

27  
2 es.



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE UN  
MINITÚNEL DE DILUCIÓN PARCIAL PARA  
ANALIZAR EMISIONES DE MOTORES A  
DIESEL**

**TESIS PROFESIONAL QUE PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
(ÁREA MECÁNICA)**

**PRESENTAN:**

**HÉCTOR HUGO CABADAS ESTRELLA  
JOSÉ SAAVEDRA BADILLO  
VÍCTOR ADRIÁN TREJO CHÁVEZ**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. ALEJANDRO FCO. ROMERO LÓPEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA  
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

México, D.F., 1998

2637410



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

---

**INDICE**

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
ANTECEDENTES	5
CAPÍTULO I	14
“COMPONENTES E INSTRUMENTACIÓN DEL MINITÚNEL”	
I.1 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE ATMOSFÉRICO	16
I.2 CUERPO DEL MINITÚNEL	18
I.3 SISTEMA DE CAPTURA DE PARTÍCULAS	23
I.4 SISTEMA DE CONTEO DE PARTÍCULAS	28
CAPÍTULO II	30
“OPERACIÓN DEL MINITÚNEL”	
II.1 RECOLECCIÓN ISOCINÉTICA DE LA MUESTRA	35
II.2 TERMOFORESIS	39

---

---

CAPÍTULO III	40
“PROTOCOLO DE PRUEBAS”	
III.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS	40
III.2 EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE PARTÍCULAS	42
III.3 EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA	43
III.4 TABLAS DE RESULTADOS (FORMATO)	46
CAPÍTULO IV	48
PRUEBAS PRELIMINARES, MEDICIÓN DE PARTÍCULAS	
IV.1 TABLA DE RESULTADOS	50
CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	60
APENDICE A	64
“NORMAS DE LA CEE Y LA NOM”	
A.1 NOM-076-ECOL-1994	64
A.2 NOM-077-ECOL-94	66
A.3 NORMATIVA 92/55/CEE	67
A.4 NTE.CCAT-005/88	68
A.5 NOM-PA-CCAT-007/93	71

---

---

APENDICE B	73
B.1 "MÉTODOS PARA EVALUAR LAS EMISIONES"	
B.1.1 ANALIZADORES DE MONÓXIDO DE CARBONO Y DIÓXIDO DE CARBONO (CO/CO <sub>2</sub> )	73
B.1.2 ANALIZADOR DE HIDROCARBUROS TOTALES (HC)	75
B.1.3 ANALIZADOR DE OXÍGENO	77
B.1.4 ANALIZADOR DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO/NO <sub>x</sub> )	79
B.2 "ALTERNATIVAS PARA DISMINUIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES DIESEL"	82
B.2.1 COMPOSICIÓN Y CALIDAD DEL COMBUSTIBLE	83
B.2.2 TENDENCIAS EN LA TECNOLOGÍA	84
B.2.3 TÉCNICAS DE REGENERACIÓN	85
B.2.4. SISTEMAS PASIVOS	86
B.2.5. SISTEMAS ACTIVOS	88
 APENDICE C	
"PLANOS DEL MINITÚNEL"	92

---

---

## **AGRADECIMIENTOS:**

- A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería por la formación académica brindada.
- A los profesores por la formación recibida durante estos años.
- A la DGAPA por el apoyo económico para la realización de este proyecto.
- Al laboratorio de control de emisiones y a todo al personal que lo integra por las facilidades brindadas
- Y muy especialmente al Dr. Alejandro F. Romero López por su apoyo, comprensión y confianza para la elaboración de esta tesis

Hugo, José y Víctor.

---

---

*El presente trabajo lo dedico a:*

*Mi Madre MA. DE LA PAZ ESTRELLA TORRES, mi Padre HÉCTOR CABADAS HERNANDEZ y mi hermana LOURDES CABADAS ESTRELLA, por todo su cariño, apoyo y comprensión.*

*Mis tíos, primos y abuela, por su cariño y apoyo.*

*Mis jefes y compañeros en la D.G.S.U.*

*Los amigos de la facultad, en especial a José y Víctor.*

*A TODOS GRACIAS*

**HÉCTOR HUGO CABADAS ESTRELLA**

---

---

*Dedico este trabajo a:*

*Dios por ser la luz que siempre ilumina mi camino.*

*Mi Padre JOSÉ A. SAAVEDRA, mi Madre GLORIA BADILLO y mi hermana  
MARÍA DEL REFUGIO por su apoyo, cariño y comprensión.*

*Todos mis amigos por su valiosa amistad*

*Victor y Hugo*

**JOSÉ SAAVEDRA BADILLO**

---



---

*A mis padres JESÚS V. TREJO y CELINA CHÁVEZ, las personas que más aprecio, que siempre me otorgan su cariño y apoyo incondicional.*

*A VIOLETA CARBAJAL T., por su apoyo y cariño, quién me ha enseñado que el "éxito tiene un precio: trabajo constante y progresivo".*

*A mis hermanos, MILDRED Y JEHOVÁ, por su confianza.*

*A mis primos, en especial JORGE y FELIPE, por su amistad y confianza*

*A mis amigos (JORGE, MANUEL, CARMEN, MARCO, GERMAN, MARIANO, GABRIEL). "Toda la grandeza de este mundo no vale lo que un buen amigo".*

*A mis compañeros de tesis (HUGO Y JOSÉ), por el apoyo y la confianza mostrados.*

*A los compañeros de la Facultad.*

**VÍCTOR ADRIÁN TREJO CHÁVEZ**

---

# INTRODUCCIÓN

Las fuentes móviles son responsables de producir una gran cantidad de las emisiones contaminantes que afectan nuestra atmósfera, entre las cuales se encuentran las producidas por los motores Diesel<sup>1</sup>, de aquí surge la necesidad de diseñar aparatos que cuantifiquen las emisiones generadas por este tipo de motor.

Los minitúneles de dilución parcial son instrumentos que permiten la cuantificación de partículas suspendidas en las emisiones de los motores Diesel, es por eso que la Universidad Nacional Autónoma de México a través

---

<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.

---

de el Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería brindan el apoyo para el diseño y construcción de un minitúnel de dilución parcial.

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 las emisiones producto de la combustión del motor Diesel en estado estable.

Este proyecto da seguimiento al trabajo: "Diseño y construcción de un minitúnel de dilución parcial, para analizar emisiones de motores a Diesel de servicio pesado"<sup>[1]</sup>, donde se describe el diseño y la construcción del cuerpo del minitúnel.

En el desarrollo de esta tesis se hace una comparación entre los dispositivos para la medición de las emisiones de motores Diesel (túnel de flujo total y minitúnel de flujo parcial). Además, se realizan modificaciones de algunos componentes existentes y el diseño e implementación de los sistemas faltantes. También, describimos el procedimiento de operación del minitúnel. Así como el protocolo de pruebas normalizado por la Comunidad Económica Europea.

## **META Y OBJETIVOS**

### **META:**

La meta de la tesis es la puesta en marcha del minitúnel, así como la adquisición de equipo para cuantificar las emisiones de los motores Diesel como son: las partículas, hidrocarburos sin quemar, óxidos de nitrógeno y óxidos de carbono; teniendo así una herramienta que ayude en el desarrollo de nuevas tecnologías y aparatos para controlar las emisiones contaminantes, e indicar su eficiencia.

### **OBJETIVOS:**

El objetivo primordial es la investigación, estudio, diseño, y construcción, en lo que se refiere a la parte de Mecánica, del sistema que permita capturar las partículas contenidas en las emisiones de los motores

Diesel, que además permita conducir gases de la combustión para su almacenamiento en bolsas "tedlar" (fluoruro de polivinil) .

Modificación en el diseño de algunos elementos del minitúnel para su adaptación al laboratorio de Emisiones de la Facultad de Ingeniería.

Otro objetivo es la selección del diseño, así como el análisis técnico y económico para la adquisición de aparatos y equipos, como son : balanza analítica, cámara de humedad controlada, analizadores de óxidos de nitrógeno, carbono, hidrocarburos, y oxígeno; donde se llevará a cabo la cuantificación de las partículas y gases.

## ANTECEDENTES

### PROBLEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN<sup>[2]</sup>

Durante muchos días del año los aproximadamente 20 millones de residentes del área Metropolitana del Valle de México, inhalan una niebla café grisácea cuyos efectos nadie ignora. La contaminación atmosférica oscurece el Valle y las zonas conurbadas, irritándoles los ojos y la nariz a los moradores, restringiendo las actividades deportivas y las de aquellas personas que tienen problemas respiratorios, afectando los organismos tanto de la gente mayor como de la joven.

La contaminación en esta zona es la peor de todo México, llegando a niveles que afectan la salud, la mayoría de los días del año y excediendo los niveles, tolerables de contaminantes como el ozono, monóxido de carbono,

hidrocarburos sin quemar, *partículas sólidas*, óxidos de nitrógeno y metales pesados. Parte de este problema es provocado por un fenómeno natural: la inversión térmica y por el hecho de que las montañas que rodean al Valle evitan que los vientos dispersen los contaminantes: En 1990 se estimaba que las fuentes móviles contribuían en un 83% a la contaminación en el área metropolitana de la Ciudad de México, mientras el restante 17% correspondía a la industria y a polvos de diversa procedencia.

## **PRINCIPALES CONTAMINANTES <sup>[2]</sup>**

En cuanto a su tipo, los contaminantes se clasifican de acuerdo con sus efectos, en tres grupos principales:

- 1. Substancias irritantes**
- 2. Substancias antihigiénicamente activas**
- 3. Substancias tóxicas.**

En el primer grupo se consideran las substancias irritantes inmediatas como son: bióxido de azufre, ácido sulfúrico, irritantes fotoquímicos, formaldehído, partículas suspendidas. También figuran en este grupo las substancias irritantes de efectos retardados o crónicos, como el ozono y bióxido de nitrógeno.

En el segundo grupo están comprendidos el bióxido de azufre, el ozono y el bióxido de nitrógeno.

En el tercer grupo se consideran el monóxido de carbono y los hidrocarburos.

A continuación se describen las características principales de los contaminantes más notorios.

*Monóxido de Carbono.*- este es uno de los mas importantes contaminantes del aire de las ciudades con intenso tráfico de automóviles. Su concentración aumenta con el tránsito lento, en los embotellamientos y cuando ocurre el fenómeno atmosférico llamado inversión térmica, que consiste precisamente en una inversión diaria de la temperatura y que ocurre con mayor frecuencia durante el invierno.

*Partículas .*- La emisión de partículas es una característica específica de los motores Diesel y es considerablemente mayor que en un motor encendido por chispa. Estas consisten en su mayoría de partículas de carbón (hollín), su emisión depende del método de combustión y de el modo de operación del motor. El resto son hidrocarburos (parcialmente absorbidos por el hollín) y sulfatos en forma de aerosol (sustancia sólida o líquida dispersada en los gases). El contenido de azufre en el combustible Diesel ( 0.2 % ) es responsable de los sulfatos.

*Hidrocarburos.*- En bajas concentraciones, no parecen ser tóxicos por si mismos, sin embargo existen informes de que una reacción química entre hidrocarburos y otros gases, tales como el ozono y el bióxido de nitrógeno, producen una neblina en la atmósfera e irritación en los ojos. Los



investigadores están convencidos de que existe una relación directa entre la cantidad de hidrocarburos existentes en el aire y la severidad del "smog". El grado al cual los productos del escape contribuyen a este problema en general, ha sido objeto de infinidad de controversias. Existen muchos tipos de hidrocarburos y todavía existen interrogantes actualmente con respecto a cuales son dañinos y que tipos de motores los producen.

### **RESULTADOS ALCANZADOS CON EL CONCEPTO DE MINITÚNEL<sup>[3]</sup>**

Uno de los antecedentes referentes a la utilización de un minitúnel de dilución parcial de gases, para evaluar emisiones contaminantes de motores a Diesel, es el del organismo "Rheinisch Westfälische Technische Überwachungs Verein e.V." (RWTUV) de Alemania, que ha presentado resultados muy interesantes acerca de la utilización del minitúnel, además de que comparan a un túnel de dilución total con un minitúnel de dilución parcial, como se presenta en las siguientes tablas.

Este Organismo ha vigilado el cumplimiento de normas estrictas que a costos muy elevados se mantienen en la Unión Europea (UE), por lo cual se hace énfasis en uno de los objetivos del proyecto, lograr la implementación y puesta en marcha del minitúnel, pero a un costo mucho menor.

## DATOS TÉCNICOS DE LOS MOTORES

CARACTERÍSTICAS	MOTOR A	MOTOR B	MOTOR C
TIPO DE MOTOR	MOTOR DIESEL TURBO CARGADO	MOTOR DIESEL NORMALMENTE ASPIRADO	MOTOR DIESEL NORMALMENTE ASPIRADO
CAPACIDAD	14618 cm <sup>3</sup>	5958 cm <sup>3</sup>	1648 cm <sup>3</sup>
NÚMERO Y POSICIÓN DE LOS CILINDROS	8, V - 90°	6, EN LÍNEA	3, EN LÍNEA
SISTEMA DE COMBUSTIÓN	INYECCIÓN DIRECTA (DI)	INYECCIÓN DIRECTA (DI)	INYECCIÓN DIRECTA (DI)
MÁXIMO TORQUE	1620 Nm a 1250 r.p.m.	370 Nm a 1850 r.p.m.	101 Nm a 1700 r.p.m.
MÁXIMO PAR	269 Kw a 2100 r.p.m.	72 Kw a 2800 r.p.m.	24 Kw A 2600 r.p.m.
VELOCIDAD MÍNIMA	600 r.p.m.	610 r.p.m.	730 r.p.m.
VELOCIDAD MEDIA	1250 r.p.m.	1850 r.p.m.	1700 r.p.m.
VELOCIDAD MÁXIMA	2100 r.p.m.	2800 r.p.m.	2600 r.p.m.

Tabla 1

En las tablas (1) y (2) se especifican las características dentro de las cuales se llevaron a cabo las mediciones de la tabla (3), la tabla (2) está basada en el ciclo de los trece modos (Normativa 91/542/CEE), además las

partículas se recolectan en filtros de 70 mm de diámetro, iguales a los que se utilizan en las pruebas de este proyecto.

### CARACTERÍSTICAS DE LAS PRUEBAS

ESTACIÓN	NO. DE MODO	VELOCIDAD	(%) DE CARGA
A1	6	INTERMEDIA	100
A2	12	MÍNIMA	50
B1	2	INTERMEDIA	10
B2	12	INTERMEDIA	10
C1	2	INTERMEDIA	10
C2	6	INTERMEDIA	100
C3	12	MÍNIMA	10

Tabla 2

En la tabla (3) se observa la diferencia entre los valores promedio de una prueba de flujo total a una de flujo parcial. Se incrementa hasta un máximo de 16.38 %, lo cual indica que las pruebas con flujo parcial son bastante confiables y reales.

Sin embargo, el uso del minitúnel esta restringido para realizar pruebas con el motor en estado estable, mientras que en un túnel las pruebas realizadas a los motores se pueden efectuar tanto en estado estable como en régimen transitorio.

TABLA DE RESULTADOS<sup>[2]</sup>

	DILUCIÓN TOTAL		DILUCIÓN PARCIAL							PROMEDIO (%)
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO	MOTOR (A)	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO	
91/542TECC (g/Kwh)	0,182	0,196	0,194	0,191		0,185	0,194	0,191	0,190	0,5286
A1.PM (g/h)	55,216	52,378	52,304	53,299		55,210	53,440	51,180	53,277	0,0412
A2.PM (g/h)	20,149	18,262	18,319	18,910		20,920	19,390	17,440	19,250	1,766
91/542TECC (g/Kwh)	0,397	0,406	0,417	0,407		0,384	0,385	0,401	0,39	4,177
B1.PM (g/h)	25,57	24,282	23,538	24,463		26,36	24,97	26,01	25,78	5,109
B2.PM (g/h)	57,86	60,186	62,003	60,016		54,26	60,47	58,09	57,607	4,014
91/542TECC (g/Kwh)	0,519	0,52	0,557	0,532		0,52	0,501	0,555	0,525	1,333
C1.PM (g/h)	0,992	0,994	1,044	1,01		0,86	0,9	0,89	0,883	12,574
C2.PM (g/h)	12,922	11,669	11,917	12,169		11,99	13,16	13,21	12,787	4,833
C3.PM (g/h)	1,041	0,933	0,992	0,989		0,9	0,78	0,8	0,827	16,38

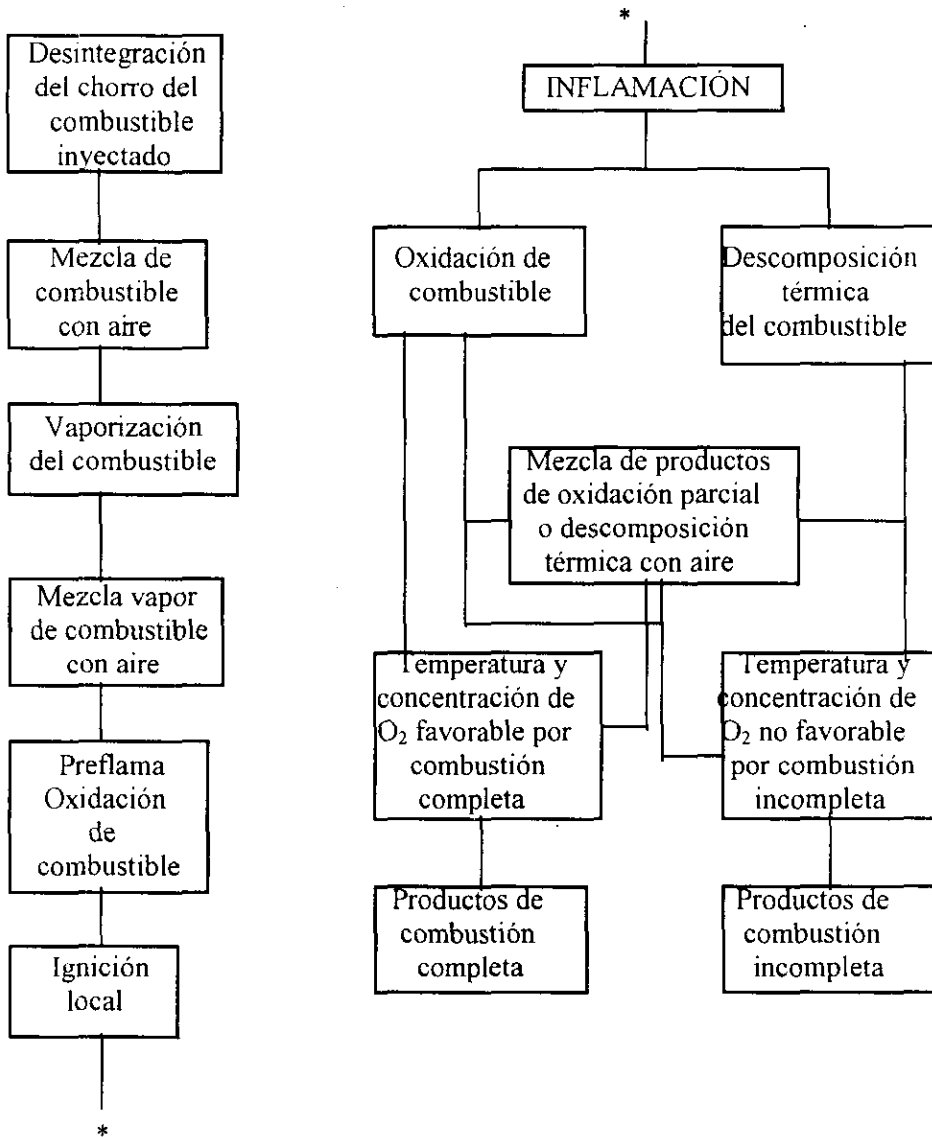
Tabla 3

## **LOS DISPOSITIVOS DE EVALUACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN MÉXICO.**

En México, debido a las intensas negociaciones del Tratado de Libre Comercio (TLC), se legislaron los estándares límite de emisiones de gases de motores Diesel mediante la adopción de los ya establecidos por la EPA para 1998 y años posteriores. Desgraciadamente, en la actualidad, no existe ningún sistema de revisión y control para poner en práctica la norma.

Para realizar la medición de emisiones contaminantes, la EPA especifico, mediante el Código de Reglamentos Federales (CFR-40 por sus siglas en inglés), un laboratorio que contenga un túnel de dilución total con celda para análisis transitorio y equipo necesario para medición (inversión aproximada de \$2.5 millones de dólares sólo en equipo). El Instituto Mexicano del Petróleo se encuentra en la etapa de construcción de un laboratorio de este tipo, dadas las condiciones actuales del país, es imposible que la U.N.A.M. pueda contar con el financiamiento para lograr un laboratorio de esta magnitud, por lo que se tomó la decisión de construir un minitúnel.

ESQUEMA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN  
EN UN MOTOR A DIESEL <sup>[15]</sup>



# CAPÍTULO I

## COMPONENTES E INSTRUMENTACIÓN DEL MINITÚNEL

Anteriormente se ha mencionado que los principales argumentos por los que se ha elaborado e implementado un minitúnel de dilución parcial son los de obtener un aparato que cumpla con los requerimientos técnicos, que señala la norma europea CEE-R49, a un bajo costo, que sea compacto y de fácil transportación para realizar experimentos en otras áreas diferentes al laboratorio donde ahora se encuentra.

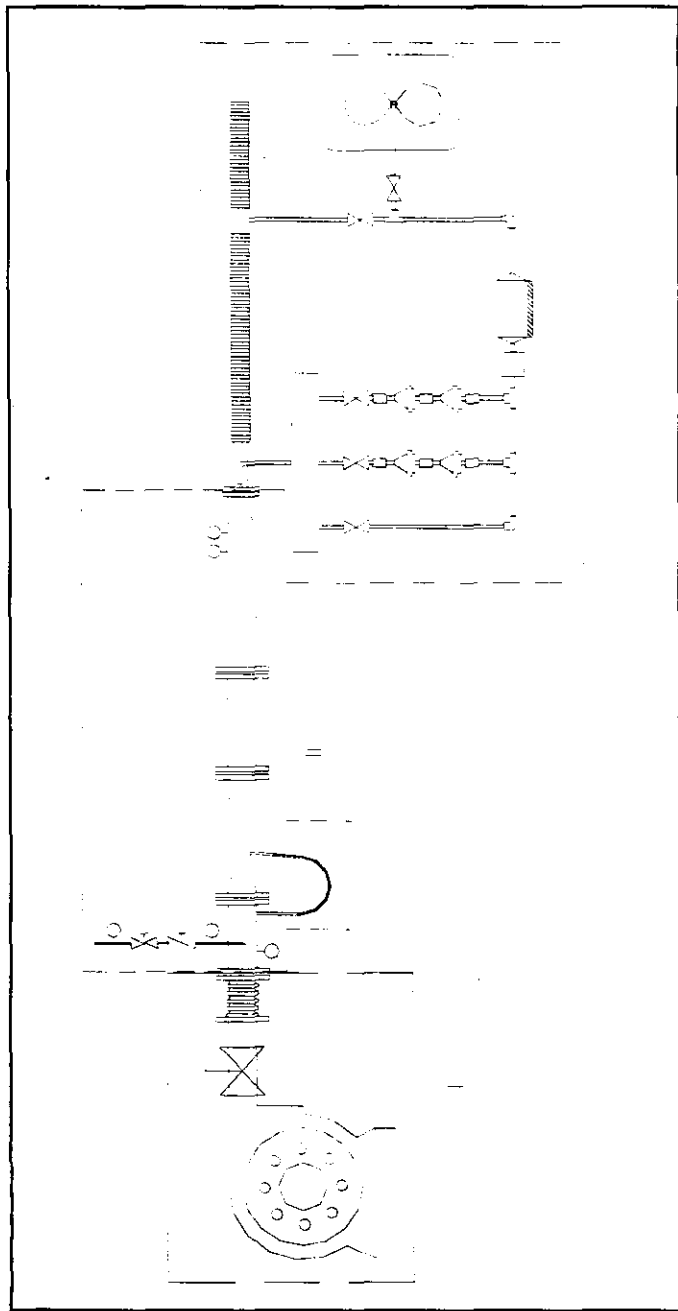


Fig. 1.1 Diagrama completo del minitunel



En este capítulo el equipo de medición, los componentes y demás accesorios que se utilizan en la realización de las diferentes pruebas se describen a continuación; para mayor facilidad en la descripción de la instrumentación utilizada y su función, todo el proceso se divide en regiones de operación, que son: suministro de aire, cuerpo del minitúnel, sistema de captura de partículas y cuantificación de emisiones.

### 1.1 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE ATMOSFÉRICO.

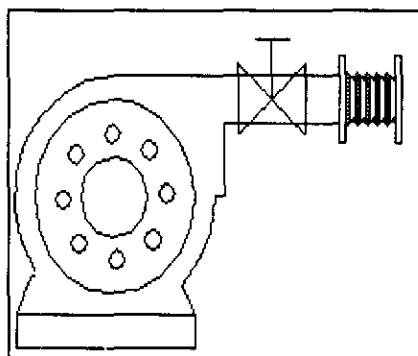


Fig. 1.2 Sistema de suministro de aire

Los artículos que integran el sistema son:

1. Filtros de aire atmosférico: Se encuentran en la entrada del ventilador y colectan todas las partículas suspendidas, mayores a una micra de diámetro, que pueda contener el aire que se utilizará en la dilución. Cabe mencionar que debido al tamaño del laboratorio, la toma de aire de los filtros del ventilador se

encontraba junto al motor, dando por resultado que el aire aspirado tuviera un incremento de temperatura que afectaría el proceso de transferencia de calor durante la prueba. Teniéndose que construir un codo (según plano MT-5) para evitar tal situación.

2. Ventilador: Suministra la cantidad de aire necesario para obtener una temperatura de mezcla de 52°C al final del minitúnel. Sus características son:

*Marca	Evisa New York, modelo N1904 A Arreglo 4
*Capacidad	13.31 m <sup>3</sup> /min (470 pcm)
*Presión estática	0.508 m columna de agua (20" columna H <sub>2</sub> O)
*Velocidad del rotor	3500 rpm
*Velocidad máxima	4200 rpm
*Potencia	2.76 kW
*Temp. de operación	22°C
*Motor marca	Siemens 3.73 kW

3. Válvula de mariposa: Regula el flujo de aire, con la ayuda de un servomotor que abre la compuerta en proporción con la cantidad de gases de combustión que se requieren.

4. Medidor de flujo de aire: muestra la cantidad de masa de aire que proporciona el ventilador, tiene un intervalo de 0 a 13.17 m<sup>3</sup>/min con una resolución de 0.0283m<sup>3</sup>/min.

5. Junta absorbedora de vibraciones: Es la unión entre el ventilador y el cuerpo del minitúnel, disminuye considerablemente la transmisión de vibraciones producidas por el ventilador.

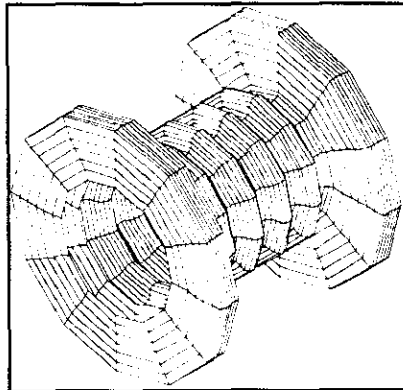


Fig. 1.3. Junta absorbedora

Además se tiene un codo de  $90^\circ$ , hecho de acero cold rolled 1018, para desviación del flujo, para optimizar el espacio ocupado, ya que el tamaño del laboratorio no permite tener todos los accesorios en una misma línea de operación.

## 1.2 CUERPO DEL MINITÚNEL

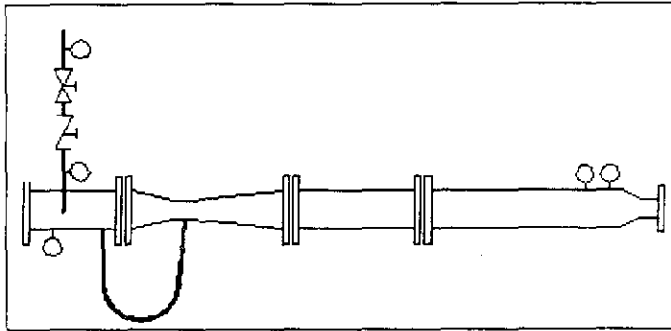


Fig. 1.4. Cuerpo del minitúnel

Los componentes que lo conforman son:

1. Toma de gases de combustión y accesorios: El tubo, en su inicio, tiene forma de "L" para coleccionar los gases; en su longitud, no mayor a 100 cm., consta de una válvula regulable electrónica que controla el flujo de las emisiones de la combustión, además hay una válvula de flujo unidireccional o check, para evitar el retorno de los gases hacia el tubo de escape, también se tiene un medidor de flujo másico contabilizando la muestra colectada (tiene un intervalo de 0 a 1.415 m<sup>3</sup>/min con una resolución de 0.0283 m<sup>3</sup>/min), y un termómetro, para indicar la temperatura con que entran los gases al minitúnel, con un intervalo de medición de 0 a 300 °C y una resolución de 1°C. En la descarga el tubo tiene forma de aguja hipodérmica, dando salida a los gases en la misma dirección del flujo de aire, el material de construcción es acero

inoxidable con un diámetro de 1.27 cm.(½"). y un espesor de 0.1587 cm. (1/16").

2. Cámara mezcladora: Aquí los gases de escape se diluyen con el aire atmosférico. Sus características son:

*Material	tubo de acero inoxidable ced. 40, diámetro nominal de 10.16 cm. (4")
*Longitud	30 cm. (11.81")
*Diámetro exterior	11.43 cm. (4.5")
*Diámetro interior	10.23 cm. (4.026")

3. Venturi: Aumenta la velocidad de los fluidos, incrementando la turbulencia que ayuda a obtener una mezcla homogénea de aire-gases de combustión. Las características son:

*Material	Tubo de acero inoxidable ced. 40, diámetro nominal de 10.16 cm. (4")
*Longitud	50 cm. (19.68")
*Diámetro exterior	11.43 cm. (4.5")
*Diámetro interior	10.23 cm. (4.026")
*Diámetro de garganta	5.115 cm. (2.013")
*Angulo de entrada	12°
*Angulo de salida	6°

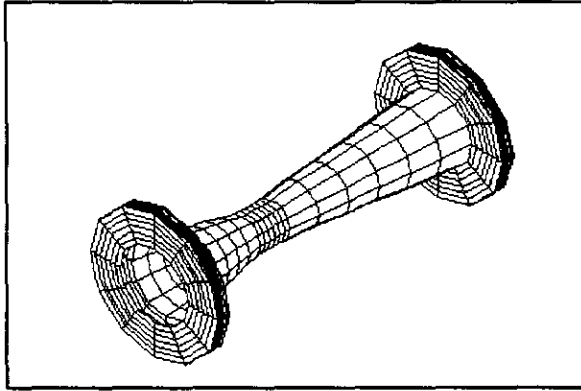


Fig. 1.5. Vénturi

4. Tubo con rejillas: Elemento que cambia el régimen turbulento de la mezcla por flujo laminar. Sus características son:

- \*Material del tubo: Acero inoxidable ced.40, diámetro nominal de 10.16 cm. (4")
- \*Material de las láminas: Acero inoxidable de 2 mm.(5/64") de espesor
- \*Longitud 40 cm (15.75")
- \*Diámetro exterior 11.43 cm. (4.5")
- \*Diámetro interior 10.23 cm. (4.026")

5. Cámara estabilizadora: Estabiliza el flujo de la muestra para el monitoreo de los gases. Sus características son:

*Material	Tubo de acero inoxidable ced. 40, diámetro nominal 4"
*Longitud	70 cm. (27.55")
*Diámetro exterior	11.43 cm. (4.5")
*Diámetro interior	10.23 cm. (4.026")

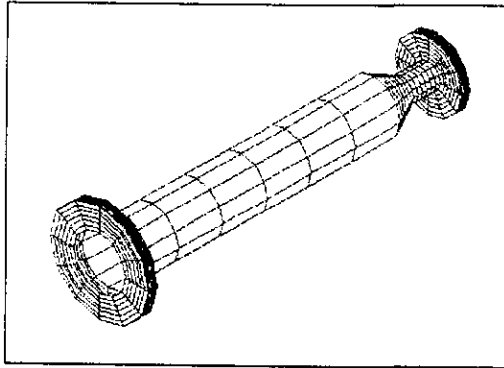


Fig. 1.6 Cámara Estabilizadora

6. Instrumentos de muestreo final: Se tiene un manómetro para conocer la variación de presión del flujo en la salida de la cámara estabilizadora (tendrá un intervalo de 0 a 1 kg/cm<sup>2</sup> con una resolución de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>), y un termómetro que indica la temperatura de la mezcla aire-gases de combustión, tiene un intervalo de medición de 0 a 100°C con una resolución de ±1°C.

También se cuenta con los soportes del cuerpo del minitúnel, hechos de acero cold-rolled 1018, que permite, gracias a sus mecanismos flexibles de sujeción, trasladarlo rápidamente de un lado a otro y por su diseño es de fácil armado.

### 1.3 SISTEMA DE CAPTURA DE PARTÍCULAS

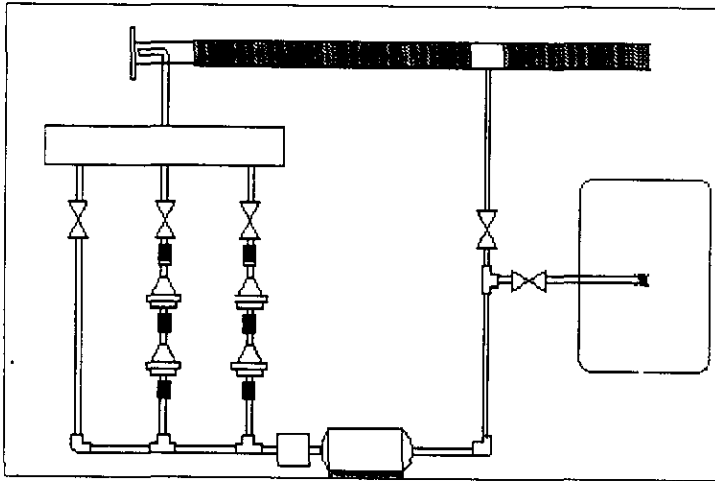


Fig. 1.7 Sistema de captura de partículas

Contiene los siguientes elementos:

1. Toma de muestra de la mezcla: al igual que en la toma de gases de escape, el tubo tiene forma de "L" para coleccionar una muestra de la mezcla aire-gases de escape, esta hecho de acero inoxidable y tiene un diámetro de 1.27 cm ( $\frac{1}{2}$ ").

2. Distribuidor múltiple y válvulas: Aquí la muestra se dirige hacia alguno de los procesos a realizar, el distribuidor esta hecho de tubo de acero inoxidable ced. 40 con diámetro nominal de 5.08 cm. (2"), los ductos por donde se mandará la muestra son de 1.27 cm. ( $\frac{1}{2}$ " de diámetro. Las válvulas



son manuales, con recubrimiento de acero inoxidable y empaque de teflón, y permitirán el paso por uno de los tres ductos a seguir.

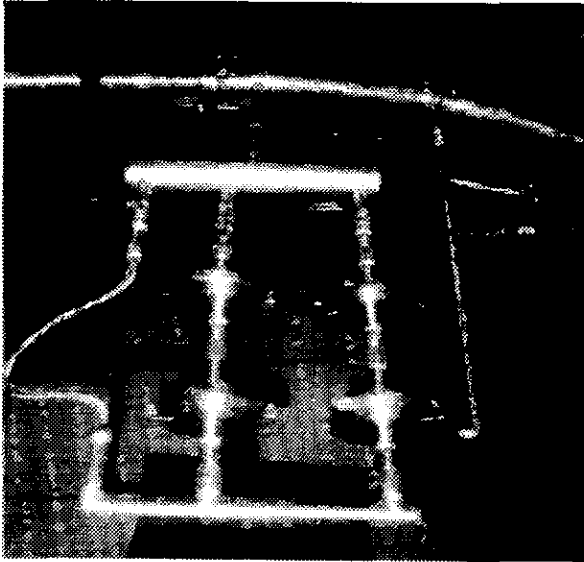


Foto 1.1. Distribuidor múltiple con válvulas

3. Portafiltras: Especiales para éste tipo de prueba (recolección de partículas suspendidas), construidos con acero inoxidable, contienen dos filtros conectados en serie y un mecanismo que permite el cambio de éstos en forma rápida.

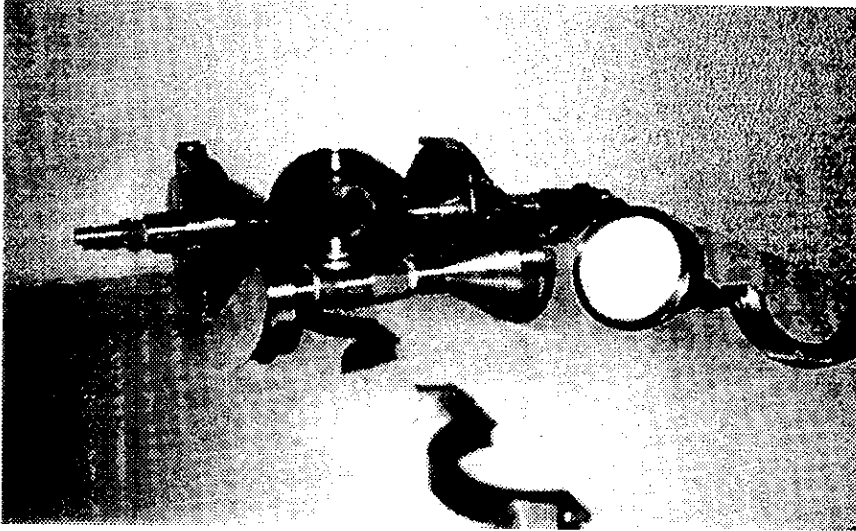


Foto 1.2 Portafiltras

4. Medidor de flujo: Detecta la cantidad de mezcla que termina el proceso de estudio.

5. Bomba de vacío: Succiona al fluido obligándolo a pasar por los filtros o apresura el transcurso hacia las bolsas, según el estudio que se este realizando, ayuda al rápido filtrado venciendo la diferencia de presión en los filtros. Sus características son:

*Gasto	0.113267 m <sup>3</sup> /min (4 CFM)
*Velocidad angular	1725 rpm
*Presión de vacío	2.666 Pa (20 micrones)
*Capacidad de aceite	0.368 kg (13 oz)
*Peso	13.15 kg

*Dimensiones	14.28 x 24.76 x 39.37 cm
*Entrada	1.27 y 0.635 cm. (½" y ¼")
*Potencia del motor	248.3 W (1/3 HP)

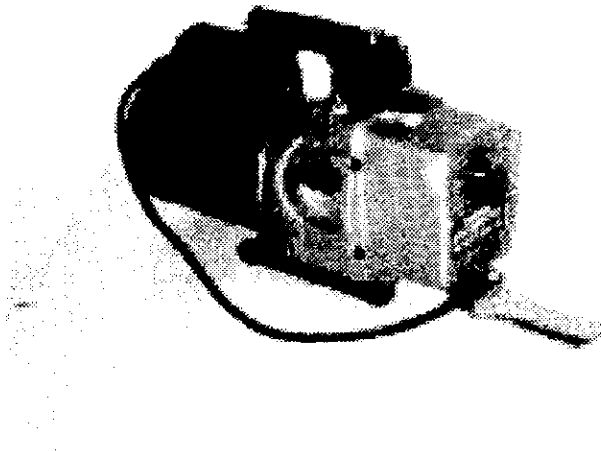


Foto 1.3. Bomba de vacío

6. Bolsas: Elaboradas de teflón para que no reaccionen con la mezcla de gases con que se llenan y puedan utilizarse varias veces. Sus características son:

*Material	TEDLAR ( fluoruro de polivinil)
*Color	negro
*Capacidad	0.857 m <sup>3</sup>
*Dimensiones	0.762 x 0.762 m

\*Válvula tipo

SEPTO

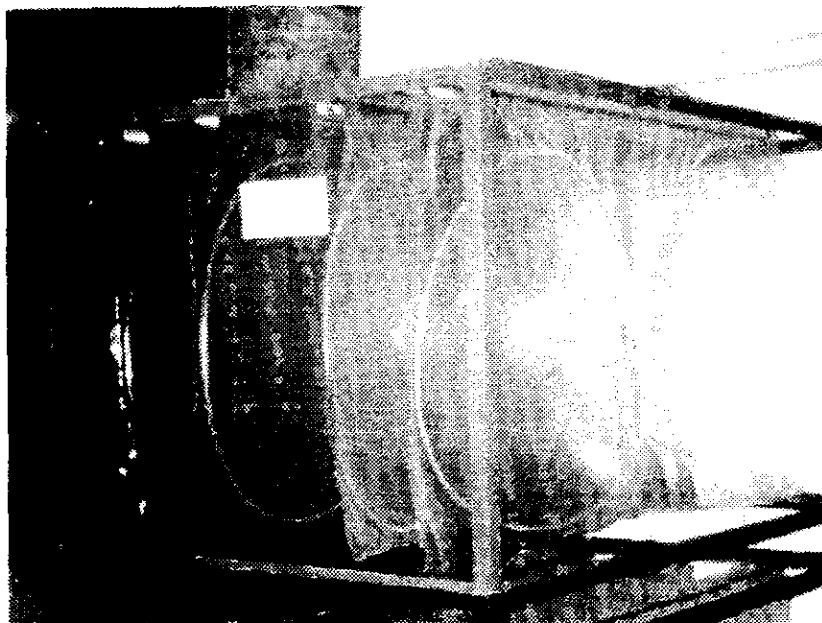


Foto 1.4. Bolsas Tedlar®

También se cuenta con tubería adicional de conducción, elaborada de acero inoxidable ced. 40 de 1.27 cm. ( $\frac{1}{2}$ " ) de diámetro y la manguera corrugada de escape de gases, construida con acero inoxidable de 12.7 cm. (5" ) de diámetro, que dirige la mezcla hacia la atmósfera.

## 1.4 SISTEMA DE CONTEO DE PARTÍCULAS

1. Filtros: Recolectan las partículas suspendidas en la mezcla aire-gases de combustión, sus características son:

*Modelo	FIBERFILM T60A20
*Color	Blanco crema
*Tamaño	70 mm de diámetro
*Material	Fibras de vidrio de borosilicato y fluorocarbón
*Tamaño de poro	10 micras

2. Cámara de humedad y temperatura controlada: Estrictamente necesaria para llevar a cabo la medición de las partículas, ya que se requiere que las mediciones sean siempre en las mismas condiciones atmosféricas y, evitan que los filtros absorban humedad del medio ambiente.



Foto 1.5. Cámara de humedad y temperatura controlada

3. Balanza analítica: con resolución de milésimas de gramo, da el peso de los filtros con las partículas, siempre debe estar dentro de la cámara de humedad y temperatura controlada. Sus propiedades son:

*Marca	Ohaus®
*Capacidad de lectura	0.1 mg
*Tamaño del plato	8.89 cm. (3 1/2")
*Medidas del compartimento	21.59X38.1X34.29cm.(8½X15X13½")
*Peso total	7.8 kg. (17lbs)

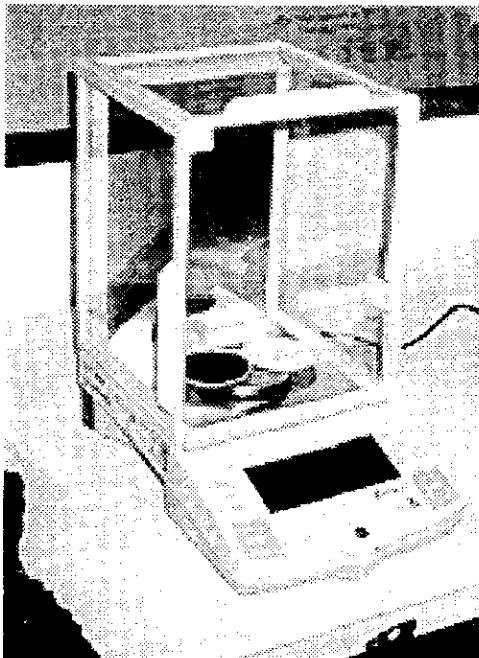


Foto 1.6. Báscula analítica

## CAPÍTULO II

# OPERACIÓN DEL MINITÚNEL

A continuación se describe el procedimiento de cualquier prueba que se realice en el minitúnel de dilución, cada prueba tendrá entre 4.5 y 6 minutos de duración, tiempo recomendado por la norma que rige la construcción y el desarrollo de pruebas del minitúnel CCE-R49.

Todas las pruebas realizadas en el minitúnel de dilución se realizan cuando el motor se encuentra en estado estable, ya que no es capaz de realizar una dilución adecuada en pruebas de ciclo transitorio.

El proceso se enfoca a simular las condiciones que se presentan al producirse una descarga de gases de combustión hacia la atmósfera, en la cual se llevan procesos físicos (sedimentación, suspensión, etc.) y químicos (oxidación, por ejemplo) mediante los cuales las partículas se aglomeran, crecen y se completan las reacciones entre todos los componentes de la emisión de un motor Diesel.

Para empezar la prueba se necesita tener la mezcla de aire - gases de combustión, por lo tanto, la válvula que controla el flujo de los gases permite la entrada de éstos hacia el minitúnel y, la válvula que controla el flujo de aire de dilución permite el paso del fluido necesario para que al final del minitúnel se tenga una temperatura de mezcla de 52°C como máximo.

El aire proporcionado por el ventilador, pasa primero por un banco de filtros que evitan el paso de partículas suspendidas, mayores a una micra de diámetro, que pueda contener dicho aire, evitando errores en la cuantificación de emisiones. La cantidad de aire se regula por una válvula de mariposa que se acciona por medio de un servomotor que recibe la orden de abrir o cerrar según la cantidad de gases de escape que entren al minitúnel.



La muestra de gases de escape, aproximadamente la décima parte del total de la emisión del motor, se recolecta por un tubo, en forma de "L", que se encuentra dentro del tubo principal de escape, en la parte media del flujo. La colección se basa en capturar las emisiones que van por el centro del tubo de escape, ya que son las que tienen más posibilidades de ser expulsadas hacia la atmósfera, mientras que las emisiones más cercanas a las paredes del tubo, particularmente las partículas suspendidas, tienden a estancarse en ellas, gracias al fenómeno de Termoforesis (al final del capítulo se explica este fenómeno ) que se presenta en los ductos.

El tubo de colección no debe exceder en su longitud los 100 cm. entre la base del tubo de escape principal y la base del ducto donde se descarguen los gases o entrada del minitúnel (normativa CEE-R49).

En la descarga, el tubo adopta la forma de aguja hipodérmica y descarga los gases en la dirección del flujo de aire y en la línea media de la cámara mezcladora.

Durante la longitud del tubo se tienen varios aparatos importantes entre ellos el medidor de flujo que cuantifica los gases colectados dando el parámetro para abrir la válvula de mariposa del ventilador; además hay un termómetro indicando la temperatura con la que entran a la cámara, la citada válvula de entrada que se activa con la señal del medidor de flujo de combustible Diesel, y por último debe mencionarse a la válvula check que impide que los gases que han entrado por el tubo colector regresen hacia el tubo principal de escape.

La muestra de gases y aire atmosférico, tiene contacto en la cámara mezcladora, combinándose, además, dicha cámara funciona como intercambiador de calor de contacto directo dando lugar a una importante transferencia de calor, debido a la gran diferencia de temperatura y a la proporción másica entre ambos fluidos.

Debido a la considerable velocidad con que entra el aire a la cámara mezcladora, las partículas suspendidas en la muestra de los gases de escape siguen el viaje de los fluidos evitando que se depositen en la cámara, además al pasar por el Venturi, siguiente accesorio por donde pasan los fluidos, la velocidad se incrementa y con ésta la turbulencia del flujo dando como resultado que las partículas se encuentren suspendidas dentro de la mezcla totalmente homogénea de aire-gases.

Como se mencionó, la mayor transferencia de calor ya se ha efectuado, y en las siguientes cámaras del minitúnel la transferencia de calor entre la mezcla homogénea y las paredes (así como la de las paredes con el medio ambiente) es mínima, por lo tanto, se tendrá una capa límite térmica despreciable dando por resultado que sea casi nula la aparición del fenómeno de Termoforesis.

El siguiente elemento por donde pasa la mezcla es la cámara con rejillas, que favorece el paso del fluido en régimen turbulento hacia una mezcla de flujo laminar, ya que ésta cámara tiene una serie de láminas longitudinales y paralelas que obstaculizan el flujo para disminuir su velocidad y darle una misma línea de corriente paralela a las láminas de la cámara.

Después de la cámara con rejillas, el fluido pasa a una cámara estabilizadora, donde el flujo se vuelve homogéneo, en la salida de éste elemento se mide la temperatura de la mezcla, que debe encontrarse en los 52°C (125°F) como máximo, para dar paso al proceso de captura de partículas y/o al llenado de las bolsas tedlar.

En el proceso de captura de partículas, se cuenta con un tubo idéntico, en forma, al tubo que colecta la muestra de los gases de escape y cumple con los requisitos para el proceso de recolección isocinética (las condiciones del proceso se establecen al final del capítulo), para que la muestra seleccionada sea representativa del total de la mezcla aire-gases de combustión. La boquilla colectora se encuentra colocada en la línea media del flujo de la cámara estabilizadora.

La muestra representativa se dirige hacia el sistema de medición, que consta de un distribuidor con tres salidas que por medio de válvulas manuales tienen la función de dirigir el fluido hacia alguno de los procesos de estudio que se realizará y las válvulas permitirán el paso por uno de los tres caminos a escoger, dos de ellos ocupados por portafiltros y el otro dirige la muestra hacia las bolsas de tedlar para almacenarse y luego cuantificar el contenido de HC, NOx y CO.

Cuando se elige el camino de los portafiltros, estos contienen dos filtros conectados en serie cada uno, para garantizar la recolección total de partículas, el arreglo de dos diferentes portafiltros fue diseñado para hacer más rápido y

ágil el proceso, ya que se puede estar cuantificando las partículas encontradas en los filtros de uno de ellos, mientras que por el otro se realiza otra prueba de recolección. Además, en ayuda para éste proceso, se utiliza una bomba de vacío que compensa la caída de presión a través de los filtros y succiona los gases, para una mayor agilidad en el proceso, mandándolos hacia la atmósfera o al llenado de bolsas para el estudio de laboratorio.

Para la opción de sólo mandar la muestra adquirida para estudio de laboratorio, hacia las bolsas, el distribuidor dirige el fluido directamente al llenado por medio del ducto diseñado para éste propósito.

Las lecturas de la instrumentación se llevan a una tarjeta de adquisición de datos para procesar la señal, con el uso de una computadora personal se muestran los resultados y por medio de ésta se tendrá la manera de verificar el funcionamiento general del minitúnel en todo momento.

## **II.1 RECOLECCIÓN ISOCINÉTICA DE LA MUESTRA**

Referido a la toma de muestra, bajo tales condiciones que dan como resultado que no se presente cambio de momentum en las partículas tomadas, y por lo tanto la muestra es representativa de los gases y aerosoles de la corriente total de prueba. Esto debe completarse por el uso de un tubo con paredes delgadas alineadas con la corriente del flujo total y el dibujo de la muestra dentro del tubo es similar a la misma línea de velocidad de la corriente total en

este punto. Aún cuando estas precauciones sean reguladas, se tendrán grandes razones para que la prueba no sea fielmente representativa, los motivos son:

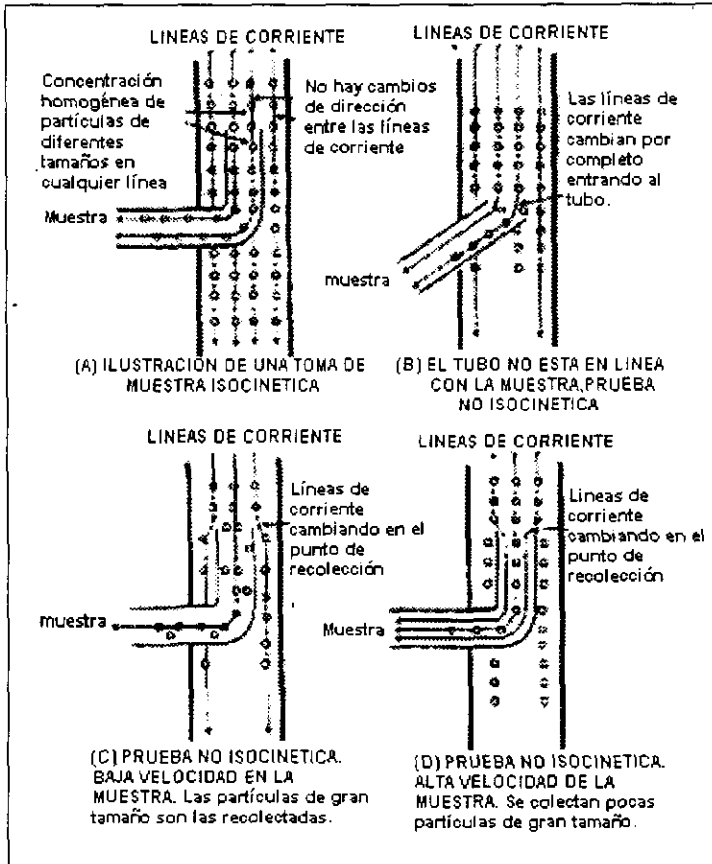


Fig. 2.1 Ilustración esquemática de toma de muestra No-isocinética e Isocinética

a) Los sondeos siempre tienen una pared finita de grosor que causa disturbios al flujo.

b) El punto de muestreo no es representativo del flujo completo.

c) Si el flujo es turbulento en el punto de muestreo no hay forma de tener una prueba isocinética. La muestra contendrá pequeñas porciones de grandes partículas: o

d) La muestra puede perderse por deposición o cambios por aglomeración o desaglomeración en la línea de prueba entrando al sondeo o al entrar al dispositivo principal de muestreo.

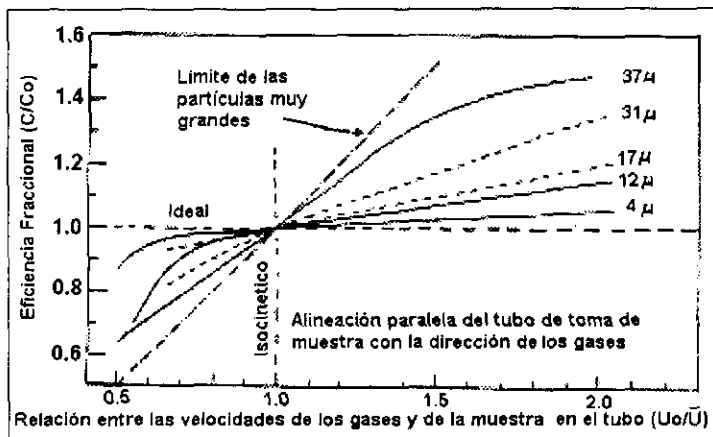


Fig. 2.2 Diagrama que muestra el cambio de proporción de partículas con respecto al de la colección isocinética. "Methods of Air Sampling And Analysis". James P. Lodge Jr.

Afortunadamente, no es siempre necesario el uso de la prueba isocinética para obtener una buena prueba. La Fig. (2.2) muestra la eficacia de colección de partículas en varios tamaños en función de la velocidad de corriente. La Fig.

(2.3) muestra los efectos de la no alineación del tubo de muestreo en la misma dirección de la corriente del flujo. Estos datos muestran que:

a) Velocidad y alineación en la muestra son importantes condiciones de una prueba isocinética.

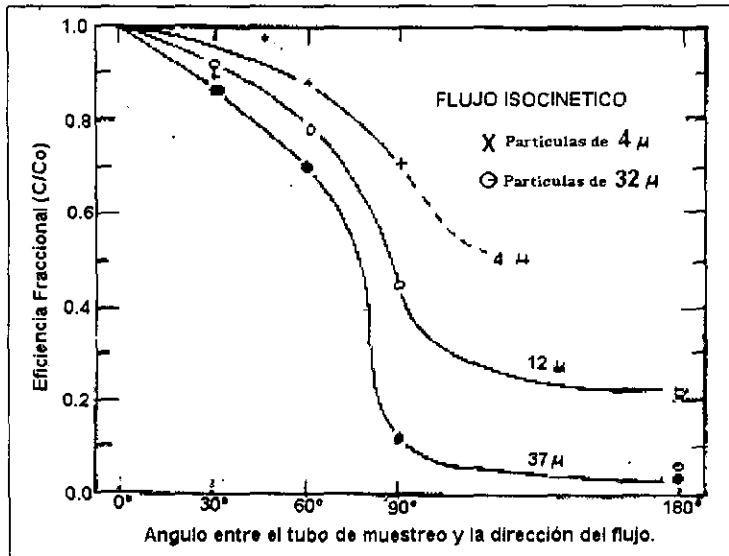


Fig. 2.3 Variación de proporción de la muestra con respecto al ángulo entre el tubo colector y la línea de corriente. "Methods of Air Sampling And Analysis". James P. Lodge Jr.

b) Bajo condiciones isocinéticas todas las partículas, de cualquier tamaño, se colectan eficientemente.

c) Las partículas pequeñas (abajo de 3 μm de diámetro) no requieren estar en prueba isocinética, para una eficiente colección, su masa pequeña minimiza los efectos inerciales.

d) Los gases estancados, como el aire ambiente, no requieren de las condiciones isocinéticas para una colección eficiente debido a que sus partículas tienen muy bajo movimiento que provoca un momentum minúsculo.

## II.2 TERMOFORESIS

Es el mecanismo causante de que las partículas, suspendidas en un gas, viajen hacia abajo en un gradiente de temperatura. Este fenómeno ocurre debido a que la mayor energía de las moléculas del lado caliente, en promedio, transfieren más momentum a las partículas que se encuentran en el lado frío. Por lo tanto la transferencia de momentum adquirido, causa que las partículas viajen hacia el lado frío del gradiente de temperatura. Esta es la situación imperante en la cámara de combustión de un motor Diesel. Debido a que las paredes de dicha cámara se encuentran relativamente frías, de 400 a 500 K, mientras que la temperatura de la masa de gases de combustión esta muy caliente, arriba de 2500 K en algunos casos, entonces se tiene una capa límite térmica entre las paredes y la masa de gases. Durante la combustión el hollín es producido y transportado en el núcleo de los gases de combustión por medio de un movimiento turbulento. Cuando el hollín tiene contacto con la capa límite térmica éste se desplaza hacia abajo, en las paredes, debido al gradiente de temperatura.



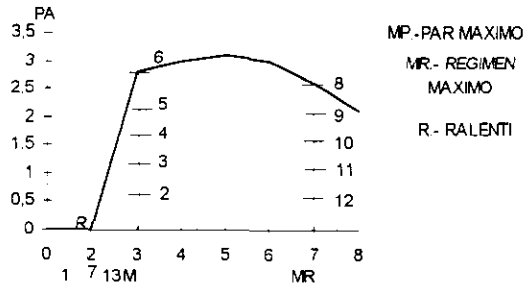
## **CAPÍTULO III**

# **PROTOCOLO DE PRUEBAS**

### **III.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS**

Las pruebas se llevaran a cabo de acuerdo al ciclo de los trece modos Tabla (3.1) marcado por la norma de la Comunidad Económica Europea, para vehículos con motores a Diesel de servicio pesado a régimen estabilizado (NORMATIVA 88/77/CEE , ECE-R49)

## CICLO DE TRECE MODOS



MODO	RÉGIMEN	% CARGA	TIEMPO EN (MIN) DE CADA MODO	
			MÍNIMO	MAXIMO
1	RALENTI	-	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	RALENTI	-	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	RALENTI	-	4.5	6.0

Tabla 3.1

Antes de llevar a cabo las mediciones de partículas y gases, se deben de tener las condiciones establecidas por norma en el minitúnel, como son:

- Tener un régimen estabilizado.
- La temperatura en la cámara estabilizadora no debe ser mayor a 52°C

Ya que se tienen estas condiciones en el minitúnel, se lleva a cabo la prueba que debe tener una duración de 4 a 6 minutos. Al final de la prueba, ya que se atrapan las partículas en los filtros y se recolecta la mezcla filtrada o no filtrada (según sea la prueba) en las bolsas Tedlar, se procede a realizar las evaluaciones de la cantidad de partículas encontrada en la mezcla y las concentraciones de los diferentes componentes de la mezcla (CO, CH<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>)

### III.2 EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE PARTÍCULAS

Ya que se tienen los filtros primario y secundario con las partículas retenidas Fig. (3.1), se conducen en portafiltros a la cámara de humedad controlada para llevar a cabo las mediciones necesarias para obtener el peso de las partículas (mg), cabe mencionar que con anterioridad se pesan los filtros mediante el mismo procedimiento, para que después con una simple operación (E.1) se obtenga el peso de las partículas.

$$\text{Peso de Partículas} = \text{Peso de filtro con Partículas} - \text{Peso de filtro (E.1)}$$

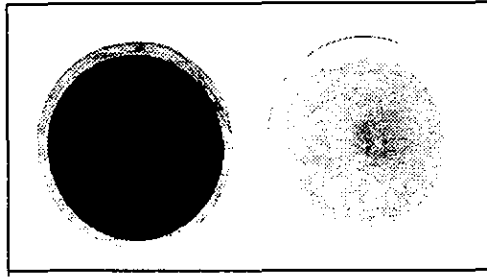


Fig. 3.1 Filtros primario y secundario

### III.3 EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA.

Esta evaluación se lleva a cabo con la muestra contenida en la bolsa Tedlar, mediante un análisis de laboratorio con equipo especializado que proporciona las cantidades de los componentes (  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  y  $\text{NO}_x$  ) con sólo suministrarle la mezcla de gases de combustión y aire atmosférico, con el que no se cuenta en el laboratorio, por lo que es necesario pedir apoyo a instituciones alternas al Instituto de Ingeniería, como es el Instituto de Química, etc.

Los resultados obtenidos en las evaluaciones se registrarán en tablas para poder así analizarlos y llegar a conclusiones acerca de la calidad de los combustibles, procesos de combustión y dispositivos anticontaminantes.

En las Tablas (3.2) y (3.3) se observa la normativa (88/77/CEE, ECE-R49) acerca de la emisión de partículas para ensayos en motor mediante el ciclo de los 13 modos.

### EMISIÓN DE PARTÍCULAS, POTENCIAS MENORES DE 85 kW.

FECHA DE APLICACIÓN	(CO) g/kWh	(CHx) g/kWh	(NOx) g/kWh	(PARTÍCULAS) g/kWh
1/julio/92	4.5	1.1	8.0	0.36
1/octubre/95	4.0	1.1	7.0	0.15

Tabla 3.2

### EMISIÓN DE PARTÍCULAS, POTENCIAS MAYORES DE 85 kW.

FECHA DE APLICACIÓN	(CO) g/kWh	(CHx) g/kWh	(NOx) g/kWh	(PARTÍCULAS) g/kWh
1/octubre/93	4.9	1.23	9.0	0.40
1/octubre/96	4.0	1.1	7.0	0.15

Tabla 3.3

En cuanto a las pruebas de motores en banco, son esencialmente de servicio pesado y que corresponden a las categorías siguientes:

- Transporte de personas con capacidad de más de 8 personas además de la del conductor y que no exceda de 5 toneladas (  $M_2$  ).
- Transporte de personas con capacidad de más de 8 personas además de la del conductor y con un peso mayor a 5 toneladas (  $M_3$  ).

- Transporte de mercancías, con un peso superior a 3.5 toneladas sin que exceda de 12 toneladas ( N<sub>2</sub> ).
- Transporte de mercancías, con un peso superior a 12 toneladas ( N<sub>3</sub> ).

Las categorías anteriores se especifican en la normativa 88/77/CEE ( ECE-R49 ).







## **CAPÍTULO IV**

# **PRUEBAS PRELIMINARES MEDICIÓN DE PARTÍCULAS**

Estas pruebas se realizaron para conocer el comportamiento de todos los sistemas constitutivos del minitúnel y realizar ajustes y/o correcciones de ser necesario, además de comprobar los rangos de temperatura requeridos por la norma.

Cabe mencionar que no se tienen todos los dispositivos electrónicos que controlan y censan el comportamiento del minitúnel durante la prueba, ya que no se cuenta con el presupuesto para adquirirlos, esto provoca que las pruebas no se hallan llevado a cabo bajo el protocolo marcado por la norma (CEE-R49)

Sin embargo, se llevo cabo la recolección de partículas en los filtros primario y secundario, que permitió comparar los resultados que se obtenian al usar, antes y después, un dispositivo anticontaminante (filtros cerámicos).

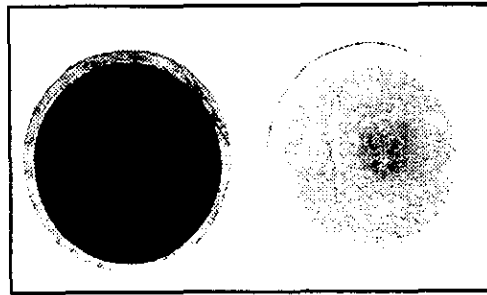


Fig. 4.1 Filtros primario y secundario  
(sin utilizar filtros cerámicos)

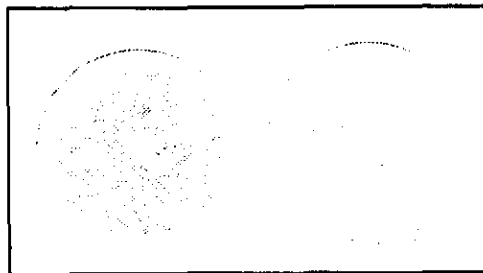


Fig. 4.2. Filtros primario y secundario  
(utilizando filtros cerámicos)

IV.1 TABLA DE DATOS Y RESULTADOS (SIN FILTRAR)

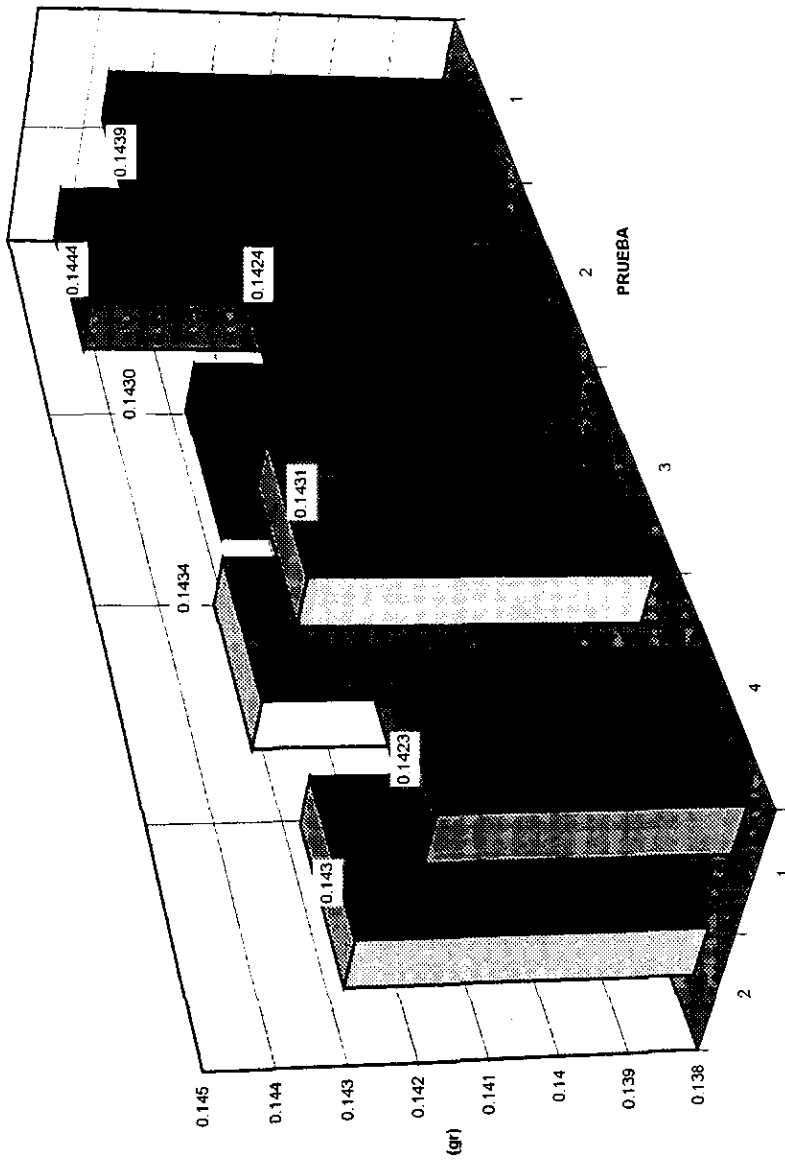
PRUEBA	TIEMPO (min)	GASTO DE COMBUSTIBLE (in <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )	VELOCIDAD DEL MOTOR (rpm)	POTENCIA DEL MOTOR		TORQUE DEL MOTOR		TEMPERATURA DEL AIRE ATMOSFERICO (°C)	TEMPERATURA DEL ACEITE DEL MOTOR (°C)	OPACIDAD K	OPACIDAD (%)	PESO DEL FILTRO ANTES (gr.)	PESO DEL FILTRO DESPUES (gr.)	PESO DE PARTICULAS	PESO POR VOLUMEN (kg/m <sup>3</sup> )
				(HP)	(kW)	(lb-ft)	(Nm)								
No															
1	10	0.000161	1200	47	35.048	250	339.08	23	97	2.9	0.062	0.1439	0.1444	0.0005	0.0003106
2	10	0.000192	1205	57	42.505	250	339.08	24	97.5	3	0.065	0.1424	0.1430	0.0006	0.0003125
3	10	0.000115	1206	60	44.742	258	349.93	25	94	2.7	0.06	0.1431	0.1434	0.0003	0.0002609
4	10	0.000169	1228	47	35.048	208	282.11	25	97	3.2	0.065	0.1423	0.143	0.0007	0.0004142

TABLA DE DATOS Y RESULTADOS (FILTRADO)

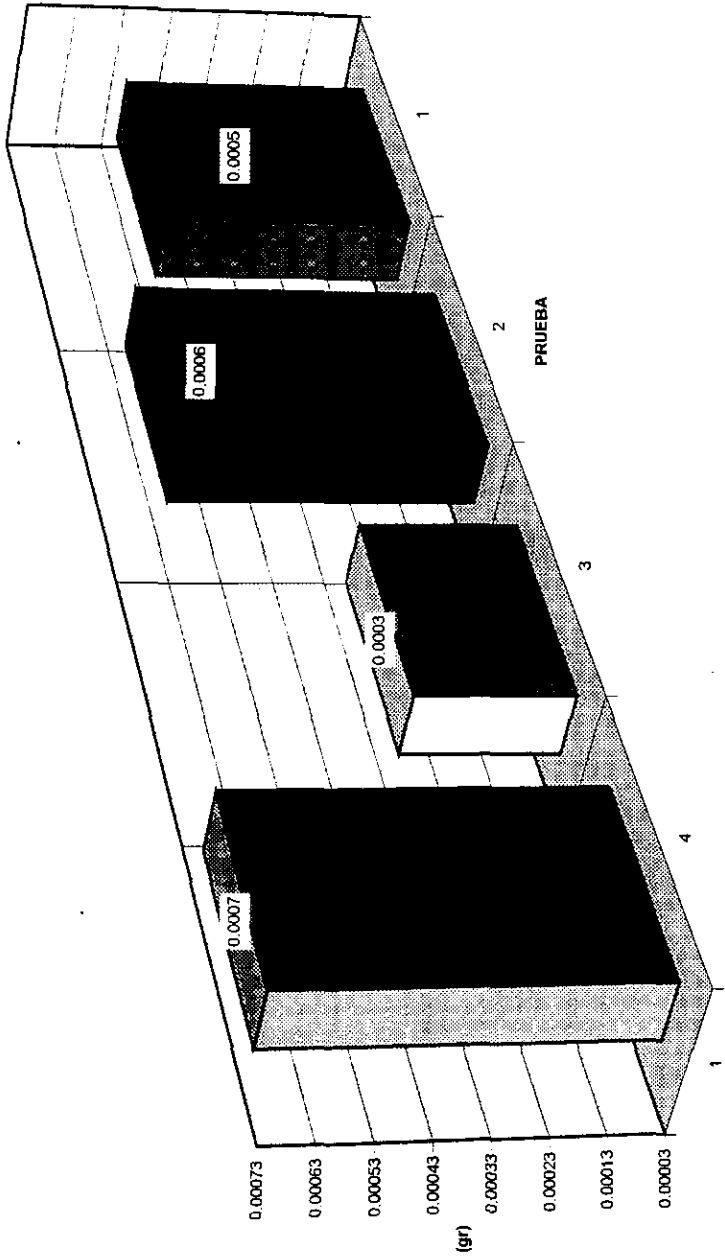
PRUEBA	TIEMPO (min)	GASTO DE COMBUSTIBLE (in <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )	VELOCIDAD DEL MOTOR (rpm)	POTENCIA DEL MOTOR		TORQUE DEL MOTOR		TEMPERATURA DEL AIRE ATMOSFERICO (°C)	TEMPERATURA DEL ACEITE DEL MOTOR (°C)	OPACIDAD K	OPACIDAD (%)	PESO DEL FILTRO ANTES (gr.)	PESO DEL FILTRO DESPUES (gr.)	PESO DE PARTICULAS	PESO POR VOLUMEN (kg/m <sup>3</sup> )
				(HP)	(kW)	(lb-ft)	(Nm)								
No															
1	10	0.000141	1181	45	33.557	199	269.90	25	83	1.8	0.038	0.1392	0.1393	0.0001	0
2	10	0.000121	1190	47	35.048	207	280.75	24	80	1.4	0.042	0.1387	0.1389	0.0002	0.0001653
3	10	0.000207	1212	62	46.233	264	358.96	24	85	1.7	0.035	0.1395	0.1396	0.0001	0.0000483
4	10	0.000192	1250	60	44.742	256	347.21	23	85	1.6	0.046	0.1397	0.1399	0.0002	0.0001042

# RESULTADOS DE LAS PRUEBAS SIN EL USO DE DISPOSITIVOS ANTICONTAMINANTES

PESO DE LOS FILTROS

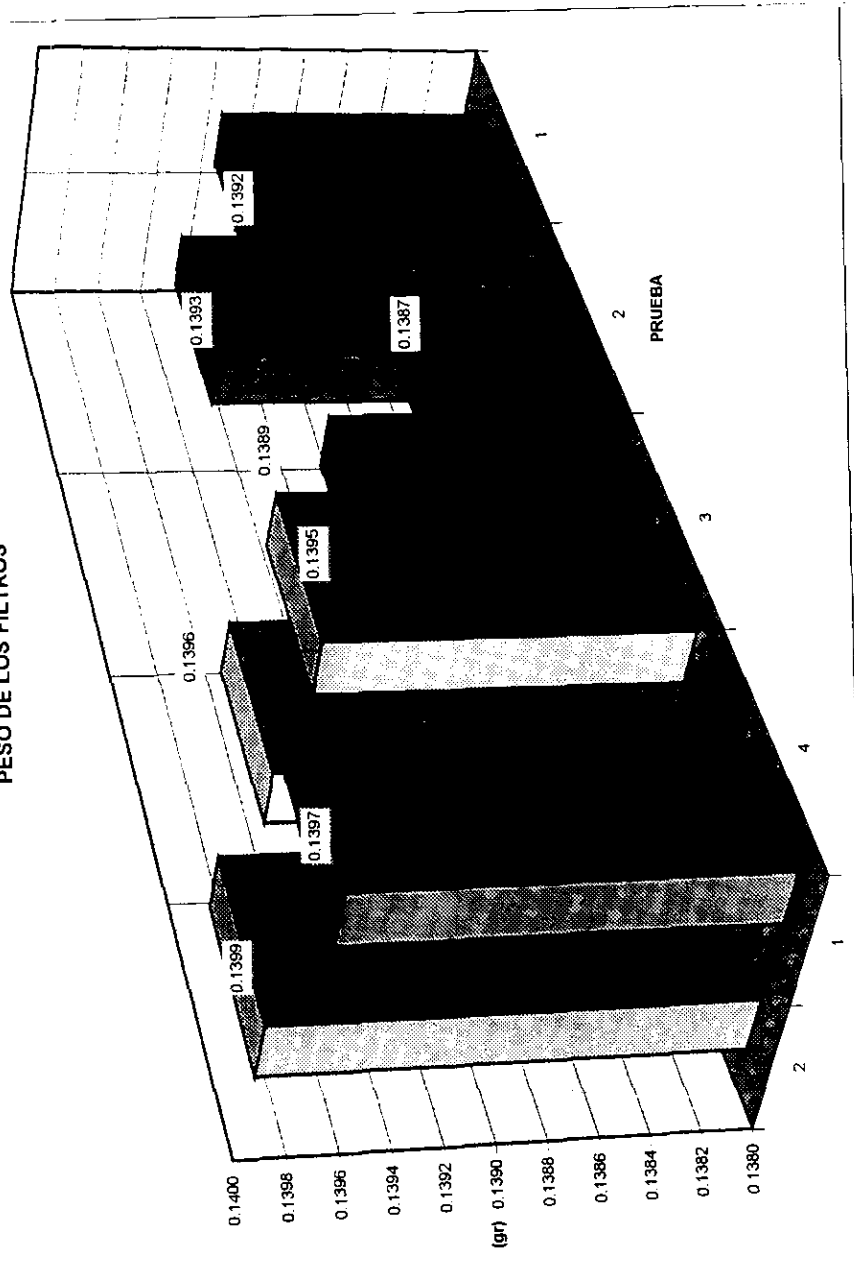


PESO DE LA PARTICULAS

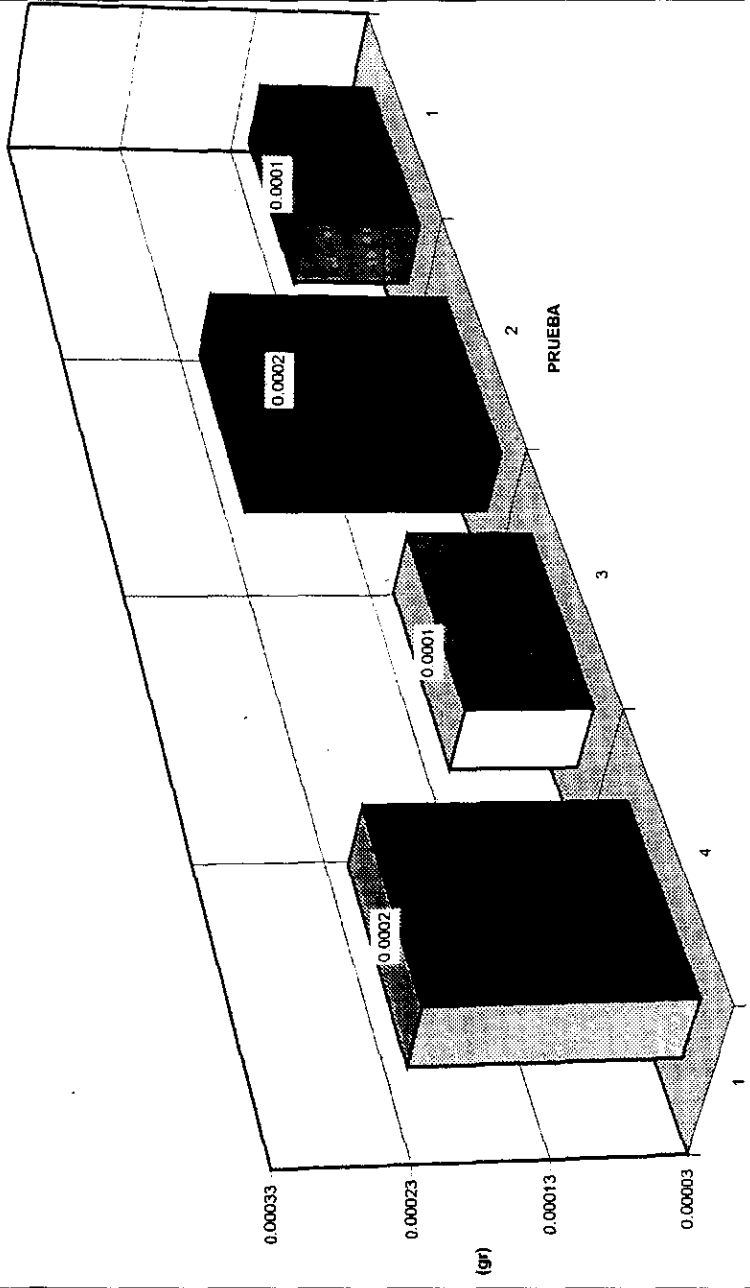


# RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL USO DEL DISPOSITIVO ANTICONTAMINANTE

PESO DE LOS FILTROS



PESO DE LA PARTICULAS



## CONCLUSIONES

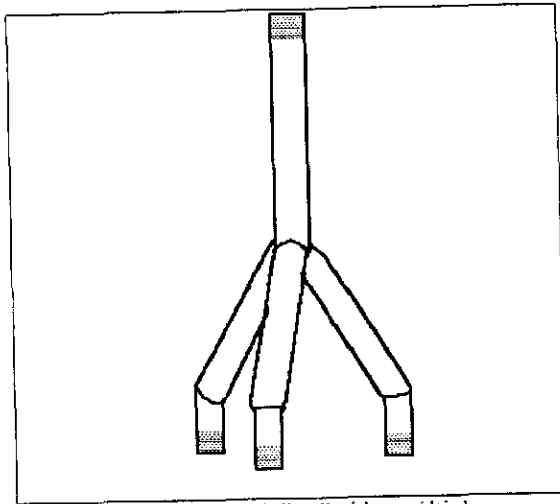
Las conclusiones de la presente tesis se basan en las experiencias adquiridas durante el desarrollo del diseño y fabricación del minitúnel, las visitas de carácter técnico hechas a los equipos del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y la Volkswagen (V.W.), así como los resultados obtenidos.

La principal caída de temperatura se presenta cuando los gases de combustión, provenientes del motor Diesel se inyectan en el minitúnel, en este punto la cámara mezcladora actúa como un intercambiador de calor de contacto directo, de aquí en adelante la transferencia de calor a través de las paredes del minitúnel es baja, debido a que la diferencia de temperaturas, de la mezcla en el interior del minitúnel y la atmosférica no es muy grande (una diferencia de 30°C aproximadamente), lo que evita que el hollín se deposite en las paredes del minitúnel (fenómeno de Termoforesis).



La tubería de conducción, después del par de filtros primario y secundario, se fabricó por nosotros mismos utilizando tubería de cobre, permitiéndonos un ahorro de dinero y tiempo. El uso de este material no afecta el resultado de las pruebas, ya que la temperatura que se registra en el interior de los tubos es muy baja y el tiempo de contacto de la mezcla con las paredes de la tubería es corto.

El distribuidor múltiple, puede tener una mejora en su diseño como se muestra en el croquis siguiente:



Croquis del distribuidor múltiple

Con esta mejora se ahorra dinero en material y en mano de obra, además se reducen las pérdidas por fricción ya que se tendría el equivalente a dos codos de 45° en lugar de tener el equivalente de dos de 90°.

Utilizar válvulas manuales en el arreglo de los portafiltros, es mejor opción que la de usar válvulas solenoides o con servomotor, porque durante la prueba estas se colocan en una posición (abierta o cerrada), la cual conducirá el flujo a algunos de los posibles destinos, también se puede adaptar un sensor, que mandaría una señal a la computadora indicando la posición de la válvula, esto tiene la ventaja que programando la computadora para que interprete la posición de las válvulas, nos muestre en el despliegue de datos, el camino que esta siguiendo el flujo, como se indica en la siguiente tabla de verdad:

No.	PROCESO	VÁLVULAS				
		V1	V2	V3	V4	V5
1	Sin filtración y salida a la atmósfera	A	C	C	C	A
2	Filtración por los filtros primario y secundario "A" y salida a la atmósfera	C	A	C	C	A
3	Filtración por los filtros primario y secundario "B" y salida a la atmósfera	C	C	A	C	A
4	Filtración por los filtros primario y secundario "A" y llenado de bolsa tedlar	C	A	C	A	C
5	Filtración por los filtros primario y secundario "B" y llenado de bolsa tedlar	C	C	A	A	C

Es importante que, cuando la bomba de vacío se vaya a poner en operación, por lo menos una de las válvulas que se comunican con la succión (V1, V2, y V3) este abierta, al igual que una de las dos de la descarga (V4 y V5), esto para evitar daños al equipo.

Económicamente la instrumentación y control del minitúnel es la parte de mayor costo, ya que se necesitan instrumentos y aparatos que soporten la temperatura con la que entran los gases de combustión, tengan la característica de poder mandar una señal eléctrica con un voltaje y amperaje específicos para poder ser adquiridos así como analizados por la computadora, y que dimensionalmente sean compatibles con las partes del minitúnel donde van a ser instalados, estas serie de características hace que estos elementos sean difíciles de conseguir en México, teniéndonos que remitir a otros países, principalmente Estados Unidos, lo que incrementa su costo y el tiempo de adquisición.

Las modificaciones al diseño original del minitúnel implicaron la fabricación de dos codos (planos MT-4, MT-5) que permiten optimizar el espacio ocupado por el minitúnel e impide que la entrada del ventilador quede junto al radiador del motor Diesel, evitando que el aire utilizado entre precalentado.

Las primeras pruebas del minitúnel resultaron ser muy halagadoras respecto al la confiabilidad del sistema ya que lograron obtener condiciones de la prueba dentro de lo que marca la norma, como son la de tener una temperatura menor a 52 °C en la recolección de partículas, no tener el

fenómeno de Termoforesis lo cual indica que las partículas no se adherirán a las paredes del minitúnel.

Por otra parte, al evaluar un tipo de dispositivo anticontaminante como son los filtros cerámicos regenerativos se observó que son muy confiables este tipo de dispositivos, ya que la disminución de la cantidad de partículas recolectadas por los filtros y de el valor de la opacidad (K), fue considerable en relación a las cantidades observadas en los gases que no fueron filtrados, lo cual nos permite cumplir con uno de los objetivos del minitúnel que es el de evaluar los dispositivos anticontaminantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PALMA Velasco, Alejandro; et. al.

“Diseño y construcción de un minitunel de dilución parcial, para analizar emisiones de motores a diesel de servicio pesado”.

Facultad de Ingeniería UNAM: Tesis 1997

[2] “Aire limpio, en el área metropolitana de la ciudad de México”.

Boletín Informativo

Turbo Master, S.A. de C.V.; 1995

[3] "Nova Microyol-Particulate Sampler"

Boletín Informativo

RWTUV; 1992

[4] "Diario Oficial de la Federación"

México, D.F.

18 de Octubre de 1988

[5] "Diario Oficial de la Federación"

México, D.F.

16 de Julio de 1993

[6] "Diario Oficial de la Federación"

México, D.F.

22 de Junio de 1994

[7] "Diario Oficial de la Comunidad Económica Europea"(CCE)

España 23 de Abril de 1991

[8] "Diario Oficial de la Comunidad Económica Europea"(CCE)

Alemania

Diciembre de 1992

[9] DIESEL EXHAUST AFTERTREATMENT 1997

"Applications for the Regeneration of Diesel Particulate Traps by Combining Different Regeneration System"

Página 130

[10] SHRIVER L., Coover & Jay D., Helsel.

"Interpretación de Dibujo Mecánico"

3ª Ed.

Editorial Mc Graw Hill

[11] "Interpretación y Recopilación Práctica de las Instrucciones Normalizadas para el Dibujo"

Tomo I, II Y III

[12] JAMES P., Lodge Jr.

"Methods of Air Sampling and Analysis".

3ª. Ed.

Intersociety Comittee (APCA, ASME, ACS,APWA, ISA, ...)

[13] SUHRE, Blake R. & Foster David E.

“Diesel Combustion Emissions, and Exhaust Aftermatreatment” (SAE 1992).

PAPER 921629 “In cylinder soot deposition rates due to thermophoresis in a direct injection Diesel engine”:

[14] KOSTECKI Paul T. & Calabrese Edward J.

“Diesel Fuel Contamination

Mc Graw-Hill

[15] “Diesel Fuel Injection”

SAE 1994

BOSCH



## APÉNDICE A

### NORMAS DE LA CEE Y LA NOM

#### A.1 NOM-076-ECOL-1994<sup>[6]</sup>

Esta norma se estableció en 1994, apareciendo en el DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN, el día miércoles 22 de junio, y establece los niveles máximos permisibles de hidrocarburos(HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx) provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos del

sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos (Diesel), con peso bruto vehicular mayor de 3.857 kilogramos, tomando en consideración el año, modelo en que se fabrica y su peso bruto vehicular, son los establecidos en las Tablas (A.1) y (A.2).

**NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES POR CONTAMINANTE PARA AUTOMOTORES CON PESO DE 3858 A 6350 KILOGRAMOS**

Año modelo del vehículo	Niveles máximos permisibles de emisión			
	HC*	CO*	NOx*	HCev**
1994	1.1	14.4	5.0	4.0
1995-1997	1.1	14.4	5.0	3.0
1998 en adelante	1.1	14.4	4.0	3.0

Tabla A.1

\*.- Gramos de contaminante por caballo de potencia al freno por hora.

\*\*.- Gramos de contaminante por prueba aplicable únicamente a combustibles líquidos

**NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES POR CONTAMINANTE PARA AUTOMOTORES CON PESO DE 3858 A 6350 KILOGRAMOS**

Año modelo del vehículo	Niveles máximos permisibles de emisión			
	HC*	CO*	NOx*	HCev**
1994	1.9	37.1	5.0	4.0
1995-1997	1.9	37.1	5.0	3.0
1998 en adelante	1.9	37.1	4.0	3.0

Tabla A.2

\*.- Gramos de contaminante por caballo de potencia al freno por hora.

\*\*.- Gramos de contaminante por prueba aplicable únicamente a combustibles líquidos

## A.2 NOM-077-ECOL-94<sup>[6]</sup>

Esta norma se estableció en 1994, apareciendo en el DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN el día miércoles 22 de junio, y establece el procedimiento de medición para la verificación de los niveles de emisión de la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan Diesel como combustible.

El método para medir la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan Diesel como combustible, es el de la aceleración libre, consiste en una prueba estática del vehículo acelerando el motor, desde su régimen de velocidad de marcha lenta hasta su velocidad máxima sin carga.

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

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.

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

■ 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 r.p.m.

El coeficiente K de opacidad se calcula con la formula:

$$\varnothing = \varnothing_0 e^{-KL}$$

Donde:

L = La longitud efectiva del paso de la luz a través de la muestra de gas

$\varnothing$  = Flujo incidente

$\varnothing_0$  = Flujo emergente.

K = coeficiente de absorción por metro ( $m^{-1}$ ).

### A.3 NORMATIVA 92/55/CEE<sup>[8]</sup>

El propósito de la norma es mantener en un nivel moderado las emisiones de gases de escape durante toda la duración de vida del vehículo mediante un control periódico de estas (opacidad del humo) y garantizar la retirada de la circulación de los vehículos muy contaminantes hasta que se realice su debido mantenimiento.

Esta disposición se aplica a partir del 1 de enero de 1997 para los vehículos con motor Diesel.

La medición de la *opacidad* de los gases de escape se hace acelerando el motor en vacío (motor desembragado y pasando de la velocidad de ralenti a la velocidad de desconexión). El nivel de opacidad no debe superar los valores límites del coeficiente máximo de absorción siguientes:

- Motores Diesel de aspiración natural 2.5 m<sup>-1</sup>
- Motores Diesel sobrealimentados 3.0 m<sup>-1</sup>

El control de los vehículos de motor Diesel exige la utilización de un equipo capaz de controlar con exactitud los vehículos en relación con los valores límite establecidos o prescritos por el constructor.

La precisión de lectura del opacímetro deberá contar con una exactitud de  $K = 0.025 \text{ m}^{-1}$ .

#### A.4 NTE-CCAT-005/88<sup>[4]</sup>

Esta norma establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, provenientes de procesos de combustión en fuentes fijas, que utilicen únicamente Diesel como combustible, cuando los gases de combustión no estén en contacto directo con los materiales de proceso.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente, prevé que las emisiones a la atmósfera deberán sujetarse a las normas técnicas

ecológicas en las que se determinen los niveles máximos permisibles de emisión, por contaminante o por fuente de contaminación, a fin de asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y para conservar el equilibrio ecológico.

Las fuentes que usan Diesel como combustible generan contaminantes, dentro de los que se encuentran, entre otros, las partículas, el monóxido de carbono, el bióxido de azufre, y óxidos de nitrógeno. Algunos de estos contaminantes reaccionan con otros compuestos, formando otros contaminantes con características toxicológicas más severas al ambiente que ellos. La emisión de dichos contaminantes produce deterioro a la calidad del aire si rebasa ciertos límites, por lo que es necesario el control de dichas emisiones a través del establecimiento de los niveles máximos permisibles, que aseguren que no se originen alteraciones significativas en el ambiente.

Para los efectos de esta norma técnica ecológica, se consideraran las definiciones contenidas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la protección al ambiente y las siguientes:

*Combustión:* Oxidación rápida, que consiste en una combinación del oxígeno con aquellos materiales o sustancias capaces de oxidarse, dando como resultado la generación de gases, luz y calor.

*Diesel:* Aceite combustible que resulta de la destilación del petróleo, cuando el 10% destila a una temperatura mínima de 200 °C. y el 90% destila a una temperatura máxima de 360 ° C y cumple, además, una especificación establecida.

*Equipo de combustión:* Dispositivo que se utiliza para realizar la ignición de un combustible.

*Proceso de combustión:* Procedimiento mediante el cual un sistema de equipos efectúan la ignición de un combustible.

La determinación de los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera previstos en esta norma, se tomaron en consideración la utilización del Diesel únicamente, la optimización de los procesos de combustión, las tecnologías de control actuales, así como la aplicación de combustibles de la mejor calidad Tabla (A.3).

### NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES

CONTAMINANTES	NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN	
	ZONAS CRÍTICAS	RESTO DEL PAÍS
	kg/m <sup>3</sup> *	kg/m <sup>3</sup> *
PARTÍCULAS	0.260	0.300
MONÓXIDO DE CARBONO	0.600	0.665
BIÓXIDO DE AZUFRE	17.000	34.000
ÓXIDOS DE NITRÓGENO**	2.700	3.000

Tabla A.3

\*.- Kilogramos de contaminantes por cada metro cúbico de Diesel consumido a 25°C.

\*\*.- Los óxidos de nitrógeno expresados como bióxido de nitrógeno.

**A.5 NOM-PA-CCAT-007/93<sup>[5]</sup>**

Esta 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 utilizan para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor a 3857 kilogramos.

En las tablas siguientes se establecen los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales para los automotores a los que se refiere esta norma.

**NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES**

AÑO MODELO DEL MOTOR	HC g/kW-h	CO g/kW-h	NOx g/kW-h	PST g/kW-h
1993*,**	1.74	20.79	6.71	0.34
1994-1997*				
Autobús urbano extra-pesado	1.74	20.79	6.71	0.09
Autobús urbano mediano-pesado, ligero-pesado y otros.	1.74	20.79	6.71	0.13
1998 EN ADELANTE				
Autobús urbano extra-pesado	1.74	20.79	5.36***	0.07
Autobús urbano mediano-pesado, ligero-pesado y otros.	1.74	20.79	5.36	0.13

TABLA A.4

Para automotores con peso bruto vehicular mayor de 3857 kg que usan Diesel como combustible.  
 Donde: g/kW-h = Gramos de contaminante por kiloWatt de potencia del motor por hora.  
 \* = Certificado por los métodos, procedimiento y combustible establecidos por la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos de América.  
 \*\* = Para los motores 1993 se considerará la clasificación año-calendario a partir del día 1º de enero de 1993 y años posteriores.  
 \*\*\* = Esta cifra estará sujeta a revisión de acuerdo a la Normatividad de los Estados Unidos de América.



Los valores establecidos en la Tabla (A.4), entraron en vigor a partir de que se comenzó a distribuir en todo el país el combustible de Petróleos Mexicanos DieselSin (contenido de azufre  $< 0.05$  % en peso).

## APÉNDICE B

### B.1 MÉTODOS PARA EVALUAR LAS EMISIONES

#### B.1.1 ANALIZADORES DE MONÓXIDO DE CARBONO Y DIÓXIDO DE CARBONO (CO / CO<sub>2</sub>)

Los analizadores de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), utilizan el principio de medición por absorción de radiación infrarroja.

---

En este principio las moléculas de los gases absorben radiación infrarroja de una longitud de onda específica. El grado de absorción es proporcional a la concentración de partículas a presión constante.

El analizador consta de un generador de rayos infrarrojos, el haz generado se divide en dos partes, la primera pasa a través de la celda de referencia (que contiene un gas a una concentración determinada y que sirve de patrón de comparación), y la segunda parte pasa por una celda muestra que contiene los gases provenientes del escape a medir: la luz emitida, una vez que ha pasado por las celdas, se modula por medio de un lente rotatorio y se registra en una celda de lectura.

Si una porción de radiación que pasó por la celda de muestra se absorbe por el gas, existe una reducción en la cantidad de radiación que incide en la celda de lectura. La diferencia entre esta señal y la señal que pasó por la celda de referencia (señal de referencia) genera a su vez una señal (lectura de la concentración) que se amplifica y se lleva a un dispositivo de medición y/o almacenamiento.

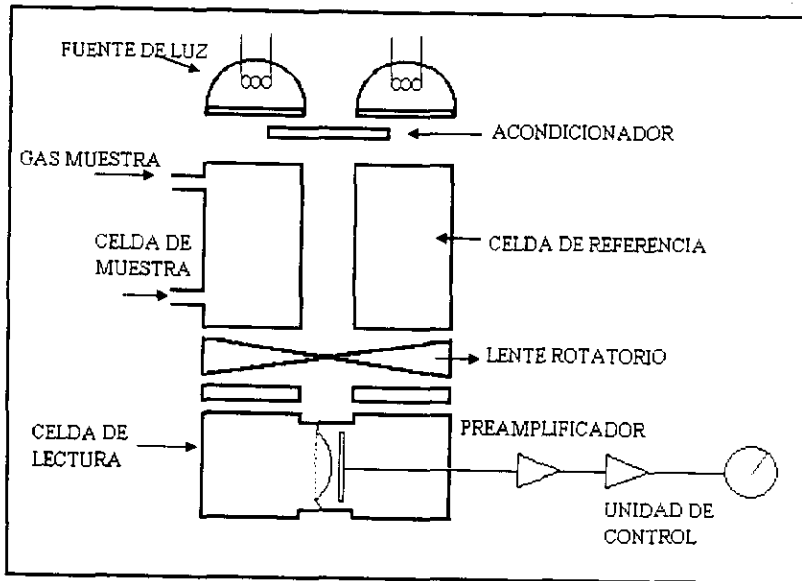


Fig. B.1 Analizador CO / CO<sub>2</sub>

### B.1.2 ANALIZADOR DE HIDROCARBUROS TOTALES (HC)

El analizador de hidrocarburos totales utiliza el principio de detección por ionización de flama para mediciones continuas del total de hidrocarburos contenidos en la muestra.

El principio de ionización de flama, se basa en el conocimiento de que un gas que contiene hidrocarburos, produce una ionización proporcional a la cantidad de átomos de carbono (originalmente presentes como hidrocarburos) en la muestra, cuando pasa a través de una flama de hidrógeno.

---

Para gases tales como óxidos de carbono ( $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), no hay respuesta. Por lo tanto la relación lineal entre la señal de salida y la concentración de hidrocarburos existente es válida para todo el rango de concentración.

El analizador funciona al hacer pasar el gas de muestra a través de la flama de hidrógeno, los hidrocarburos presentes en el gas se queman, incrementándose el número de iones en la flama. El cambio de ionización puede medirse por medio de un electrodo colector circundante a la flama y un voltaje de corriente directa entre la flama y el colector.

Los flujos de combustible y gas de muestra se mantienen constantes a fin de garantizar exactitud. Cuando no hay hidrocarburos presentes, la ionización de la flama es muy baja, como el flujo de gas muestra es constante, la corriente de ionización es teóricamente proporcional a la concentración de carbono. Hay que hacer notar que una concentración "x" de etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) produce una señal de doble intensidad que la misma concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ).

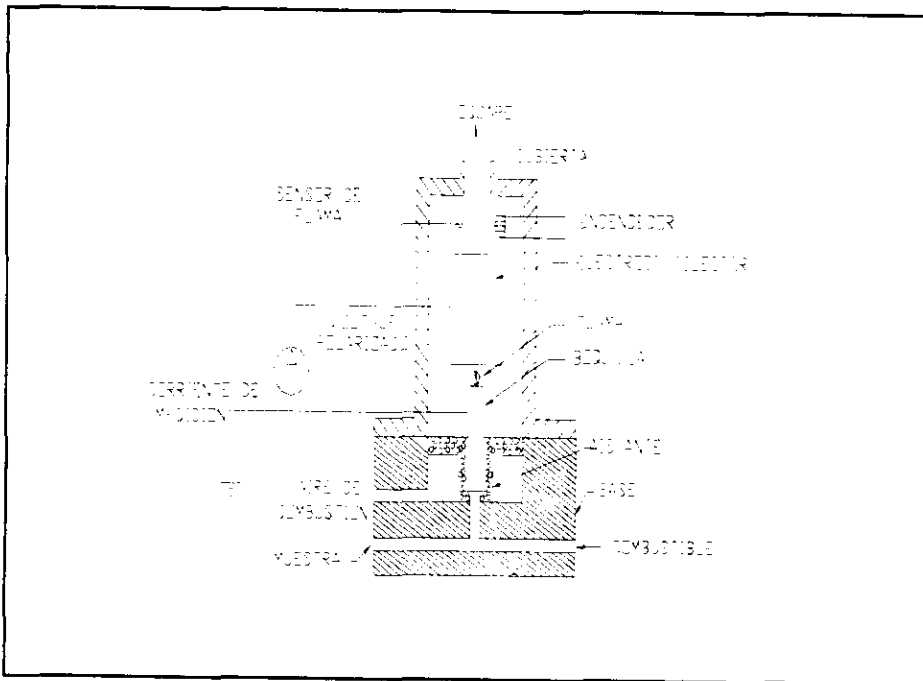


Fig. B.2 Analizador de hidrocarburos totales

### B.1.3 ANALIZADOR DE OXÍGENO

Este analizador se basa en el principio de que un gas paramagnético que sea introducido en un campo magnético desbalanceado, será atraído al campo de mayor intensidad de acuerdo con la relación:

$$DP = (H^2XC)$$

Donde:

- DP = Diferencia de presión.
- H = Intensidad de campo magnético.
- X = Susceptibilidad magnética del gas.
- C = Concentración de la sustancia.

Haciendo que la presión en ese campo aumente, este aumento de la presión se toma del campo magnético usando un gas no paramagnético ( $N_2$ ). El electroimán se magnetiza alternadamente y el cambio de presión se convierte en una señal eléctrica por medio de un capacitor sensible a la presión, esta señal de salida es proporcional a la concentración de oxígeno en la muestra.

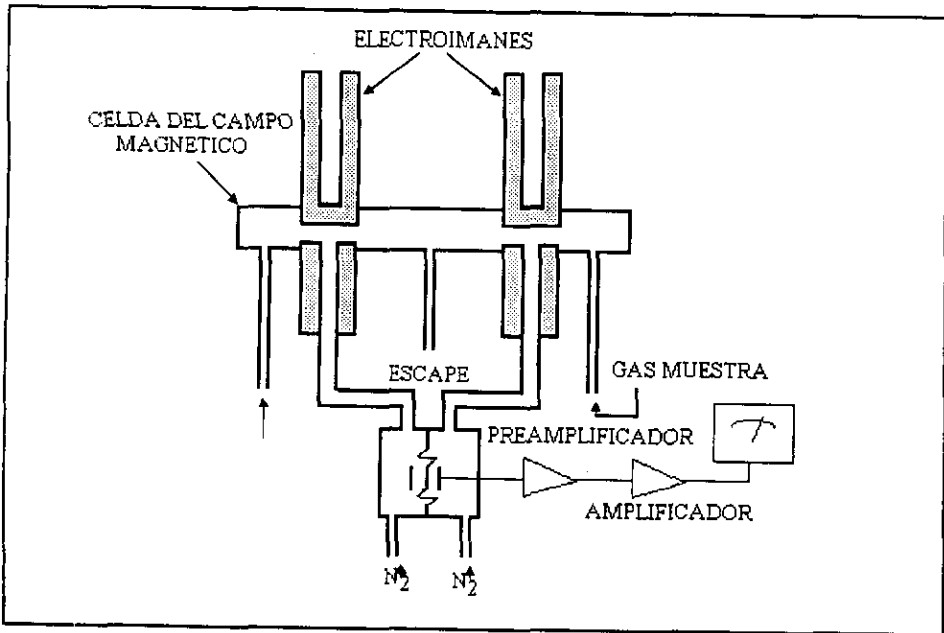


Fig. B.3 Analizador O<sub>2</sub>

### B.1.4 ANALIZADOR DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO / NO<sub>x</sub>)

Este analizador consta de tres partes:

- 1.- Generador de ozono
- 2.- Analizador de luminiscencia química
- 3.-Módulo electrónico para medir la concentración de NO<sub>x</sub> en una muestra de gas.

#### 1.-Generador de ozono.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

El generador abastece al analizador con una mezcla de ozono / aire ( u ozono / oxígeno) a una concentración y flujo compatible con el rango de concentración de NO<sub>x</sub> en el analizador. El ozono en el generador, se obtiene por exposición del aire ( u oxígeno) a la radiación de dos lámparas ultravioleta.

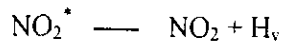
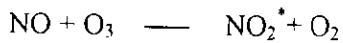
#### 2.-Analizador de luminiscencia química.

El analizador mide la concentración de NO / NO<sub>x</sub> monitoreando la reacción químicoluminiscente del ozono (O<sub>3</sub>) con el óxido nítrico (NO) en la cámara de reacción. La medición es continua en un amplio rango de concentración de NO y NO<sub>2</sub>, sin la interferencia de otros gases. Un convertidor de alta eficiencia cambia el NO<sub>2</sub> de los gases muestra en NO, para medirse en el analizador.



**Determinación del NO.**

El óxido de nitrógeno (NO), contenido en el gas muestra se convierte en NO<sub>2</sub> por la oxidación dentro del analizador usando ozono molecular (O<sub>3</sub>) que se obtiene del generador de ozono, mediante la siguiente reacción:



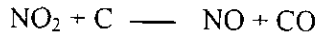
Con la reacción antes mencionada, aproximadamente el 10% del NO<sub>2</sub> producido se encuentra en estado de excitación, este estado se revierte inmediatamente al volver a su estado normal emitiendo fotones de longitud de onda específica (H<sub>ν</sub>).

\* Denota estado excitado.

Los fotones emitidos, se capturan en un fotomultiplicador que se conecta al módulo electrónico para aumentar el voltaje y poder realizar la medición. La concentración de NO es proporcional a la luz emitida (y por tanto al voltaje generado en el fotomultiplicador).

**Determinación de los NO<sub>x</sub>.**

El funcionamiento es idéntico, excepto que el gas muestra se hace pasar por un convertidor (contenido en el interior del analizador) antes de entrar a la cámara de reacción. Ahí el NO<sub>2</sub> presente en la muestra se convierte en NO por medio de la siguiente reacción:



El NO así obtenido pasa a la cámara de reacción y se repite el ciclo descrito en el apartado anterior.

### 3. Módulo electrónico.

Este módulo permite el control de los potenciómetros de ajuste y cero para las diferentes escalas, así como también el interruptor de selección NO / NO<sub>x</sub> para medir NO o NO<sub>x</sub>. El módulo está conectado en serie con el analizador químicoluminiscente.

## **B.2 ALTERNATIVAS PARA DISMINUIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES DIESEL<sup>[9]</sup>**

En los últimos años el desarrollo en la investigación de trampas para partículas Diesel y los sistemas de regeneración han dejado conceptos muy prometedores. Paralelamente el desarrollo tecnológico de motores Diesel para vehículos de pasajeros así como para los de trabajo ligero y pesado, han dejado un avance digno de subrayar especialmente enfocados en emisiones de partículas y  $\text{NO}_x$ , funcionamiento de los motores y economía de combustible.

### **B.2.1 COMPOSICIÓN Y CALIDAD DEL COMBUSTIBLE**

La composición y la calidad del Diesel (combustible) es un punto importante en la formación de emisiones contaminantes debido al funcionamiento del motor Diesel.

Especialmente reduciendo el contenido de azufre en el combustible se obtiene una reducción sustancial en las emisiones contaminantes. Favoreciendo así también el avance tecnológico para el tratamiento posterior de las emisiones. En Alemania se produce un combustible con una concentración muy baja de azufre el que se utiliza por empresas de transportación urbana dentro de la ciudad (Diesel Exhaust Aftertreatment 1997 ,SAE).

La comisión europea propuso un límite de 350 ppm de azufre para el Diesel, sin embargo este límite provoca complicaciones para el tratamiento posterior de las emisiones por lo que El ministerio de Protección Ambiental (Bundesministerium für Umweltschutz) BMU, Bonn sugiere un Límite al contenido de azufre de 50 ppm para entrar en vigor cerca del año 2003 (Diesel Exhaust Aftertreatment 1997 ,SAE).

El contenido de hidrocarburos aromáticos en el Diesel es otro factor que también favorece la formación de mayor masa de emisiones.

## B.2.2 TENDENCIAS EN LA TECNOLOGÍA

En la actualidad se han hecho muchos estudios con el fin de disminuir, tanto como sea posible, la emisión de contaminantes a la atmósfera construyendo diversos equipos y desarrollando aditivos, las partículas de hollín es uno de estos contaminantes y una de las posibilidades para disminuir su descarga en la atmósfera es una trampa de partículas (filtro), que incluya el material filtrante y los métodos de regeneración de la trampa. Para que este tipo de sistema tenga mas posibilidades de éxito, debe cumplir con aspectos como:

- \* Confiabilidad y durabilidad .
- \* Costo razonable.
- \* No debe representar ningún tipo de peligro para los pasajeros así como para los peatones.
- \* Su mantenimiento no debe representar un gasto de tiempo demasiado grande y un costo relativamente bajo.
- \* Debe ser un concepto sencillo.

Con respecto a la filtración de partículas provenientes de la descarga de los motores Diesel, Se han encontrado un número de materiales filtrantes en diferentes formas como panales de abeja, tubos y rollos han sido desarrollados, ejemplos de estos son:

- \* Filtros cerámicos (panales de abeja).
- \* Filtros de cartuchos de silicio.

- \* Rollos de fibra de vidrio o metal.
- \* Fibras tejidas.
- \* Filtros de metales sinterizados.
- \* Estructuras parecidas a mallas.

Los materiales mas comúnmente usados hoy en día no son entre si significativamente diferentes, ni tampoco totalmente confiables en eficiencia de filtración. Sin embargo algunos han probado ser más prácticos para diferentes tipos de motores, aplicaciones de éstos, así como para diferentes rangos de temperatura.

### **B.2.3. TÉCNICAS DE REGENERACIÓN.**

La captura de partículas emitidas por un motor Diesel no es el problema en si, el mayor problema de los sistemas de filtros de partículas, es el quitar las partículas atrapadas en el filtro, un proceso comúnmente llamado regeneración, que es la limpieza del filtro mediante la quema de partículas sólidas (oxidación de las partículas).

En general los métodos de regeneración se separan en dos grupos :

- \* Sistemas pasivos.
- \* Sistemas activos.

#### **B.2.4. SISTEMAS PASIVOS**

Los sistemas pasivos no dependen de dispositivos de control, éstos dependen enteramente de mecanismos catalíticos de autocontrol. De esta manera estos sistemas deben alcanzar condiciones de regeneración durante operación normal, sin ningún sistema de control adicional. Los sistemas pasivos son:

- \* Aditivos al combustible.
- \* Filtros cubiertos catalíticamente.

##### **Aditivos al combustible.**

Se han hecho muchos estudios en el desarrollo de aditivos catalíticos para el combustible, los cuales efectivamente apoyen la regeneración de las partículas de la trampa.

El aditivo se mezcla en el combustible y de esta manera el aditivo toma parte en el proceso de combustión. Los aditivos como son aquellos basados en Fe, Cu, Na, Mn, K y Ce, significativamente bajan la temperatura de oxidación de la partícula e incrementan el rango o proporción de la reacción química. Con este efecto la oxidación se inicia a temperaturas que se alcanzan en condiciones normales de operación.

Bajo condiciones de estado estacionario, las temperaturas de ignición son bajas, alrededor de 250°C, sin embargo, investigaciones anteriores han demostrado que el funcionamiento del aditivo en gran parte depende del sistema de combustión, de las características de los motores y de varias cosas más.

Por esto los aditivos aseguran una regeneración casi continua como se requiere para cargas fuertes de filtración ya que en estos casos las temperaturas están alrededor de 350°C a 375°C, así como para los vehículos de transporte urbano donde la temperatura de descarga debe ser relativamente baja.

### **Filtros con baño catalítico**

En principio el mecanismo de oxidación del hollín que se da en los filtros recubiertos de catalizador es similar que el de los aditivos. Sin embargo los elementos activadores del catalizador que promueven la oxidación del hollín a temperaturas bajas de emisión son atacadas sobre la superficie del material del filtro. Las principales razones para recubrir la superficie del material del filtro con el catalizador son evitar la desaparición de las funciones del aditivo, así como la acumulación de derivados de los aditivos en el filtro.

Las temperaturas de regeneración observadas en los filtros recubiertos con baño catalítico son del orden de 350°C a 420°C. Por lo tanto, cuando las temperaturas de operación son bajas, una capa de hollín llega a cubrir el filtro y no se puede llevar a cabo la regeneración ni la operación óptima del motor.



### **B.2.5. SISTEMAS ACTIVOS**

Se controlan por el incremento de la contrapresión. En efecto, hay algunos sistemas que trabajan con la presión del filtro para poner en funcionamiento los sistemas de regeneración y principalmente son:

- \* Sistemas de inyección de catalizador.
- \* Quemadores de combustible Diesel.
- \* Hornos eléctricos.

Los sistemas de inyección de catalizador dependen del impacto del catalizador sobre la temperatura de ignición del hollín y del rango de reacción. La temperatura de emisión no se afecta por este sistema. El horno eléctrico y los quemadores de Diesel proveen energía adicional que provoca que se eleve el nivel de la temperatura en donde empieza la ignición del hollín, sin embargo, los quemadores de Diesel generalmente y algunos hornos eléctricos incrementan la temperatura de la emisión obteniendo como resultado suficiente energía para la quema del hollín. Algunos sistemas de horno eléctrico inflaman las partículas atrapadas en el filtro.

#### **Sistemas de inyección de catalizador.**

Los sistemas catalizadores en función se inyectan en el tubo de descarga localizado aguas arriba del filtro. Evaluando diferentes problemas de los dispositivos por los cuales dejan de ser lo suficientemente funcionales en la regeneración, por ejemplo, muchos de estos dispositivos sufren por una

distribución no homogénea del aditivo, que se inyecta en la trampa (o sobre la trampa) no alcanza todas las regiones de esta y de aquí, la oxidación del hollín se da solo en algunos puntos localizados.

De esta manera la contrapresión se incrementa debido a la acumulación de partículas sólidas sin reaccionar, que no se queman bajo condiciones normales de operación. Además, se obtienen resultados fundamentales de programas implementados para la ignición de la partícula. El catalizador puede ser parte del filtro atacando así la superficie del hollín.

### **Quemador de combustible Diesel**

Una ventaja de los quemadores de Diesel es la disponibilidad del Diesel para el proceso de regeneración, de esta manera no es necesario instalar tanques extras con el propósito de un tratamiento posterior.

Para garantizar una operación libre de falla del quemador del combustible, con una rápida descarga en condiciones ambientales cambiantes (La contrapresión cambiante y las condiciones de temperatura variables) es realmente un reto técnico. Si la regeneración del colector de hollín ha sido efectiva durante la operación del vehículo, se utiliza un quemador de combustible de alto poder.

La potencia de entrada de los quemadores puede reducirse, usando equipo adicional, por ejemplo alerones que estrangulen la entrada de aire para una disminución del flujo en el par de filtros. Para tener el sistema trabajando

---

en condiciones estables de regeneración, algunos sistemas regeneran los filtros mientras el motor esta fuera de operación.

Sin embargo, para algunas aplicaciones un sistema de quemador de combustible puede ser un camino aceptable para la regeneración de filtros. Pero en los vehículos de pasajeros los requerimientos técnicos para un quemador de combustible, no parece ser lo más conveniente.

Durante la regeneración de un filtro de partículas, la temperatura de emisión y, además, algunas partes del sistema de descarga pueden exceder temperaturas de mas de 700°C. Esto es un punto para la discusión acerca de la seguridad de los pasajeros y peatones.

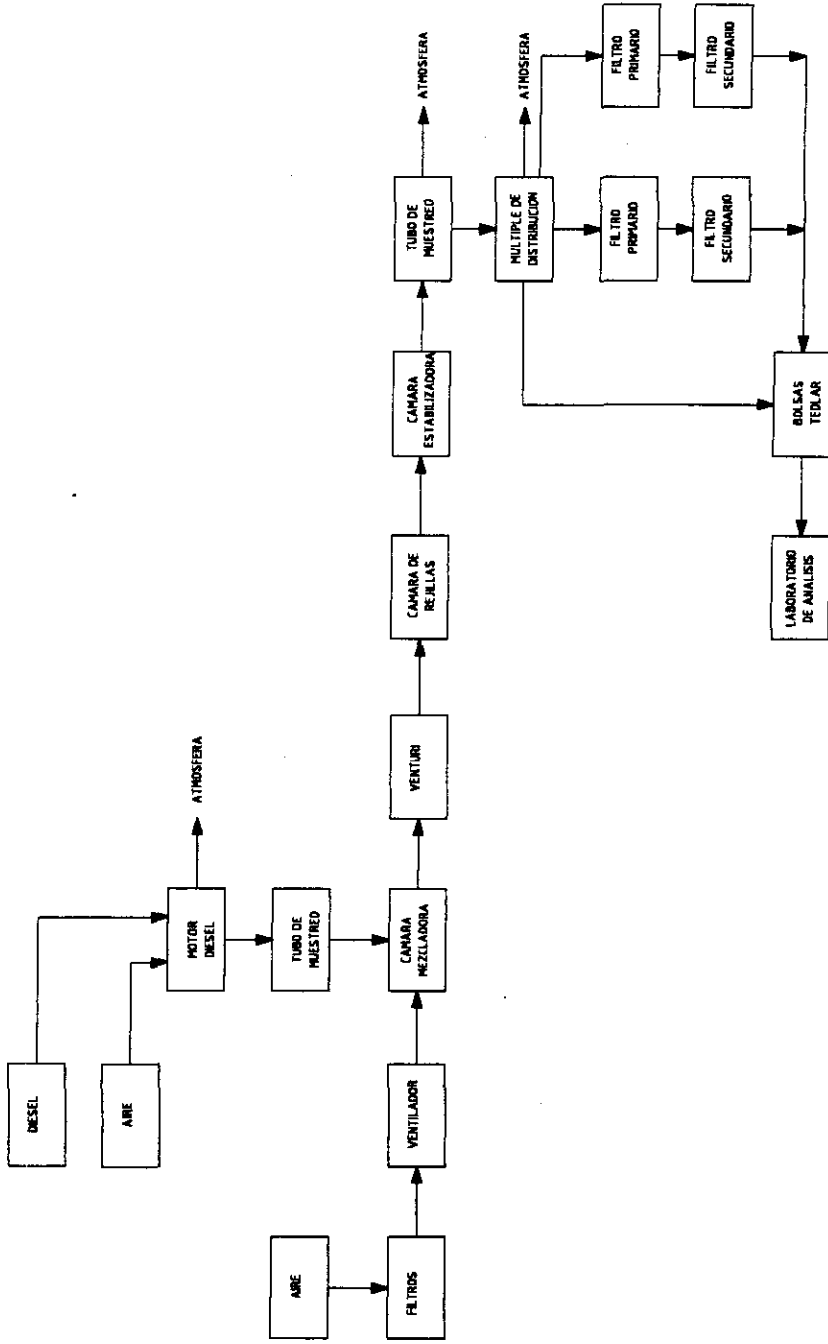
### **Horno eléctrico**

El principio del mecanismo del método de regeneración basado en el horno eléctrico es la ignición del hollín acumulado en el filtro, horneando la descarga de gas.

Se han obtenido buenos resultados al utilizar un alambre que se pone al rojo vivo, en las vías del filtro en combinación con condiciones favorables de una buena concentración de oxígeno así como una velocidad del hollín no muy alta, una vez iniciado el proceso de regeneración se considera como una reacción exotérmica que produce el calor requerido para auto propagación de la combustión.

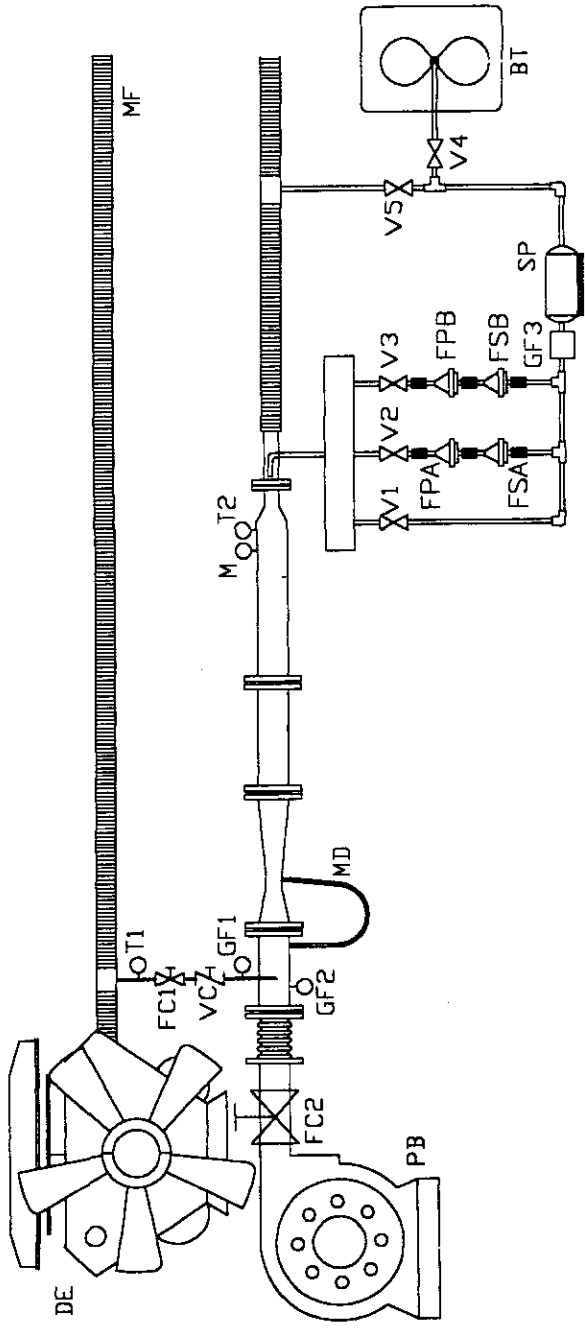
Muchos de estos sistemas se han introducido, sin embargo, varios tienen un extraordinario consumo de energía, lo cual obviamente no es práctico para muchas aplicaciones.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MINITUNEL

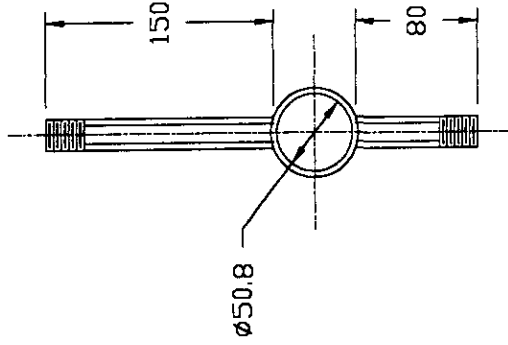
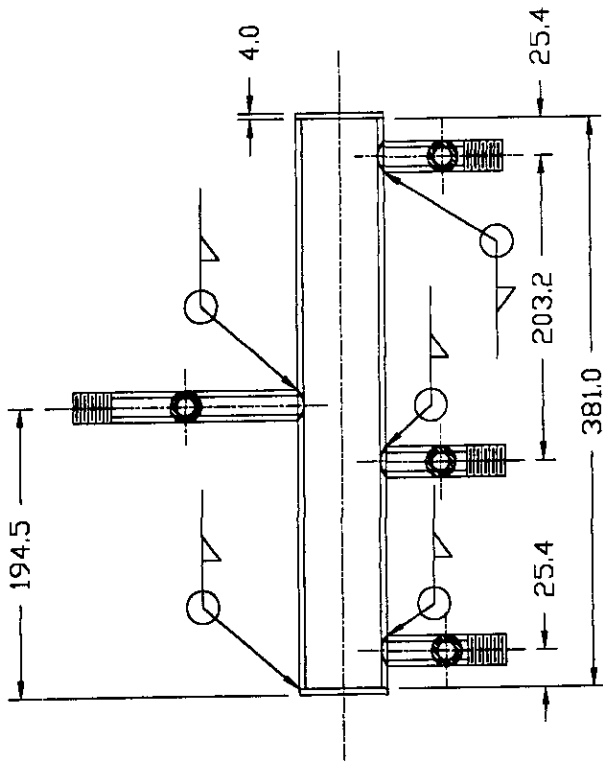


## Nomenclatura para el plano M-1

Clave	Descripción
BT	Bolsas de Tedlar
SP	Bomba de vacio
FP.FS	Filtros primario y secundario
MF	Manguera de escape
M	Manómetro
MD	Manómetro diferencial
GF2	Medidor de flujo de aire
GF1	Medidor de flujo de gases crudos
GF3	Medidor de flujo de muestra
DE	Motor Mercedes Benz
T1	Termómetro de gases crudos
T2	Termómetro de mezcla de gases
VC	Válvula check
VC	Válvula de control de gases crudos
FC2	Válvula de mariposa
V1-V5	Válvulas manuales de selección
PB	Ventilador



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
ACOT:	DIAGRAMA DEL MINITUNEL
ESC:	DIBUJO: JOSE SAAVEDRA B
	ARCHIVO: C:\TUNEL2DM
	M-1



NOTA:  
 MATERIAL ACERO INOXIDABLE  
 CEDULA 40  
 TODAS LAS CUERDAS SON:  
 DIAM. 13/16-NTP X 1"

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ACOT: mm

COLECTOR

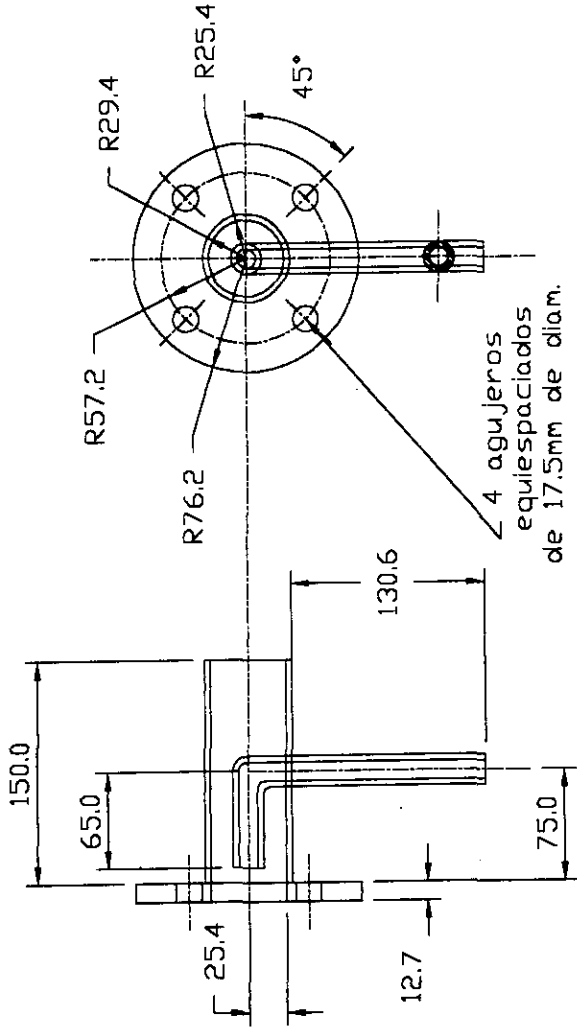
ESC: 1:4

DIBUJO: JOSE SAAVEDRA B

ARCHIVO: C:\COLECMAR

MT-2





MATERIAL:  
ACERO INOXIDABLE

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ACOT: mm

TUBO PARA MUESTREO

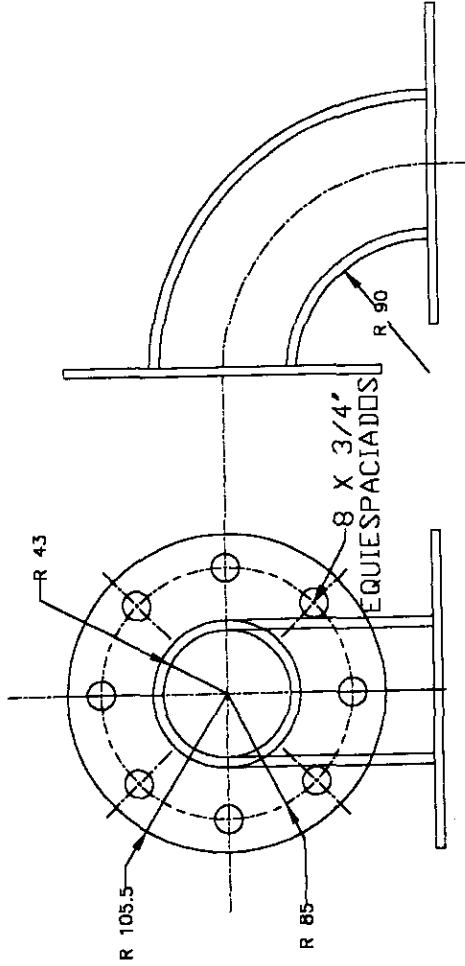
ESC:1:4

DIBUJO: JOSE SAAVEDRA B



ARCHIVO: C:\T\MUESTRAM

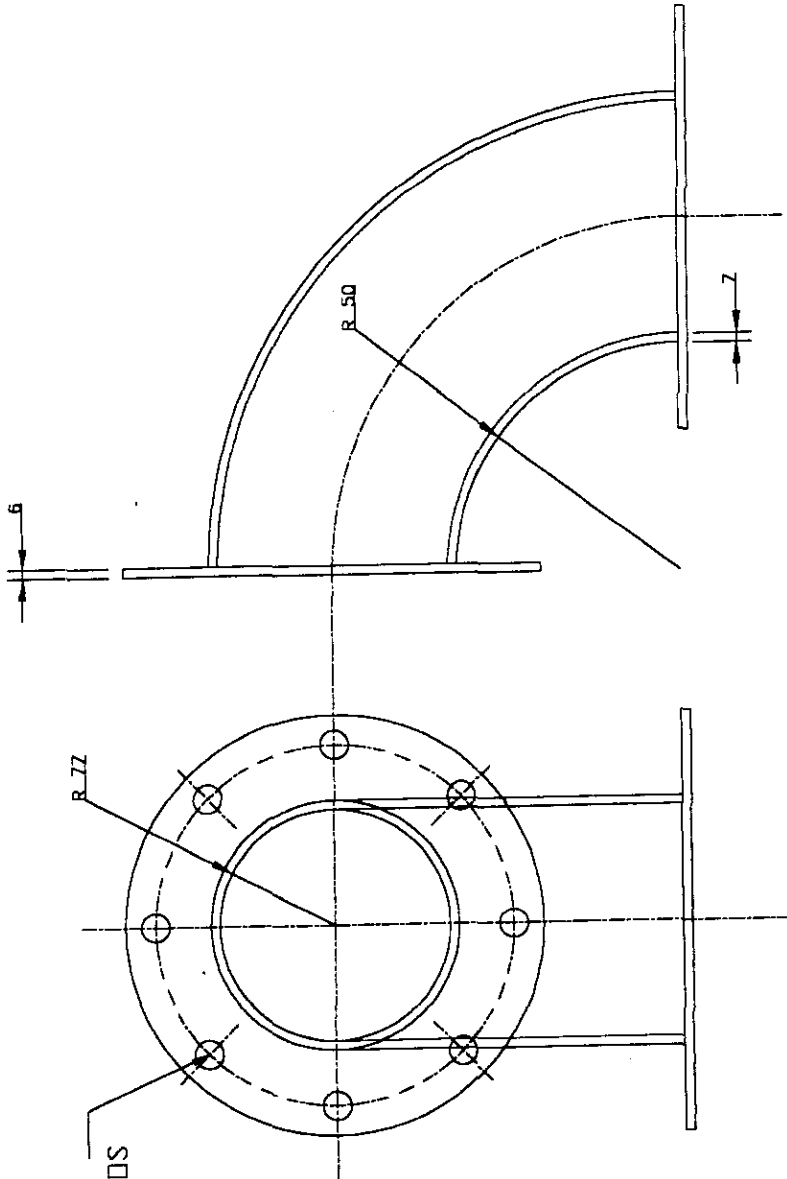
MT-3



MATERIAL:  
ACERO 1018

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
ACOT: mm	CODO CHICO
ESC: 1:4	DIBUJO: JOSE SAAVEDRA B
	ARCHIVO: C:\CODDCHCM
MT-4	

8 X 3/4"  
EQUIESPACIADOS



MATERIAL:  
ACERO 1018

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

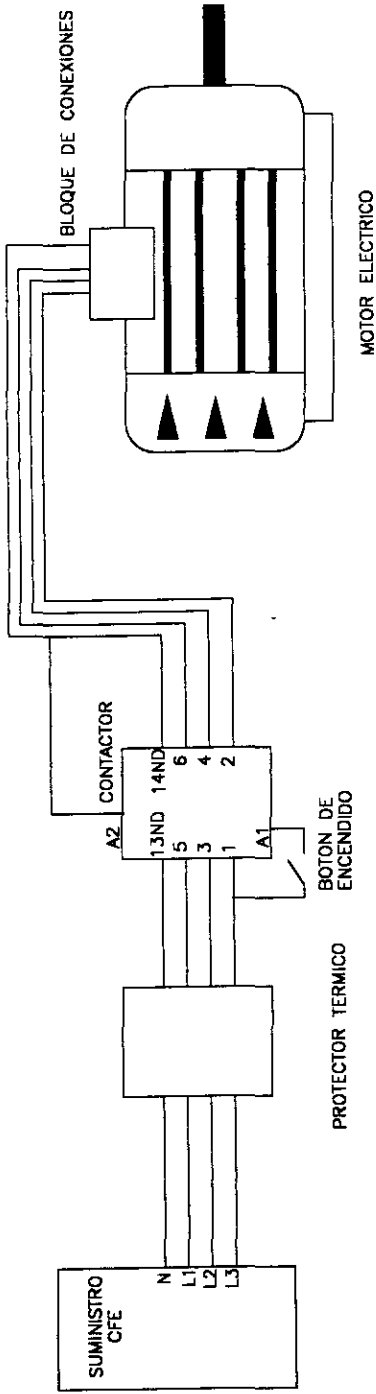
ACOT: mm


CODO GRANDE

DIBUJO: JOSE SAAVEDRA B

ARCHIVO: C:\CODOBIGM

MT-5



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
ACOT: S/A	DIAGRAMA ELECTRICO DEL VENTILADOR
ESC: S/E	DIBUJO: JOSE SAAVEDRA B
	ARCHIVO: C:\ELECTVEN
	MT-6