura, puede controlarse mediante la tasa de dilución, o mediante un cambiador de calor aire - gas que se localiza aguas arriba de la toma de muestras.



Las partes que componen este equipo son de funcionamiento sencillo y consecuentemente, el sistema de control no requiere ser muy complejo:

1.- Sonda.

Está compuesta por una parte del sistema neumático que comprende, desde la boquilla de la sonda hasta el portafiltras.

2.- Armario móvil.

En él se ubica la otra parte del circuito neumático y la unidad de cálculo para la gestión de los captadores y accionadores, así como el enlace para la unidad de control.

3.- Unidad de control.

Constituye el medio para el diálogo entre el operario y el equipo. Mantiene el control de la bomba de vacío, el reglaje de los caudales consigna, de la tasa de dilución y la secuencia de muestreo.

Un poco antes de iniciar cada ensayo se eligen los valores consigna de: la tasa de dilución ( $\tau$ ), el caudal del aire de dilución ( $q_1$ ) y el caudal de gases diluidos ( $q_2$ ), los cuales están relacionados entre sí mediante,  $\tau = q_2/(q_2 - q_1)$  como se ha indicado .

Una vez iniciado el ensayo, la unidad de control muestra la evolución de la presión y temperatura de filtrado ( $P_f, T_f$ ), el tiempo de muestreo ( $t_m$ ) que son los segundos que dura el ensayo y, el volumen de muestreo ( $V_m$ ) que es un cálculo interno que realiza la sonda:

$$V_m = (q_2 - q_1) t_m$$

La máxima presión de filtrado que puede medirse es de 200 mm Hg. después de este valor la unidad de control para la bomba, ésta también puede detenerse si el tiempo de muestreo es mayor a 30 minutos. Una vez terminado el ensayo se observa el estado de los filtros y en caso de que alguno de ellos esté roto, se repite dicho ensayo.

Cuando se retira el portafiltras, en su lugar se coloca una barra de aluminio que sella el conducto de muestreo, el propósito es habilitar el circuito de purga.

El cálculo del gasto específico de partículas ( $M_{ep}$ ) se realiza de forma análoga al minitúnel y túnel de dilución, siguiendo la secuencia que se describe a continuación:

$$M_{gc} = M_{aire} + M_{comb} \text{ [g/s]} \quad (6.10)$$

$$m_{gc} = V_{muestro} \rho \text{ [g]} \quad (6.11)$$

$$M_p = M_{gc} (m_p / m_{gc}) \text{ [g/s]} \quad (6.12)$$

$$M_{ep} = M_p (3600 / potencia) \text{ [g/kW-h]} \quad (6.13)$$

siendo:

$M_{gc}$  gasto de gases crudos

$m_{gc}$  masa de gases crudos que atraviesa los filtros durante el ensayo

$V_m$  Volumen de gases crudos muestreados

$m_p$  la masa de partículas recolectada en los filtros durante los ensayos

$M_p$  el gasto total de partículas

$V_{mues}$  el volumen muestreado

$\rho$  la densidad de los gases diluidos.

## CAPITULO VII

# ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL MINITÚNEL DE DILUCIÓN

### VII.1 - Ventilador

Es el elemento que suministra la cantidad de aire atmosférico filtrado requerido de acuerdo a los gases de combustión.(fotografía VII.1.1.)



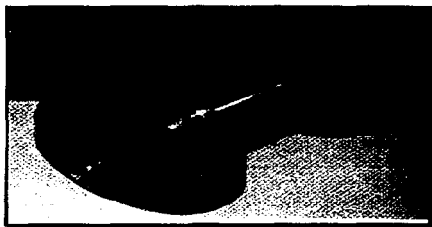
Fotografía VII .1.1. Ventilador

**Características:**

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| • Marca                    | Evisa New York, modelo NI904 A Arreglo 4                   |
| • Capacidad                | 13.31 m <sup>3</sup> /min (470 pcm)                        |
| • Presión estática         | 0.508 m col de H <sub>2</sub> O (20" col H <sub>2</sub> O) |
| • RPM del rotor            | 3500   |
| • RPM máximas              | 4200   |
| • Potencia en frío         | 2.76 kW  |
| • Potencia en caliente     | 2.76 kW  |
| • Temperatura de operación | 22 °C  |
| • Motor                    | 3.73 kW Siemens 2P., 3F                                    |
| • Rotor                    | Aluminio   |
| • Compuerta de descarga    | Tipo mariposa  |

**VII.2.- Cámara mezcladora**

En esta parte se realiza la mezcla de aire y gases. (fotografía VII.2.1.).



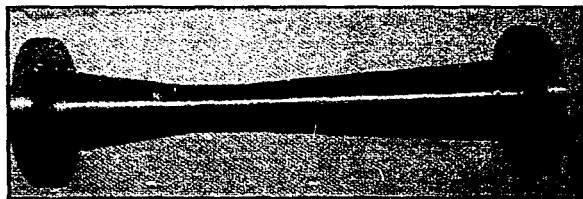
Fotografía VII .2.1. Cámara Mezcladora

**Características:**

- Material Tubo de acero inoxidable ced. 40, diámetro nominal 4"
- Longitud 30 cm (11.81")
- Diámetro exterior 11.43 cm (4.50")
- Diámetro interior 10.23 cm (4.026")

**VI.3.- Venturi**

Este elemento provoca un flujo turbulento para obtener una mezcla homogénea de aire-gases. (fotografía VII.3.1.).

**Características:**

- Material Tubo de acero inoxidable ced. 40, diámetro nominal 4"
- Longitud 50 cm (19.68")
- Diámetro exterior 11.43 cm (4.50")
- Diámetro interior 10.23 cm (4.026")

- Diámetro de garganta 5,115 cm (2.013")
- Ángulo de entrada 12°
- Ángulo de salida 6°

#### VI.4.- Tubo con rejillas

Permite obtener un flujo laminar. (fotografía VII.4.1.)



Fotografía VII.4.1 Tubo de Rejillas

##### *Características:*

- Material Tubo de acero inoxidable ced. 40, diámetro nominal 4",  
7 laminas de acero inoxidable de 2 mm (5/64") de espesor
- Longitud 40 cm (15.75")
- Diámetro exterior 11.43 cm (4.50")
- Diámetro interior 10.23 cm (4.026")

### VI.5.- Cámara Estabilizadora

Su función es la de estabilizar el flujo de la mezcla ya que al final de este se realiza el monitoreo de los gases. (fotografía VII.5.1.).



Fotografía VII .5.1 Cámara Estabilizadora

*Características:*

- |                     |   |
|---------------------|---|
| • Material          | Tubo de acero inoxidable ced. 40, diámetro nominal 4" |
| • Longitud          | 70 cm (27.55")  |
| • Diámetro exterior | 11.43 cm (4.50")                                      |
| • Diámetro interior | 10.23 cm (4.026")                                     |

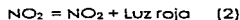
### VII.6.- Sistema de Medición de Partículas

Los sistemas que se utilizaran son los que establece la norma EPA, para realizar la cuantificación de los diferentes constituyentes (HC, NOx , CO y partículas). Los sistemas que se emplean son:

1. *Detector por ionización de flama (FID)*: Este metodo mide emisiones de hidrocarburos del escape, utiliza una flama producido por la combustión de hidrógeno y aire. Entonces ocurre un aumento en los iones y es por lo tanto no conductivo. Así, cuando una cantidad del gas analizado contiene hidrocarburos es premezclado con el hidrógeno, la concentración de iones se incrementa en grandes proporciones y la flama pasa a ser conductiva.

El FID no responde a los óxidos de carbono, óxidos de nitrógeno vapor de agua, o nitrógeno presentado en los gases del escape. Solo responde a componentes oxigenados tales como aldehidos, cetanos y alcoholes, los cuales resultan de la combustión incompleta o parcial de hidrocarburos.

2. *Detector infrarrojo no dispersivo (NDIR)*: Este método mide las emisiones de monóxido de carbono y bióxido de carbono del escape, utiliza un haz infrarrojo dirigido a través de dos celdas ópticas paralelas. Durante el análisis la radiación infrarroja se absorbe por los óxidos de carbono. La cantidad de radiación absorbida es proporcional a la concentración del gas.
3. *Detector por luminiscencia química (CHLD)*: Esta técnica se usa para determinar la presencia de óxidos de nitrógeno (NO /NOx) en una muestra. La medición del NO involucra la siguiente reacción :



En la reacción (1), el oxido nítrico y el ozono reacciona en la forma de óxido de nitrógeno en un estado de excitación.



En la reacción (2), la excitación del dióxido de nitrógeno inmediatamente revierte al estado base emitiendo fotones que consta esencialmente de luz roja. La intensidad de la luz roja se mide y es directamente proporcional a la concentración del NO. La misma técnica se usa para la medición de No<sub>x</sub>.

### **VII.7.- Sistema de Medición de Flujo**

Se emplean medidores de flujo másico, manómetros, termómetros., con la característica de que son electrónicos y con una salida analógica; la función de estos instrumentos es la de medir las condiciones en que se esta desarrollando la mezcla diluida.

### **VII.8.- Bomba de succión**

Sirve para hacer operar el filtrado de partículas en los elementos Micropore® de 70 mm de diámetro y vencer la caída de presión en los filtros primario y secundario.

## **CAPITULO VIII**

### **INSTRUMENTACIÓN DEL MINITÚNEL.**

#### **VIII.1.- Tipo de Instrumentos.**

En los sistemas de instrumentación que componen al minitúnel se está considerando evitar errores en el manipuleo de los instrumentos, provocados por la intervención del manejo manual; también para conocer el comportamiento de los flujos y poder manipular la cantidad de los flujos, y detectar diversas variables del minitúnel, por tales motivos se complementa el empleo de un sistema electrónico, teniendo en cuenta que la instrumentación tenga incluida una salida analógica ya sea en voltaje con valores de 0 a 5 volts o una corriente de 4 a 20 mA que será llevada a una tarjeta de adquisición de datos para procesar la señal. Se contará con una computadora personal que mostrará los resultados del procesamiento de datos de la tarjeta en la pantalla, y por medio de ésta se tendrá la manera de controlar los instrumentos y el funcionamiento general del minitúnel de dilución.

El sistema de instrumentación está compuesto por:

- Medidores de Flujo Másico
- Válvulas analógicas y digitales
- Medidores de presión
- Termómetros

## VIII.2.- Función de los Instrumentos.

### VIII.2.1.- Medidores de Flujo Másico.

El flujo másico de los tres gases descritos , se medirán con flujómetros másicos ABB Kent Taylor®, dichos medidores de flujo programables proporcionan una salida de señal analógica de 4 a 20 mA proporcionales al flujo másico a medir para que estas señales analógicas sean recibidas por la tarjeta adquisidora de datos se deberán de convertir a señales digitales de 1 a 5 V.

- *Medidor de flujo másico para combustible Diesel.*

Su función es mostrar la cantidad de masa del combustible que demanda el motor al aplicar una carga ó sin ella. En el instrumento se requiere un intervalo de 0 a 742 gr/min.

- *Medidor de flujo másico para aire y gases de combustión.*

La función es mostrar la cantidad de masa de aire y de gases de combustión que se hace pasar para la dilución; también para conocer si dichas cantidades de flujos cumplen con la relación 4:1 respectivamente, establecida por las normas mencionadas anteriormente.

En los medidores de flujo para el aire y gases de combustión se requiere un intervalo de 0 a 13.17 kg /min y 0 a 1.415 kg/min respectivamente con una resolución de 0.0283 m<sup>3</sup>/min.

### **VIII.2.2.- Medidores de Presión.**

La presión se medirá en medidores de presión que deben proporcionar una salida de señal digital de 1 a 5 V para que esta señal sea recibida por la tarjeta adquisidora de datos.

- *Manómetros*

Para conocer las variaciones de presión del flujo a través de una serie de pruebas de muestreo y se considera que el instrumento tenga un intervalo de 0 a 1 kg/cm<sup>2</sup> y con una resolución de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>.

- *Manómetro Diferencial de Presión.*

La función es la de conocer la diferencia de presión entre dos puntos del tubo venturi a través de una serie de pruebas de muestreo por donde circulan los gases de combustión ya diluidos. En donde se necesita del instrumento un intervalo de caída de presión de 17118.7 Pa con una resolución de 1 Pa.

### **VIII.2.3.- Termómetros.**

El empleo de los termómetros tiene dos aplicaciones: El primer caso conocer a qué temperatura se encuentran los gases de combustión en el momento en que se muestrean. El termómetro requiere de un intervalo de medición de 0 a 300° C con una resolución de 1° C.

La temperatura se medirá con un elemento sensor de temperatura del circuito integrado LM35 tipo industrial con encapsulado metálico que proporciona una señal de salida analógica de 4 a 20 mA para que estas señales analógicas sean recibidas por la tarjeta adquisidora de datos se deberán convertir a señales de salida digital de 1 a 5 V.

El segundo caso conocer la temperatura a la que llega al final de la cámara estabilizadora el flujo diluido y comparar si la lectura obtenida es menor a 52°C de acuerdo a las normas internacionales. El termómetro debe tener un intervalo de medición de 0 a 100 ° C, con una resolución de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

#### VIII.2.4.- Válvulas analógicas y digitales.

El empleo de la señal analógica es una señal continua en el tiempo es decir que las válvulas tienen un control fino para la abertura de las mismas para regular el flujo.

El empleo de la señal digital es una señal discreta en el tiempo es decir que las válvulas tienen un control de dos estados abierta o cerrada.

- *Válvula con servomotor*

Ésta contiene una señal analógica y su función es la de regular el flujo de aire que produce el ventilador y será controlada desde la computadora personal por medio de la tarjeta de adquisición y control de datos.

- *Válvula check*

Ésta tiene una señal digital para el control de dos estados abierto o cerrado y la función es evitar el retorno de los gases de combustión a la salida del escape y se controla desde la computadora personal por medio de la tarjeta de adquisición y control de datos.

- *Válvula regulable electrónica*

Ésta contiene una señal analógica y su función es regular el flujo de los gases de combustión producidos por el motor Diesel y se controla desde la computadora personal por medio de la tarjeta de adquisición y control de datos.

- *Válvula solenoide de 3 vías*

Ésta tiene una señal digital para controlar apertura y cierre, su función es cambiar la dirección del flujo cuando se requiera desmontar los portafiltras y se controla desde la computadora personal por medio de la tarjeta de adquisición y control de datos.

- *Válvula manual*

Está tiene una señal digital para apertura y cierre, y su función es regular la muestra diluida a las bolsas y se controla desde la computadora personal por medio de la tarjeta de adquisición y control de datos.

## CAPITULO IX

### SISTEMAS DE MEDICIÓN DE PARTICULAS.

#### IX.1.- Métodos de Medida y Caracterización de las Partículas.

Anteriormente se ha indicado el procedimiento de recolección de las partículas procedentes de los motores Diesel. Existen sin embargo, otros métodos que pueden medirlas directamente en el medio gaseoso donde se encuentran: en la cámara de combustión o tomando una muestra gaseosa sin diluir. Obviamente estas partículas que se miden directamente no corresponden a la definición de **partícula** pero, son útiles a fin de conocer por ejemplo, las tasas de producción, oxidación y emisión de hollín.

## IX.2.- Métodos de Medida Sin Recolección.

Estos métodos se basan en técnicas ópticas, algunas aplicando la teoría de la dispersión de la luz y otras mediante el espectro de radiación electromagnética.

La teoría de la dispersión de la luz ha sido desarrollada con todo detalle, en principio por John William Strutt (Lord Rayleigh) y más ampliamente por Gustav Mie (1868 - 1957) quien, en 1908 publicó una solución rigurosa del problema del esparcimiento para partículas esféricas homogéneas de cualquier tamaño.

Aunque complicada, su solución tiene gran valor práctico, particularmente cuando se aplica al estudio de suspensiones coloidales y metálicas, partículas interestelares, niebla, nubes y la corona solar, por mencionar sólo unos pocos.

Un **nefelómetro**, es un dispositivo que mide la concentración de partículas suspendidas en un líquido o en un gas, mediante la intensidad de la dispersión. Este dispositivo ha tenido muchos usos, por ejemplo, midiendo la masa o el volumen de las partículas en la atmósfera, especialmente el "smog".

Cada partícula produce un pulso de dispersión de la luz y una fotocelda lo recibe. La cantidad de luz que pasa a través de un aerosol, es la diferencia entre la cantidad de luz incidente y la cantidad dispersada y absorbida por las partículas.

Los medidores de humo son dispositivos basados en la extinción de la luz, que se usan ampliamente en los motores Diesel.



### IX.3.- Dispersión de Luz Laser (*Laser Light Scattering, LLS*).

Este método se basa en este principio y se aplica tanto a la investigación en llamas atmosféricas, como a los motores Diesel.

Para medir el diámetro promedio y la concentración de partículas en la cámara de combustión, se equipa al motor con ventanas de cuarzo; por las cuales, a la vez que se hace incidir un rayo láser, se acumula la intensidad de dispersión luminosa.

Una breve descripción de una instalación que ha usado este método, es la siguiente:

Como fuente de luz se usa un láser polarizado, que emite una luz monocromática, Unas lentes hacen incidir el rayo de luz en el punto de medida y se seleccionan previamente los ángulos de dispersión.

Mediante 2 bancos ópticos idénticos que miden la dispersión luminosa en esas 2 direcciones se puede conocer, tanto el tamaño de las partículas como su concentración. El volumen de medida es 1 mm<sup>3</sup> aproximadamente.

### IX.4.- Analizador Dinámico de Partículas.

Es un sistema de medida que utiliza el método de extinción de luz infrarroja para seleccionar longitudes de onda y así, medir hidrocarburos (a excepción del Metano) y hollín que es básicamente carbón. Mide dos componentes importantes de las partículas ya que la fracción orgánica soluble consiste principalmente de hidrocarburos condensados y por otra parte, el hollín es el principal componente de la fracción insoluble.

# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

La extinción de luz infrarroja tiene una doble ventaja en comparación con la luz visible :

- a) La difusión es independiente del tamaño de las partículas.
- b) Se pueden medir separadamente HC y hollín utilizando 2 bandas de frecuencias diferentes.

Una bomba de vacío succiona una fracción de los gases de escape sin diluir y los hace pasar por una celda de medida ; en otra que está dispuesta simétricamente, hay aire limpio (figura IX.4.1).

La energía radiada por la fuente se separa en 2 rayos los cuales, pasan a través de estas 2 celdas y llegan a un mismo detector.

Dicho detector, debido a que es sensible a la desviación de la luz y a su variación de intensidad, puede medir por comparación ya que tiene una intensidad de referencia.

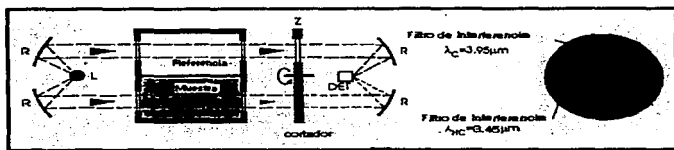


figura IX.4.1

## **IX.5.- Sistemas de Medición que Recomienda la EPA.**

Los sistemas de medición de partículas que se emplea para el minitúnel son las que propone las normas de EPA y los sistemas que se seleccionaron son :

### **IX.5.1.- Detector infrarrojo no dispersivo (DIRND)**

El analizador DIRND consiste en un detector infrarrojo de longitud de onda esta basado en que los átomos vibran a una frecuencia determinada y bien definida. Esta frecuencia se encuentra en la región infrarroja del espectro electromagnético. Se emplea dicho método para cuantificar el dióxido de carbono y monóxido de carbono de los gases del escape.

Cuando la mezcla se haga pasar por dicho detector y se exponga a la absorción infrarroja, los componentes como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono de acuerdo a sus propiedades físicas absorberán la luz infrarroja en la frecuencia determinada.

Este método se puede emplear para cuantificar el óxido de carbono en el caso mas conveniente. Como se muestra en la siguiente figura IX.5.1.

### **IX.5.2.- Detector por ionización de flama (DIF)**

El sensor consiste de una cámara pequeña en la que se procede una flama producida con la mezcla de hidrogeno y aire. Se hace pasar la muestra en la cámara permitiendo que se mezcle con el hidrogeno y el aire produciendo fragmentos iónicos y electrones libres producidos por la combustión de los átomos de carbono oxidables producen una corriente eléctrica detectable. Este método se emplea para cuantificar a los hidrocarburos en la salida de los gases del escape. Como se muestra en la figura IX.5.2.

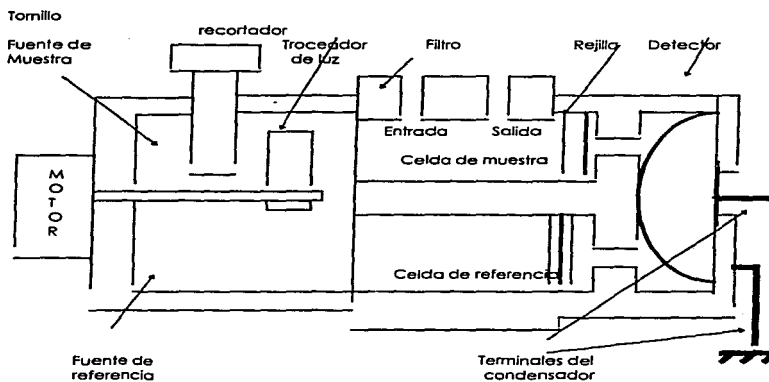
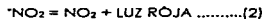
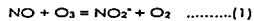


Figura IX.5.1. Analizador de gases infrarrojo no disperso (NDIR).

### IX.5.3.- Detector de luminiscencia química (DLQ o REDOX)

Esta técnica es empleada para sensor la presencia de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$  /  $\text{NO}_2$ ) en una muestra y está basado en su reacción con el ozono e involucra la siguiente reacción :



La reacción (1), el óxido nítrico y el ozono ( $\text{O}_3$ ) reacciona para producir el dióxido de nitrógeno en estado excitado electrónicamente ( $\text{NO}_2^*$ ).

En la reacción (2), la excitación del dióxido inmediatamente regresa a su estado base emitiendo fotones, el cual produce luz roja. La intensidad de la luz es directamente proporcional a la concentración del NO. para determinar el NOx en la muestra ,el sistema DLQ determina alternativamente la cuantificación del NO y NOx; para que posteriormente el circuito electrónico registre automáticamente la concentración del NO<sub>2</sub> .

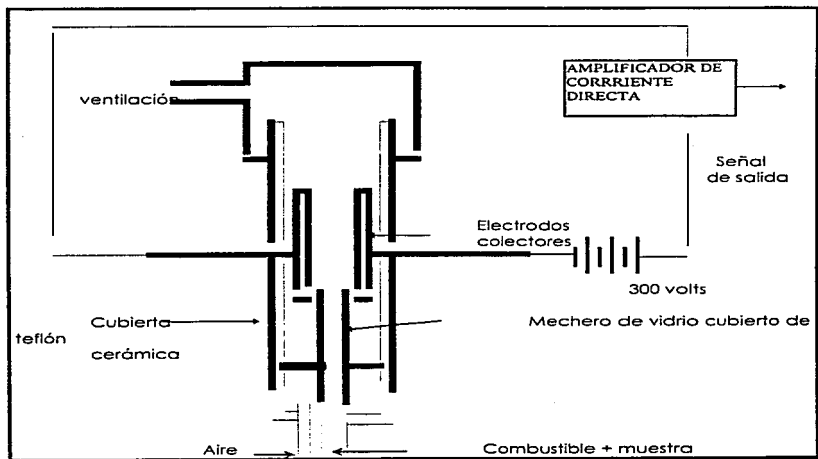


Figura. IX.5.2.- Ionizador de flama utilizando un detector quemador para el análisis de hidrocarburos.

#### **IX.5.4.- Partículas sólidas**

Para pesar y capturar las partículas sólidas en los gases de combustión, se emplean una balanza analítica y los filtros  $PM_{10}$  ( $0.01-30 \times 10^{-6}m$ ). La captura de las partículas se realizará durante una prueba de 4.5 a 6 min. Los filtros son de Micropore®, para la captura de partículas sólidas se selecciona el tamaño de  $10 \mu m$ .

Se emplea dos portafiltras de acero inoxidable, en serie, primario y secundario, para asegurar una colección al 95 %.

## CONCLUSIONES

Se hace necesario desarrollar un sistema para cuantificar las emisiones de los motores, debido a que actualmente no existe una institución u organismo que se encargue de controlar de manera real y eficaz los niveles permisibles de contaminantes atmosféricos como son el CO, HC, NO<sub>x</sub> y las partículas sólidas, de acuerdo a las normas establecidas por la EPA, que rigen el Código Federal Mexicano, por lo que en el Instituto de Ingeniería en conjunto con la Facultad de Ingeniería de la UNAM se propuso integrar un equipo capaz de medir los contaminantes provenientes de las emisiones de un motor a Diesel mediante un minitúnel de dilución parcial de manera cuantitativa (en ppm) y posteriormente desplegar las lecturas en un panel de control en un monitor de computadora a través de una interface como es una tarjeta de adquisición de datos y un software de control e instrumentación.

Por tal motivo se desarrolló esta tesis, para analizar las emisiones de un motor a Diesel mediante un minitúnel de dilución parcial. Además proporciona una recopilación tanto de los principios de medición fundamentales de los analizadores DIRND, DIF Y DLQ, como de los principales elementos que los constituyen. Un problema que se encontró fue que este tipo de instrumentos de medición requieren para su diseño y construcción no solo de conocimientos en el área de electrónica, sino también de la química, óptica y mecánica, así como también el diseño ha sufrido variaciones en el aspecto operativo de acuerdo a las necesidades propias del lugar a donde se colocará el equipo y al mismo tiempo por los recursos económicos limitados, para la creación de este minitúnel, debido a estas investigaciones se ha llegado a la conclusión de que en México desafortunadamente, aún no se cuenta con una plataforma tecnológica que conjunte a los diversos Institutos y Universidades de los sectores educativos e industriales con el interés común de diseñar y fabricar totalmente en México, instrumentos de medición como estos, por lo que hasta que no se decida firmemente erradicar la dependencia tecnológica extranjera de los países del primer mundo, no se podrá competir realmente con ellos. Por dichas razones, se optó por seleccionar los analizadores de gases comerciales de Horiba Instruments, Inc. para el minitúnel.

Por medio de un microprocesador de una computadora personal y un software de control e instrumentación se llevará a cabo la puesta en marcha del motor a Diesel, del minitúnel de dilución y del sistema de monitoreo y control electrónico.

Posteriormente, como parte de otro trabajo, se implementará el sistema de monitoreo y control con el cual desde la pantalla de una computadora se podrán monitorear todas las lecturas correspondientes a los analizadores e instrumentos electrónicos, de igual forma se enviarán las señales de control necesarias para el funcionamiento óptimo del minitúnel de dilución de gases.



Actualmente el sistema de monitoreo y control electrónico se encuentra en la etapa de la elección y adquisición de los elementos que constituyen el sistema como son: los analizadores, instrumentos de medición, accesorios electrónicos, la tarjeta adquisidora de datos, la computadora personal y el software de control e instrumentación, puesto que el diseño y manufactura del minitúnel ya está desarrollado y listo para iniciar con la implementación total de los diferentes elementos que lo constituyen. Por lo tanto no se cuenta con resultados de operación o pruebas realizadas.

Finalmente, debido a que la contaminación ambiental es un problema que concierne a todo ser humano y que es necesario tomar conciencia de ello, es muy importante que los profesionistas que inician su carrera, sea cual fuere esta, participen más en los proyectos de investigación que se desarrollan en México, por que sólo de esta forma se logrará un avance tecnológico, ambiental y cultural en este país y en beneficio de toda la humanidad.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. "Automated Fractional Sampling of Particulate Emissions", catalogue; Sierra Instruments Inc. Monterrey California.
2. Ayachi N., Franz I. and Brun m. "Soot Particulates Instantaneous Local Optical Measurements in a Diesel Chamber" Ecole Central de Lyon, France 1990.
3. Baumeister T. y Marks., "Standard Handbook for Mechanical Engineers"., Cap. 6 y 8. Mc. Graw Hill, Seventh Edition. E.U. 1978
4. Blas P. de, Herrero C., Pardo A : "Respuesta Educativa a la Crisis Ambiental" Centro de Publicaciones, Ministerio de Educación y Ciencia 1ª de España 1991.
5. Bravo H. "La Contaminación del Aire en México" 1ª Edición, Editorial: Universo XXI, México 1989.
6. "Council Directive of 26 June 1991 (91/441/CEE)" Official Journal of the European Communities, 30.8.91.
7. "Determination of Particulate Emissions with a Full-Flow Dilution System" , catalogue; RWTUV. Germany. 1993.
8. "Diluted Particulate Measurement with Partial Flow Sampling (SPC 472)" ., Smart Sampler AVL. Austria 1991.
9. "Engine Instrumentation" , catalogue; AVL., Austria 1990.

10. González Oropeza Rogelio. "Análisis Paramétrico de la Emisión de Partículas en un motor Diesel de inyección directa Mediante Sonda de Muestreo" Tesis Doctoral Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, junio de 1993
11. Hecht E. y Zajac A. "Optical" Fondo Educativo Interamericano, México, 1986.
12. Heywood J. "Internal Combustion Engine Fundamentals" McGraw-Hill, 1989.
13. Holman J. "Transferencia de Calor", pp. 255-270. 1ª edición CECSA. México. 1993.
14. "Legislación de la Directiva 88/77/CEE, Relativa a Emisiones de Motores Diesel Destinados a la Propulsión de Vehículos" Diario Oficial de las comunidades Europeas, 9 de Febrero de 1988, edición en lengua Española.
15. Lipkea W. Johnson J. & Vuk C. "The Physycal and Chemical Carácter of Diesel Particulate Emissions-Measurement Techniques and Fundamental Considerations" SAE Paper N° 780108, 1978.
16. "Memoria 1ª Reunión Nacional sobre los problemas de Contaminación Ambiental". Tomo II., pp. 711-719. Industria y Comercio S.A. 1973.
17. Mendel O. "Practical Piping Handbook", pp. 1810-1811, Pennwell books. E.U. 1981.
18. "Microtroll Particulate Samples" , Nova Messetechnik. Academically Trained Engineer Motzkau, catalogue; Institutión for Vehicle Technology Exhaust Gas Testing Department. Berlín Germany. 1993.
19. "Modificación de la Directiva 88/77/CEE, Relativa a Emisiones Diesel Destinados a la Propulsión de Vehículos" Bruselas, 22 de Abril de 1991.
20. Mohinder L. Nayyar., "Piping Handbook" ., pp. 1768-1809, Mc Graw Hill , Sixth Edition. E.U. 1992.
21. "Motorización del Automóvil-Posibles Soluciones para Ahorro de Energía y Protección del Medio Ambiente" Lucas Diesel.
22. Obert F. E. "Motores de Combustión Interna, Analisis y Aplicaciones" 1ª Edición en Español, 5ª impresión. CECSA, México 1971.
23. Sanz J.M. "La Contaminación Atmosférica" Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1ª de España, 1991.
24. "Secretaría de Desarrollo social (SEDESOS)" , 1993, NOM-PA-CCAT-007-93, "Niveles de Emisión de Vehículos a Diesel con peso vehicular superior a 3857 KG", Publicada en el Diario oficial de la Federación el 23-06-93.

25. Smith G.W. **"Kinetic Aspects of Diesel Soot Coagulation"** SAE Paper N° 820466.
26. **"Sonde de Prelevement"** Note Technique, Le Moteur Modern, France, Octobre 1990.
27. **"SPC 472 Smart Sampler"**. , Partial Flow Dilution and Particulate Sampling System for Measuring Diesel Engine Emissions, catalogue; Austria. January 1991.
28. Springer K. **"Diesel Lube Oils-4<sup>th</sup> Dimension of Diesel Particulate Control"** The Internal Combustion Engine Division, ASME, ICE-Vol.4, 1988.
29. Springer K.J. and Bradow R.L. **"Fuel and Additive Effects on Diesel Particulate Development and Demostration of Methodology"** SAE Paper N° 760130, February 1976.
30. **"Tunnel de Dilution"** Note Technique, Centre de Recherche en Machines Thermiques, France, Juin 1990.
31. **"Tunnel de Dilution Pour Banc D'essai Moteur Diesel Destine au Controle Demissions de Particules a Lechappement"** , catalogue; Le Moteur Moderne., Societe D'etudes Et D'Applications en Mecanique Thermodynamique Et Dynamique des fluides. Jun. 1987.
32. Wall J. **"Impact of U.S. Emision Regulation on Heavy-Duty Diesel Engine Development in the 1990's"** Cummins Engine Company.
33. White F. **"Mecánica de Fluidos"** , pp. 405-415 y 555-630. Mc. Graw Hill, México. 1992.

**APÉNDICE A (NORMAS PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES).**

**APÉNDICE B (PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL MINITÚNEL).**

**APÉNDICE C (DIAGRAMAS DE DISEÑO).**

**APÉNDICE D ( EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS EMISIONES EN EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO).**

## **APÉNDICE A**

# **NORMAS PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES**

### **NORMAS DE LA EPA (Environment Protection Agency).**

Para la certificar los motores a Diesel se deben someter a una prueba de emisiones contaminantes.

El procedimiento consiste en operar el motor sobre un dinamómetro como se muestra en la figura 1.1. Este ciclo simula la operación del motor en un vehículo en maniobras asociado con los niveles de emisiones.

La primera parte del ciclo se conoce como el modo de aceleración. Representa un vehículo en arranque, soltando el acelerador temporalmente mientras cambia la palanca de velocidades a primera y entonces empiece a acelerar. La ultima parte del ciclo es de acelerando el motor hasta alcanzar el torque máximo del motor. Esto se conoce como el modo "lugging" y simula las condiciones que ocurre cuando el vehículo esta en una pendiente.

Los gases emitidos se miden a través del ciclo usando un opacímetro. Los gases son cuantificados durante los modos de aceleración y "lugging" y se comparan en los estándares contaminantes permisibles.

Una tercera prueba de los gases que representa la mas alta concentración de gases encontrados durante cada modo. Los valores obtenidos de los gases se expresan en unidades de porciento de opacidad.

En 1973 los gases contaminantes como óxido de nitrógeno, monóxido de carbono, e hidrocarburos se medían usando el método de 13 modos. De cualquier forma el ciclo transitorio se adopto y se estandarizó en 1985. Para el material particulado(PM) .

La duración del ciclo es de 20 minutos y consiste de 4 segmentos iguales representando las diferentes secciones.

Para certificar el motor a Diesel que esta a prueba se requiere que el ciclo se corra dos veces . La primera prueba se conoce como prueba en frío. Después que se completa la prueba en frío, el motor se para durante 20 minutos después de ese lapso de tiempo se continúa con la segunda prueba conocida como prueba en caliente. Los gases contaminantes se miden durante ambas pruebas y se combinan usando factores de 1 a 7 durante la prueba en frío y factores de 6 a 7 durante la prueba en caliente. Los factores de prueba en frío y en caliente se seleccionaron para indicar el valor real del motor operando en frío y en caliente. Los gases contaminantes son cuantificados y se miden en gramos de contaminantes por hora dividido entre la energía consumida por el del motor.

Las tablas 1. 1 y 1. 2 muestran las cantidades pasadas, actuales y futuras de las emisiones de gases para motores a Diesel mostrando como han cambiado los valores a través del tiempo. Se dan los estándares para camiones y autobuses. La razón es que los autobuses operan exclusivamente dentro de las ciudades mientras los camiones operan en la transporación de bienes.

Los estándares de monóxido de carbono son mas fáciles de reconocer en un motor a Diesel. En los estándares de hidrocarburos y gases no se aprecian los límites en los nuevos diseños de motores a Diesel por que emplean sistemas de fuel injection y aire para el combustible.

Los estándares de  $\text{NO}_x$  y  $\text{PM}$  , en años recientes se han enfocado en el control de estos dos contaminantes en los motores a Diesel. Para 1998 el  $\text{NO}_x$  y  $\text{PM}$  representan una reducción de 65% y 95% respectivamente.

El sistema de análisis de hidrocarburos para los motores a Diesel requiere un detector de ionización de flama (HFID). Para obtener una muestra en el HFID se debe tomar directamente en la línea de descarga diluida en la prueba en caliente, el HFID se debe usar como un sistema de flujo constante para asegurar una muestra representativa.

El sistema de análisis de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  requiere de una bolsa para obtener una muestra y un analizador no dispersivo infrarrojo (NDIR) , se mide continuamente el  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  en la dilución como un sistema de flujo constante para asegurar una muestra representativa.

El sistema de análisis del  $\text{NO}_x$  requiere de un analizador llamado redox, se mide continuamente el  $\text{NO}_x$  en la dilución como un sistema de flujo constante para asegurar una muestra representativa.

Para determinar la masa de las partículas en la muestra diluida en la descarga a una temperatura de 125 °F o 51.7 °C se emplean dos pares de portafiltras, un par se emplea en la prueba en caliente y el otro par en la prueba en frío. Los filtros se requieren que sean de membrana de fluorocarbon, el diámetro del filtro es de 70 mm (60 mm de diámetro de captura neta) , los filtros no deben estar en contacto el uno con el otro.



<b>Federal Heavy-Duty Truck Engine Emission Standards</b>				
	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>
pre-1988	10 &	1.5	25	##
1988	10.7	1.3	15.5	0.60
1990	6.0	1.3	15.5	0.60
1991	5.0	1.3	15.5	0.25
1994	5.0	1.3	15.5	0.10
1998	4.0	1.3	15.5	0.10
& La suma de HC y NO <sub>x</sub> no debe exceder de 10 ## No regulado				
<b>Federal Heavy-Duty Urban Bus Engine Emission standards</b>				
	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>
1991	5.0	1.3	15.5	0.25
1993	5.0	1.3	15.5	0.10*
1994	5.0	1.3	15.5	0.07
1996	5.0	1.3	15.5	0.05
1998	4.0	1.3	15.5	0.05
*1993 Los estandares también se aplican para autobuses urbanos				
<b>Federal Heavy-Duty Engine Smoke Standards</b>				
Aceleración : 20%		Peak : 50%		Lug : 15%

Tabla 1.1 Estándares de emisiones en motores en super carreteras de la U.S Federal

<b>California Heavy-Duty Truck Engine Emission Standards</b>				
	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>
1984-1988	5.1	1.3	15.5	##
1988	6.0	1.3	15.5	0.60
1990	6.0	1.3	15.5	0.60
1991	5.0	1.3	15.5	0.25
1994	5.0	1.3	15.5	0.10
<b>California Heavy-Duty Engines In Medium Trucks ( &gt;8,500 ≤ 14,000 GVWR)</b>				
	<b>NO<sub>x</sub> +NMHC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>	
1995	3.9	14.4	0.10	
<b>California Heavy-Duty Urban Bus Engine Emission Standards</b>				
	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>
1991	5.0	1.3	15.5	0.10
1994	5.0	1.3	15.5	0.07
1996	4.0	1.3	15.5	0.05
## No Regulada				

Tabla 1.2 Estándares de emisiones en motores de la legislación de California

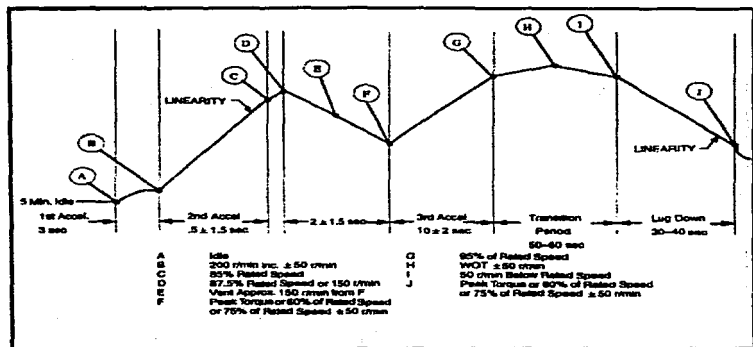


figura 1.1 Ciclo de Operación en el Dinamómetro

**NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL**

De la emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo, provenientes del escape de motores nuevos, que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor de 3, 857 kilogramos.

**Proyecto de la Norma :** *NOM-PA-CCAT-007/93*

**Objeto:** Establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo, provenientes del escape de motores nuevos, que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor de 3, 857 kilogramos.

**Campo de aplicación:** De observancia obligatoria para los fabricantes e importadores de los motores que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nacionales o importados, referidos en el punto anterior.

**Referencias:** *NMX-AA-23*

Definiciones:

*Año modelo del motor*

El período comprendido entre el 1o. de enero del año en curso al 31 de diciembre del mismo año.

***Autobús urbano de servicio ligero- pesado y mediano-pesado***

El vehículo de transporte pesado para pasajeros con motor diesel de hasta 250 HP y peso bruto vehicular de hasta 33,000 libras(14, 969 kilogramos), con capacidad de quince pasajeros o más que se dedica principalmente a la operación interurbana; es decir, dentro de los límites de una ciudad o de una gran área metropolitana. La operación del autobús urbano se caracteriza por recorridos cortos y paradas frecuentes. Para facilitar este tipo de operación se instalan normalmente más de una entrada de acceso y salida rápida.

***Autobús urbano de servicio-extrapesado***

El vehículo de transporte pesado para pasajeros con motor diesel que generalmente excede de 250 HP de potencia y con un peso bruto vehicular de más de 33,000 libras (814, 969 kilogramos), con una capacidad de quince o más pasajeros que se dedica principalmente a la operación interurbana; es decir, dentro de los límites de una ciudad o de una gran área metropolitana, la operación del autobús urbano se caracteriza por recorridos cortos y paradas frecuentes. Para facilitar este tipo de operación se instalan normalmente más de una entrada de acceso y salida rápida.

En los dos puntos anteriores las tarifas se pagan generalmente en efectivo con monedas en lugar de boletos comprados por adelantado, los autobuses urbanos se caracterizan también por la ausencia de equipo e instalaciones para viajes de largas distancias tales como sanitarios, compartimientos grandes para equipaje o instalaciones para equipaje de mano.

***Motor a Diesel.***

La fuente de potencia en la cual el combustible se inyecta a las cámaras de combustión del motor para ser encendido durante la operación normal del pistón, mediante calor generado por la compresión y que usa diesel como combustible.

***Motor de uso urbano***

El motor que se utiliza para la propulsión de un vehículo automotor para el transporte de personas cuyo uso está restringido a la áreas urbanas con peso bruto vehicular mayor de 3, 857 kilogramos.

***Peso bruto vehicular***

El peso real del vehículo expresado en kilogramos, sumado al de su máxima capacidad de carga conforme a las especificaciones del fabricante y al de su tanque de combustible lleno.

***Vehículo automotor***

El vehículo transporte terrestre de carga o de pasajeros que se utiliza en la vía pública, propulsado por su propia fuente motriz.

***Zona metropolitana de la Ciudad de México***

El área integrada por la 16 Delegaciones Políticas del Distrito Federal y los siguientes 17 municipios del Estado de México: Atizapá de Zaragoza, Coacalco, Cuautitlán de Romero Rubio, Cuautitlán Izcalli, Chalco de Covarrubias, Chimalhuacán, ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Naucalpan de Juárez, nezahualcóyotl, San Vicente Chicoloapan, Nicolás Romero, Tecámac, Tlalnepanitla y Tultitlán.

***Especificaciones***

Los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de los motores nuevos a que se refiere esta norma, tomando en consideración el año-modelo en que se comercializan, son los establecidos en las siguientes tablas.

---

Tabla 1

Niveles máximos permisibles de emisión de motores utilizados en vehículos con peso bruto vehicular mayor de 3, 857 kg que usan diesel como combustible.

Año modelo del motor	HC	CO	NO <sub>x</sub>	PST
	g/bhp-h	g/bhp-h	g/bhp-h	g/bhp-h
1993 <sup>a,b</sup>	1.3	15.5	5.0	0.25
1994-1997 <sup>a</sup>				
Autobús urbano extra pesado	1.3	15.5	5.0	0.07
Autobús urbano mediano-pesado ligero pesado y otros	1.3	15.5	5.0	0.10
1998 en adelante				
Autobús urbano extra-pesado	1.3	15.5	4.0 <sup>c</sup>	0.05
Autobús urbano mediano-pesado ligero pesado y otros	1.3	15.5	4.0	0.10

Donde:

g/bhp-h= Gramos de contaminante por caballo de fuerza de potencia al freno por hora.

<sup>a</sup> Certificado por los métodos, procedimientos y combustible establecidos por la Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos de América, en tanto no se tenga el laboratorio en nuestro país.

<sup>b</sup> Para los motores 1993 se considerará la clasificación año-calendaria a partir del día primero de enero de 1993 y años posteriores.

<sup>c</sup> Este cifra estará sujeta a revisión de acuerdo a la Normatividad de los Estados Unidos de América que se publique a su debido tiempo y nunca excederá de 5.

Los valores establecidos en las tablas 1 y 2 entrarán en vigor cuando Petróleos Mexicanos esté en condiciones de suministrar en todo el territorio nacional el combustible diesel en las especificaciones establecidas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, es decir, con un contenido de azufre ( < 0.05% en peso ) mientras tanto los fabricantes de vehículos y motores a diesel incorporarán su tecnología bajo normas certificadas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, paralelamente al compromiso de Petróleos Mexicanos de suministrar este tipo de diesel en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México a partir de octubre de 1993 y en todo el territorio nacional se hará cuando Petróleos Mexicanos incremente su capacidad de producción de combustible.

Tabla2

Año modelo del motor	Aceleración %	Lug %	Pico %
1993 <sup>a</sup> .	20	15	50
1994-1997 <sup>a</sup>			
Autobús urbano extra pesado	20	15	50
Autobús urbano mediano-pesado ligero pesado y otros	20	15	50
1998 en adelante			
Autobús urbano extra-pesado	20	15	50
Autobús urbano mediano-pesado ligero pesado y otros	20	15	50

Donde:

<sup>a</sup> Certificado por los métodos, procedimientos y combustibles establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, en tanto que no se tenga el laboratorio en nuestro país.

\* Para los motores 1993 se considerará la clasificación año-calendario a partir del día primero de enero de 1993 y años posteriores

### Vigilancia

La secretaría de Desarrollo Social, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al ambiente es la autoridad competente para vigilar el cumplimiento de la presente norma oficial mexicana.

**Concordancia con normas internacionales:** Esta norma oficial mexicana coincide totalmente con las normas de emisiones para este tipo de motores de Estados Unidos de América.

**Normatividad a la que sustituye:** Se abroga el Acuerdo por el que se expidió la norma técnica ecológica NTE-CCAT-010/90, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de Febrero de 1991.



## NOM-CCAT-008-ECOL/1993

De la opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

**Proyecto de la Norma:** NOM-PA-CCAT-008/93

**Objeto:** Establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

**Campo de aplicación:** De observancia obligatoria en vehículos automotores en circulación equipados con motores que usan diesel como combustible, con excepción de vehículos con peso bruto vehicular menor de 400 kilogramos, ni a tractores agrícolas a maquinaria para la construcción.

**Referencias:** NMX-AA-23

Definiciones:

*Coefficientes de absorción de la luz (k)*

El coeficiente de absorción de una columna diferencial de gas de escape a la presión atmosférica y a una temperatura de 70 ° C, expresada por metro (m-1).

*Flujo nominal de gas (G)*

El volumen indicativo de gases de combustión emitidos por el escape del vehículo automotor o del motor, en el cual se debe de efectuar la medición de la opacidad.

***Humo***

El residuo resultante de una combustión incompleta, que se compone en su mayoría de carbón, cenizas y de partículas sólidas y líquidas visibles en la atmósfera.

***Motor diesel***

La fuente de potencia en la cual el combustible se inyecta a las cámaras de combustión del motor, para ser encendido durante la operación normal del pistón, mediante el calor generado por la compresión y que usa diesel como combustible.

***Opacidad***

El estado en el cual un material impide parcialmente o en su totalidad el paso del haz de luz.

***Vehículo automotor***

El vehículo de transporte terrestre que se utiliza en la vía pública, tanto de carga como de pasajeros, propulsado por su propia fuente matriz

***Vehículo en circulación***

El vehículo automotor que transita por la vía pública.

***Especificaciones***

Los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible, expresada como coeficiente de absorción por metro (m-1), tomando como base el flujo nominal del gas, expresado en litros por segundo, son establecidos en la tabla 1.

Para el cálculo del flujo nominal (G) se aplican las ecuaciones siguientes:

-Para motores de dos tiempos:

$$G = VR/60$$

-Para motores de cuatro tiempos:

$$G = VR/120$$

Donde:

G= Flujo nominal del gas, expresado en litros por segundo (l/s), para motores de aspiración natural y turbocargados.

V=Desplazamiento del motor expresado en litros.

R=45% de la velocidad angular del motor correspondiente a la de su potencia máxima efectiva, expresada en revoluciones por minuto, o 1000 r.p.m., tomándose la que sea mayor.

Cuando el valor del flujo nominal del gas, resultante de aplicar la ecuación correspondiente según el caso, no se encuentre previsto en la tabla 1, el nivel máximo permisible de emisión de opacidad del humo expresada como coeficiente de absorción por metro ( $m^{-1}$ ), será el que se obtenga por interpolación por partes proporcionales.

**APENDICE B**

**PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL MINITÚNEL**

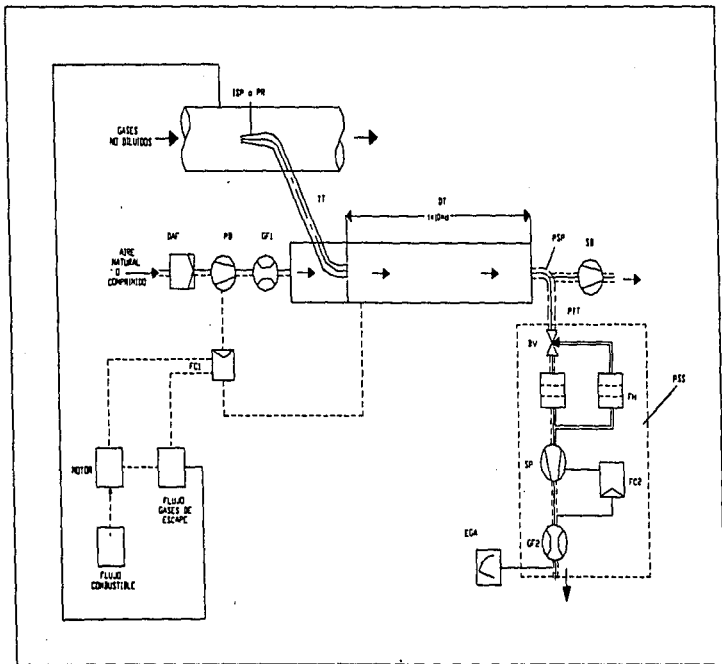


Diagrama de Control

## **NOMENCLATURA DEL ECE-R49**

### **(COMUNIDAD EUROPEA)**

**EP** : Conexión sin sonda isocinética con un mínimo de seis diámetros de distancia corriente arriba de la salida de los gases y con tres diámetros libres corriente abajo sin ninguna obstrucción.

**PR** : Sonda de toma de muestras colocada en la línea media del tubo de escape, en un punto en que se cumplan las condiciones anteriores (EP). El mínimo diámetro interior aceptable debe ser de 4mm.

**ISP** : Sonda isocinética (optativa), no se usa en este caso.

**EGA** : Analizador de gases de escape para CO<sub>2</sub> ó NO<sub>x</sub> (para balance de carbono solo analizadores de CO<sub>2</sub>).

**TT** : La tubería para transportar las muestras debe :

Calentarse o aislarse, de tal manera que la temperatura en el tubo de transferencia no baje de 423K (150°C).

-Tener un diámetro por lo menos igual al de la sonda, pero en ningún caso mayor a 25mm.

-Tener una distancia entre la toma y la salida de los gases no mayor a 1000mm.

-La muestra debe descargarse en la dirección del flujo y en la línea media del tubo de dilución.

**SC** : Control de presión regulable mediante la bomba de succión (SB) al mantenerse constante las revoluciones del ventilador de aire de dilución (PB). Las variaciones de presión en el tunel de dilución no deben variar más de " 250 Pa.

**DPT** : Sólo para sonda isocinética.

**FC1** : Para controlar el flujo de la masa de dilución. Puede conectarse a la salida de los gases de escape o en la alimentación del combustible y/o al medidor diferencial de CO<sub>2</sub>.

**GF1** : Medidor de flujo, debe ajustarse de tal manera que la temperatura del aire debe estar a 298K ± 5K (25°C ± 5°C).

**SB** : Solo para dilución parcial (bomba de succión).

**PB** : Ventilador de aire de dilución, conectado al control de flujo (FC1). Como señal de control pueden tomarse en forma selectiva : gases de escape, flujo de combustible o señal diferencial de CO<sub>2</sub>.

**DAF** : Filtro de aire de dilución, la temperatura a la entrada debe mantenerse a 298K ± 5K (25°C ± 5°C).

**DT** : Tunel de dilución, debe tener :

-Diámetro lo suficientemente pequeño para que se produzca turbulencia (No. de Reynolds > 4000) y longitud tal que los gases de escape se mezclen completamente.

**PSS** : Sistema de toma de partículas, la bomba de succión (SP) debe operar continuamente durante la toma de muestras. Una válvula tipo de globo debe aislar el sistema (BV).

**PSP** : Sonda de toma de partículas, colocada a 10 diámetros de cualquier obstrucción (ver figura). Debe tener un diámetro mínimo de 12mm.

**PIT** : El tubo de transferencia de partículas no debe calentarse, ni ser mayor de 1020mm; la longitud se mide desde la toma de muestras hasta el portafiltras.

**FH** : Para el filtro primario o secundario, puede usarse una o dos portafiltras (juntos o separados).

**SP** : Bomba de succión de partícula, debe estar lo suficientemente alejada del tunel de tal forma que los gases mantengan una temperatura constante ("3K).

**FC2** : Controlador de flujo para incrementar la exactitud de los valores de flujo a través de los filtros.

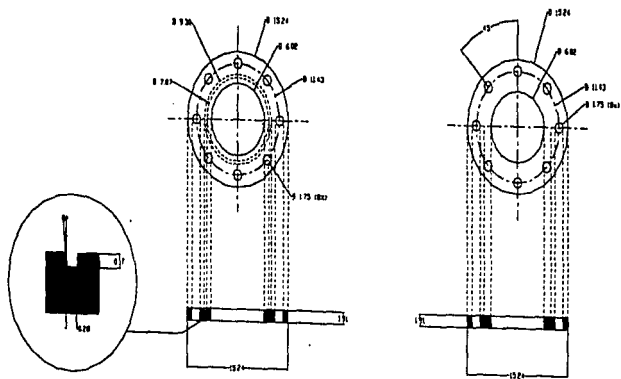
**GF2** : Medidor de flujo del sistema de medición de partícula, debe tener una distancia tal del tunel que permita mantener una temperatura constante ("3K).

**BV** : Válvula globo, no debe ser menor que el tubo de toma de muestras y su tiempo de cierre debe ser menor de 0.5 segundos.



NOTAS

Brazos conformes de acuerdo a las especificaciones.  
 Tornillos de sustrato de 1.59 cm y una longitud de 51 cm.  
 Doble de Neopreno de un ancho de 0.52 + 0.03 cm y  
 de un diámetro de 7.9 cm.  
 Acabado en centros  
 Tolerancia :012



CORTE DE LA SECCION  
 DEL SELLO.

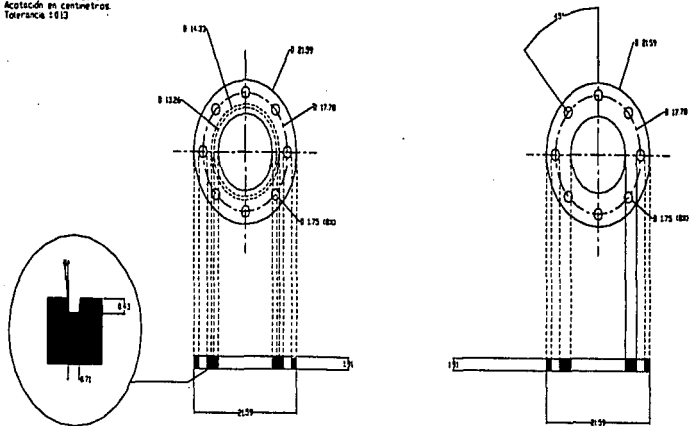
DETALLE DE LA BRIDA IZQUIERDA

DETALLE DE LA BRIDA DERECHA

Plano de construcción de la brida menor

**NOTAS:**

Bras soldadas de acuerdo a las especificaciones.  
 Tornillos de diámetro de 1.59 cm y una longitud de 31 cm.  
 Enroque de Neopreno de un ancho de 0.53 ± 0.12 cm y de  
 un diámetro de 13.28 cm.  
 Acabado en centímetros.  
 Tolerancia: ± 0.12



**CORTE DE LA SECCION  
 DEL SELLO**

**DETALLE DE LA BRIDA IZQUIERDA**

**DETALLE DE LA BRIDA DERECHA**

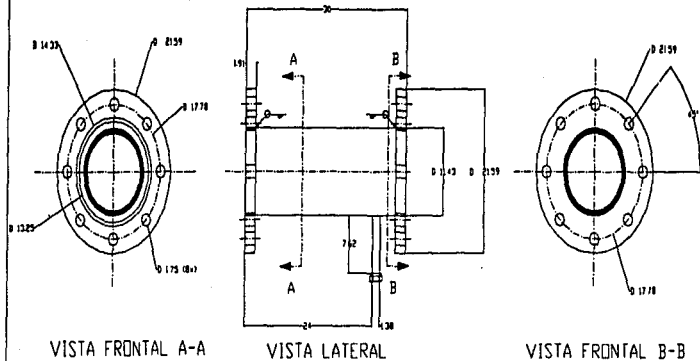
**Plano de construcción de la brida mayor**

**NOTAS:**

Bridas a los extremos con barrenos  
para tornillos de 159 cm

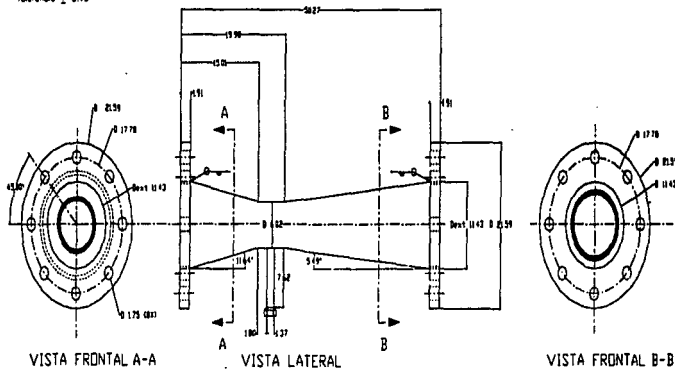
Acotación en centímetros

Esc. 1:1  
Tolerancia  $\pm 0.13$  cm



**Plano de construcción de la Cámara Mezcladora**

NOTAS :  
 Bidas e los extremos con borrenos  
 para tornillos de 1.50 cm  
 Acabación en centímetros  
 Esc: 1:1  
 Tolerancia  $\pm 0.13$



Plano de construcción del Venturi

**NOTAS :**

Bridas a los extremos con barrenos

para tornillos de 159 cm

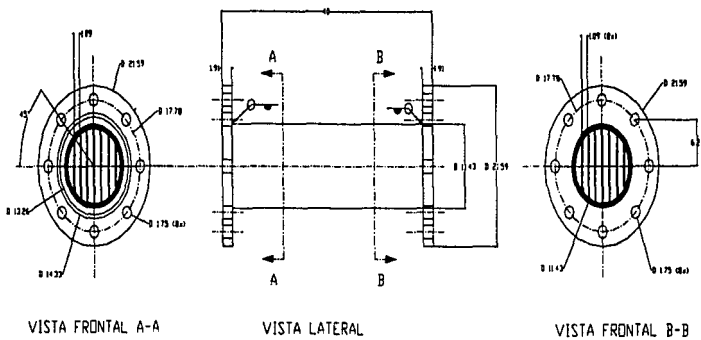
7 Laminas de acero inoxidable

de 0.2 cm de espesor

Acotación en centímetros

Esc 1:1

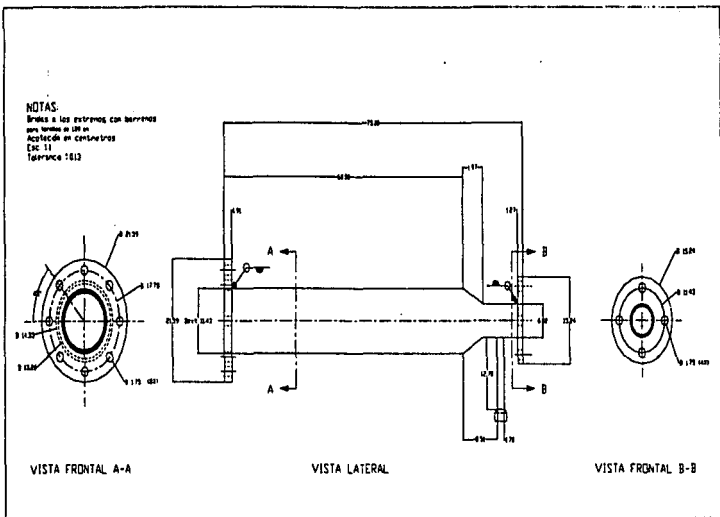
Tolerancia  $\pm 0.13$  cm



**Plano de construcción de la Cámara de Rejillas**

**NOTAS:**

Brines a los extremos con barrenos  
que tienen un 10% de  
Acople en el centro  
Escala 1:1  
Isotermia 1912



**Plano de construcción de la Cámara Estabilizadora**

ACERO INOXIDABLE CED. 40.

NOTA: La unión de cada elemento del minitúnel  
será acoplado por medio de bridas.

Tubo de acero inoxidable ced. 40 ( $d=10.16$  cm.)

Acotación en cm.

Esc: 1:1

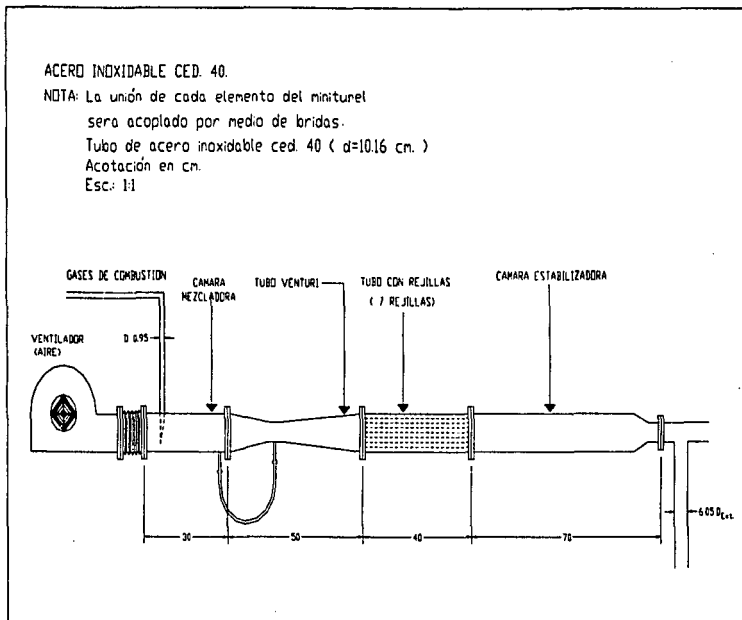


Diagrama General del Minitúnel

T1 - Termómetro digital 0-300°C.  
 T2 - Termómetro digital 0-100°C.  
 M - Manómetro digital 0-1 Kg/cm<sup>2</sup>.  
 MF1 - Medidor de flujo digital 0-10 m<sup>3</sup>/hr.  
 MF2 - Medidor de flujo digital 0-1000 m<sup>3</sup>/hr.  
 MD - Manómetro diferencial digital

VR - Válvula regulable electrónica.  
 VC - Válvula check.  
 VM - Válvula manual.  
 VS - Válvula solenoid de 3 vías.  
 VRM - Válvula regulable automática

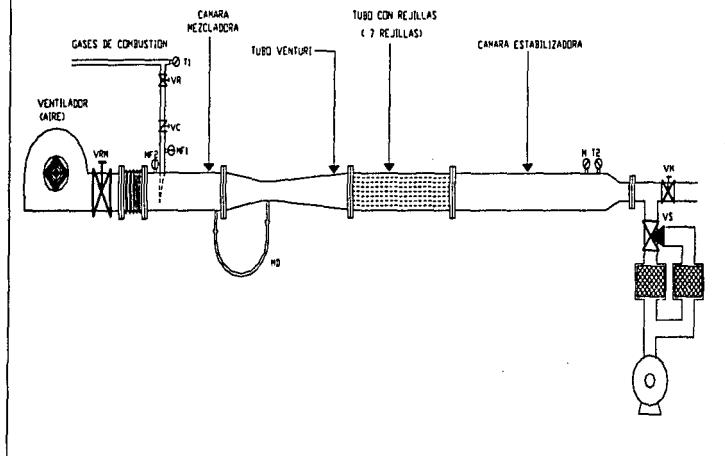
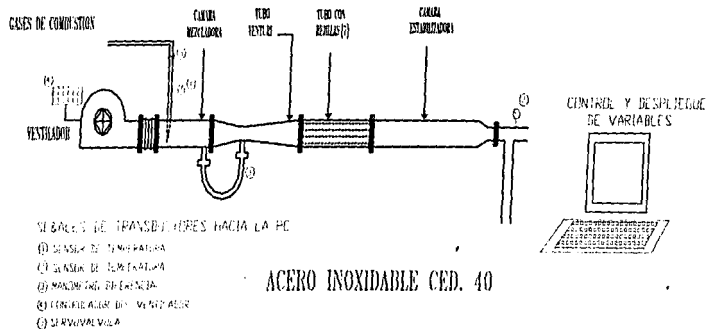


Diagrama General de Instrumentación del Minitúnel



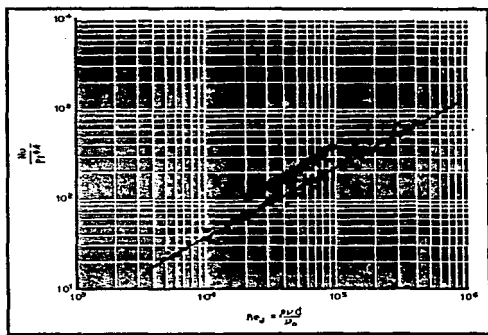
# MINTUNEL DE DILUCION DE GASES



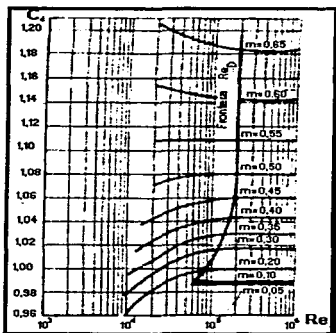
Acolación en cm.  
Escala 1:1

## APENDICE C

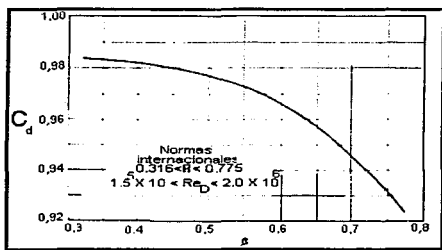
## DIAGRAMAS DE DISEÑO



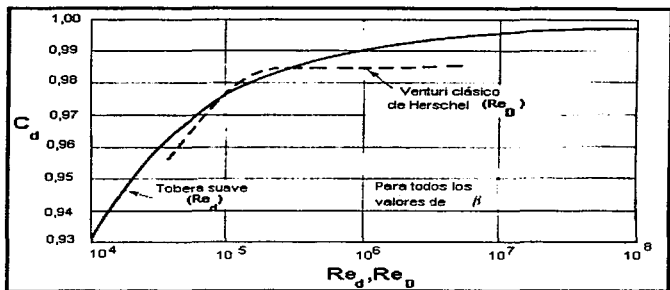
Gráfica de Correlación típica de datos para corrección forzada en tubos lisos con flujo turbulento



Gráfica de Venturi normal



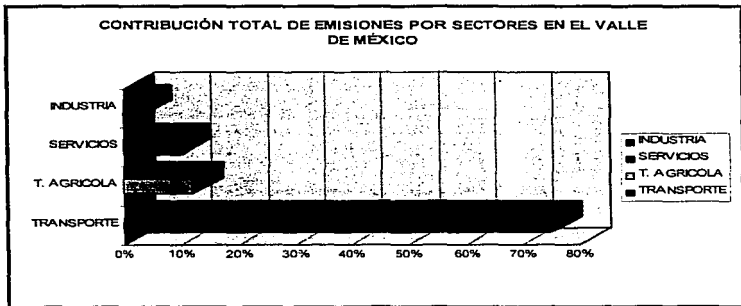
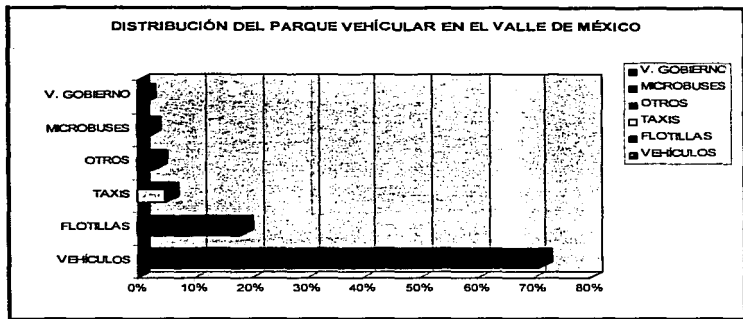
Gráfica de Coeficiente de descarga para un venturi típico



Gráfica de Coeficiente de descarga de los venturi actual y de Herschel

**APÉNDICE D**

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR LAS EMISIONES EN  
EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO**



CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN MÉXICO (MDB)	
Combustible Consumido en el País	244
Diesel Sin	188
Diesel Alto - Azufre	20
Cantidad Consumida por la Industria	36.1
Diesel Sin en la Ciudad de México	20.7

Distribución del parque vehicular en la Ciudad de México	
Camiones de Carga	411 487
Autobuses de Pasajeros	14 140
Camiones de Carga Privados	17 817
Autobuses de Pasajeros Privados	3 529
Otros	10 603

EMISIONES DE PARTÍCULAS DE MATERIA / NO <sub>x</sub> EN LA CIUDAD DE MÉXICO (TON/AÑO)		
	PM	NO <sub>x</sub>
TOTAL DE PARTÍCULAS DE MATERIA / NO <sub>x</sub> GENERADAS	451 614	177 139
GENERADAS POR MOTORES DIESEL (TON/AÑO)		
Camiones de carga	75 096.37	23 252
Autobuses de pasajeros	2 580.55	842.2
Camiones de carga privados	3 261.45	1 097.3
Autobuses de pasajeros privados	644	261.2
otros	1 935	653.3