



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

"DISEÑO DE FILTROS MECANICOS CATALIZADOS PARA PARTICULAS EN DIESEL"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

JESUS TEUTLE GARCIA

ASESOR: ING. JOSE LUIS BUENROSTRO RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO

2002

TESIS CON FALSA DE ORIGEN



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.



ESTADO NACIONAL  
AZÚCAR  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Diseño de Filtros Mecánicos Catalizados  
para Partículas anbiesel"

que presenta el pasante: Jesús Tautla García  
con número de cuenta: 8808493-7 para obtener el título de :  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de Noviembre de 2001

PRESIDENTE

Ing. José Luis Buenrostro Rodríguez

VOCAL

Ing. Jorge de la Cruz Bravo

SECRETARIO

Ing. Jesús García Lira

PRIMER SUPLENTE

Ing. José Luz Hernández Castillo

SEGUNDO SUPLENTE

Ing. Nicolás Rodolfo Balderas Reyes

---

# RECONOCIMIENTOS

Agradezco profundamente el apoyo a las siguientes instituciones, sin el cual no hubiera sido posible este proyecto:

- Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)
- Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA)
- Mercedes-Benz México S.A. de C.V.
- Degussa, A.G. Frankfurt.
- Dirección General de Asuntos del Personal Académico, de la Universidad (DGAPA-UNAM).

Especialmente al Dr. Alejandro F. Romero López. Director del Proyecto de Investigación de " Los Filtros Catalizadores ".

---

---

**Agradezco...**

**Al ser supremo que me ha permitido ser lo que soy...**

**A mi esposa por su apoyo, comprensión y el tiempo que me ha dedicado...**

**A mi hijo (†) por su recuerdo que me ha impulsado a ser mejor día con día...**

**A mis padres y hermanos...**

**SIMPLEMENTE MIL GRACIAS**

**SIN USTEDES NO HABRÍA LOGRADO**

**ESTE ÉXITO QUE NOS TRAZAMOS JUNTOS**

**EL TERMINO DE MI CARRERA PROFESIONAL**

**SERÁ EL PRINCIPIO DE UNA VIDA MEJOR.**

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
<b>I. ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
I.1 PARTÍCULAS DIESEL CONTAMINANTES PELIGROSAS	1
<b>II. INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
II.1 POTENCIAL CANCERÍGENO	10
II.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS DIESEL	12
II.3 OTROS COMPONENTES	16
II.4 NIVEL DE EMISIÓN	17
II.5 EXPERIMENTOS PROPIOS	18
<b>III. GENERACIÓN DE PARTÍCULAS</b>	<b>20</b>
III.1 TEORÍA DE FORMACIÓN DEL HOLLÍN	21
III.2 CAUSAS DE FORMACIÓN	24
III.3 HIDROCARBUROS SIN QUEMAR	26
III.4 FORMACIÓN DE OTROS COMPONENTES	29
III.5 CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE	31
III.6 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE AFECTAN LA EMISIÓN DE PARTÍCULAS	33
<b>IV. SOLUCIONES PROPUESTAS</b>	<b>36</b>
IV.1 ACTUACIONES PARA REDUCIR PARTÍCULAS PROCEDENTES DEL COMBUSTIBLE	37
IV.2 ACTUACIONES PARA REDUCIR PARTÍCULAS DEL ACEITE DE LUBRICACIÓN	42
IV.3 POSTRATAMIENTO DE GASES DE ESCAPE	43
IV.4 CATALIZADORES	44
IV.5 TRAMPAS DE PARTÍCULAS	47
<b>V. POSTRATAMIENTOS DE GASES</b>	<b>51</b>
V.1 FILTRO CATALIZADOR	51
V.2 TIPOS DE FILTROS UTILIZADOS EN TRAMPAS	53
V.3 FILTRO MONOLÍTICO DE CERÁMICA	55
V.4 EXPECTATIVAS	60

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
<b>VI. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>63</b>
VI.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA	63
VI.2 FILTRO CERÁMICO CATALIZADOR	64
VI.3 DISPOSITIVO DE INERCIA TÉRMICA	65
VI.4 VÁLVULAS SELECTORAS	66
VI.5 ACTUADORES NEUMÁTICOS	66
VI.6 AMPLIFICADOR DE FLUJO	68
VI.7 ELECTROVÁLVULAS	68
VI.8 CIRCUITERÍA Y TUBERÍAS	69
<b>VII. DISEÑO DE UN PROTOTIPO</b>	<b>72</b>
VII.1 PROTOTIPO	73
VII.2 ELEMENTO FILTRANTE	74
VII.3 D. I. T.	76
VII.4 REGENERACIÓN DE FILTROS	79
VII.5 REGENERACIÓN INVERSA	81
<b>VIII. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE PARTÍCULAS</b>	<b>85</b>
VIII.1 TÚNELES DE DILUCIÓN	85
VIII.2 MINITÚNEL DE DILUCIÓN	88
VIII.3 CARACTERÍSTICAS DE PARTÍCULAS	89
VIII.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS PARTÍCULAS	90
VIII.5 DISEÑO DE UN MINITÚNEL	91
VIII.6 ELEMENTOS CONSECUTIVOS DEL MINITÚNEL	94
VIII.7 CONSIDERACIONES TEÓRICAS	94
<b>IX. ENSAYOS EXPERIMENTALES</b>	<b>97</b>
IX.1 INSTALACIÓN DEL SISTEMA	98
IX.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	101
IX.3 PRUEBAS PRELIMINARES AL D. I. T.	102
IX.4 TOBERA DE INYECCIÓN	103
IX.5 SISTEMA DE MEDICIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES	105
IX.6 REALIZACIÓN DE MEDICIONES	105
IX.7 PRUEBAS EN MINITÚNEL	106
IX.8 COMBUSTIBLE DIESEL Y ANÁLISIS DE LABORATORIO	116
<b>X. CONCLUSIONES</b>	<b>120</b>
<b>COMENTARIOS</b>	<b>126</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>130</b>

---

# **CAPÍTULO I**

## **ANTECEDENTES**

---

# ANTECEDENTES

## **I.1 PARTÍCULAS DIESEL CONTAMINANTES PELIGROSAS.**

El cáncer ha sido identificado como un problema de salud mundial; sin embargo, todavía no está muy claro hasta qué punto es un problema de salud en México. En el presente trabajo se abordará esta interrogante; para ello, inicialmente se mostrará una visión panorámica del impacto y las tendencias de la enfermedad que tiene sobre el ser humano.

La epidemiología del cáncer tiene una historia que se remonta a casi 200 años, desde las observaciones en hombres jóvenes limpiadores de chimeneas en Londres que presentaban cáncer con mayor frecuencia, esto permitió descubrir que los productos de combustión del carbón podrían causar cáncer en cualquier parte de la piel con las cuales tuviera contacto, pudiéndose así desarrollar la tan fructífera investigación de la carcinogénesis química.

Así se encontró que los limpiadores de chimenea tenían cáncer del escroto a consecuencia del efecto directo de la acción de los productos cíclicos aromáticos del hollín. Con estas investigaciones se supo, desde principios de siglo, que el cáncer no es causado por un solo agente, sino que puede ser producido por una multitud de ellos.

De lo antes dicho resulta que el cáncer tiene por lo menos dos grupos de agentes causales muy claros, uno de ellos sería la susceptibilidad genética y el otro, el efecto de los agentes ambientales. De cualquier manera, éstos agentes tendrían que interactuar en un momento dado y deberán ser tomados en cuenta para los estudios epidemiológicos del padecimiento.

Cabe mencionar que la epidemiología es aquella disciplina encargada de investigar los factores relacionados de la enfermedad en grupos de personas. Comprende el estudio de las poblaciones, tanto de enfermos como de los sanos y de sus interrelaciones en conjunto ambiental.

El primer método para buscar asociaciones epidemiológicas del cáncer en diferentes poblaciones fue después de la primera Guerra Mundial, solamente en los últimos 25 años ha habido un esfuerzo coordinado para coleccionar estadísticas de muy diferentes regiones del mundo y de poblaciones diversas que representan una gran variedad de ambientes y de estilos de vida.

De todo esto es posible contar con un panorama de cómo varía de país a país y de grupo social a grupo social. Actualmente existen varias decenas de registros especializados sobre el cáncer en diferentes partes del mundo, por ejemplo, existe el cáncer de pulmón, cáncer de mama, cáncer del esófago, cáncer de la próstata entre otros.

El cáncer del hígado es muy frecuente entre los hombres de Mozambique y muy raro en Europa y Estados Unidos, mientras que lo opuesto ocurre para el cáncer del pulmón.

La información presentada, considerada globalmente, permitió que el comité de la Organización Mundial de la Salud, concluyera que el cáncer humano es debido principalmente a factores extrínsecos y por tanto puede ser prevenido. Se afirma que el 80 y 90% de los cánceres se deben en gran parte a los productos de la actividad industrial, como los relacionados con la combustión de productos energéticos fósiles, de desechos radioactivos y otros más.

Desgraciadamente en México las estadísticas han sido esporádicas y mal definidas, de tal suerte que hasta el momento no es posible tener un argumento claro, basado en cifras reales, acerca de la mortalidad por este padecimiento.

Se ha comprobado que el cáncer es un problema de salud en todo el mundo, lo que reclama de una investigación multidisciplinaria en todas las áreas. Para decidir con precisión, se requieren de estudios epidemiológicos y estadísticos, amplios y completos para lo que deberían destinarse los presupuestos adecuados, es por eso que mediante investigaciones externas se ha comprobado lo siguiente:

En México, como en los demás países en vía de desarrollo, el principal depredador y enemigo de la naturaleza es su propia especie humana, resultado de la falta de educación y de conciencia acerca del valor de los recursos naturales. Sin embargo, el deterioro ambiental no puede atribuirse solamente al individuo sino que también, como en todas partes, obedece asimismo a la organización social, económica e institucional en el que se desenvuelven los grandes centros urbanos, que tienen como consecuencia grandes focos de contaminación resultado de la actividad industrial, comercial, del transporte vehicular y de las deficiencias de la política ambiental.

La situación en México se puede decir que ha sido constante el deterioro ambiental y en algunos aspectos alarmantes, no con esto se trata de menospreciar o desacreditar lo que el gobierno y la sociedad han hecho en más de veinte años para proteger y mejorar el medio ambiente, pero ha sido insuficiente. Pero el rezago aumenta de manera constante, es por eso que el más reciente documento oficial relativo al Programa de Medio Ambiente (SEMARNAP 96) intenta enmarcar la política ambiental en México en el período 1995-2000 hacia el objetivo de desarrollar tecnologías limpias o más limpias (que debería decirse "menos sucias ") (1).

Sin embargo no presenta un diagnóstico del deterioro ambiental de México en forma fácil y comprensible para el público, es por eso que trataremos un tema en particular que es el contacto entre el hombre con las partículas Diesel<sup>1</sup> y su consecuencia que éstas ocasionan.

Las partículas están en el medio ambiente, después de los procesos de mezcla y dilución, no sólo afectan al cuerpo humano mediante una multitud de vías, sino que también alcanza a los animales y plantas que constituyen su alimento.

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

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

---

<sup>1</sup> En respetuoso homenaje al Dr. Rudolph Christian Karl Diesel, todas las referencias al motor y al combustible se escriben con mayúsculas y con ortografía original.

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

Las emisiones de los motores Diesel han sido desde los últimos quince años, objeto de un considerable número de estudios sobre animales y en menor medida sobre hombres a fin de conocer su grado de peligrosidad. Por que según un estudio realizado con extractos de partículas Diesel expuestas sobre bacterias o células de mamíferos, revelan una actividad genética mutante con un efecto cancerígeno sobre la piel de los ratones (19).

Los estudios directos sobre el hombre son difíciles de interpretar debido a que existen muchas otras causas potenciales de cáncer como las producidas por el alcohol, tabaco, comida o radiaciones de tratamientos médicos.

Aceptando que las pruebas cancerígenas no son determinantes sobre los hombres pero si suficiente para los animales, con lo que las estadísticas clasifican las emisiones Diesel en un grupo de los cancerígenos más potenciales.

Hay claras evidencias en la literatura epidemiológica que indican que, las partículas agravan las enfermedades relacionadas con bronquitis, asma, padecimientos cardiovasculares y enfisema pulmonar.

El metabolismo y mecanismo de eliminación del cuerpo humano juega un papel muy importante en este tema ya que las fracciones de las partículas son compuestos metálicos que son fácilmente desalojados del cuerpo.

Estudios realizados sobre la retención y expulsión del manganeso, utilizado en aditivos para el combustible, señalan que, pequeñas partículas pueden ser depositadas en la sangre y disueltas ahí mismo. Las partículas grandes pueden ser limpiadas por la acción de la mucosa del sistema respiratorio y ser tragadas, teniendo como consecuencias problemas gastrointestinales.

Por su puesto hay mucha controversia en el tema y sobre todo, los fabricantes de Motores Diesel se niegan a aceptar el peligro cancerígeno de las partículas, también es cierto que los recursos reales y financieros para llevar a cabo una política ambiental eficaz no son suficientes.

Se parte de una situación en la que ya sé a hecho e intentado en años pasados, pero siendo rebasada por el ritmo del deterioro ambiental. Los programas y proyectos que se adopten no generarán resultados inmediatos, sino a diversos plazos. No obstante, la conciencia que ya sea ha creado en México de los daños ambientales y de sus efectos en la salud es factor que debería ser favorable a la puesta en marcha de nuevos y grandes avances. Es por eso que en la U.N.A.M., por parte del Instituto de Ingeniería pretende atacar este problema mediante un estudio de la generación y control de las partículas emitidas por dicho motor.

---

# **CAPÍTULO II**

## **INTRODUCCIÓN**

# INTRODUCCIÓN

A pesar de que el primer prototipo de motor a Diesel producido y patentado por el Dr. Rudolph Diesel en 1892, en realidad fue pensado para quemar pólvora, en un experimento que por poco le cuesta la vida al inventor, su operación mecánica no ha sufrido grandes transformaciones y el principio de trabajo sigue siendo esencialmente el mismo. Posteriormente a los primeros experimentos, el cambio a combustible líquido, que se atomiza por medio de inyectores a muy alta presión, logró que gradualmente se fueran encontrando usos cada vez más cotidianos de este tipo de motor, que entre otras ventajas, resulta ser más eficiente que el ciclo Otto (en honor a su inventor August von Otto) o de gasolina.

El motor Diesel, además es más robusto, se usa para vehículos de servicio pesado, entendiéndose bajo esta clasificación a aquellos medios para transporte urbano, foráneo de pasajeros (autobuses) o de carga de diversos bienes (camiones de carga). En igualdad de condiciones y al compararse con el motor Otto (sin convertidor catalítico), tiene las ventajas siguientes:

- Consumo menor de energía por trabajo producido.
- Emisión menor de contaminantes regulados (HC, NO<sub>x</sub>, CO).
- Mayor durabilidad (del orden de 500,000 Km, vs 150,000 del motor Otto).

En contra posición también tiene algunas desventajas:

- Emite partículas sólidas de carácter cancerígeno (PM<sub>10</sub>, por la denominación de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EUA.).
- Es muy ruidoso.
- Algunos hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA), producen un olor desagradable al olfato humano y cuando el combustible contiene azufre, peor aún por la producción de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) o sulfatos.
- En combustión incompleta produce humo negro o blanco (en frío), que ocasiona contaminación visual.

Las desventajas lo han hecho impopular entre grupos sociales y ecologistas, tendiendo a restarle importancia a sus ventajas, que económicamente son superiores, lo que lo ha hecho muy atractivo para su uso en transporte de carga y pasajeros urbanos y foráneos.

La importancia fundamental del motor a Diesel es que debe ser ineludible el compromiso de lograr una combustión óptima que permita ahorrar energía, más aún si se considera que con este tipo de combustible se mueve aproximadamente el 90% de la carga que se maneja en el país y casi el 80% de todo el transporte urbano de personas.

Puesto que algunos organismos especializados en daños al medio ambiente de carácter internacional, tales como " Environmental Protection Agency " (EPA, por sus

siglas en inglés), o Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, han determinado que la exposición humana a los gases de escape de motores a Diesel, representa un riesgo cancerígeno, se han emitido leyes muy estrictas para restringir la emisión de partículas (humo negro u hollín) al medio ambiente.

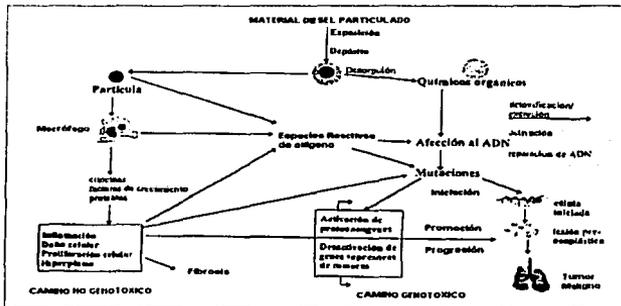
## II.1 POTENCIAL CANCERÍGENO.

Se hace una revisión breve de publicaciones recientes, sobre los efectos cancerígenos de partículas sólidas (formadas esencialmente de carbono combinado con hidrocarburos policíclicos aromáticos y otros compuestos), que se emiten a la atmósfera.

La generación de partículas y los procesos de oxidación que se lleva a cabo en la cámara de combustión, permanecen como fenómenos que desafían su descripción formal. Existen muy pocos resultados experimentales en la literatura. Entre otros factores, la microestructura de la flama juega un papel físico muy importante en la generación de partículas, una inspección cuidadosa y detallada de desarrollo casi instantáneo de la flama dentro de la cámara de combustión Diesel, sólo puede lograrse con arreglos experimentales sumamente costosos, en los que se utilicen cámaras fotográficas de alta velocidad (> 150 000 exposiciones por segundo).

La preocupación con respecto al potencial cancerígeno de los gases de escape de motor Diesel, no es nueva, ya que existen referencias que datan desde 1955. Abundan estudios médicos y epidemiológicos, sin embargo, aún no se ha podido establecer con precisión numérica, una correlación que establezca el riesgo de personas sujetas a emisiones de gases de escape en motores a Diesel y la ocurrencia de cáncer pulmonar.

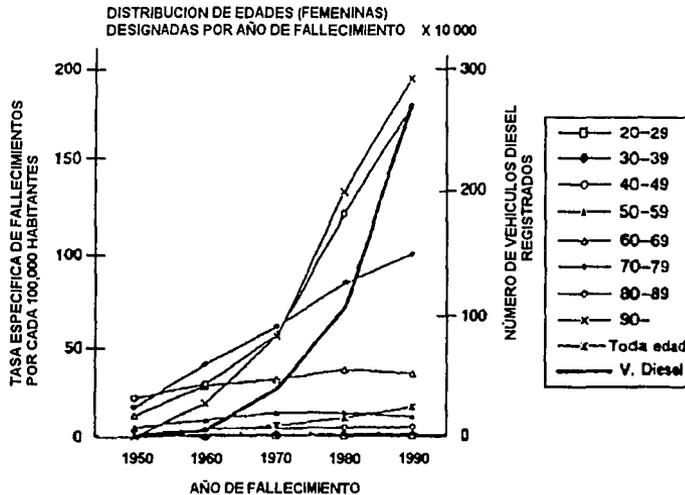
En el trabajo de Naussear (21), establece claramente que estudios de inhalación en animales muestran una asociación directa entre la exposición a partículas Diesel y cáncer pulmonar u otros tipos de cáncer (figura II.1). Esta afirmación se basa en dos publicaciones del Instituto Nacional de Seguridad y Riesgos de Trabajo (National Institute on Occupational Safety and Hazards, NIOSH) de 1987 y 1989, después de revisar varios estudios epidemiológicos humanos, el NIOSH concluye que los estudios sugieren una asociación entre la exposición a emisiones de motores Diesel y cáncer pulmonar, recomendando que "los gases de escape de motores Diesel se consideren como un cancerígeno potencial", (NIOSH, 1989).



**Figura II.1 Mecanismos Posibles de Carcinogénesis Inducida por las Emisiones Diesel.**

Un reporte muy interesante fue presentado por Michinori Kabuto (20) donde se muestra una correlación entre la mortalidad debida a cáncer femenino pulmonar y exposición a gases de escape Diesel en la zona metropolitana de la ciudad de Tokio. El reporte presenta un análisis estadístico estándar de las tazas de mortalidad debidas a cáncer pulmonar femenino, durante tres periodos diferentes 1969-1973, 1974-1978 y

1979-1983, para el área metropolitana de Tokio correlacionada a la vez con el crecimiento poblacional de vehículos a Diesel, para la misma área. La figura II.2 muestra algunos resultados finales de la investigación.



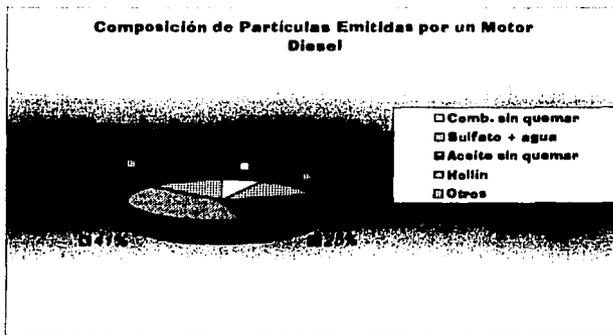
**Figura II.2 Tendencias Seculares (1950-1990) de Mortalidad Femenina Debida a Cáncer Pulmonar y del Número de Vehículos a Diesel Registrados En el Área Metropolitana de Tokio (Kabuto y Cols. 1992).**

## II.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS DIESEL.

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

Por todas estas consideraciones, es necesario conocer un poco de las características que implica la combustión en estos motores.

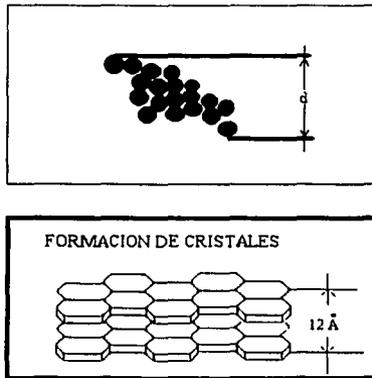
La composición de las partículas que emite un motor Diesel depende del tipo de motor, de sus condiciones de funcionamiento y del combustible utilizado. La figura II.3 corresponde a un promedio de las pruebas tomadas de un motor sobrealimentado, potencia media y en un cierto ciclo de operación.



**Figura II.3 Composición de Partículas Emitidas por un Motor Diesel.**

Se puede observar que el componente mayoritario es el hollín con el 41%, el cual propiamente dicho, es carbón con una parte mínima de hidrógeno. Mucha gente ha utilizado las palabras " carbón y hollín " para describir un amplio rango de materiales procedentes de la combustión de combustibles fósiles, sin embargo, éstos contienen además, considerables cantidades de hidrógeno como otros elementos y compuestos. La fuente del carbón, base del hollín es el mismo combustible y, en mínima parte el aceite lubricante.

Micrografías tomadas a partículas de hollín (figura II.4) permiten observar una concentración laminar, similar a la microestructura perlítica que presentan en algunos materiales (aceros al carbón por ejemplo) sólo que están en arreglo esferoidal. Los átomos de carbón se unen en un arreglo hexagonal formando planos, y éstas plaquetas. Dichas plaquetas se arreglan en forma de laminas que a su vez forman, cristales. De dos a cinco plaquetas por cristal agrupándose en cantidades del orden de  $10^3$  cristales por glóbulo.



**Figura II.4 Esquema de la Microestructura de una Partícula de Hollín.**

Los glóbulos tienen un tamaño de 10 a 50 nm de diámetro, se fusionan y forman partículas. Una sola partícula contiene de  $10^3$  a  $10^5$  átomos de carbón (9).

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

De la figura II.3 se puede observar que, una fracción de las partículas esta compuesta de sulfatos y agua. La fuente principal de esta porción es el combustible, en cualquier sistema de combustión, donde este presente azufre o compuestos de azufre, el producto predominante es el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

No se conoce el mecanismo mediante el cual el azufre se oxida sin embargo cuando se quema el combustible, el azufre también se transforma en  $\text{SO}_2$  que es su forma más estable termodinámicamente a elevadas temperaturas.

En el motor Diesel, más del 95% del azufre contenido en el combustible se convierte en dióxido de azufre y el resto sale como trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) esto es niebla de ácido sulfúrico o alguna otra forma de óxido.

Por la rapidez de reacción sólo una parte de dióxido de azufre se transforma en trióxido y el resto sale como  $\text{SO}_2$  congelado; por ello, sólo una pequeña parte del azufre puede ser convertido mediante hidrólisis en ácido sulfúrico, en gotas o partículas.

El  $\text{SO}_2$  en presencia de oxígeno reacciona y se transforma lentamente en  $\text{SO}_3$  cuando es expuesto a la radiación solar. El dióxido de azufre también juega un papel muy importante en la formación fotoquímica de aerosoles en la contaminación del aire.

Algunos investigadores han reportado que cerca del 2% del azufre contenido en el combustible se convierte en  $\text{SO}_3$  y es recolectado como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en filtros de pruebas. Por lo que los fabricantes de motores Diesel han impuesto como condición para alcanzar los estándares establecidos por la normativa de emisiones, regular el contenido de azufre en el combustible.

Se tiene conocimiento de que, será necesario utilizar uno o más dispositivos de postratamiento de los gases de escape para alcanzar los niveles mínimos de emisiones en los próximos años, sin embargo, al utilizar catalizadores en el sistema de escape y un combustible con alto contenido de azufre, la conversión  $\text{SO}_3$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  es igual o mayor a la reducción de los hidrocarburos.

El porcentaje de sulfatos y agua asociada, presente en las partículas, se incrementará en proporción inversa a la reducción de otras fracciones, mientras no se reduzca el contenido de azufre en el combustible<sub>(7)</sub>

### II.3 OTROS COMPONENTES.

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

Como ejemplo se pueden mencionar **las cenizas** que resultan de compuestos orgánicos e inorgánicos. Algunas de ellas se forman en los crudos refinados que constituyen la mayoría de los productos contaminantes.

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

**Los aditivos** que se utilizan para suprimir el humo también son compuestos orgánicos y orgánico-metálicos incluyendo algunos con nitrógeno o azufre.

El nitrógeno, de forma análoga al azufre, está ligado al combustible y contribuye no sólo a la emisión de  $\text{NO}_x$ , sino también como una fuente de emisión de partículas (nitratos y sulfatos).

Actualmente, se están utilizando algunos aditivos como los óxidos de Manganeso para disminuir la temperatura de regeneración en las trampas de partículas, sin embargo éste y otros elementos salen a la atmósfera constituyendo parte de las partículas formadas en cantidades mayores si no hay postratamiento de los gases de escape, teniendo algún grado de toxicidad o bien no se eliminan fácilmente del cuerpo humano

#### **II.4 NIVELES DE EMISIÓN.**

El estudio incluye algunos aspectos de la legislación en el ámbito internacional en los principales países industrializados, fundamentalmente en los EUA y la Comunidad Económica Europea (CEE en lo sucesivo para abreviar), así de la legislación que se ha adoptado en México.

El tratamiento posterior de los gases de escape y combustibles alternativos, se encuentran bajo fuertes programas de investigación actualmente. En lo que se refiere al mercado de los EUA, uno de los más vigorosos del mundo, los autobuses para servicio urbano están sujetos a la legislación que entró en vigor en 1994, tanto los estándares de los EUA como los Europeos obligan a una reducción drástica del contenido de azufre a menos del 0.05% en peso para todos los vehículos en circulación.

En México sólo se ha emitido una legislación muy débil, basada en mediciones de opacidad, aunque recientemente se adoptó una legislación que prácticamente adopta los estándares de la EPA en 1994, por la que ahora es la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE).

La norma Mexicana en materia de protección ambiental NOM-CCAT-007-ECOL/1993 y NOM-CCAT-008-ECOL/1993. Establece los niveles máximos permisibles de emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y opacidad

de humo respectivamente, provenientes del escape de vehículos automotores en circulación que usan Diesel como combustible, a excepción de vehículos con peso bruto vehicular menor de 400 Kg. y a tractores agrícolas o maquinaria para construcción.

## **II.5 EXPERIMENTOS PROPIOS.**

Finalmente, se incluye una descripción breve de algunos sistemas de tratamiento posterior de los gases de escape, que parece ser inevitables para poder alcanzar los estándares rigurosos que en 1998 fueron puestos en marcha por la EPA.

A fin de lograr que el nivel de emisiones de partículas sólidas se mantenga dentro de los límites establecidos por la EPA para este año (2000) y años posteriores se llevaron acabo experimentos con un sistema auto-regenerable de filtrado mecánico.

Para ello se utilizaron dos filtros cerámicos Corning® con baño catalítico propiedad industrial de Degussa, AG, de Frankfurt am Main, Alemania, con pared delgada y una densidad de 62 celdas/cm<sup>2</sup>, que más adelante se hará una descripción más detallada de este prototipo.

---

# **CAPÍTULO III**

## **GENERACIÓN DE PARTÍCULAS**

## GENERACIÓN DE PARTÍCULAS

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 en función del tipo de proceso dominante en la combustión que les da origen: pirólisis u oxidación.

Las características de los componentes de 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.

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 de aire-combustible propicia pirólisis del combustible, lo que favorece a la formación de hollín. Al aumentar la relación aire-combustible la emisión de hollín decrece dramáticamente hasta que se tiene demasiado aire.

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. <sup>(24)</sup>

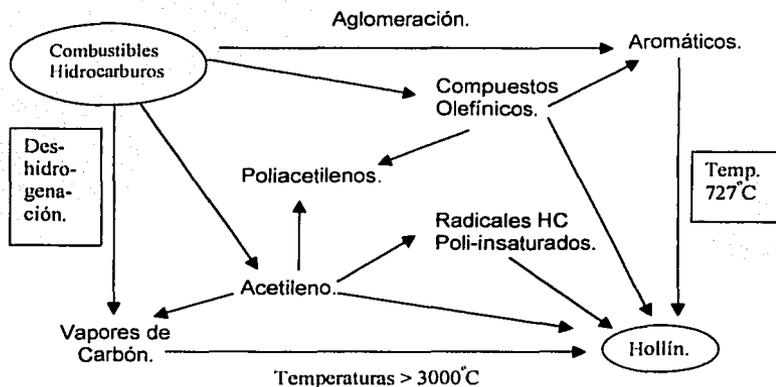
### III.1 TEORÍA DE FORMACIÓN DEL HOLLÍN.

Aunque no es posible aún hacer una descripción detallada de la formación y producción del hollín, sean planteado algunos mecanismos de su formación cuyos resultados coinciden con los datos experimentales obtenidos. <sup>(26)</sup>

Los resultados de numerosos estudios sobre la formación del hollín que se han llevado a cabo, muestran hidrocarburos o grupos de hidrocarburos, que juegan un papel predominante en la formación de estas sustancia carbonosa.

La figura III.1 muestra los mecanismos de formación de hollín, en la cual muchos investigadores están de acuerdo con este proceso.

Las trayectorias señaladas en la figura III.1, dependiendo de los niveles de temperatura que se alcancen durante la combustión, indican diferentes compuestos intermedios que predominarán como elementos precursores.



**Figura III.1 Mecanismo de Formación de Hollín**

A elevadas temperaturas, los procesos intermedios que se han encontrado son los acetilenos y poliacetilenos los cuales, propagan el crecimiento de las partículas en las regiones más calientes de la llama. Las primeras partículas de hollín son aproximadamente esféricas que pueden aparecer con un diámetro pequeño, alrededor de 20 Å en menos de 1 ms creciendo superficialmente hasta alcanzar diámetros de 500 a 1000 Å en menos de 10 ms <sup>(5)</sup>

Entre 1730 y 3000°C, se da la descomposición térmica o separación de las moléculas del combustible en lugar de la polimerización.

A bajas temperaturas, las reacciones involucran polimerización y condensación (exotérmicas por naturaleza) y, los aromáticos o compuestos policíclicos, también conocidos como hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) son propuestos como los precursores de la formación del hollín <sup>(12)</sup>

Tal y como se observa en la figura III.1, este mecanismo prevalece cuando las temperaturas de la flama son de alrededor de los 2000 y 3000°C, o relativamente bajas. En un motor Diesel las temperaturas pueden alcanzar valores muy elevados (3000°C), por lo tanto hace que los mecanismos citados tengan lugar a que se considere a los PAHs como los precursores del hollín.

Desde el punto de vista Termoquímico, a elevadas temperaturas, los acetilenos ( $C_2H_2$ ) y poliacetilenos ( $C_4H_2$ ,  $C_6H_2$ ) son los que más probablemente se condensan. Estos compuestos son los que inducen la formación y crecimiento de la estructura aromática que da inicio a la formación de hollín.

Se estima un promedio de  $10^3$  a  $10^5$  átomos de carbón en las partículas de hollín, esto indica que el tamaño de los cristales que están comprendidos en las partículas de hollín podría ser del orden de 7 a 12 Å, a que corresponden valores experimentales.

El crecimiento de la superficie del hollín está, en principio determinado por dos procesos: de separación de H mediante la adición de  $C_2H_2$  y la condensación de los PAHs sobre la superficie de la partícula.

### **Observaciones en las Llamas Diesel.**

En cuanto al estudio de las llamas en los motores Diesel, los mecanismos de formación que se han descrito en la figura III.1 explica muchas de las teorías, que la materia que se condensa proviene de oxidación parcial, que incluyen generalmente a los hidrocarburos insaturados, particularmente acetilenos. (3)

Datos experimentales obtenidos del muestreo de gases, en distintos puntos del cilindro y bajo diversas condiciones de operación, revelan que las partículas de hollín

son formadas y oxidadas en una región cercana a la punta o extremo de la llama (aprox. 1900°C). Asimismo, la máxima concentración de hollín se encuentra en la máxima temperatura. (11)

Debe tenerse presente que, finalmente las emisiones de hollín emitidas a la atmósfera, serán la diferencia entre la tasa de formación y la tasa de oxidación de éste.

### III.2 CAUSAS DE FORMACIÓN.

Además de los procesos físicos-químicos que originan la formación de hollín, existen condiciones particulares del motor Diesel que favorecen su producción:

- Debido al impacto de la llama con la pared del cilindro, la propagación molecular no puede mantenerse y la llama se extingue.
- La extinción de la llama puede producirse por falta de aire circundante. La turbulencia existente en la cámara de combustión puede provocar que se separen algunos volúmenes de combustible de la llama principal.
- El hollín puede sobrevivir en las llamas debido a la baja tasa de oxidación. La alta concentración de productos de la combustión, alrededor de las capas luminosas, puede ser responsable de la tasa de oxidación lenta.
- Si la producción de calor, debido a la oxidación del combustible, es más baja que la transmitida a través de los productos hacia el aire circundante, la llama se apaga.

### **Teoría de la Formación de Hidrocarburos sin Quemar.**

Debe hacerse mención de que existen hidrocarburos no quemados (HC) formando parte de las partículas mientras que otros, salen al medio ambiente como gases. Los primeros generalmente se condensan y se adhieren a las partículas, los segundos, se mantienen en fase gaseosa hasta su salida a la atmósfera.

Los hidrocarburos no quemados (HC) pueden tener un comportamiento semejante al de una sustancia pura. Se puede recordar que en una Torre Fraccionadora están separándose continuamente diferentes hidrocarburos cuyos puntos de ebullición, difieren de sólo unos cuantos grados, a una misma presión de saturación muy similar a la atmósfera.

En el motor, una vez que se ha iniciado el desalojo de los gases producto de la combustión, la presión es casi constante durante el recorrido (de dichos gases) por el sistema de escape hasta su llegada a la atmósfera.

Tratando de explicar el fenómeno de condensación de algunos hidrocarburos se hizo un estudio con una sustancia pura incrementando su presión y temperatura; observando que:

Al disminuir su temperatura debido a la expansión y al mezclarse con el aire, los hidrocarburos más pesados tienden a condensarse y adherirse a las partículas carbonosas.

Los compuestos más ligeros mantienen su condición gaseosa por más tiempo, debido a que su temperatura de saturación es menor. Las fuentes de formación de los hidrocarburos sin quemar, tanto en fase gaseosa como en la condensada, son: el aceite de lubricación y el combustible.

### III.3 HIDROCARBUROS SIN QUEMAR.

El equipo de medición de hidrocarburos no quemados (normalmente un detector de ionización de llama), mantiene la muestra a 190°C, no distinguiendo si dichos hidrocarburos proceden del lubricante o del combustible.

Más sin embargo, estudios radiactivos y de espectrometría indican que un porcentaje considerable de los hidrocarburos absorbidos sobre las partículas de hollín, **proceden del aceite de lubricación.** (9)

Los HC procedentes de esta fuente, son aquellos que escapan del proceso de combustión o aquellos que son evaporados y acarreados por la corriente de los gases de escape.

Los primeros provienen del aceite que moja las paredes del cilindro, debido principalmente a las distorsiones de éste, provocadas por el desgaste o por montaje.

Los segundos, provienen del aceite que se quema sobre los vástagos de las válvulas de escape y probablemente de la junta de la turbina (en caso de que el motor sea turboalimentado)

En el caso de los **HC provenientes del combustible**, las causas son más numerosas, empezando por las altas temperaturas de destilación y porque mantienen un amplio rango en el tamaño de las moléculas.

Los niveles de hidrocarburos emitidos por los motores Diesel, varían ampliamente con las condiciones de operación y características del motor.

Diversas fuentes han coincidido al señalar dos situaciones fundamentales en las que, el combustible puede escapar al proceso de combustión normal:

- La mezcla combustible-aire puede ser demasiado pobre (aire en exceso) para darse la autoignición o para sostener la propagación de la llama, en las condiciones prevalecientes dentro de la cámara de combustión.
- En las etapas iniciales del proceso de combustión, la mezcla puede ser demasiado rica (exceso de combustible) y por tanto, no favorecer la ignición o el sostenimiento de la propagación de la llama.

La magnitud de las emisiones de hidrocarburos no quemados, originados por mezclas pobres, dependerá principalmente de los siguientes factores:

- Sobremezcla
- Apagado de llama
- Período de retraso

### **Sobremezcla.**

En el proceso de formación de mezcla, el combustible inyectado se combina con el aire, alguno de ellos será más pobre con respecto al grado de flamabilidad, por otro lado alguno será más rico para poderse quemar.

Existirá por lo tanto combustible no quemado provocando que algunos productos de éste (aldehidos, cetonas, ésteres) salgan del cilindro sin ser quemados.

### **Apagado de Llama.**

Este efecto, dentro del mecanismo de mezclas pobres, contribuye a la generación de HC debido principalmente a la pérdida de calor a través de la pared del pistón y, a la generación de zonas frías.

Varios investigadores dicen que, la llama de un cierto volumen de gas puede apagarse debido a una caída de temperatura en el cilindro por la expansión del volumen de la cámara de combustión, o que el pistón al llegar al punto muerto superior, el espacio entre éste y la culata es muy estrecho. Si el chorro de combustible o llama entra en dicho espacio la combustión es obstaculizado y la llama puede ser apagada. (11)

### **Período de retraso.**

Existe un período de retraso, que durante este período existe la posibilidad de que una porción del combustible inyectado se mezcle con exceso de aire, constituyendo una significativa fuente de hidrocarburos especialmente cuando la demora de la ignición es grande (debido a los cambios de operación del motor)

En caso de mezclas excesivamente ricas, existen diversas causas que impiden al combustible quemarse completamente, entre ellas las más importantes son:

### **El mojado de pared.**

En un largo período de retraso aumenta la probabilidad de que el combustible haga contacto con las paredes del cilindro, debido a que las gotas del combustible alcanzan la pared antes de que éstas se incendien.

El efecto de mojado de pared también es frecuente en motores de pequeños diámetros, debido a que existe una longitud muy corta para la distribución y evaporación del chorro. Este alcanza a la pared antes de atomizarse completamente, causando una combustión incompleta o bien la extinción de una llama.

#### **El exceso de combustible.**

El combustible puede inyectarse en exceso debido a una inadecuada regulación de la tasa de inyección.

En los motores de inyección directa, en condiciones transitorias como en las aceleraciones, existe una sobrealimentación de combustible propiciando la aparición de humo en el escape.

La emisión de partículas y HC está en función directa de la cantidad de combustible inyectado. Al disminuir la cantidad suministrada por carrera, se aprecian notables reducciones de hidrocarburos en el escape.

### **III.4 FORMACIÓN DE OTROS COMPONENTES.**

La teoría de formación de otras especies que componen las partículas Diesel, distintas a los hidrocarburos no quemados y del hollín, pueden ser potencialmente más extensas debido a la gran variedad de especies formadas. No obstante, el desconocimiento de la formación de algunas de estas especies y la cantidad tan reducida de las mismas, dará una referencia sólo de aquellas que tienen mayor influencia en la formación de partículas.

Dentro de estas especies, se pueden citar algunas de mayor relevancia como: sulfatos de agua, cenizas, sales y compuestos metálicos.

Cada componente tiene uno o varios mecanismos de formación diferentes para sumarse a la formación de partículas. Algunos de ellos se forman en la etapa de combustión mediante el proceso de oxidación parcial.

De todas estas especies se cree que el azufre y las cenizas son las que influyen en forma decisiva en la generación de partículas.

#### **Cenizas.**

Las cenizas pueden contribuir considerablemente a la emisión de partículas debido a que, son la fuente de la mayoría de las trazas metálicas contaminantes las cuales a su vez, no son solamente peligrosas para la salud, sino también porque actúan de forma catalítica en todos los procesos de formación de partículas.

La mayoría de las cenizas se han formado en los procesos de refinamiento de los crudos que raramente están presentes en los procesos de destilación del combustible, en los cuales en cambio, se han encontrado trazas de compuestos metálicos y organico-metalicos.

No todos los compuestos metálicos existen en la composición original del combustible, éstos pueden ser agregados juntamente con los aditivos tanto del aceite de lubricación, como del mismo componente.

### **Sulfatos y agua ligada.**

El azufre puede estar en el combustible en su forma elemental, ligados generan un doble problema, contribuyen a la contaminación atmosférica (partículas y lluvia ácida) y ocasionan severos problemas físicos debido a que son muy corrosivos.

El producto predominante de la combustión del azufre es el  $\text{SO}_2$ , ya que sólo una pequeña cantidad de  $\text{SO}_3$  aparece en los productos.

Realmente el  $\text{SO}_3$ , es el único de los óxidos de azufre que presenta posibilidades de incrementar la formación de partículas y, aunque la tasa de conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  se incrementa aumentando la cantidad de aire en el 1% aproximadamente.

### **Sales.**

Paralelamente a las cenizas y el azufre, se han encontrado cloruro de Sodio, Calcio y Magnesio que constituye el contenido de sales de combustible. Estas trazas, además de constituir una etapa intermedia en la formación de partículas, tienen un pronunciado efecto sobre el revestimiento de los motores por su carácter corrosivo, particularmente si el Azufre está presente.

### **III.5 CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE.**

Los combustibles que utiliza el motor Diesel son una amplia variedad de mezclas de hidrocarburos, provenientes de la refinación de distintos tipos de "crudo".

Debido a esa variedad junto con las complejas técnicas de refinación, dichos combustibles son, en algún grado, inherentemente variables. En este sentido, las propiedades de los combustibles (gasóleos) guardan una estrecha relación con la formación y emisión de partículas al medio ambiente.

Muchos investigadores han discutido el efecto de las propiedades del combustible sobre las emisiones contaminantes y, se reconoce que es difícil investigar cada propiedad por separado, debido a sus interacciones tan complejas. Por esta razón, es importante acumular datos de los efectos causados al cambiar las propiedades del combustible. Esto permite estudiar los datos desde varios puntos de vista.

La composición adecuada de los combustibles destinados para el motor Diesel, estos combustibles deben responder a un compromiso que equilibre su contenido energético, con la calidad al autoencendido y con la limpieza de su funcionamiento.

#### **Aromáticos.**

Entre las múltiples características de estos compuestos, los aromáticos permiten cierta flexibilidad en la refinación del combustible que además, en invierno permite que éste tenga una mayor fluidez tanto en el mismo motor, como en los conductos empleados para su manejo y almacenamiento.

El contenido de aromáticos tiene una importante influencia sobre la formación de las partículas. De hecho los hidrocarburos policíclicos aromáticos son considerados como precursores en el mecanismo de la formación de hollín como ya se ha mencionado con anterioridad. No obstante algunas fuentes,<sup>(22)</sup> ponen en duda que el efecto observado sobre la emisión de partículas sea exclusivamente debido al contenido en aromáticos ya que, éste tiene una relación directa con la densidad del combustible.

No obstante estas aseveraciones que, apoyadas en los resultados experimentales, intentan poner en claro el efecto que causa el contenido de aromáticos en las emisiones Diesel, hoy en día, existen insuficientes datos para predecir con exactitud sus efectos, o decir con seguridad el grado de reducción de aromáticos que se recomienda en la formulación del combustible Diesel.

### **III.6 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE AFECTAN LA EMISIÓN DE PARTÍCULAS.**

Otros parámetros importantes, mediante los cuales se puede ejercer cierto control de las emisiones de partículas son:

- La relación de compresión (RC)

Este parámetro está fuertemente relacionado con el retraso de ignición y es uno de los factores más importantes de la generación de humos, partículas,  $\text{NO}_x$  y consumo de combustible.

En el motor Diesel el uso de elevadas relaciones de compresión es obligada para resolver problemas de humo frío y reducir emisiones  $\text{HC}/\text{NO}_x$ . El incremento de la relación de compresión está asociado con el incremento de humo negro y el consumo específico de combustible debido a que se empeora la utilización del aire.

El nivel de humo disminuye a bajas relaciones de compresión de forma inversa a los niveles de  $\text{NO}_x$  (23).

- La recirculación de gases de escape (RGE)

Algunos investigadores indican que la recirculación de gases de escape, reduce los óxidos de nitrógeno pero, incrementa la densidad de humo y disminuye la potencia del motor.

Otros muestran que es posible utilizarla para disminuir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, además de que se puede alcanzar el máximo nivel de potencia.

El uso de la RGE se acompaña de otros efectos como, la concentración de oxígeno y el incremento de la temperatura en el aire de aspiración así como el aumento progresivo de la presión de vacío en colector de admisión.

La causa-efecto entre las diferentes emisiones contaminantes podrían ser:

- El nivel de hollín no cambia al variar la concentración de  $O_2$  en el aire de aspiración o al variar la presión de vacío en el colector. Sin embargo, si cambia al incrementarse la temperatura del aire de aspiración, aunque esa contribución al total de partículas es pequeña.
- El nivel de  $NO_x$  disminuye de acuerdo a la concentración de  $O_2$  y se incrementa cuando se eleva la temperatura del aire de aspiración. Los HC aumentan conforme disminuye la concentración de  $O_2$  y disminuye cuando se eleva la temperatura del aire de aspiración.

---

# **CAPÍTULO IV**

## **SOLUCIONES PROPUESTAS**

## **SOLUCIONES PROPUESTAS**

En cuanto a emisiones, la industria manufacturera de motores Diesel, mantiene objetivos muy severos ya que se debe asegurar, entre otras cosas, que las emisiones se mantengan por debajo de los niveles establecidos por la normativa.

Los motores deben alcanzar dichos niveles, no solo cuando estén nuevos sino también durante su vida útil, que son períodos de rodaje de 177 000 Km para motores de servicio ligero-pesado y de 466 000 Km para motores de servicio pesado <sup>(13)</sup>.

Existen diversas formas de intentar alcanzar dichos objetivos de las cuales se sugieren algunas propuestas para este caso.

#### IV.1 ACTUACIONES PARA REDUCIR PARTÍCULAS PROCEDENTES DEL COMBUSTIBLE.

Existen tres puntos importantes para reducir la producción de partículas procedentes del combustible, estos son:

- Las características del combustible.
- La relación que tiene éste con las condiciones de operación.
- La influencia del mismo con los parámetros de diseño del motor.

##### **Actuaciones Sobre las Características del Combustible.**

El combustible Diesel es una mezcla de hidrocarburos tanto de la serie alifática como aromática. Su composición es determinante en el control de las emisiones y muy especialmente, en el de las partículas.

Se comenta por ejemplo que, **el Contenido de Aromáticos** aumenta drásticamente los niveles de partículas, lo cual es causado por una ineficiente combustión a bajas cargas <sup>(15)</sup>.

Existe el **Efecto de Destilación** que es una de las acciones que puede mejorar las características del combustible esto se daría reduciendo el rango de temperatura de destilación.

Siempre es deseable aumentar **el Número de Cetano (NC)** en un combustible pues ello, representa aumentar su calidad de ignición y disminuir los niveles de emisiones contaminantes, especialmente el de partículas. Es deseable mejorar el NC a partir de la

composición del combustible que con el uso de aditivos, pues mejoran aún más las prestaciones del motor y la reducción de los niveles de emisión de partículas, ya que el uso de aditivos puede tener efectos secundarios graves, si no se usan en proporciones limitadas.

Es claro también que al disminuir el **Contenido de Azufre** en el combustible significa una de las claves fundamentales para disminuir la emisión de partículas.

Un motor que haga uso de combustibles con bajo contenido de azufre, podría utilizar un catalizador de oxidación el cual, aunque este diseñado para oxidar emisiones gaseosas, también influye notoriamente sobre la masa de partículas que emite.

Al reducir el azufre trae consigo un triple beneficio:

- Se forma menos partículas de sulfato con agua ligada.
- Hay menos materia orgánica soluble, procedente del aceite (Hidrocarburos poliaromáticos).
- Se propaga el uso de catalizadores de oxidación.

Hoy en día existen diverso **Combustibles Alternativos** y mezclas de ellos que pueden usarse en los motores Diesel: gas natural, GLP, etanol, metanol etc., aunque sólo el metanol y el gas natural pueden producirse de manera que satisfaga la demanda mundial. Dichos combustibles ofrecen bajos niveles de emisión en cuanto en partículas y óxidos de nitrógeno, sin embargo emiten CO y CO<sub>2</sub> en cantidades semejantes a los gasóleos.

Existen muchos otros factores que favorecen a la formación del material particulado, tal y como lo es el aceite de motor que pasa a las cámaras de combustión, la geometría de las cámaras de combustión, los materiales utilizados en la construcción del motor etc.

El aceite de motor constituye indirectamente una parte importante de la fracción orgánica soluble presente en las partículas de hollín que se forman en el motor. Del mismo modo, otros factores conducen a aspectos diferentes en el diseño del motor, lo que lleva a una larga serie de modificaciones importantes a los diseños originales, con lo que ha nacido una nueva generación de este tipo de motores que se caracteriza por una notable reducción en los niveles de las emisiones.

De acuerdo con una cierta publicación, al agregar pequeñísimas cantidades (0.05g/l) de aditivos catalíticos al combustible (compuestos con hierro o cobre) éstos se queman en el motor y se emiten como pequeñas partículas metálicas.

Si se usa un filtro cerámico en el escape del motor éstas se mezclan dentro del filtro con las partículas Diesel, reduciendo la energía de activación dramáticamente, al grado que la temperatura de ignición de las partículas puede bajar hasta 300°C.

Esto no se ha desarrollado más, debido al riesgo de liberar compuestos metálicos a la atmósfera, lo que sería contraproducente en el intento de salvaguardar la calidad ambiental para efectos de la salud humana.

#### **Actuaciones Sobre las Condiciones del Funcionamiento del Motor.**

Las condiciones del funcionamiento del motor, juega un papel muy importante para reducir las emisiones de partículas, estas condiciones son:

- ☛ Avance de la inyección.
- ☛ Régimen de giro.
- ☛ Carga aplicada al motor.

La regulación del punto en el que se inicia el **Avance de Inyección** puede hacer que los niveles de partículas y algunas emisiones gaseosas sean más bajas.

Se puede retrasar el avance de inyección, de manera que se tengan picos de presión y temperatura menos severos; de esta forma, aunque se reduce un poco la potencia del motor pero los niveles totales de partículas disminuyen.

**Régimen de Giro.** Como la generación de partículas se incrementa a medida que la velocidad del motor aumenta (a bajas cargas) lo que se puede sugerir en primer lugar es, sobrealimentar el motor para garantizar un buen llenado en el cilindro de manera que no exista deficiencia en la cantidad de aire.

De acuerdo a la **Carga que se le aplique al Motor** se puede modular la recirculación de los gases de escape en función del régimen de giro y de la carga aplicada, de esta manera, a la vez que se reduce el consumo de combustible también se reduce los niveles de contaminantes emitidos, en particular la fracción orgánica soluble de las partículas.

#### **Actuaciones Sobre los Parámetros de Diseño.**

Los parámetros de diseño más relevantes sobre los que se puede actuar para la reducción de emisiones de partículas, son los siguientes:

- Cámara de combustión.
- Sistema de inyección.
- Relación de compresión.

El proceso de mezcla es fundamental en la **Cámara de Combustión** y éste, depende de la estructura de flujo dentro de dicha cámara y de la manera en el que el combustible es introducido. (7)

Tanto en las cámaras divididas como en las abiertas, se debe definir una geometría capaz de regular el proceso de mezcla en todo el rango de carga y régimen del motor.

Se comenta en diversa fuentes que una elevada presión en el **Sistema de Inyección** favorece la atomización y el mezclado por tanto, reduce la emisión de partículas. Incluso cuando la capacidad de la bomba es limitada, se pueden reducir los diámetros de los orificios de la tobera para incrementar dicha presión. Asimismo, se puede incrementar o reducir el número de orificios para adecuar la distribución de los chorros y consecuentemente, aumentar la homogeneidad de la mezcla. Dicho parámetro, también permite regular la duración de la inyección.

Por otra parte, en cuanto a las características geométricas de la tobera de inyección, se recomienda reducir al mínimo el saco de ésta y, conocer en detalle el comportamiento del fluido en su interior. Esto podría ayudar en una gran medida a predecir la penetración del chorro y la calidad de la atomización, que son algunos de los parámetros de mayor interés para conseguir un buen mezclado.

La selección de una óptima **Relación de Compresión (RC)**, basada en los antecedentes experimentales<sup>(23)</sup>, indica que debe equilibrarse la emisión de partículas con la de  $\text{NO}_x$ , ya que a medida que RC aumenta, se incrementa el nivel de partículas y disminuye el de  $\text{NO}_x$  y viceversa.

En determinados motores este comportamiento puede verse mejorado mediante el uso de cámaras de combustión reentrantes, las cuales pueden, no sólo reducir partículas y  $\text{NO}_x$  sino también, el consumo de combustible.

#### **IV.2 ACTUACIONES PARA REDUCIR PARTÍCULAS PROCEDENTES DEL ACEITE DE LUBRICACIÓN.**

Un factor importante en la formación de partículas, es el consumo de aceite de lubricación. Se ha publicado que se requiere una reducción considerable del consumo de éste, si se desea alcanzar los futuros niveles de emisión de partículas que indican las diferentes normativas. <sup>(6)</sup>

Uno de los factores más importantes para bajar el consumo de aceite de lubricación, son el sellado y las deformaciones que sufre el diámetro interior de los cilindros.

Se han comparado cilindros de diferente manufactura, con idénticas dimensiones: diámetro/carrera encontrándose diferencias sustanciales en sus distorsiones. En estos casos, si se quieren remediar dichas distorsiones, se pueden inducir significativos costos y cambios muy fuertes en el bloqueo de cilindros, camisa del cilindro y junta de culata. Por lo tanto, es más recomendable corregirlo desde el diseño original.

La nueva generación de motores Diesel, así como el desarrollo de nuevos combustibles implicó una inversión multimillonaria y un amplio espacio de tiempo que tuvo como primer fruto importante el alcance de los límites legales establecidos en los E.U.A. para 1991 sin mayor problema, las mejoras continuaron y hacia finales de 1994, la combinación de estas modificaciones junto con el uso de los complejos sistemas de control habían permitido reducir la emisión de material particulado hasta en una tercera parte antes de la cruzada tecnológica. Esto se puede apreciar en la siguiente tabla.

MODELO DEL VEHÍCULO	M.P. (mg/Km.)	FOS (mg/Km.)
Mod. 1980 con IDI	246	124
Mod. 1983 con IDI	200-250	No disponible
Mod. 1983 con IDI turbocargado	150-200	No disponible
Mod. 1986 con IDI turbocargado	231	18.5
Mod. 1987 con IDI	122	27.5
Mod. 1988 con IDI turbocargado	82	16

**Tabla IV.1 Identificación de las Concentraciones del Material Particulado y Fracción Orgánica Soluble presentes en las emisiones Diesel de Diferentes Modelos de Motor (MP=Material Particulado, FOS=Fracción Orgánica Soluble, IDI = Inyección Indirecta).**

#### IV.3 POSTRATAMIENTO DE GASES DE ESCAPE.

El tratamiento que puede hacerse a los gases de escape después de la cámara de combustión, comprende básicamente el uso de dos tipos de dispositivo: **El catalizador de oxidación y La trampa de partículas.** Cada uno de estos sistemas tiene múltiples variaciones, debido a los diferentes enfoques con que se pretende mejorar tal dispositivo obteniendo el mejor provecho.

Una trampa, captura las partículas oxidándolas durante el proceso de regeneración; es efectiva y alcanza elevados niveles de eficiencia con ciertas condiciones de operación, sin embargo es cara y complicada.

Un convertidor catalítico tiene una eficiencia menor, dependiendo de la temperatura de los gases de escape que está diseñado para oxidar HC y CO, pero no las retiene. Son relativamente baratos y mucho menos complicados que las trampas.

La instalación de estos sistemas de postratamiento en los vehículos que utilizan motores Diesel, podrán ayudar a reducir considerablemente el nivel de partículas emitidas.

#### **IV.4 CATALIZADORES.**

Un catalizador o convertidor catalítico está diseñado para oxidar principalmente emisiones gaseosas. Sin embargo, como una parte importante de las partículas son los hidrocarburos no quemados, que provienen tanto del aceite de lubricación como del combustible, su efecto redonda en una reducción de la masa de partículas emitidas.

El principio de funcionamiento de este sistema, consiste en acelerar las reacciones de oxidación (de CO y HC) mediante la presencia de un material catalítico activo. Este material normalmente es Platino o Paladio y se baña sobre una cerámica que a su vez, está recubierto por una capa de alúmina.

En cuanto a las características geométricas del catalizador, se requiere que éste tenga un área frontal grande, que permita a los gases de escape hacer contacto con el material catalítico y al mismo tiempo, minimizar la contrapresión de escape. (17)

El área frontal de estos convertidores, difiere del estándar que utilizan los automóviles de gasolina en 2 principales aspectos:

- i) Su volumen es de 5 a 10 veces más grande.
- ii) Su durabilidad física catalítica, se extiende hasta 465 000 Km en lugar de 80 000 Km de los de gasolina.

La durabilidad física comprende los aspectos mecánicos y térmicos que estos dependen de:

- Mecánico.- principalmente de un envase o encapsulamiento que debe proteger al monolito de vibraciones e impactos.
- Térmico.- debido a que los gases de los motores Diesel son substancialmente más fríos que los del motor a gasolina, la temperatura de conversión es más baja y los esfuerzos térmicos asociados axiales y radiales, son bajos con lo que elimina la fatiga térmica, asegurando una operación durante los 465 000 Km que se requiere.

La estructura del convertidor es monolítica, y el material de que esta hecho es generalmente Cordierita, Mullita o Cordierita-Mullita que son materiales cerámicos cuyas formulaciones y principales características se muestran en la Tabla IV.2

MATERIAL	CORDIERITA	MULLITA	CORDIERITA MULLITA
Formulaciones	2MgO 2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5SiO <sub>2</sub>	3*IO <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	5SiO <sub>2</sub> 3*1 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub> 2MgO
Porosidad (%)	33	42	40
Tamaño de poro (µm)	3.5	4.9	2.6
Coefficiente Térmico de Expansión (25-1000°C, X10 <sup>7</sup> /°C)	10	51	30
Resistencia a la Compresión	20.5	16	34.3
Temperatura de Fusión (°C)	1450	1850	1450

**Tabla IV.2 Principales Características de las Cerámicas Utilizadas en los Catalizadores para Motores Diesel. (10)**

En el convertidor catalítico, 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 NO<sub>x</sub> así como el combustible no quemado y los hidrocarburos secundarios generados por pirólisis en la cámara de combustión.

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). Éstas 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.

<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MOTOR</b>	<b>TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE</b>
Altas r.p.m. o carga grande	350-750°C
Ciudad	150-300°C
Vacío	100-150°C

**Tabla IV.3 Temperaturas en el Escape Asociadas al Régimen de Trabajo de un Motor Diesel Típico.**

Los resultados en ensayos experimentales con y sin el uso del catalizador, muestran que el empleo de los convertidores en el motor Diesel puede reducir, tanto las emisiones gaseosas como las de partículas, siempre y cuando se empleen combustibles con bajo contenido de azufre. Estos dispositivos pueden usarse conjuntamente con filtros de partículas.

#### **IV.5 TRAMPAS DE PARTICULAS**

Las trampas de partículas son sistemas que, mediante el filtrado de los gases de escape, capturan las partículas que emite el motor Diesel. Una vez que se acumuló una cierta masa de ellas, se incineran para limpiar el filtro (regeneración) y se inicia el ciclo de trabajo, con lo que varios investigadores se inclinan por este método, como la opción más viable para alcanzar los niveles de emisión de partículas que se mencionan en las diferentes normativas.

Hay escépticos que argumentan que hasta la fecha no se han reportado éxitos comerciales y que su costo, duración y mantenimiento son grandes inconvenientes de estos dispositivos.

Actualmente, existe una gran variedad de diseños en los cuales, cada uno de los componentes que se mencionan en este apartado, tiene sus propias particularidades. No obstante, la idea central de una trampa de partículas es la misma.

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, panales etc.).

Los problemas asociados con el uso de filtros, así como la eficiencia de filtrado depende en gran medida del tipo del filtro empleado. Existen diferentes estudios que evalúan cada uno de los dos tipos según la eficiencia inicial y la estabilidad física. La opinión general señala a los filtros cerámicos con estructura de panel como la mejor opción, al presentar algunas de la eficiencia 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 proyecto, por lo que en lo sucesivo se hará referencia al mismo más adelante.

Al emplear una trampa de partículas se pueden optar por tres diferentes soluciones de regeneración:

- 1° Utilizar una cerámica catalizada que reduce la temperatura de ignición del hollín.
- 2° Usar aditivos en el combustible directamente en la corriente de los gases de escape, antes de llegar al filtro, para promover la oxidación.
- 3° Utilizar una fuente de energía para quemar las partículas.

De estas tres, la última opción es la que ofrece mayor eficiencia para oxidar las partículas. Se denomina **regeneración activa**, a su vez los primeros dos tipos de regeneración mencionados, se denominan **autorregeneración** y **regeneración pasiva** respectivamente.

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. La regeneración del filtro se discute más adelante en el capítulo siete.

---

# **CAPÍTULO V**

## **POSTRATAMIENTO DE GASES**

## **SISTEMAS DE POSTRATAMIENTO**

Los sistemas de post-tratamiento constituyen un acercamiento más sencillo a la solución 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 estos definen las condiciones de operación.

Además de las limitantes en el material particulado, los motores Diesel también tienen que cumplir con normas relativas a  $\text{NO}_x$ , CO e hidrocarburos liberados. Así, es fácil de entender que el primer dispositivo de tratamiento de gases de escape en motores Diesel haya sido - al igual que el motor a gasolina - el convertidor catalítico.

### **V.1 EL FILTRO CATALIZADOR.**

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 (fibras metálicas sintetizadas) 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.

Aún así existen problemas asociados a su uso. Uno de estos es su relativa fragilidad, que puede significar su 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 importante dentro del mismo.

Los filtros comerciales de cordierita tienen un recubrimiento de Gama-Alumina. Esta sustancia sufre cambios en su estructura cristalina a partir de 750°C, entonces se transforma 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 esta por arriba de los 700°C, con lo que no es difícil alcanzar la temperatura crítica de 1100°C debido al calor liberado durante la combustión.

Las características que se desean en los filtros son: una eficiencia de filtrado, baja caída de presión, resistencia a las temperaturas durante la regeneración, resistencia mecánica, bajo costo y durabilidad.

Una apropiada eficiencia de filtrado, se determina por el nivel de partículas que emita el motor puesto que, para un cierto tamaño de la trampa, dicha eficiencia también afectará a la frecuencia de regeneración, a la durabilidad, y al funcionamiento en general.

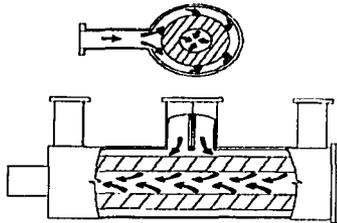
## V.2 TIPOS DE FILTROS UTILIZADOS EN LAS TRAMPAS.

Los tipos de filtros que se usan en los diferentes diseños de trampas de partículas son los siguientes:

### **Mallas de Acero Inoxidable, Recubierto con Material Catalítico.**

Estos filtros son fabricados con alambre de acero inoxidable, recubierto con alúmina y metales preciosos. Consiste de un recubrimiento alrededor de uno o más elementos cilíndricos filtrantes.

Los gases de escape fluyen radialmente hacia el hueco central, a través del filtro, siendo la densidad del recubrimiento menor en la parte exterior y aumentando en el interior del cilindro. Este arreglo ayuda a que las partículas no obstruyan el filtro y ocasionen cambios súbitos en el caudal de los gases de escape.



**Figura V.1 Filtro de Alambre Recubierto**

El material catalítico ayuda oxidar una parte de la fabricación orgánica de las partículas y reduce la temperatura de ignición de las mismas.

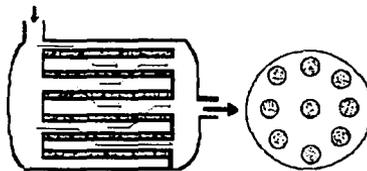
### **Monolitos de Cerámica Celular.**

El monolito de cerámica celular es, posiblemente, el más utilizado y desarrollado en trampas de motores de servicio ligero y pesado. Tiene una alta eficiencia de filtrado, durabilidad y costo moderado. A su vez, los inconvenientes son, su elevado peso, la contrapresión de escape que ocasiona la susceptibilidad a fallar por esfuerzos técnicos durante la regeneración. Existe la opción de utilizar material catalítico en estos filtros que modifique la trayectoria del filtrado.

### **Fibras de Silicatos.**

Son una serie de filtros individuales hechos con una especie de hilo basado en fibra de sílice entre tejido sobre un tubo metálico poroso el cual sirve como un soporte.

Los gases pasan a través de los filtros individuales que salen por el centro de los tubos, depositando las partículas sobre los hilos.



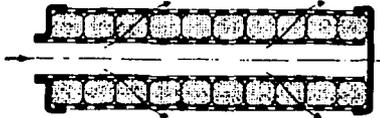
**Figura. V.2 Filtro de Sílice Tipo Vela.**

Tiene una buena eficiencia de filtrado con bajas caídas de presión. Las desventajas son que su contenedor es un poco más voluminoso que los anteriores y que la ignición es un poco más tardía.

### **Mallas de Fibras Cerámicas.**

Estas fibras se fabrican a partir de materiales cerámicos como la mullita, se entretejen en forma de lazo y se forma una mallas sobre una superficie cilíndrica recta, de modo que cada malla forma un filtro individual.

Tienen una alta eficiencia de filtrado que ocasionan una baja caída de presión. Dentro de sus principales ventajas, presenta una gran resistencia a las cargas mecánicas y térmicas.



**Figura V.3 Estructura de Filtros Individuales de Fibras Cerámicas.**

### **V.3 FILTRO MONOLÍTICO DE CERÁMICA.**

La acumulación de partículas se monitorea a diferentes intervalos, midiendo la caída de presión en el filtro, el régimen y la carga del motor.

La caída de presión de los gases de escape, es ocasionada por la entrada y salida del canal, durante el trayecto del canal mismo, debida a la capa de partículas acumuladas en la porosidad de la cerámica.

Su densidad de celdas varía ampliamente desde 9 hasta 400 por  $\text{cm}^2$ , ofreciendo una elevada área superficial geométrica o relación área/volumen de  $27.5 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ .

Su tamaño puede variar en un rango de 23 a 27 cm de diámetro y de 15 a 18 cm de longitud, disponiendo de una superficie total de 19,3 a  $27 \text{ m}^2$  lo mismo que permite distribuir eficientemente el metal catalítico (Pt, Ag, Cu)

La acumulación de masa de partículas es una función progresiva del filtrado de los gases de escape y la disposición de éstas sobre la pared del filtro.

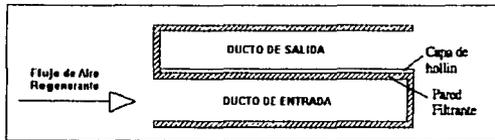


Figura V.4 Filtro Monolítico de Cerámica.

#### Consideraciones de Diseño por Choque Térmico y Caída de Presión.

La distribución de temperaturas no es uniforme en el catalizador, generalmente las temperaturas más elevadas se localizan en el centro y van disminuyendo radialmente.

Con un aislamiento térmico apropiado, se puede lograr que el gradiente radial de temperatura no exceda de  $200^\circ\text{C}$  ó  $250^\circ\text{C}$ .

**Caída de Presión a Través del Catalizador.**

Tomando en cuenta las características geométricas del convertidor como son, el diámetro hidráulico de la celda unitaria ( $D_h$ ), la densidad de celdas por centímetro cuadrado ( $N$ ), el diámetro del convertidor ( $d$ ), la longitud del mismo ( $l$ ) y el caudal de los gases de escape ( $Q$ ), se deduce la ecuación (5.1) que permite calcular la caída de presión a través del catalizador.

$$P_t = \frac{4KQ}{\pi} * \frac{l}{d^5} * \frac{1}{ND_p^3} \dots\dots\dots(5.1)$$

Desde el punto de vista de funcionamiento, es deseable optimizar el tamaño del convertidor ya que, al tiempo que se minimiza la caída de presión, se maximiza la superficie total para un cierto flujo, y su tamaño debe limitarse al espacio disponible.

De acuerdo con las mediciones efectuadas de presión y temperatura, se sabe que el tiempo en una cierta masa de partículas se acumula, depende de las condiciones de operación del motor. Los datos de la caída de presión y el valor de la temperatura a la entrada del filtro, representan un criterio útil para determinar la masa de partículas acumuladas.

Este valor es de suma importancia debido a que al mayor número de partículas capturadas en dicho filtro indicará el momento en que se inicie el proceso de regeneración.

### **Mecanismo de Regeneración.**

El proceso de regeneración por fuente de energía consiste de las siguientes dos etapas:

1ª durante un cierto tiempo los quemadores o la fuente de energía de que se disponga, incrementan la temperatura del flujo de aire a través del filtro a un nivel suficientemente alto para comenzar el proceso de oxidación de las partículas.

2ª cuando la combustión se haya estabilizado, los quemadores o fuente se apagan mientras se mantiene el flujo de aire. La energía liberada por la oxidación del carbono sirve para sostener la combustión, la cual, se propaga por canales del filtro hacia la masa de carbón. En este momento la regeneración se completa.

El proceso de regeneración puede ser seguido a través de la señal de temperatura suministrada por termopares, localizados a la entrada, en medio y en la parte posterior del filtro.

Cuando comienza la regeneración, el primer termopar localizado a la entrada del filtro, lee un incremento progresivo de temperatura el cual, después de un máximo, decrece a medida que la combustión se aleja de la entrada. En este momento, el segundo termopar colocado en la parte media, comienza a detectar dicho incremento progresivo de temperatura a medida que se aproxima la onda de combustión. Cerca del valor máximo del segundo termopar, los quemadores o la fuente, se apaga y la combustión se propaga de forma autónoma a lo largo de los canales.

La regeneración depende de tres factores principales:

1. La cantidad de partículas acumuladas en el filtro.
2. La temperatura que se alcanza durante el proceso.
3. La concentración de oxígeno.

El sistema de regeneración se basa en el uso de un flujo (predeterminado) de aire externo, independientemente de los gases de escape del motor, el cual garantiza una concentración de oxígeno constante.

Al principio el nivel de temperatura esta determinado por la fuente de energía que se utilice y, en la siguiente etapa, por la cantidad de partículas acumuladas en el filtro. Por tanto, la única variable verdaderamente independiente del sistema, es la masa de las partículas acumuladas y ésta, es la variable que debe ser controlada.

#### **El sistema de Control.**

Una trampa de partículas debe contar con un sistema que controle periódicamente los procesos de carga y regeneración. Un cierto valor de la masa de partículas acumuladas, da la señal del límite superior de la carga del filtro. En este momento, se inicia el proceso de regeneración activando la fuente de energía.

La autorregeneración puede ocurrir si los gases de escape salen a elevadas temperaturas, esto es, cuando el motor trabaja continuamente a máxima carga durante mucho tiempo.

Generalmente, esta condición es la más favorable para los sistemas catalíticos pero no para la regeneración asistida ya que los residuos de partículas en la autorregeneración pueden causar sobrecalentamientos locales, lo que puede causar la destrucción del filtro.

La masa de partículas recolectada es calculada y exhibida en el tablero de controles. Si la masa acumulada va decreciendo en lugar de aumentar, el sistema de control debe reconocer este hecho y reducir la regeneración, proporcionalmente a la masa que exista en el filtro. Para estos casos, un subsistema que controla la fuente de energía y el suministro auxiliar de aire, desvía a los gases hacia otro filtro o hacia el tubo de escape.

También los actuadores de las válvulas de desvío están arreglados de manera que los gases de escape sean desviados en caso de fallar el sistema. De esta forma, no se requiere de ninguna acción por parte del conductor.

A dicho sistema, se le asignan también otras funciones como detectar fallos y condiciones de operación que ponen en peligro la vida de la trampa.

Limitar el efecto negativo de la caída de presión, para un buen desempeño del motor y para evitar daños al filtro durante su regeneración, es un buen ejemplo de sus funciones.

En caso de detectarse fallas, por ejemplo en los transductores de presión, el filtro es eludido por los gases de escape y aparece la señal de alarma.

#### **V.4 EXPECTATIVAS.**

Algunos de los resultados reportados en la literatura<sup>(13)</sup> demuestran que en los niveles actuales impuestos por las normativas norteamericana y europea se alcanzan sin necesidad de usar métodos de postratamiento pero, para 1994 en E.U.A. y 1996 en la CEE parece que habrá necesidad de hacer uso de filtros regenerables o de catalizadores, con la correspondiente desulfurización del combustible.

Por otra parte, ciertos diseños con recubrimiento catalítico en el filtro de la trampa, están dando buenos resultados para reducir la temperatura de oxidación e incrementar de esta forma la tasa de combustión de las partículas.

La regeneración puede darse espontáneamente en varios ciclos de servicio y de esta manera, se reducen los ciclos de regeneración asistida. No obstante, el sistema de control deberá cuidar que la temperatura en el interior del filtro no rebase nunca un cierto valor, de esta forma se puede garantizar un período de vida útil.

La posibilidad de producción de estos dispositivos depende de su costo, la aceptación de los clientes y el nivel de reducción de partículas requerida.

Paralelamente al desarrollo de las trampas, se están perfeccionando mecanismos de recolección de partículas, así como formas de desalojar el filtro. Parece ser que estos dispositivos, serán una variante más de las formas de operación de dichas trampas.

---

# **CAPÍTULO VI**

## **DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema presentado tiene como finalidad llevar a cabo la filtración mecánica de las partículas de hollín presentes en los gases de motor Diesel en todo momento, así como realizar la regeneración (limpieza) de los filtros en 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.

### VI.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA.

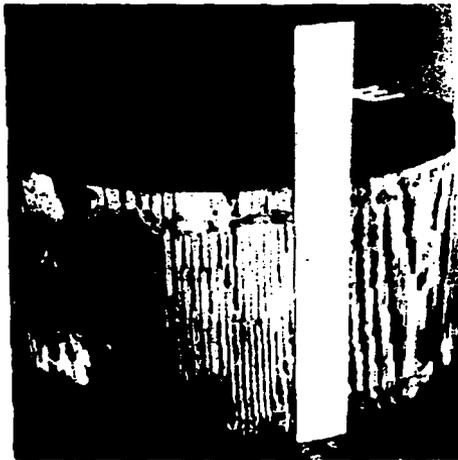
El sistema consta de los siguientes elementos:

- Filtro Cerámico Catalizado.
- Dispositivo de Inercia Térmica.
- Válvulas Selectoras.
- Actuadores Neumáticos.
- Amplificador de Flujo.

- Electroválvula.
- Circuitería y Tuberías.
- Sistema Electrónica de Control.

## VI.2 Filtro Cerámico Catalizador.

Como ya sea mencionado con anterioridad, que en este proyecto se utilizaron filtros cerámicos catalizados donados por Degussa® cuyas características se describen en el tema 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.



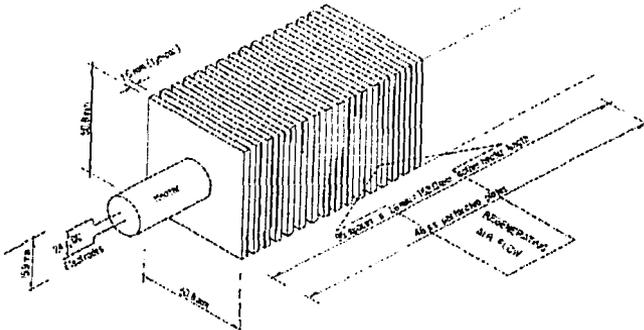
**Figura VI.1 Monolito Cerámico con Impregnación Catalítica  
Degussa DF-345®**

### VI.3 Dispositivo de Inercia Térmica (DIT).

Su función es de 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 Dispositivo de Inercia Térmica (DIT en lo sucesivo para abreviar) utiliza tres resistencias eléctricas asociadas en una envoltura 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 envoltura 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 cuando la temperatura 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 VI.2 Resistencia "Fierod"® con su Area Extendida de Transferencia de Calor.**

#### **VI.4 Válvulas Selectoras.**

El sistema cuenta con dos válvulas selectoras para su funcionamiento. Las válvulas se encuentran a la salida de los filtros y 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 esta formada por un disco y un vástago que se desplaza 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 esta formada por dos válvulas de mariposa colocadas perpendicularmente de forma tal que una de ellas permanece cerrada mientras la otra permanece abierta.

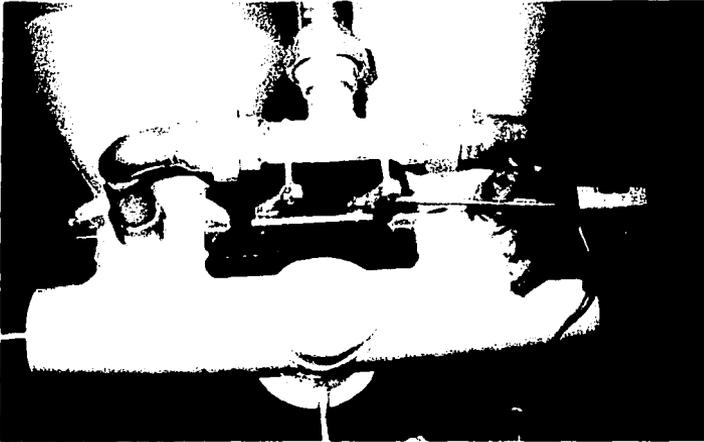
Las válvulas cuentan con un eje acoplado a un mecanismo especial que realiza su función a través de un cilindro neumático.

#### **VI.5 Actuadores Neumáticos.**

El sistema de regeneración de los filtros requiere del uso de dos actuadores o cilindros neumáticos para su funcionamiento. Uno de ellos acciona la válvula que dirige el flujo de gases de escape del motor hacia uno u otro de los filtros catalizados.

El otro actuador 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 proporcionado por el fabricante.



**Figura VI.3 Vista de Planta de las Válvulas y Actuadores Neumáticos Instalados en el Sistema de Filtración.**

Los cilindros utilizados son fabricados por la compañía 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 fricción generada entre los diversos elementos es mínima. Los dos actuadores neumáticos cuentan además con elementos magnéticos para final de carrera, que permiten asegurar la posición exacta de las válvulas acopladas a dichos actuadores.

#### **VI.6 Amplificador de Flujo.**

El sistema cuenta con un amplificador de flujo, cuya función es inducir el flujo de aire de regeneración a través del DIT. El dispositivo seleccionado para esta aplicación es un amplificador de flujo tipo transvector modelo 952 de la marca Vortec®.

Este dispositivo tiene una capacidad de hasta  $5\text{m}^3/\text{min}$ . Bajo las condiciones a las que se espera operar, el dispositivo funciona por medio de aire comprimido y se encuentra controlado neumáticamente mediante una de las electroválvulas del sistema, a su vez accionada por el sistema electrónico de control.

#### **VI.7 Electroválvulas.**

El sistema neumático usa dos electroválvulas para el control de los elementos utilizados. Una de las electroválvulas controla el accionamiento de los actuadores o cilindros neumáticos.

La otra electroválvula se utiliza para el control del amplificador de flujo. Para el control de los actuadores neumáticos se utiliza una electroválvula 5/2 vías, dado que se utilizan cilindros de doble efecto.

La razón de utilizar una sola válvula es que ambos cilindros neumáticos actúan de forma simultánea, y pueden controlarse con el mismo dispositivo. Para el control del amplificador de flujo se utiliza una electroválvula 2/2 vías, dado que el funcionamiento del amplificador puede compararse al de un cilindro de simple efecto.

### **VI.8 Circuitería y Tuberías.**

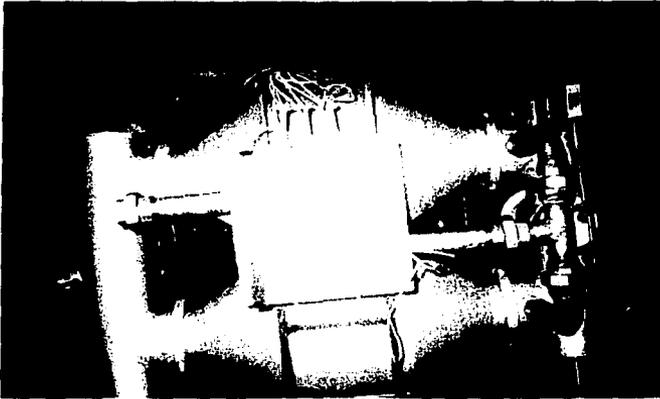
Dentro del sistema de filtración y regeneración de partículas pueden distinguirse básicamente tres circuitos o sistemas, con características propias en cuanto al tipo de gases que manejan y a los ductos y tuberías que utilizan. Estos tres circuitos son: el del aire comprimido que alimenta los elementos neumáticos, el del aire de regeneración para los filtros; y el de gases de escape del motor.

Todos los elementos mencionados hasta el momento forman parte de al menos uno de los tres sistemas de aire y gases mencionados. El circuito de aire comprimido está formado por todas las mangueras que alimentan a las electroválvulas y otros elementos neumáticos. La alimentación de las electroválvulas en el sistema instalado se realizará a través del compresor del sistema de frenos del camión.

La alimentación de las electroválvulas y del amplificador de flujo se realiza a través de manguera plástica reforzada  $\frac{1}{2}$ " de diámetro. La presión de operación de este caso es aproximadamente de  $6 \text{ kg/cm}^2$ . La alimentación de los actuadores neumáticos se realiza a través de manguera plástica de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro estandarizada para los actuadores utilizados.

El sistema de aire de regeneración incluye todos los ductos que van del amplificador de flujo al dispositivo de inercia térmica, y de éste a los filtros. En todos los casos, el sistema utiliza tubería de acero inoxidable de 1" de diámetro y ¼" de espesor. La razón de utilizar acero inoxidable en este caso es disminuir al máximo la corrosión del material debida a las altas temperaturas a las que circula el aire de regeneración.

Por último, el sistema de gases de escape incluye los ductos provenientes del escape del motor y que llegan a los filtros catalizados, y los ductos que van de los filtros a la atmósfera. En este caso, se utiliza tubería de acero inoxidable de 4" de diámetro.



**Figura VI.5 Vista Superior del Sistema Filtrante.**

---

# **CAPÍTULO VII**

## **DISEÑO DE UN PROTOTIPO**

## DISEÑO DE UN PROTOTIPO

En el sector de transportes de nuestro país, una estimación burda deja ver de inmediato que cerca del 90% de la carga que se mueve en el territorio nacional utiliza motores Diesel, casi el 100% del servicio foráneo de pasajeros (incluyendo los Ferrocarriles Nacionales) y una buena parte del servicio urbano de transporte público, utiliza también este combustible para llevar a cabo sus funciones.

Este hecho influyó posiblemente en la decisión para poner en marcha este proyecto de investigación por parte de la U.N.A.M, dado que México no puede quedarse atrás en su legislación, más aún cuando se aprobó la vigencia del Tratado de Libre Comercio de Norteamérica.

Bajo este marco de referencia, se procedió, a llevar a cabo una investigación, para desarrollar un sistema capaz de integrarse a los motores Diesel de servicio pesado que operan en las diversas regiones del país, pero sobre todo en el Area Metropolitana de la Ciudad de México.

## VII.1 PROTOTIPO.

A continuación se describe el desarrollo del diseño de un sistema de filtrado de partículas Diesel para vehículos de servicio pesado. 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, obteniéndose así un filtrado continuo de partículas con menores restricciones en cuanto al número de ciclos de regeneración o a la duración de éstos.

El proceso de regeneración se lleva a cabo mediante la inyección de un flujo de aire caliente en sentido inverso al del proceso de filtrado, el aire es calentado mediante el DIT, el cual es calentado hasta la temperatura de regeneración mediante un banco de resistencias eléctricas.

El empleo de los filtros catalizados permite la combustión a bajas temperaturas (aproximado 450°C) del material atrapado; por lo que puede llevarse a cabo dicha incineración dentro de los filtros con bajo riesgo de fractura por efectos de fatiga térmica.

Sé cuenta con un sistema de control y adquisición de datos, diseñado basándose en un microcontrolador, que monitorea las caídas de presión en los filtros, la temperatura de regeneración, el volumen de aire de regeneración y la temperatura dentro del DIT. Dicha lecturas sirven para realizar las operaciones de control necesarias para obtener un funcionamiento óptimo del sistema de filtrado y regeneración.

Las lecturas se almacenan en una tarjeta de memoria RAM, que puede desmontarse para vaciar los datos en una computadora personal, con el fin de evaluar el funcionamiento del sistema durante períodos prolongados de tiempo.

Uno de los requerimientos de diseño es la posibilidad de instalar este dispositivo de filtrado en un autotransporte de servicio pesado. La figura VII.1 muestra el esquema general del sistema propuesto con todos los elementos que lo forman.

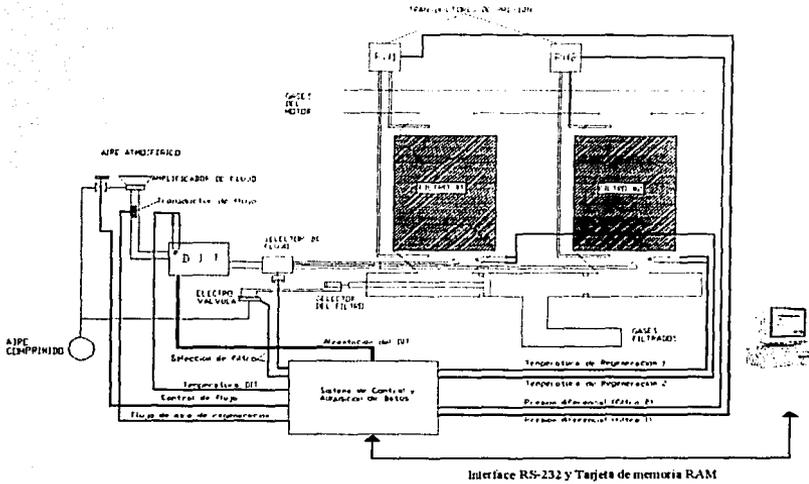


Figura VII.1 Diagrama Esquemático del Sistema de Filtrado.

## VII.2 ELEMENTO FILTRANTE.

Para el sistema propuesto, se selecciono un monolito cerámico marca Corning® tipo EX-80. El elemento cerámico cuenta con un baño catalítico propiedad industrial de Degussa®, A.G., Frankfurt, Alemania. Las características principales de estos monolitos se muestran en la tabla VII. 1.

La cerámica Corning<sup>®</sup>, combinada con el baño catalítico de Degussa<sup>®</sup>, representan el último avance en tecnología de filtrado de partículas generadas durante el proceso de combustión incompleta que se lleva a cabo en las cámaras de los motores Diesel.

<b>Características del elemento Corning<sup>®</sup> tipo EX-80</b>	
Tamaño medio del poro ( $\mu\text{m}$ )	13
Eficiencia Inicial (%)	87
Eficiencia Final ( <i>filtro cargado en %</i> )	92
Caída de presión ( <i>cmHg/g de hollín filtrado</i> )	0.1
Porosidad (%)	48
Coefficiente de expansión térmica ( $\times 10^{-7}$ cm/cm/°C 25-800°C)	4.0

<b>Características del Filtro Degussa<sup>®</sup></b>	
Tipo	DF 345
Metal Precioso ( <i>g/unidad</i> )	23
Disposición Física ( <i>celdas/cm<sup>2</sup></i> )	15.5
Pared cerámica ( <i>mm</i> )	0.4
Diámetro Exterior ( <i>m</i> )	0.286
Longitud ( <i>m</i> )	0.203

**Tabla VII.1 Características del Elemento Filtrante Seleccionado.**

El elemento EX-80 de Corning<sup>®</sup> 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 480 000 Km, cuando los gradientes térmicos involucrados no superan los  $\pm 35^\circ\text{C}/\text{cm}$ .<sup>(25)</sup>

Esto se consigue disminuyendo el coeficiente de expansión térmica del material, manteniendo su resistencia mecánica y modulo de elasticidad. Pruebas de laboratorio realizadas por el fabricante mostraron que los esfuerzos térmicos provocados durante la regeneración, incluso cuando ésta nos se controla, se encuentran por debajo del limite del 66% de la resistencia del material.

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  $T \approx 700^\circ\text{C}$  a  $T \approx 450^\circ\text{C}$ , con lo que se facilita el proceso de regeneración de los filtros al manejar los flujos de aire de menor temperatura.

### **VII.3 DISPOSITIVO DE INERCIA TERMICA (DIT)**

La regeneración de hollín en los filtros cerámicos, ya sean catalizados o no, requieren en la mayoría de los casos, el uso de una corriente de aire con temperatura suficiente para calentar las partículas hasta un punto de ignición y con una concentración mínima de oxígeno para permitir la incineración o limpieza del filtro.

Para estos fines se diseñó un dispositivo de inercia térmica, el cual genera y almacena energía en forma de calor hasta el momento en que alguno de los filtros necesita regeneración; en dicho momento se induce un flujo de aire a través del DIT mediante el amplificador de flujo. La energía almacenada se transfiere entonces a la corriente de aire y ésta se envía al filtro que debe regenerarse.

#### **Construcción**

El dispositivo de inercia térmica consta de los siguientes elementos:

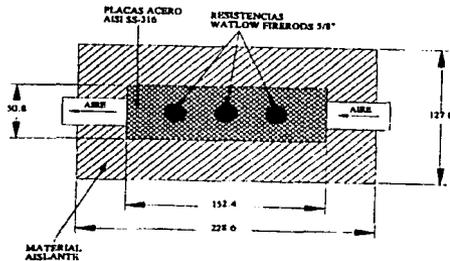
- Elementos calefactores

- Superficie extendida
- Material aislante
- Terminales de control

Los elementos calefactores utilizados para el DIT consisten en tres resistencias eléctricas tipo Firerods®, fabricadas por la empresa Watlow Electrical Engineering Corp. Con una capacidad de 600W cada una, (1,8 KW totales)

Las resistencias se energizan con 24V de CD disponibles en un autobús de pasajeros o en un camión de carga de servicio pesado, las resistencias se alimentan mediante un motor-generador instalado para este propósito, o bien la alimentación se puede obtener del propio alternador del camión.

La superficie extendida está formada por 48 placas de acero inoxidable ASI 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 para alojar las resistencias eléctricas. La figura VII.2 muestra una vista lateral del DIT.



**Figura VII.2 Vista lateral interna del DIT.**

El conjunto de resistencias más la superficie extendida se coloca dentro de una envolvente metálica de acero inoxidable, con una capa de aislante para alta temperatura con el fin de minimizar las pérdidas de calor hacia el exterior, puesto que el DIT debe alcanzar temperaturas de 1000°C en ciclos alternativos de calentamiento-enfriamiento. Cada una de las resistencias cuenta con dos termopares tipo K, de tal forma que se puede monitorear y controlar la temperatura de las resistencias.

### **Funcionamiento**

El DIT funciona en períodos cíclicos consistentes en:

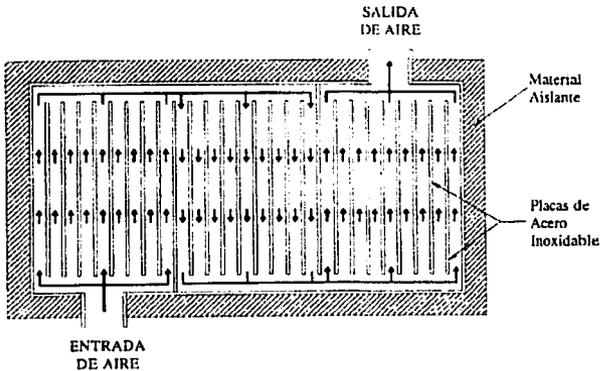
1.- Período de almacenamiento de energía térmica. El sistema de control interrumpe la alimentación de las resistencias cuando la señal enviada por los termopares indica que la temperatura en alguna de ellas alcanza el valor de 950 °C.

2.- No existe flujo de aire a través del dispositivo.

3.-Una vez que los filtros necesitan de limpieza, el suministro de aire con la temperatura necesaria (>450 °C) se induce mediante el control electrónico. El aire inyectado al interior del DIT recorre tres veces la superficie extendida de las resistencias. La figura VII.3 muestra un esquema del recorrido del aire.

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 VII.3 muestra un esquema del recorrido del aire en el interior del dispositivo.



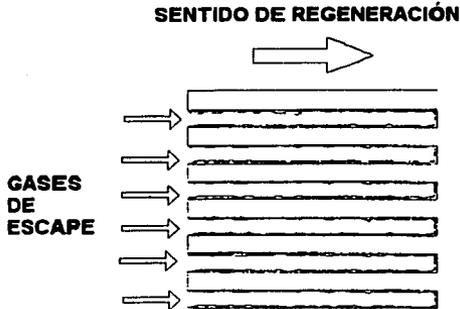
**Figura VII.3 Flujo de aire a través del DIT.**

#### VII.4 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 de 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 sistema general de este tipo de sistema de regeneración se aprecia en la siguiente figura VII.4.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



**Figura VII.4 Esquema de Regeneración Tradicional.**

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.

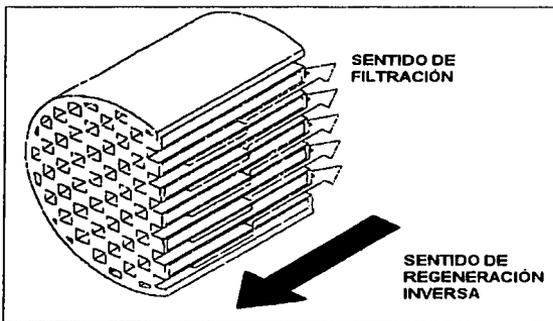
Los resultados obtenidos experimentalmente demuestran una regeneración incompleta del filtro y señala una concentración mínima del 5% de oxígeno en el flujo de aire regenerante.

Por otra parte, la determinación del rango aceptable de carga de partículas para garantizar la regeneración completa del filtro es uno de los problemas más complejos en los que se refiere este sistema de control.

### VII.5 REGENERACIÓN INVERSA.

El sistema de regeneración que nosotros proponemos podría resultar en una regeneración completa del filtro y en un menor tiempo de regeneración que el sistema tradicional, 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.

La diferencia esencial del esquema radica 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 VII.5 Esquema de Regeneración Inversa.**

Las principales ventajas al inyectar la corriente de aire regenerante en sentido inverso son una mayor eficiencia en la incineración del material particulado y mejor disipación de calor en el material cerámico.

En tanto que en un esquema con flujo regenerante directo las partículas de hollín podrían escapar antes de consumirse, ayudadas por la presión acrecentada en el escape, en el esquema de regeneración inversa no puede suceder esto, pues el flujo de aire se opone a la salida de las partículas.

El límite de esta oposición es el arrastre de las partículas disminuidas al filtro paralelo, donde se deben quedar atrapadas en lugar de escapar a la atmósfera, en caso de que no se quemen durante el arrastre por el gas caliente, cosa que es de esperarse si existe una concentración mínima de oxígeno presente en el flujo.

Por otra parte, el aire regenerante se lleva gran parte de la energía liberada en la combustión, evitando la concentración de energía en el material cerámico.

Una gran diferencia que existe entre la regeneración directa con la regeneración inversa, es que este último suponiendo que no existe la regeneración completa del filtro en un ciclo, la inyección inicial de la corriente de aire en sentido inverso tiende a destapar el filtro, favoreciendo más su limpieza.

Entre las desventajas potenciales está la posibilidad de que si la presión del aire regenerante es muy grande, se arrastre algunas de las partículas de mayor grueso que no pudieron encenderse, al filtro paralelo y crezca la contrapresión en el escape del motor, provocando a sí su ahogamiento.

También existe la posibilidad de que algunas partículas minúsculas sean arrastradas y forzadas a través del filtro paralelo por efecto del mismo flujo, escapando a la atmósfera.

Por otro lado, el empleo de un microcontrolador permite que el sistema de control y adquisición de datos sea extremadamente versátil, de peso ligero, tamaño reducido y bajo consumo de potencia. Sin la intervención del operador del vehículo.

De acuerdo con todos los elementos necesarios ya antes descritos, se procedió al desarrollo del prototipo de pruebas. Para completar la construcción del prototipo se cuenta con los siguientes elementos que se integran para la elaboración del sistema:

- Motor Mercedes-Benz.
- Sistema de Control Electrónico.
- Ductería de Interconexión.
- Grupo de Motor Alternador de 24V 105 Amp, CD.

Todos los elementos anteriores propiamente interconectados, permiten lograr un sistema de filtrado mecánico de partículas Diesel y su regeneración en sentido inverso a la captura de las mismas.

---

# **CAPITULO VIII**

## **TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE PARTÍCULAS**

## MINITÚNEL DE DILUCIÓN

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

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

### VIII.1 TÚNELES DE DILUCIÓN

Para la medición de partículas, se han diseñado ciertos dispositivos, llamados túneles de dilución, en los cuales se propicia un mezclado homogéneo entre los gases de escape y aire limpio<sub>(3)</sub>.

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

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

Otros túneles de dimensiones más reducidas, denominados minitúneles de dilución, realizan esta función aunque, sólo en condiciones estables del motor. No son capaces de realizar una dilución adecuada en pruebas de ciclo transitorios. No obstante, presentan ciertas ventajas que se comentan más adelante.

### **Principio de Operación**

De acuerdo al tamaño del motor, se conduce hacia el túnel el caudal íntegro de los gases de escape o una fracción de éstos. Ya en su interior, se mezcla con aire limpio y fresco el cual es suministrado y medido por un soplador ó ventilador.

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

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

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

Para determinar la masa de partículas que emite el motor, se recoge una muestra de la mezcla diluida, la cual, intenta mantener la velocidad del gas que existe en el túnel mientras se extrae una fracción de gases diluidos.

Un balance de masa, permitirá determinar la fracción de los gases de escape que se diluyen. El caudal se conoce mediante el medidor de flujo del sistema de muestreo, midiendo los gases diluidos no muestreados y mediante un orificio calibrado u otro dispositivo<sup>(27)</sup>.

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

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

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

El tamaño de los filtros puede variar, siendo común el de 4.7 cm de diámetro. Dichos filtros se deben acondicionar en una cámara de humedad controlada, antes y después de la recolección de partículas para ser pesados y así, con la diferencia, se obtiene la masa de partículas de la muestra.

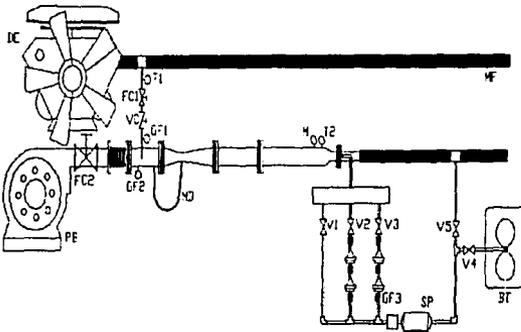
## VIII.2 MINITÚNEL DE DILUCIÓN

El minitúnel de dilución puede considerarse como un caso particular de túnel de dilución, trabajando siempre con dilución parcial y con unas dimensiones más reducidas (y por tanto con menor costo), que lo invalidan para homologación aunque no para trabajos de investigación y desarrollo. Algunos investigadores aseguran a ver encontrado con este sistema diferencias menores del 5% respecto a las medidas realizadas con el túnel de dilución de flujo total.

### Principio de Operación

Existen diferentes diseños de minitúneles de dilución y por tanto, algunas características pueden variar de un modelo a otro. Sin embargo el principio básico de operación es común.

El equipo que se describe está representado por el esquema de la figura VIII.1 en el cual, el ventilador aspira simultáneamente una fracción de los gases de escape (a través de la línea de muestreo) y el aire para distribuirlos.



Símbolo	Descripción
PB	Ventilador
GF1	Medidores de flujo
TT	Tubo de muestra de gases de combustión
PSP	Tubo para muestra de partículas
FH	Portafiltras primario y secundario
SP	Bomba de vacío
FC1, FC2	Controladores de flujo
T1, T2	Termópares
M	Manómetro
DE	Motor Diesel
VC	Válvula check
MD	Manómetro diferencial
V1, V2, V3, V4, V5	Válvulas 1,2,3,4 y 5
BT	Bolsa de teflon
MF	Manguera flexible

**Figura VIII.1 Esquema del Minitúnel, Motor y Diagrama de Conexiones**

El aire que es suministrado se ajusta mediante una válvula a la tasa de dilución para obtener una temperatura de filtrado  $T_f=50^\circ\text{C}$ . Además para garantizar que dicha temperatura se mantiene en el rango adecuado, se cuenta con una calefacción eléctrica para evitar todo riesgo de condensación de agua dentro de los Portafiltras ó sobre los filtros.

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

### VIII.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS PARTÍCULAS.

Una vez que las partículas han sido recolectadas, se dispone de varios medios para medirlas, individual o colectivamente. El método depende del tamaño y de la naturaleza de la superficie sobre la cual fueron depositadas.

### **Determinación de la masa**

La materia que compone a las partículas pueden tener componentes volátiles o fácilmente oxidables. Para evitar riesgos el procedimiento de muestreo y el de medida debe ser normalizado. Los filtros que se utilizan para recoger las partículas deben ser pesadas antes y después de la toma de muestras, exactamente en las mismas condiciones de humedad y temperatura, a efecto de garantizar que la diferencia de peso se deba exclusivamente a la masa de partículas recolectadas.

### **Clasificación por tamaño**

La medición de partículas mediante microscopio electrónico, normalmente se hace con fotografías ya sea en película o en impresiones. El microscopio electrónico de transmisión no es muy apropiado para partículas de más de 10  $\mu\text{m}$ , debido al cambio visual tan reducido y además que, con esa resolución tienen que estudiarse las partículas individualmente.

Para la caracterización de las partículas Diesel, es más apropiado el microscopio electrónico de barrido puesto que el campo visual es mayor y además, permite conocer su morfología y su composición elemental con el sistema de rayos X que tiene integrado.

## **VIII. 4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS PARTÍCULAS.**

La caracterización de las especies químicas, asociado con la materia de las partículas, es una tarea complicada. Dichas especies cubren un amplio rango de compuestos químicos tanto orgánicos como inorgánicos.

Los compuestos orgánicos son especialmente numerosos y puede esperarse que, varíen en tipo y cantidad conforme cambien las condiciones de operación del motor, así como las características del combustible.

El hecho de que los compuestos orgánicos sean numerosos, garantiza que la cantidad de alguna especie, en una muestra, será pequeña.

### VIII.5 DISEÑO DE UN MINITÚNEL.

Hoy en día es necesario la tecnología electrónica de punta en todos los equipos de laboratorio, pues facilita tanto el manejo, lectura, almacenamiento y procesos de la información así como el uso del mismo equipo.

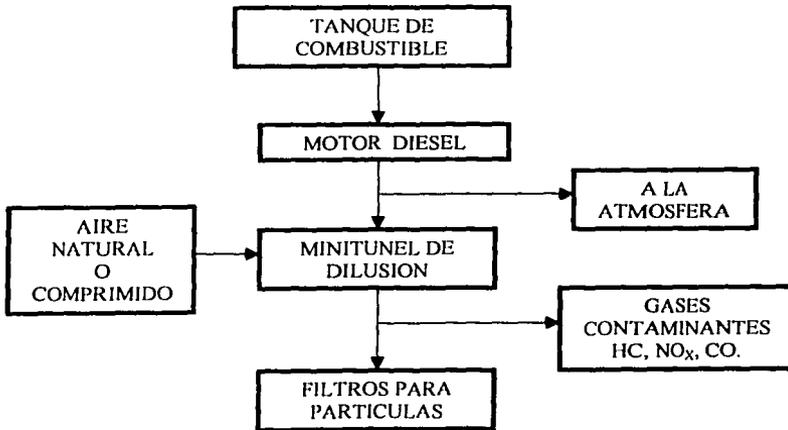
Así, que conjuntamente con el apoyo de otro proyecto del Instituto de Ingeniería fue el de implementar la instrumentación y el control de un minitúnel de dilución de gases, que cumpla con los requerimientos de los usuarios y con las normas de construcción de equipos de estas características, además de prescindir en un porcentaje considerable de la importación de la tecnología y con esto disminuir el costo del equipo.

Con esto se propuso utilizar un minitúnel de dilución parcial de gases de escape en lugar de un túnel de flujo total, que equipado con la electrónica adecuada permita llevar a cabo mediciones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), partículas sólidas (PM por sus siglas en inglés) y opacidad (K). Tarea que hasta el momento la puede realizar el monopolio paraestatal de PEMEX-IMP.

El principio básico de diseño del minitúnel de dilución, consta de tomar muestras de gases crudos y diluirlos simultáneamente con aire atmosférico filtrado hasta alcanzar la temperatura de equilibrio y de esta forma poder llevar a cabo todas las mediciones correspondientes. Mediante un sistema de extracción y bombeo la muestra diluida se pasa por un filtro para capturar partículas, a la vez que se efectúan las mediciones correspondientes de los contaminantes (HC, NO, y CO). La dilución se hace con objeto de simular las condiciones ambientales que se presentan en la vida real.

La figura VIII.2 muestra el principio de operación del minitúnel de dilución en diagramas de bloques. Actualmente el minitúnel se encuentra en la etapa de instrumentación electrónica debido a que ya se realizó la construcción de éste. Sé esta trabajando en la implementación del sistema que cuantifique las emisiones contaminantes en partes por millón (ppm) que emite un motor Diesel.

Las pruebas se realizan en estado estable de acuerdo a las normas Europeas de los trece nodos. Se emplearán accesorios e instrumentos electrónicos con el uso de sensores para cuantificar el monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, e hidrocarburos.



**Figura VIII.2 Diagrama a Bloques del Principio de Operación del Minitúnel.**

El presente trabajo utiliza la norma CEE-R49 (Comunidad Económica Europea, ahora Unión Europea) para implementación del minitúnel, que permita cuantificar emisiones de motores a Diesel en estado estable.

El procedimiento para las pruebas será el siguiente: se dispone a tomar una muestra de gases a la salida del escape del motor Diesel, en una tubería de acero inoxidable, para disminuir el riesgo de contaminar las partículas con óxidos de hierro que se lleva a una cámara de dilución para lograr una mezcla gases-aire; el aire se toma de la atmósfera, se pasa por un filtro colocado a la entrada del ventilador, tomando en consideración una relación aproximada 4:1 de aire-gases respectivamente, pero por el criterio de diseño, debe tener la mezcla diluida una temperatura máxima de 52°C., después la mezcla se pasa por un diámetro suficientemente pequeño (venturi), con el propósito de lograr una turbulencia y así tener una mezcla homogénea.

A la salida del venturi se tiene una cámara estabilizadora de flujo con el objetivo de controlar la mezcla, por último se realiza un monitoreo de gases. La CEE-R-49 indica que la toma de la muestra se debe de realizar en un intervalo de tiempo de 4.5 minutos como mínimo y 6 como máximo, con esto se logrará un mejor monitoreo de la muestra.

Los contaminantes sujetos a control según la Norma Oficial Mexicana (NOM) son hidrocarburos sin quemar (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas de carbonáceas producto de la combustión incompleta en los cilindros del motor (PM u hollín). Aunque debido a limitaciones monetarias el minitúnel sólo es capaz de llevar a cabo mediciones en estado estable (CEE-R-49) y no en estado transitorio como marca la EPA.

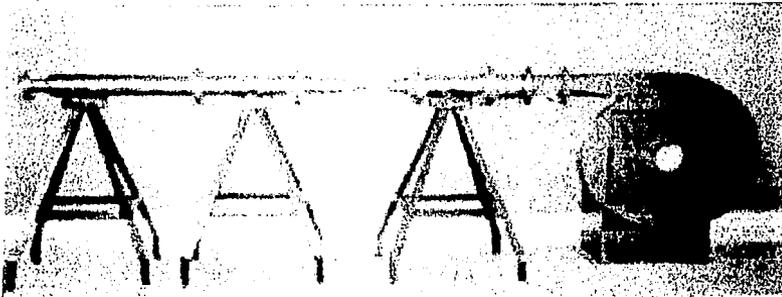
El control de la presión, se regula mediante una bomba de succión debido a que se mantienen constantes las revoluciones del motor del ventilador de aire para dilución. Las variaciones de presión en el túnel de dilución bajo este esquema de control no van a variar de  $\pm 250$  Pa.

### VIII.6 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL MINITÚNEL.

- Ventilador: es el elemento que suministra la cantidad de aire atmosférico filtrado requerido de acuerdo a los gases de combustión.
- Cámara Mezcladora: en esta parte se realiza la mezcla de aire y gases.
- Venturi: este otro elemento provoca un flujo turbulento para obtener una mezcla homogénea de aire y gases.
- Tubo con Rejillas: este otro elemento permite obtener un flujo laminar.
- Cámara Estabilizadora: su función es la de estabilizar el flujo de la mezcla ya que al final de este se realiza un monitoreo de los gases.
- Sistema de Medición: se realiza el monitoreo de los diferentes constituyentes (HC, NO<sub>x</sub>, CO y partículas)

### VIII.7 CONSIDERACIONES TEÓRICAS.

De acuerdo a las características requeridas de diseño del minitúnel, se fabricó en acero inoxidable cédula 40, tipo AISI SS-316, que tiene excelente resistencia a la corrosión, con un contenido de 12% de Cr. Para que al exponerse al oxígeno a altas temperaturas no permita la formación de óxidos de hierro, para evitar la contaminación de las partículas.



**Figura VIII.3 Minitúnel**

La de terminación de construir un minitúnel de dilución parcial de gases, se debe a que en el país no se ha desarrollado una forma de medir cada uno de los componentes de los gases de combustión del motor Diesel.

El proyecto representa un esfuerzo para limitar en lo posible daños al ser humano, debido a la inhalación de sustancias tóxicas presentes en los gases de escape, por lo que se requiere de esfuerzos adicionales en inversiones tanto de capital como de formación de recursos humanos que se aboquen a la solución del problema.

---

# **CAPÍTULO IX**

## **ENSAYOS EXPERIMENTALES**

# ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales realizados se han llevado a cabo en el Laboratorio de Control de Emisiones de la Facultad de Ingeniería de nuestra Universidad. El propósito principal de dichos ensayos ha sido el de conocer la influencia que ejerce el tipo de combustible y las condiciones de operación del motor respecto a los niveles de emisión de partículas.

Las condiciones que se establecieron para la realización de dichos ensayos se determinaron conforme a las recomendaciones del Fabricante del Motor Diesel (Mecedez-Benz México) y fundamentalmente, a la colaboración del equipo de trabajo del laboratorio.

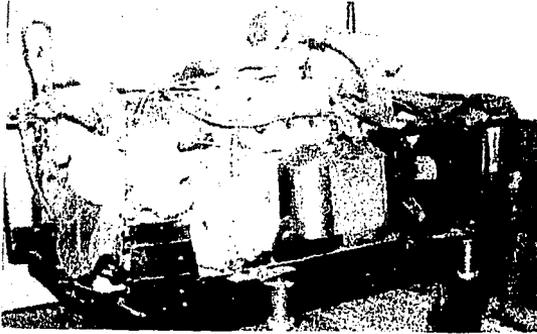
## IX.1 INSTALACIÓN DEL SISTEMA.

La instalación en la que se ha desarrollado los ensayos experimentales se muestra en la figura IX.1, la cual, consiste en el equipamiento e instrumentación de todo el sistema auto-regenerable ya montado en el banco de pruebas del Laboratorio de Emisiones de la Facultad de Ingeniería.



**Figura IX.1 Sistema Autoregenerable en Banco de Pruebas.**

El motor se encuentra instalado en una sala insonorizada, sobre una bancada de hormigón armado cuyas dimensiones son de 1300x1700x480 mm, cubierto con chapa de acero. Se une a una bancada mediante cuatro soportes, calculados para eliminar las vibraciones en el rango de operación del motor.



**Figura IX.2 Motor Mercedes Benz Montado en Banco de Pruebas**

El eje del motor va unido, mediante una transmisión cardán, a un dinámometro hidráulico, capaz de opera hasta una velocidad de 3500 r.p.m. y absorbe una potencia máxima de 515 kW.

La instalación cuenta con diversos sistemas de medición y dispositivos de control los cuales respectivamente, permite conocer los valores de los parámetros que intervienen en la operación del motor y asimismo su operación en torno al valor de un parámetro que se elija.

#### **Motor Diesel y Pruebas Bases.**

Las pruebas bases consisten a las condiciones de operación sin el sistema de tratamiento posterior de gases de escape de un motor Diesel Típico.

Para este proyecto se seleccionó un motor a Diesel Turbocargado de la marca Mercedes-Benz.

La razón para seleccionar un Motor Mercedes-Benz con las características que se describen en la Tabla 1, se debe a que un porcentaje muy altos de estos motores se utilizan como fuente de energía para el Sistema de Autotransportes Urbanos de la Ciudad de México.

Esto hace peculiarmente atractivo este tipo de motor, pues puede llegar a obtenerse una solución que límite considerablemente la emisión de partículas sólidas a la atmósfera del Area Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM en lo futuro para abreviar).

Las pruebas bases correspondientes al motor seleccionado, fueron hechas en la planta. Es decir la fuente de información de la Tabla 1, es precisamente del fabricante del Motor, en este caso Mercedes-Benz México, S.A. de C.V.<sup>(42)</sup>

Potencia Máxima a 2600 r.p.m., kW	126.8
Par Máximo a 1450 r.p.m., Nm	600
Presión Media Efectiva a 1100 r.p.m. kPa	1937
Consumo Especifico de Combustible (g/kWh)	
A Potencia Máxima	221.2
A Par Máximo	198.7
Volumen Desplazado, seis cilindros en línea, m <sup>3</sup>	5.96x10 <sup>-3</sup>
Relación de Compresión	16:1

**Tabla IX.1 Características Principales del Motor Mercedes-Benz  
Tipo UM366LA.**

### **Medida de Humos.**

Para la medición de humos se utilizó un opacímetro de la marca Horiba, éste hace pasar un volumen de gases de escape a través de un filtro de papel el cual, se oscurece al retener cierta cantidad de partículas. Una celda fotoeléctrica mide la opacidad del filtro ensayado, comparándola con la de uno limpio. Su escala es de 0 a 9.8, con una resolución de  $\pm 0.1$ . La exactitud que estima el fabricante es de  $\pm 3\%$  de los valores medidos.

### **IX.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.**

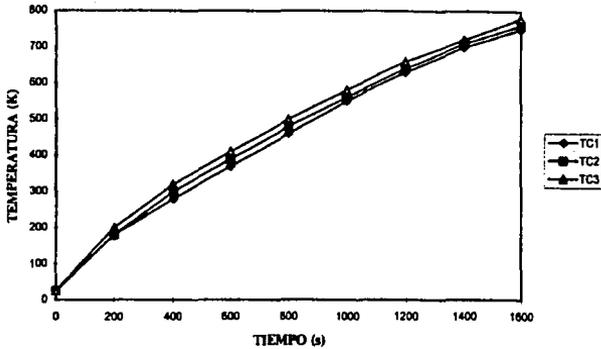
Es indispensable tener un conocimiento previo, tanto la rutina de ensayos como del equipo que se emplea. Esto permite salvar obstáculos que se presentan durante el desarrollo experimental y al mismo tiempo, eliminar una gran parte del riesgo de obtener resultados erróneos.

En este caso, se tuvieron que tomar una serie de precauciones durante toda la puesta en marcha del equipo.

### **IX.3 PRUEBAS PRELIMINARES AL DIT.**

Se comprobó en el laboratorio el comportamiento del DIT. El experimento se llevó a cabo durante las fases de almacenamiento de energía cuando no existe flujo de aire inducido a través del dispositivo.

Las resistencias se energizaron con la ayuda de un conjunto motor-generator y un juego de dos baterías de 12V conectadas en serie. Los resultados obtenidos en la prueba de calentamiento del DIT se muestran en la figura 3.



**Figura IX.3 Pruebas de Banco del Dispositivo de Inercia Térmica.**

Las variables marcadas en la figura corresponden a:

TC1 = Temperatura de aire a la entrada del DIT

TC2 = Temperatura media del metal dentro del DIT

TC3 = Temperatura del aire estacionario a la salida del DIT

En la figura IX.3 se observa que la curva se puede aproximar a dos rectas, una entre 100°C y 380°C y otra entre 380°C y 800°C. Dada la variación mínima de pendiente en ambos tramos de la curva, el calentamiento de las resistencias puede considerarse lineal.

#### IX.4 TOBERA DE INYECCIÓN.

El aire de regeneración debe fluir de manera uniforme a través de los filtros, con el fin de evitar gradientes elevados de temperatura en su interior y que se pueda llevar a cabo una regeneración uniforme. Es por ello que se optó por diseñar una tobera para emplearla como expansor del flujo regenerante. Las ecuaciones (1) a (3) modelan el comportamiento de la tobera cuando se tiene aire como fluido de trabajo:

$$cp \approx \gamma * R \quad \gamma - 1 \tag{1}$$

$$T_{01} = (T_1 + 0.5V_1^2) / Cp \tag{2}$$

$$Ma^2 = 5 \left( \frac{T_{01}}{T_1} \right) - 1 \tag{3}$$

Donde:  $T_1$  = Temperatura del DIT °C

$T_{01}$  = Temperatura a la entrada de la tobera

$V_1$  = Velocidad del aire m/s

$Cp$  = Calor Específico del aire

$R$  = Constante de los gases  $m^2s^{-2}K^{-1}$

$\gamma$  =  $Cp/Cv$ : relación de calores específicos

Los resultados de la simulación pueden verse en la Tabla IX.2 y Figura IX.4. En dicha figura puede verse que con un diámetro de salida en la tobera de 3.56 mm se alcanza un número de Mach mayor a uno, lo que garantiza la expansión del fluido.

Diámetro de La Tobera	Flujo de Aire		
	25m <sup>3</sup> /hr	30m <sup>3</sup> /hr	50m <sup>3</sup> /hr
2.54	0.02	0.02	0.04
1.905	0.04	0.04	0.07
1.270	0.08	0.10	0.16
0.635	0.32	0.38	0.63
0.508	0.50	0.59	0.99
0.457	0.61	0.73	1.22
0.406	0.77	0.93	1.55
0.355	1.01	1.21	2.02
0.304	1.38	1.65	2.75

Tabla IX.2 Estimación del Flujo de Aire vs Diámetro de la Tobera.

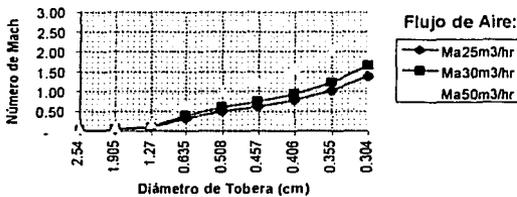


Figura IX.4 Flujo de Aire vs Variaciones del Número de Mach

## IX.5 SISTEMAS DE MEDICIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES.

Los sistemas que se utilizan son los que se establecen en las normas EPA y de la CEE, para realizar la cuantificación de los diferentes constituyentes (HC, NO<sub>x</sub>, CO y partículas)

- **Partículas Sólidas:** El procedimiento para pesar y capturar las partículas sólidas de los gases de combustión (ppm), emplea una balanza analítica (con una resolución de .001mg) y filtros de 7 cm de diámetro, para un tamaño de 10 µm.
- Los gases se hacen pasar por una serie de filtros (figura IX.5), primario y secundario en los cuales se recolectan las partículas sólidas que contienen los gases de escape, una vez que se recolectaron las partículas, se llevan los filtros a pesar en la balanza analítica (figura IX.6), obteniendo así, conforme a la fórmula uno, la masa de partículas, cabe mencionar que los filtros se pesan en un ambiente controlado y que antes de pesarse se dehumidifican para obtener una medición precisa de las partículas.

### Ecuación para la medición de partículas

$$Wfs - Wf = Wp \quad (1)$$

## IX.6 REALIZACIÓN DE MEDICIONES.

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 tomó tanto muestras de gases filtrados como gases de muestra sin filtrar.

El proceso de regeneración en el sistema de los filtros cerámicos catalizados se llevó a cabo según lo descrito en capítulos anteriores, obteniendo finalmente el objetivo planteado.

### IX.7 PRUEBAS EN MINITÚNEL.

Poniendo en marcha el minitúnel y llevando a cabo las primeras pruebas, en las cuales se cuantificaron las partículas y la opacidad (k) de los gases de escape emitidos por el Motor Diesel.

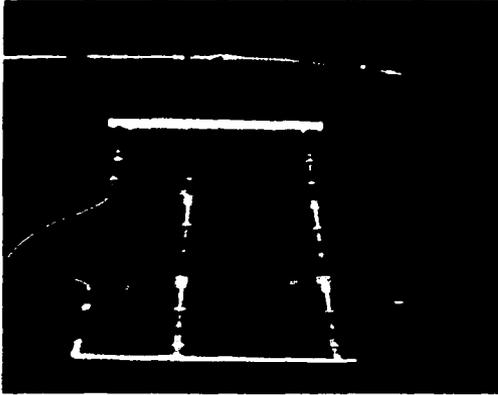
Las primeras pruebas tuvieron una duración de cinco minutos y aunque no se tiene el minitúnel instrumentado al 100% para el monitoreo de las condiciones en las cuales se llevaron a cabo las pruebas estas arrojaron resultados muy interesantes.

Las muestra de gases se introdujeron en un extremo del minitúnel de dilución (el cual se aprecia en la figura IX.5) en donde se mezcla con una alta proporción de aire limpio, los gases diluidos se succionan mediante una bomba de vacío que se encuentra en el otro extremo del túnel.



**Figura IX.5 Filtración de Gases a través del Minitúnel.**

De manera que se llevan a un ducto donde se capturaron las partículas suspendidas mediante filtros de micropore®, insertados en los Portafiltros primario secundario.



**Figura IX.6 Portafiltros (Primario y Secundario).**

Los filtros de la marca micropore® fueron pesados mediante una balanza analítica horas antes del ensayo, para conocer la influencia de la humedad del ambiente, sobre el peso de dichos filtros.

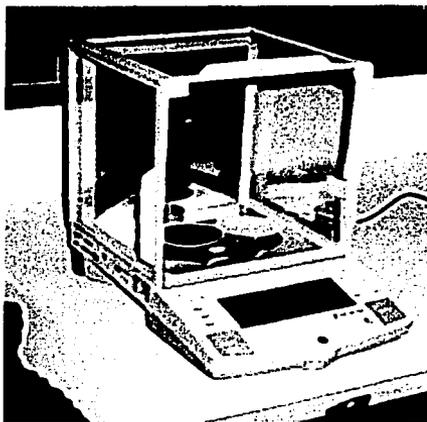
Una vez que se pesaron los filtros y que se instalaron para recoger la muestra de partículas, se controló la temperatura de filtrado ( $T \leq 52^{\circ}\text{C}$ ) de dos formas.

1. - Aumentando la tasa de dilución.

Como este parámetro es la relación entre el caudal de gases diluidos y los gases crudos, al aumentar su valor se incrementa el caudal de aire, lo que hace que descienda progresivamente la temperatura de la muestra.

2. - Usando un cambiador de calor: aire - gases diluidos.

Este dispositivo se emplea sólo en casos extremos, cuando la temperatura de la muestra es demasiado elevada y para disminuirla no es suficiente con aumentar la tasa de dilución.



**Figura IX.7 Bascula Analítica.**

Se observo que se tiene una temperatura en la toma de partículas de aproximadamente de 45°C que cae dentro del rango de lo que marca la norma, además el no tener el fenómeno de Termofóresis.

Termofóresis: es el fenómeno causante de que las partículas suspendidas en un gas viajen hacia las paredes de los ductos que lo conducen, debido al tamaño de la capa límite térmico entre fluido y paredes, ya que las partículas con mayor energía tenderán a dirigirse a hacia las zonas con menor energía (pared de ducto).

Por otra parte, al evaluar un tipo de dispositivo anticontaminante como son los filtros cerámicos regenerativos se observo que es muy confiable este tipo de dispositivo, ya que la disminución de la cantidad de partículas recolectadas en los filtros micropore® y el valor de la opacidad (k) fue considerable, con relación a las cantidades observadas en los filtros cuando no se uso el dispositivo, lo cual permite cumplir con uno de los objetivos del minitúnel que es el de evaluar dispositivos anticontaminantes.

Por ultimo con la implementación del sistema se pudo observar el comportamiento y desempeño de todas las variables, información con lo que se pudo obtener gracias al control e instrumentación electrónico del sistema.

### **Correlación entre Partículas y Opacidad.**

Es conveniente recordar la definición de Humo y Opacidad. El humo es el residuo resultante de una combustión incompleta, que se compone en su mayoría de carbón, cenizas, partículas sólidas y líquidas visibles en la atmósfera, mientras que la Opacidad la podemos definir como el estado en el cual la materia impide parcialmente o en su totalidad el paso del haz de luz.

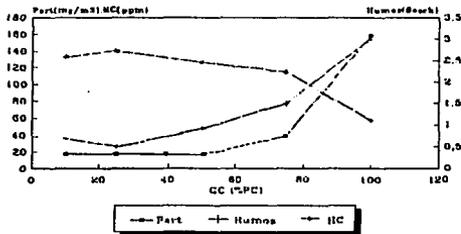
Debido a las dificultades que se presentan en la medición de partículas, diversos investigadores han propuestos estimar la concentración de partículas a través de la medición de humos, que es considerablemente más sencilla. Para ello se utilizó el opacímetro como equipo de medición.

Los primeros intentos no encontraron una relación adecuada puesto que al medir el hollín no se diluían los gases de escape. Posteriormente, al medir la emisión de partículas con túneles de dilución se ha podido evaluar, casi con exactitud, la masa de carbón emitida.

### Comportamiento del Motor al Variar el Grado de Carga.

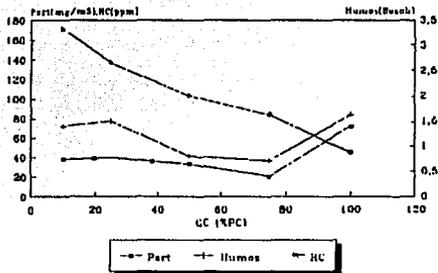
La influencia de la emisión de partículas se analiza mediante el grado de carga, no obstante se debe de reconocer que a elevadas cargas los niveles son considerablemente más altos que a bajas cargas.

A bajas y medianas cargas, los HC mantienen elevados niveles de emisión independientemente de la regulación de avance. Es probable que al reducir el avance, aumente la tasa de oxidación de hollín ya que diferentes fuentes reportan que a medida que se retrasa el punto de inyección, disminuye la emisión de humos, lo que se puede apreciar en las siguientes figuras.



Influencia del Grado de Carga sobre la Emisión de Partículas.  
**Figura IX.8 Motor a Carga de 1200 r.p.m.**

A elevados grados de carga:



Influencia del Grado de Carga sobre la Emisión de Partículas,

Figura IX.9 Motor a Carga de 2000 r.p.m.

### Comportamiento del motor al Variar el Régimen de Giro.

La influencia del régimen sobre la emisión de partículas se analiza de dos formas:

- Manteniendo un par constante.
- Manteniendo el grado de carga constante.

El primer caso se observa que un amplio rango del régimen, la reducción de partículas es reducida. Sin embargo a elevadas velocidades, los niveles de emisión se incrementan rápidamente.

A bajo régimen.

Los elevados niveles de emisión de partículas mantienen una composición con mayor contenido de hollín, HC. Humos y consecuentemente partículas.

A elevado régimen.

La masa de partículas emitidas no es tan elevada como a bajas velocidades puesto que descienden los niveles de hollín y ocasiona una disminución progresiva de HC, mientras el nivel de humo aumenta. Esto presupone un cambio gradual en la composición de las partículas.

Mediante estas dos formas de análisis se llega a puntos de convergencia como era de esperarse:

1° Los mayores niveles de emisión de partículas se registran a cargas elevadas y bajo régimen.

2° La influencia del régimen de giro sobre la emisión de partículas disminuye al reducir la carga.

En la Figura IX.10 se visualizan 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 los 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 IX.3 se muestra la comparación en peso de los filtros antes y después de realizar las pruebas.

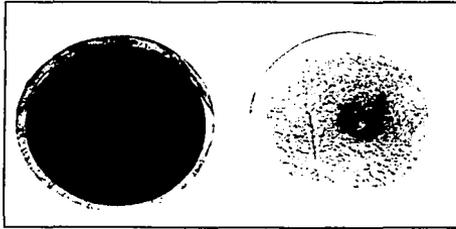


Figura IX.10 Filtros Micropore.

### RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES.

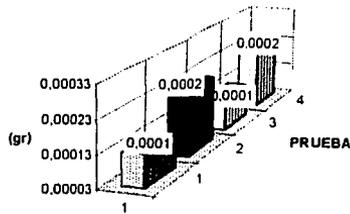
No. DE PRUEBA	VEL. DEL MOTOR	POT. DEL MOTOR	TORQUE DEL MOTOR	GASTO DE DIESEL	TEMPERATURA	OPACIDAD	APACIDAD	TEMP. ACEITE DE MOTOR	PESO DEL FILTRO DESPUES	PESO DEL FILTRO ANTES	PESO DE PARTICULAS
1	1190	47	207	2.34	10	0.042	1.4	80.0	0.1389	0.1387	0.0002
2	1181	45	199	2.73	10	0.038	1.8	83.0	0.1457	0.1457	0.0000
3	1250	60	256	1.86	5	0.046	1.6	85.0	0.1416	0.1414	0.0002
4	1212	62	264	2.01	5	0.035	1.7	85.0	0.1406	0.1405	0.0001
5	1206	60	258	2.23	10	0.06	2.7	94.0	0.1434	0.1431	0.0003
6	1200	47	250	3.12	10	0.062	2.9	97.0	0.1444	0.1439	0.0005
7	1228	47	208	3.29	10	0.065	3.2	97.0	0.143	0.1421	0.0009
8	1205	57	250	1.86	5	0.065	3.0	97.5	0.143	0.1424	0.0006

TABLA IX.3 TABLA DE RESULTADOS.

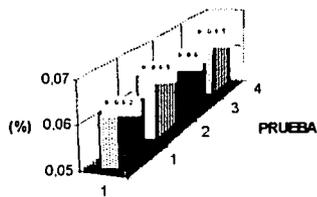
**GRAFICAS DE RESULTADOS (PRUEBAS PRELIMINARES)**

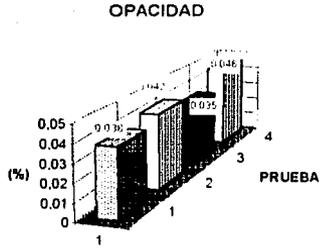
**GRAFICAS CON FILTRADO**

**PESO DE LA PARTICULAS**

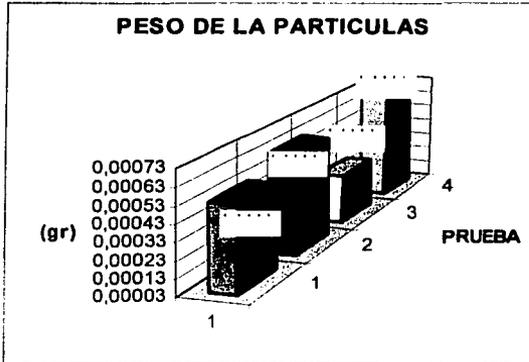


**OPACIDAD**





**GRAFICAS SIN FILTRAR**



## IX.8 COMBUSTIBLE DIESEL Y ANÁLISIS DE LABORATORIO.

El combustible seleccionado corresponde al que comercializa el monopolio paraestatal Petróleos Mexicanos "PEMEX" en el AMCM, con la denominación de Diesel SIN.

Se procedieron a efectuar pruebas de análisis básicos, para comparar con los valores reportados por Instituto Mexicano del Petróleo IMP-PEMEX. En un principio se recurrió a la Facultad de Química de la UNAM, con el objeto de contar con la opinión de un laboratorio independiente.

En virtud del que el departamento de química analítica de la Facultad de Química de la UNAM no cuenta con el equipo adecuado para llevar a cabo el análisis, hubo necesidad de recurrir a otro laboratorio independiente, siendo en este caso el Departamento de Físico-Química aplicada del Instituto de Investigaciones Eléctricas ("IIE"), el encargado de llevar a cabo el análisis correspondiente.

PROPIEDADES	UNIDADES	IMP - PEMEX	IIE
Destilación 10%	°C	220	
90%	°C	316	
TFE	°C	349	
Temperatura de Flamación	°C	91	68, 108 <sup>a</sup>
Temperatura de Ecurrimiento	°C	-15	
Número de Cetano	-----	53	
Azufre Total	PPM	487	1200
Corrosión al Cu	-----	1b	
Carbón Ramsbottom	% P	0.02	0.12 <sup>b</sup>
Agua y Sedimento	% Vol.	< 0.05	< 0.1
Viscosidad 37°C	SU	35.1	37.4
Color ASTM	-----	L 1.0	
Contenido de Aromáticos	% Vol.	23	3 0
Peso específico	-----	0.83	0.84 <sup>c</sup>

**Tabla IX.4 Cuadro Comparativo del Combustible Diesel SIN.**

#### Notas Adicionales a la Tabla IX.4

- <sup>a</sup> Temperatura de Ignición
- <sup>c</sup> Carbono Conradson
- <sup>e</sup> Relativo al agua

Los resultados del análisis proporcionado por IMP-PEMEX se comparan en la Tabla IX.4, mostrando también los resultados del IIE, con el objeto fundamental de tener un análisis independiente para poder verificar la información publicada en varios medios informativos (radio, T.V., prensa etc.), respecto a las cualidades del combustible denominado Diesel SIN.

En un principio se había pensado llevar acabo algunas pruebas y también con Diesel especial que corresponde a la otra denominación que PEMEX comercializa en el resto del país

Sin embargo esta alternativa se desecho debido a que la Paraestatal de referencia aumenta en forma progresiva a la distribución de Diesel SIN en toda la República y tiene como objeto promover su uso en todo el País<sub>(44)</sub>.

El análisis del IMP-PEMEX puede compararse fácilmente con el del IIE, en la Tabla IX.4. Del cuadro comparativo, se infiere que aún cuando se trata de un combustible de buena calidad, sus características no necesariamente coinciden con las que PEMEX a publicó intensamente en todos sus programas informativos, e incluso en el Simposio Sobre la Calidad de los Combustibles, que se llevó a cabo en el IMP<sub>(44)</sub>.

El aspecto más preocupante es el del contenido de azufre pues se determino mediante cromatografía liquida de alta resolución, habiéndose determinado una cifra de aproximadamente de dos y media veces que lo que PEMEX reportó, lo que implica un 250% de error y que desde luego puede significar el envenenamiento de los filtros Catalizados.<sup>(45)</sup>

Otro aspecto digno de mencionarse como resultado del análisis mencionado, es el hecho de que el contenido de aromáticos también es 25% mayor que el indicado difusamente por PEMEX.

El contenido de aromáticos comparado con otro combustible Norteamericano esta limitado por un máximo de 10% y el análisis del combustible de PEMEX, contiene un 300% de ese límite. Por lo que ya se ha mencionado los aromáticos también influyen en forma decisiva en la generación de partículas sólidas.

---

# **CAPÍTULO X**

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó acabo una revisión breve de la literatura técnica relacionada con la formación de partículas sólidas emitidas por los motores Diesel en sus gases de escape, y ofrecer un panorama global de las teorías de formación de partículas, incluyendo la influencia de las características del combustible así como de los parámetros de operación y diseño del motor. Con ello se pretende sentar las bases para una comprensión ágil de fenómeno y abordar con conocimiento de causa los métodos que conlleven a un control más estricto de la emisión de partículas: postratamiento y diseño del motor.

Con base a los resultados experimentales que se han desarrollado para analizar la emisión de partículas bajo la influencia de parámetros que ya sean mencionado se desprenden algunas conclusiones de utilidad para la contaminación ambiental que sufren algunos países industrializados:

**CONCLUSIONES.**

- ◆ Aún cuando todavía no se tiene una idea precisa del costo asociado a una producción masiva del sistema y de que forzosamente un prototipo debe resultar muy costoso, uno de los objetivos generales es alcanzar un sistema económico en su inversión inicial y óptimo en sus aspectos operacionales.
- ◆ La medición de partículas emitidas por los motores Diesel ha adquirido recientemente una fundamental importancia en México, no sólo por la reciente entrada en vigor de la reglamentación que las limita, sino porque constituye una labor imprescindible para iniciar trabajos de investigación destinados al diseño de motores menos contaminantes. En este sentido la medida de la opacidad del humo de escape sólo constituye al aspecto visual de un problema más amplio como la emisión de partículas.
- ◆ En los Estado Unidos de Norteamérica, tanto como el NIOSH, han aceptado implícitamente que este tipo de emisiones representa un riesgo cancerígeno potencial, especialmente para personas que trabajan en atmósferas sobrecargadas de partículas Diesel.
- ◆ El interés más inmediato se centra en medir el gasto de partículas emitidas por el motor pero también, en el conocimiento de los tamaños de éstas y su composición química, debido por una parte, al efecto fisiológico que puedan tener cuando se encuentran suspendidas en la atmósfera y por otra, a la información de su procedencia pensando en futuros diseños de motores más limpios.
- ◆ Los métodos de medida de emisión de partículas tratan de reproducir las condiciones en que éstas son expulsadas a la atmósfera por el motor, a través de un

proceso de dilución con aire. De esta forma, se tienen en cuenta los efectos dinámicos que sufren las partículas en su trayecto desde el cilindro hasta la atmósfera.

- ◆ A reserva de efectuar las pruebas de campo, la carga adicional sobre la capacidad del motor escogido será apenas de 1.8 kW, que para el motor seleccionado representa apenas un porcentaje del 1.42% de la capacidad nominal. Este porcentaje se verá obviamente reducido para el caso de motores de mayor potencia
- ◆ 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.
- ◆ El tiempo necesario para llevar la regeneración del filtro es mucho menor al tiempo requerido para saturar el filtro paralelo.
- ◆ El esquema de regeneración inversa favorece a la disipación del calor en el material cerámico.
- ◆ La integridad física del material cerámico no se ve amenazada por las temperaturas involucradas en el proceso.
- ◆ La durabilidad del filtro no se ve mermada debido a la fatiga térmica generada por los gradientes de temperatura involucrados.
- ◆ La temperatura máxima de muestreo (52°C) se ha designado arbitrariamente para facilitar la estabilidad térmica de las partículas sobre el filtro y previene que los HC pesados no pasen a través de dicho filtro.

- ◆ Las causas de la formación de las partículas son diferentes para cada uno de los constituyentes de las mismas. El componente mayoritario es el hollín cuyos mecanismos de formación están en función de la temperatura que se alcance durante la oxidación. A elevadas temperaturas (1730-3500°C) predomina la descomposición de las moléculas del combustible, mientras que a bajas temperaturas (< 1400°C) predomina la polimerización y condensación.
- ◆ Parece ser que el uso de los catalizadores se ve como una opción más adecuada de postratamiento, debido a que las trampas de partículas implican grandes inconvenientes como su costo, duración y mantenimiento. No obstante se están mejorando los diseños y es factible que estos dispositivos puedan encontrar aplicación en el parque vehicular.
- ◆ Para pruebas en ciclos transitorios es fundamental el uso de grandes túneles de dilución, ya que sólo con la capacidad de éstos se puede diluir adecuadamente el caudal total de los gases de escape. Las aproximaciones que se han intentado hacer con minitúneles en pruebas transitorias han quedado sólo en eso, en aproximaciones, por lo que no están aceptados oficialmente para la homologación de vehículos, tanto en Europa como en los Estados Unidos. En este sentido los minitúneles pueden usarse para ensayos a régimen establecido.
- ◆ Respecto a la influencia del régimen, se ha observado que los mayores niveles de partículas emitidas se registran a cargas elevadas y a bajo régimen de giro, disminuyendo tal influencia al reducirse la carga.
- ◆ A bajos grados de carga (GC) se aprecia que una masa total de partículas es inferior al de elevadas cargas. La emisión de humo aumenta de acuerdo al GC, mientras la de los HC disminuye de forma monótona.

- ◆ La influencia de la densidad del combustible sobre la emisión de partículas tiene vínculos muy estrechos tanto con el contenido de aromáticos como con la temperatura de destilación, ya que esta última discrimina a los hidrocarburos con mayor peso molecular.
- ◆ El esquema de regeneración inversa aquí propuesto, tiene mérito para la utilización futura y filtrado, que permite alcanzar niveles similares a los que estableció la EPA en 1998. Sin embargo, requiere de esfuerzos adicionales de investigación para convertirlo en un sistema viable.
- ◆ Debe hacerse un esfuerzo por adoptar las normas federales de emisiones de los EUA (EPA), en todo el mundo, un programa gradual sería el más susceptible de aplicarse, dados los altos costos que ello implica
- ◆ Todas las soluciones que se puedan emprender serán forzosamente costosas desde el punto de vista monetario. Sin embargo, ante un posible problema de salud pública, la sociedad debe estar consciente de ello y prepararse para afrontar las fuertes erogaciones necesarias para limpiar el medio ambiente.

---

# COMENTARIOS

## COMENTARIOS

Este presente trabajo representa un primer acercamiento para determinar la funcionalidad del sistema propuesto y estimar el comportamiento del mismo.

Desgraciadamente estas pruebas no se pudieron realizar con el equipo e instrumentación de punta, que se requerían para la realización de dichas pruebas experimentales, esto fue debido a la falta de apoyo económico en el área de investigación de nuestro país.

Es importante señalar que las suposiciones realizadas en el modelo del proceso de combustión de las partículas son validas para condiciones controladas de laboratorio.

Esto significa que durante el régimen de trabajo de un motor Diesel las condiciones del gas de escape varían considerablemente.

Del mismo modo, las constantes de reacción involucradas en la oxidación de hollín en el filtro presentan variación según el régimen de operación del motor y la evolución de la combustión en el filtro.

Esto es especialmente cierto, cuando se supera la temperatura crítica.

Las estimaciones del tiempo requerido para regenerar el filtro al 95% y 99%, están realizadas en un ajuste matemático que supone continuidad y estabilidad en la propagación de la combustión en el filtro.

En realidad el hollín no se deposita uniformemente en el filtro, sino que tiende a concentrarse en la parte más cercana al escape del motor.

El esquema de regeneración propuesto es factible de acuerdo con los contenidos de azufre presentes en el combustible Diesel SIN proporcionados por PEMEX.

No obstante, un análisis independiente del combustible realizado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas difiere considerablemente de los valores reportados por PEMEX por lo que no se puede confiar en contar con la calidad de combustible necesaria para evitar el envenenamiento del recubrimiento catalítico.

#### **INVESTIGACIONES FUTURAS.**

Con esto, el presente trabajo es un intento para establecer un punto de partida en el desarrollo de futuras investigaciones, manteniendo la intención de equilibrar las prestaciones del motor con sus emisiones contaminantes. De esta manera se contribuye a resolver el problema de la contaminación atmosférica que se presenta en las grandes concentraciones urbanas.

Una vez conocida la técnica de muestreo y medición de las partículas Diesel es factible incorporar dicha técnica al conjunto de medidas que evalúen el comportamiento del motor, en instalaciones de motores monocilíndricos que son básicamente de investigación.

Se pretende con ello que los trabajos de investigación a realizar en el futuro dispongan de un elemento de análisis más, a la hora de evaluar el comportamiento global del motor.

Una vez que se haya determinado la reducción en los niveles de partículas por el uso de estos dispositivos, se puede reorientar las líneas de investigación planteando las siguientes cuestiones:

- Si es razonable usar un catalizador que una trampa de partículas en motores de reciente diseño.
- Si una trampa de partículas es más apropiada para motores con algunos años de servicio, será importante reducir su complejidad de operación y garantizar un tiempo razonable de vida útil. El principal aspecto que debe abordarse en este caso, es la forma de regeneración: asistida, combinada con autorregeneración o acoplado dispositivos de recolección sin oxidación.

---

# REFERENCIAS

## REFERENCIAS

1. SEDUE (1990) "**Programa Nacional para la Protección del Medio Ambiente**" 1990-1994, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México.
2. SEMARNAP (1996) "**Programa del Medio Ambiente**" 1995-2000, Poder Ejecutivo Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México.
3. Lipkea W., Johnson J. & Vuk C. "**The Physical and Chemical Character of Diesel Particulate Emissions-Measurement Techniques and Fundamental Considerations**" SAE Paper N° 780108, 1978.
4. Wiedemann B. and Neumann K. H. "**Vehicular Experience With Additives for Regeneration of Ceramic Diesel Filters**" SAE Paper N° 850017, February 1985.
5. Glassman I. "**Combustion**" Second Edition Academic Press, Inc. pp.345-361, 360-375, U.K. 1987.

6. Richard R. & Silbley J. "**Diesel Engine Emissions Control for the 1990's**" SAE Paper N° 880346, March 1988.
7. Cartellieri W. And Herzog P. "**Swirl Supported or Quiescent Combustion for 1990' s Heavy-Duty Diesel Engines Analysis**" SAE Paper N° 880342 February 1988.
8. Corneti G. Messori P. and Operati C. "**Developmente of Ceramic Particulate Trap fou Urban Buses**", ASME Internal Combustion Engine Division ICE-Vol. 4, Texas USA October 1988.
9. Heywood J. "**Internal Combustion Engine Fundamentals**" McGraw-Hill, 1989.
10. Meinrad S & Giorgio C. "**Laboratory Results in Particulate Trap Tecnology**" SAE Paper N 890170, February 1989.
11. Kamimoto T. and Yagita M. "**Particulate Formacion and Flame Structure in Diesel Engines**" SAE Paper N° 890436 February 1989.
12. Yoshihara Y., Kitamachi T, Kita-Ku, Shuichiro N., Ikegami M., Honnmachi Y., Sakio-Ku "**Kinetics of a Soot Formacion Based on a Cluster Theory**" Conference of Mechanism of Non-Uniform Combustion, The Ministry of Education, Science and Culturer of Japan, September 1990.
13. Wall J. Impac of U.S. Emision Regulations on Heavy-Duty Diesel Engine Development in the 1990's Cummins Engenie Company.
14. Helferich R. Yoshida K. & Ogasawara K. "**Reneneration Performance of a Catalized Versus a Non-Catalized Ceramic Membrane Diesel Particulate Trap**" SAE Paper N° 910327, February 1991.

15. Barale R., Bulleri M., Cornetti G., Loprieno N. and Wachter W.F. **"Preliminary Investigation on Genotoxic Potencial of Diesel Exhaust"** SAE Paper N° 920397, February 1992.
16. Asaumi Y., Shintani M. and Watanabe Y. **"Effects of Fuel Properties on Diesel Engine Exhaust Emissions Characteristics"** SAE Paper N° 922214, October 1992.
17. Gulati S. **"Design Considerations for Diesel Flow - Through Converters"** SAE Paper N° 920145, February 1992.
18. Mayer A. & Buck A. **"Knitted Ceramic Fibers - A New Concep for Particulate Traps"** SAE Paper N° 920146, February 1992.
19. **"Motorización del Automóvil-Posibles Soluciones para Ahorro de Energía y Protección del Medio Ambiente"** Lucas Diesel.
20. Kabuto et. Al. **"Associations Between Road Side Diesel Exhaust Pollutions and Femele Lung Cancer Mortality in the Greader Tokyo Area"** (GTA) en la Fourth Annual Meeting of the Internacional Society for Enviorenmental Epidemiology (ISEE) and the Internacional Society of Exposure Analysis, Cuernavaca, Mor., México.
21. Nauss, K and Heidg **"Critical Issues in Assessing the Carcinogenicity of Diesel Exhaust a Synthesis of Current Knowledge"** en Diesel Exhaust 1995.
22. Betts W., Floysand S. and Kvinge F. **"The Influence of Diesel Fuel Properties on Particulate Emissions in European Cars"** SAE Paper N° 922190, October 1992.

23. **"Geometry Controls Diesel Emissions"** Perkins Engine Group SAE Paper N°780113, 1978.
24. Barbella R. Ciajolo A., D' Anna A., Bertoli C. Prati V. **"Formation of Soot and Polycyclic Aromatic hydrocarbons in Direct Injection Diesel Engine"** Workshop and Exposition on Fluidmechanicas, Combustion and Emission in Reciprocating Engines, Capri-Nipoly. April 1990.
25. MacDonald, J. S. y Simon, G. M. **"Development of a Particulate Trap System for a Heavy Duty Diesel Engine"**. SAE Paper 880006.
26. Romero, A. **"Soot Combustion During Regeneration of Filter Ceramic Traps for Diesel Engines"**. SAE Paper N° 960127.
27. Springer K. J. And Bradow R. L. **"Fuel and Additive Effects on Diesel Particulate Development and Demostration of Methodology"** SAE Paper N°760130 February 1976.
28. Anónimo, **"Determination of Particulate Emissions with a Full-Flow Dilution System"**, catalogue; RWTUV. Germany. 1993.
29. Anónimo., **"Automated Fractional Sampling of Particulate Emissions"**, catalogue; Sierra Instruments Inc. Monterrey California.
30. Anónimo., SPC 472 Smart Sampler. , **"Partial Flow Dilution and Particulate Sampling System for Measuring Diesel Engine Emissions"**, catalogue; Austria. January 1991.
31. Anónimo., **"Engine Instrumentation"**, catalogue; AVL., Austria 1990.

32. James P. Lodge Jr. **"Methods Of Air Sampling and Analysis. Intersociety Comitte"** (APCA, ASME, ACS, APWA, ISA,) 3<sup>a</sup>. Edicion.
33. Blake R. Suhre & David E. Foster. **"Diesel Combustion Emissions, and Exhaust Afternatretment"** (SAE 1992). "In cylinder soot deposition rates due to thermophoresis in a direct injection Diesel engine"
34. Paul T. Kostechi & Edward J. Calabrese. **"Diesel Fuel Contamination"**. Mc
35. Anónimo, **"Diluted Particulate Measurement with Partial Flow Sampling"** (SPC 472) Smart Sampler AVL, Austria 1991.
36. Anónimo, 1993 Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), **NOM-PA-CCAT-007-93 "Niveles de Emisión de Vehículos a Diesel con peso Vehicular a 3857 Kg"** publicado en el Diario Oficial de la Federación el 23-06-93.
37. Norton Harry **"Sensores y Analizadores"** pp. 539-544 Edit. Gustavo Gilli; Barcelona, España, 1984.
38. Mendel O. **"Practical Piping Nandbook"** pp. 1810-1811. Pennwell books E.U. 1981.
39. White F. **"Mecanica de Fluidos"** Mc. Graw Hill México 1992.
40. Holman J. **"Transferencia de Calor"** 1<sup>a</sup> Edición CECSA, México 1993.
41. Engler, B., and Muller, W., Degussa, A.G., **"Anorganische Chemieprodukte, Autoabgaskatalysatoren"**, comunicación personal, 17-05-1994.

42. Fernández Zayas, J.L. Instituto de Ingeniería, comunicación personal a "**Mercedez-Benz México, S.A. de C.V.**", 11-mayo de 1994.
43. IMP-PEMEX, Anónimo, "**Caracterización de Diesel Sin**", comunicación personal 11-05-1993.
44. Manzanilla, F. PEMEX, "**Programa Nacional de Refinación**", Simposio de Combustibles, IMP-PEMEX, 12-05-1994.
45. Romero, A.F., "**Sistema de Postratamiento de Gases de Combustión Diesel**" proyecto COPERA 031, Instituto de Ingeniería UNAM 3137, reporte final 1994.