



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO.

---

Facultad de Ingeniería

**Efecto del Biodiesel de origen animal en las  
emisiones y prestaciones del motor Diesel.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A

**CARLOS FERNANDO GONZÁLEZ  
HERNÁNDEZ**

DIRECTOR DE TESIS: DR. ROGELIO  
GONZÁLEZ OROPEZA



CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO DEL 2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# ÍNDICE

	Página
<b>Introducción</b>	3
<b>CAPITULO 1 Biocombustibles</b>	
1.1 Biocombustibles	7
1.2 Bioetanol	10
1.3 Biodiesel	12
1.4 Biodiesel de origen animal	17
<b>CAPITULO 2 Emisiones Diesel y su medición</b>	
2.1 Gases contaminantes (NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , HC)	20
2.2 Partículas Diesel	22
2.3 Medición de partículas diesel	25
2.4 Sistema RAVEM	27
<b>CAPITULO 3 Dispositivos y métodos para el control de emisiones</b>	
3.1 Convertidor catalítico	38
3.2 Trampas de partículas	41
3.3 Recirculación de gases	43
3.4 Normatividad de control de emisiones	46
<b>CAPITULO 4 Ensayos experimentales</b>	
4.1 Planeación de los ensayos	52
4.2 Datos experimentales	56
4.3 Análisis de los resultados	73
4.4 Conclusiones	85
<b>Referencias</b>	87

## Introducción

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por la humanidad desde tiempos remotos. Hacia el año 1970 las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura (a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación y su inminente extinción), como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias.

Debido a esta necesidad latente de energía renovable, a través de los años se han buscado alternativas, dentro de las que destacan el desarrollo de combustibles alternos como son el uso del hidrógeno, gas L.P., gas natural, celdas de hidrógeno y biocombustibles.

En el caso particular de los biocombustibles, que son producidos a partir de la biomasa y son considerados, por tanto, una energía renovable, éstos se pueden presentar tanto en forma sólida (residuos vegetales, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales) como líquida (bioalcoholes, biodiesel) y gaseosa (biogás, hidrógeno).

La percepción actual es que los biocombustibles no podrán sustituir totalmente a los combustibles fósiles, pero sí complementarlos en forma de diferentes mezclas con el fin de reducir la dependencia respecto del petróleo, a diferencia de otras alternativas que son excluyentes (por ejemplo, los gases licuados del petróleo) y necesitan cierta duplicación del sistema motor. En el mismo sentido, los biocombustibles pueden utilizar la misma red logística de distribución que los combustibles fósiles.

Es preciso recordar que uno de los principales impulsos del actual desarrollo de los biocombustibles está relacionado con sus características medioambientales, y en especial, con el hecho de que son la medida de mayor efecto (si no la única) para disminuir las emisiones del sector transporte y reducir su efecto en relación con el cambio climático.

**Perspectivas Nacionales [2]**

En México se está a la espera de la aprobación de la ley de biocombustibles para que inicie la construcción de cuatro biorefinerías, de las cuales dos abastecerán a Petróleos Mexicanos para que use etanol como oxigenante en las gasolinas, mientras que las otras dos se dedicarán a la exportación de este biocombustible, por lo que empresarios han iniciado la conformación de asociaciones con productores mexicanos de maíz amarillo para asegurar el abasto del insumo. [1]

Especialistas, recomiendan considerar que los combustibles alternos pueden ser competitivos, solo en países con déficit de petróleo y México es un país petrolero donde: extraer un barril de petróleo cuesta 5 dólares; obtener uno de gasolina 20 dólares y, en contraste un barril de etanol anhidro con 33% menor contenido calorífico entre 120 y 150 dólares.

Asimismo, señalan que las grandes ciudades mexicanas por las condiciones de su parque vehicular, antiguo e inadecuado; con el manejo y uso menos estricto de los combustibles; sin conocer exactamente la naturaleza y causas de las emisiones; tendrían un pronóstico más desfavorable porque la investigación hecha en California en una muestra similar; concluye que el problema de emisiones contaminantes se agravaría con la mezcla de etanol.

Respecto a la Iniciativa PEMEX desde un inicio promovió la "no obligatoriedad en el uso de etanol", lo cual determina la necesidad de "desarrollar el mercado". Para esto y para que se realice la introducción de etanol en gasolinas, PEMEX señala la necesidad de realizar una evaluación de factibilidad con precios de PEMEX, estudio de impacto ambiental, discusión con armadoras de automóviles. Pareciera que aún falta mucho para lograr que el etanol realmente se utilice en México por ello es singular la celeridad que se le ha dado a la aprobación de esta legislación.

Se ha insistido en las bondades que tendría para los productores pero esto no se vislumbra claramente. También se plantea que una política de promoción en el uso de biocombustibles sería factible en México si:

- Se parte de que el uso de la tierra es prioritariamente destinado a producir alimentos y que otras producciones tales como la de los biocombustibles se supeditan a que no haya hambre en la población. Se establece un esquema de subsidios que beneficie a la producción primaria y que permita que los mismos productores participen en la producción de biocombustibles, para darle valor agregado a su producción.
- Está considerado como un elemento más dentro de una política energética general que indique claramente la necesidad de reducir los consumos de energía, específicamente en el sector del transporte. Se promueve en su totalidad las diversas fuentes formas de energía renovables y no tan sólo los biocombustibles.

En ese contexto, una política de promoción a los biocombustibles deberá determinar cuales son las mejores fuentes de biocombustibles (aceites usados, biogas, tratamiento de basura) teniendo como prioridad que se garantice la soberanía y seguridad alimentaría, la salud humana y animal y el medio ambiente de todas las regiones del país.

Tomando en cuenta este contexto, en esta tesis se pretende estudiar el efecto del biodiesel de origen animal en un motor de encendido por compresión, en cuanto a emisiones contaminantes y prestaciones de dicho motor en comparación a un combustible diesel ordinario (con 350 partes por millón de azufre), con el objetivo de encontrar las ventajas y desventajas, desde el punto de vista científico y tecnológico, que conlleva el uso de este tipo de combustibles, los cuales pueden representar una alternativa viable al grave problema ambiental y a la inminente extinción de los recursos no renovables. Para lograr este fin se realizarán ensayos basándose en la prueba R49 [17] de la Unión Europea para la medición de emisiones; también se realizarán mediciones del consumo de combustible, temperatura, par y potencia del motor.

Para medir las emisiones y el consumo de combustible de dichas pruebas se hace uso del sistema RAVEM (Ride Along Vehicle Emissions Measurement, medición de las emisiones del vehículo durante el recorrido) por sus siglas en inglés, el cual es un dispositivo de medición de emisiones portátil, dentro de los demás dispositivos que se utilizan destacan termopares para la medición de la temperatura y un banco de pruebas con el cual se medirá la potencia del motor, a través de un dinamómetro de banco.

# **CAPITULO 1: BIOCOMBUSTIBLES**

## 1.1 Biocombustibles

Los biocombustibles son sustancias procedentes de materias orgánicas renovables (biomasas) que pueden ser empleadas como combustibles [3]. La biomasa, es toda materia que almacena energía solar, en la naturaleza (plantas terrestres y acuáticas), o en residuos de materiales y animales (agricultura y estiércol). Es materia orgánica, formada por hidratos de carbono y compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno producida en áreas de la superficie terrestre por organismos específicos [4]. Se suele utilizar para hacer referencia al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de estos recursos biológicos, esa energía la podemos recuperar por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles. Cuando la materia orgánica libera su energía almacenada a través de un proceso natural o artificial, devuelve al ambiente la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que consumió durante su crecimiento, por lo que se dice que este ciclo es CO<sub>2</sub> neutro, es decir que la biomasa no afecta la contaminación en el ambiente. Mientras el consumo de la masa orgánica aprovechada para usos energéticos sea igual o menor que la producción general, se puede considerar a la biomasa como un recurso renovable, por eso la importancia de mantener el equilibrio en bosques y cultivos Fig. (1.1).

Las energías renovables como la solar y la eólica dependen de la disponibilidad del sol o viento para producir energía y ésta solo puede utilizarse, en ausencia de estas fuerzas naturales, con baterías u otros medios de almacenamiento. En el caso de la biomasa, la energía puede transformarse en combustible líquido o gaseoso para ser usado en sistemas de generación eléctrica o en sistemas de transporte, es decir para motores de combustión interna, en reemplazo de los combustibles tradicionales (gasolina, diesel, gas). [5]



*Fig. 1.1 Cultivos de maíz y soya para la producción de Biocombustibles*

En la actualidad los biocombustibles mas utilizados son el bioetanol y el biodiesel.

Como toda tecnología en pleno desarrollo existen distintas ventajas y desventajas en cuanto al uso y producción de ésta.

*Dentro de las ventajas que se espera, tengan, este tipo de combustibles y en especial el biodiesel destacan:*

- Desde el punto de vista medioambiental, la utilización de biocombustibles contribuye a la reducción de emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera. Concretamente, el biodiesel no emite dióxido de azufre, lo cual ayuda a prevenir la lluvia ácida, y disminuye la concentración de partículas en suspensión emitidas, de metales pesados, de monóxido de carbono, de hidrocarburos aromáticos policíclicos y de compuestos orgánicos volátiles. El bioetanol, en comparación con la gasolina, reduce las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos. (Fig. 1.2)



*Fig. 1.2 Contribución de los Biocombustibles al medio ambiente*

- Además, al ser fácilmente biodegradables, los biocombustibles no inciden negativamente en la contaminación de suelos. En última instancia, ayudan a la eliminación de residuos en los casos en que los mismos se utilizan como materia prima en la fabricación de biocombustibles (por ejemplo, los aceites usados en la fabricación de biodiesel).
- En cuanto al aspecto energético, los biocombustibles constituyen una fuente energética renovable y limpia. Además, su utilización contribuye a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles y otorga una mayor seguridad en cuanto al abastecimiento energético.
- Desde el punto de vista socioeconómico, los biocombustibles constituyen una alternativa de empleo dentro de la industria agraria.

*En cuanto a los posibles inconvenientes o desventajas destacan:*

- Desde el punto de vista ético, los biocombustibles para muchos, representan un obstáculo para la agronomía alimenticia, algunas personas creen que al darle prioridad a la siembra para la producción de estos combustibles se deja en segundo término la alimentación de países no desarrollados.



Boligan, *Crisis y etanol*. Periódico El Universal 25 de Mayo 2008

- En cuanto al aspecto ambiental, se piensa que al darle prioridad a la siembra dirigida a este ámbito, se contribuirá a la tala excesiva y con se agravará el problema de la deforestación.
- A bajas temperaturas los biocombustibles puede empezar a solidificar y formar cristales, que pueden obstruir los conductos del combustible.
- Por sus propiedades solventes, debido al metanol, puede ablandar y degradar ciertos materiales, tales como el caucho natural y la espuma de poliuretano. Es por esto que puede ser necesario cambiar algunas mangueras y retenes del motor antes de usar biodiesel en él, especialmente con vehículos antiguos.
- Sus costos aún pueden ser más elevados que los del diesel de petróleo. Esto depende básicamente de la fuente de aceite utilizado en su elaboración. Además de crear una dependencia directa al precio de las materias primas.

Existen muchas opiniones encontradas en cuanto a la factibilidad del uso y producción de este tipo de combustibles, pero para todos es innegable que debido a la inminente extinción del petróleo y a la creciente necesidad de energías limpias y renovables los biocombustibles representan una opción cada vez mas cercana y viable, por lo cual se tendrá que hacer uso de ésta y buscar alternativas para reducir las posibles desventajas que puedan conllevar el uso de este tipo de tecnología. Para con esto obtener una energía limpia, renovable y sin problemas a largo plazo.

## **1.2 Bioetanol. [7] [8]**

Es un alcohol, elaborado mediante un proceso similar al de la cerveza, donde el almidón de los cultivos ricos en él, (especialmente el maíz), son convertidos en azúcares y éstos a su vez, fermentados y convertidos en etanol. Por último el etanol es destilado, adquiriendo su forma final. En ocasiones, es transformado en un éter, llamado etil terbutil éter, compuesto con características oxidantes. Es utilizado para incrementar el octanaje y mejorar la calidad de las emisiones de la gasolina, al convertirla en un combustible oxigenado. El Bioetanol se puede extraer de cereales (maíz, trigo, avena, cebada), papa, betabel, caña de azúcar, biomasa forestal, residuos pecuarios, y residuos de las cosechas y las agroindustrias.

El proceso es similar al que se emplea en la fabricación de alcohol donde la materia orgánica se muele primero y luego, por efecto de la levadura y el calor, se rompen las moléculas complejas de azúcares en otras más simples resultando el etanol. El etanol  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  o alcohol etílico es un líquido claro de un olor característico que puede disolverse en el agua. Fig. 1.3 [7].



Fig.1.3 Etanol

El Bioetanol ofrece diversas posibilidades de mezclas para la obtención de biocombustibles con los siguientes nombres y propiedades:

**E5:** El Biocombustible E5 significa una mezcla del 5% de Bioetanol y el 95% de gasolina normal en volumen. Esta es la mezcla habitual y mezcla máxima autorizada en la actualidad por la regulación europea; sin embargo, es previsible una modificación de la normativa europea que aumentará este límite al 10% (E10) ya que diferentes estudios constatan que los vehículos actuales toleran sin problemas mezclas hasta el 10% de Bioetanol y los beneficios para el medioambiente son significativos.

**E10:** El Biocombustible E10 significa una mezcla del 10% de Bioetanol y el 90% de Gasolina normal. Esta mezcla es la más utilizada en EEUU ya que hasta esta proporción de mezcla los motores de los vehículos no requieren ninguna modificación y e incluso produce la elevación del número de octano mejorando el desempeño de los motores y obteniendo una notable reducción en la emisión de gases contaminantes.

**E85:** Mezcla de 85% de Bioetanol y 15 % de gasolina, utilizada en vehículos con motores especiales. En EEUU las marcas más conocidas ofrecen vehículos adaptados a estas mezclas. También se comercializan, en algunos otros países como Brasil y Suecia, los llamados vehículos FFV (Flexible Fuel Vehicles) o Vehículos de Combustibles Flexibles con motores adaptados que permiten una variedad de mezclas.

**E95 y E100:** Mezclas hasta el 95% y 100% de Bioetanol son utilizados en algunos países como Brasil con motores especiales.

**E-DIESEL:** El Bioetanol permite su mezcla con diesel utilizando un aditivo solvente y produciendo un biocombustible diesel: el E-Diesel, con muy buenas características en cuanto a combustión y reducción de contaminantes, ofreciendo así otras alternativas al Bioetanol en el campo de los vehículos Diesel. El E-Diesel ya se comercializa con éxito en EEUU y Brasil y pronto hará su aparición en España y demás países de Europa.

**ETBE:** No se comercializa como un biocombustible, sino que se utiliza como un aditivo de la gasolina. El ETBE (etil ter-butil éter) se obtiene por síntesis del bioetanol con el isobutileno, subproducto de la destilación del petróleo. El ETBE posee las ventajas de ser menos volátil y más miscible con la gasolina que el propio etanol y, como el etanol, se adiciona a la gasolina en proporciones del 10-15%. La adición de ETBE o etanol sirve para aumentar el número de octano de la gasolina, evitando la adición de sales de plomo. [8]

### 1.3 Biodiesel. [4]

El biodiesel es un éster que se produce de los aceites vegetales, grasas animales y grasas comestibles recicladas. Mediante un proceso de transesterificación, los aceites orgánicos de maíz, soya, girasol y otros son combinados con alcohol (etanol o metanol) y alterados químicamente para formar ésteres grasos (biodiesel) y glicerina. Fig. (1.4).

La definición de biodiesel propuesta por las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Material Standard, Asociación Internacional de Normativa de Calidad) lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos, de cadena larga, derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión. Sin embargo, los ésteres más

utilizados, como veremos más adelante, son los de metanol y etanol (obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos) debido a su bajo costo y sus ventajas químicas y físicas.



Fig. 1.4 Ciclo del Biodiesel

El biodiesel puede mezclarse con diesel procedente del refinado de petróleo en diferentes cantidades. Al igual que el etanol, para el biodiesel se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15 ó B30 en las que el número indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla.

A continuación se detallan las principales materias primas para la elaboración de biodiesel:

• Aceites vegetales convencionales

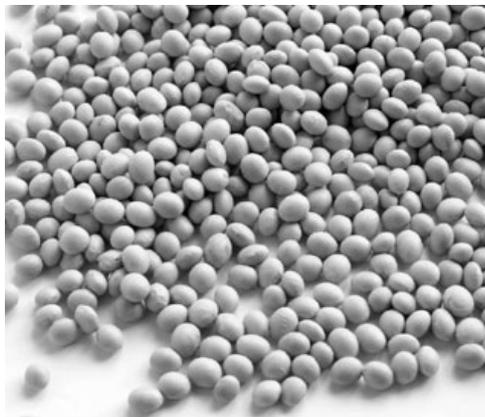
· Aceite de girasol



· Aceite de colza



· Aceite de soya



- Aceite de coco



- Aceite de palma



• **Aceites vegetales alternativos**

- Aceite de Brassica carinata



· Aceite de *Cynara cardunculus*



· Aceite de *Camelina sativa*



· Aceite de *Crambe abyssinica*



- Aceite de *Jatropha curcas*



- **Aceites de semillas modificadas genéticamente**

- Aceite de girasol de alto oleico

- **Aceites de fritura usados**

- **Aceites de otras fuentes**

- Aceites de producciones microbianas
- Aceites de microalgas

- **Grasas animales**

- Sebo de vaca
- Grasa porcina.
- Grasa de pollo.

#### **1.4 Biodiesel de origen animal.**

Además de los aceites vegetales y los aceites de fritura usados, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca, grasas porcinas y grasas de pollo, pueden utilizarse como materia prima en la transesterificación para obtener biodiesel. Esta alternativa es cada vez mas viable debido al bajo costo de este tipo de grasas (en comparación a las grasas vegetales) las cuales eran utilizadas sólo para la producción de alimentos de animales, por lo cual muchas empresas comienzan a buscar alianzas,

para la producción a gran escala de biodiesel de origen animal. Algunos estudios han demostrado que el biodiesel a partir de este tipo de grasas es de consistencia más sólida que el producido a partir del aceite vegetal, por lo que de ser utilizado necesitaría un sistema de calentamiento que lo mantenga líquido. A partir de los 15 grados Celcius comienza a formar sólidos que no permiten su eficaz comportamiento [18]. Pero esto se soluciona agregando un 20% de diesel de origen orgánico (del petróleo) o trabajando con sistemas de calentamiento. De esta forma mejora el comportamiento en frío y puede ser utilizado a temperaturas más bajas.

# **CAPITULO 2: EMISIONES DIESEL Y SU MEDICIÓN**

## 2.1 Gases contaminantes.

Las emisiones del motor diesel comprenden una gran variedad de compuestos, algunos de los cuales salen a la atmósfera en fase gaseosa y otros, que forman parte de las partículas, pueden condensarse y sumarse en la fase líquida o sólida.

Dentro de las emisiones gaseosas se encuentran los HC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> etc. En fase líquida, los sulfatos e hidrocarburos. En fase sólida, el hollín, compuestos metálicos, cenizas, etc.

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

Los procesos, tanto físicos como químicos, que se desarrollan para la formación de partículas, se inician tan pronto se inyecta el combustible en el cilindro y continúan en la atmósfera durante y después de la dilución de los gases de escape. [9]

Los motores diesel transforman la energía química contenida en el diesel en energía mecánica. El diesel es inyectado a una presión superior a la existente en el interior de los cilindros mezclándose con el aire comprimido y realizándose el proceso de combustión. Los gases procedentes de esta combustión están formados por componentes que son dañinos para la salud y el medio ambiente. En la tabla 2.1 se indica la concentración de los gases tóxicos contenidos en los gases de escape producidos por los motores diesel, por supuesto de forma genérica.

CO	HC	DPM (Partículas)	NOx	SO <sub>2</sub>
ppm	ppm	g/m <sup>3</sup>	ppm	ppm
5-1,500	20-400	0.1-0.25	50-2,500	10-150

Tabla 2.1. Emisiones de un motor Diesel [8].

monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos (HC), y aldehídos, son generados en el escape como resultado de una combustión incompleta del diesel. Una proporción importante de hidrocarburos es también generada por el aceite del motor. Cuando los motores funcionan en espacios cerrados tales como minas subterráneas, construcciones de edificios, túneles, almacenes o laboratorios de pruebas, el monóxido de carbono puede acumularse en el ambiente atmosférico y causar dolores de cabeza, vértigos e incluso desmayos. En las mismas condiciones, los hidrocarburos y aldehídos causan irritaciones de ojos y sensaciones de ahogo. Los hidrocarburos y aldehídos son los que contribuyen en mayor medida al olor tan característico de los gases de escape del diesel. Los hidrocarburos tienen también un efecto medioambiental negativo, ya que son precursores de la formación de ozono.

Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son creados por la unión del nitrógeno y el oxígeno en unas condiciones de alta presión y temperatura en el interior del cilindro. Los NO<sub>x</sub> están formados en su mayor parte por óxido nítrico (NO) y una pequeña proporción de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El dióxido de nitrógeno es muy tóxico. Las emisiones de NO<sub>x</sub> son también un serio asunto en el medio ambiente por su papel en la formación de ozono.

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se forma por el azufre contenido en el diesel. La concentración de SO<sub>2</sub> en el escape depende del azufre contenido en el diesel. Combustibles de bajo contenido en azufre, menos de un 0.05%, están siendo utilizados por la mayoría de las motorizaciones diesel en Estados Unidos y en Canadá. El dióxido de azufre es un gas incoloro, tóxico, con la característica de ser irritante. La oxidación del dióxido de azufre produce trióxido de azufre, el cual es el gas generador del ácido sulfúrico y éste a su vez es responsable de la formación de partículas sulfatadas. Los óxidos de azufre tienen un profundo impacto en el medioambiente siendo la causa principal de la lluvia ácida.

Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH) son compuestos que contienen dos o más anillos de benceno. Algunos compuestos de esta clase son conocidos como cancerígenos. Los PAH's en los gases de escape se encuentran en la fase gaseosa como en las partículas. El componente más peligroso de cuatro y cinco anillos está presente en la fracción orgánica soluble (SOF) del material particulado. [8]

## 2.2 Partículas Diesel.

El Material Particulado Diesel (MPD) o bien Diesel Particle Matter es un producto inherente al proceso de combustión del ciclo Diesel. En general está conformado por aglomerados de esferas de carbono sólido impregnadas de una fracción orgánica soluble (SOF) y por un aerosol que contiene sulfatos, ácido sulfúrico, hidrocarburos y otros elementos. Presenta una estructura como la que se muestra en la figura 2.1. Al igual que en su forma, el MPD en su composición es muy irregular debido a la influencia de diferentes factores dentro de los cuales se encuentra la tecnología del motor, las condiciones de trabajo, calidad del combustible, etc. [10]

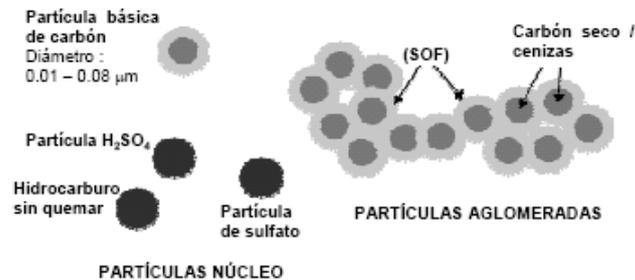


Fig. 2.1 Estructura de las partículas diesel.

Como se mencionó anteriormente, la composición de las partículas diesel dependerá particularmente del motor, así como de sus condiciones de velocidad y carga. Las "Partículas húmedas" pueden componer sobre un 60% de moléculas de hidrocarburos (SOF), mientras que las "partículas secas" pueden contener la mayoría del carbón seco. Y las partículas originadas por los sulfatos, están directamente relacionadas con el contenido de azufre en el combustible.

Algunas partículas diesel son muy finas. Los núcleos de las partículas primarias de carbón tienen un diámetro de 0.01 a 0.08 micras, mientras que el aglomerado de partículas tiene un diámetro comprendido entre 0.08 y 1 micras. Debido a su pequeño tamaño, las partículas diesel son casi en su totalidad respirables y tienen un impacto importante en nuestra salud. Han sido clasificadas por varias agencias gubernamentales como cancerígenas. Son también conocidas por aumentar el riesgo de infarto y de provocar enfermedades respiratorias.

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

El concepto de dilución tiene especial importancia por la gran inestabilidad que tienen las partículas respecto a la variabilidad de sus características, a medida que los gases de escape van mezclándose con el aire, difundiendo calor, hasta que alcanzan el equilibrio térmico en la atmósfera, se van desarrollando algunas reacciones químicas y físicas.

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

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

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

- **Agregados**, son partículas o grupos de partículas, unidas por fuerzas intermoleculares o fuerzas atómicas de cohesión. Son muy estables.
- **Aglomerados**, son dos o más partículas unidas por fuerzas de cohesión relativamente débiles.
- **Aerosoles**, dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas en un medio gaseoso, generalmente menores de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Las emisiones gaseosas contaminantes (HC, NO<sub>x</sub>, CO y CO<sub>2</sub>) se pueden medir con exactitud, directamente en los gases de escape crudos (sin diluir) debido a que, a la temperatura a la que son medidos, las reacciones de formación o descomposición no se llevan a cabo, en cambio, las partículas tiene una dinámica de formación totalmente diferente. Aunque hay que mencionar que para la medición de los hidrocarburos se

debe mantener un conducto (tubo de muestreo de acero inoxidable) a una temperatura de 190<sup>o</sup> C para que éstos no se condensen.

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

- Las **primarias**, son aquellas que resultan de los procesos que ocurren en el motor mismo, es decir, directamente en la combustión.
- Las **partículas secundarias**, son formadas como consecuencia de las interacciones de nucleación, agregación, etc. en la fase gas-vapor o gas-vapor - sólido, en el sistema de escape del motor o, finalmente, en la atmósfera.

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

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

Las partículas emitidas por el motor diesel se componen principalmente por hollín, sulfatos con agua, aceite sin quemar, combustible sin quemar, entre otros, como se muestra en la Figura 2.2. [9]

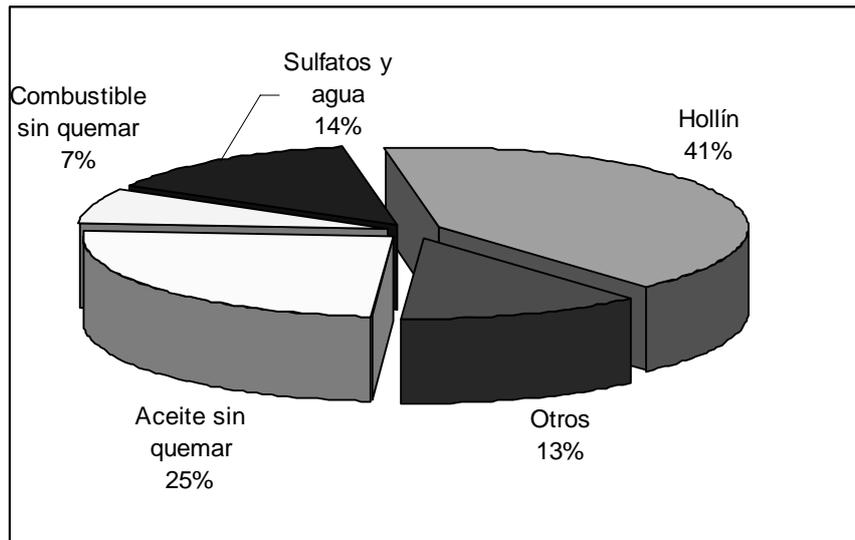


Fig. 2.2 Composición media del las partículas diesel.

### 2.3 Medición de partículas diesel.

El método utilizado para medir las partículas que son emitidas 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.

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

El túnel de dilución consiste en un cilindro cuyo largo es al menos 10 veces el diámetro. La totalidad de los gases de escape es inyectada al túnel de dilución, donde se mezcla con aire ambiente. La mezcla se homogeniza a lo largo del túnel durante un trayecto no

inferior a 10 veces el diámetro. Al final de dicho túnel se encuentra una sonda isocinética que toma una muestra de la mezcla sin perturbar el flujo. Se le llama isocinética porque se busca que, en el momento del muestreo, en toda la sección del conducto se tenga la misma velocidad. [9]

La función del túnel es homogenizar el flujo de aire con los gases de escape, donde disminuye la temperatura (no superior a 52 °C) y la concentración de los gases bajo condiciones de flujo constante.

Existen túneles de dilución, figura 2.3, 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.



Fig. 2.3 Túnel de dilución

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 ciclos transitorios. No obstante, presentan ciertas ventajas que se comentan más adelante.

## 2.4 Sistema RAVEM

El **RAVEM** (*Ride Along Vehicle Emissions Measurement*, medición de emisiones a lo largo del recorrido) por sus siglas en inglés, es uno de los nuevos tipos de sistemas de medición de emisiones portátiles que han empezado a estar disponibles en los últimos años. La tecnología del RAVEM fue desarrollada por la empresa Motor, Combustible e Ingeniería de Emisiones, Inc. (EF&EE, Engine, Fuel & Emissions Engineering, por sus siglas en inglés).

El sistema RAVEM se basa en un muestreo de flujo-parcial, proporcional de volumen constante (CVS, Constant Volume Sample, por sus siglas en inglés) a partir del tubo de escape del vehículo. El principio CVS es ampliamente utilizado en la medición de emisiones vehiculares, ya que los ajustes de dilución son tales que la concentración de contaminantes en el túnel de dilución del CVS es proporcional a la tasa de flujo de masa en el escape del vehículo. La concentración de contaminantes puede medirse sin grandes problemas, mientras que medir las tasas de flujo de masa resulta costoso y difícil de medir con exactitud, especialmente en condiciones de tránsito, al circular en la vía pública. Fig. 2.4.



Fig. 2.4 Sistema Ravem.

La masa total de emisiones contaminantes durante un ciclo de manejo dado, es igual a la integral de la tasa de flujo de masa de contaminantes durante dicho ciclo. En un sistema CVS, este valor integrado puede obtenerse fácilmente integrando sólo la concentración medida, la tasa de flujo de masa del CVS funciona únicamente como una constante de multiplicación. Esta integración puede llevarse a cabo tanto

numéricamente como físicamente. La tasa de flujo del escape no entra directamente en el cálculo, lo cual hace innecesaria su medición. En la Figura 2.5 se muestra un diagrama esquemático del sistema RAVEM. Excepto por el sistema de muestreo isocinético en la parte superior de la figura, este diagrama es muy parecido a un sistema CVS convencional de dilución sencilla para la medición de emisiones.

En el caso de los gases, el sistema RAVEM utiliza tanto la integración numérica como la física. Las concentraciones de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y CO en el gas de escape diluido son registradas segundo a segundo durante cada prueba. Además, se colectan en bolsas de Tedlar® las muestras de los gases de escape diluidos y aire de dilución durante la prueba y son analizadas más tarde para determinar NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y CO y (opcionalmente) otros contaminantes.

En el muestreo CVS para material particulado, la integración de la muestra se lleva a cabo físicamente, haciendo pasar la mezcla del escape diluida, con una tasa de flujo constante y controlado, a través de un filtro pre-pesado. El peso ganado por el filtro es después dividido por el volumen de mezcla que pasó a través de él para determinar la concentración promedio de partículas durante el ciclo de prueba.

Los métodos convencionales de un laboratorio de emisiones definidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA por sus siglas en inglés, Environmental Protection Agency, agencia de protección al medio ambiente) y la Oficina de Recursos del Aire de California (CARB por sus siglas en inglés, California Air Resources Board) utilizan CVS de flujo completo, en los cuales todo el flujo de gases de escape es extraído y diluido. El requerimiento del aire necesario resultante, hace que un sistema CVS de flujo completo sea impráctico para sistemas portátiles; de cualquier forma, el diseño del sistema RAVEM resuelve este obstáculo extrayendo y diluyendo sólo una fracción del flujo total del escape, utilizando un sistema patentado de muestreo isocinético proporcional. Dado que el sistema de muestreo del RAVEM toma solamente una pequeña fracción del flujo total del escape, los requerimientos de aire para dilución y el tamaño del túnel de dilución pueden ser reducidos a niveles competitivos para una operación portátil.

La medición de concentración de contaminantes en el sistema RAVEM sigue los métodos especificados por la EPA y en el estándar 8178 de la norma ISO. De esta forma, la muestra diluida sigue los principios de medición siguientes:

- Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) por análisis de químiluminiscencia.
- Monóxido de Carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mediante análisis infrarrojo no dispersivo sin humedad;
- Material particulado (PM), mediante su colección en filtros prepesados de fibra de vidrio de silicato de boro cubiertos con teflón (material hidrófobo), seguido de un post acondicionamiento y repesado de los filtros recolectores.

La capacidad de medir aldehídos (con análisis HPLC (cromatografía de líquidos de alta resolución o high performance liquid chromatography por sus siglas en inglés) de cartuchos DNPH (dinitrofenilhidrazina), y compuestos orgánicos volátiles (con análisis de cromatografía de gases) fueron adicionados posteriormente al sistema RAVEM.

#### *Sistema RAVEM y su Operación.*

El sistema RAVEM esta compuesto de los siguientes subsistemas claves:

- \* Sistema de dilución de volumen constante
- \* Sistema de muestreo isocinético
- \* Sistema de bolsas de muestreo
- \* Sistema analizador de gases
- \* Sistema de muestreo de partículas
- \* Sistema de muestreo de cartuchos
- \* Sistema de procesamiento y manejo de datos
- \* Entradas auxiliares

Cada uno de éstos se describen brevemente a continuación.

#### *Sistema de Dilución de Volumen Constante*

Este subsistema constituye el corazón del sistema RAVEM. De acuerdo al diagrama de la Figura 2.5, el soplador de velocidad variable proporciona una mezcla de aire/gas de escape hecha dentro del túnel de dilución a una tasa constante (expresada en litros por

minuto). El gas de escape “crudo” entra al túnel de dilución cerca del extremo superior, donde se mezcla con el aire de dilución filtrado. Las proporciones relativas de gas de escape y aire de dilución son controladas por el sistema de muestreo isocinético.

Los sensores del venturi, temperatura y presión entre el túnel de dilución y el soplador proporcionan los datos de realimentación necesarios para mantener este flujo a volumen constante. Este sistema es calibrado contra un medidor térmico de flujo de masa de alta precisión (no mostrado) para compensar cualquier desajuste. Aquí se requiere alta precisión, ya que cualquier error en el flujo de masa resultará en un error proporcional en los resultados finales.

#### *Sistema de Muestreo Isocinético.*

El sistema de muestreo isocinético comprende: - la punta de prueba o de muestreo, - una línea de muestra aislada, que conecta la punta de muestreo con la entrada de los gases crudos en el túnel de dilución, y - el sistema para controlar el flujo de muestreo y mantener las condiciones isocinéticas. El sistema de control utiliza puntas de presión estática en las superficies interna y externa de la punta de prueba, conectadas a un manómetro de sensibilidad diferencial. Cuando este manómetro marca cero, la presión interna y externa son iguales. Lo anterior requiere que las velocidades dentro y fuera de la punta de prueba sean también iguales. La garganta en el extremo superior del túnel de dilución varía la presión dentro del mismo de acuerdo a las necesidades que se requieran para tener esta condición. El ventilador en el extremo de la garganta aumenta el rango de presiones del túnel de dilución para incluir ligeras variaciones, tanto positivas como negativas (comparadas con la presión atmosférica).

Dado que el sistema de control depende de igualar la presión estática medida, dentro y fuera de la punta de prueba, cualquier fuga u otro problema en las puntas de presión, en líneas de presión y en el sensor de presión diferencial, que afecte la diferencia de dichas presiones, resultará en un *sobre muestreo* o *sub muestreo* de los gases de escape.

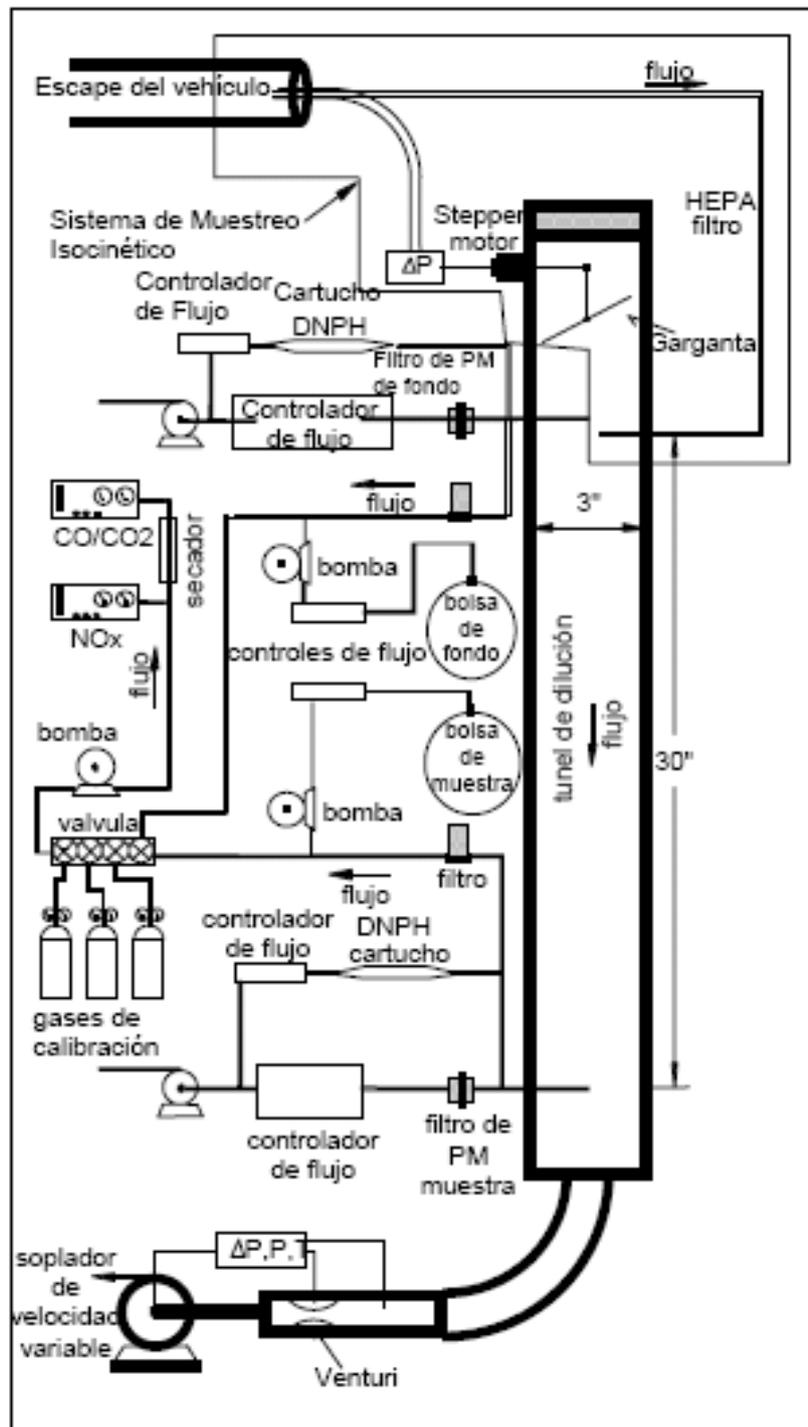


Figura 2.5 Diagrama del sistema RAVEM.

### Sistema de Bolsas de Muestreo.

El sistema de bolsas de muestreo Fig. 2.6 esta diseñado para llenar un par de bolsas Tedlar en cada prueba. Una de las bolsas contiene una muestra integrada de los gases de escape provenientes del túnel de dilución y la otra, contiene una muestra integrada

del aire de dilución. Con respecto al uso de las bolsas Tedlar, el sistema RAVEM cuenta con dos opciones: Un par de bolsas internas las cuales tienen una capacidad de aproximadamente 10 litros, o un par de bolsas externas con una capacidad de 60 litros las cuales son alimentadas a través de dos puertos de conexión rápida en el exterior de la unidad. El sistema está diseñado para permitir que las bolsas externas se intercambien rápidamente durante las pruebas, de tal forma que las bolsas de muestra colectadas en cada prueba se pueden analizar fuera del vehículo mediante cromatografía de gases. Un par de válvulas de 3 vías operadas manualmente permiten seleccionar entre las bolsas internas o las externas. Para llenar las bolsas, se extrae gas de un puerto de muestreo en el túnel de dilución, éste pasa a través de un filtro y de una pequeña bomba. Después llega a la válvula seleccionadora de bolsa mediante un controlador de flujo de masa y de ahí a la bolsa. Cualquier fuga en la bolsa de muestreo afectaría directamente a los resultados de emisiones. Una revisión de fugas se realiza en el proceso de vaciado de la bolsa de muestreo antes de realizar cada prueba.



*Fig. 2.6 Sistema de bolsas de muestreo*

*Sistema Analizador de Gases.*

El sistema analizador de gases comprende una bomba de muestreo, una válvula múltiple y analizadores convencionales de CO/CO<sub>2</sub> a temperatura ambiente y de NO<sub>x</sub>

precalentado en una caja contra golpes. El analizador de NOx es de la marca California Analytical Instruments modelo HCLD 400 equipado con un convertidor de NO a NO<sub>2</sub> que utiliza carbón activado. El analizador se mantiene a una temperatura de 60° C, lo cual hace innecesario secar la muestra para evitar condensaciones. Para el generador de ozono se alimenta aire seco comprimido a baja presión con una bomba equipada con un filtro y un cartucho secante.

El analizador de CO/CO<sub>2</sub> es de la marca California Analytical Instruments modelo ZRH el cual utiliza análisis infrarrojo no dispersivo (NDIR por sus siglas en inglés, Nondispersive Infrared sensor). El vapor de agua interfiere con la medición NDIR, especialmente en el caso del CO, por lo cual debe ser removido de la muestra; esto se logra al pasar la muestra a través de una membrana de intercambio de masa semi-permeable Nafion<sup>MR</sup>. En el otro lado del intercambiador de masa se alimenta aire seco mediante una pequeña bomba que cuenta con un cartucho secante.

La válvula múltiple alimenta al analizador de cualquiera de las fuentes siguiente: los gases de escape diluidos del túnel de dilución, el aire de dilución que entra al túnel (para análisis del medio ambiente), la bolsa integrada de muestra, la bolsa integrada de aire ambiente, gas cero, gas span CO/CO<sub>2</sub>, o gas span Nox. Los últimos 3 gases mencionados son utilizados para calibración y se suministran al sistema RAVEM mediante puertos de conexión rápida ubicados en el exterior de la unidad. Durante una prueba de emisiones, se monitorea constantemente la concentración de gases de escape diluidos y se registra una vez por segundo. Cuando la prueba termina, se calibra el analizador y después se utiliza para determinar la concentración de contaminantes en las bolsas de muestra y de aire ambiente.

Dado que las lecturas segundo a segundo pueden verse afectadas por variaciones, vibraciones, cambios en la concentración de contaminantes de fondo y el manejo del vehículo, los datos de la bolsa normalmente son más exactos y generalmente son los que se reportan. El registro de los datos segundo a segundo es útil para examinar la variación de emisiones durante el ciclo de manejo y también constituyen un respaldo si le sucede algo a la muestra de las bolsas.

*Sistema de Muestreo de partículas.*

Este sistema está compuesto por una bomba de vacío, 2 controladores de flujo, 2 válvulas de cierre y 2 soportes para filtros: uno para las PM de la muestra y otro para el aire de fondo diluido. Cada soporte para filtro contiene 2 filtros de 37 mm en serie. Los filtros utilizados son de fibra de vidrio de silicato de boro cubiertos con teflón y cumplen con las especificaciones de EPA y de ISO 8178 para medición de partículas provenientes del diesel. Por último, los 2 soportes utilizados están diseñados para ser conectados y removidos rápidamente del sistema de muestreo y se tienen que tener por lo menos 2 juegos de soportes, lo cual permite que mientras se lleva a cabo una prueba de emisiones, se cambien los filtros de la prueba anterior por unos nuevos para la prueba siguiente.

Durante una prueba de emisiones, se abren las válvulas de cierre, permitiendo la entrada de los gases de escape diluidos y del aire de dilución en su respectivo juego de filtros. El gas filtrado pasa a través de controladores de flujo a la bomba de vacío, donde es expulsado al ambiente. Los filtros expuestos al aire de dilución proporcionan una muestra en "blanco" para cada prueba, permitiendo la corrección por efectos de cambios en la humedad, presión atmosférica y PM en el ambiente (incluyendo especies condensables) presentes en el aire de dilución filtrado. La experiencia nos ha mostrado que dichas correcciones pueden llegar a ser entre 0.01 y 0.02 g/BHP-hr.

*Sistema de Muestreo de Cartuchos.*

Este sistema tiene un diseño similar al de muestreo de partículas (PM) descrito anteriormente y comprende dos válvulas de cierre, dos soportes para tubos de muestreo de vidrio SKC inc. de 6 mm de diámetro, dos controladores de flujo y una bomba. La diferencia con el sistema de PM es que está diseñado para tasas de flujo mucho menores (0 a 2 l/min en lugar de 0 a 30 l/min) y en que se alimenta del flujo de muestra filtrado, el cual alimenta también las bolsas Tedlar, en lugar de alimentarse directamente del túnel de dilución. Para medir la concentración de carbonilos tales como el formaldehído, acetaldehído y acetona, los cartuchos de muestra son cargados con 2 tubos de vidrio de 6 mm que contienen sílica gel impregnada con Dinitrofenilhidrazina (DNPH por sus siglas en inglés).

El gas de la muestra y del aire de dilución de los puertos de muestreo se hace pasar por los filtros Fig. 2.7, después por los cartuchos, donde cualquier carbonilo presente reacciona con el DNPH quedando retenido en él. Después se remueven, se colocan en una hielera para mantener la temperatura a aproximadamente 4° C y poder transportarlas al laboratorio donde se mantienen en un refrigerador hasta que se analicen mediante Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC por sus siglas en inglés, High Performance Liquid Chromatography).



Fig. 2.7 Sistema de muestreo por cartuchos.

#### *Sistema de Procesamiento de Datos y Manejo.*

El sistema de procesamiento de datos y manejo esta compuesto por una computadora laptop, conectada a un sistema de la marca National Instruments Fieldpoint que contiene 24 canales analógicos a digitales, 8 canales digitales a analógicos, 36 salidas digitales, 8 entradas digitales de uso general y 4 entradas de conteo. Esto incluye algunos puertos de entrada y salida libres, lo cual facilita la interfase con sensores auxiliares.

El sistema RAVEM mide y registra varios datos en un formato segundo a segundo durante cada prueba de emisiones, incluyendo los datos crudos y concentraciones

calculadas de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, la tasa de flujo CVS, la posición de la mariposa y las lecturas del manómetro diferencial. También se registran los datos de calibración relacionados con la alimentación cruda y concentraciones calculadas, lo cual hace posible recalcular los resultados segundo a segundo utilizando la calibración al final de la prueba. La temperatura de los gases de escape y más de 2 temperaturas auxiliares se graban segundo a segundo; además la temperatura, la presión barométrica y la humedad se registran al inicio de cada prueba. Todo lo anterior se guarda en archivos separados para cada prueba en un formato binario compacto. [11, 12]



Fig. 2.8 Proceso de manejo y procesamiento de datos

**CAPITULO 3: DISPOSITIVOS Y  
MÉTODOS PARA EL CONTROL DE  
EMISIONES**

### 3.1 Convertidor catalítico.

En la actualidad existen millones de vehículos circulando por el mundo y cada uno de ellos es una fuente de contaminación. En ciudades grandes, la contaminación de estos vehículos puede ocasionar problemas graves.

Para solucionar este problema los gobiernos de algunos países han establecido leyes que limitan la cantidad de contaminantes que un vehículo puede generar, lo que obligó a la industria automotriz a buscar medios para hacer más eficientes y menos contaminantes sus motores. Sin embargo, por más eficiente que sea un vehículo siempre genera contaminantes, esto es precisamente lo que motivó al uso del convertidor catalítico ya que es un sistema que trata los gases de escape del motor antes de dejarlos libres en la atmósfera.

Un convertidor catalítico es un dispositivo que forma parte del sistema de control de emisiones del vehículo, ayuda a disminuir notablemente los elementos nocivos de los gases de escape de un vehículo.

Consta de un panel (normalmente de cerámica) con deposición (exposición) de partículas de metales preciosos (platino, paladio y rodio), los gases contaminantes reaccionan más fácilmente con los metales preciosos, oxidándose o terminándose de oxidar algunos compuestos y reduciéndose los óxidos de nitrógeno (separándose en oxígeno y nitrógeno). Un catalizador disminuye la energía de activación para desarrollarse una reacción química determinada, sin embargo, sí se requiere de una energía inicial, que se obtiene del calor de combustión (por ello en el arranque el catalizador no es eficiente) y posteriormente con las propias reacciones químicas que se producen en su interior, dicho catalizador alcanza su máxima eficiencia.

Los convertidores catalíticos de tres vías, se denominan así haciendo referencia a los tres contaminantes que debe disminuir (CO, HC y NOx). Los hidrocarburos HC se oxidan, el monóxido de carbono CO termina de oxidarse, y los óxidos de nitrógeno NOx se reducen, es decir, ocurre una reacción opuesta a la oxidación, se separan en oxígeno y nitrógeno.

El convertidor catalítico de tres vías funciona mediante dos funciones que son:

### Catalizador de reducción

El catalizador de reducción es la primera etapa del convertidor catalítico. Utiliza platino y rodio para disminuir las emisiones de NOx. (óxido de nitrógeno) Cuando una molécula de monóxido o dióxido de nitrógeno entra en contacto con el catalizador, éste atrapa el átomo de nitrógeno y libera el oxígeno, posteriormente el átomo de nitrógeno se une con otro átomo de nitrógeno y se libera. Es decir, descompone los óxidos de nitrógeno en oxígeno y nitrógeno que son los componentes del aire. [13]

### Catalizador de oxidación

El catalizador de oxidación es la segunda etapa del convertidor catalítico. Este catalizador de platino y paladio toma los hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) que salen del motor y los hace reaccionar con el oxígeno que también viene del motor generando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). [13]

### *Sistema de control*

Existe una tercera etapa que monitorea los gases de escape del motor y utiliza esta información para controlar el sistema de inyección de combustible del motor. Se tiene un sensor de oxígeno en los gases de escape del motor antes de llegar al convertidor catalítico. Este sensor informa a la computadora sobre la cantidad de oxígeno existente en el escape, con esta información la computadora puede aumentar o disminuir la cantidad de oxígeno en el escape ajustando la relación de aire-gasolina. El sistema de control le permite a la computadora asegurarse que el motor está funcionando con una relación muy cercana a la estequiométrica y además le permite mantener suficiente oxígeno en el escape para oxidar los hidrocarburos y el monóxido de carbono.

### *Convertidores catalíticos para Motor Diesel*

Antes de comentar el funcionamiento de los catalizadores para este tipo de motores, debe tenerse en cuenta lo siguiente: debido a las características inherentes al proceso de combustión, el Motor Diesel trabaja con un exceso de aire. Una reducción de los óxidos de nitrógeno por este medio (catalizador) no podría conseguirse, puesto que ésta sólo se logra con la falta de aire. Para reducir los niveles de óxidos de nitrógeno

todos los Motores Diesel actuales traen sistemas de recirculación de gases de escape. La entrada dosificada de gases de escape a los cilindros en el tiempo de admisión, desplaza oxígeno del aire y disminuye la temperatura de la combustión, lo que hace que se reduzca el nivel de emisión de estos gases.

El principio de funcionamiento del catalizador que se está empleando ahora en los Motores Diesel se basa en la oxidación del monóxido de carbono e hidrocarburos, pasando a formar dióxido de carbono. Además, el catalizador sirve para reducir considerablemente las emisiones de gases malolientes.

Los Catalizadores de Oxidación (Diesel Oxidation Catalysts, DOCs) son la tecnología de postratamiento de control de emisiones más común en los vehículos diesel actuales. A pesar de no estar tan ampliamente extendida como los convertidores de tres vías (TWC) en vehículos a gasolina, los DOC son muy similares a los primeros catalizadores usados para motores de gasolina. Como se mencionó en párrafos anteriores los catalizadores de oxidación trabajan oxidando el CO, los HC y la fracción orgánica soluble del material particulado a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en el flujo de escape, el cual es rico en oxígeno en los motores diesel. [14]

Por otro lado, el catalizador Diesel suele tener un inconveniente, también presente en los motores a gasolina: su rendimiento sólo es elevado cuando los gases de escape alcanzan altas temperaturas. Por esto se los suele situar lo más cerca posible del múltiple de escape, y, a nivel experimental, ya existen catalizadores precalentados eléctricamente, de forma tal que el catalizador ya está caliente aún durante el arranque en frío. Sin embargo, hay que resolver el problema del elevado consumo de energía asociado a un dispositivo de este tipo. Asimismo, para el catalizador Diesel es especialmente importante que el combustible sea de buena calidad y, sobre todo, contenga una mínima o nula cantidad de azufre. Varios fabricantes de automóviles están sometiendo a prueba a un nuevo tipo de catalizador Diesel, denominado "Denox", capaz de actuar también sobre los óxidos de nitrógeno y se espera verlo en los vehículos Diesel de serie dentro de pocos años.

Las partículas son residuos de la combustión y la mayor parte de ellas tiene un volumen de 2 a 3 milésimas de milímetro, es decir que son mucho más pequeñas que las partículas de polvo o ceniza. Las partículas de hollín, por ejemplo, causantes del

típico humo Diesel, pueden almacenar distintos tipos de hidrocarburos y se ha expresado la sospecha de que algunas de estas sustancias pueden ser potencialmente peligrosas para la salud.

El catalizador Diesel no puede retener partículas, para ello existen los dispositivos denominados "trampa de partículas", la que ya se instala en algunos camiones livianos y también en automóviles.



Fig. 3.1 Convertidor Catalítico Diesel

### **3.2 Trampas de partículas. [15]**

Las trampas de partículas Fig. 3.2 son sistemas que, mediante el filtro de los gases de escape, capturan partículas que emite el motor diesel. Una vez que se ha acumulado una cierta masa de ella, se incineran para limpiar el filtro (regeneración) y se reinicia el ciclo de trabajo.

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.

Al emplear una trampa de partículas se puede optar por 3 diferentes soluciones de regeneración:

1. Utilizar una cerámica catalizada que reduce la temperatura de ignición del hollín.
2. Usar aditivos en el combustible o, inyectados 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 y eficacia para oxidar las partículas. Se denomina regeneración positiva, activa o asistida. A su vez los primeros 2 tipos de regeneración mencionados, se denominan autorregeneración y regeneración pasiva respectivamente. Siendo que la trampa de partículas con regeneración mediante fuente de energía es la que ofrece mayor eficiencia será descrita brevemente.

Esta trampa, en términos generales, ésta compuesta por:

- \* Un filtro monolítico de cerámica, que recolecta las partículas emitidas por el motor.
- \* Un fuente de energía para incrementar la temperatura y oxidar las partículas. En la regeneración asistida se han utilizado diversas fuentes de energía, las cuales son detalladas en la literatura:
  - Resistencias
  - Microondas
  - Quemadores de gas
  - Quemadores de diesel
- \* Un sistema de control, que ordena el inicio y el fin del proceso de regeneración entre otras cosas.
- \* Una desviación (by pass), que permite conducir a los gases de escape hacia otro filtro mientras éste se regenera, en caso que operen dos filtros en paralelo, o hacia el silenciador.

Para determinar la acumulación de partículas en este tipo de filtros se monitorea a distintos intervalos, midiendo la caída de presión en el filtro, la temperatura, el régimen y la carga del motor.

Este parámetro es de suma importancia debido a que al compararse con el consigna, indicará el momento en que se inicie el proceso de regeneración.

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.

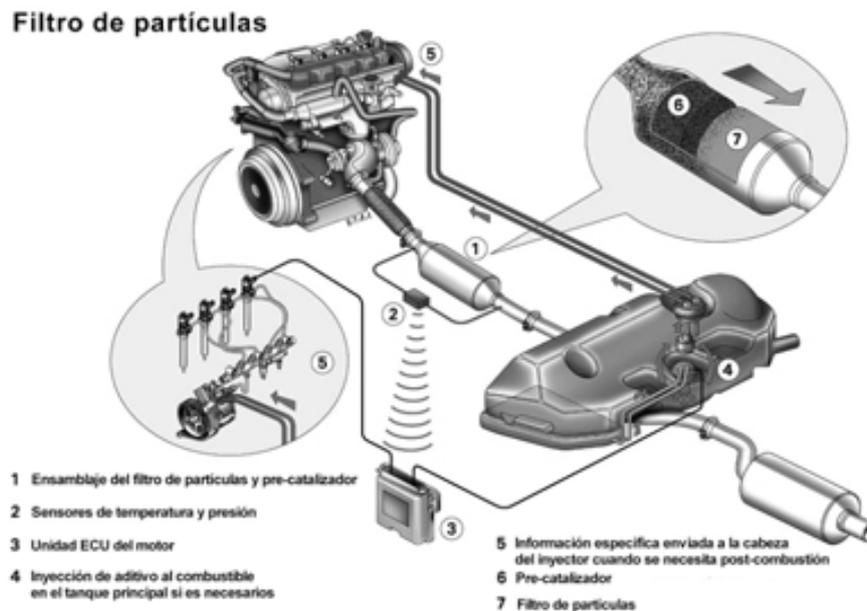


Fig. 3.2 Diagrama de trampa o filtro de partículas de motor diesel.

### 3.3 Recirculación de gases [16]

El sistema de recirculación de los gases de escape está diseñado para reducir las emisiones de los NOx (óxidos de nitrógeno). Como su nombre lo indica algunos de los gases de escape son reenviados y mezclados con el aire de admisión. Al reducir el aire de admisión disminuye la temperatura de combustión máxima.

La recirculación de gases de escape tiene dos misiones fundamentales, una es reducir los gases contaminados procedentes de la combustión o explosión de la mezcla y que mediante el escape salen al exterior. Estos gases de escape son ricos en monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

La segunda misión de la recirculación de gases es bajar las temperaturas de la combustión o explosión dentro de los cilindros. La adición de gases de escape a la mezcla de aire y combustible hace más fluida a esta por lo que se produce la combustión o explosión a temperaturas más bajas.

## Válvula EGR

La válvula EGR, recirculación de gases de escape toma su nombre del inglés cuya nomenclatura es: Exhaust Gases Recirculation.

En la figura 3.3 tenemos una válvula seccionada y en ella podemos distinguir las siguientes partes:

- Toma de vacío del colector de admisión.
- Muelle resorte del vástago principal
- Diafragma
- Vástago principal
- Válvula
- Entrada de gases de escape del colector de escape
- Salida de gases de escape al colector de admisión

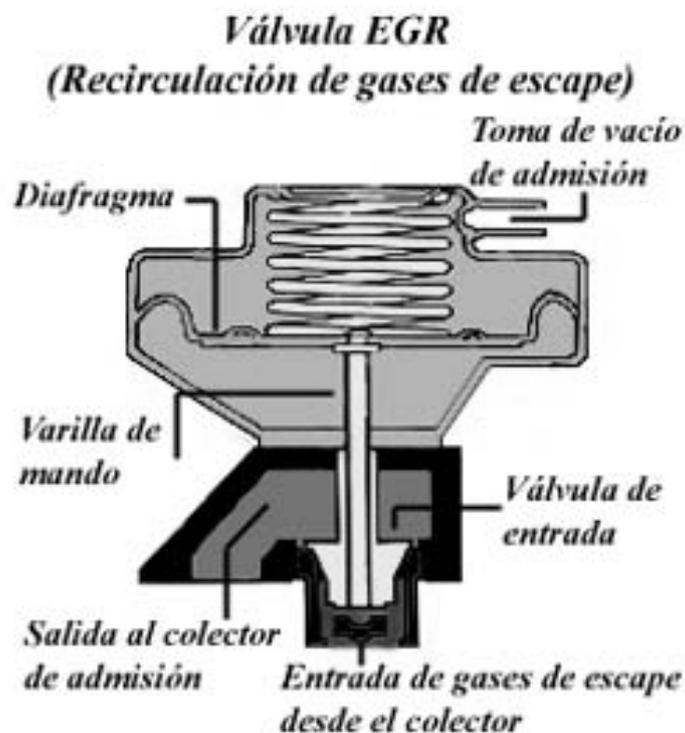


Fig. 3.3 Válvula EGR

La base de la válvula es la más resistente, creada de hierro fundido ya que tiene que soportar la temperatura de los gases de escape (sobrepasan los 1000°C) y el deterioro por la acción de los componentes químicos de estos gases. Estas altas temperaturas y componentes EGR químicos que proceden del escape son los causantes de que la válvula

pierda la funcionalidad, pudiendo quedar trabada, tanto en posición abierta como cerrada, por lo que los gases nocivos saldrían, en grandes proporciones al exterior y afectando a la funcionalidad del motor.

#### *Tipos de válvulas EGR*

El efecto de recirculación de gases lo podemos encontrar hoy en día tanto en motores gasolina como diesel, pero sobretodo en los diesel es donde con más frecuencia las veremos ya que la mayoría de los vehículos con estos motores la llevan incorporada al salir de fábrica.

Los tipos de válvulas EGR no son tipos como tal sino complementos, es decir que la válvula EGR mecánica se puede encontrar en los motores sola o se puede encontrar con un accionamiento electrónico que depende exclusivamente de la unidad de mando del motor. Qué tenga este accionamiento electrónico depende de las necesidades del motor, como veremos en la sección de funcionamiento.

#### *Funcionamiento del sistema de recirculación de gases*

La apertura de la válvula del sistema, se realiza a baja y media potencia aproximadamente puesto que para las altas prestaciones de un motor, se necesita una entrada de aire más denso que se mezcle con el combustible, lo que se denomina en automoción aire fresco.

Esto sucedería contando con que la válvula EGR dispusiera de un mando eléctrico, que bajo el mando de la unidad de mando del motor, actuase sobre el vástago de la válvula abriendo y cerrando a esta.

Si la válvula EGR no cuenta con un dispositivo electrónico que interrumpa su funcionamiento, siempre estaría más o menos abierta (dependiendo de la admisión del colector, es decir, de la potencia solicitada por el motor).

No es raro, si no todo lo contrario, encontrarnos con sistemas que solo cuentan con la válvula EGR, pero tenemos que pensar que no es lógico que continúe la introducción de gases de escape a la admisión a grandes revoluciones, ya que precisamente lo que

necesita la mezcla es aire fresco. Por esto mismo, el sistema de recirculación mejoró incorporando estos mandos electrónicos.

Ahora, nos encontramos con un problema a la hora de cerrar la válvula EGR a altas revoluciones y es el ya tan conocido fenómeno de la contaminación. Todos los gases que estaban siendo reducidos en las cámaras de combustión, ahora son liberados (CO, HC y NO<sub>x</sub>).

Después de esta pequeña introducción de funcionamiento, describamos el funcionamiento teórico de una válvula mecánica EGR:

El colector de admisión como ya sabemos es el encargado de llevar al interior de los cilindros el aire de la mezcla (o la mezcla de aire y combustible) por demanda de los pistones de los cilindros. La toma de vacío que tiene la válvula EGR basa su funcionamiento en este efecto, la succión de aire crea un vacío que actúa sobre el diafragma de la válvula comprimiendo el resorte y levantando la válvula que permite el paso del gas de escape desde el colector de escape hacia el colector de admisión.

De la misma forma cuando menor sea la succión de aire (o mezcla) por parte de los cilindros, menor será el vacío por lo que el diafragma permitirá al muelle resorte a bajar a su posición dejando al vástago cerrar la válvula de entrada de gases de escape al colector de admisión.

### **3.4 Normatividad de control de emisiones Diesel**

Normas Ambientales Vigentes para Vehículos a Diesel en México.

Actualmente las normas que aplican a los vehículos a diesel son las siguientes:

- NOM-044-SEMARNAT-1993: Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), partículas suspendidas totales (PST) y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos. En la tabla siguiente se muestran los límites establecidos en la norma.

Límites máximos permisibles de emisión en motores nuevos utilizados en vehículos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos que usan diesel como combustible

Año- modelo del motor	Niveles máximos permisibles de emisión [g/bhp-h]			
	HC	CO	NOx	PST
1993	1.3	15.5	5.0	0.25
1994-1997				
Autobús urbano extra-pesado	1.3	15.5	5.0	0.07
Autobús urbano mediano-pesado, ligero-pesado y otros	1.3	15.5	5.0	0.01
1998 en adelante				
Autobús urbano extra-pesado	1.3	15.5	4.0	0.05
Autobús urbano mediano-pesado, ligero-pesado y otros	1.3	15.5	4.0	0.10

- NOM-045- SEMARNAT -1996: Que establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel o mezclas que incluyan diesel como combustible.

Niveles máximos permisibles de opacidad

Peso bruto vehicular	Año modelo	Coefficiente de absorción de luz (m <sup>-1</sup> )	Porcentaje de opacidad (%)
Hasta 2,727 Kg*	1995 y anteriores	1.99	57.61
	1996 y posteriores	1.07	37.04
Mayores 2,727 Kg**	1990 y anteriores	1.99	57.61
	1991 y posteriores	1.27	42.25

\*En función del año-modelo del vehículo. \*\*En función del año-modelo del motor

- NOM-077- SEMARNAT -1995: Que establece el procedimiento de medición para la verificación de los niveles de emisión de la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

El método para la medición es el de la aceleración libre, consistente en una prueba estática del vehículo acelerando el motor, desde su régimen de velocidad de marcha lenta hasta su velocidad máxima sin carga. La medición de las emisiones de humo se realiza durante el periodo de aceleración del motor, utilizando un opacímetro.

- NOM-086 SEMARNAT- 1993: Especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.

En particular para el diesel vehicular se establecen las especificaciones fisicoquímicas que deberá tener el combustible que se comercialice en la ZMVM, este combustible deberá cumplir con un contenido máximo de azufre en peso del 0.05% y el número de cetano deberá ser de 48 como mínimo.

#### *Normativa Europea [17]*

Desde la norma Euro I en 1992 hasta las recientes normas Euro IV y Euro V para el período 2005-2008, regulan las emisiones emitidas por los motores diesel de vehículos pesados del mismo modo que lo harán las propuestas de la agencia alemana de medioambiente (UBA) para 2008 y 2010 (Euro V – UBA y Euro VI UBA).

La Comisión Europea ha adoptado la Directiva 2001/27/EC, que prohíbe el uso de mecanismos no fiables, así como las estrategias irracionales, que pueden reducir la eficiencia de los sistemas de control de emisiones cuando los vehículos operan por debajo de las condiciones normales de circulación determinadas durante las pruebas de emisiones.

La siguiente tabla contiene un resumen de las normas de emisión y sus fechas de aplicación. Fechas en las tablas se refieren a las nuevas homologaciones de tipo; las fechas de todas las homologaciones son en la mayoría de los casos un año después (UE homologaciones son válidos durante más de un año).

### Capítulo 3: Dispositivos y métodos para el control de emisiones

Normas europeas de emisiones para motores diesel HD, g/kWh (humo en  $m^{-1}$ )

Nivel	Fecha	Prueba	CO	HC	NOx	PM	Humo
Euro I	1992, <85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,612	
	1992, > 85 kW		4,5	1,1	8,0	0,36	
Euro II	1996,10		4,0	1,1	7,0	0,25	
	1998,10		4,0	1,1	7,0	0,15	
Euro III	1999,10, sólo EEVs	ESC y ELR	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15
	2000,10	ESC y ELR	2,1	0,66	5,0	0,10 Un 0,13	0,8
Euro IV	2005,10		1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Euro V	2008,10		1,5	0,46	2,0	0,02	0,5
Euro VI †	2013,04 <sup>b</sup>		1,5	0,13	0,4	0,01	

† Propuesta (2007.12.21)  
 -- para los motores de menos de 0,75 dm<sup>3</sup> cilindrada por cilindro y una potencia nominal de velocidad de más de 3000 min<sup>-1</sup>  
 b - 2014,10 para todos los modelos

#### Normativa EU [17]

Las normas de emisiones para camiones pesados que utilizan motores Diesel se resumen en la siguiente tabla. Esta tabla es para el periodo de 1988-2003 de los EU.

Las normas de emisión EPA para Motores Diesel pesados, g/bhp·hr

Año	HC	CO	NO <sub>x</sub>	PM
Camiones pesados con motor diesel.				
1988	1,3	15,5	10,7	0,60
1990	1,3	15,5	6,0	0,60
1991	1,3	15,5	5,0	0,25
1994	1,3	15,5	5,0	0,10
1998	1,3	15,5	4,0	0,10
Los motores de los autobuses urbanos				
1991	1,3	15,5	5,0	0,25
1993	1,3	15,5	5,0	0,10
1994	1,3	15,5	5,0	0,07
1996	1,3	15,5	5,0	0,05 *
1998	1,3	15,5	4,0	0,05 *
* - En el uso estándar de 0,07 PM				

Modelos 2004 y posteriores

En Octubre de 1997, la EPA adoptó nuevas normas de emisiones para los vehículos pesados que utilizan motor diesel modelo 2004 y posteriores. El objetivo era reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> de carretera de gran potencia a los motores de los niveles de aproximadamente 2 g/bhp\*h a partir de 2004. Los fabricantes tienen la flexibilidad para certificar sus motores a una de las dos opciones que se muestran en la siguiente tabla:

Opción	NMHC + NO <sub>x</sub>	NMHC
1	2,4	n / a
2	2,5	0,5

# **CAPITULO 4: ENSAYOS EXPERIMENTALES**

### 4.1 Planeación de pruebas

La planeación de las pruebas se hizo mediante una matriz de ensayos, en la cual se estimaba la combinación de situaciones diferentes a las que se somete el motor, por ejemplo de régimen, de par, de potencia, instalando o no el catalizador, etc., todo ello para hacer las comparaciones entre combustibles y mezclas de combustibles diferentes, como se puede apreciar en la tabla 4.1

Combustible	Ensayos			
	Diesel 15 ppm	Línea Base (curvas de par y potencia)		
Diesel 30 ppm	13 modos con DOC	13 modos sin DOC	Curvas de par y potencia	Pruebas de opacidad
B-5	13 modos con DOC	13 modos sin DOC	Curvas de par y potencia	Pruebas de opacidad
B-10	13 modos con DOC	13 modos sin DOC	Curvas de par y potencia	Pruebas de opacidad
B-20	13 modos con DOC	13 modos sin DOC	Curvas de par y potencia	Pruebas de opacidad

Tabla 4.1 Planeación de pruebas

#### **Prueba 13 Modos**

A lo largo de un ciclo prescrito de condiciones de funcionamiento del motor caliente, las cantidades de dichos gases contaminantes se determinarán de forma continua tomando una muestra del gas de escape sin diluir. El ciclo de pruebas consiste en un número determinado de fases de régimen y de potencia que cubren la gama típica de las condiciones de funcionamiento de los motores diesel. Durante cada fase, se determina la concentración de cada contaminante, el caudal de gas de escape y la potencia desarrollada, y se ponderan los valores determinados. La muestra de partículas deberá diluirse con aire ambiente acondicionado. Se tomará una muestra a lo largo de todo el procedimiento de prueba, mediante los filtros adecuados.

**Ciclo de prueba**

Dicho ciclo indica 13 modos o formas de operación característicos de los motores diesel, montando un motor diesel en un dinamómetro de banco:

Modo	Velocidad	Carga, %	Factor de ponderación	
			R49	US
1	Ralentí	-	0.25/3	0.20/3
2	Velocidad de	10	0.08	0.08
3		25	0.08	0.08
4	Torque Máximo	50	0.08	0.08
5		75	0.08	0.08
6		100	0.25	0.08
7		Ralentí	-	0.25/3
8	Velocidad de potencia Máxima	100	0.1	0.08
9		75	0.02	0.08
10		50	0.02	0.08
11		25	0.02	0.08
12		10	0.02	0.08
13	Ralentí	-	0.25/3	0.20/3

Tabla 4.2 Ciclo de prueba ESC o 13 modos.

**Curvas de potencia**

Previamente a la realización de las pruebas formales se obtuvieron las curvas de potencia y par en nuestro motor con el objetivo de encontrar los valores máximos de carga y potencia característicos en él, y a su vez las velocidades a las cuales se logran estos valores.

Para ello se planearon y realizaron tablas con velocidades teóricas dadas, tomando en cuenta el valor mínimo (600 RPM) y máximo (2400 RPM) en nuestro motor. Posteriormente el motor fue acelerado hasta dichas velocidades y a su vez se le fue agregando carga y acelerando para mantener la velocidad constante (y con esto garantizar los valores máximos de par y potencia), hasta el punto en el cual era imposible acelerar mas al motor.

nt [rpm]	n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
600			
800			
1000			
1200			
1400			
1600			
1800			
2000			
2200			
2400			

Tabla 4.3 Valores de Velocidad teórica

**nt- Velocidad Teórica. [rpm]**

**n- Velocidad Real. [rpm]**

**M- Par. [lbf\*pie]**

**Ne- Potencia [HP]**

Con los datos obtenidos se realizaron las respectivas curvas  $n$  vs  $M$  y  $n$  vs  $Ne$ , para poder determinar los valores máximos de par y potencia, así como sus velocidades características. Con lo cual se procedió a la construcción de la tabla del ciclo ESC (tabla 4.1) con las velocidades encontradas y los porcentajes de carga máxima requeridos.

Cabe señalar que para la realización de la línea base se utilizó combustible diesel UBA (ultra bajo azufre de 15 PPM) sin convertidor catalítico, para garantizar que no afectará el azufre a nuestra línea de combustible y así garantizar el mejor desempeño de nuestro motor y mejores resultados de emisiones.

***Prueba de opacidad***

El procedimiento de medición de humo a la salida del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible, será el siguiente:

Con el motor operando en marcha lenta y sin carga, se acciona el acelerador hasta obtener la intervención del gobernador en un lapso entre 2 y 3 segundos y cuando se obtenga ésta, se suelta el pedal del acelerador hasta que el motor regrese a la velocidad de ralentí y el opacímetro se estabilice en condiciones mínimas de lectura. No se tomarán en cuenta las lecturas del opacímetro mientras la velocidad del motor sea menor de las revoluciones por minuto de marcha lenta

Para las pruebas se utilizó un motor Mercedes Benz modelo 1992 con datos de placa:

- \* Potencia nominal: 127W (170HP)/2600 rpm.
- \* Entrega de combustible: 76-80 mm<sup>3</sup>/carrera.
- \* Velocidad de vacío: 600 ±50 rpm.

Además de un dinamómetro marca Clayton con datos de placa:

- \* Modelo: A31060-CAM250E-10456
- \* Potencia: 250 HP (200 kW)
- \* Rango de velocidad: 2190 a 8000 rpm
- \* Par: 600 ft\*lb (813 N\*m).

También se hizo uso de un opacímetro marca Bosch, al igual que el banco de mediciones, (Fig. 4.1) del laboratorio de control de emisiones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Fig. 4.1 Consola de control del banco de motores.

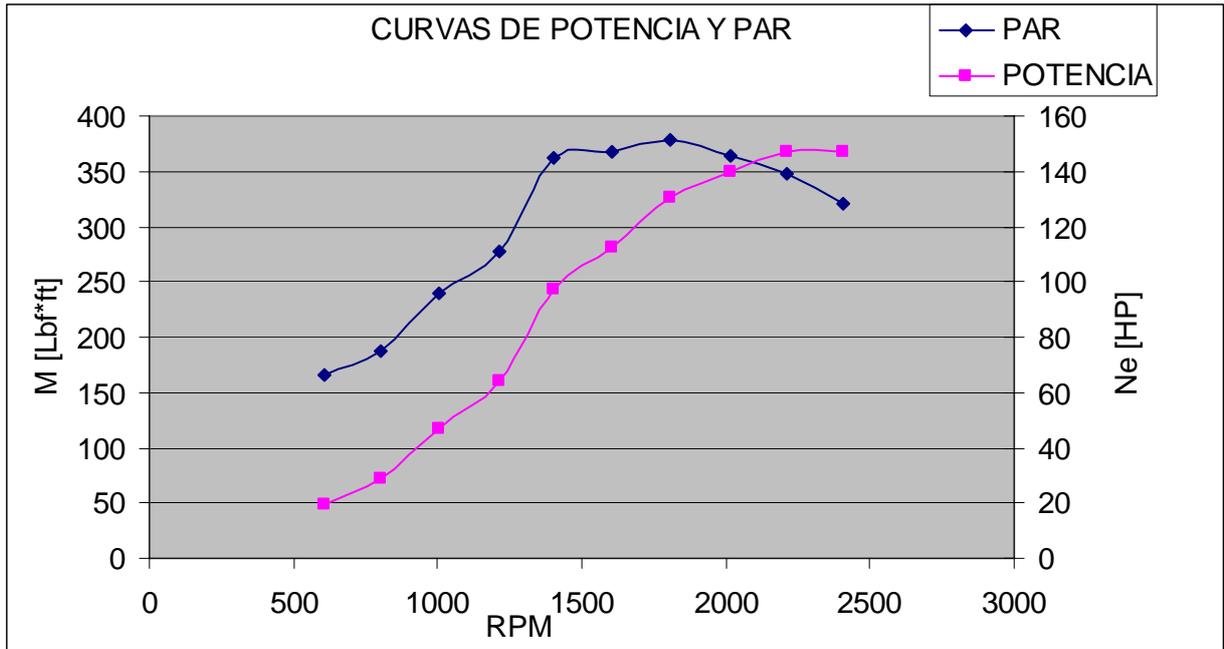
Durante la realización de las pruebas del ciclo 13 modos se realizaron mediciones continuas a través del equipo RAVEM para la obtención de emisiones contaminantes. Como se menciona en la tabla 4.1 se probaron dos tipos de combustibles diesel de alto azufre (350 PPM) para tener un comparativo y Biodiesel de origen animal en distintas mezclas (5, 10, 20 %) con diesel de 350 PPM. También se realizaron sus respectivas curvas de potencia las cuales sirvieron para comparar el desempeño del motor

A su vez se probó la eficiencia de un convertidor catalítico por lo cual también se realizaron las pruebas anteriores, pero con el uso de este dispositivo. Lo cual es conveniente para tener distintos puntos de comparación en cuanto a control de emisiones y desempeño del motor.

## 4.2 Datos experimentales.

Realización de curvas de potencia y par para el motor.

nt [rpm]	n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
600	610.3333333	166.2333333	19.43333333
800	804.6666667	186.8666667	29.06666667
1000	1007	240.2666667	46.5
1200	1212	276.9666667	64.46666667
1400	1405.333333	362.6333333	97.43333333
1600	1605.666667	368.3666667	112.5666667
1800	1807.333333	378.3333333	130.5
2000	2013.666667	364.1	139.8
2200	2209.333333	348	146.9
2400	2405.333333	320.6333333	146.7333333



Gráfica 4.1 Curvas de potencia y par

Como se puede notar en la gráfica 4.1 el valor máximo de par es de 378.33 [Lbf\*ft] y éste se alcanza a la velocidad de 1800 RPM, así como el valor máximo de potencia es 146.9 [HP] y éste se alcanza a la velocidad de 2200 RPM. Con lo cual la tabla del ciclo queda:

Modo	Velocidad Teórica	Carga, % Teórica
1	600.000	0.000
2	1800.000	37.800
3	1800.000	94.500
4	1800.000	189.100
5	1800.000	283.700
6	1800.000	378.300
7	600.000	0.000
8	2200.000	378.300
9	2200.000	283.700
10	2200.000	189.100
11	2200.000	94.500
12	2200.000	37.800
13	600.000	0.000

Tabla 4.4 Ciclo 13 modos construido

Estos son los valores que indica el ciclo, y a las cuales se debió llevar el motor en cuanto a carga y velocidad.

Cabe señalar que al realizar las pruebas y al llevar el motor a estos valores de carga y velocidad se midió la potencia del motor ( $N_e$ ), las temperaturas del aceite, antes del convertidor y después del convertidor ( $T_{ac}$ ,  $T_{1c}$ ,  $T_{2c}$ ), así como las velocidades ( $n$ ) y pares reales ( $M$ ) a los que se llegaron.

Se realizaron 3 réplicas para cada caso, es decir 3 réplicas para 350 sin DOC, 3 réplicas para 350 con DOC y así sucesivamente, con los cuales se realizó un promedio general de estos valores.

Estas pruebas como se puede notar tuvieron una duración total de 30 minutos en los cuales se midió:  $NO_x$ , CO,  $CO_2$  y PM, además del consumo de combustible en peso, a través de una balanza antes y después de la prueba.

Para el cálculo de emisiones se promediaron los últimos 60 segundos de cada uno de los 13 modos para cada repetición con los cuales se realizó un promedio general para cada combustible con y sin DOC. Posteriormente cada valor de emisiones se multiplicó por los factores de ponderación y se realizó la suma para obtener los valores de las emisiones totales.

Como se menciono anteriormente, también se realizaron curvas de potencia y par para cada caso con el fin de comparar las prestaciones del motor.

A continuación se muestran las tablas de datos experimentales:

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	n [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	78.667	77.333	79.000	600.000	568.667	0.000	0.567	0.167
2	2	78.000	155.333	164.000	1800.000	1791.667	37.800	37.933	13.067
2	3	76.333	203.333	214.000	1800.000	1807.000	94.500	78.100	32.633
2	4	76.667	283.667	296.000	1800.000	1811.000	189.100	190.200	65.633
2	5	77.667	361.667	370.333	1800.000	1836.000	283.700	283.300	99.167
2	6	80.333	429.667	433.667	1800.000	1811.333	378.300	378.767	130.800
4	7	84.333	286.333	300.000	600.000	579.333	0.000	1.100	0.200
2	8	89.667	414.333	418.000	2200.000	2156.000	378.300	370.900	152.533
2	9	90.333	431.333	433.333	2200.000	2189.000	283.700	284.100	118.267
2	10	89.667	400.667	404.667	2200.000	2180.333	189.100	187.867	78.167
2	11	90.667	338.667	347.000	2200.000	2183.333	94.500	93.900	39.067
2	12	93.333	277.333	285.667	2200.000	2167.333	37.800	37.267	62.267
3	13	95.333	193.333	199.667	600.000	575.000	0.000	0.967	0.200

**Tabla 4.5 Datos 13 modos 350 sin DOC**

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	n [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	77.837	79.167	81.423	600.000	622.000	0.000	1.467	0.267
2	2	76.013	149.397	159.090	1800.000	1809.667	37.800	37.867	13.133
2	3	76.087	210.200	221.100	1800.000	1812.333	94.500	94.667	32.800
2	4	76.377	285.900	302.133	1800.000	1820.000	189.100	191.133	66.200
2	5	78.487	370.267	385.707	1800.000	1816.000	283.700	283.400	98.233
2	6	80.187	436.067	447.433	1800.000	1822.333	378.300	378.800	131.900
4	7	87.190	279.733	309.333	600.000	583.667	0.000	0.867	0.167
2	8	91.737	464.500	443.233	2200.000	2162.333	378.300	368.667	152.167
2	9	91.513	440.867	447.800	2200.000	2194.000	283.700	283.767	118.733
2	10	94.533	401.833	411.300	2200.000	2186.667	189.100	753.533	78.833
2	11	95.270	338.567	351.033	2200.000	2176.000	94.500	94.067	39.100
2	12	96.440	273.400	288.867	2200.000	2185.333	37.800	37.633	15.767
3	13	98.270	193.850	211.280	600.000	615.000	0.000	1.800	0.633

**Tabla 4.6 Datos 13 modos 250 con DOC**

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	n [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	80.200	78.967	79.780	600.000	625.333	0.000	0.467	0.067
2	2	80.533	158.933	167.600	1800.000	1879.000	37.800	36.700	12.900
2	3	81.033	213.533	220.267	1800.000	1826.333	94.500	94.567	33.000
2	4	82.000	294.900	303.000	1800.000	1845.667	189.100	191.000	67.267
2	5	81.967	366.233	368.667	1800.000	1820.333	283.700	284.033	98.733
2	6	85.933	445.367	447.900	1800.000	1842.000	378.300	377.567	132.900
4	7	83.667	291.000	297.433	600.000	614.333	0.000	0.567	0.167
2	8	88.293	438.200	439.320	2200.000	2152.333	378.300	369.000	151.633
2	9	90.700	442.700	447.533	2200.000	2224.667	283.700	283.933	120.500
2	10	92.900	407.733	410.000	2200.000	2206.000	189.100	188.167	80.133
2	11	92.987	337.300	342.300	2200.000	2185.333	94.500	94.300	39.300
2	12	93.400	276.767	313.600	2200.000	2186.667	37.800	37.700	15.800
3	13	87.890	176.767	179.033	600.000	598.000	0.000	0.300	0.067

**Tabla 4.7 Datos 13 modos B-5 sin DOC**

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	n [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	77.667	78.000	79.333	600.000	612.000	0.000	0.767	2.167
2	2	77.667	149.000	156.667	1800.000	1798.333	37.800	37.700	13.033
2	3	76.333	210.333	222.000	1800.000	1792.333	94.500	94.733	32.433
2	4	75.667	282.667	294.667	1800.000	1824.000	189.100	189.933	66.133
2	5	76.667	360.333	374.333	1800.000	1803.000	283.700	283.500	97.567
2	6	82.000	436.667	446.000	1800.000	1815.000	378.300	378.667	131.367
4	7	86.667	304.333	338.333	600.000	607.333	0.000	1.067	0.233
2	8	91.000	440.667	448.667	2200.000	2154.333	378.300	370.567	151.800
2	9	92.000	446.667	450.000	2200.000	2193.333	283.700	283.300	118.567
2	10	94.000	404.000	413.000	2200.000	2189.667	189.100	188.500	78.800
2	11	94.667	371.000	352.667	2200.000	2171.333	94.500	94.433	39.133
2	12	95.333	272.667	287.000	2200.000	2176.000	37.800	37.467	15.633
3	13	96.667	188.667	208.667	600.000	611.667	0.000	1.067	0.200

**Tabla 4.8 Datos 13 modos B-5 con DOC**

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	n [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	76.400	79.800	80.900	600.000	615.333	0.000	0.267	0.033
2	2	77.700	160.000	166.167	1800.000	1781.000	37.800	37.767	12.900
2	3	78.223	212.433	219.233	1813.333	1829.333	94.500	94.767	33.067
2	4	78.267	293.340	307.267	1800.000	1831.333	189.100	188.833	66.033
2	5	77.767	365.267	371.533	1800.000	1800.667	283.700	284.967	98.367
2	6	82.500	435.900	439.933	1800.000	1804.667	378.300	377.900	130.300
4	7	85.767	267.800	258.600	600.000	603.000	0.000	0.767	0.867
2	8	88.633	434.067	437.833	2200.000	2163.667	378.300	364.333	150.533
2	9	90.700	440.200	442.367	2200.000	2203.667	283.700	280.667	117.833
2	10	92.933	402.533	405.367	2200.000	2205.333	189.100	187.500	78.933
2	11	95.233	333.000	337.933	2200.000	2198.667	94.500	94.233	39.600
2	12	95.500	273.000	279.700	2200.000	2190.667	37.800	38.033	15.967
3	13	91.033	175.467	184.667	600.000	618.000	0.000	0.200	0.033

**Tabla 4.9 Datos 13 modos B-10 sin DOC**

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	n [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	78.675	74.700	75.700	600.000	589.500	0.000	0.525	0.100
2	2	77.550	155.000	165.100	1800.000	1798.250	37.800	37.575	13.000
2	3	77.775	203.325	216.525	1810.000	1809.000	94.500	95.550	33.000
2	4	78.475	289.325	303.675	1800.000	1812.500	189.100	189.725	65.575
2	5	78.050	374.650	388.525	1800.000	1812.250	283.700	284.450	98.300
2	6	82.775	448.650	410.875	1800.000	1815.250	378.300	378.150	131.250
4	7	87.000	258.200	285.100	600.000	590.750	0.000	0.425	0.125
2	8	93.775	439.425	447.550	2200.000	2164.250	378.300	362.875	149.825
2	9	96.300	453.075	459.225	2200.000	2174.750	283.700	283.025	117.450
2	10	95.575	413.825	422.825	2200.000	2198.250	189.100	188.675	79.025
2	11	97.450	348.650	362.175	2200.000	2175.250	94.500	94.250	39.100
2	12	97.200	285.925	301.325	2200.000	2180.000	37.800	37.775	15.800
3	13	94.500	178.700	199.425	600.000	593.250	0.000	0.225	0.075

**Tabla 4.10 Datos 13 modos B-10 con DOC**

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	N [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	74.780	80.833	82.440	600.000	607.333	0.000	1.367	0.267
2	2	77.133	144.233	153.900	1800.000	1811.000	37.800	37.667	13.100
2	3	77.167	199.533	148.300	1813.333	1816.000	94.500	95.300	33.033
2	4	76.867	282.333	296.333	1800.000	1819.000	189.100	190.033	66.000
2	5	78.500	359.233	370.967	1800.000	1804.000	283.700	282.600	97.367
2	6	82.533	413.533	419.667	1800.000	1816.333	378.300	378.967	131.467
4	7	77.833	289.633	299.300	600.000	623.000	0.000	0.500	0.133
2	8	89.467	395.833	402.800	2200.000	2151.000	378.300	363.767	149.933
2	9	90.100	442.977	423.767	2200.000	2177.000	283.700	284.900	118.333
2	10	88.233	392.300	398.533	2200.000	2206.000	189.100	189.500	79.767
2	11	87.433	336.500	343.233	2200.000	2194.667	94.500	94.500	39.600
2	12	87.567	309.167	284.300	2200.000	2192.667	37.800	37.700	15.200
3	13	81.633	199.700	208.167	600.000	620.333	0.000	0.900	0.200

**Tabla 4.11 Datos 13 modos B-20 sin DOC**

t[ <b>min</b> ] por modo	modo	Tac [°C]	T1c [°C]	T2c [°C]	nt [rpm]	n [rpm]	Mt [lbf pie]	M [lbf pie]	Ne [HP]
3	1	74.780	80.833	82.440	600.000	607.333	0.000	1.367	0.267
2	2	77.133	144.233	153.900	1800.000	1811.000	37.800	37.667	13.100
2	3	77.167	199.533	148.300	1813.333	1816.000	94.500	95.300	33.033
2	4	76.867	282.333	296.333	1800.000	1819.000	189.100	190.033	66.000
2	5	78.500	359.233	370.967	1800.000	1804.000	283.700	282.600	97.367
2	6	82.533	413.533	419.667	1800.000	1816.333	378.300	378.967	131.467
4	7	87.833	289.633	299.300	600.000	623.000	0.000	0.500	0.133
2	8	99.467	395.833	402.800	2200.000	2151.000	378.300	363.767	149.933
2	9	90.100	442.977	423.767	2200.000	2177.000	283.700	284.900	118.333
2	10	88.233	392.300	398.533	2200.000	2206.000	189.100	189.500	79.767
2	11	87.433	336.500	343.233	2200.000	2194.667	94.500	94.500	39.600
2	12	87.567	309.167	284.300	2200.000	2192.667	37.800	37.700	15.200
3	13	81.633	199.700	208.167	600.000	620.333	0.000	0.900	0.200

**Tabla 4.12 Datos 13 modos B-20 con DOC**

Donde:

**Tac- Temperatura del aceite**

**T1c- Temperatura antes del catalizador**

**T2c- Temperatura después del catalizador**

**nt- Velocidad teórica**

**Mt- Par teórico.**

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	Modo	CO <sub>g/min</sub>	NO <sub>x g/min</sub>	CO <sub>2 g/min</sub>	R49	US	CO <sub>g/min</sub>	NO <sub>x g/min</sub>	CO <sub>2 g/min</sub>	CO <sub>g/min</sub>	NO <sub>x g/min</sub>
1.000	0.466	1.166	52.297	0.083	0.067	0.039	0.097	4.358	0.031	0.078	3.486
2.000	1.964	2.943	258.871	0.080	0.080	0.157	0.235	20.710	0.157	0.235	20.710
3.000	1.074	4.594	353.603	0.080	0.080	0.086	0.368	28.288	0.086	0.368	28.288
4.000	1.152	7.496	624.905	0.080	0.080	0.092	0.600	49.992	0.092	0.600	49.992
5.000	1.516	9.375	884.420	0.080	0.080	0.121	0.750	70.754	0.121	0.750	70.754
6.000	2.172	11.637	1168.670	0.250	0.080	0.543	2.909	292.168	0.174	0.931	93.494
7.000	0.169	0.948	39.042	0.083	0.067	0.014	0.079	3.253	0.011	0.063	2.603
8.000	2.993	10.672	1565.731	0.100	0.080	0.299	1.067	156.573	0.239	0.854	125.259
9.000	1.354	9.493	1157.758	0.020	0.080	0.027	0.190	23.155	0.108	0.759	92.621
10.000	1.039	7.107	789.866	0.020	0.080	0.021	0.142	15.797	0.083	0.569	63.189
11.000	0.917	4.275	455.313	0.020	0.080	0.018	0.086	9.106	0.073	0.342	36.425
12.000	1.397	2.582	303.078	0.020	0.080	0.028	0.052	6.062	0.112	0.207	24.246
13.000	0.292	0.917	41.836	0.083	0.067	0.024	0.076	3.486	0.019	0.061	2.789
Promedio PM grs.	Consumo de combustible			Suma		1.470	6.651	683.703	1.308	5.816	613.856
<b>3.456</b>	<b>4621.673 gr.</b>										
Promedios Generales de la suma R49				Promedios Generales de la suma US							
	CO <sub>g/min</sub>	NO <sub>x g/min</sub>	CO <sub>2 g/min</sub>	CO <sub>g/min</sub>	NO <sub>x g/min</sub>	CO <sub>2 g/min</sub>	Promedio PM grs.				
	1.470	6.651	683.703	1.308	5.816	613.856	3.456				

**Tabla 4.13 Promedios de emisiones 350 sin DOC**

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	Modo	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	R49	US	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min
1.000	0.505	1.222	54.150	0.083	0.067	0.042	0.102	4.512	0.034	0.081	3.610
2.000	2.214	3.128	273.870	0.080	0.080	0.177	0.250	21.910	0.177	0.250	21.910
3.000	1.297	4.971	409.246	0.080	0.080	0.104	0.398	32.740	0.104	0.398	32.740
4.000	0.988	7.552	632.471	0.080	0.080	0.079	0.604	50.598	0.079	0.604	50.598
5.000	0.602	9.534	931.714	0.080	0.080	0.048	0.763	74.537	0.048	0.763	74.537
6.000	0.692	11.966	1251.156	0.250	0.080	0.173	2.992	312.789	0.055	0.957	100.093
7.000	0.017	0.978	39.858	0.083	0.067	0.001	0.082	3.321	0.001	0.065	2.657
Q p8.000	1.547	10.676	1635.853	0.100	0.080	0.155	1.068	163.585	0.124	0.854	130.868
9.000	0.473	9.375	1211.545	0.020	0.080	0.009	0.187	24.231	0.038	0.750	96.924
10.000	0.396	7.064	811.701	0.020	0.080	0.008	0.141	16.234	0.032	0.565	64.936
11.000	0.366	4.250	473.224	0.020	0.080	0.007	0.085	9.464	0.029	0.340	37.858
12.000	1.119	2.595	309.178	0.020	0.080	0.022	0.052	6.184	0.090	0.208	24.734
13.000	0.231	0.915	42.883	0.083	0.067	0.019	0.076	3.574	0.015	0.061	2.859
Promedio PM grs.	Consumo de combustible				Suma	0.846	6.799	723.679	0.826	5.897	644.323
3.623	4850.148 gr.										
Promedios Generales de la suma R49				Promedios Generales de la suma US							
	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	Promedio PM grs.				
	0.846	6.799	723.679	0.826	5.897	644.323	3.623				

Tabla 4.14 Promedios de emisiones 350 con DOC

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	Modo	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	R49	US	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min
1.000	1.332	1.168	66.214	0.083	0.067	0.111	0.097	5.518	0.089	0.078	4.414
2.000	2.845	2.794	265.591	0.080	0.080	0.228	0.223	21.247	0.228	0.223	21.247
3.000	1.648	4.662	382.309	0.080	0.080	0.132	0.373	30.585	0.132	0.373	30.585
4.000	1.521	7.381	595.245	0.080	0.080	0.122	0.591	47.620	0.122	0.591	47.620
5.000	1.995	9.328	870.807	0.080	0.080	0.160	0.746	69.665	0.160	0.746	69.665
6.000	2.836	11.700	1198.291	0.250	0.080	0.709	2.925	299.573	0.227	0.936	95.863
7.000	1.179	0.940	55.468	0.083	0.067	0.098	0.078	4.622	0.079	0.063	3.698
8.000	3.930	10.683	1569.180	0.100	0.080	0.393	1.068	156.918	0.314	0.855	125.534
9.000	2.195	9.649	1254.307	0.020	0.080	0.044	0.193	25.086	0.176	0.772	100.345
10.000	1.473	7.569	828.932	0.020	0.080	0.029	0.151	16.579	0.118	0.606	66.315
11.000	1.655	4.476	504.401	0.020	0.080	0.033	0.090	10.088	0.132	0.358	40.352
12.000	0.921	2.869	314.064	0.020	0.080	0.018	0.057	6.281	0.074	0.229	25.125
13.000	0.043	0.897	33.216	0.083	0.067	0.004	0.075	2.768	0.003	0.060	2.214
PM grs.	Consumo de combustible				Suma	2.081	6.668	696.549	1.852	5.889	632.977
4.263	4888.995	gr.									
Promedios Generales de la suma R49			Promedios Generales de la suma US								
CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	Promedio PM grs.					
2.081	6.668	696.549	1.852	5.889	632.977	4.263					

Tabla 4.15 Promedios de emisiones B-5 sin DOC

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	R49	US	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min
1.000	0.747	1.219	52.023	0.083	0.067	0.062	0.102	4.335	0.050	0.081	3.468
2.000	2.066	3.348	264.603	0.080	0.080	0.165	0.268	21.168	0.165	0.268	21.168
3.000	1.241	5.124	383.178	0.080	0.080	0.099	0.410	30.654	0.099	0.410	30.654
4.000	1.355	8.074	645.971	0.080	0.080	0.108	0.646	51.678	0.108	0.646	51.678
5.000	0.519	9.958	903.472	0.080	0.080	0.042	0.797	72.278	0.042	0.797	72.278
6.000	1.459	12.293	1244.330	0.250	0.080	0.365	3.073	311.082	0.117	0.983	99.546
7.000	0.414	0.968	45.819	0.083	0.067	0.034	0.081	3.818	0.028	0.065	3.055
8.000	1.795	11.056	1623.496	0.100	0.080	0.179	1.106	162.350	0.144	0.885	129.880
9.000	0.889	10.314	1372.228	0.020	0.080	0.018	0.206	27.445	0.071	0.825	109.778
10.000	0.273	7.835	828.935	0.020	0.080	0.005	0.157	16.579	0.022	0.627	66.315
11.000	0.686	4.635	494.884	0.020	0.080	0.014	0.093	9.898	0.055	0.371	39.591
12.000	1.388	2.826	322.302	0.020	0.080	0.028	0.057	6.446	0.111	0.226	25.784
13.000	0.574	0.852	40.692	0.083	0.067	0.048	0.071	3.391	0.038	0.057	2.713
PM grs.	Consumo de combustible				Suma	1.168	7.065	721.121	1.049	6.240	655.907

4.261 4929.189 gr.

Promedios Generales de la suma R49			Promedios Generales de la suma US			Promedio PM grs.
CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	
1.168	7.065	721.121	1.049	6.240	655.907	4.261

**Tabla 4.15 Promedios de emisiones B-5 con DOC**

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	Modo	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	R49	US	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min
1.000	0.405	1.157	47.195	0.083	0.067	0.034	0.096	3.933	0.027	0.077	3.146
2.000	1.815	2.920	254.035	0.080	0.080	0.145	0.234	20.323	0.145	0.234	20.323
3.000	1.057	4.657	381.064	0.080	0.080	0.085	0.373	30.485	0.085	0.373	30.485
4.000	1.083	7.391	619.015	0.080	0.080	0.087	0.591	49.521	0.087	0.591	49.521
5.000	1.740	9.028	892.214	0.080	0.080	0.139	0.722	71.377	0.139	0.722	71.377
6.000	3.599	11.217	1226.798	0.250	0.080	0.900	2.804	306.700	0.288	0.897	98.144
7.000	0.122	1.020	41.503	0.083	0.067	0.010	0.085	3.459	0.008	0.068	2.767
8.000	2.912	9.988	1575.527	0.100	0.080	0.291	0.999	157.553	0.233	0.799	126.042
9.000	1.660	9.025	1257.425	0.020	0.080	0.033	0.181	25.149	0.133	0.722	100.594
10.000	1.099	7.105	858.654	0.020	0.080	0.022	0.142	17.173	0.088	0.568	68.692
11.000	0.905	4.267	517.633	0.020	0.080	0.018	0.085	10.353	0.072	0.341	41.411
12.000	1.127	2.836	334.302	0.020	0.080	0.023	0.057	6.686	0.090	0.227	26.744
13.000	0.241	0.835	38.579	0.083	0.067	0.020	0.070	3.215	0.016	0.056	2.572
Promedio PM grs.	Consumo de combustible				Suma	1.806	6.438	705.925	1.411	5.675	641.818
4.481	4894.218	gr.									
Promedios Generales de la suma R49				Promedios Generales de la suma US							
CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	Promedio PM grs.					
1.806	6.438	705.925	1.411	5.675	641.818	4.481					

**Tabla 4.16 Promedios de emisiones B-10 sin DOC**

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	Modo	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	R49	US	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min
1.000	0.645	1.106	50.511	0.083	0.067	0.054	0.092	4.209	0.043	0.074	3.367
2.000	1.966	3.136	267.267	0.080	0.080	0.157	0.251	21.381	0.157	0.251	21.381
3.000	1.274	4.866	388.746	0.080	0.080	0.102	0.389	31.100	0.102	0.389	31.100
4.000	0.975	7.537	617.928	0.080	0.080	0.078	0.603	49.434	0.078	0.603	49.434
5.000	0.699	9.574	901.762	0.080	0.080	0.056	0.766	72.141	0.056	0.766	72.141
6.000	1.269	12.183	1233.885	0.250	0.080	0.317	3.046	308.471	0.102	0.975	98.711
7.000	0.034	0.866	34.613	0.083	0.067	0.003	0.072	2.884	0.002	0.058	2.308
8.000	1.406	10.668	1595.379	0.100	0.080	0.141	1.067	159.538	0.112	0.853	127.630
9.000	0.663	10.146	1253.523	0.020	0.080	0.013	0.203	25.070	0.053	0.812	100.282
10.000	0.384	8.074	852.837	0.020	0.080	0.008	0.161	17.057	0.031	0.646	68.227
11.000	0.305	4.721	514.942	0.020	0.080	0.006	0.094	10.299	0.024	0.378	41.195
12.000	0.488	3.096	347.348	0.020	0.080	0.010	0.062	6.947	0.039	0.248	27.788
13.000	0.252	0.818	40.645	0.083	0.067	0.021	0.068	3.387	0.017	0.055	2.710
Promedio PM grs.	Consumo de combustible				Suma	0.965	6.875	711.919	0.816	6.106	646.274
4.338	4847.463	gr.									
Promedios Generales de la suma R49			Promedios Generales de la suma US								
CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	Promedio PM grs.					
0.965	6.875	711.919	0.816	6.106	646.274	4.338					

**Tabla 4.17 Promedios de emisiones B-10 con DOC**

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	Modo	CO <sub>g</sub> /min	NO <sub>x</sub> <sub>g</sub> /min	CO <sub>2</sub> <sub>g</sub> /min	R49	US	CO <sub>g</sub> /min	NO <sub>x</sub> <sub>g</sub> /min	CO <sub>2</sub> <sub>g</sub> /min	CO <sub>g</sub> /min	NO <sub>x</sub> <sub>g</sub> /min
1.000	0.472	1.016	34.214	0.083	0.067	0.039	0.085	2.851	0.031	0.068	2.281
2.000	1.759	2.933	246.234	0.080	0.080	0.141	0.235	19.699	0.141	0.235	19.699
3.000	1.051	4.808	383.270	0.080	0.080	0.084	0.385	30.662	0.084	0.385	30.662
4.000	1.137	7.714	621.477	0.080	0.080	0.091	0.617	49.718	0.091	0.617	49.718
5.000	1.289	10.034	891.328	0.080	0.080	0.103	0.803	71.306	0.103	0.803	71.306
6.000	2.672	13.065	1279.026	0.250	0.080	0.668	3.266	319.756	0.214	1.045	102.322
7.000	0.308	0.987	38.689	0.083	0.067	0.026	0.082	3.224	0.021	0.066	2.579
8.000	2.878	11.032	1553.398	0.100	0.080	0.288	1.103	155.340	0.230	0.883	124.272
9.000	1.196	10.128	1254.323	0.020	0.080	0.024	0.203	25.086	0.096	0.810	100.346
10.000	0.914	7.753	845.079	0.020	0.080	0.018	0.155	16.902	0.073	0.620	67.606
11.000	0.868	4.360	499.501	0.020	0.080	0.017	0.087	9.990	0.069	0.349	39.960
12.000	1.151	2.782	323.182	0.020	0.080	0.023	0.056	6.464	0.092	0.223	25.855
13.000	0.382	0.850	36.846	0.083	0.067	0.032	0.071	3.070	0.025	0.057	2.456
Promedio PM grs.	Consumo de combustible				Suma	1.554	7.147	714.068	1.271	6.159	639.062
4.061	4781.286	gr.									
Promedios Generales de la suma R49			Promedios Generales de la suma US								
CO <sub>g</sub> /min	NO <sub>x</sub> <sub>g</sub> /min	CO <sub>2</sub> <sub>g</sub> /min	CO <sub>g</sub> /min	NO <sub>x</sub> <sub>g</sub> /min	CO <sub>2</sub> <sub>g</sub> /min	Promedio PM grs.					
1.554	7.147	714.068	1.271	6.159	639.062	4.061					

**Tabla 4.18 Promedios de emisiones B-20 sin DOC**

Promedios de pruebas	Promedio últimos 60 segundos de cada modo			Factor de ponderación		Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación R49			Promedio de los últimos 60 segundos por factor de ponderación US		
	Modo	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	R49	US	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min
1.000	0.727	1.058	44.191	0.083	0.067	0.061	0.088	3.683	0.048	0.071	2.946
2.000	1.872	3.014	262.956	0.080	0.080	0.150	0.241	21.037	0.150	0.241	21.037
3.000	1.171	4.678	380.022	0.080	0.080	0.094	0.374	30.402	0.094	0.374	30.402
4.000	0.928	7.406	621.146	0.080	0.080	0.074	0.592	49.692	0.074	0.592	49.692
5.000	0.541	9.658	931.194	0.080	0.080	0.043	0.773	74.495	0.043	0.773	74.495
6.000	0.828	12.136	1255.880	0.250	0.080	0.207	3.034	313.970	0.066	0.971	100.470
7.000	0.054	0.932	37.860	0.083	0.067	0.005	0.078	3.155	0.004	0.062	2.524
8.000	1.432	10.560	1595.425	0.100	0.080	0.143	1.056	159.542	0.115	0.845	127.634
9.000	0.591	9.483	1232.911	0.020	0.080	0.012	0.190	24.658	0.047	0.759	98.633
10.000	0.353	7.266	828.567	0.020	0.080	0.007	0.145	16.571	0.028	0.581	66.285
11.000	0.381	4.106	491.137	0.020	0.080	0.008	0.082	9.823	0.030	0.328	39.291
12.000	0.958	2.574	309.696	0.020	0.080	0.019	0.051	6.194	0.077	0.206	24.776
13.000	0.309	0.902	42.467	0.083	0.067	0.026	0.075	3.539	0.021	0.060	2.831
Promedio PM grs.	Consumo de combustible				Suma	0.848	6.780	716.761	0.797	5.863	641.016
3.429	4833.342	gr.									

Promedios Generales de la suma R49			Promedios Generales de la suma US			Promedio PM grs.
CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	CO_g/min	NOx_g/min	CO2_g/min	
0.848	6.780	716.761	0.797	5.863	641.016	3.429

**Tabla 4.19 Promedios de emisiones B-20 con DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
610	169.933333	20
801.333333	183.666667	28.133333
1001.666667	243.266667	46.633333
1205.666667	310.6	71.7
1403.333333	415.3	111.566667
1606	<b>415.933333</b>	127.833333
1803.666667	415.033333	143.366667
2004.666667	396.366667	151.866667
2197	378.2	158.9
2398.333333	353.066667	<b>161.766667</b>

**Tabla 4.20 Velocidad, par y potencia 350 sin DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
614	159.866667	18.833333
798.666667	182.9	28.033333
991.333333	235.6	44.7
1205	307.633333	71.066667
1400.666667	<b>404.466667</b>	108.133333
1601	400.233333	122.6
1801	400.566667	138
1999.666667	385.666667	147.633333
2207.666667	370.5	156
2397	344.366667	<b>157.833333</b>

**Tabla 4.22 Velocidad, par y potencia B-5 sin DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
607.333333	163.1	19.033333
801.333333	183.266667	28.1
994.666667	236.633333	45.1
1210	306.566667	70.933333
1401.666667	<b>405.2</b>	108.3
1603	402	123.066667
1822.666667	402.933333	138.8
2001	382.366667	146.166667
2204.666667	363.833333	153.033333
2399.666667	336.833333	<b>154.233333</b>

**Tabla 4.24 Velocidad, par y potencia B-10 sin DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
600	160.053333	18.433333
802.666667	180.2	26.533333
1003.666667	232.033333	44.533333
1204.333333	282.7	65.066667
1408.666667	<b>389.933333</b>	104.9
1605	386.466667	118.533333
1801.666667	386.5	133
1999	369.9	142.466667
2204.666667	354.5	148.966667
2397.666667	330.866667	<b>151.4</b>

**Tabla 4.26 Velocidad, par y potencia B-20 sin DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
604.666667	165.6	19.233333
797.666667	181.433333	27.8
998.666667	233.933333	44.766667
1208	288.133333	66.6
1405.666667	406.6	109.433333
1600.333333	407.633333	124.833333
1805.333333	<b>408.533333</b>	141.066667
2003.333333	389.1	149.133333
2198	370.633333	155.6
2398.333333	345.266667	<b>158.4</b>

**Tabla 4.21 Velocidad, par y potencia 350 con DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
619	169.1	20.033333
801	189.966667	29.133333
1010	243.966667	47.1
1217.666667	309.033333	72
1398.666667	<b>411.066667</b>	109.933333
1606	405.866667	123.533333
1801.666667	403.833333	138.866667
2002.333333	389.166667	148.9
2200.333333	369.366667	155.066667
2404	342.466667	<b>156.866667</b>

**Tabla 4.23 Velocidad, par y potencia B-5 con DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
616.333333	161.4	19.133333
798	179.266667	27.533333
999.666667	232.533333	44.666667
1205.333333	290.766667	67.233333
1404	397.766667	106.933333
1610.666667	399.366667	123.233333
1804	<b>401.666667</b>	138.633333
1993	387.566667	147.733333
2200.666667	366.433333	154.466667
2437.666667	341.766667	<b>156.8</b>

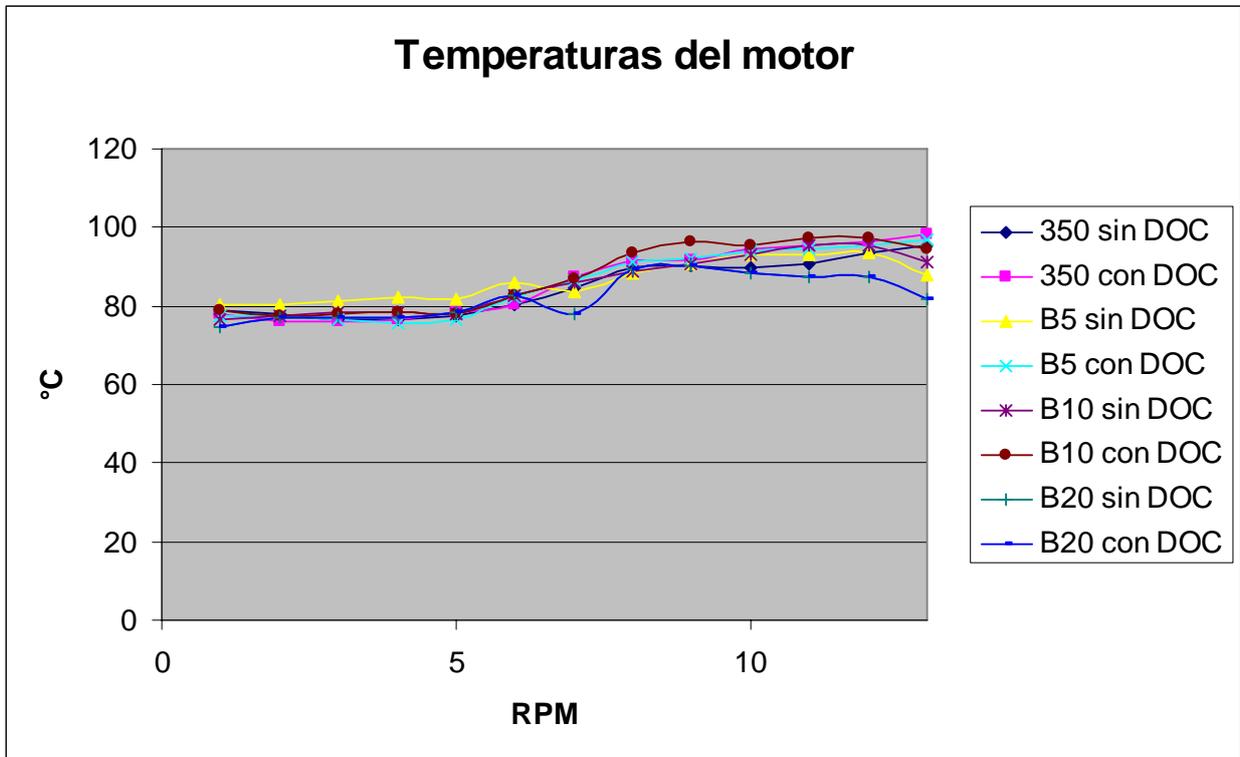
**Tabla 4.25 Velocidad, par y potencia B-10 sin DOC**

n [rpm]	M [lbf*pie]	Ne[HP]
606.333333	163.133333	19.066667
797.666667	170.966667	26.9
996.666667	224.733333	42.966667
1206.666667	276.366667	63.933333
1406.333333	387.366667	105.233333
1602	387.1	118.9
1800.666667	<b>389.2</b>	134.266667
2006	373.766667	143.6
2203.666667	356.466667	150.2
2403	334.8	<b>154.066667</b>

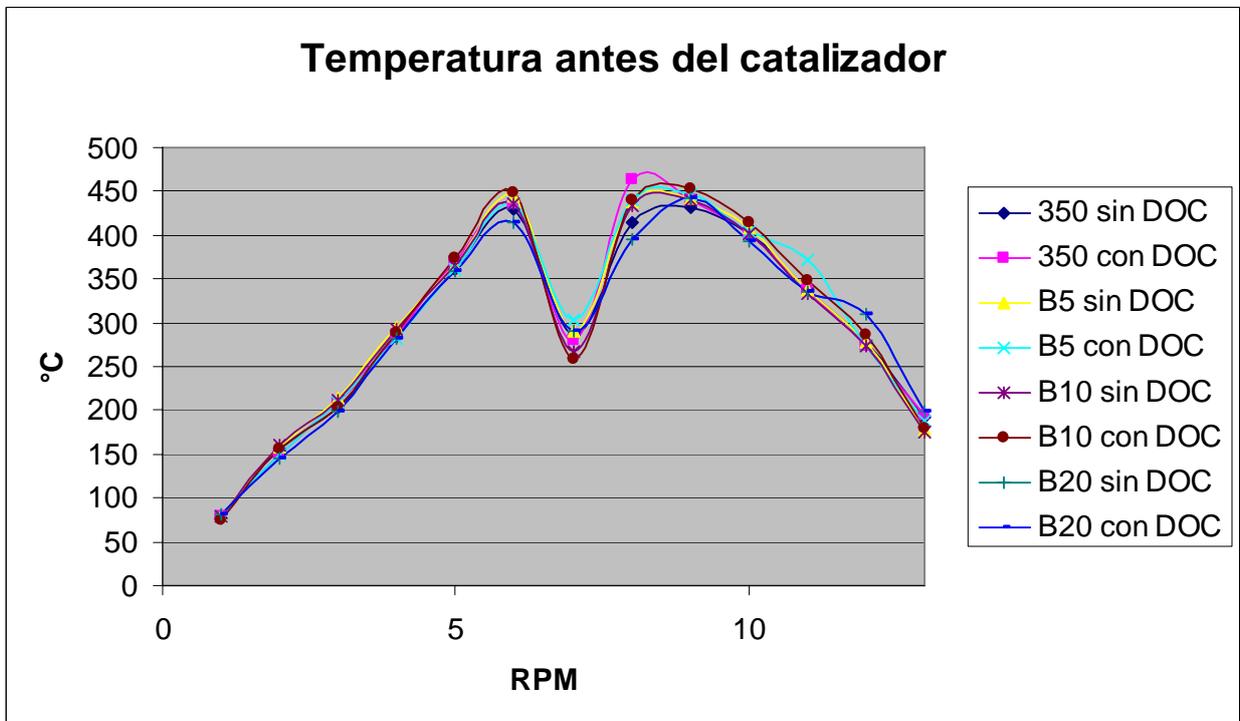
**Tabla 4.27 Velocidad, par y potencia B-20 con DOC**

### 4.3 Análisis de los resultados.

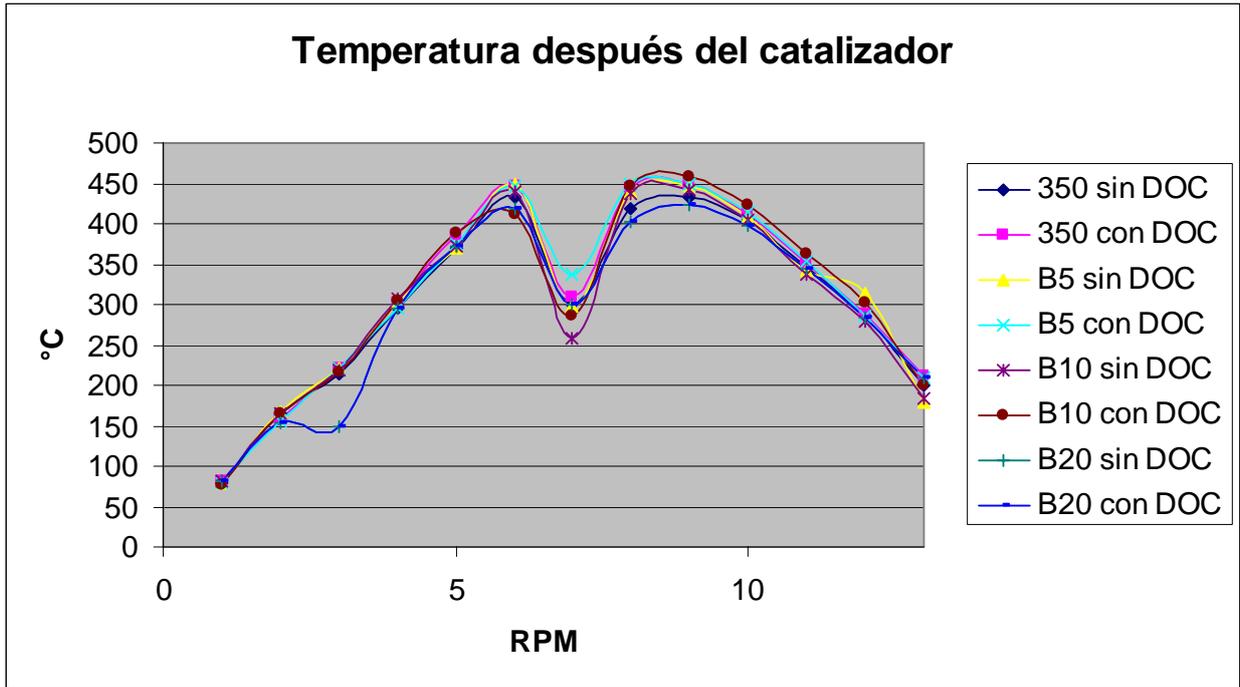
#### Temperaturas



Gráfica 4.2 Temperaturas del motor



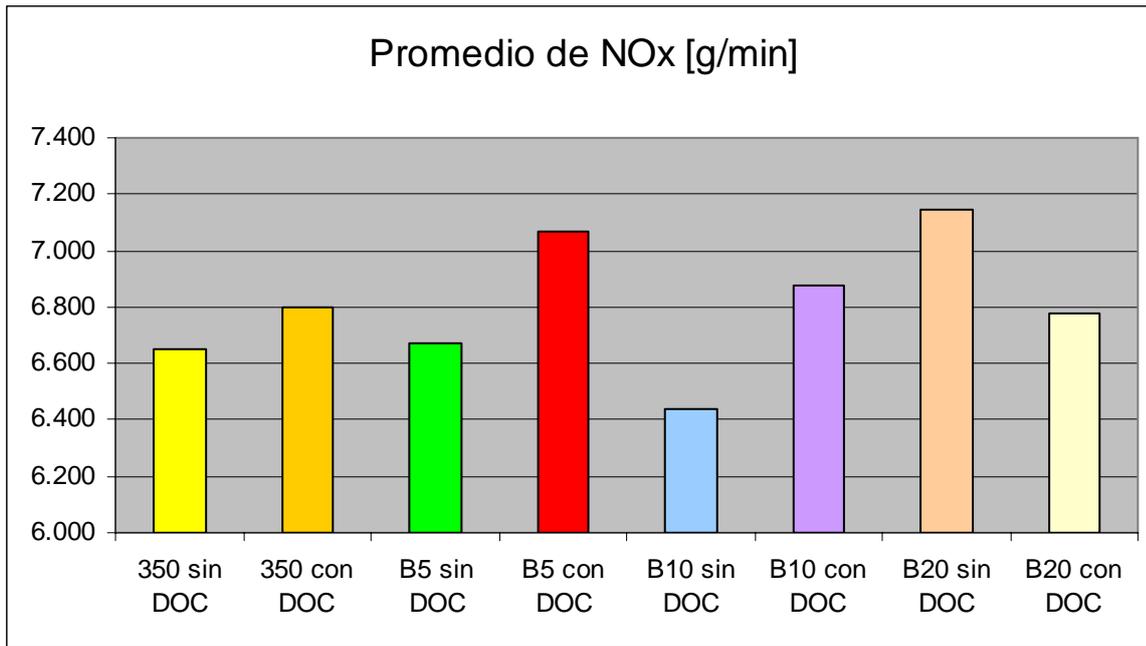
Gráfica 4.3 Temperaturas antes del catalizador



Gráfica 4.4 Temperaturas después del catalizador

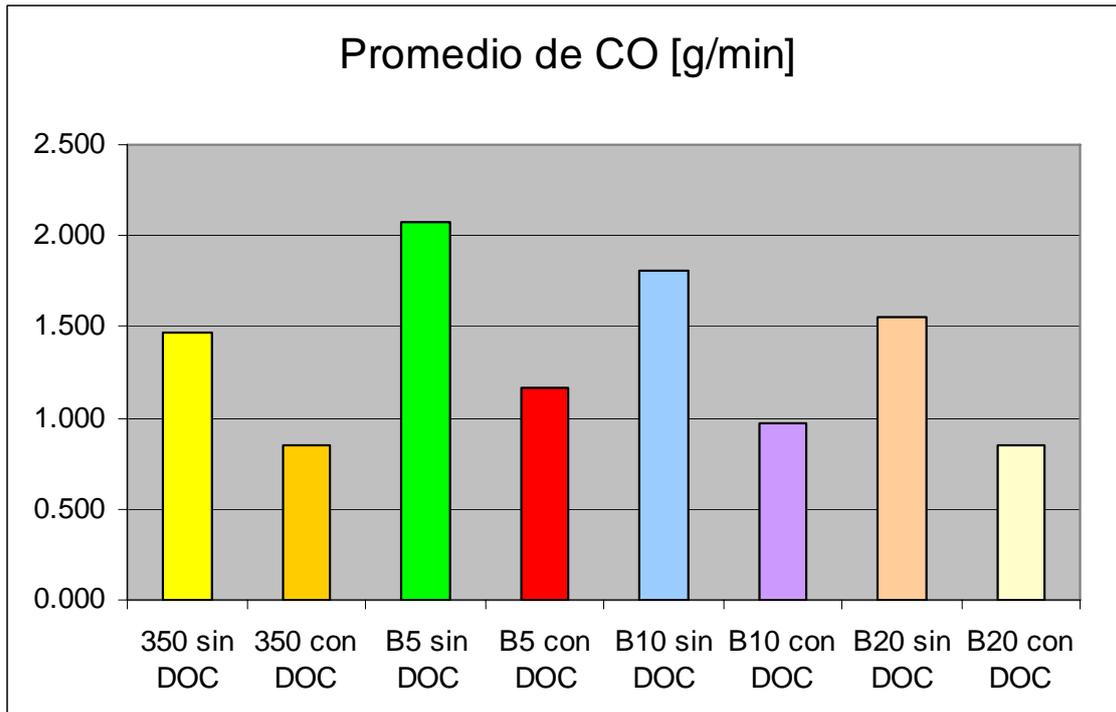
Uno de los parámetros importantes en el monitoreo del funcionamiento del motor es la temperatura. La del aceite de lubricación ( $T_{ac}$ ) (gráfica 4.2) indica la temperatura de funcionamiento del motor, que muestra valores diferentes dependientes de la carga aplicada, y es muy similar para todos los combustibles. Y en el caso de las temperaturas antes y después del catalizador, sirven como indicadores del funcionamiento del mismo, una elevación de su valor al pasar los gases de escape a través de él, indica que se realizan oxidaciones y funciona correctamente, como se observa entre las gráficas 4.3 y 4.4.

### **Emisiones**



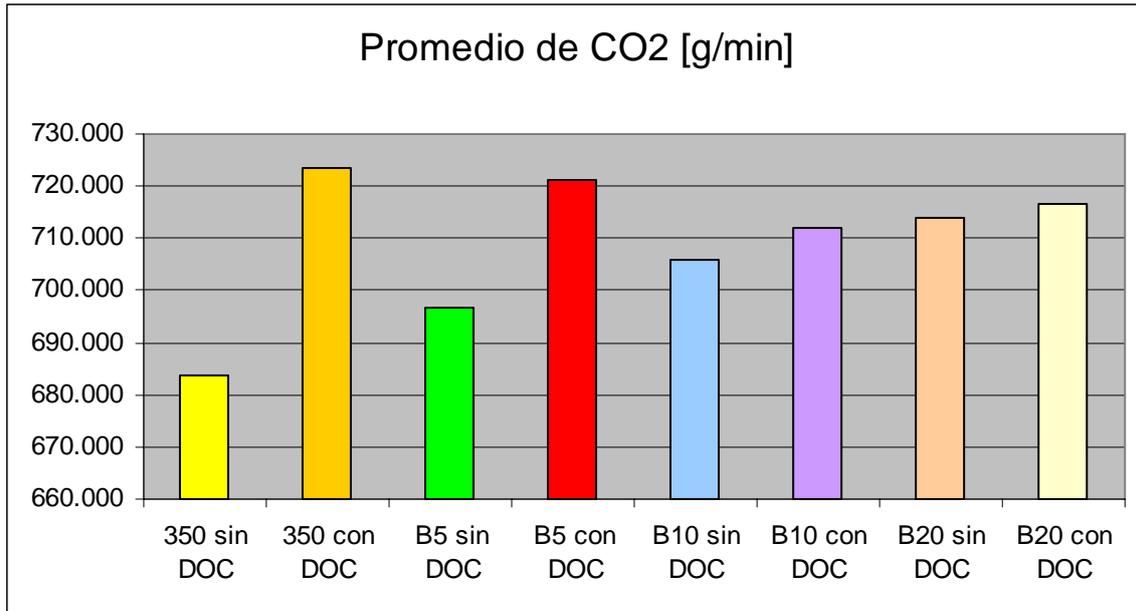
Gráfica 4.5 Promedio de NOx

En el caso de los NOx se puede observar de la gráfica 4.5 que haciendo uso del convertidor catalítico, éstos aumentan, a excepción del B20, también se observa que el combustible que mejor se comporta en este aspecto es el B10 sin convertidor. Otro aspecto que destaca en esta gráfica es que en comparación con el diesel de alto azufre, el biodiesel no disminuye los NOx exceptuando el B10 sin DOC y el B20 con DOC.



Gráfica 4.6 Promedio de CO

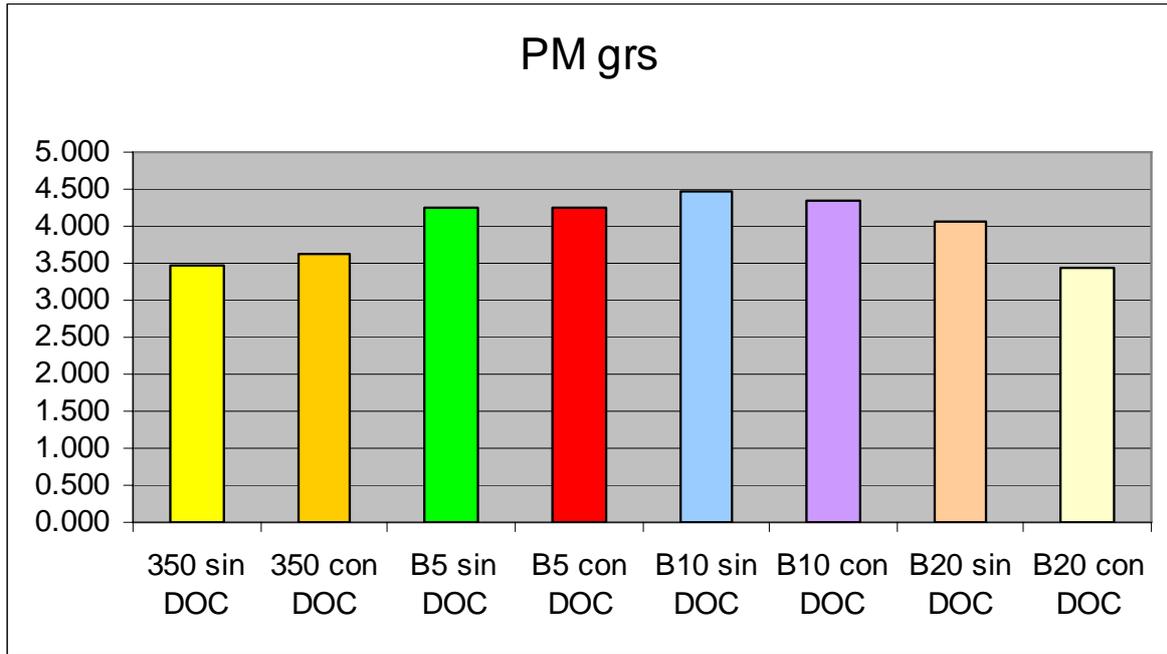
En cuanto al CO se puede observar en la gráfica que el convertidor trabaja de manera correcta, ya que cumple con reducirlo, en todos los casos. Es también pertinente resaltar que al comparar entre los distintos combustibles, el diesel de 350ppm se comporta de mejor manera que el biodiesel de origen animal, ya que dicho combustible produce menores cantidades de CO, tanto con DOC como sin DOC. Otro aspecto más es que el combustible que produjo mayor cantidad de CO es la mezcla B5, y se puede notar que la tendencia es a disminuir conforme se aumenta la cantidad de biodiesel.



Gráfica 4.7 Promedio de CO<sub>2</sub>

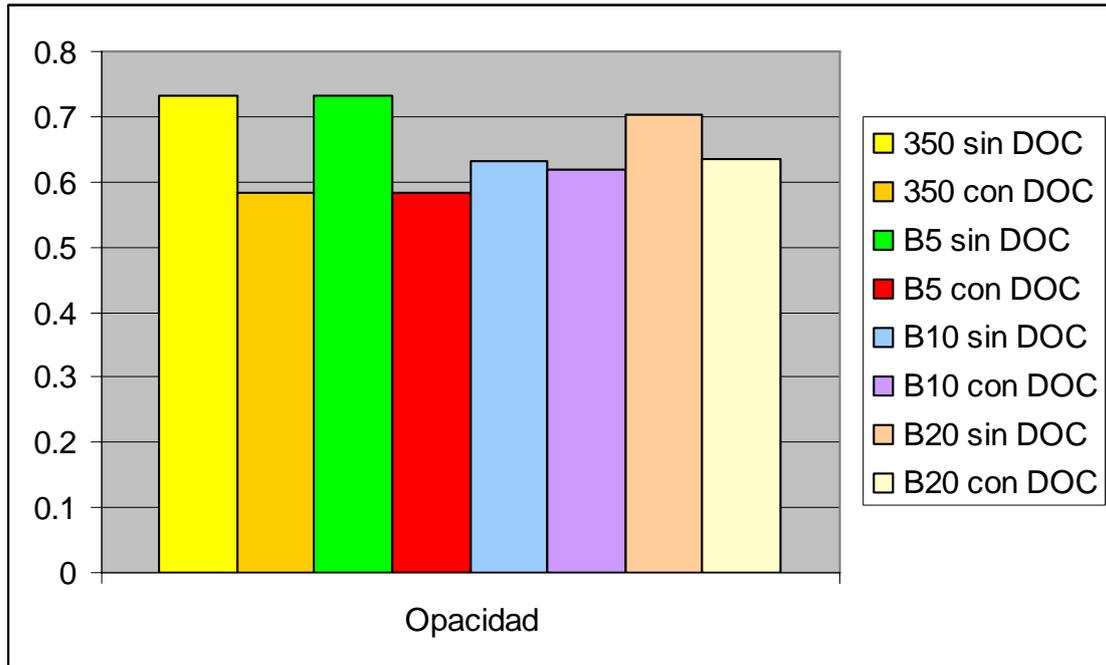
Por otra parte, al analizar la gráfica 4.7 del CO<sub>2</sub>, también se puede notar que el convertidor trabaja de manera correcta, ya que los niveles de CO<sub>2</sub> se incrementan en comparación con los ensayos sin dicho catalizador, con lo cual se puede deducir que el CO y los HC son oxidados de manera correcta.

También destacan los niveles de emisión de este gas entre el combustible diesel 350 ppm, con las diferentes mezclas, esto puede significar que el azufre o en general las características del diesel PEMEX produce mayores cantidades de hidrocarburos que el biodiesel de origen animal durante su combustión.



Gráfica 4.8 Promedio de PM

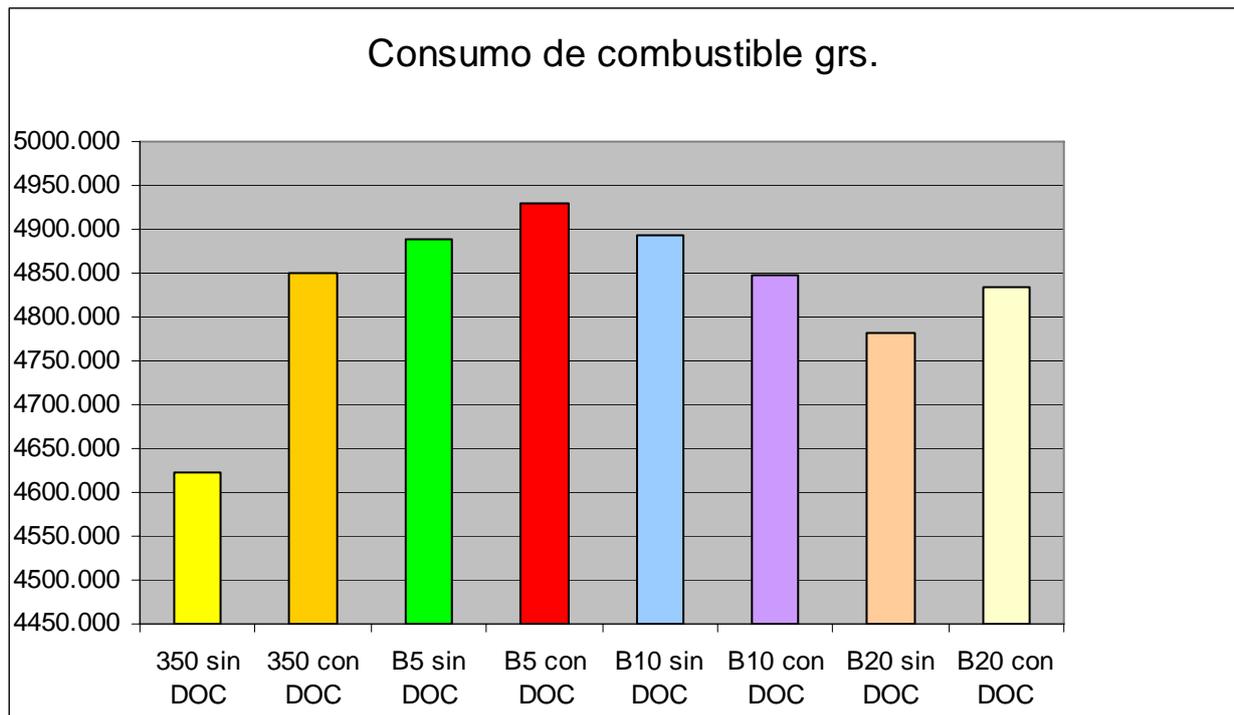
En cuanto al material particulado se puede observar, en la gráfica 4.8 que, el diesel 350 se comporta mejor que las distintas mezclas de biodiesel con y sin DOC, a excepción de la mezcla B20. En el caso del uso del convertidor no hay certidumbre, puesto que para algunos casos aumentan las partículas pero en otros, como en el B20, disminuyen.



Gráfica 4.9 Opacidad m<sup>-1</sup>

En el caso de la opacidad o coeficiente de absorción de luz (gráfica 4.9) puede observarse que el uso del convertidor ayuda a reducir los valores de ésta. Y la mezcla en la cual toma un valor mínimo es el B5 con DOC, también destaca el B10 sin DOC ya que es el combustible que mejor se comporta sin el uso del convertidor.

**Consumo de combustible**



Gráfica 4.10 Consumo de combustible

Respecto al consumo de combustible, esta prueba (13 modos) no es el mejor método para evaluar dicho consumo, sin embargo como se han hecho ensayos tanto con el diesel 350, como con las mezclas de biodiesel, se espera que las comparaciones tengan validez.

De cualquier forma, como se puede observar en la gráfica 4.9 el combustible que menos se consumió fue el diesel ordinario 350 ppm, también destaca que en la mayoría de los casos el convertidor hace que el motor aumente su consumo, parece ser que al ofrecer cierta obstrucción en el escape, existe un mayor trabajo de bombeo. En cuanto a las mezclas la que menos consumo tuvo es la B20, esto puede deberse a la mayor cantidad de biodiesel que esta contiene.

**Curvas de potencia y par**

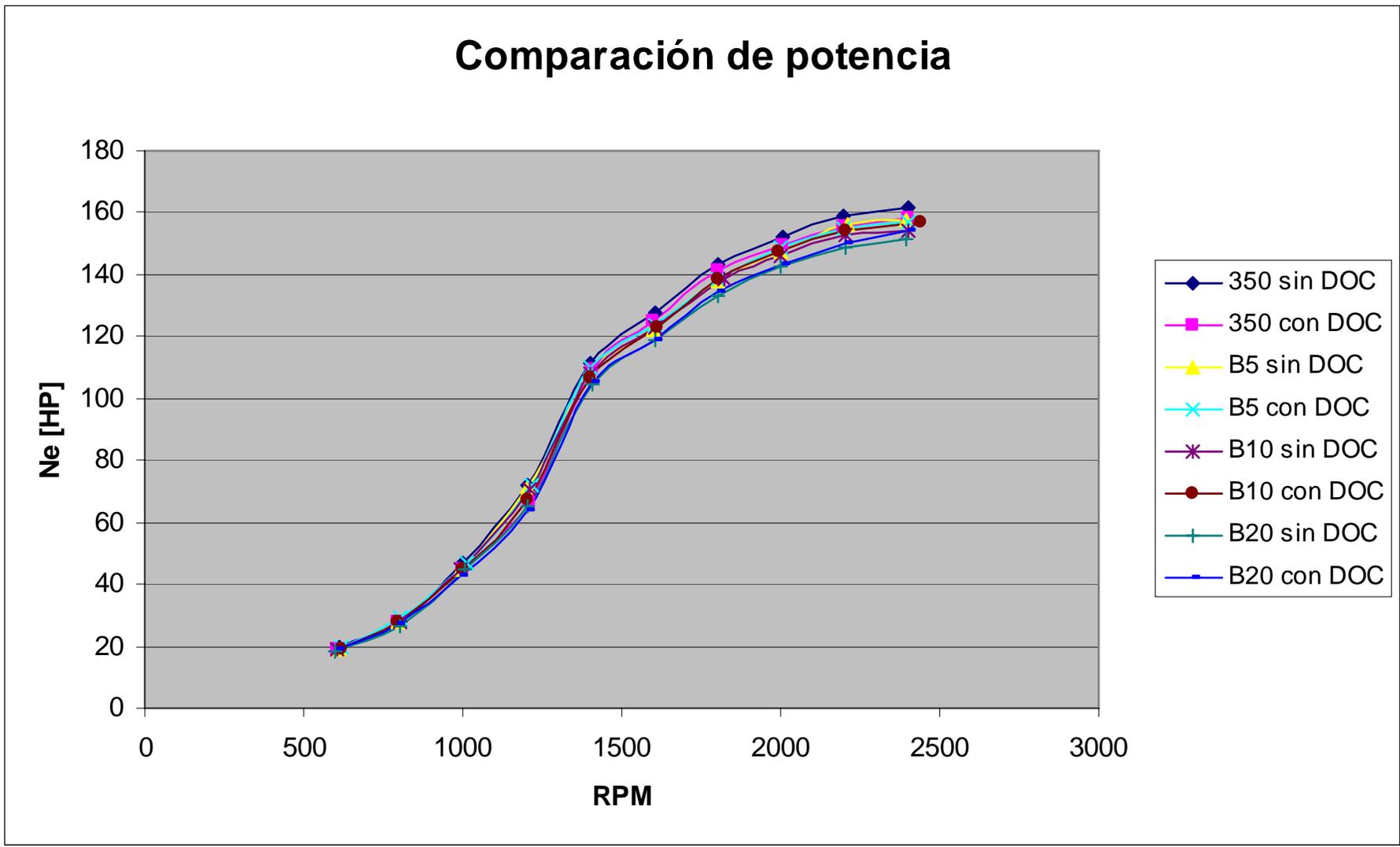
**Valores máximos**

	M [lbf*pie]	Ne[HP]
<b>350 sin DOC</b>	<b>415.933333</b>	<b>161.766667</b>
<b>350 con DOC</b>	<b>408.533333</b>	<b>158.4</b>
<b>B5 sin DOC</b>	<b>404.466667</b>	<b>157.833333</b>
<b>B5 con DOC</b>	<b>411.066667</b>	<b>156.866667</b>
<b>B10 sin DOC</b>	<b>405.2</b>	<b>154.233333</b>
<b>B10 con DOC</b>	<b>401.666667</b>	<b>156.8</b>
<b>B20 sin DOC</b>	<b>389.933333</b>	<b>151.4</b>
<b>B20 con DOC</b>	<b>389.2</b>	<b>154.066667</b>

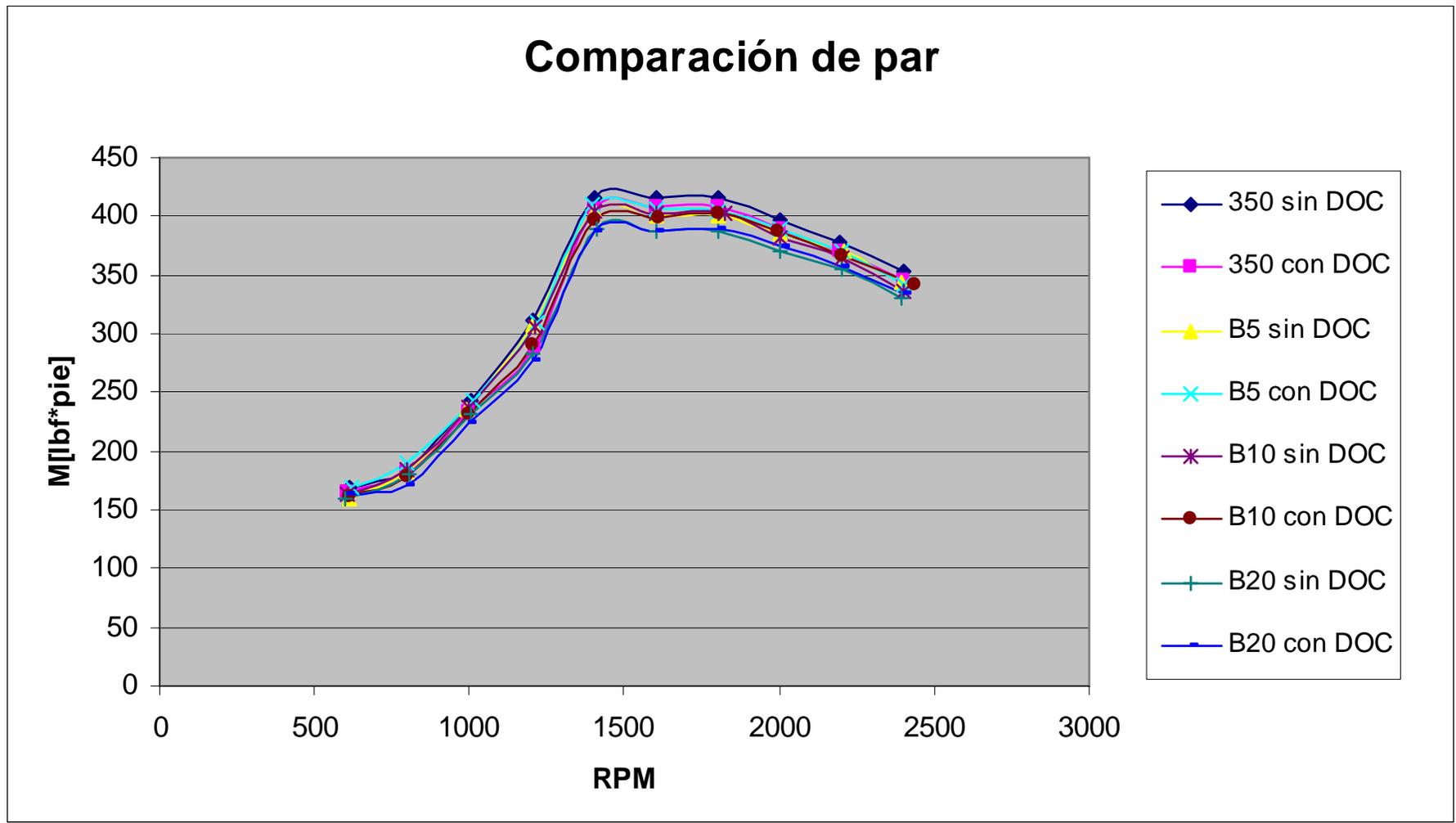
Tabla 4.28 Valores máximos de par y potencia

En cuanto a potencia, aunque sus valores son muy cercanos unos a otros, pueden verse en la tabla 4.28 y en la gráfica 4.11 que con diesel de 350 ppm sin DOC se alcanza la mayor potencia en el motor, con lo cual podemos notar que las distintas mezclas ocasionan una pérdida de potencia en dicho motor, destacando solamente el B5 lo cual indica nuevamente que puede deberse al alto contenido de diesel ordinario en la mezcla. Con el convertidor catalítico no se observa alguna tendencia en cuanto a potencia ya que en para algunos casos hace disminuir la potencia pero para otros parece que aumenta con el uso de éste. En el caso del par nuevamente, la tabla 4.28 y la gráfica 4.12 muestran que el diesel 350 ppm es en donde se alcanza el par máximo del motor, seguido nuevamente del B5, lo cual puede ser una misma tendencia en cuanto el par y a la potencia.

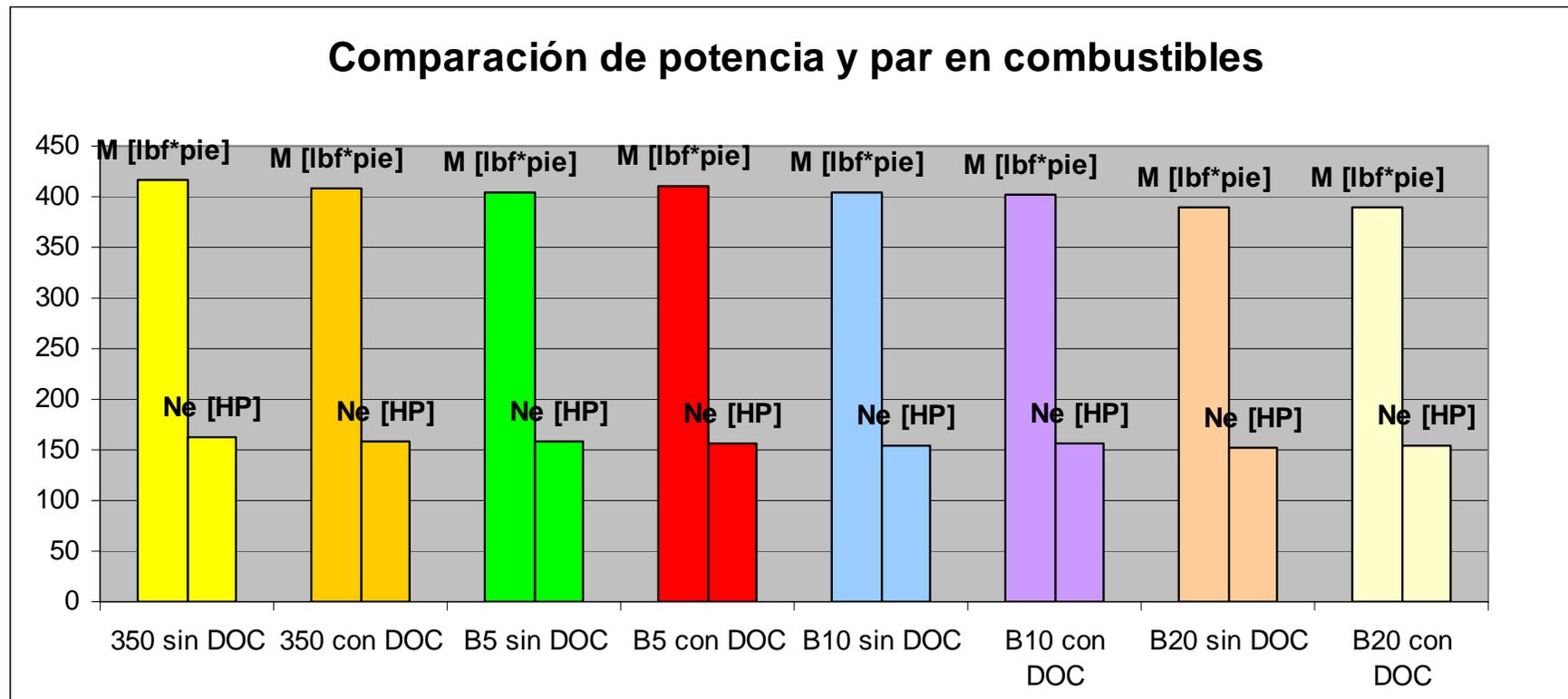
Estas observaciones se han hecho tomando en cuenta los valores máximos de la potencia y el par, lo mismo que con las curvas correspondientes.



Gráfica 4.11 Comparación de potencia



Gráfica 4.12 Comparación de par



Gráfica 4.13 Comparación de potencia y par

En la gráfica 4.13 puede observarse los comentarios hechos anteriormente y también destaca que la pérdida de par y potencia no es muy significativa.

## 4.4 Conclusiones

Las conclusiones significan una síntesis del trabajo aquí elaborado, por tanto representa una de las partes esenciales de la tesis, para comenzar se puede decir que este proyecto resultó un buen intento para llevar a cabo un trabajo de investigación completo y de relevancia tanto para el país, como para el medio ambiente.

Para emitir conclusiones se debe tomar en cuenta varios aspectos a fin de separar las ventajas y desventajas de los combustibles y dispositivos utilizados. En el caso del motor diesel o de encendido por compresión las emisiones mas significativas y las que mas se deben cuidar son el CO, NOx, y el material particulado, ya que la cantidad de hidrocarburos que se presentan en el motor Diesel son bajos en comparación con el motor de encendido por chispa. La mezcla que tiene mejores resultados es la B10, ya que en el caso del NOx y la opacidad medida como se vio anteriormente, tiene valores menores que las demás mezclas lo cual significa que ésta puede ser una opción en estos dos aspectos, y en el caso de CO se obtiene valores aceptables, aunque en el caso del PM aumenta, es difícil decir qué mezcla es mejor ya que en algunos casos una se comporta mejor que otra, pero en otros aspectos afecta mas al motor y al ambiente, pero la mezcla B10 es la que tiene un mejor comportamiento de manera general, tomando en cuenta los aspectos antes mencionados.

En el caso del convertidor catalítico se concluye que funciona de manera correcta en cuanto al CO y la opacidad ya que como se mencionó antes, muestra una disminución significativa al agregarse el dispositivo, en el caso de los NOx, dicho convertidor no es conveniente ya que en la mayoría de los casos produjo un incremento en los NOx del motor, el cual se debe al aumento de temperatura observado en las gráficas 4.3 y 4.4, que se obtiene al poner el convertidor en el escape del motor, ya que éste actúa como tapón en dicho escape del motor. Esto también puede observarse en la gráfica del consumo de combustible en la cual se puede observar que en la mayoría de los casos al poner el convertidor catalítico hace que dicho consumo aumente (no de manera muy significativa) en comparación al mismo combustible sin el uso de este dispositivo.

En cuanto a la potencia y al par del motor se puede deducir que el combustible diesel de 350 ppm se comporta mejor que cualquier mezcla de biodiesel; la mezcla que tiene mayor par y potencia dentro de las pruebas fue el B5, esto puede ser debido a que es

la que tiene mayor cantidad de diesel ordinario (95%), esto ayuda a que sea la que mayor par y potencia obtenga, ya que el diesel de 350 ppm es el que mejor se comporta de manera individual. En cuanto al convertidor catalítico en estas pruebas no se puede deducir con certeza si afecta en la potencia y en el par debido a que en algunas pruebas la potencia y par aumentaban y en otras disminuían lo cual significa que no había una tendencia clara para poder concluir.

Creo que en general este tipo de pruebas son de gran ayuda para este país, el cual depende de manera directa de las energías no renovables en particular del petróleo, ya que esto representa una opción viable al inminente problema de su extinción. Creo que los resultados obtenidos no son los que se esperaban, ya que en la actualidad la mayor ventaja de los biocombustibles es la reducción de emisiones contaminantes, lo cual como se puede observar en las pruebas realizadas no tuvieron una disminución significativa. En el caso de la potencia y el par la reducción de las mezclas no fue muy notable, lo cual puede deberse a distintos aspectos como por ejemplo la calidad del biodiesel.

En cuanto al dispositivo probado, funciona de manera parcial, ya que reduce solamente el CO de las tres emisiones mencionadas anteriormente. Lo cual representa que solo soluciona uno de tres problemas ambientales, y por el contrario aumenta otro que son los NOx debido a que aumenta la temperatura del motor. Aunque para solucionar esta problemática existen otros dispositivos como trampas de partículas para PM y convertidores de reducción para el caso de los NOx que a la par con este dispositivo podrían solucionar de mejor manera este problema.

Con el paso del tiempo este tipo de pruebas de combustibles alternos y dispositivos para la reducción de emisiones tomará mayor importancia en nuestro país, debido a problemas como el calentamiento global y a la inminente extinción del petróleo, por lo cual es interesante la realización de este proyecto, esperando sirva a futuras generaciones como referencia en el estudio de este tipo de temas.

## Referencias

- [1] Periódico La Jornada, 20 de octubre de 2006.
- [2] San Vicente Tello, *Sobre la minuta de la Ley de promoción y desarrollo de bioenergéticos*.  
[http://prdleg.diputados.gob.mx/debate\\_parlamentario/debate\\_parlamentario/desarrollo\\_sustentable\\_02.html](http://prdleg.diputados.gob.mx/debate_parlamentario/debate_parlamentario/desarrollo_sustentable_02.html)
- [3] Tinaut Fluixá Francisco. *Biocombustibles para motores de automoción*.  
[http://www.tiernet.net/tiernet/html/presentacion/fco\\_tinaut.ppt#262,3,LOS\\_BIOCOMBUSTIBLES.Introducción\(I\)](http://www.tiernet.net/tiernet/html/presentacion/fco_tinaut.ppt#262,3,LOS_BIOCOMBUSTIBLES.Introducción(I))
- [4] Creus Solé, Antonio. *Energías Renovables*. Ed. Ceysa, 2004.
- [5] Sánchez Miño, Santiago. *Energías renovables, conceptos y aplicaciones*.  
[http://www.uni-oldenburg.de/ppre/download/Downloads/ENERG%cdAS\\_RENOVABLES.pdf](http://www.uni-oldenburg.de/ppre/download/Downloads/ENERG%cdAS_RENOVABLES.pdf)
- [6] Biocombustibles los combustibles del futuro. *Bioetanol*.  
<http://www.biocombustibles.cl/bioetanol.htm>
- [7] Biocombustibles.es. *Bioetano*. <http://www.biocombustibles.es/bioetanol.html>
- [8] Nett Technologies Inc. *Emissions FAQ*. <http://www.nett.ca/faq/diesel.html>.
- [9] Rojas Tapia, A. Padilla Martínez, C. *Muestreo, medición y análisis de partículas diesel*. Facultad de Ingeniería UNAM. 1996.
- [10] Trujillo Quintero Juan José. Huertas José Ignacio. *Diseño, construcción y pruebas de un colector de partículas para las emisiones de los vehículos diesel*. Universidad de Los Andes, Bogotá Colombia. Enero de 2002.
- [11] RAVEM C.S. Weaver and L.E. Petty "Reproducibility and Accuracy of On-Board Emission Measurements Using the RAVEM™ System", SAE Paper No. 2004-01-0965, March, 2004.

- [12] RAVEM Weaver, C.S. and M.V. Balam-Almanza, "Development of the 'RAVEM' Ride-Along Vehicle Emission Measurement System for Gaseous and Particulate Emissions", SAE Paper No. 2001-01-3644.
- [13] Fuentes, Sergio. Díaz, Gabriela. *Catalizadores ¿La piedra filosofal del siglo XX?*. La ciencia para todos. México 2003.
- [14] SEMARNAT. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Evaluación del convertidor catalítico de oxidación en vehículos a diesel, Car Sound/ Magnaflow serie 60000 modelo 60011, (reporte de de opacidad, contrapresión y temperatura)*. México 2007.
- [15] González Oropeza, Rogelio. *Análisis paramétrico de la emisión de partículas en un motor diesel de inyección directa mediante sonda de muestreo*. Universidad politécnica de Valencia. 1993.
- [16] Ralbovsky, E. *Motores Diesel*. Ed. Paraninfo. España 1999.
- [17] Diesel.net. *Emissions Estandars*. <http://www.dieseln.net.com/standards/>
- [18] Comisión de Biodiesel. [http://grupoqo2.blogspot.com/2007\\_11\\_01\\_archive.html](http://grupoqo2.blogspot.com/2007_11_01_archive.html)