

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA DEPTI

8

2ef.

REDUCCION DE LAS EMISIONES EN MOTORES DIESEL DE SERVICIO PESADO POR MEDIO DE LA FILTRACION Y REGENERACION CATALITICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA MECANICA (TERMOFLUIDOS)

P R E S E N T A:

RICARDO PECH PEREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALEJANDRO F. ROMERO LOPEZ



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

265622

1998



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.

A mis padres Andrés S. Pech y Esther Pérez y Pérez por todo el apoyo recibido.

A mi hermano Andrés Pech Pérez por su ayuda para llevar a feliz término este trabajo.

A mi Asesor y Director de Tesis Dr. Alejandro F. Romero López por su gran apoyo en la elaboración del mismo.

A mis sinodales por los valiosos comentarios y puntos de vista hechos a este trabajo.

*“... Las fuerzas convergen y pronto se encontrarán. A las potencias gemelas de la pólvora y de la ira humana se añade ahora la fuerza de la que ya he escrito: la fuerza de la mente. ...”*

**Leonardo Da Vinci**

<b>CAPÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
 <b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	 <b>2</b>
<b>LAS PARTÍCULAS DIESEL COMO CONTAMINANTES   RIESGOSOS .....</b>	 <b>2</b>
<b>PAHs Y HOLLÍN .....</b>	 <b>4</b>
<b>REDUCIR LA EMISIÓN .....</b>	 <b>6</b>
 <b>CAPÍTULO II: ANTECEDENTES.....</b>	 <b>8</b>
<b>GENERACIÓN DE PARTÍCULAS DIESEL .....</b>	 <b>8</b>
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS EMISIONES .....</b>	 <b>11</b>
<b>CONCEPTOS, PROPUESTAS Y RELACIONES IMPORTANTES .....</b>	 <b>13</b>
<b>DISMINUCIÓN EN LA GENERACIÓN DE PARTÍCULAS .....</b>	 <b>14</b>
<b>SISTEMAS DE POST-TRATAMIENTO .....</b>	 <b>14</b>
<b>CONVERTIDOR CATALÍTICO .....</b>	 <b>14</b>
<b>FILTROS .....</b>	 <b>15</b>
<b>OTROS .....</b>	 <b>16</b>
<b>FILTRO CATALIZADO .....</b>	 <b>17</b>
 <b>CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL SISTEMA .....</b>	 <b>19</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	 <b>19</b>

REGENERACIÓN DE LOS FILTROS.....	22
REGENERACIÓN DIRECTA .....	22
REGENERACIÓN INVERSA .....	24
FILTROS CERÁMICOS CATALIZADOS .....	25
DISPOSITIVO DE INERCIA TÉRMICA (DIT) .....	26
CONSTRUCCIÓN DEL DIT .....	28
FUNCIONAMIENTO DEL DIT .....	29
RESULTADOS EXPERIMENTALES PRELIMINARES DEL DIT.....	30
VÁLVULAS SELECTORAS .....	31
ACTUADORES NEUMÁTICOS .....	31
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA .....	33
EL HOLLÍN Y SU COMBUSTIÓN EN CONDICIONES ESPERADAS .....	35
<b>CAPÍTULO IV: MÉTODO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO .....	37
INSTRUMENTOS Y APARATOS UTILIZADOS .....	38
DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	39
ARREGLO DEL EXPERIMENTO .....	39
RESULTADOS DEL EXPERIMENTO .....	43
COMPORTAMIENTO DEL DIT .....	43
MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA .....	45
MEDICIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN EL FILTRO CATALIZADO .....	46

<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES .....</b>	<b>49</b>
<b>COMENTARIOS .....</b>	<b>50</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>51</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>52</b>

## RESUMEN

En el presente trabajo, se propone un estudio completo de lo que es el sistema de filtrado de partículas sólidas (hollín) para motores Diesel de servicio pesado, las cuales son nocivas para la salud del género humano ya que producen cáncer. Se realiza un estudio de dichas partículas así como sus repercusiones.

Se plantean posibles soluciones para controlar este difícil problema el cual es una preocupación mundial. Una solución evidente para la captura de material particulado es la utilización de filtros adecuados por lo que se presenta una descripción detallada de los mismos, además de una descripción del sistema en sí y de cada uno de sus componentes .

Al final de este trabajo, se muestran una serie de resultados obtenidos de las pruebas realizadas en un banco de ensayos ubicado en el Laboratorio de Emisiones incluyendo fotos del sistema. Los resultados son obtenidos de pruebas de filtración y de la regeneración .La regeneración de los filtros es obtenida por medio de un Dispositivo de Inercia Térmica (DIT) el cual calienta el aire a presión por medio de tres resistencias las cuales se calientan a 700 °C.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### **LAS PARTÍCULAS DIESEL COMO CONTAMINATES RIESGOSOS**

En 1978 una serie de investigaciones biomédicas independientes detectaron cambios importantes en las colonias de *Salmonella typhimurium* (nombre científico de la mutagénesis bacteriana en la época) al ponerlas en contacto con extractos obtenidos del lavado con solventes orgánicos de material diesel particulado. Estos resultados generaron una polémica importante entorno a los riesgos a la salud humana debidos a las emisiones de partículas diesel. Esta polémica estuvo acompañada de nuevas y diversas investigaciones clínicas cuyos resultados llevaron a la limitación de los niveles de emisión de este tipo de contaminante por parte de la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA) en los EEUU.

Como una primera aproximación para averiguar si los efectos cancerígenos detectados en las colonias de bacterias serían extrapolables al hombre, se hicieron diferentes estudios utilizando mamíferos (Hammerle, 1987). Entre las especies utilizadas para las pruebas estuvieron cricetos, ratones y ratas. De manera independiente algunos de estos estudios demostraron que las ratas tienden a desarrollar tumores cancerígenos en los pulmones al obligarlas a respirar los gases de escape de motores a diesel. Esto ocurre después de muchas horas diarias de exposición a altas concentraciones de material particulado (por arriba de 4 mg/m<sup>2</sup>) por al menos veinticuatro meses (Hammerle, 1987). Esta evidencia experimental comprueba ineludiblemente que el mencionado efecto cancerígeno detectado en las bacterias sí es extrapolable a los mamíferos. Esto último se confirma con los resultados paralelos de los mismos estudios, en los que se observó que el efecto cancerígeno no se presenta --en condiciones semejantes de exposición-- en las poblaciones de cricetos o de ratones. Esto excluye de la discusión una afirmación tajante de que en los seres humanos se deba presentar la misma sensibilidad de las ratas, pero de ninguna manera elimina a las partículas diesel como cancerígeno potencial para el hombre.

La imposibilidad de repetir los experimentos mencionados sobre seres humanos excluye la determinación cierta y a corto plazo de los efectos de las emisiones diesel en el hombre. El intento de conocer estos efectos ha llevado a diferentes aproximaciones en la concepción de los estudios. Entre éstas predominan los estudios epidemiológicos, basados en la identificación de relaciones entre el contacto humano con las emisiones diesel debido a ocupaciones laborales y los historiales clínicos asociados, evaluados a lo largo de muchos años.

A manera de ejemplo, citamos uno de los primeros estudios de este tipo (Cambridge, Mass.: Health Effects Institute, 1992). En él, se tomó como universo de estudio a los trabajadores ferroviarios estadounidenses que comenzaron a trabajar entre 1939 y 1949. Éstos fueron agrupados según las actividades que realizaron durante sus años de servicio. Dentro del grupo más expuesto laboralmente a las emisiones diesel, se identificaron subgrupos según

el tiempo de exposición implícito en el puesto de trabajo durante la jornada laboral. Así, se identificaron grupos de alto, mediano y bajo riesgo. Al estudiar los historiales clínicos, se observaron más casos de cáncer pulmonar en los grupos de alto riesgo, tal y como se esperaba. Este resultado no pudo considerarse como contundente, por la dificultad de evaluar la influencia de otros factores (tabaquismo) que podrían falsear los resultados. Sin embargo, en el mismo estudio se obtuvo un resultado paralelo que sirvió para justificar que la incidencia de casos en el grupo de alto riesgo sí se debía al contacto con las emisiones diesel. Este resultado fue el hecho sorprendente de que existía un patrón de distribución similar al de cáncer en el pulmón al analizar la incidencia de cáncer en la vejiga dentro del mismo grupo identificado como "de alto riesgo", lo que podría ser una confirmación del efecto indeseable de las emisiones, si se supone que las partículas acumuladas en el pulmón son removidas naturalmente y durante el proceso de limpieza pasan en algún momento por la vejiga (Hammerle, 1987).

Como este estudio, existen muchos otros, algunos de los cuales eliminan el factor del tabaquismo (Benítez, 1991). Estas consideraciones hechas por los diferentes estudios son generalmente distintas, pero --casi sin excepción-- todos llegan a las mismas conclusiones, señalando una probabilidad mayor de desarrollo de cáncer pulmonar de entre 20 y 50 por ciento mayor para las personas con exposición ocupacional importante al material particulado (Diesel Exhaust...) (Kabuto). Los resultados no son categóricos en la mayoría de los casos y el aumento porcentual de riesgo identificado para los grupos cuyo contacto con las emisiones ha sido importante no es significativo según los resultados de muchos de sus estudios (Idem). Aún así, la coincidencia aparente de resultados ha sido considerada como argumento suficiente para continuar con la limitación de los niveles de emisión particulada. La identificación de este tipo de emisión como sustancia peligrosa para la salud por parte del Instituto Nacional de Salud y Riesgos Ocupacionales de los EEUU (NIOSH) llevo al gobierno de los Estados Unidos a emprender un esfuerzo federal para reducir paulatinamente --hasta prácticamente eliminar-- las partículas de hollín generadas en la combustión de motores diesel. Este esfuerzo nació como iniciativa del gobierno estatal del estado de California, el cuál ha permanecido a la cabeza de este movimiento manteniendo las exigencias más estrictas a nivel mundial en legislación ambiental.

La identificación de las emisiones diesel como factor de riesgo a la salud se puede ver en la tabla siguiente (Nauss, 1995):

<b>Año y Organización</b>	<b>Evidencia Humana</b>	<b>Evidencia Animal</b>	<b>Clasificación</b>
National Research Council 1981	No demostrado convincentemente	Negativo	-----
National Institute for Occupational Safety and Health 1988	Limitado	Confirmativa	Carcinogénico ocupacional en potencia

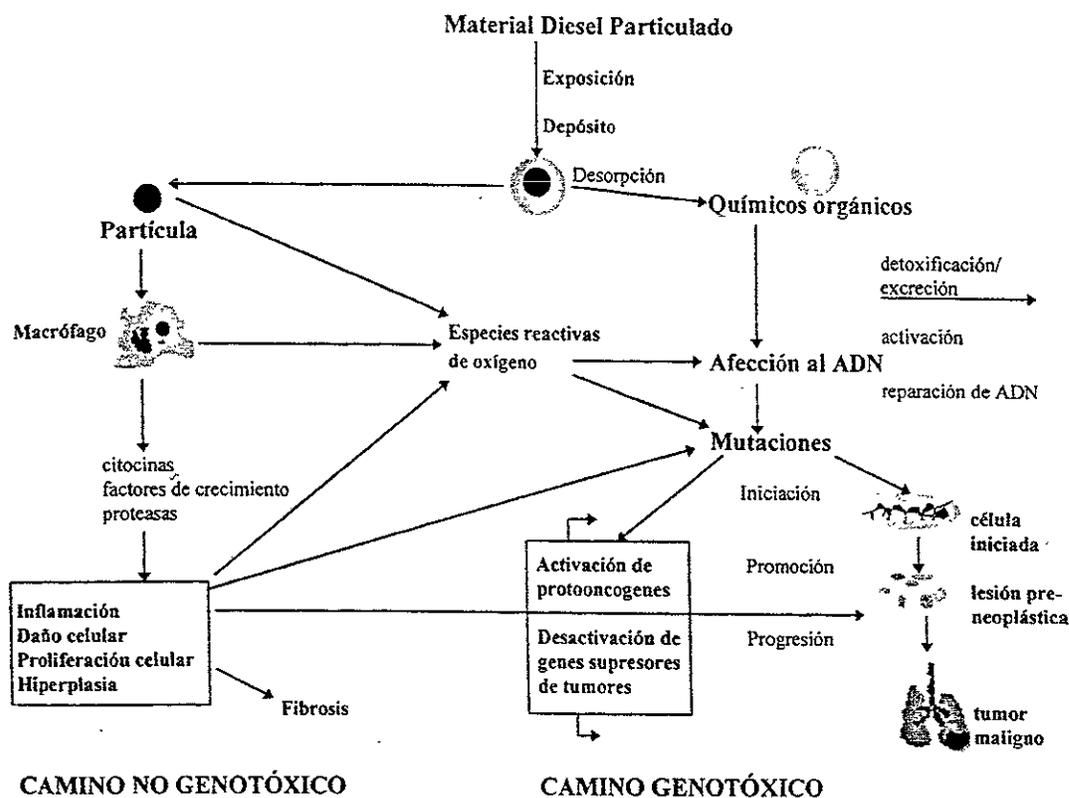
International Agency for Research on Cancer 1989	Suficiente	Limitado	Probable carcinógeno humano
U. S. Environmental Protection Agency (DRA) 1990	Limitado	Suficiente	Probable carcinógeno humano
<b>Año y Organización</b>	<b>Evidencia Humana</b>	<b>Evidencia Animal</b>	<b>Calificación</b>
U. S. Environmental Protection Agency (DRA) 1994	Limitado	Suficiente	Probable carcinógeno humano
California Environmental Protection Agency (DRA) 1994	Suficiente	Suficiente	Carcinógeno humano

*Tabla 1.1. Evaluación de riesgos relacionados con las emisiones Diesel (DRA es la abreviación de Draft Risk Assessment)*

### PAHs Y HOLLÍN

El efecto cancerígeno del material diesel particulado se relacionó originalmente con los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) . Los PAHs están clasificados entre las sustancias mutagénicas y cancerígenas más poderosas de acuerdo con la Agencia Internacional de Investigaciones Sobre el Cáncer (Nauss, 1995). Estos compuestos fueron detectados desde la década de 1950 en las emisiones de vehículos a diesel y a gasolina como posibles cancerígenos, pero no fue hasta que se introdujeron al mercado vehículos ligeros a diesel en volúmenes importantes, que se les dio importancia, generando una serie de investigaciones biomédicas más específicas para averiguar su efecto mutagénico y --en caso de confirmarlo-- saber que tan seria sería la exposición a las concentraciones existentes en ambientes laborales o regionales. La caracterización química de los PAHs y sus derivados químicos (nitro-PAHs, principalmente), así como la investigación de sus efectos sobre los organismos vivos se ha desarrollado esencialmente alrededor de las emisiones diesel ( aunque también existen en mucho menor proporción en las emisiones de los motores a gasolina). Estos compuestos tienen --en general-- bajas presiones de vapor y se condensan, junto con otros materiales orgánicos, en los núcleos carbonáceos (hollín) generados en el motor diesel antes de salir del escape (Hammerle, 1997). La combinación del hollín seco y estos compuestos orgánicos es estable a temperatura ambiente, y en conjunto constituyen, en su acepción más general, lo que se identifica como "material diesel particulado". (Las partículas diesel tienen en su mayoría diámetros menores a 1  $\mu\text{m}$  y cientos de compuestos orgánicos absorbidos en su superficie, algunos de los cuales son los PAHs mencionados anteriormente).

Los estudios que buscaban la relación entre las emisiones diesel y el cáncer pulmonar adjudicaban el efecto a la presencia de los PAHs y prácticamente todas las investigaciones se realizaron en torno a éstos, hasta que en 1986 se señaló la similitud entre los tumores inducidos para las emisiones diesel y los inducidos al respirar material particulado inerte (sin presencia de compuestos orgánicos, como por ejemplo óxido de titanio o negro de carbón) (Nauss, 1995). Al hacer experimentos paralelos se observó que --efectivamente-- había desarrollo de tumores pulmonares similares a los anteriormente reportados en poblaciones de ratas sujetas a respirar los gases de escape provenientes de motores diesel y poblaciones de ratas sujetas a respirar material carbonáceo particulado sin compuestos químicos absorbidos (Hammerle, 1997). Este resultado parecía indicar que los compuestos orgánicos asociados al material particulado (incluyendo a los PAHs cuyo efecto cancerígeno está bien identificado) no tendrían una influencia relevante en el efecto mutagénico del material particulado como tal.



**Figura. 1.1. Mecanismos posibles de carcinogénesis inducida por las emisiones diesel (Nauss, 1995)**

Aparentemente, un nivel tan grande de partículas rebasa la capacidad natural de limpieza del cuerpo, con la consiguiente acumulación de partículas en los pulmones, estado que se conoce como "sobrecarga pulmonar" y que podría ser el verdadero detonador oncogénico. Esta sospecha parece comprobarse por el hecho de que poblaciones de ratas sujetas a

emisiones diesel filtradas no desarrollan tumores pulmonares. La formación de tumores en los pulmones de las ratas se debería a la incapacidad fisiológica de limpiar los pulmones, así como a la inflamación y proliferación de células epiteliales de los alvéolos. Los mecanismos involucrados no parecen afectar directamente el ADN (genotoxicidad), a diferencia de lo que ocurre por acción de los PAHs (Nauss, 1995).

Así como no se puede afirmar categóricamente que el efecto apreciado en las ratas pueda extrapolarse a los seres humanos, tampoco queda excluida la posibilidad de que los PAHs y otros compuestos orgánicos presentes en las emisiones diesel y que --aparentemente no tienen efecto alguno en el desarrollo de tumores en los pulmones de las ratas-- tengan un efecto mutagénico y cancerígeno importante en el hombre, ya sea directamente o debido a efectos sinérgicos. Además, se sugiere que pueden existir diferentes mecanismos de carcinogénesis inducida por las emisiones diesel, bajo diferentes condiciones de exposición a las mismas (Nauss, 1995).

### REDUCIR LA EMISIÓN

En los EEUU se autorizó mediante la *Clean Air Act* a la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) a regular las emisiones provenientes de todo tipo de vehículos de combustión interna. Por el mismo conducto, se autorizó --además-- al estado de California a establecer estándares de emisión y de calidad de combustible mucho más estrictos a los del resto de la federación para poder cumplir con las exigencias de su legislación interna. La evolución de esta legislación se puede observar en la siguiente tabla de estándares para vehículos diesel "pesados"

MODELO (AÑO)	OXIDOS DE NITROGENO (g/bhp-hr)	MATERIAL PARTICULADO (g/bhp-hr)	MATERIAL PARTICULADO (g/bhp-hr)
	CAMIÓN Y AUTOBÚS	CAMIÓN	AUTOBÚS
1985	10.7	No disponible	No disponible
1988	10.7	0.6	0.6
1990	6	0.6	0.6
1991	5	0.25	0.25
1993	5	0.25	0.10
1994	5	0.10	0.07
1996	5	0.10	0.05 (Se permite 0.07)
1998	4	0.10	0.05/0.07

*Tabla 1.2. Variación en la concentración permitida de emisiones de óxidos de nitrógeno y material particulado para motores nuevos de camiones y autobuses a diesel. (Diario Oficial de la Federación, 1993)*

En México se adoptó virtualmente la legislación de la EPA en junio de 1993 con la publicación de la norma NOM-PA-CCAT-007-93 publicada por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) bajo el encabezado de "Niveles de Emisión de Vehículos Diesel con Peso Bruto Superior a los 3875 kg" publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 1993. La adopción de estándares tan estrictos se da en el seno de la integración comercial de América del Norte y su efecto como legislación vigente es de importancia capital para el sector de transporte nacional. Esto se entiende si se considera que cerca de un 90 % de la carga que se mueve en todo el país se mueve utilizando motores diesel, al igual que prácticamente la totalidad del transporte de pasajeros foráneo ( autobuses y trenes) y un porcentaje importante del transporte urbano (SEDESOL, 1993) .

Los motores diesel de gran tamaño son altamente usados como fuentes de poder. Su economía y eficiencia innata los ha llevado a crecer fuertemente en el mercado. Sus virtudes en combinación con su durabilidad los lleva a tener un dominio importante en el transporte.

La ubicuidad de los vehículos con motores diesel sobre el medio ambiente de las grandes ciudades, por ejemplo el Área Metropolitana de la Ciudad de México, ha llevado a investigadores de todo el mundo a tomar medidas para controlar los contaminantes emitidos por dichos vehículos.

El humo del escape característico de un motor diesel de servicio pesado contiene una gran cantidad de material particulado. La materia fina particulada (hollín), ha sido foco de atención debido a los efectos nocivos que genera en la salud humana. Debido a esta situación , la reducción de las emisiones es de gran interés en las áreas urbanas.

La tecnología asociada a las trampas de partículas utilizadas para reducir emisiones , está en desarrollo, aunque se ha mostrado (Smith A. y Tidmarsh D., 1998) que los sistemas de regeneración son caros y algunas veces sufren problemas de durabilidad.

Con el fin de eliminar las partículas de hollín emitidas por los motores diesel de servicio pesado, se presenta en este trabajo un sistema de filtración y regeneración en el cual son utilizados filtros de panal con baño catalítico para el filtrado además, de un dispositivo de inercia térmica utilizado para calentar aire a presión por medio de resistencias y producir de esta manera la incineración de las partículas de hollín atrapadas en los filtros. El sistema está compuesto de tuberías así como de electroválvulas y actuadores que tiene un papel importante el funcionamiento del mismo. Así también, se presentan resultados de las pruebas realizadas a los filtros catalíticos las cuales se llevaron a cabo en un banco de ensayos instalado en el Laboratorio de Emisiones. Las pruebas realizadas fueron de filtrado y de regeneración.

## CAPITULO II

### ANTECEDENTES

#### GENERACIÓN DE PARTÍCULAS DIESEL.

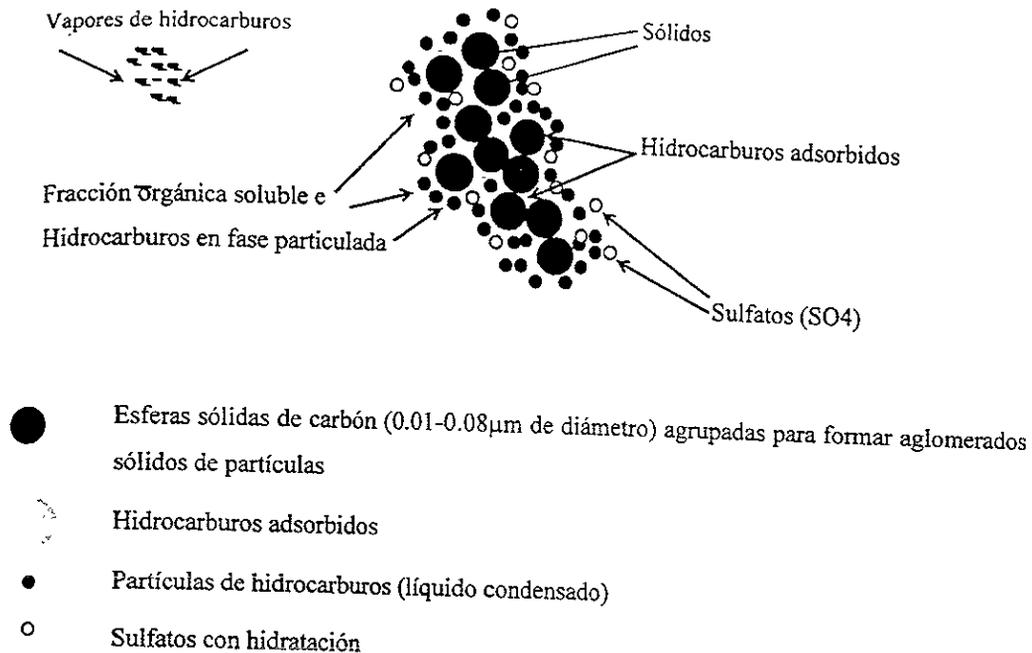
Las partículas de hollín son sólo uno de los diferentes compuestos que se producen en la cámara de combustión de los motores diesel. Las emisiones diesel son mezclas complejas de compuestos orgánicos e inorgánicos. Estos compuestos se forman en la cámara de combustión y sus características son función del tipo de proceso dominante en la combustión que les da origen: pirólisis u oxidación. Las características de los componentes de la emisión así como las proporciones en que aparecen son también función de la composición del combustible, el tipo de motor utilizado, y los valores de los parámetros de operación del mismo.

Se denominan como "productos pirolíticos" (Kanury, 1975) a estos compuestos si se generan como efecto de una combustión incompleta en presencia de —o sobreviviendo a— la flama difusiva que se genera al momento de la ignición. Entre estos productos secundarios están principalmente la fracción sólida carbonácea u hollín y una fracción líquida constituida por hidrocarburos ligeros ( acetileno, principalmente ). Existen además otros compuestos secundarios cuya presencia es importante, si bien la concentración es mínima comparada con las especies mencionadas anteriormente. Entre éstas se encuentran los hidrocarburos poliaromáticos o PAHs y otros compuestos orgánicos de alta masa molecular (HMWs) (Kanury, 1975).

En general, los componentes más importantes en cantidad (fracción molar) son los acetilenos y en no mucho menor cantidad, las partículas de hollín. En algunos casos, un orden de magnitud por debajo de las figuras representativas de hollín aparecen los HMWs y a su vez un orden de magnitud por debajo de éstos, los PAHs. Este último grupo comprende naftalenos, acenaftilenos, fenantrenos, fluorantenos y pirenos además de otros PAHs etilénicos y acetilénicos que se generan por la presencia de flamas. Este grupo de compuestos se encuentra mezclado con las partículas líquidas o bien, asociado por absorción a los núcleos carbonáceos. Su existencia es importante en el estudio del material particulado, pues además de intervenir en la formación del hollín, algunos de ellos están bien identificados como sustancias cancerígenas por si mismas (Lipkea, 1978).

En realidad, los mecanismos que intervienen en la formación de las partículas diesel son muy complejos y están poco entendidos (Khair, 1992). La generación de las partículas diesel obedece a un gran número de diferentes factores, por lo que la definición exacta del papel que desempeña cada uno de éstos es labor imposible. No obstante estudios de diferentes investigadores señalan que la variación en los valores de cada uno de estos factores, manteniendo los valores de los otros parámetros constantes afecta directamente la concentración final de partículas generadas (Barbella, 1987). Entre estos factores se encuentra el tipo de combustible utilizado; el tipo de reacción dominante durante la

combustión (pirólisis u oxidación) y el régimen de trabajo del motor : carga, relación aire-combustible, velocidad, tiempo de inyección, etc.



**Figura 2.1** Constitución de los aglomerados de partículas (Nauss,1995)

En lo que a régimen de trabajo del motor se refiere, se ha observado que el factor que afecta más notablemente en la generación de partículas es la carga. En términos generales, al disminuir ésta, aumenta la presencia de hidrocarburos líquidos en el escape del motor, pero la cantidad de hollín disminuye ( sea inyección directa, o indirecta). En relación al combustible, se ha observado una baja generación de partículas cuando es bajo el contenido de compuestos aromáticos en el combustible, baja su temperatura de destilación y bajo su número cetónico.

Los compuestos aromáticos fomentan la generación de partículas mucho más que los compuestos parafínicos pero disminuyen el número cetónico. Esto último se traduce en un aumento en la proporción de combustible que se quema durante el ciclo de combustión en condiciones pobres ( en proporción de combustible), situación en la que no se genera hollín. Así, paradójicamente, los compuestos aromáticos permiten una reducción global en la generación de partículas (Barbella, 1987).

Por otra parte, una baja temperatura de destilación del combustible representa gran volatilidad del mismo. Esto implica una fácil evaporación y, consecuentemente, un buen mezclado del combustible con el aire en la cámara de combustión, lo que favorece una oxidación más completa. Además de estas características físicas del combustible, los cambios que éste sufre pueden influir en la forma como se lleva a cabo la combustión, retardando la ignición y alterando las reacciones asociadas. Del mismo modo, los cambios

en las propiedades físicas y termodinámicas del combustible que ocurren con el cambio de temperatura y el calor liberado alteran la forma en que se realiza la combustión y con ello, la cantidad de material particulado y las características del mismo.

La formación de hollín en la cámara de combustión es un proceso de carbonización que se debe a reacciones de pirólisis en fase gaseosa, que ocurren a bajas concentraciones de oxígeno y altas temperaturas. Así, de manera general se puede decir que una baja proporción aire-combustible propicia pirólisis del combustible, lo que favorece la formación de hollín. Al aumentar la relación aire-combustible la emisión de hollín decrece dramáticamente hasta que se tiene demasiado aire (40 o más partes por una de combustible). En este caso hay un ligero aumento en la emisión de partículas para relaciones mayores, debido probablemente a las temperaturas de combustión involucradas, que se encuentran por debajo de las anteriores.

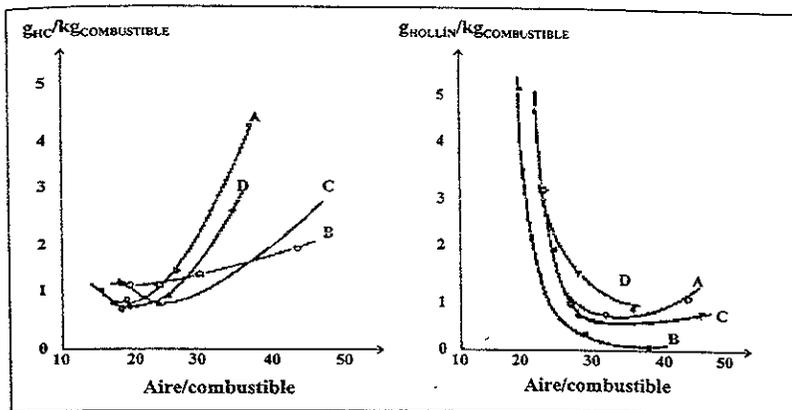


Figura 2.2. Relación aire/combustible y emisión de hidrocarburos y hollín para diferentes combustibles.

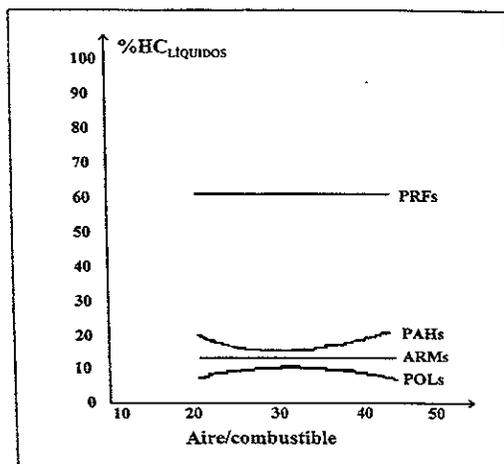


Figura 2.3. Porcentaje de hidrocarburos no quemados (parafinas, compuestos polares, mono y poliaromáticos) vs. relación aire/combustible.

(Barbella, 1987)

En las figuras anteriores son utilizados combustibles especiales: A y B son combustibles que tiene el mismo número de Cetano (35) y un contenido aromático del 55 % pero con diferente volatilidad. C y D son combustibles que tienen un alto número de Cetano (50) y un bajo contenido aromático respecto a A y B.

El efecto de la relación aire-combustible en la generación de partículas se aplica a todos los tipos de motor diesel, pues es independiente del sistema de combustión involucrado. No así las características de los combustibles. En los motores de inyección directa la emisión de partículas depende esencialmente del número cetónico tal y como se explicó en párrafos anteriores, es decir que los compuestos aromáticos no parecen afectar de manera notable el volumen producido de material particulado en el rango de número cetónico de los aceites diesel representativos. En los motores de inyección indirecta la emisión de partículas (así como de hidrocarburos líquidos), depende tanto del contenido aromático y menor volatilidad, mayor el volumen de emisión particulada (Barbella, 1987).

Lo anterior se explica por las diferencias esenciales en los procesos de combustión que tienen lugar en los respectivos tipos de motor. En el motor de inyección directa, el combustible inyectado en la cámara de combustión se quema en condiciones de premezclado "pobres" al momento de la ignición y subsecuentemente, en un régimen difusivo. La cantidad relativa de la fracción premezclada ( con dependencia directa y aproximadamente lineal a la volatilidad e inversa al número cetónico) determinará la cantidad de emisión de partículas e hidrocarburos. En el caso de los motores de inyección indirecta, el combustible pasa a la precámara de combustión. donde se evapora y se quema en condiciones "ricas, lo que favorece la formación de hollín, independientemente del número cetónico del combustible. En este caso, es apreciable la influencia del contenido aromático que propicia la formación de hollín. En la misma precámara, la relación real aire-combustible disminuye al aumentar la volatilidad del combustible, lo que origina condiciones "ricas en combustible" con un aumento en las emisiones en general (acetilenos y hollín) como consecuencia inmediata (Barbella, 1987).

### **CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS EMISIONES.**

La composición de las emisiones diesel varía considerablemente según el tipo de motor, condiciones de operación, combustible, aceite lubricante y, por supuesto, la utilización de algún dispositivo de post-tratamiento para el control de emisiones. La composición de las emisiones diesel ha cambiado dramáticamente en los últimos 30 años al igual que los otros parámetros pertinentes enumerados. Este cambio en composición se refiere, más que a las especies componentes, a la proporción en las que éstas aparecen. La variación en las características de las emisiones implica una seria dificultad al intentar evaluar los efectos en la salud humana debidos a la exposición de las emisiones diesel en general. Hace diez años los combustibles eran muy diferentes de los combustibles de hoy, por lo que no se puede asegurar que los efectos en la salud debidos a las emisiones diesel de entonces sean los mismos que los debidos a las emisiones actuales.

Si bien las emisiones diesel no se pueden caracterizar con precisión, sobretodo debido a la variación en las proporciones de las especies asociadas, como se menciona en los párrafos

anteriores, si se puede identificar el grueso de dichas componentes. Las especies químicas que se enlistan a continuación son representativas para las emisiones diesel en general:

COMPONENTE	PRODUCTOS ATMOSFÉRICOS DE REACCIÓN	IMPACTO BIOLÓGICO
<b>EMISIONES EN FASE GASEOSA</b>		
Dióxido de carbono		Efecto invernadero
Monóxido de carbono		Altamente tóxico; bloquea entrada de oxígeno a los alvéolos
Óxidos de nitrógeno	Ácido nítrico y ozono	$NO_2$ es irritante de las mucosas y precursor de ozono; $HNO_3$ contribuye a la lluvia ácida.
Hydrocarburos (<C19)	alcanos Aldehídos, alquilnitratos y cetonas	Irritan la cuestión respiratoria. Los productos de reacción son precursores de ozono
Alquenos (<C5)	Aldehídos y cetonas	Irritan la cuestión respiratoria. Los productos de reacción son precursores de ozono. Algunos alquenos son mutagénicos y carcinogénicos
Aldehídos y Formaldehídos	Monóxidos de carbono y radicales hidroperóxiles	El formaldehído, además de ser precursor del ozono, es un probable carcinógeno humano
Aldehídos altos (acroleína)	Peroxiacilnitratos	Irritan tracto respiratorio y producen irritación de los ojos. Daños a las plantas
Compuestos monocíclicos	aromáticos Derivados hidroxilados y nitrohidroxilados	El benceno es tóxico y carcinogénico en los humanos al igual que otros productos de reacción
PAHs (fenantreno, fluoranteno)	(<5anillos) Nitro PAHs (<5anillos)	Algunos son mutagénicos o carcinogénicos
Nitro-PAHs (2-3 anillos) (nitronaftaleno)	Quinones y derivados nitrohidroxilados	Algunos productos de reacción son mutagénicos

Dióxido de azufre	Ácido sulfúrico	Irrita tracto respiratorio; contribuye a la lluvia ácida
-------------------	-----------------	---

**EMISIONES EN FASE  
PARTICULADA**

Carbón elemental		Los núcleos absorben compuestos orgánicos; por su tamaño pueden introducirse en los alvéolos pulmonares Irrita tracto respiratorio
Sulfato inorgánico		
Hidrocarburos (C14-C35)	Aldehídos, cetonas y alquilnitratos	Desconocido
Nitro-PAHs (>2anillos) (nitropirenos)	Derivados hidroxilados	nitro- Muchos nitro-PAHs son mutagénicos o carcinógenos poderosos, así como algunos productos de reacción
PAHs (>3anillos) (pireno)	Nitro-PAHs (>3anillos)	PAHs de mayor masa molecular contribuyen notablemente a la carcinogénesis de las emisiones. Muchos nitro- PAHs son mutágenos o carcinógenos poderosos

**Tabla 2.1. Composición general de las emisiones diesel, sus productos de reacción y el impacto biológico relacionado con ambos tipos de compuestos (Khair, 1992).**

**CONCEPTOS, PROPUESTAS Y RELACIONES IMPORTANTES**

Debido a la estricta modificación de las normas para emisiones de motores diesel, tanto en México, como en Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea, se han propuesto en el mundo un gran número de sistemas desarrollados para la misma finalidad; sin embargo, todos ellos, incluyendo el aquí presentado, difieren entre si en uno u otro aspecto, tratando de encontrar la solución óptima.

Como se pudo ver anteriormente, los mecanismos que determinan la generación de partículas de hollín son sumamente complejos. En general hay dos acercamientos básicos para evitar la liberación de material diesel particulado a la atmósfera. El primer enfoque ataca directamente la generación de partículas en la cámara de combustión. En este sentido, existen a la vez dos aproximaciones que se complementan para lograr el objetivo. Uno se basa en la modificación física del motor; el otro, en el control de calidad del combustible.

El segundo enfoque busca la recolección y posterior eliminación del material particulado y cobra vida en los sistemas de post-tratamiento de gases.

### **DISMINUCIÓN EN LA GENERACIÓN DE PARTÍCULAS**

Los primeros intentos de atacar la generación de partículas en el motor partieron de la identificación y el análisis de los modos de operación del motor en los que se detectaba menor emisión. De esta manera, se propusieron cambios en la inyección de combustible y sistemas de recirculación de los gases de escape para cumplir con las exigencias legales. La clave de este acercamiento es la correcta regulación en "timing" y cantidad de combustible inyectado, así como la determinación de la proporción óptima de gases a recircular según la velocidad del vehículo y del tipo de motor, así como de la posición del pedal de aceleración, caracterización de la entrada de aire al motor, presión manejada en los cilindros del motor y temperatura en los mismos (régimen de trabajo del motor).

Un situación cercana a esto fue la adaptación de sistemas complejos de control en la inyección de combustible y recirculación de gases de escape (McDonald, 1988). La idea fue utilizar dispositivos electrónicos que monitorearan el funcionamiento del motor para ajustar inmediatamente el tiempo de inyección, el volumen de combustible inyectado y la proporción de gas de recirculación. Esto permitió tener flexibilidad en el sistema, a la vez que se garantizaba una notable reducción en los niveles de emisión. La preocupación de determinar la cantidad ideal de combustible a inyectar ha llevado a alteraciones físicas del motor tales como el aumento de área del canal de inyección en 40 % para evitar el bloqueo del mismo por los depósitos debidos a la carbonización del combustible; al diseño e implementación de nuevos inyectores; y a la utilización de detergentes que evitan que los productos de carbonización se depositen en los conductos de salida de la cámara de combustión.

### **SISTEMAS DE POST-TRATAMIENTO**

Los sistemas de post-tratamiento constituyen un forma de solución más sencilla al planteamiento del problema, al no participar directamente en el diseño del motor o la elaboración del combustible, aunque deben adaptarse a las características de éstos, pues en muchos casos éstos definen las condiciones de operación (contrapresión, presencia de azufre, etc.).

#### **Convertidor catalítico**

Además de las limitantes en material particulado, los motores a diesel también tienen que cumplir con normas relativas a  $\text{NO}_x$ , CO e hidrocarburos liberados. Así, es fácil entender que el primer dispositivo de tratamiento de gases de escape en motores diesel haya sido --al igual que con el motor de gasolina-- el convertidor catalítico. En éste, la presencia de ciertos compuestos metálicos permite disminuir la energía de activación de las moléculas que participan en la combustión, con lo que se puede llevar a cabo la oxidación de especies intermedias de la combustión tales como CO y  $\text{NO}_x$ , así como del combustible no quemado y de los hidrocarburos secundarios generados por pirólisis en la cámara de combustión. (entre los que se encuentra la fracción orgánica soluble o SOF) (Corning Particulate Filters, 1997).

El proceso descrito de oxidación secundaria ocurre a temperaturas muy por debajo de las requeridas en condiciones no catalizadas (entre 250°C y 300°C). Estas temperaturas existen en los gases de escape del motor sin importar el régimen de trabajo del mismo, con lo que prácticamente se elimina la emisión de esas especies indeseables con el uso del convertidor catalítico. Desgraciadamente, aunque la presencia de catalizadores también baja notablemente la energía de activación de las partículas de hollín, la temperatura de los gases de escape no siempre alcanza el valor necesario para activar la combustión de las mismas. Esto es especialmente cierto para las condiciones de trabajo de los motores en las ciudades (trabajo en vacío o a bajas rpm del motor). Lo anterior significa que con el uso exclusivo del convertidor catalítico, el grueso de las partículas escapa libremente a la atmósfera y una parte de ellas se acumula en el interior del convertidor. El depósito paulatino de éstas sobre la superficie de metal precioso da lugar a la ulterior inutilización del mismo, que se acelera por la presencia de azufre en el combustible (asociado tanto a los núcleos carbonáceos, cuanto a las partículas líquidas y los compuestos en fase gaseosa), que al reaccionar con los metales catalíticos forman compuestos sulfurosos. Esto último no sólo anula temporalmente el efecto positivo del convertidor, sino que lo inutiliza irreversiblemente, por lo que es evidente que por sí mismo el convertidor catalítico es ineficaz para el control de las emisiones globales de los motores diesel, lo que acentuó la necesidad de encontrar una solución más completa al problema.

CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MOTOR	TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE
Altas rpm o carga grande	350-750°C
Ciudad	150-300°C
Vacío	100-150°C

*Tabla 2.2 Temperaturas en el escape asociadas al régimen de trabajo de un motor diesel típico. (Gilot, 1993).*

### Filtros

Una solución evidente al problema del material particulado es la utilización de filtros adecuados. La idea es atrapar con un filtro a las partículas para después removerlo (cambiarlo) o limpiarlo de alguna manera. Aunque el concepto es elemental, su uso origina complicaciones importantes. La primera y más evidente de éstas surge como consecuencia del taponamiento del filtro después de cierto tiempo de uso. Con el paulatino taponamiento hay un aumento importante en la eficiencia de recolección del filtro, pero esta aparente ventaja origina directamente una disminución en la eficiencia del motor. A cierto nivel de taponamiento, el aumento en la resistencia para el flujo de los gases de escape origina una contrapresión que ahoga paulatinamente el escape, al grado que puede llegar a ahogarlo.

El uso exclusivo de los filtros podría implicar mayor riesgo a la salud que el representado por el material particulado original ya que según ciertos autores, el hollín no regenerado que se queda en el filtro podría tener mayor efecto cancerígeno que el emitido normalmente por el motor al interactuar con los gases de escape para formar hidrocarburos poliaromáticos nitrados.

Existen diferentes tipos de filtros, cuyas diferencias principales radican en la forma y los materiales utilizados para su fabricación. Entre los principales tipos se pueden señalar filtros de

fibras metálicas compactadas, elementos metálicos porosos y materiales cerámicos con diferentes formas (principalmente espumas, fibras y “panales”). Los problemas asociados con el uso de filtros, así como la eficiencia de filtrado dependen en gran medida del tipo de filtro empleado. Existen diferentes estudios que evalúan cada uno de los tipos según la eficiencia inicial y la estabilidad física. La opinión general señala a los filtros cerámicos con estructura de panal como la mejor opción, al presentar algunas de las eficiencias iniciales más altas y una buena estabilidad física, aún cuando existe el riesgo de resquebrajamiento o fusión por arriba de ciertas temperaturas. Este tipo de filtro se seleccionó para este sistema, por lo que en lo sucesivo se hará referencia al mismo (3M Diesel Filter Cartridges, 1995).

Existen diferentes maneras de destapar los filtros. Ejemplo de éstas son la aplicación de corrientes de aire en sentido inverso al depósito de partículas con la posterior recolección de las mismas en una charola, y el lavado del filtro con solventes orgánicos. No obstante, en la mayoría de los casos, la regeneración de los filtros consiste en la incineración del hollín, que se realiza por medios térmicos. Si el filtro es metálico, la energía necesaria para incinerar las partículas se puede aportar directamente por la aplicación de una diferencia de potencial al filtro o mediante una envolvente resistiva del mismo. Esto representa una obvia ventaja respecto a otros medios de regeneración al reducir las pérdidas caloríficas en las corrientes de aire ;sin embargo, hasta el presente momento, la eficiencia de filtración de los elementos metálicos es considerablemente más baja en comparación con la de los elementos cerámicos. En éstos, la energía necesaria para incinerar las partículas la proporciona una corriente de aire caliente. La corriente de aire se induce en la misma dirección de filtración o en dirección contraria : regeneración directa o inversa, respectivamente, siendo esta última la utilizada para el sistema presentado. Esto se explica en detalle en párrafos posteriores correspondientes a la regeneración. Los medios para elevar la temperatura del aire de regeneración pueden ser quemadores o resistencias. Una desventaja que presentan los quemadores respecto a las resistencias es que introducen una cantidad adicional de contaminantes a los gases de escape (3M Diesel Filter Cartridges, 1995).

### **Otros**

Existen otras alternativas para el control de las partículas. En realidad las alternativas son las mismas que las existentes para el control de material particulado en la industria. Esto incluye cámaras de sedimentación, paso de los gases a través de cortinas de agua, ciclones, etc. Existen algunas publicaciones que proponen o reportan el uso de tales sistemas aplicados a automóviles o camiones a diesel. Algunos de éstos no eliminan directamente a las partículas (cortinas de agua), por lo que aún eliminando la emisión a la atmósfera, no acaban con el potencial cancerígeno de las partículas ; los otros sistemas presentan dificultades por las dimensiones requeridas para su funcionamiento óptimo, la adaptación del sistema de combustión de las partículas recolectadas y la integración de los sistemas en sí al chasis de los vehículos. Aunque su uso no queda de ninguna manera descartado, no serán discutidos aquí, pues en el grado de desarrollo en que se encuentran no representan alternativas importantes en la utilización de sistemas convencionales que hacen uso de filtros.

En fin, la combinación de las modificaciones al motor, la mejor calidad de los combustibles, el uso de agentes catalíticos y el uso de filtros ha permitido reducir notablemente la cantidad de emisión particulada, como se puede ver en la siguiente tabla.

Vehículo	MP mg/km	FOS mg/km	FOS/MP, %
1986 3 1 IDI 31 turbocargado 1900 kg		3.4	12.5
1987 1.6 1 IDI 1200 kg	26	12	46.5
1987 3 1 IDI 8.75 turbocargado		no disponible	no disponible
1992 2.5 1 IDI* *sin filtro particulado	120	12	10

**Tabla 2.3. Identificación de las concentraciones de material particulado y fracción orgánica soluble de los gases de escape de diferentes modelos de motor, filtrados en presencia de catalizadores (Corning Incorporated, 1993).**

Como se menciona en párrafos anteriores, el atrapar el material particulado en los filtros no acaba con el riesgo a la salud asociado con él. De acuerdo con esto es insuficiente el cambio regular de filtros, (lo cual no es práctica ni económicamente rentable), así como su regeneración por medios mecánicos o por lavado con solventes ; la regeneración ideal del filtro exige la eliminación real del material particulado, lo que hace casi obligatoria su combustión. Esto exige altas temperaturas (>700°C) que si bien ocurren naturalmente cuando el motor gira a gran velocidad o carga, no se alcanzan en condiciones de manejo dentro de la ciudad, o en vacío, como se puede ver en la tabla 2.2. Así en estas condiciones --que son las asociadas con el contacto humano más cercano a las emisiones-- no ocurre la regeneración libre ni siquiera utilizando catalizadores (T>450°C). La mayoría de las situaciones prácticas hace necesario utilizar una fuente de energía para alcanzar la temperatura requerida para la incineración de las partículas. Esta fuente de energía debe utilizarse periódicamente para no afectar de manera importante la eficiencia del motor, lo que obliga a establecer mecanismos de control adecuados (Corning Incorporated, 1993)

### EL FILTRO CATALIZADO

Los filtros cerámicos de Cordierita permiten la recolección de partículas diesel con eficiencias de hasta 95% -- considerablemente por arriba de la eficiencia de recolección de otro tipo de filtros (i.e. fibras metálicas sinterizadas)-- y permiten fácilmente la introducción de termopares para monitorear la temperatura durante su regeneración, por lo que son una excelente alternativa como mecanismo de control del material particulado. Aun así, existen problemas asociados a su uso. Uno de estos es su relativa fragilidad, que puede significar resquebrajamiento debido a vibraciones. Otro más importante surge durante su regeneración. Al llevarse a cabo la combustión de las partículas, se generan altas temperaturas dentro del filtro, lo cual lleva a gradientes térmicos importantes dentro del mismo. Además, los filtros comerciales de cordierita tienen un recubrimiento de Gamma alumina. Esta sustancia sufre cambios en su estructura cristalina a partir de 750°C. Entonces se transforma en Delta-alumina, luego en Teta-alumina y finalmente en Alfa-alumina. Lo alarmante de esta transformación es que a 1100°C el área específica del alumina decrece violentamente de 100 m<sup>2</sup>/g a 40 m<sup>2</sup>/g, lo cual representa el virtual resquebrajamiento e inutilización del filtro. Esto representa un obstáculo primario a la regeneración directa del filtro, pues la temperatura "normal" de combustión de las partículas diesel está por arriba de 700°C, con

lo que no es difícil alcanzar la temperatura crítica de  $1100^{\circ}\text{C}$  debido al calor liberado durante la combustión (3M Diesel Filter Cartridges).

Una variación importante en los filtros cerámicos es la utilización de recubrimientos catalíticos. Estos permiten reducir la temperatura de combustión del material particulado hasta cerca de  $450^{\circ}\text{C}$ . En filtros de este tipo, las temperaturas involucradas permiten un mayor rango de seguridad para mantener la integridad del filtro durante su regeneración. La temperatura máxima alcanzada durante la regeneración depende de la calidad de la combustión, a su vez función de la masa inicial de material depositada en el filtro, su distribución, la concentración de oxígeno en la corriente de aire de regeneración, la aplicación de éste, etc.

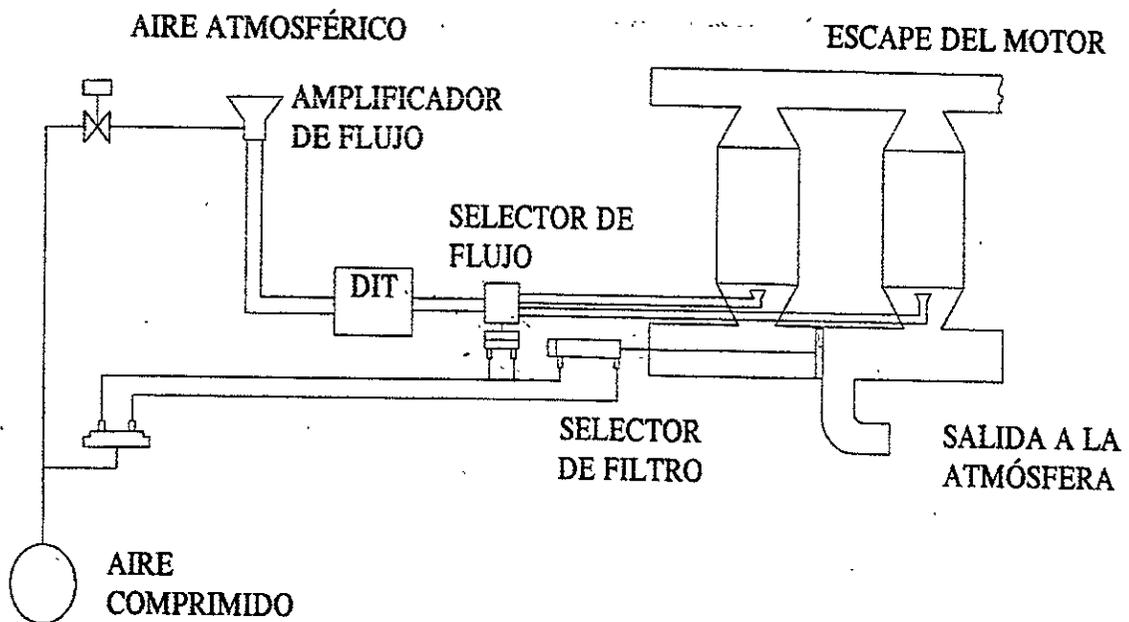
# CAPITULO III

## DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL SISTEMA

### INTRODUCCIÓN

El sistema en cuestión tiene como finalidad llevar a cabo la filtración mecánica de las partículas de hollín presentes en los gases de escape de un motor diesel en todo momento, así como realizar la regeneración (limpieza) de los filtros de forma continua y automática. A lo largo de este capítulo se hace una descripción, tanto de los elementos que forman parte del sistema desarrollado, como del funcionamiento general del mismo.

La figura 3.1 muestra un esquema general del sistema propuesto, con todos los elementos que lo forman.



*Figura 3.1. Esquema del sistema.*

El sistema consta de los siguientes elementos:

- Filtros cerámicos catalizados
- Dispositivo de inercia térmica (DIT)
- Válvulas selectoras
- Actuadores neumáticos
- Amplificador de flujo
- Electroválvula

- Circuitería, tubería y ductos
- Sistema electrónico de control

Para el sistema propuesto, se seleccionó un monolito cerámico marca Corning® tipo EX-80. El elemento cerámico cuenta con un baño catalítico propiedad industrial de Degussa®. Las características principales de estos monolitos son las siguientes :

**Características del elemento Corning® tipo**

**EX-80**

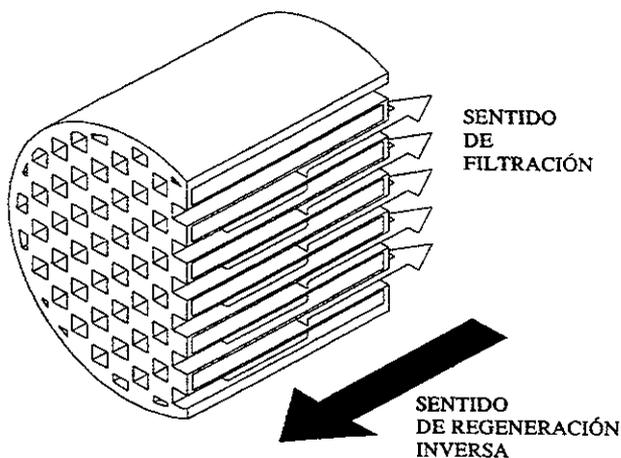
Tamaño medio del poro (µm)	13
Eficiencia inicial (%)	87
Eficiencia final (filtro cargado)(%)	92
Caída de presión (cmHg/g de hollín filtrado)	0.1
Porosidad(%)	48
Coefficiente de expansión térmica	4.0
(x10 <sup>7</sup> cm/cm/°C (25-800°C))	

**Características físicas del filtro Corning® con baño catalítico propiedad de Degussa®**

Tipo	DF 345
Metal precioso (g/unidad)	23
Disposición física (celdas/cm <sup>2</sup> )	15.5
Pared cerámica (mm)	0.4
Diámetro exterior (m)	0.286
Longitud (m)	0.203

**Tabla 3.1. Características del elemento filtrante seleccionado (Corning Particulate Filters Ex-80 Composition, 1997)**

La figura 3.2. muestra un esquema del filtro, con la disposición de los ductos así como el sentido de filtración y el sentido de regeneración inversa utilizado



**Figura 3.2. Esquema del filtro cerámico utilizado. Sentido de filtración regeneración inversa.**

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran las gráficas de comportamiento del material cerámico para la caída de presión y la eficiencia de filtración en función de los gramos de hollín filtrados por el elemento.

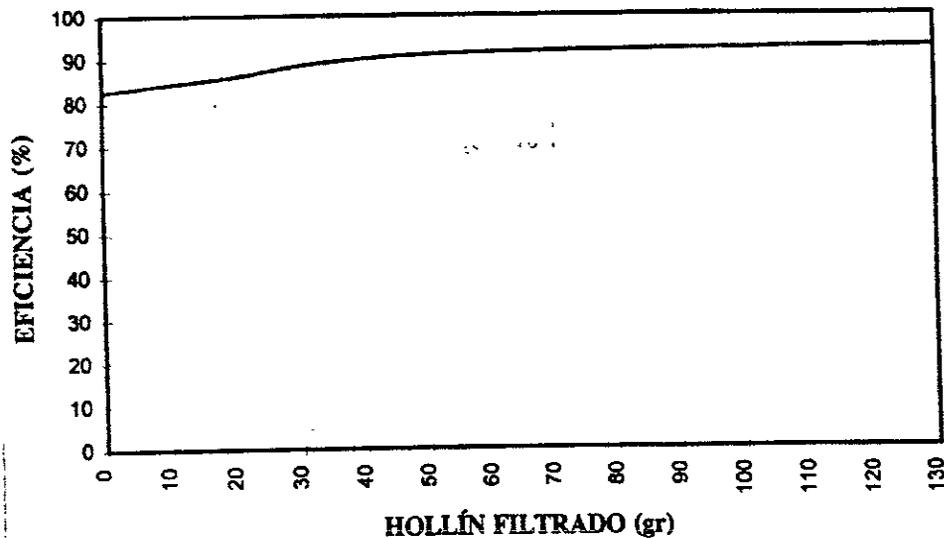


Figura 3.3. Eficiencia de filtración en función de los gramos de hollín filtrado para los elementos filtrantes (Corning Particulate Filters, Ex-80 Composition, 1997).

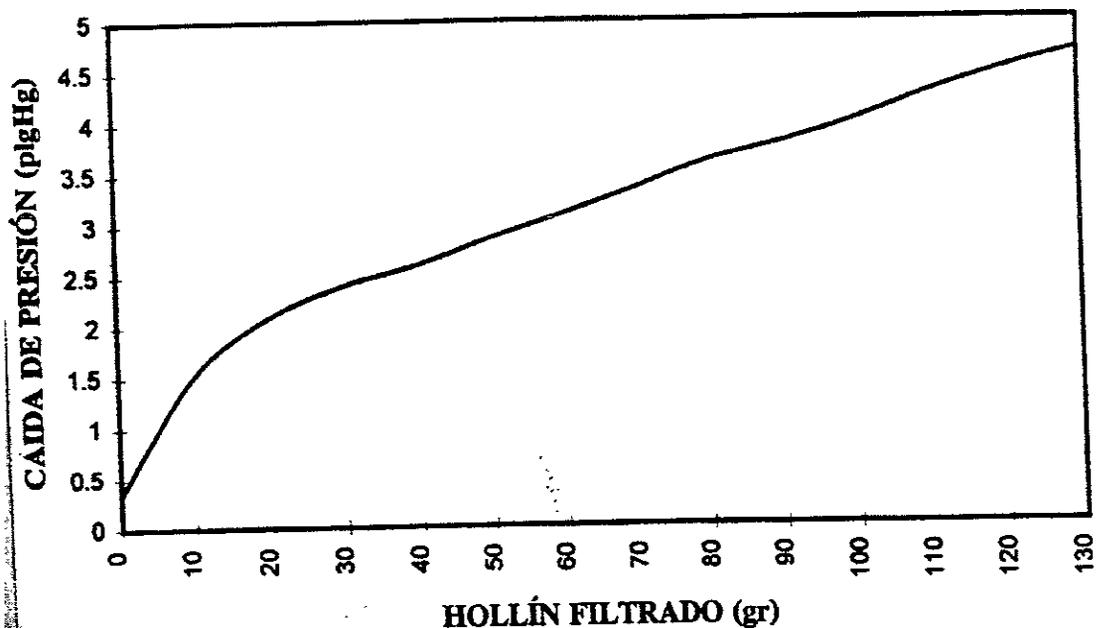


Figura 3.4. Caída de presión en el filtro en función de los gramos de hollín filtrados (Corning Particulate Filters, Ex-80 Composition, 1997).

El elemento EX-80 de Corning® proporciona una excelente resistencia a la fatiga térmica debida a gradientes importantes de temperatura producidos durante su regeneración. Pruebas preliminares

en elementos semejantes reportan una durabilidad del filtro de 300,000 millas cuando los gradientes térmicos involucrados no superan los  $\pm 35$  °C/cm. Esto se consigue disminuyendo el coeficiente de expansión térmica del material, manteniendo su resistencia mecánica y módulo de elasticidad. Pruebas de laboratorio realizadas por el fabricante mostraron que los esfuerzos térmicos provocados durante la regeneración, incluso cuando ésta no se controla, se encuentran por debajo del límite del 66 % de la resistencia del material (Corning Particulate Filters, Ex-80 Composition, 1997).

La función del baño catalítico es disminuir la energía de activación de las partículas de hollín. Al disminuir la energía de activación, disminuye también la temperatura de ignición de las partículas de  $T \approx 700$  °C a  $T \approx 450$  °C, con lo que se facilita el proceso de regeneración de los filtros al manejar flujos de aire de menor temperatura.

## REGENERACIÓN DE LOS FILTROS

### Regeneración Directa

La idea de regenerar el filtro mediante la introducción de una corriente de aire caliente no es nueva. Existen numerosos estudios al respecto. En éstos se considera un flujo de aire de regeneración que atraviesa el filtro en el mismo sentido que los gases de escape. Este flujo se calienta con resistencias eléctricas o por la combustión de pequeñas cantidades de combustible que son inyectadas oportunamente. El esquema general de este tipo de sistema de regeneración se aprecia en la siguiente figura :

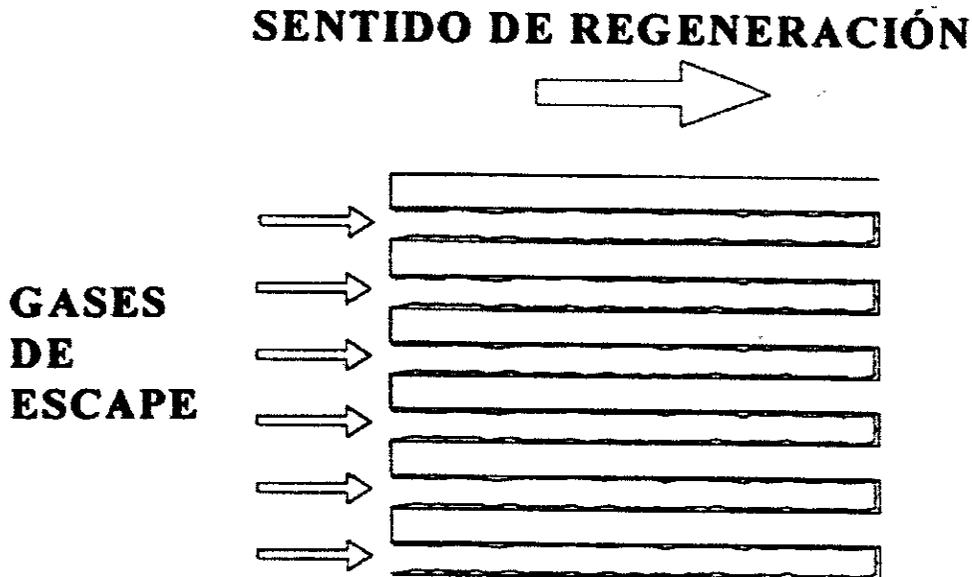
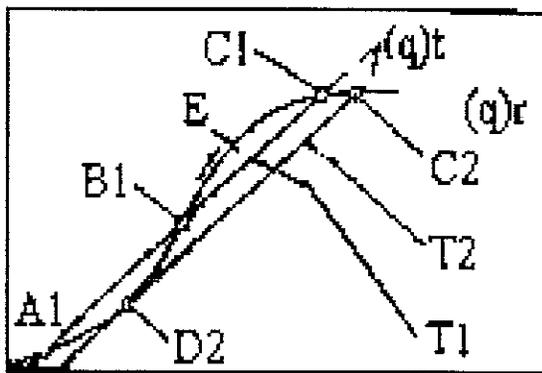


Figura 3.5. Esquema de regeneración normal.

La regeneración mediante este sistema puede considerarse compuesta por cuatro etapas: precalentamiento, ignición, combustión lenta y enfriamiento del filtro. El tiempo de regeneración, así como la temperatura máxima alcanzada depende de la carga inicial del filtro, del área total de filtración y espesor de la pared de los canales del filtro.

Existen diferentes estudios experimentales en torno a este esquema de regeneración. De acuerdo con los datos obtenidos, a partir de cierta temperatura que podemos identificar como "crítica" ocurre la ignición repentina del hollín en cierto punto del filtro. La ignición del material particulado depende esencialmente de la relación entre el calor de combustión liberado y las pérdidas de calor para una temperatura ambiente determinada. Si se tienen pérdidas de calor mayores a la generación de calor, habrá un descenso en la temperatura del material particulado. Al manejar mayores temperaturas ambiente, el calor generado supera las pérdidas, con lo que hay un aumento en la temperatura de las partículas hasta el punto en el cual comienza la combustión violenta caracterizada por un aumento rápido de la temperatura hasta un punto de inflexión a partir del cual decrece la velocidad con la que aumenta la temperatura del material particulado. Ésta sigue un patrón asintótico a partir de una cierta temperatura  $C2$  que caracteriza la combustión sostenida. Lo anterior se puede observar en la siguiente figura, donde se observan – para temperaturas ambiente distintas  $T1$  y  $T2$  – las pérdidas relacionadas (consideradas lineales) y el calor generado.



calor generado  $(q)r$   
calor perdido  $(q)t$

T de la partícula ( $T_a$ )

$T1 < T2$

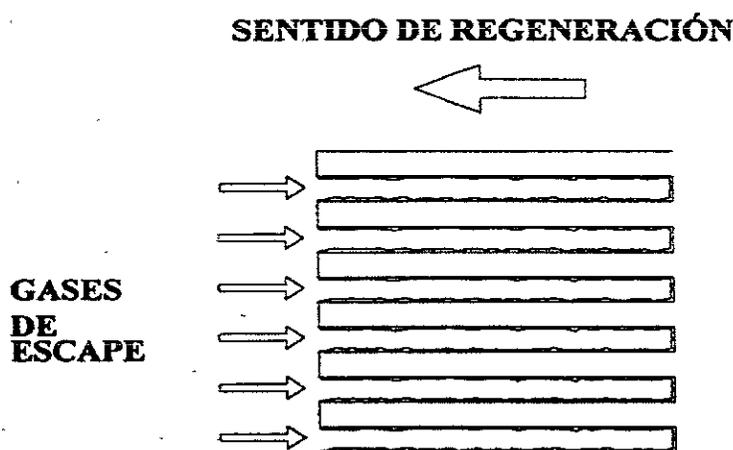
Temperatura ambiente

Figura 3.6. Relación de las características de combustión del material sólido (Romero A. F., 1997)

Así, a partir de cierto punto, la combustión se propaga debido al calor liberado en ella a lo largo del filtro haciendo innecesaria la continuación del flujo de aire caliente u otra fuente externa de energía. En otras palabras, la regeneración a partir de este punto se vuelve autosostenida mientras se mantenga un nivel mínimo de oxígeno. La velocidad de propagación de la combustión dentro de filtro consiste esencialmente en la propagación del frente de flama.

### Regeneración Inversa

El sistema de regeneración que se propone resulta en una regeneración completa del filtro y en un tiempo menor de regeneración que el sistema directo. En realidad se trata del mismo esquema anterior, en el que una corriente de aire caliente se hace pasar a través del filtro, aportando inicialmente a las partículas de hollín la energía necesaria para iniciar su combustión, que se sostiene y propaga gracias a la concentración de oxígeno en la corriente (suponiendo una concentración suficiente y una distribución adecuada de material particulado a lo largo del filtro, una vez comenzada la combustión, la temperatura del aire de regeneración ya no es determinante para completar la regeneración del filtro, siendo la fuente primaria de energía el calor liberado por las partículas en combustión). La diferencia esencial del esquema radica en que la corriente de aire se hace pasar en sentido inverso a la salida de los gases de escape del motor, como se puede observar en el siguiente esquema.



*Figura 3.7. Esquema de regeneración inversa.*

Las principales ventajas al inyectar la corriente de aire en sentido contrario son una mayor eficiencia en la captura del material particulado y disipación de calor del material cerámico. Así, mientras en un esquema con flujo regenerante directo las partículas de hollín que han reducido su diámetro podrían escapar antes de consumirse, ayudadas por la presión acrecentada en el escape, en el esquema de regeneración inversa, la corriente de aire evita esto, pues se opone a la salida de las partículas. El límite de esta oposición es el arrastre de las partículas disminuidas al filtro paralelo, donde deben quedar atrapadas en lugar de escapar a la atmósfera en caso de que no se

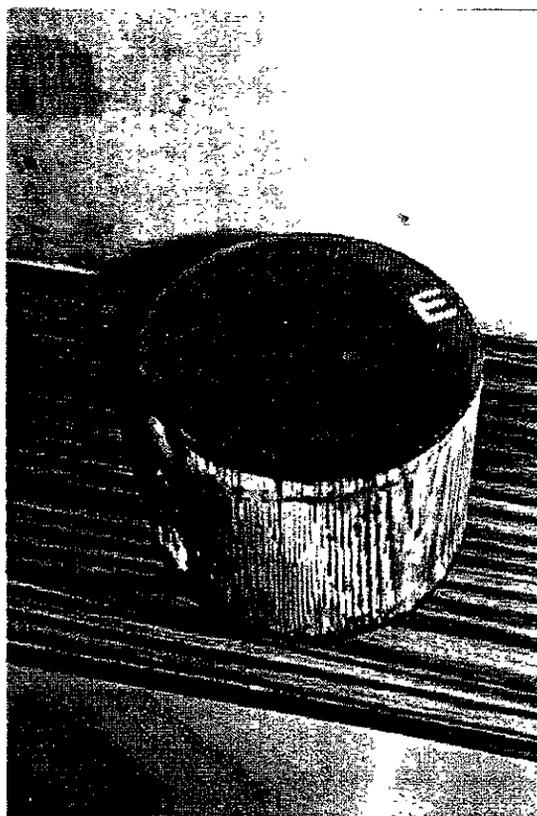
quemem durante su arrastre por el gas caliente, cosa que es de esperar si se tiene la concentración de energía en el material cerámico, como sucede en el esquema de regeneración directa.

Una diferencia substancial con el sistema de regeneración directa es que suponiendo que no se alcance la regeneración completa del filtro en un ciclo (como sucede en el esquema de regeneración inversa), la inyección inicial de la corriente de aire en sentido inverso tiende a destapar el filtro, favoreciendo más su limpieza total.

Entre estas desventajas potenciales está la posibilidad de que si la presión del aire regenerante es muy grande, se arrastre el grueso de las partículas (que podrían llegar a no encenderse) al filtro paralelo y crezca la contrapresión en el escape del motor, con los inconvenientes antes mencionados. También existe la posibilidad de que algunas partículas minúsculas sean arrastradas y sean forzadas a través del filtro paralelo por efecto del mismo flujo, escapando a la atmósfera.

### **Filtros cerámicos catalizados**

Se utilizaron dos filtros cerámicos catalizados donados por Degussa cuyas características se especifican en la sección del filtro catalizado. Los filtros están colocados en paralelo, de manera que mientras uno de los filtros está regenerándose, los gases de escape pasan a través del otro elemento y el filtrado de partículas nunca se interrumpe. Esta configuración se puede apreciar en el esquema general del sistema (Figura 3.1) y en la siguiente.



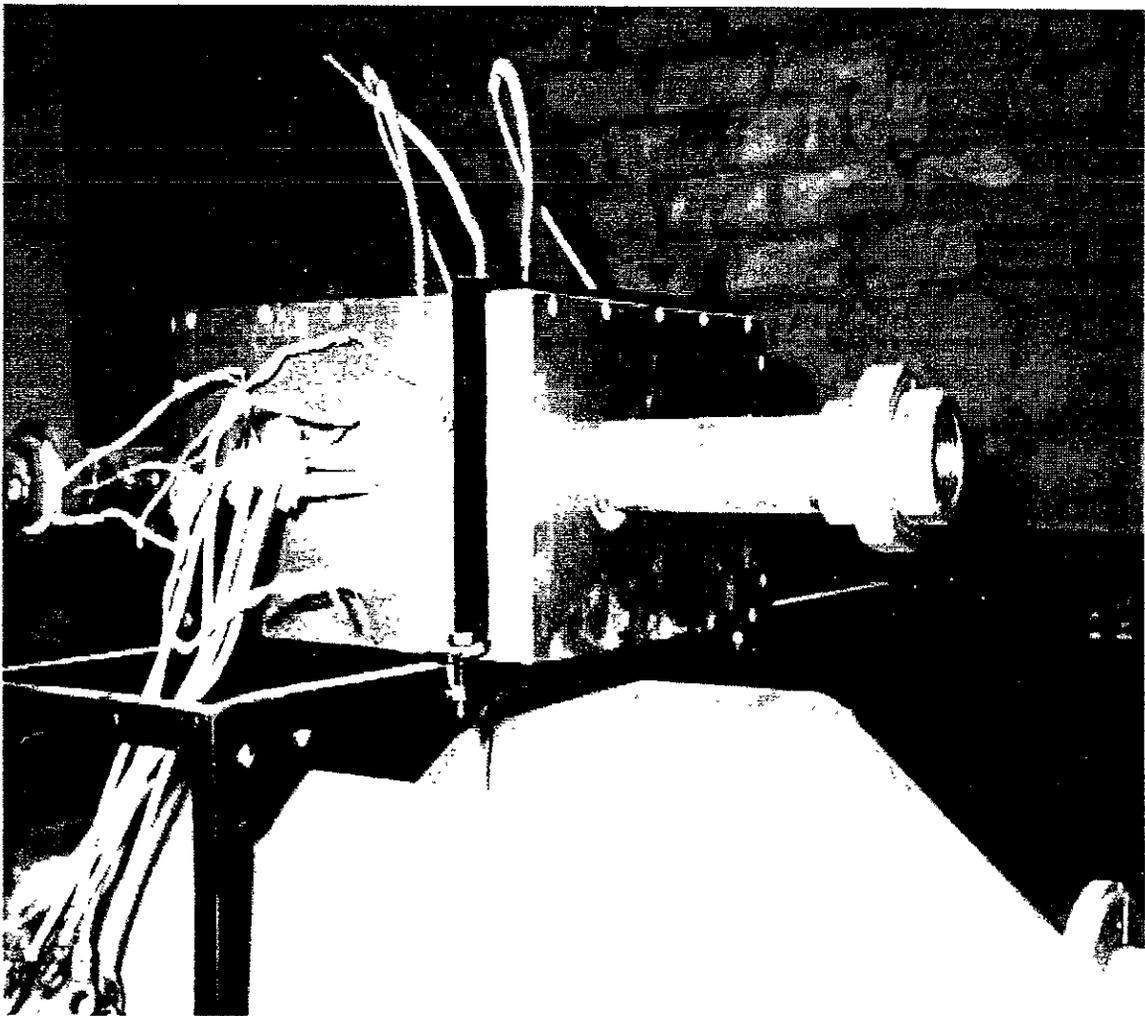
*Figura 3.8. Vista de un filtro catalizado marca Degussa®.*

### **Dispositivo de Inercia Térmica (DIT).**

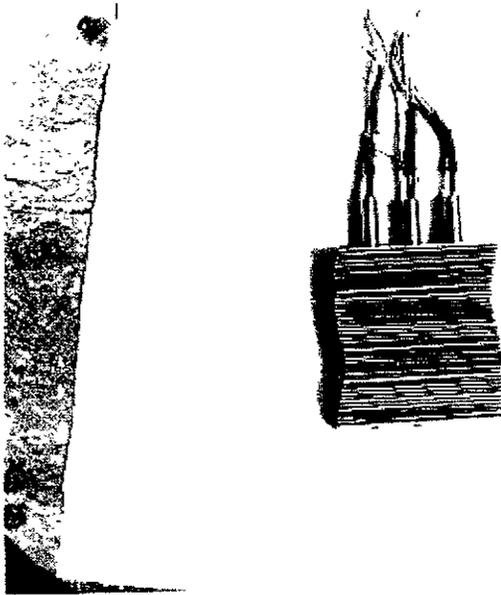
La función del dispositivo de inercia térmica es calentar la corriente de aire inducida a través de él, utilizada posteriormente para realizar la regeneración de las partículas en el interior del filtro.

El DIT utiliza tres resistencias eléctricas asociadas a una envolvente metálica y a una superficie extendida formada por una serie de placas de acero inoxidable. El aire de regeneración pasa a través de la superficie extendida, para elevar su temperatura hasta los niveles necesarios para llevar a cabo la regeneración. El DIT cuenta además con una envolvente aislante que reduce al máximo las pérdidas de calor al ambiente.

Cada una de las resistencias cuenta con termopares de control. Los termopares se encuentran conectados al control electrónico del sistema, de forma tal que el sistema corta el suministro de energía a las resistencias cuando la temperatura de alguna de las resistencias alcanza los niveles máximos admisibles, e induce el flujo de aire de regeneración cuando el DIT alcanza su temperatura óptima de operación.



*Figura 3.9. Vista lateral del Dispositivo de Inercia Térmica (DIT)*

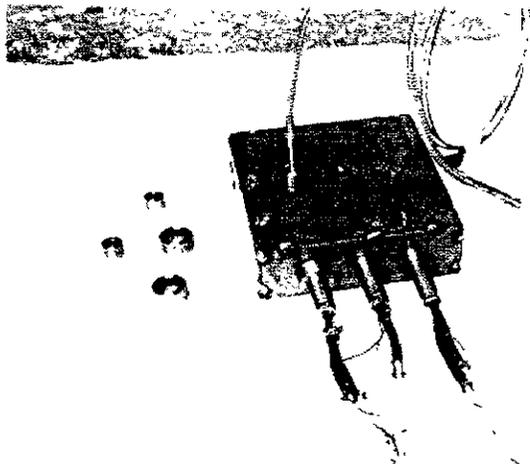


*Figura 3.10. Vista interior del DIT con sus aletas intercambiadoras de calor.*

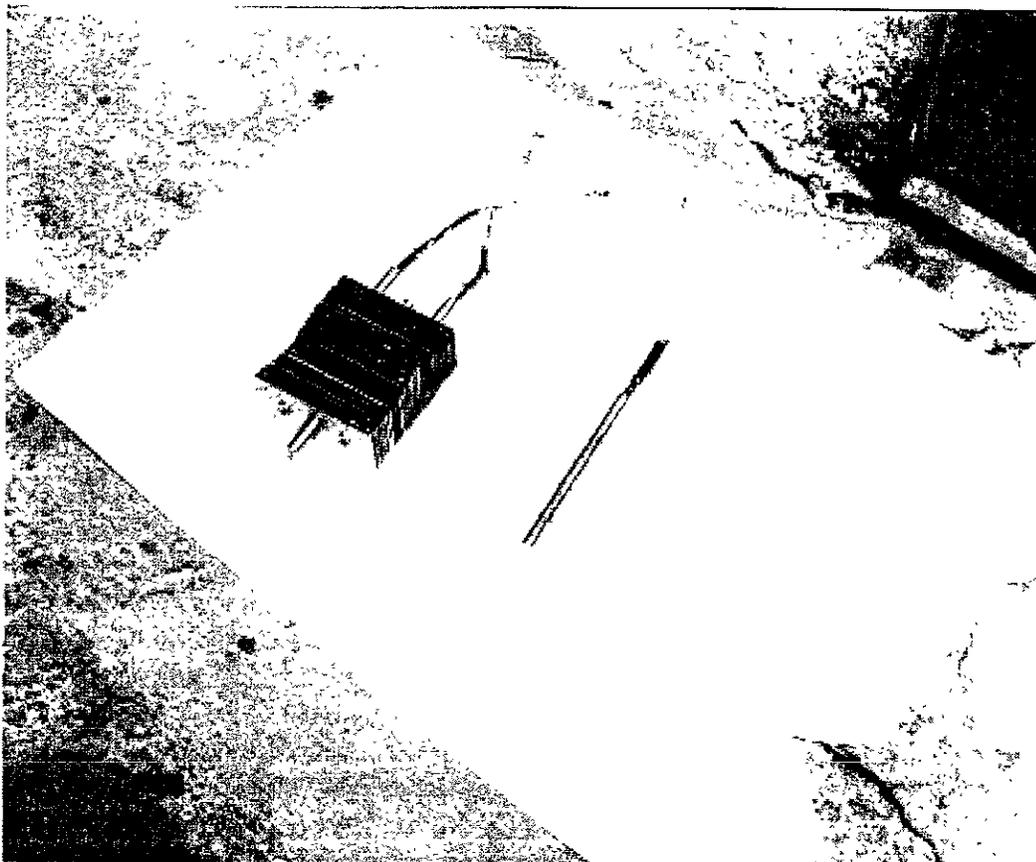
La descripción completa del DIT su construcción y funcionamiento es el siguiente:

La regeneración del hollín capturado en los filtros cerámicos, ya sea catalizados o no, requiere en la mayoría de los casos, del uso de una corriente de aire con temperatura suficiente para calentar las partículas hasta su punto de ignición y con una concentración mínima de oxígeno para permitir la reacción de combustión. Para estos fines se diseñó y modeló -- previo a la realización de este trabajo -- un Dispositivo de Inercia Térmica (DIT) (Gutierrez Salinas R., 1996).

El DIT almacena energía en forma de calor hasta el momento en el que alguno de los filtros necesita regeneración; en dicho momento el sistema de control recibe una señal y se induce un flujo de aire mediante el amplificador de flujo a través del DIT. La energía almacenada en el DIT se transfiere a la corriente de aire y ésta es enviada al filtro que la necesite para iniciar el proceso de regeneración.



*Figura 3.11. Vista del DIT con una coraza de acero.*



*Figura 3.12. Vista interna del DIT con una resistencia eléctrica Firerods® a su lado.*

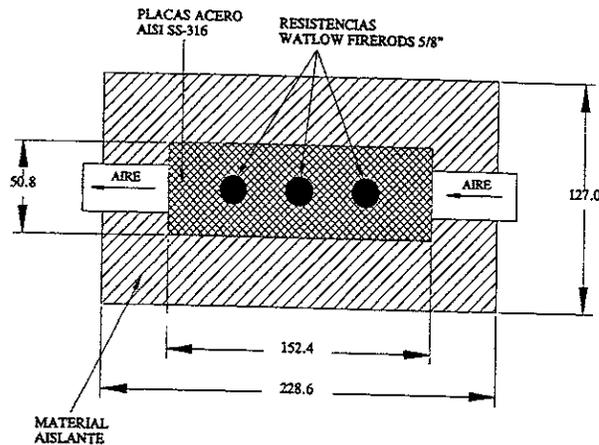
### **Construcción**

El dispositivo de inercia térmica consta de los siguientes elementos:

- Elementos calentadores
- Superficie extendida
- Material aislante
- Termopares de control

Los elementos calentadores utilizados para el DIT están formados por tres resistencias eléctricas tipo Firerods®, fabricadas por la empresa Watlow Engineering Corp., con capacidad de 600 W cada una. Las resistencias utilizadas pueden ser de cualquier otro tipo similar de fabricación nacional o importada. Con las tres resistencias, el DIT tiene la capacidad total de 1.8 kW, energizado con 24 V de CD, disponibles en un autobús de pasajeros o en un camión de carga de servicio pesado. Durante la etapa experimental, las resistencias se controlan mediante un circuito de potencia controlado a su vez, por el microcontrolador del sistema.

Las resistencias utilizadas se encuentran encapsuladas en un cartucho de acero inoxidable que sirve de base a una superficie extendida (o aletas) para maximizar la transferencia de calor hacia el flujo de aire de regeneración. La superficie extendida está formada por 96 placas de acero inoxidable AISI SS-316 de 1.6 mm de espesor. Cada una de las placas mide 152.4 x 50.8 mm, y consta de tres perforaciones de 15.875 mm de diámetro por donde entran las resistencias eléctricas. La figura 3.13 muestra una vista lateral del dispositivo de inercia en su interior.



**Figura 3.13. Vista lateral del DIT. Resistencia, placas y material aislante**

El conjunto de las tres resistencias con su superficie extendida, se coloca en el interior de una envolvente metálica de acero inoxidable. La envolvente cuenta en su exterior con una capa de material aislante de alta temperatura, con el fin de minimizar las pérdidas de calor hacia el exterior, puesto que el DIT debe alcanzar temperaturas de 1273 K en ciclos alternativos de calentamiento-enfriamiento.

Cada una de las resistencias Firerod cuenta con dos termopares de control. Los termopares se encuentran conectados al circuito de control del sistema, de tal forma que, permiten evaluar la temperatura de las resistencias en todo momento durante la fase experimental, y permiten al circuito cortar la alimentación de las resistencias cuando éstas han alcanzado su temperatura óptima.

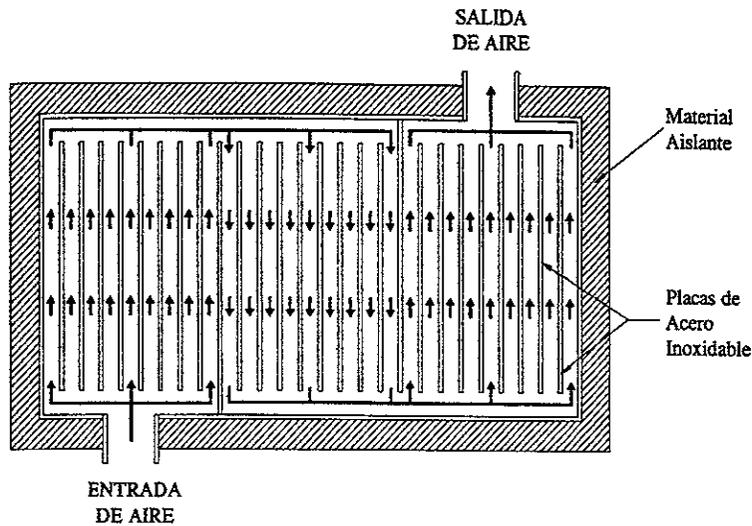
**Funcionamiento**

El dispositivo diseñado funciona en períodos cíclicos consistentes en:

1. Período de almacenamiento de energía térmica, durante el cual se produce el calentamiento de los elementos calentadores y de su superficie extendida. Durante esta parte del proceso, la superficie extendida puede alcanzar hasta 1000°C, sin embargo, los elementos calentadores no deben exceder los 950°C debido a especificaciones del fabricante. Durante esta etapa, el sistema de control suspende la alimentación de las resistencias cuando la señal enviada por los termopares establece que la temperatura en alguna de las resistencias ha alcanzado el valor mencionado.
2. Durante el período de calentamiento mencionado, no existe flujo de aire a través del dispositivo. El flujo de aire hacia el DIT proveniente del amplificador de flujo se induce únicamente cuando recibe la señal proveniente del control electrónico del sistema.
3. Una vez que se alcanza la temperatura óptima del DIT y alguno de los filtros necesita de limpieza, el suministro de aire se induce mediante el control electrónico, a fin de que el aire obtenga la temperatura necesaria para llevar a cabo el proceso de regeneración.

El aire inyectado al interior del DIT es obligado a recorrer tres veces la superficie extendida de las resistencias a fin de maximizar la transferencia de calor de las placas hacia el aire de regeneración. El recorrido del aire se consigue mediante la disposición especial que tienen las

placas en el interior del DIT. La figura 3.14 muestra un esquema del recorrido del aire en el interior del dispositivo y de la disposición de las placas de acero que forman la superficie extendida

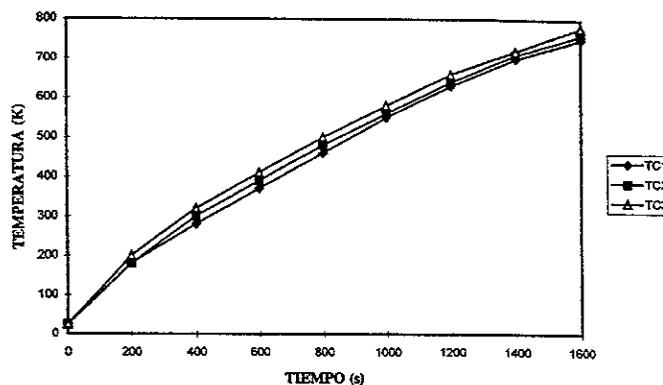


**Figura 3.14.** Esquema del recorrido del aire y disposición de las placas en el interior del DIT.

**Resultados Experimentales Preliminares**

Se han realizado pruebas con el calentamiento del DIT, es decir, durante la fase de almacenamiento de energía, cuando no existe flujo de aire inducido a través del dispositivo. El experimento se llevó a cabo utilizando el microcontrolador diseñado, alimentando las resistencias con ayuda del conjunto motor-generator y un juego de baterías de 12 V semejantes a las utilizadas en un camión.

El microcontrolador fue programado para alimentar las resistencias y cortar la alimentación de las mismas cuando alguno de los termopares indique que la temperatura ha alcanzado 950°C. El sistema electrónico proporciona, además, la temperatura de las resistencias en todo momento.



**Figura 3.15.** Calentamiento experimental del DIT.

Los resultados obtenidos en la prueba de calentamiento del DIT se muestran en la figura 3.15. los cuales fueron realizados con el DIT desmontado. La figura es una gráfica Tiempo-Temperatura para las lecturas obtenidas de los termopares conectados a cada una de las resistencias del dispositivo. Las variables marcadas en la figura corresponden a :

- TC1 Temperatura del aire estacionario a la entrada del DIT
- TC2 Temperatura media del metal dentro del DIT
- TC3 Temperatura del aire estacionario a las salida del DIT

En la figura anterior se observa una variación parabólica de pendiente a partir de 100°C. Dado la suavidad de la curva, ésta se puede aproximar por dos rectas, una entre 100°C y 380°C y otra entre 380°C y 800°C. Dada la mínima variación de la pendiente en ambos tramos de la curva, el calentamiento de las resistencias puede considerarse lineal.

### **Válvulas Selectoras**

El sistema cuenta con dos válvulas selectoras para su funcionamiento. Las válvulas pueden apreciarse en la figura 3.1., a la salida del dispositivo de inercia térmica. Ambas válvulas realizan su función a través de actuadores neumáticos.

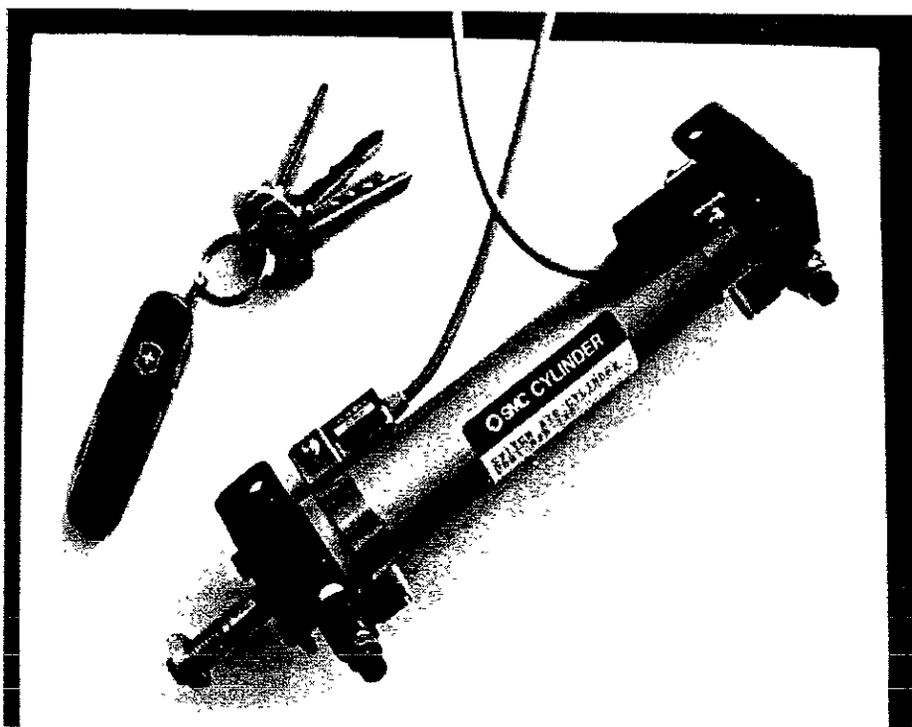
La válvula ubicada a la salida de los filtros tiene como función desviar el flujo de gases de escape hacia uno u otro de los filtros durante el funcionamiento del sistema. La válvula está formada por un disco y un vástago que se desplazan entre dos posiciones ubicadas a uno y otro lado del ducto de escape de acuerdo a las necesidades del sistema.

La válvula ubicada a la salida del DIT tiene como función dirigir el flujo de aire de regeneración hacia uno u otro de los filtros dependiendo de las necesidades de regeneración de los mismos. Esta válvula está formada por dos válvulas de mariposa colocadas perpendicularmente, de forma tal que una de ellas permanece cerrada mientras la otra permanece abierta. Las válvulas cuentan con un eje acoplado a un mecanismo especial que realiza su función a través de un cilindro neumático.

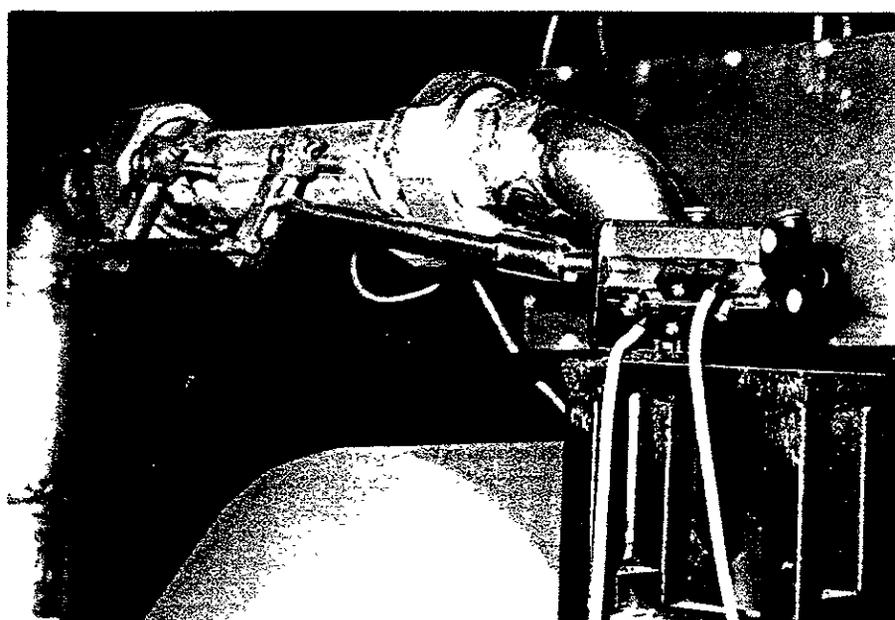
### **Actuadores Neumáticos**

El sistema de regeneración de filtros requiere del uso de dos actuadores o cilindros neumáticos para su funcionamiento. Uno de ellos (figura 3.16 y 3.18), acciona la válvula que dirige el flujo de gases de escape del motor hacia uno u otro de los filtros catalizados. El otro actuador (figura 3.17) controla la válvula que dirige el flujo de aire de regeneración hacia uno u otro de los filtros catalizados.

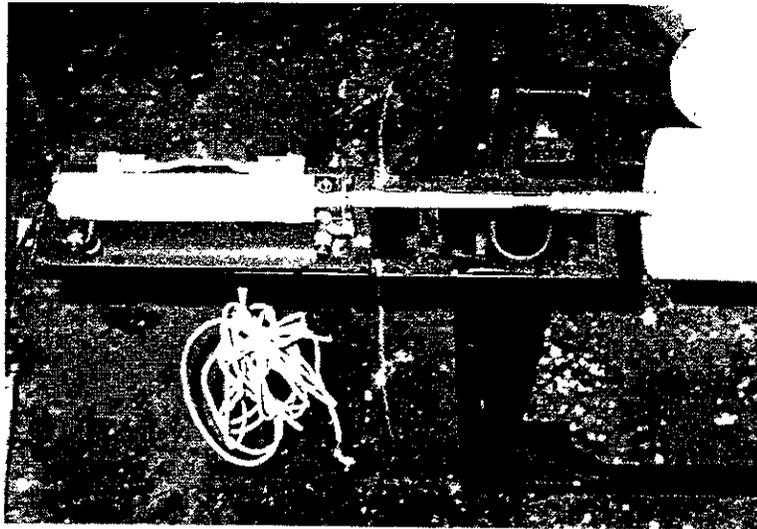
El cilindro neumático para los gases de escape es un cilindro de doble efecto de 125 mm de carrera. El actuador utilizado para el flujo de aire de regeneración es un cilindro de doble efecto de carrera corta (10 mm). En un trabajo previo, los actuadores fueron seleccionados de acuerdo a la carrera y a los diagramas de presión-fuerza, pandeo y consumo de aire proporcionados por el fabricante. Los cilindros utilizados son fabricados por la SMC Corporation S.A. de C.V. En ambos casos, la fuerza necesaria para que los actuadores lleven a cabo su función es mínima, dado que las presiones del aire que actúan sobre las válvulas son pequeñas y en ambos casos favorecen el movimiento de las mismas. La fuerza necesaria que ejercen los cilindros para vencer la fracción generada entre los diversos elementos es mínima



*Figura 3.16. Actuador Neumático de Pistón.*



*Figura 3.17. Actuador Neumático*



*Figura 3.18. Vista del actuador neumático instalado en el sistema.*

### **FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.**

El sistema funciona en forma cíclica para cada uno de los dos filtros de la siguiente manera. En un primer instante, los gases de escape provenientes del motor Diesel son obligados a pasar a través de uno de los filtros, de acuerdo a la posición de la válvula selectora ubicada a la salida de los mismos. Durante este período, este elemento realiza la filtración de las partículas, mientras el otro permanece en espera. Cuando la caída de presión debida a la acumulación de las partículas en el filtro alcanza los niveles máximos predeterminados, el sistema de control recibe una señal y envía la orden de desplazar la válvula selectora, con lo que el flujo de gases de escape es desviado hacia el otro filtro. La caída de presión máxima para evitar el ahogamiento de un motor como el utilizado está alrededor de 10 kPa (MacDonald, 1988).

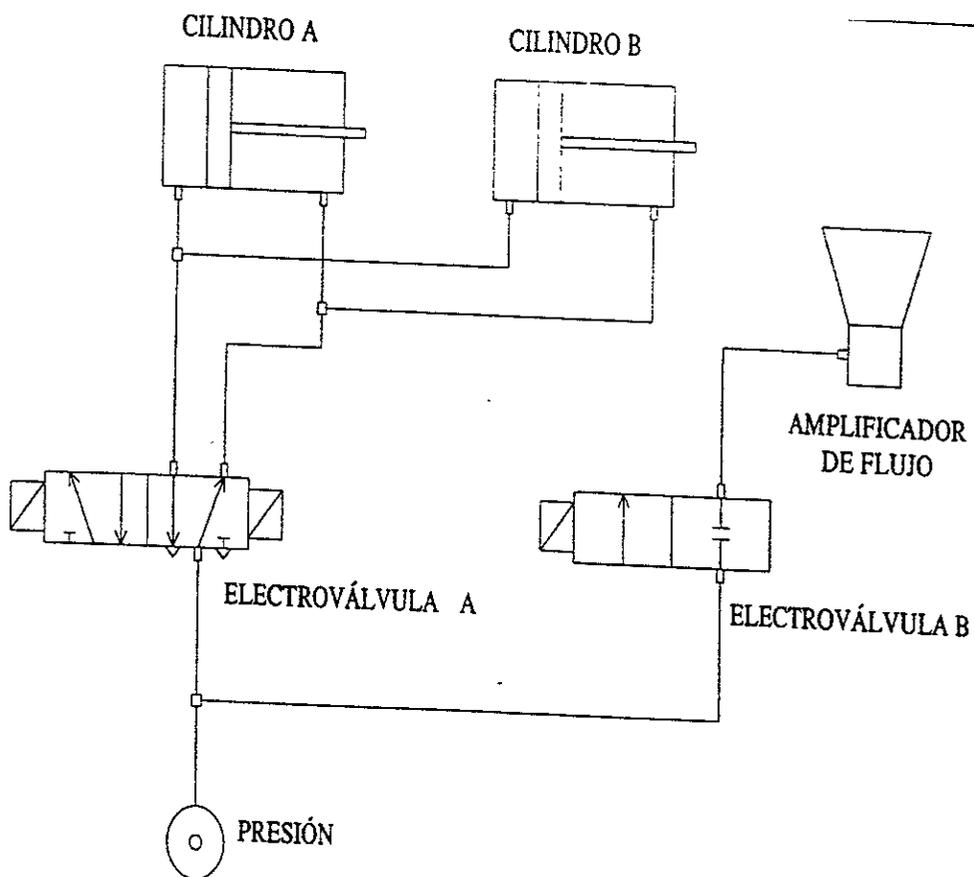
Al mismo tiempo, el cilindro neumático ubicado a la salida del DIT recibe una señal, desplazando la válvula y abriendo el ducto hacia el filtro cargado. Durante todo este tiempo, el DIT ha almacenado energía, y cuando la temperatura en el interior de éste alcanza su máximo valor, el sistema envía la señal al amplificador de flujo. El amplificador induce un flujo de aire a través del DIT ; el aire eleva su temperatura y entra al filtro cargado para iniciar el proceso de regeneración. El flujo de aire se induce durante un tiempo determinado necesario para completar la regeneración del filtro, posterior al cual el filtro queda en espera y listo para volver a filtrar las partículas de hollín.

Cuando la caída de presión en el filtro que se encuentra trabajando alcanza los valores máximos permisibles, la válvula selectora ubicada a la salida de los mismos regresa a su posición inicial, repitiéndose el proceso descrito anteriormente.

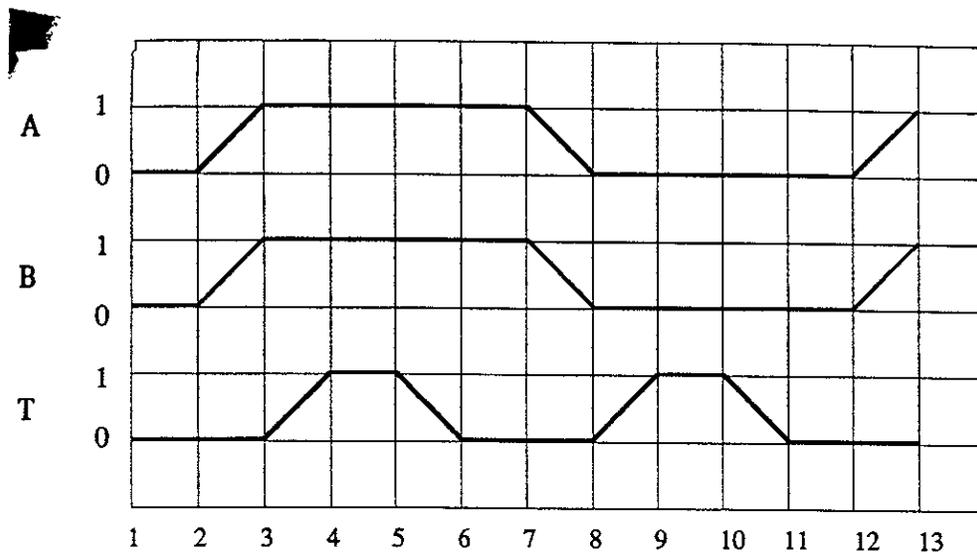
Tanto los actuadores neumáticos como el amplificador de flujo se encuentran controlados por dos electroválvulas, según fue mencionado, y deben funcionar de forma coordinada. Las figuras 3.19 y 3.20 muestran los diagramas de instalación y de fases de los elementos neumáticos del sistema.

El diagrama de instalación muestra todas las conexiones hechas entre los elementos neumáticos del sistema, es decir, desde la línea de presión proveniente del compresor, hasta las electroválvulas, los actuadores neumáticos y el amplificador de flujo. El diagrama de fases muestra, por otro lado, los períodos durante los cuales actúan cada uno de los tres elementos neumáticos controlados por las electroválvulas. Para el caso de los actuadores A y B, las

posiciones 1 y 0 del diagrama de fases representan cualquiera de las dos posiciones que puede adoptar cada uno de los cilindros. En el caso del amplificador de flujo T, la posición 0 indica la condición en la que permanece desactivado, es decir, cuando no existe flujo de aire a través de él ;por otro lado, la posición 1 representa la condición en la que se induce el flujo de aire de regeneración. El diagrama de fases no muestra, sin embargo, el tiempo real de permanencia de los elementos en cada una de sus posiciones. Un diagrama de tiempo, en este caso, sería básicamente el mismo diagrama de fases, pero mostrando tanto la permanencia de los elementos en sus posiciones, como la velocidad de aplicación de los actuadores ; sin embargo, la velocidad de actuación de los elementos en sus posiciones varía de un período a otro, dependiendo de las condiciones de operación del motor. Por esta razón, la realización de un diagrama de tiempos sería irrelevante y básicamente imposible de realizar.



*Figura 3.19. Diagrama neumático de instalación*



*Figura 3.20. Diagrama neumático de fases*

### EL HOLLÍN Y SU COMBUSTIÓN EN CONDICIONES ESPERADAS.

Las características las condiciones en las que ocurre el proceso de combustión definen los mecanismos que determinan la velocidad de reacción, en este caso, la oxidación de las partículas de hollín. La velocidad de reacción, en este caso, la oxidación de las partículas de hollín. La velocidad de reacción es una medida cuantitativa del número de moles de reactivo consumido por unidad de tiempo y por unidad de volumen, de manera que si se considera un volumen de estudio en particular, la velocidad de reacción no tiene más significado que el cambio en la concentración de los reactivos en el tiempo.

En general, la regeneración del filtro estará determinada por la ignición de las partículas de hollín, que para una misma concentración de oxígeno se puede identificar--en general--con un régimen cinéticamente controlado. Esto significa que las velocidades de reacción involucradas son pequeñas comparadas con la velocidad de difusión de calor y de especies reactivas, de manera que el tiempo en que ocurre el contacto de las especies reactivas y la difusión de temperatura es despreciable comparado con el tiempo que exige la combustión para llevarse a cabo. Esto se debe a que en un momento dado, si la corriente de aire de regeneración permite mantener las condiciones necesarias y suficientes (concentración de oxígeno y temperatura mínima) para que se lleve a cabo la combustión durante el tiempo de regeneración (lo cual sucede esencialmente en la superficie del material particulado), la limitante del proceso será la velocidad con que ocurra la reacción. Es cierto que a mayor temperatura y concentración de oxígeno en el aire de regeneración mayor será la constante de reacción, es decir menor el tiempo de regeneración, pero para las características determinadas del aire de regeneración, bajo las condiciones anteriormente especificadas, la velocidad de reacción estará determinada igualmente por la velocidad con la que los reactivos alcanzan las condiciones necesarias para reaccionar (el proceso más lento es el que determina la velocidad máxima).

En general, las condiciones que determinan un régimen controlado cinéticamente surgen cuando hay un buen grado de mezclado, un coeficiente de difusión igualmente alto, un espesor pequeño de la masa de gas reactivo, un factor preexponencial de colisión pequeño, una alta energía de activación y “baja” temperatura del gas involucrado.

La combustión del carbón no es una reacción simple (entiéndase por esto una reacción de un solo paso), presentándose un complejo mecanismo de oxidación a monóxido de carbono y luego una reoxidación de este en una reacción de equilibrio a  $\text{CO}_2$ . No obstante, para fines de la regeneración del filtro solamente el primer paso de la oxidación es el que determinará la regeneración y así, se puede considerar la combustión de las partículas como una reacción simple, es decir, considerar como reacción determinante la oxidación de las partículas a CO solamente.

El proceso de filtración mecánica y regeneración mediante el uso de filtros cerámicos, catalizados o no, presenta, entre otros, dos aspectos importantes. El primero se relaciona con las altas temperaturas que alcanza el material cerámico durante el proceso de regeneración, debidas al calor liberado por la combustión de las partículas de hollín. El material cerámico utilizado en los filtros presenta una temperatura crítica en  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ , en la que experimenta un cambio drástico en su superficie específica que puede ocasionar el resquebrajamiento del mismo.

El segundo aspecto se relaciona con la propagación de la combustión a lo largo de todo el filtro. Esta propagación se logra, por una parte, con la transferencia de calor del aire de regeneración proveniente del Dispositivo de Inercia Térmica (DIT) hacia las paredes del material cerámico y la capa de hollín atrapadas en el filtro; y por otro lado, con la ayuda del calor liberado durante la combustión de las primeras partículas. Una vez que la totalidad del hollín ha alcanzado la temperatura de ignición, el proceso de regeneración puede considerarse como autosostenible en tanto la concentración de oxígeno en el aire inyectado se mantenga por encima del 5 %, condición que no representa problemas si se considera que el aire de regeneración es aire atmosférico a presión. La situación de la propagación se resuelve en parte con el uso de filtros catalizados, que disminuyen la temperatura de ignición de  $T=700^\circ\text{C}$  a  $T=450^\circ\text{C}$ , con lo que las altas temperaturas de combustión se pueden alcanzar con mayor facilidad. Sin embargo, si la temperatura del aire de regeneración o la transferencia del calor liberado durante la combustión no son suficientes para iniciar la combustión de todo el hollín, la regeneración del filtro será únicamente parcial y a la larga, la caída de presión dentro del filtro rebasará los límites admisibles para el motor (10 kPa).

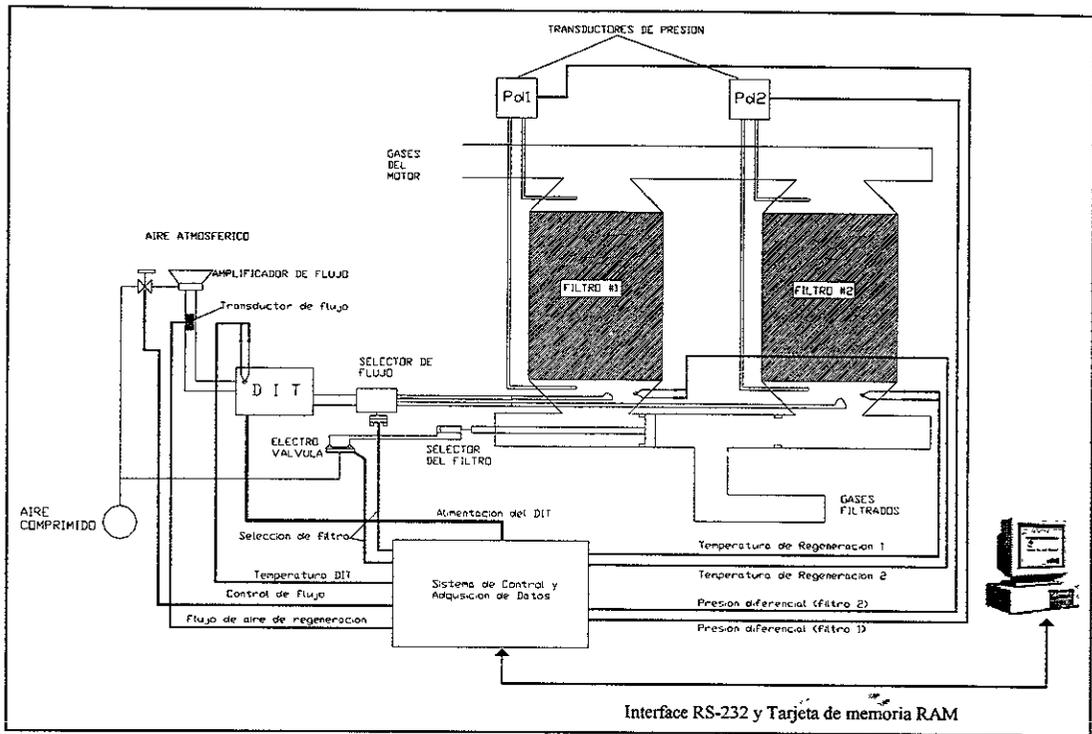
# CAPITULO IV

## MÉTODO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de una serie de pruebas hechas al sistema de filtrado de partículas Diesel para vehículos de servicio pesado. Como se planteó en anteriores capítulos, el sistema cuenta con dos filtros cerámicos catalizados conectados en paralelo de manera que es posible limpiar uno de ellos mientras el otro se encuentra en servicio. El proceso de regeneración se lleva a cabo mediante la inyección de un flujo de aire caliente en sentido inverso al proceso de filtrado, el aire se calienta mediante un dispositivo almacenador de energía térmica (Dispositivo de Inercia Térmica, DIT), que se calienta hasta la temperatura de regeneración mediante un banco de resistencias eléctricas..

### DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Los gases de escape provenientes del motor Diesel se hacen pasar a través de uno de los filtros, de acuerdo a la posición de la válvula selectora ubicada a la salida de los mismos (figura 3.1.). Cuando la caída de presión debida a la acumulación de partículas en el filtro alcanza los niveles máximos predeterminados (la caída de presión máxima para evitar la interrupción del motor de pruebas es de 10kPa, MacDonald, 1988), el sistema de control recibe una señal y envía la orden de desplazar la válvula selectora, con lo que el flujo de gases de escape se desvía hacia el filtro vacío. Al mismo tiempo, el cilindro neumático ubicado a la salida del DIT recibe una señal, desplazando la válvula selectora de flujo y abriendo el ducto hacia el filtro cargado. Durante este tiempo el DIT ha almacenado energía. Cuando la temperatura en su interior alcanza su valor máximo, el sistema acciona el amplificador de flujo, que induce aire atmosférico a través del DIT para calentarse hasta una temperatura superior a la necesaria para la regeneración (aprox. 450 °C) El aire se inyecta (en sentido inverso al de filtrado) por medio de una tobera a través del filtro cargado para incinerar las partículas atrapadas. Una vez que se ha terminado la regeneración, el filtro queda en espera listo para volver a operar. El sistema de filtrado se gobierna mediante un dispositivo de control y adquisición de datos (basado en el micro-controlador 80C552 de la marca PHILIPS) que tiene la capacidad de almacenar en una tarjeta de memoria la información respecto al comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de filtrado y regeneración. La tarjeta puede desmontarse para vaciar los datos en una PC.



**Figura 4.1. Diagrama del sistema de filtrado.**

### INSTRUMENTOS Y APARATOS UTILIZADOS

- Manómetros en U para medir la caída de presión
- 2 baterías de 12 V c/u para generar la corriente necesaria para el DIT
- Generador de Corriente eléctrica (80 Amperes)
- Interruptor de cuchillas para encender el conjunto motor-generator
- Banco de Pruebas para motores diesel
- Opacímetro
- Minitúnel de dilución de gases.
- Ventilador de 5 hp.
- Sistema de filtros catalíticos.
- Filtros Micropore Pallflex® para capturar partículas de muestra
- Motor diesel Mercedes Benz
- Termopar tipo k
- Dinamómetro
- Electroválvulas
- Actuadores Neumáticos
- Portafiltros
- Bomba de Vacío
- Ductos flexibles que actuaron como salidas para los gases de escape
- Conexiones de cobre para la salida hacia el minitúnel o hacia los portafiltros.
- Central de control de la carga al dinamómetro.
- Líquido refrigerante

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se puso en funcionamiento el generador de corriente eléctrica así como el ventilador.

Se suministró carga al motor por medio del dinamómetro el cual a su vez fue controlado por la central de carga. También se puso a funcionar la bomba de vacío para succionar los gases utilizados para la toma de muestras

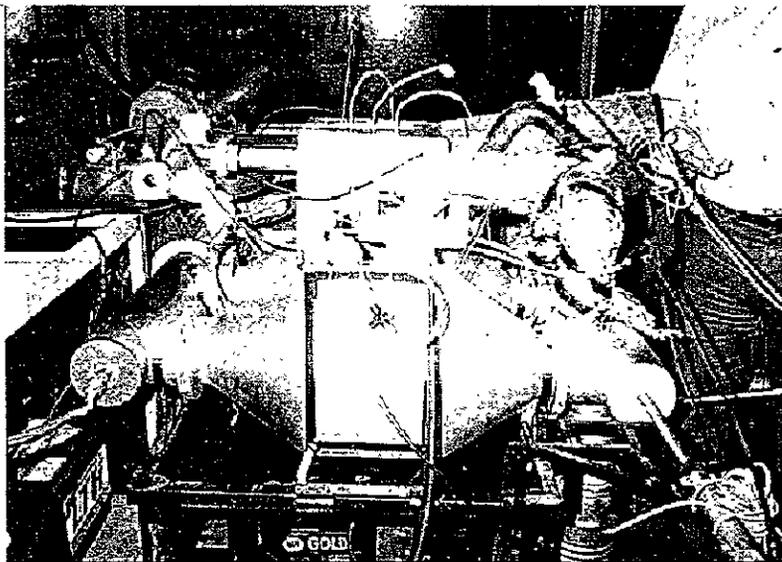
Primeramente se tomaron muestras de los gases de escape sin filtrar mandándolos directamente hacia el minitúnel de dilución de gases y después hacia los portafiltras en los cuales se tomaron muestras. Posteriormente el sistema cambió para dar paso a la toma de muestras filtradas cambiando una válvula de paso ubicada cerca del minitúnel la cual obstruye la dirección de flujo directo de los gases hacia el minitúnel y cambia su dirección hacia los filtros y después a los portafiltras en donde nuevamente se toman muestras.

En el lapso del experimento se toman medidas de la presión diferencial en los manómetros en U para monitorear el punto en el cual se llega a saturar el filtro y así comenzar la regeneración. Así también se tomaron mediciones de opacidad tanto para los gases sin filtrar como para los gases filtrados.

El proceso se realizó metódicamente ya que en la toma de muestras se tenían que intercambiar los filtros micropore Pallflex<sup>®</sup> usados por los filtros nuevos.

Previamente a las pruebas, los filtros micropore fueron llevados a pesaje en balanzas analíticas. Posteriormente a dichas pruebas, se volvieron a pesar para después sacar una relación que justificara la capacidad de filtrado.

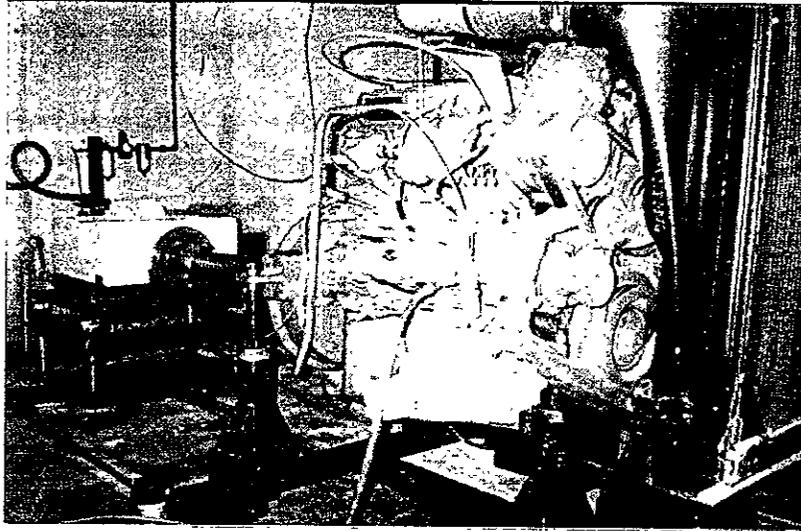
En la figura 4.2. se muestra el sistema autoregenerable ya montado en el banco de pruebas del Laboratorio de Emisiones de la Facultad de Ingeniería.



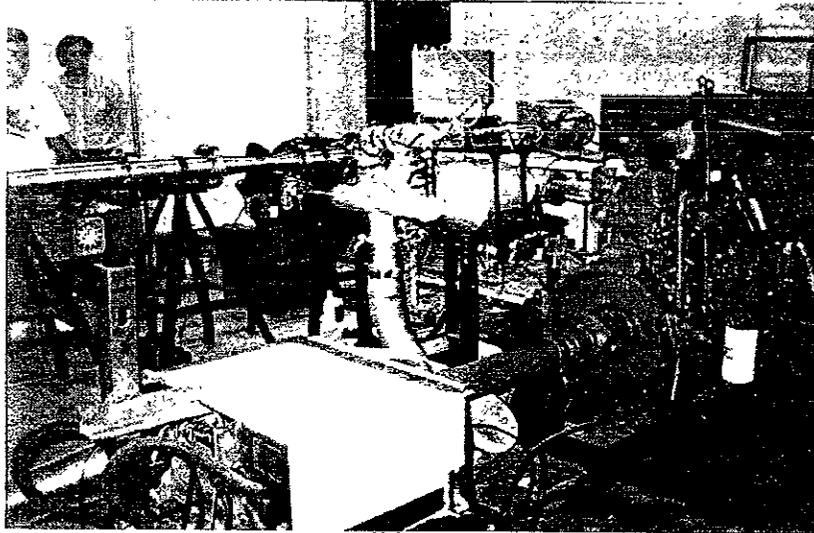
*Figura 4.2. Sistema Autoregenerable en el banco de prueba*

### Arreglo del experimento.

En la figura 4.3. se muestra el motor Diesel de banco utilizado para la prueba del sistema de filtros catalizados, en la figura 4.4 puede verse el arreglo completo de los filtros con el motor.

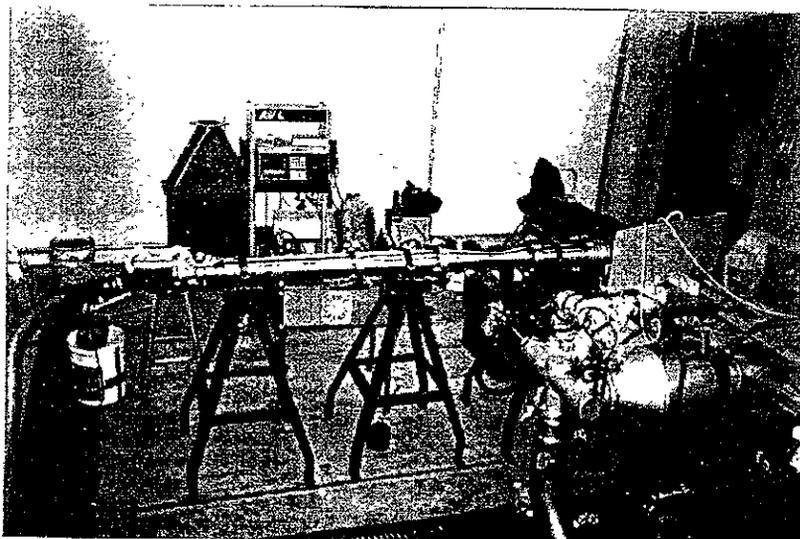


*Figura 4.3. Motor Mercedes Benz montado en banco de pruebas*

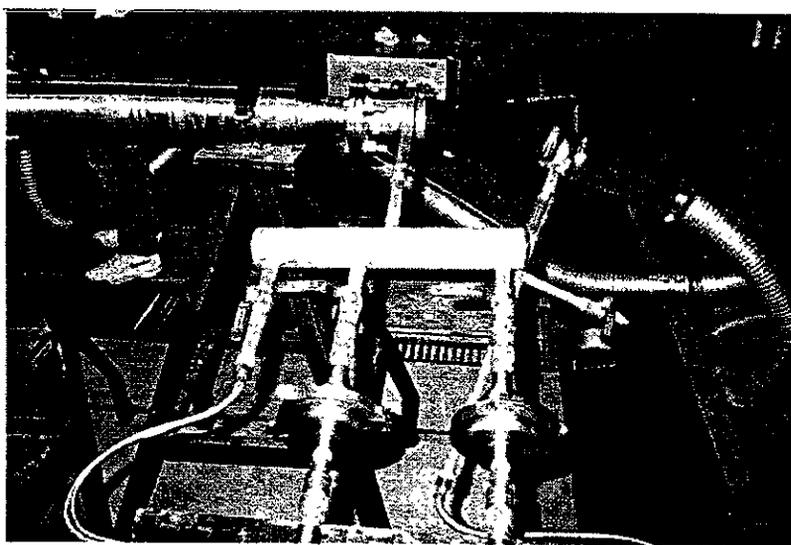


*Figura 4.4. Instalación completa del sistema de filtrado .*

Una vez funcionando el motor Diesel y alcanzando las condiciones estables de operación se procedió a realizar la filtración, al hacer pasar los gases del motor por uno de los filtros catalizados, lo que redujo notablemente la cantidad de emisiones particuladas, como punto de comparación se tomaron tanto muestras de gases filtrados como muestras de gases sin filtrar. Las muestras de gases se introdujeron en un extremo del Minitúnel de Dilución (el cual se aprecia en la figura 4.5.) en donde se mezclan con una alta proporción de aire limpio, los gases diluídos se succionan mediante una bomba de vacío que se encuentra en el otro extremo del túnel, de manera que se llevan a un ducto donde se capturan las partículas suspendidas mediante filtros de Micropore, insertos en los portafiltros primario y secundario, (véase figura 4.6.).

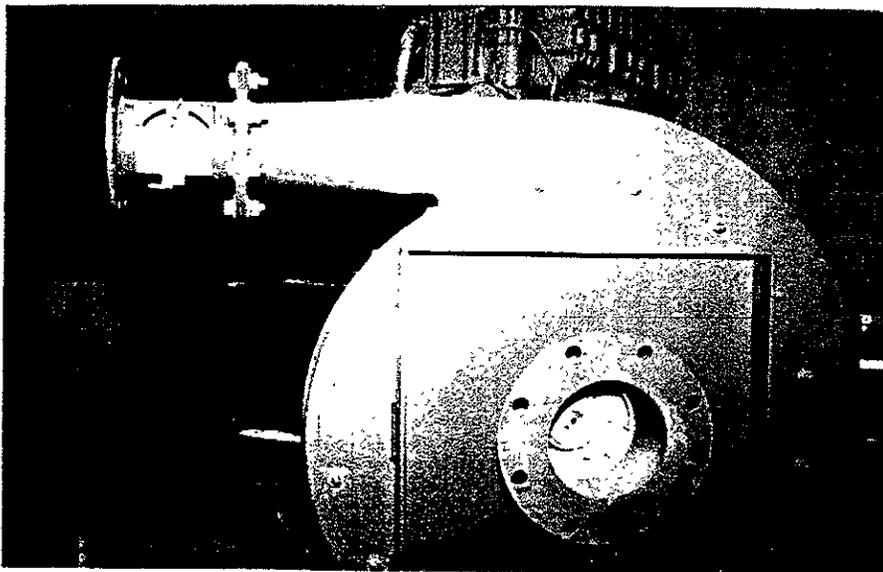


*Figura 4.5. Vista completa del Minitúnel de Dilución empleado en las pruebas.*



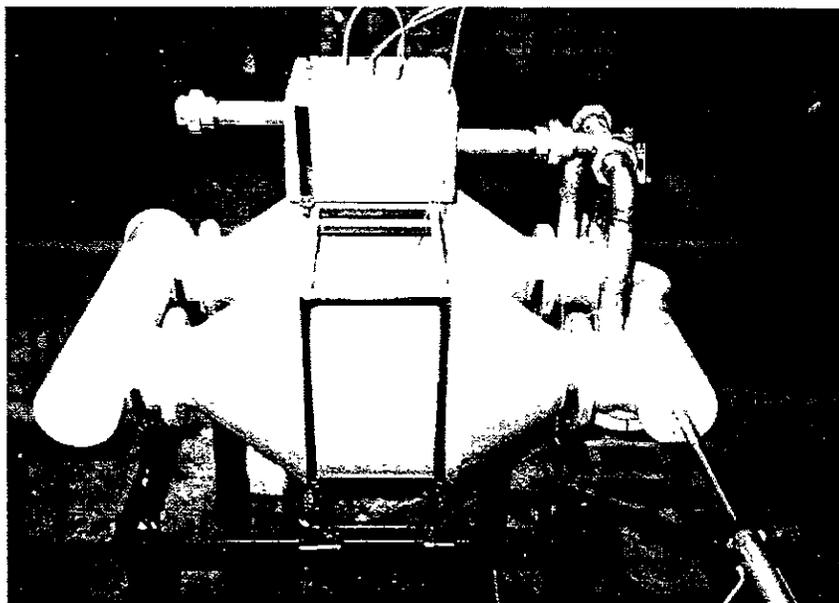
*Figura 4.6. Arreglo de portafiltros primario y secundario.*

Fue necesario utilizar un ventilador SIEMENS® de 3475 r.p.m. a 60 Htz. con un motor de 5 hp para poder impulsar los gases de escape hacia la toma de muestras. Una figura del ventilador es la siguiente:



*Figura 4.7. Ventilador SIEMENS de 3475 r.p.m*

En la siguiente figura mostramos el arreglo de los filtros antes de colocarlo en el banco de pruebas



*Figura 4.8. Sistema de filtros catalíticos*

En la siguiente figura se muestra la bomba de vacío la cual tuvo como función hacer que los gases de escape entraran a través de conductos unidos a los portafiltros y de esta manera tomar muestras de los gases filtrados y sin filtrar

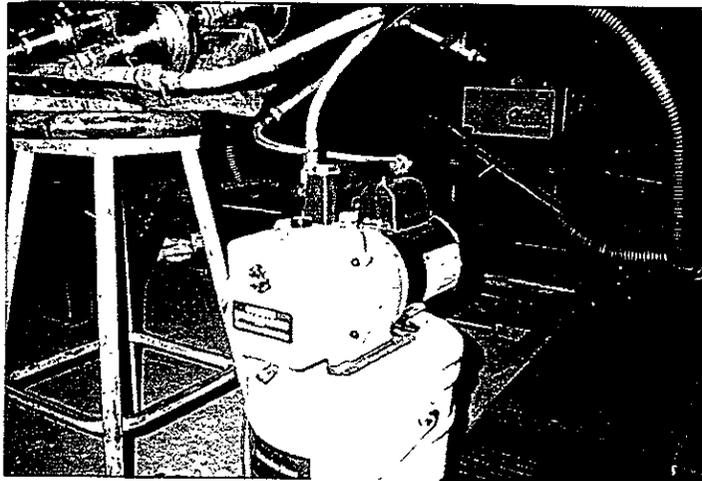


Figura 4.9. Foto de la bomba de vacío Robinair® con un motor de 1/3 hp.

## RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

### Comportamiento del DIT.

En el laboratorio se llevaron a cabo pruebas experimentales obteniendo los siguientes resultados :

En la figura 4.10. se muestra el comportamiento del DIT durante las fases de almacenamiento de energía, cuando no existe flujo de aire inducido a través del dispositivo.

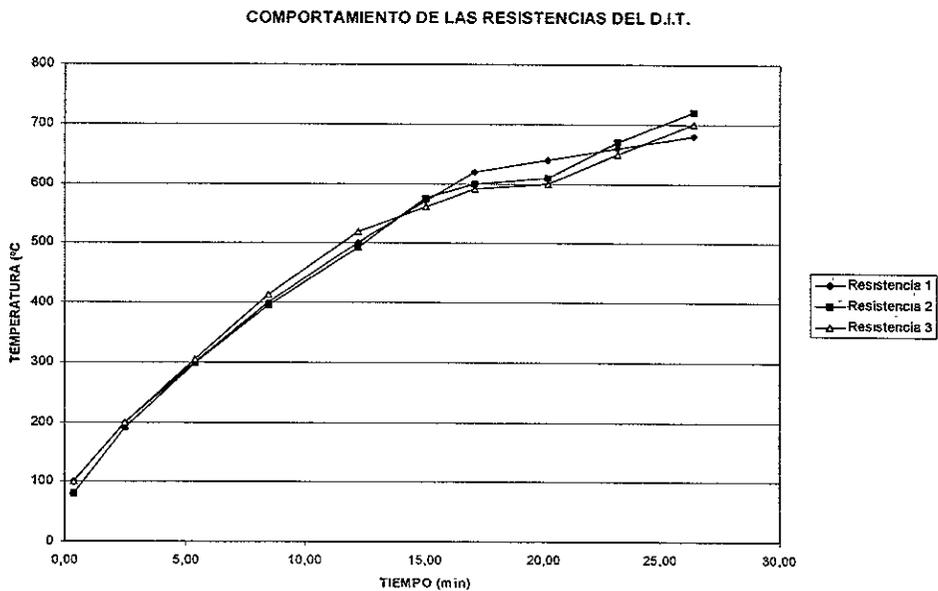
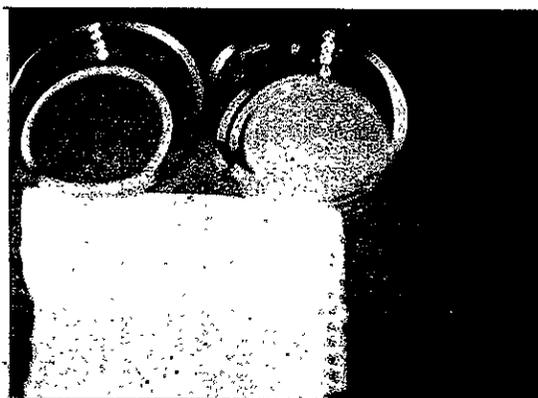


Figura 4.10. Comportamiento real del DIT.

En la figura 4.10. también se observa que se tiene una variación mínima de pendiente entre dichas rectas, por lo que el calentamiento de las resistencias puede considerarse lineal.

En la figura 4.11. se ven los filtros Micropore de 70 mm de diámetro, el del lado izquierdo muestra las partículas capturadas de los gases del motor al pasar directamente sobre el portafiltros, en cambio el otro muestra una disminución apreciable de partículas capturadas una vez que los gases son filtrados por el filtro catalizado. En la tabla 4.1 y figura 4.12. se muestra la comparación en peso de los filtros antes y después de realizar las pruebas, además la duración del muestreo fue de 40 minutos aproximadamente.



*Figura 4.11. Filtros Micropore*

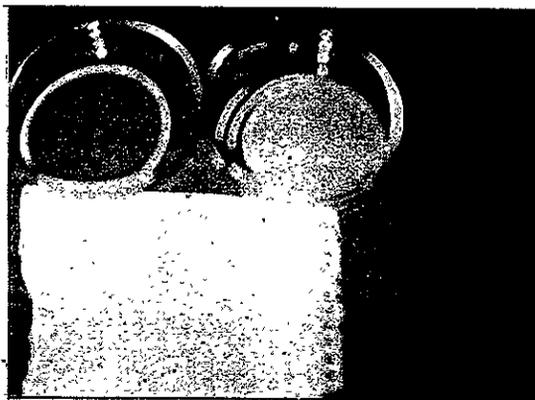
En lo que respecta a la gráfica de barras (fig. 4.12) se observa un comportamiento razonable en la relación de pesajes ya que los filtros en la prueba de filtrado muestran una pequeña variación en su peso debido a la poca acumulación de hollín en dichos filtros.

En lo que respecta a los filtros utilizados para las pruebas sin filtrar claramente se puede observar la diferencia que existe en los pesos antes y después de la prueba. Esto debido a la acumulación de partículas de hollín en cantidades mayores a la prueba de filtrado. Esto demuestra la capacidad óptima de filtración de las trampas catalíticas.

NÚMERO DE FILTRO	PESO DE FILTROS ANTES DE LA PRUEBA (gramos)	PESO DE FILTROS DESPUÉS DE LA PRUEBA (gramos)	TIPO DE PRUEBA	PESO DEL HOLLÍN (gramos)
1	0.1414	0.1415	1ª Prueba de filtrado (primario)	0.0001
2	0.1387	0.1388	1ª Prueba de filtrado (secundario)	0.0001
3	0.1439	0.1533	1ª Prueba sin filtrado (primario)	0.0094
4	0.1424	0.1510	1ª Prueba sin filtrado (secundario)	0.0086
5	0.1405	0.1406	2ª Prueba de filtrado (primario)	0.0001
6	0.14584	0.14589	2ª Prueba de filtrado (secundario)	0.00005
7	0.1456	0.1584	2ª Prueba sin filtrado (primario)	0.0128
8	0.1432	0.1571	2ª Prueba sin filtrado (secundario)	0.0139

*Tabla 4.1. Eficiencia de Filtrado de las pruebas en el filtro catalizado, tomando en cuenta el pesaje de los filtros Micropore antes y después.*

En la figura 4.11. se ven los filtros Micropore de 70 mm de diámetro, el del lado izquierdo muestra las partículas capturadas de los gases del motor al pasar directamente sobre el portafiltros, en cambio el otro muestra una disminución apreciable de partículas capturadas una vez que los gases son filtrados por el filtro catalizado. En la tabla 4.1 y figura 4.12. se muestra la comparación en peso de los filtros antes y después de realizar las pruebas, además la duración del muestreo fue de 40 minutos aproximadamente.



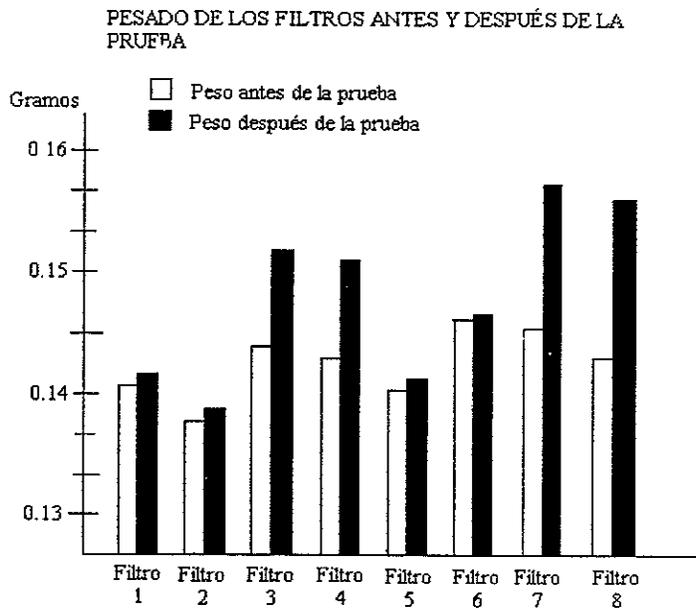
**Figura 4.11. Filtros Micropore**

En lo que respecta a la gráfica de barras (fig. 4.12) se observa un comportamiento razonable en la relación de pesajes ya que los filtros en la prueba de filtrado muestran una pequeña variación en su peso debido a la poca acumulación de hollín en dichos filtros.

En lo que respecta a los filtros utilizados para las pruebas sin filtrar claramente se puede observar la diferencia que existe en los pesos antes y después de la prueba. Esto debido a la acumulación de partículas de hollín en cantidades mayores a la prueba de filtrado. Esto demuestra la capacidad óptima de filtración de las trampas catalíticas.

NÚMERO DE FILTRO	PESO DE FILTROS ANTES DE LA PRUEBA (gramos)	PESO DE FILTROS DESPUÉS DE LA PRUEBA (gramos)	TIPO DE PRUEBA	PESO DEL HOLLÍN (gramos)
1	0.1414	0.1415	1ª Prueba de filtrado (primario)	0.0001
2	0.1387	0.1388	1ª Prueba de filtrado (secundario)	0.0001
3	0.1439	0.1533	1ª Prueba sin filtrado (primario)	0.0094
4	0.1424	0.1510	1ª Prueba sin filtrado (secundario)	0.0086
5	0.1405	0.1406	2ª Prueba de filtrado (primario)	0.0001
6	0.14584	0.14589	2ª Prueba de filtrado (secundario)	0.00005
7	0.1456	0.1584	2ª Prueba sin filtrado (primario)	0.0128
8	0.1432	0.1571	2ª Prueba sin filtrado (secundario)	0.0139

**Tabla 4.1. Eficiencia de Filtrado de las pruebas en el filtro catalizado, tomando en cuenta el pesaje de los filtros Micropore antes y después.**



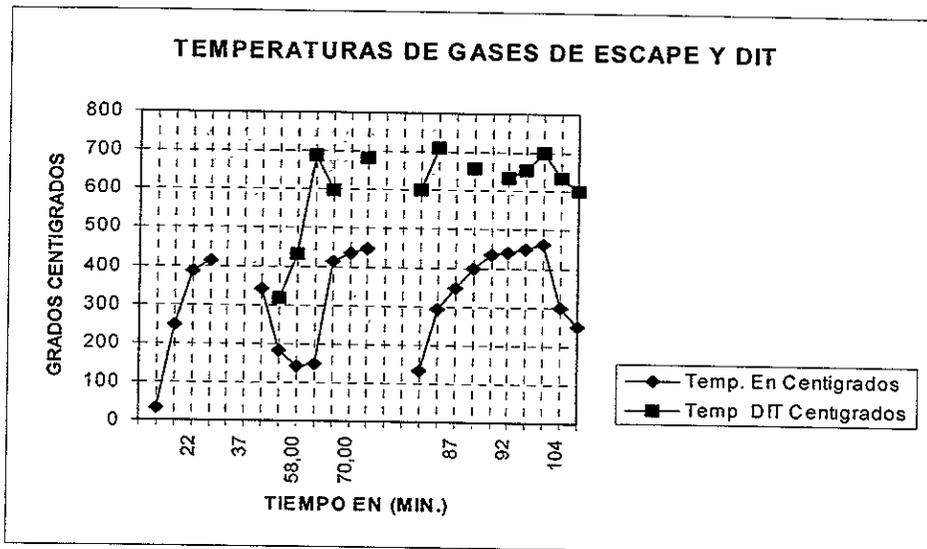
*Figura 4.12. Comparación de pesaje de filtros Micropore antes y después de las pruebas*

#### **Medición de las Temperaturas**

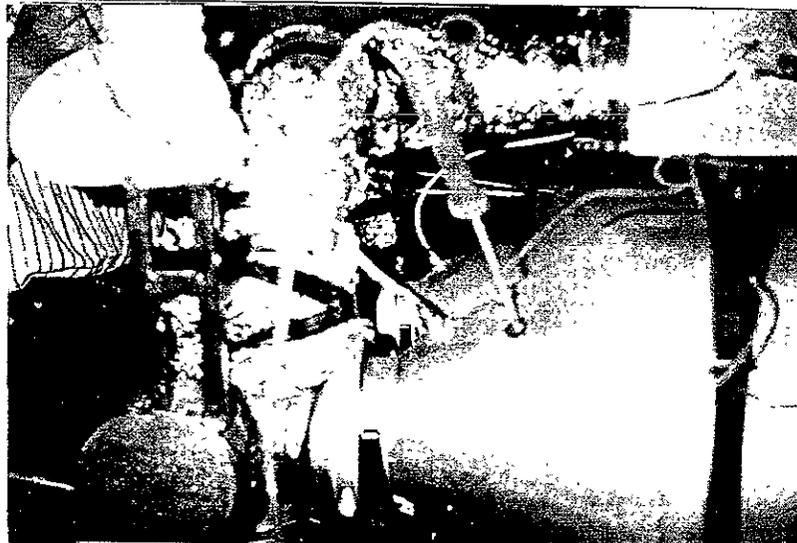
En la figura 4.13. se muestra la gráfica de la temperatura de los gases de escape a la salida del filtro catalizado y temperatura del DIT, con respecto de la duración de la prueba. En esta figura, se observa el comportamiento de dichas temperaturas. La temperatura de los gases de escape estuvo oscilando entre los 400 y 450 °C para evitar que se produjera una falsa regeneración, es decir, que dichos gases provocaran la regeneración sin que el calor del DIT interviniera en el proceso. Para lograr esto se cuidaron los parámetros de prueba bajando el motor a un estado de “ralenti”, evitando de esta manera que la temperatura de los gases sobrepasara los 500 °C.

En lo que respecta al DIT, la temperatura a la que se llegó fue de 700 °C en cada una de las resistencias con lo cual se pudo establecer un parámetro fidedigno para provocar a la postre la regeneración la oscilación de la temperatura en el DIT se debió a caídas del voltaje y por lo tanto a disminuciones en la corriente que alimentaba a las resistencias.

Para dichas pruebas se insertó en el encapsulado del filtro un termopar tipo K especial para obtener lecturas en los gases de escape, el cual se muestra en la figura 4.14.



*Figura 4.13. Gráfica de temperaturas de los gase de escape y en la salida del DIT.*



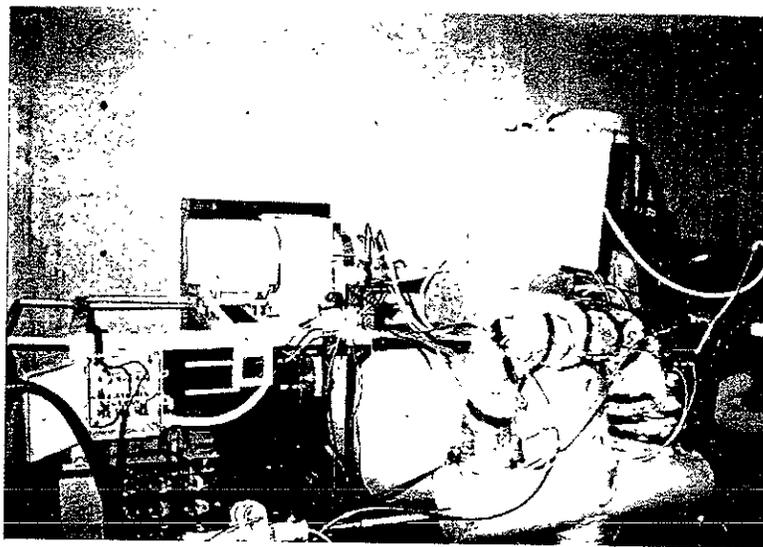
*Figura 4.14. Colocación del termopar tipo K dentro del encapsulado.*

#### **Medición de la caída de presión en el filtro catalizado**

La medición de esta variable fué realizada por medio de un manómetro diferencial de columna de agua (el cual puede verse en la figura 4.15.). Por medio de esta presión se puede inferir la cantidad de material particulado atrapado en el filtro catalizado, una vez que los gases de escape provenientes del motor Diesel son obligados a pasar por éste.

Durante el funcionamiento del sistema, los manómetros indicaron una presión diferencial máxima de 1.2 kPa (veáanse tabla 4.2 y figura 4.16) con lo que se trabajó al motor en el rango de operación permitido (la caída de presión máxima para evitar el ahogamiento del motor está alrededor de 10 kPa.). En figura 5.16 se puede observar el comportamiento de la presión diferencial en las dos etapas del proceso: la acumulación de hollín y posteriormente

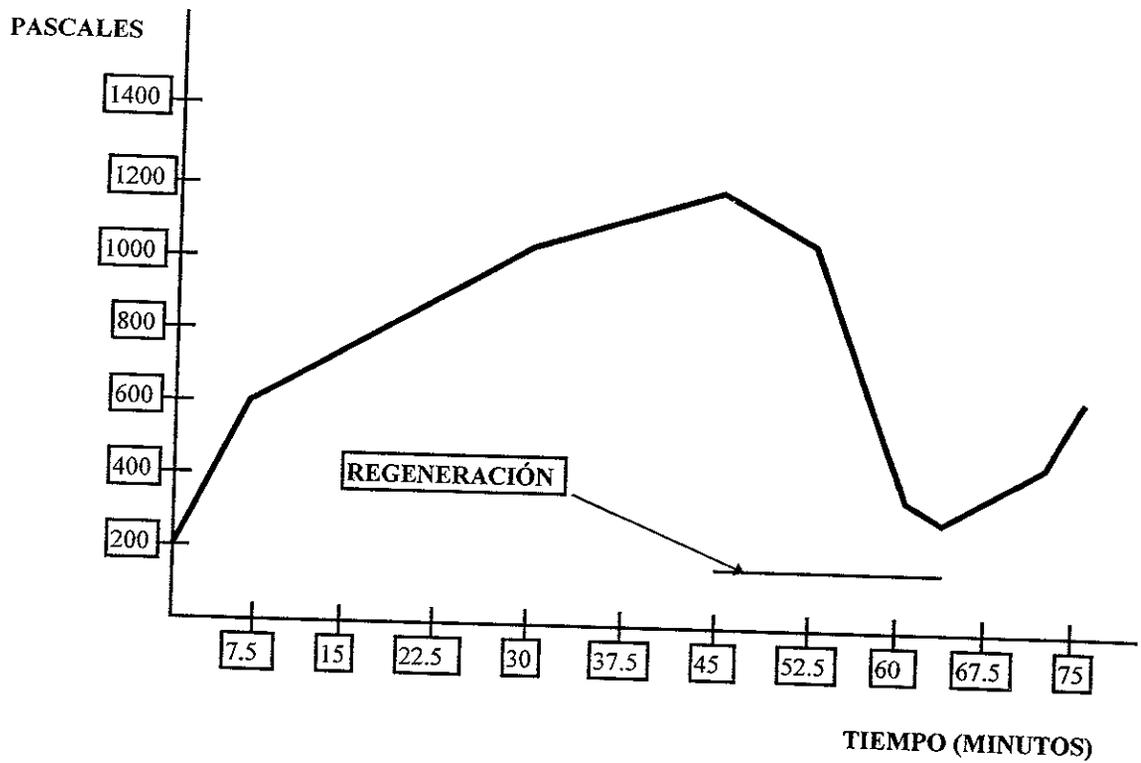
la incineración del mismo. El proceso de acumulación se da en un rango de 45 minutos aproximadamente, observándose un claro aumento en la caída de presión de 200 a 1200 Pa debido al taponamiento en el filtro. La presión máxima alcanzada fue de 1200 Pa. Posteriormente se suministró aire a presión a fin de comenzar la regeneración. Esta se dio en un lapso de 15 minutos, un resultado muy razonable para tener una eficiencia del 95 % en la regeneración.



*Figura 4.15. Arreglo de filtros con manómetro tipo U de columna de agua*

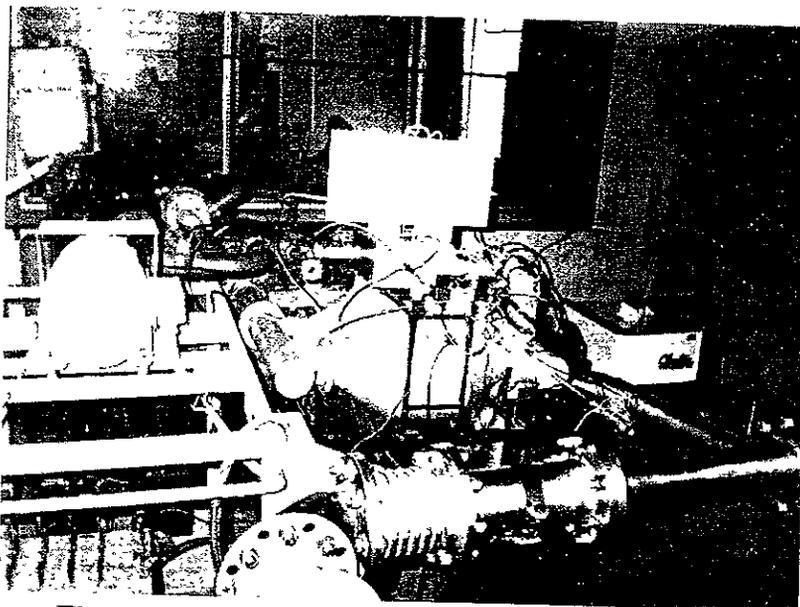
COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL EN EL FILTRO	
TIEMPO (minutos)	PRESION ( $\Delta P$ )
7.5	600
15	735
22.5	885
30	1030
37.5	1100
45	1200
52.5	1034
60	350
63.75	290
67.5	360
75	590

*Tabla 4.2. Relación de las caídas de presión con respecto al tiempo en los manómetros.*



*Figura 4.16. Gráfica de la Presión Diferencial en los extremos del filtro.*

Como punto final la siguiente figura muestra lo que fue el sistema montado en el banco de pruebas con todos los accesorios utilizados.



*Figura 4.17. Sistema completo en el banco de pruebas.*

# CAPITULO V

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados mostrados en el presente trabajo, se desprenden las siguientes conclusiones :

- La energía almacenada en el dispositivo de inercia térmica, que se transfiere al aire de regeneración, es suficiente para iniciar la combustión de las partículas en el interior del filtro.
- La regeneración del filtro se lleva a cabo de manera progresiva, por lo que se puede considerar un proceso de combustión controlado.
- El tiempo necesario para llevar a cabo la regeneración del filtro es mucho menor al tiempo requerido para saturar el filtro paralelo tomando en cuenta la carga del motor en "ralenti".
- Las temperaturas máximas del aire y del material cerámico se localizan en el extremo de entrada del aire de regeneración .
- Las temperaturas máximas del proceso se localizan en el aire y no en la pared del filtro.
- El esquema de regeneración inversa favorece la disipación del calor en el material cerámico
- La caída de presión en el filtro permaneció abajo del rango permitido (10 kPa), durante una prueba de 70 minutos aproximadamente, lo que indica la gran capacidad de almacenamiento de partículas en el filtro catalítico.
- La temperatura de los gases de escape a velocidades mayores en el motor, llegó a ser suficientemente alta como para producir la regeneración parcial del filtro catalizado (más de 450°C) controlándose adecuadamente. Lo anterior se deduce por la existencia de una caída de presión de 1.2 kPa a 290 Pa (ver tabla 4.2 y figura 4.12, Capítulo 4).
- Se requiere una localización cuidadosa del sistema de filtrado puesto que los gases de escape pueden alcanzar temperaturas que podrían destruir a los filtros cerámicos. Por otro lado es posible aprovechar el aumento de temperatura provocado por los gases para ayudar a iniciar la regeneración una vez que el DIT entra en funciones. Bajo este esquema de funcionamiento es importante iniciar la regeneración cuando se tiene la temperatura máxima del filtro catalizado.

## COMENTARIOS

Este trabajo representa el complemento de un proceso para determinar la funcionalidad del sistema expuesto y estimar el comportamiento del mismo en una prueba física realizada en un banco de pruebas . Las pruebas se realizaron de manera constante monitoreando todos los parámetros importantes que determinan el buen funcionamiento de los filtros así como la regeneración que se presenta en los mismos.

En dichas pruebas se utilizaron componentes mecánicos y electrónicos, aunque la parte electrónica está en una etapa de desarrollo en parte por la elaboración de la interfase entre el sistema y una computadora para que así todo quede perfectamente automatizado

Se usó aislamiento térmico en las tuberías a la salida del DIT para evitar pérdidas de calor y de esa manera conseguir las temperaturas deseadas.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece profundamente el apoyo de las siguientes instituciones, sin el cual no hubiera sido posible la realización de este trabajo :

-Dirección General de Asuntos del Personal Académico, Universidad Nacional Autónoma de México, DGAPA-UNAM, Proyecto IN107397.

-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT Proyecto . (Becas)

-Instituto de Ingeniería (Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y Fluidos) UNAM

-Laboratorio de Control de Emisiones-- de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

-Mercedes-Benz de México, S. A. de C. V.

-Degussa, A. G., Frankfurt, Germany

-Nelson Industries, Inc, USA

## REFERENCIAS.

- Barbella, R. *et al.* "Soot and Unburnt Liquid Hydrocarbon Emissions From Diesel Engines" en *Combustion Science and Technology*, vol 59. Londres: Gordon and Breach, 1987.
- Benítez B., Luis y Guadalupe Quiñones Silva "El cancer. ¿Un problema de salud en México?". Revista Médica del IMSS. México: IMSS, 1991.
- "Corning Particulate Filters, Ex-80 Composition" Corning Incorporated, 1997
- "3M Diesel Filter Cartridges" 3M Automotive Engineered Systems Division, 1995
- "Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure, and Health Effects. Cambridge, Mass.: Health Effects Institute, 1995. Identification and Risk Quantitation. Stockholm, Mayo-Junio, 1992.
- "Regeneración de Filtros Catalizados para Partículas Diesel" García Moreno R. and Gutiérrez Salinas R., UNAM, 1996.
- Gilot, P. *et al.* "Determination of Kinetic Data for Soot Oxidation. Modeling of Competition Between Oxygen Diffusion and Reaction During Thermogravimetric Analysis" in *Combustion and Flame*. Elsevier Science Publishing Co. Inc., 1993.
- Kabuto *et al.* "Associations Between Road Side Diesel Exhaust Pollutions and Female Lung Cancer Mortality in the Greater Tokio Area (GTA)" en la Fourth Annual Meeting of the International Society for Environmental Epidemiology (ISEE) and the International Society Of exposure Analysis, Cuernavaca Morelos, México.
- Khair, M.K. "Progress in Diesel Engine Emissions Control". ASME Paper 92-ICE-14.
- Lipkea, W. H. y Johnson, J. H. "The Physical Character of Diesel Particulate Emissions- Measurement Techniques and Fundamental Considerations". SAE Paper 780108.
- McDonald, J.S., and Simon, G.M., (1988) "Development of a Particulate Trap System for a Heavy Duty Diesel Engine", SAE Paper 880006.
- Naus, K. and HEIDG. "Critical Issues in Assessing the Carcinogenicity of Diesel Exhaust: A Synthesis of Current Knowledge" en "*Diesel Exhaust: A Critical Analysis Of Emissions, Exposure, and Health Effects*". Cambridge, Mass.: Health Effects Institute, 1995.
- Noiro, R. *et al.* "Control of Soot Emission by Filtration and Post-Combustion. A Laboratory Study of Regeneration of an Organic Particulate Trap Assisted by Hydrocarbon Injection", en *Combustion Science and Technology*, vol. 85. Londres: Gordon and Breach, 1992.
- Oçizik, M. N. *Heat Conduction*. New York: Wiley and Sons, 1993.
- Romero, A. F. *et al.* "Soot Combustion During Regeneration of Filter Ceramic Traps for Diesel Engines". SAE Paper 960127.
- Smith A., Tidmarsh D. and Latke B. *et al.* "The Efficiency of an Oxidation Catalyst Fitted to a Modern High Speed Diesel Engine Running Under Steady State Conditions". SAE Paper 980192.