



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

EFFECTO DEL COMBUSTIBLE DIESEL DE ULTRA BAJO AZUFRE  
(UBA) EN LAS EMISIONES Y DESEMPEÑO DEL MOTOR DIESEL.

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.

PRESENTA:  
ARTURO EMILIANO RAMÍREZ TERÁN.

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ROGELIO GONZÁLEZ OROPEZA.



MÉXICO D.F.

NOVIEMBRE DE 2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

### **Agradecimientos:**

A mi madre y hermano, por su comprensión y su apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mis abuelos por la educación y valores que me inculcaron así como toda la ayuda brindada a mi madre, hermano y a mí.

A mi tío Enrique por su apoyo incondicional en el desarrollo de mi carrera.

Al Dr. Rogelio González Oropeza por ser de gran ayuda en el desarrollo de este trabajo, por sus conocimientos y experiencia aportados.

## Índice

<b>Capítulo 1. Introducción.</b>	<b>Página.</b>
1.1 El motor Diesel.	2
1.2 Diesel de Ultra Bajo Azufre (UBA).	12
<b>Capítulo 2. Emisiones contaminantes del motor diesel y equipos de medición.</b>	
2.1 Gases contaminantes CO, CO <sub>2</sub> , HC, NO <sub>x</sub> .	19
2.2 Partículas Diesel.	21
2.3 Analizador de gases.	31
2.4 RAVEM.	35
<b>Capítulo 3. Dispositivos y métodos de control.</b>	
3.1 Convertidor catalítico.	42
3.2 Trampas de partículas.	45
3.3 Sistema de recirculación de gases.	47
3.4 Normas que regulan emisiones de vehículos en circulación.	49
3.5 Combustibles.	51
<b>Capítulo 4. Ensayos experimentales utilizando Diesel de Ultra Bajo Azufre.</b>	
4.1 Planeación de los ensayos.	56
4.1.1 Ensayo 13 modos.	56
4.1.2 Curvas de potencia.	57
4.1.3 Prueba de opacidad.	58
4.2 Equipo utilizado.	58
4.2.1 Banco de ensayos.	58
4.2.2 Opacímetro.	59
4.2.3 RAVEM.	60
4.2.4 Torre de enfriamiento.	60
4.2.5 Consumo de combustible.	61
4.2.6 Motor.	61
4.2.7 Dinamómetro.	62
4.3 Datos Experimentales.	63
4.3.1 Curvas de potencia.	63
4.3.2 13 modos.	67
4.3.3 Opacidad.	73
4.4 Análisis de resultados.	75
<b>Capítulo 5. Conclusiones.</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>91</b>

# **Capítulo 1.**

## **Introducción.**

En este capítulo se hace una descripción de algunos conceptos utilizados en el desarrollo del trabajo, que van desde el motor diesel, sus tendencias hacia el futuro y una pequeña descripción de los automóviles híbridos hasta las tendencias de los nuevos combustibles.

## **1.1 El motor Diesel.**

El propósito principal de los motores endotérmicos (de combustión interna), es la producción de energía mecánica a partir de la energía que se encuentra almacenada en un combustible, y que se libera mediante un proceso de combustión, generalmente usados para el transporte.

En este trabajo se hablará particularmente del motor EC. El motor EC (encendido por compresión) fue inventado por Rudolph Diesel en 1892. En él las transformaciones del fluido del trabajo se desarrollan de acuerdo con un ciclo, que puede considerarse abierto o cerrado, utilizando aire a presión atmosférica o a una mayor presión cuando existe un sistema de sobrealimentación, además por supuesto, de la inyección de un combustible líquido.

El motor diesel funciona por el principio del autoencendido o autoignición, en el que la mezcla aire-combustible arde por la temperatura alcanzada en la cámara de compresión, por lo que no es necesaria la chispa como en los motores de ciclo Otto.

En cuanto el combustible frío entra en contacto con el aire que se encuentra a una temperatura considerablemente mayor, comienza a fragmentarse en pequeñas gotas y a cambiar de fase y toma calor de la masa de aire comprimido hasta alcanzar su temperatura de inflamación. Cuando esto ocurre, comienza la combustión y el calor producido se pasa a toda la masa de aire y combustible restante, produciéndose su inflamación.

### **Tendencias del motor diesel.**

En la actualidad las áreas de desarrollo de los motores diesel están teniendo apertura hacia otras tecnologías que en conjunto, buscan un beneficio al medio ambiente y un ahorro en costos por mantenimiento, entre otras cosas, que logran que los vehículos diesel tengan una evolución importante en el ramo del transporte terrestre particular y público principalmente.

Por ejemplo, el término de propulsión híbrida es utilizado para referirse a vehículos con más de una fuente de propulsión. Los sistemas híbridos pueden incorporar varios tipos de acumuladores de energía y/o convertidores de energía.

El objetivo del desarrollo de las tecnologías híbridas es combinar dos fuentes de energía, de manera que las cualidades de cada sistema sean utilizadas en conjunto, de tal forma que las ventajas del empleo del sistema híbrido sea mucho mayor que el costo de su fabricación.  
[7]

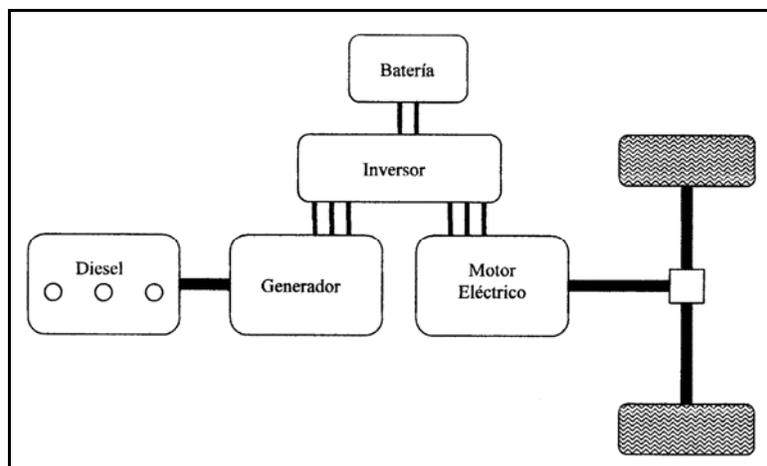
## Vehículos Híbridos Diesel-Eléctricos.

Un vehículo híbrido es aquel que combina dos o más formas de generación de energía, y por ende puede, directa o indirectamente, proveer energía de propulsión. Y cada vez estas máquinas van tomando importancia en la vida cotidiana. Muchas de las locomotoras que se ven en algunos países son híbridos diesel-eléctricos; y en algunas ciudades se usan autobuses diesel- eléctricos, y estos pueden circular con energía eléctrica proveniente de la carga eléctrica de cables de alta tensión o incluso cuando no cuentan con una fuente de energía eléctrica.

Actualmente diferentes marcas de vehículos están invirtiendo por este tipo de tecnologías, con el fin de reducir el consumo de combustible y por ende disminuir la contaminación ambiental, se han creado diferentes tipos de vehículos híbridos dependiendo de su funcionamiento y su uso. Aquellos híbridos que combinan un Motor de Combustión Interna (MCI) y un motor eléctrico son los únicos sistemas híbridos que han tenido un desarrollo serio. Existen dos tipos básicos de esta clase de sistema: en serie y en paralelo.

### Híbridos en serie.

Utilizan el MCI acoplado a un generador, que produce electricidad para el motor eléctrico que acciona el giro de las ruedas. Es llamado híbrido en serie pues el flujo de energía se mueve en línea directa. Al estar el MCI desacoplado de la tracción, puede seguir funcionando a una velocidad constante con el objetivo de cargar la batería.

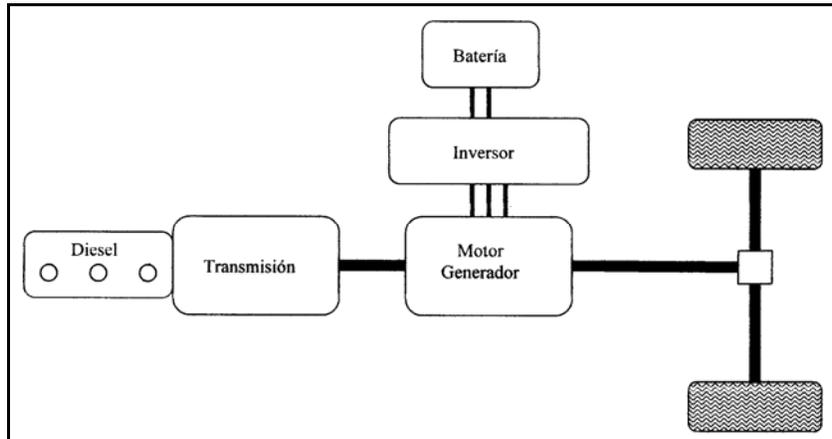


**Figura 1.1 Sistema Híbrido en serie.**

Una desventaja del sistema es que la energía debe ser convertida varias veces, siendo la eficiencia mecánica entre el MCI y el eje de tracción difícilmente superior al 55% (esto incluye la eficiencia de almacenamiento de la batería). Otra desventaja es que requiere un motor más grande y pesado que en el sistema en paralelo, lo que no presenta graves consecuencias en autobuses para transporte público. [7]

## Híbridos en paralelo.

Utilizan tanto el MCI como el eléctrico para accionar la tracción, asignando la energía de cada uno de acuerdo a las condiciones de conducción. Es llamado híbrido en paralelo pues la energía fluye en líneas paralelas. En este sistema, el MCI puede accionar la tracción al mismo tiempo que carga las baterías. Estos tipos de vehículos son los más populares y sobre los que más se investiga.

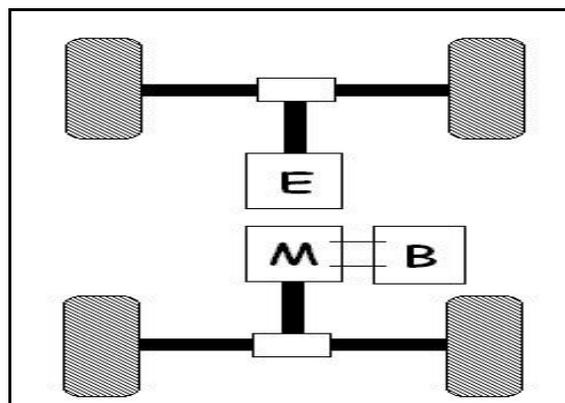


**Figura 1.2 Sistema Híbrido en paralelo.**

Se pueden categorizar en cuatro tipos, de acuerdo a como combinan su energía, que se describen a continuación.

- Combinación de fuerzas de tracción.

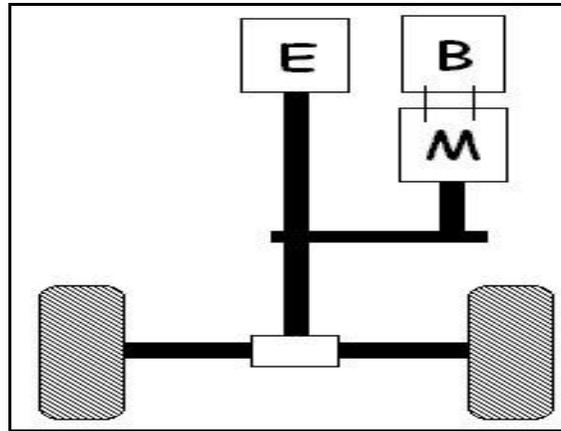
El torque producido en cada motor es entregado a distintos pares de ruedas, por ejemplo, el motor eléctrico (E) entrega torque a las ruedas traseras, mientras que el MCI (M) entrega torque al tren delantero.



**Figura 1.3 Combinación de fuerzas de tracción.**

- Combinación de torques.

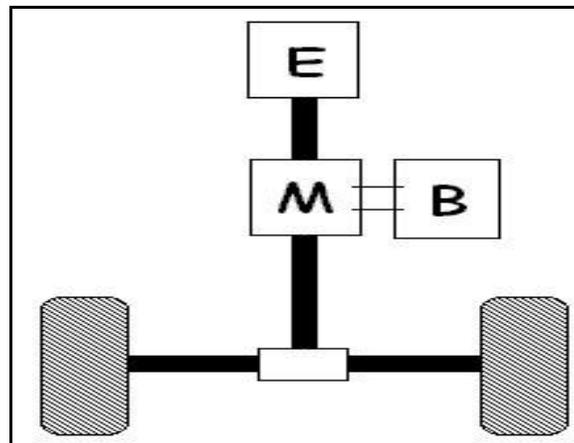
El torque de ambos motores es combinado mediante un arreglo de ejes antes de ser aplicado a la transmisión.



**Figura 1.4** Combinación de torques.

- Combinación de torque en el eje.

El torque de ambos motores es combinado en un mismo eje antes de ser aplicado a la transmisión.

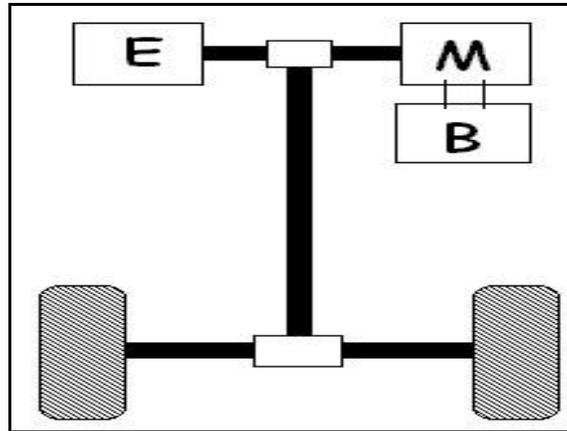


**Figura 1.5** Combinación de torque en el eje.

- Combinación de velocidades.

Ambos motores funcionan a velocidades distintas, y sus torques son acoplados en una compleja caja de engranajes antes de la transmisión. Este sistema fue desarrollado, construido y probado por "Southwest Research Institute" (SWRI). El desarrollo comprendió un MCI de 1,000 c.c.\*, 3 cilindros y 40 [KW] como potencia máxima, con un motor de inducción A. C. De 325 [V] y 53 [KW] como potencia máxima, además de un

paquete de baterías de 7,5 [Kwh.]. Ambos sistemas acoplados en un sistema planetario de engranajes capaz de desacoplar al MCI, permitiendo así que este opere en su región óptima. Para transmitir el torque a las ruedas del vehículo se utilizó una caja de transmisión continua (CVT), a diferencia de las que conocemos hasta hoy que son discretas. [7]



**Figura 1.6 Combinación de velocidades.**

La tecnología híbrida fue diseñada para operar en zonas urbanas, donde existan problemas de contaminación ambiental, por lo que el sistema híbrido es muy adecuado para cumplir con el objetivo de reducción de emisiones contaminantes atmosféricas, especialmente en autobuses de transporte público. Operando únicamente como vehículo eléctrico, con la energía guardada en las baterías, teniendo una autonomía de 80 a 200 km.

#### **Elementos característicos.**

- Sistema de frenos regenerativo

Al desacelerar o frenar, el motor eléctrico actúa como generador, recuperando la energía cinética desde las ruedas, convirtiéndola en electricidad que puede ser guardada en la batería. Frenos de fricción tradicionales son requeridos, así como un sistema de control electrónico que permita maximizar la recuperación de energía y pueda operar el sistema dual de frenos. Sistemas comerciales en uso permiten recuperar alrededor de un 30% de la energía cinética típicamente perdida como calor en frenos de fricción. La energía recuperada al freno puede reducir el consumo energético en 15% en conducción en ciudad.

- Generador

Un generador sincrónico de corriente alterna produce la electricidad para cargar las baterías. Funciona también como motor de partida para el motor diesel.

- Motor eléctrico

Un motor sincrónico de corriente alterna, compacto, de bajo peso y alta eficiencia.

#### - Inversor

El inversor cambia la corriente continua de la batería en corriente alterna para mover el motor eléctrico, y cambia la corriente alterna del generador en corriente continua para cargar la batería. También varía la frecuencia de la corriente, dependiendo de las revoluciones del motor eléctrico para maximizar la eficiencia. El inversor debe ser enfriado por agua. [7]

#### - Divisor de potencia (híbridos en paralelo)

El sistema híbrido en paralelo necesita de un divisor de potencia, que utiliza un engrane planetario que distribuye el giro del motor MCI entre la tracción y el generador. Controlando las revoluciones del generador, el divisor funciona también como una transmisión continua y variable.

#### - Baterías

Se utilizan las baterías diseñadas para vehículos eléctricos, requiriendo una alta densidad de energía, peso liviano y una larga vida.

#### - Ultracapacitores

Se ha desarrollado también la tecnología de ultracapacitores para el almacenamiento de la energía. Al no depender de reacciones químicas (como las baterías) pueden ser cargados y descargados rápidamente. El ultracapacitor entrega la energía almacenada en él, como un pulso eléctrico poderoso. Se encuentran en etapa de desarrollo comercial.[7]

### **Autos híbridos-diesel.**

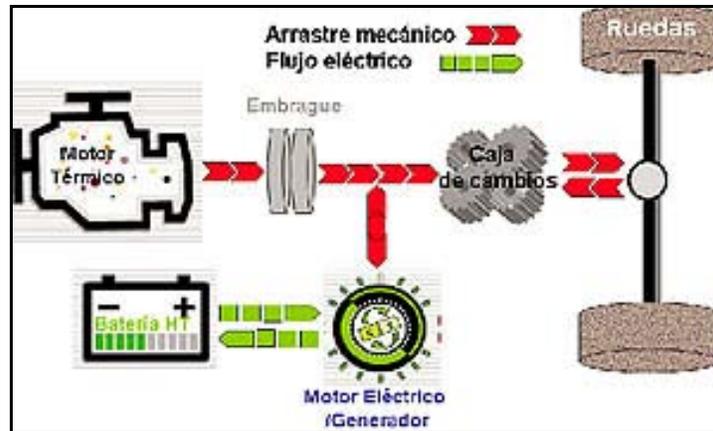
Coches populares que aspiran a ser superventas en el futuro: en 2010, comprar uno de estos modelos sólo supondrá una diferencia de precio como la que actualmente se da entre gasolinas y Diesel.

Hasta ahora, los híbridos que se comercializan unen mecánicas de gasolina junto a motores eléctricos: **Toyota Prius, Honda Civic Hybrid, Lexus RX400h, Ford Escape Hybrid**. Sus detractores aseguran que son muy caros, continúan contaminando (eso sí, bastante menos) y sus consumos –en la actualidad- son similares a los de los coches Diesel “normales y corrientes”.

Pero PSA (Peugeot-Citroën) tiene una solución: los híbridos deben ser menos contaminantes y más baratos. Para lo primero, ya piensan en los motores Diesel. Para reducir costos, apuestan por compartir elementos y firmar alianzas con otros fabricantes.

Se han puesto una fecha tope: en 2010, estarán sus **HDI Híbridos** en la calle y el comprador sólo tendrá que echar las mismas cuentas que si ahora se plantea comprar un coche de gasolina o uno de diesel.

Querían aprovechar todos los medios disponibles a su alcance. Por eso, optaron por un **sistema híbrido paralelo**. El motor térmico es el que mueve el vehículo, pero –además– cuenta con la fuerza extra que le da el eléctrico. Las baterías se cargan aprovechando la energía cinética que se produce en las frenadas. [17]



**Figura 1.7 Sistema híbrido diesel-eléctrico.**

Se eligió un motor, el 1.6 HDi de 90 HP con **Stop&Star**, un sistema del cual se ha podido comprobar su eficacia en modelos como el Citroën C3. Con él, el motor se desconecta justo antes de la parada total del vehículo, manteniendo esta situación mientras permanece inmóvil, por ejemplo en embotellamientos, ante un semáforo, etc. Este sistema funciona de forma automática cuando detecta la presión sobre el pedal del freno. Una vez que el conductor deja de pisarlo, vuelve a encender el motor. Sin embargo, el HDi híbrido tiene una función extra: siempre que se vaya por debajo de los 60 km/h, se puede apagar el motor de combustión y moverse con electricidad (siempre y cuando se tenga las baterías cargadas). Si se acelera de forma continua, el sistema Stop & Start “despierta” automáticamente al motor térmico. El motor eléctrico permitirá circular a velocidades inferiores a 50 km/h, que representa (según sus cálculos) las condiciones de utilización urbana. Desarrolla una potencia en continuo de 22 HP con un par de 59 mkg, pero puede llegar hasta los 32 HP y 95 mkg. Las baterías se colocan en la parte trasera del vehículo, en lugar de la rueda de emergencia. Además, PSA contaba con otro elemento en el que también son especialistas: un filtro de partículas de última generación.



**Figura 1.8 Componentes del sistema híbrido diesel-eléctrico.**

El HDI Híbrido va asociado a una caja de cambios pilotada de 6 velocidades, que permite un manejo secuencial o completamente automático. Al principio se pensó en una transmisión automática, pero se descartó la idea porque los mecanismos de fricción y el sistema hidráulico disminuían sus rendimientos.

Conducir este coche es realmente sencillo y muy agradable, ya que –cuando nos movemos con el motor eléctrico- no hay apenas ruidos ni vibraciones. Pero, además y sin que nosotros lo sepamos, llevamos con nosotros un copiloto de excepción.

Se denomina PTMU (siglas de “power train management unit”) y selecciona el mejor modo de funcionamiento para reducir el consumo: con el motor de combustión, con el motor eléctrico, con ambos a la vez. Además, permite almacenar en las baterías la energía que se produce cuando se frena el motor. Al desacelerar, el PTMU gestiona la repartición del frenado. Decide si utilizamos un frenado eléctrico (y recuperamos energía) o hidráulico (perderemos energía). Para ello valora la seguridad y optimiza el consumo. En todo momento, conocemos qué está haciendo nuestro coche ya que en una pantalla multifunción se representan todas sus operaciones.



**Figura 1.9 Pantalla multifunción.**

Otra novedad es la tecla ZEV (cero emisión del vehículo) permitirá transformar el coche en un vehículo completamente eléctrico. Se podrá recorrer más distancias y alcanzar velocidades más elevadas que las conseguidas sin el arranque del motor térmico en modo híbrido normal. Así, se suprime toda emisión contaminante o sonora en el exterior del vehículo. Este modo se desactiva automáticamente cuando las baterías ya no están suficientemente cargadas o bien manualmente, pulsando un botón. [17]

### **Motores diesel convertidos a gas natural vehicular (GNV) “Conjunto Dual”.**

El principio básico de operación del conjunto dual de combustible, es la sustitución de una cantidad de combustible líquido (diesel), con una cantidad equivalente de combustible gaseoso (GNV). La cantidad de gas que se utiliza debe ser tal, que reemplace el valor calorífico del diesel, sin que se produzcan pérdidas de potencia. Existe una gran variedad

de convertidores duales, que generalmente se instalan a la salida del filtro de aire antes del turbo-cargador y/o del múltiple de admisión, donde se mezcla el aire con el gas natural en la relación adecuada para la combustión. [7]

El proceso mas empleado para entregar el gas natural se denomina “fumigación”, que se refiere a pre-mezclar el gas natural con el aire antes que entren al motor, sin cambiar el diseño original del múltiple de admisión. La mezcla aire/gas es distribuida en forma homogénea y pareja a través del múltiple de admisión y cuando la válvula de admisión de un cilindro se abre, la carga de la mezcla es introducida en el cilindro. La temperatura que se necesita para la ignición del gas natural, es mucho mayor que la que se requiere para el combustible diesel, por lo tanto la sustitución total del combustible diesel no es posible para la operación normal, puesto que la temperatura generada durante el ciclo de compresión-ignición (CI) no es suficiente para la ignición del gas natural, requiriéndose una fuente alterna de encendido. Para ello se utiliza el propio sistema de inyección del motor, se inyecta una cantidad reducida de diesel en la cámara de combustión, encendiéndose de la misma forma que en el motor 100% diesel, y creando un frente de onda para quemar el gas natural. Con este sistema se utilizan mezclas donde el combustible diesel esta en el orden del (20 al 25) %. Este método de combustión es conocido como “Piloto de ignición“, y tiene la ventaja de mantener el sistema de combustión con la lubricación requerida por el fabricante, ya que a través de él continúa circulando combustible diesel.

En los motores duales se utiliza la inyección de un piloto de combustible diesel que enciende la mezcla. Existe un tipo de motor diesel / gas que opera de forma similar al motor diesel donde sólo se comprime aire en el cilindro, el gas se inyecta a alta presión al final de la etapa de compresión así como una pequeña cantidad de diesel. Es de amplio uso en motores estacionarios, generadores y en servicios de transmisión por tuberías, donde se utiliza un 95% de gas y 5% de diesel. Con ambos sistemas se ha tenido la ventaja de poder transformar un motor diesel sin incurrir en el gasto, tan costoso para muchas empresas, de adquirir un motor a gas nuevo, sin disminuir la potencia ni sacrificar la principal bondad del motor diesel (su eficiencia térmica). Actualmente están siendo utilizados por muchas empresas de transporte público, escolares, recolectores de basura, camiones de reparto, tractores y otros, como un mecanismo alternativo para disminuir costos de operación en equipos estacionarios y en el cumplimiento de las regulaciones ambientales en los vehículos de transporte.

Puesto que estos motores pueden ser utilizados indistintamente como motores duales o como motores a diesel, es recomendable ajustarse a los requerimientos de los fabricantes de lo equipos, pudiendo escoger la calidad de servicio correspondiente al aceite diesel con bajo contenido de azufre y bajo nivel de cenizas sulfuradas. La formulación del lubricante ideal para este tipo de operación dual depende, en gran medida, de la composición, contaminantes y el porcentaje de mezcla de cada uno de los combustibles, requiriéndose de un cuidadoso balance de los aditivos, ya que el aceite debe cumplir con los requerimientos de un motor diesel y uno a gas simultáneamente, sin perder de vista los requerimientos particulares del fabricante del equipo original.

La mayoría de los motores diesel que se transforman al sistema dual corresponden a motores de esta última década, usualmente turbo-alimentados, post-enfriados, con sistemas de recirculación de gases de escape y, en algunos casos, con inyección directa por cilindro de la última generación. [7]

Lo que sucede en un motor cuando se utiliza la mezcla diesel / GNV, es lo siguiente:

- No hay pérdidas de Potencia. El volumen de combustible diesel es sustituido por gas para mantener el mismo valor de BTU requerido por el motor.
- El equipo dual no requiere modificar el sistema normal de ensamblaje del motor. El equipo dual es instalado a la salida del purificador de aire antes del turbo-cargador o del múltiple de admisión, donde se produce la mezcla de aire / gas que ingresará a la cámara de combustión a través de la válvula de admisión. Por lo tanto, no se requiere de fuente piloto de ignición, ya que el porcentaje de diesel es capaz de encender la mezcla; el sistema de combustible no sufre resequedad ya que continúa circulando diesel que imparte la lubricidad necesaria.
- Posibilidad de extensión en los periodos de cambio de aceite. Ya que sólo se utiliza un 20 o 30 % de combustible diesel, se disminuye la probabilidad del paso de gases al sistema de lubricación, causantes de la acidificación del aceite y del consumo de los aditivos.
- Alarga la vida del motor, ya que disminuye el porcentaje de depósitos carbonáceos en la cámara de combustión a nivel de válvulas y sus asientos. La combustión casi completa del Gas Natural disminuye la cantidad de productos de oxidación en el escape, disminuyendo significativamente las emisiones de humos negros.

### **Aplicaciones.**

El sistema dual provee un ahorro adicional cuando los generadores de diesel son usados para manejar la carga más alta durante los periodos de demanda de alta corriente.

Los grandes sistemas de refrigeración para el aire acondicionado, almacenes frigoríficos, sistema de agua y bombas de desagüe, y otros sistemas de energía necesarios pueden utilizar los motores dual.

Camiones diesel, autobuses, camionetas, locomotoras y equipo industrial se puede beneficiar del sistema dual, alcanzando pocos requerimientos de emisión de gases, bajos costos de combustible, reduciendo los gastos de mantenimiento y extendiendo la vida del motor. Los camiones recolectores de basura han resultado excelentes para el sistema dual, demostrando ser una prueba contundente para el proceso mencionado. Cada aplicación de gas tiene su propio alimentador de gas natural de forma segura, tanques de alta presión de compresión o de gas líquido natural. [7]

## **1.2 Diesel de ultra-bajo azufre (UBA).**

La tecnología diesel moderna por ser limpia hacia el medio ambiente y representar un significativo ahorro de hasta el 50 por ciento en el gasto de combustible con respecto a la gasolina, por la combinación de menor costo y mayor rendimiento, es la alternativa más factible de movilidad automotriz en México en el corto y mediano plazo, para vehículos por debajo de los seis mil kg de peso bruto vehicular, segmentos que incluye a los autos, camionetas familiares, vehículos utilitarios de carga y pasaje. [1]

El desarrollo del diesel moderno se ha movido en tres vertientes: bajas emisiones, beneficios económicos y mayor potencia. Hoy en día existen motores diesel de 3 ó 4 cilindros que son tan potentes o más que sus contrapartes de gasolina, con 4, 5 ó 6 cilindros.

Los requerimientos que se necesitan para que México esté en capacidad de orientarse a los beneficios de la tecnología diesel son: la disponibilidad de diesel con bajo contenido de azufre de entre 10 a 15 partes por millón en lugar de las 500 que se tienen en la actualidad; distribución de diesel por PEMEX en todo el territorio para que los usuarios de todas las entidades tengan acceso al combustible; incentivos fiscales autorizados por los legisladores, como ocurre en otras naciones y cambio de boquillas de las bombas despachadoras, ya que las actuales son para surtir camiones pesados y no entran en los tanques de los autos. [1]

Los avances tecnológicos como las bombas rotativas evolucionadas al innovador sistema Common Rail y particularmente los inyectores piezo-eléctricos de última generación, que desarrollan altas presiones en la cámara de combustión, además de los convertidores catalíticos y las trampas de partículas, que han reducido sustancialmente los niveles de ruido y las emisiones de gases, particularmente para el caso de los NOx hasta en 85 por ciento y de partículas suspendidas en 40 por ciento que son las principales preocupaciones de la tecnología diesel, entre 1990 y 2006.

Hoy en día, el diesel cumple bien la normatividad ambiental Euro y EPA, con base en los esfuerzos desarrollados, por ejemplo en la actualidad es imposible, por el ruido, reconocer si un auto tiene motor diesel o de gasolina, como sí era distinguible hace algunos años.

Es ampliamente reconocido que las emisiones de los vehículos deterioran la calidad del aire y por ende, la salud humana. Las nuevas especificaciones permitirán disminuir significativamente las emisiones a la atmósfera al reducir el contenido de azufre en los combustibles. Adicionalmente, este cambio en los combustibles permitirá introducir al mercado mexicano vehículos con sistemas más avanzados de control de emisiones. [2]

En el curso de los pasados 30 años, expertos en control de contaminación en todo el mundo se han dado cuenta de que los combustibles más limpios son una pieza clave en la estrategia efectiva para tener aire limpio. La calidad del combustible se considera ahora no sólo necesaria para reducir o eliminar ciertos contaminantes directamente (ejemplo, plomo), sino también es un pre-requisito para la introducción de muchas tecnologías de control de contaminación importantes (por ejemplo, plomo y azufre). Adicionalmente, ha surgido una ventaja importante de los combustibles más limpios: su rápido impacto en los vehículos

nuevos y los ya existentes. Es importante saber que la más nueva tecnología de motores sólo va a ser efectiva si es usada en combinación con la apropiada calidad de combustible. [5]

Es imposible limpiar el aire, o en particular reducir la contaminación del aire generada por el sector transporte, sin eliminar el azufre de los combustibles. El azufre es por sí mismo un contaminante, pero más importante aún es que el azufre impide la adopción de las principales tecnologías para el control de la contaminación. Ninguna estrategia de reducción significativa de la contaminación del aire puede dar resultado sin reducir el azufre de los combustibles a niveles cercanos a cero.

Prácticamente el total de los compuestos orgánicos de azufre son convertidos a dióxido de carbono, agua y óxidos de azufre, estos óxidos son los responsables del incremento en las emisiones de óxido de nitrógeno, partículas y óxidos de carbono al entorpecer la actividad de los convertidores catalíticos, además, de ser contaminantes por si mismos al reaccionar químicamente en la atmósfera o seres vivos.

Sus efectos nocivos se pueden agrupar en:

En contacto con:	En forma de:	Efectos:
Monumentos y edificios	Lluvia acida	Corrosión y desgaste
Cuerpos de agua	Lluvia acida	Desequilibrios ecológicos por cambio de pH
Seres humanos y animales	Gases en la atmósfera	Irritación de ojos y mucosas
Convertidores catalíticos	Gases de escape	Entorpecimiento de actividad catalítica
Gobiernos	Contaminación ambiental	Sanciones internacionales

**Tabla 1.1 Efectos de la contaminación.**

Como una consecuencia de todos los efectos negativos que produce la contaminación por compuestos organosulfurados, es necesario reducir las emisiones de estos óxidos de azufre a la atmósfera y en los motores. [11]

Como alternativas para llegar a este fin, las dos que parecen las más factibles son:

- Aumentar la eficiencia de los autos y sus sistemas de control de emisiones.
- Mejorar la calidad del combustible, reduciendo su contenido de azufre.

Los combustibles de bajo azufre son la clave para reducir las emisiones vehiculares, mediante la introducción de tecnologías avanzadas de control y nuevos vehículos con diseños más eficientes.

Los combustibles de bajo azufre (~50 ppm) permiten mayores beneficios al incorporar tecnologías avanzadas de control para vehículos diesel. Los filtros de partículas del diesel pueden usarse con combustibles de bajo azufre pero sólo alcanzan un 50% de eficiencia

aproximadamente. La reducción catalítica selectiva puede aplicarse en este caso para lograr un control de emisiones de NOx superior al 80%.

Combustibles de ultra-bajo azufre (~10 ppm) permiten el uso de equipo de absorción de NOx, incrementando su control hasta niveles superiores al 90%, tanto en vehículos a diesel como de gasolina. Esto permite diseños de motores más eficientes, que son incompatibles con los actuales sistemas de control de emisiones. Los filtros de partículas alcanzan su máxima eficiencia con combustibles de ultra-bajo azufre, cerca del 100% de reducción de PM partículas (particulate matter).

La tecnología necesaria para reducir el azufre a niveles ultra bajos se utiliza actualmente en muchos lugares en todo el mundo. Los costos actuales son razonables y la industria de refinación continúa desarrollando catalizadores más activos y nuevos procesos para la remoción del azufre y reducir aún más los costos.

Los estudios muestran que los beneficios de la reducción de azufre rebasan con mucho los costos, si bien la inversión requerida en refinación sigue siendo significativa. *La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos encontró que los beneficios ambientales y en la salud humana asociados a la reducción de azufre fueron diez veces más elevados que los costos (este estudio consideró normas de emisión contingentes más estrictas para combustibles de bajo azufre). Más aún: un estudio europeo demostró que los combustibles de ultra-bajo azufre reducen significativamente los costos totales, incidiendo directamente en un mayor rendimiento del combustible.* El considerable potencial para reducir emisiones de gases de efecto invernadero es un beneficio adicional a los impactos positivos sobre la salud, sobre el ambiente y otros, derivados de la reducción del azufre.

En el mundo desarrollado, los fabricantes de autos y las empresas de refinación han tenido que aplicar sus importantes capacidades técnicas y administrativas para cumplir con regulaciones ambientales crecientemente estrictas. Los resultados han sido niveles de azufre menores en los combustibles y normas de emisión cada vez más bajas para todo tipo de vehículos. De igual forma, los retos ambientales de largo plazo y los requerimientos más estrictos que se esperan en el futuro, están impulsando la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

En muchos casos resulta efectivo y ventajoso realizar en un solo paso el cambio a diesel de ultra-bajo azufre. Los beneficios en la reducción de emisiones totales crecen rápidamente cuando el nivel de azufre en el diesel disminuye de bajo a ultra bajo, tanto en términos de la reducción de emisiones de los vehículos existentes, como para el control de emisiones de los nuevos vehículos. Dado este aumento de los beneficios y el incremento constante de los costos, tiene sentido optar directamente por el diesel de ultra-bajo azufre. [6]

Debido a su origen biológico, el petróleo preserva no solamente el carbono y el hidrógeno de la biomasa original en forma de los hidrocarburos, sino también otros elementos, como el azufre y el nitrógeno e inclusive una variedad de metales de transición, como hierro, vanadio, níquel, etc.

El azufre y el nitrógeno se encuentran incorporados como heteroátomos en una variedad de compuestos, pudiendo representar alrededor del 5% de la masa en algunos depósitos.

Al quemarse como combustible, el azufre contenido en el diesel se convierte en óxidos de azufre que se liberan a la atmósfera. En presencia de agua, los óxidos gaseosos se convierten en ácidos, que se disuelven y se precipitan junto con el agua de lluvia. Este proceso se conoce como lluvia ácida y es frecuente en las ciudades con gran carga vehicular.

Actualmente las lluvias ácidas han disminuido notablemente, gracias a que las normas sobre el contenido máximo de azufre en combustibles son más estrictas desde finales de los años 60. La implementación de estas normas requirió que se desarrollaran una serie de métodos para la depuración del azufre en las fracciones dedicadas a combustibles. El más común de estos métodos es la hidrodesulfuración catalítica, que consiste en la conversión del azufre orgánico en sulfuro de hidrógeno usando altas temperaturas y presiones de hidrógeno molecular. [3]

El combustible diesel es una mezcla compleja de hidrocarburos compuesta principalmente de parafinas y aromáticos, con un contenido pequeño de olefinas.

El número de cetano es la medida clave de la calidad de la combustión de un carburante diesel. El número de cetano guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión. Una combustión de calidad ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante. Cuanto más elevado es el número de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión. [27]

Por el contrario, aquellos carburantes con un bajo número de cetano requieren mayor tiempo para que ocurra la ignición y después se queman demasiado rápido, produciendo altos índices de elevación de presión. La combustión da lugar a ruido excesivo, un aumento de las emisiones, una reducción en el rendimiento del vehículo y aumento de la fatiga del motor. Un humo y ruido excesivos son problemas comunes en los vehículos diesel, especialmente bajo condiciones de arranque en frío.

Las partículas de sulfato contribuyen directamente a las emisiones de PM 10 y de PM 2,5 con sus asociados efectos adversos para la salud y el ambiente.

En Dinamarca, una reducción en los niveles de azufre del combustible desde 440 a 70 ppm llevó a una reducción de 56% en los números de partículas emitidas de los vehículos diesel. Pruebas sobre camiones diesel japoneses demostraron que una reducción en el azufre del combustible desde 400 a 2 ppm disminuía la masa de emisiones de partículas a la mitad. En pruebas de camiones diesel de carga pesada en los EE UU, una caída en el azufre del combustible desde 368 a 54 ppm produjo una reducción de 14% en las emisiones de partículas.

En adición a estas emisiones de partículas, las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden llevar a la formación de partículas secundarias, a medida que las partículas se forman en el aire

ambiente. Modelos de la EPA estiman que el 12% del SO<sub>2</sub> emitido en áreas urbanas se convierte en la atmósfera en material particulado de sulfato.

Con la finalidad de realizar la desulfuración de diesel, se emplean diferentes tecnologías que trabajan bajo diferentes métodos o fenómenos fisicoquímicos.

Estas se dividen en técnicas convencionales y no convencionales, se entiende por tecnologías convencionales a todas aquellas que emplean hidrógeno para romper la molécula azufrada y extraer el átomo de azufre y que además realizan este proceso en lechos percoladores o en lechos fijos. [11]

El oneroso costo de la hidrodeshulfuración catalítica, debido principalmente al alto consumo de hidrógeno y al envenenamiento de los catalizadores por metales pesados, aunado a una limitación intrínseca de reducir los niveles de azufre por debajo de 500 ppm, por arriba de las 15 ppm requeridas por la norma, ha ocasionado que se busquen nuevas alternativas.

Se conoce como proceso de hidrotratamiento a una serie de reacciones de hidrogenación a las cuales se someten algunos de los destilados del petróleo con la finalidad de saturar a una gran variedad de compuestos hidrocarbonatos insaturados y, al mismo tiempo, remover algunos heteroátomos que puedan estar presentes en su estructura (azufre y nitrógeno principalmente) mejorando así la calidad de los productos resultantes, por ejemplo el de las gasolinas y el diesel. Particularmente, la hidrodeshulfuración (HDS) es el proceso industrial mediante el cual se pretende remover el o eliminar el azufre del crudo en forma de H<sub>2</sub>S, a partir de su reacción con hidrógeno. Dicha reacción se promueve a nivel industrial, mediante el uso de catalizadores heterogéneos, constituidos por metales de transición tales como Co, Mo, W y Ni principalmente, soportados sobre alumina, bajo condiciones severas de presión y temperatura (25-50 atm, 330-370 °C). Durante este proceso, una gran porción del azufre presente en diferentes compuestos reactivos es removido con relativa facilidad, sin embargo, el azufre de algunas moléculas menos reactivas a este proceso son difíciles de eliminar.

Actualmente, el proceso de HDS permite obtener diesel con un contenido menor a 100 ppm de azufre dependiendo del origen del petróleo, no obstante, con el objeto de cumplir con las nuevas especificaciones de combustibles y en particular para cumplir con el contenido de azufre, se han planteado algunas modificaciones a los procesos actuales, o incluso el desarrollo de nuevas tecnologías. Entre las medidas planteadas se incluyen: el uso de condiciones de presión y temperatura más altas que las que operan actualmente; el incremento en los tiempos de residencia de las cargas en los reactores, o bien, el desarrollo de catalizadores con mayor actividad. No obstante, las primeras opciones han resultado ser costosas para las refinerías y, en consecuencia, no han sido adoptadas por la mayoría de las compañías petroleras.

Un proceso alternativo al de HDS por el cual se puede llegar a obtener diesel de ultra-bajo azufre bajo condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica es el proceso denominado “desulfuración por oxidación-extracción”. [7]

El azufre es un elemento esencial para la vida. Aunque el azufre inorgánico es la fuente predilecta para la mayor parte de los microorganismos, en su ausencia, una variedad de

compuestos organoazufrados pueden ser metabolizados para proveer el indispensable elemento. Este hecho es el principio básico de una de las más interesantes aplicaciones de la microbiología en la industria del petróleo, la *biodesulfuración*.

El caso mejor estudiado de biodesulfuración oxidativa es la utilización de dibenzotiofeno (DBT) como única fuente de azufre por *Rhodococcus* sp. El DBT y sus derivados alquilados son los organoazufrados más abundantes en el diesel primario y se han establecido como compuestos modelo para este tipo de estudios.

La cepa de *Rhododoccus erythropolis* se ha destacado por su capacidad para remover selectivamente el azufre del DBT sin degradar el esqueleto carbonado y es la base del proceso comercial propuesto por la compañía norteamericana Energy Biosystems Corporation. Esta cepa es el prototipo de microorganismo biodesulfurador, sin embargo, existen aislados de otros géneros que comparten estas características.

En México, investigadores del Instituto Mexicano del Petróleo han aislado cepas de *Rhodococcus* de sitios contaminados con petróleo en México capaces de desulfurar muestras de diesel.

Este proceso es típicamente capaz de reducir más de la mitad del contenido de azufre en diesel, por lo que se considera como una importante alternativa a la hidrodesulfuración catalítica. Sin embargo, existen dos importantes inconvenientes para la incorporación de este proceso a nivel industrial. La primera es que, dado de que el diesel no es soluble en agua, deben mezclarse grandes cantidades del cultivo bacteriano con porciones del combustible a tratar. Debido a los grandes volúmenes de diesel que se requiere procesar, el mezclado de los fermentadores se vuelve un factor limitante. La segunda es el tiempo requerido para este proceso, demasiado lento para los flujos habituales en una refinería. Una fermentación típica requiere de por lo menos siete días para reducir el 60% del contenido de azufre del diesel.

A pesar de lo exitosa que pueda ser la biodesulfuración a nivel de planta piloto, es posible que no se consolide como proceso a nivel de refinería. La opción actual es la utilización de otras actividades enzimáticas, En particular, se ha demostrado que la enzima cloroperoxidasa del hongo *Caldariomyces fumago* puede oxidar selectivamente el azufre de los organoazufrados del diesel, los cuáles pueden ser removidos eficientemente de la mezcla mediante una destilación convencional. [3]

## **Capitulo 2.**

### **Emisiones contaminantes del motor diesel y equipos de medición.**

En este apartado se hará una descripción de los contaminantes del motor diesel así como sus efectos en la salud, también se describirán algunos de los equipos con los que se miden dichas emisiones.

## **2.1 Gases contaminantes.**

Los países desarrollados y también los países que se encuentran en vías de desarrollo, han efectuado acciones orientadas fundamentalmente “a disminuir las emisiones contaminantes” nocivas a la salud provenientes de los motores de combustión interna, además de lograr una evolución tecnológica en los diseños de los automotores que han hecho disminuir el consumo de combustible; recordando que aún la eficiencia termodinámica de los motores de combustión interna a gasolina y a diesel sigue baja, de tal forma que de cada kilogramo de combustible, solamente se aprovecha del 30 a 35% de su energía, así mismo, han evolucionado y ha aumentado la calidad en estos combustibles. [19]

Respecto a la emisión de contaminantes, de los datos registrados en algunas ciudades, las emisiones de las fuentes móviles es muy variada, se estima desde un 15% hasta un 80% dependiendo de las características del lugar, de la distribución de sus industrias y del tipo de contaminante: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, Pb, SO<sub>2</sub>, Partículas.

Las normativas actuales y futuras que se imponen a los productores de motores de combustión interna prevén una reducción importante en óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos sin quemar (HC), plomo (Pb), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y partículas.

Las exigencias de las normativas, junto con la reducción de ruidos y un mejoramiento constante de los combustible utilizables en los motores, permiten prever no solamente una importante evolución de estos motores, sino también la adopción de nuevas técnicas como por citar algunas que afectan directamente al proceso de combustión: un sistema de inyección, nuevas geometrías de cámaras de combustión, sistemas de escape, y sistemas de postratamiento de gases, entre otros.

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

Las características que engloba el proceso de combustión en los motores diesel (mezcla heterogénea, 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. [18]

### **Monóxido de Carbono (CO).**

El monóxido de carbono es una sustancia química conformada por carbono y oxígeno, pero a diferencia del CO<sub>2</sub>, esta sustancia sólo contiene una molécula de oxígeno. Es un gas inodoro, incoloro, inflamable y tóxico. Es el contaminante que más abunda en la atmósfera ya que se produce con la quema de cualquier combustible, sin embargo no se percibe y no se considera muy agresivo.

El monóxido de carbono presente en altas concentraciones, provoca problemas del sistema cardiaco, produce degeneración adiposa (grasosa) de los vasos sanguíneos, dificultad para respirar, causa problemas en el sistema nervioso, intoxicación y hasta la muerte, por desgracia es el contaminante más abundante en la atmósfera y el más difícil de eliminar.

El proceso más determinante del monóxido de carbono es que reacciona 210 veces más con el oxígeno para formar carboxihemoglobina, en lugar de hemoglobina, principal sustancia que transporta el oxígeno al cuerpo. La carboxihemoglobina en presencia del 10% en la sangre afecta significativamente el transporte del oxígeno.

El problema con el monóxido de carbono es que es el principal elemento que provoca la muerte por envenenamiento a las personas, por ello es recomendable evitar la quema de combustible con cualquier tipo de fin en lugares cerrados. Además, también contribuye con daños a la capa de ozono.

### **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).**

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), es un compuesto químico conformado por dos moléculas de oxígeno y una de carbono que participa en conjunto con otras sustancias en la contaminación del ambiente.

En los últimos años se ha multiplicado el nivel del CO<sub>2</sub> en el mundo, el resultado más evidente es el ya mencionado *Efecto Invernadero*, en donde se incrementa la temperatura media de la Tierra produciendo el derretimiento de los cascos polares inundando las ciudades de las costas y una inestabilidad ecológica; también causa desequilibrios como el bloqueo de la atmósfera por el humo y polvo que bloquearían el paso de los rayos solares, produciendo el descenso en la temperatura.

El dióxido de carbono produce mareos en los seres humanos en un ambiente saturado, sin embargo, los daños aún no están profundamente descubiertos.

Por otro lado, se sabe que las plantas requieren de este elemento para la fabricación de oxígeno (O<sub>2</sub>) mediante la fotosíntesis.

## **Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>).**

En cuanto a los compuestos de nitrógeno y oxígeno que se forman con el exceso de este último en una combustión, como el óxido nítrico y bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), también se tienen efectos evidentes debido a la su presencia en el medio. [26]

El óxido de nitrógeno es una sustancia que no constituye una amenaza a los ecosistemas, sin embargo el (NO<sub>2</sub>), es una sustancia que produce efectos realmente notorios en los conductos respiratorios y edema pulmonar en el ser humano, a pesar de ello, no se han generado normas para disminuir de manera considerable el volumen de este elemento desde los años 80's.

Los óxidos de nitrógeno se forman a través de reacciones fotoquímicas, contaminantes como el PAN (nitrato de peroxiacetilo), principal causante del *Smog* fotoquímico (también conocido como niebla), produce irritación en los ojos y en las vías respiratorias. Los motores que más las producen son los de mezcla pobre como los diesel.

En cuánto a los óxidos de azufre, se tiene conciencia de que las sustancias son tóxicas para el ser humano, aunque sólo son mortales con antecedentes de enfermedades en las vías respiratorias.

## **Hidrocarburos (HC).**

Los hidrocarburos son compuestos formados por hidrógeno y carbono en diferentes proporciones de acuerdo al tipo del cual se trate. Se presentan principalmente en los combustibles fósiles, es decir, derivados del petróleo.

Para los hidrocarburos no se puede concebir un daño generalizado, ya que los diversos tipos de hidrocarburos afectan desde los efectos insignificantes hasta los más trágicos. Se piensa que los hidrocarburos tienen efectos cancerígenos sobre los seres humanos. [26]

## **2.2 Partículas Diesel.**

Las emisiones del motor Diesel están formadas por una variedad de compuestos químicos, algunos de ellos contaminan el ambiente, ya sea en fase gaseosa u otros, y tienden a condensarse y adherirse a partículas ya sea en fase líquida o gaseosa.

Existen varios factores involucrados en el proceso de combustión dentro del motor (mezcla heterogénea, reacciones pirolíticas, altas temperaturas, hidrocarburos de cadena larga, azufre), que provocan la emisión de gases tóxicos. Estos factores también provocan la formación de algunos constituyentes de material particulado. Estos fenómenos físicos y químicos involucrados en la generación de partículas comienzan desde el inicio de la inyección de combustible y continúan durante la combustión, incluso ya en la atmósfera, donde las emisiones están diluidas y alcanzan el equilibrio con el ambiente.

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.

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

“Cualquier materia, sólida o líquida, que esté presente en los gases de escape diluidos, en condiciones aproximadamente ambientales o bien, que se hayan recolectado en un filtro especificado tras de haber diluido los gases de escape a una temperatura inferior o igual a 325 K (52 °C) con aire limpio filtrado”.

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Comportamiento Dinámico de las Partículas.**

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, la velocidad de las reacciones de formación o descomposición es muy lenta, en cambio, las partículas tiene una dinámica de formación totalmente diferente.

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 interacciones que existen entre ellas: sedimentación, difusión, evaporación, condensación, crecimiento y colisión, ganancia o pérdida de carga eléctrica en la superficie, reacciones en las fases líquida y sólida, adsorción, procesos fotoquímicos etc., que pueden ocurrir en algunas de ellas en forma simultánea y en otras, en forma secuenciada.

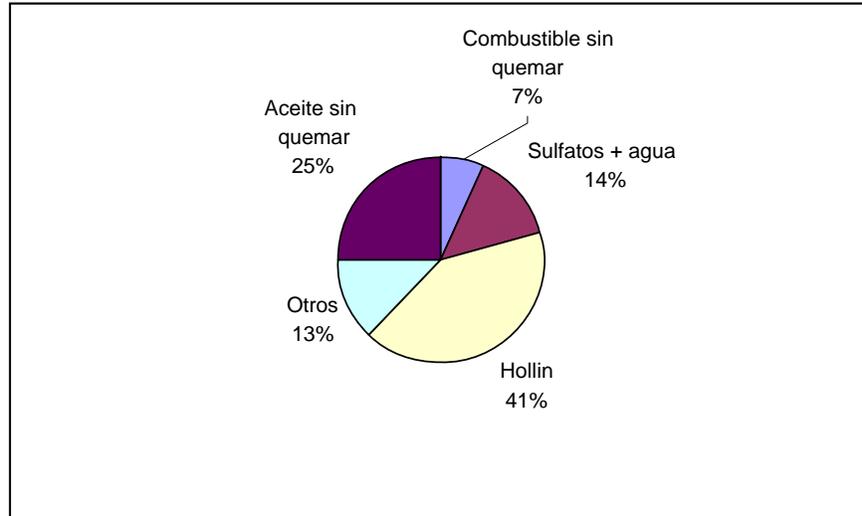
Algunos fragmentos de combustible sólido o líquido, pueden pasar a través del sistema de combustión virtualmente inalterados, o bien, pueden evaporarse y subsecuentemente condensarse como partículas sólidas o líquidas. Asimismo, las cenizas y otros fragmentos no combustibles pueden emitirse como partículas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

A partir de la expulsión de los productos de la combustión, las moléculas que normalmente tienen una forma esferoidal (glóbulos), experimentan un crecimiento de su superficie y se unen mediante un proceso de aglomeración formando cadenas. Dichas partículas al diluirse en el aire atmosférico, completan su formación. [10]

### **Tamaño y Forma de las Partículas.**

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

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



**Figura 2.1 Procedencia de la Partícula.**

Un sistema monodisperso está compuesto de partículas del mismo tamaño, mientras que diferentes tamaños de partículas forman sistemas polidispersos.

Lo más común, en un muestreo, es que se tengan sistemas polidispersos y la descripción de los tamaños debe ser dado en términos estadísticos con distribuciones de número, área, volumen, masa, etc.

Ensayos experimentales han demostrado que la temperatura en los gases de escape influye significativamente en el tamaño de las cadenas que forman los aglomerados. Se recolectan menos partículas grandes cuando la temperatura de los gases de escape es alta.

Existen cambios apreciables cuando dicha temperatura desciende alrededor de 300 °C y el cambio es aún más significativo cuando llega a 200 °C. Estos cambios son debidos probablemente a la condensación y subsecuente adsorción de los hidrocarburos, que se encuentran en fase gaseosa, sobre los aglomerados o agregados sólidos.

Existen fuerzas interatómicas e intermoleculares que son responsables del crecimiento de las partículas y a su vez, definen el tamaño final de éstas. El tamaño determina mucho del comportamiento óptico y aerodinámico de las partículas, lo cual redundará en posibles técnicas de medida. El tamaño de las partículas emitidas por un motor diesel oscila en un rango de 0.005 a 30µm, es decir desde una magnitud molecular hasta magnitudes visibles.

El efecto del tamaño sobre el cuerpo humano es especialmente importante, ya que, las partículas finas (menores de 10µm) se mantienen en suspensión en el aire atmosférico por largos períodos de tiempo y, su comportamiento aerodinámico facilita su inhalación y deposición en el sistema respiratorio.

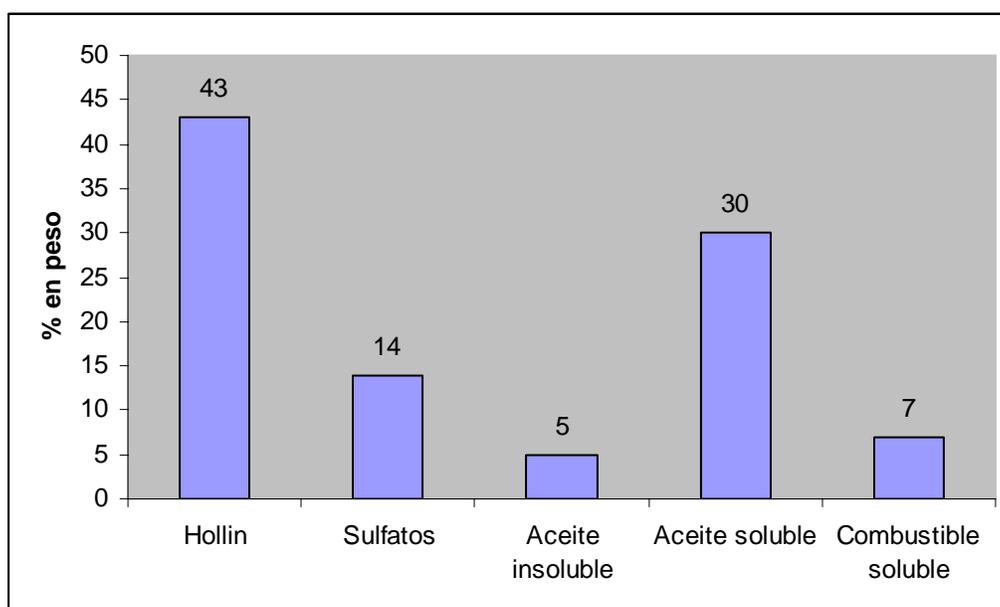
A manera de comparar el tamaño de las partículas diesel con otras partículas, la tabla 2.1 indica los tamaños de algunas de ellas y los métodos de análisis utilizados, de acuerdo precisamente a su tamaño.

PARTÍCULA	Rango tamaño del en $\mu\text{m}$
humo de aceites	0.03-1.0
humo de tabaco	0.01-1.0
niebla de ácido sulfúrico	0.3-3.0
carbón negro	0.01-0.3
polvo en la atmósfera	0.001-20
virus	0.003-0.05
bacterias	0.3-200
aire	30-200

MÉTODOS DE ANÁLISIS	Rango de Utilización en $\mu\text{m}$
impactadores	0.1-5.0
microscopio electrónico	0.001-20
ultra-centrifugado	0.001-1.0
difracción rayos-x	0.002-0.1
esparcimiento de luz	0.01-10
conductividad eléctrica	1-100
precipitación térmica	0.001-5
visible al ojo	60-30 000
espectrometría	5nm – 2.5 $\mu\text{m}$

**Tabla 2.1 Partículas Típicas y Métodos de Análisis de Tamaño.**

La composición de las partículas que emite un motor diesel depende del tipo de motor, de sus condiciones de funcionamiento y del combustible utilizado. La figura 2.2 da un promedio de las muestras tomadas en un motor sobrealimentado, de inyección directa potencia media y en un cierto ciclo de utilización.



**Figura 2.2 Composición Media de las Partículas Emitidas por un Motor Diesel.**

## **El Hollín.**

Se puede observar que el componente mayoritario es el hollín, el cual, propiamente dicho, es carbón con una parte mínima de hidrógeno (aproximadamente el 1% en peso). Esta composición corresponde a la fórmula empírica  $C_8H$ .

Mucha gente ha utilizado las palabras “carbón” y “hollín” para describir un amplio rango de materiales procedentes de la combustión de combustibles fósiles, sin embargo, éstos contienen además, considerables cantidades de hidrógeno y otros elementos y compuestos. La fuente del carbón, base del hollín, es el mismo combustible y, en mínima parte, el aceite lubricante.

Secuencias fotográficas, tomadas con cámara de alta velocidad han demostrado que el hollín se presenta en los bordes del chorro de combustible antes de iniciarse la combustión, por lo que, algunos investigadores estiman que la pirolisis (descomposición química por el calor) es el mecanismo que lo genera.

Existen otras formas carbonosas (cenósfera y alquitrán) que son formadas también por pirolisis, sus características son distintas a las del hollín, sin embargo, por las cantidades formadas, son de mucho menor importancia que este último.

Es necesario analizar y conocer las características de hollín a fin de, entre otras cosas, diseñar adecuadamente los sistemas de postratamiento, en particular, la autorregeneración de los filtros.

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

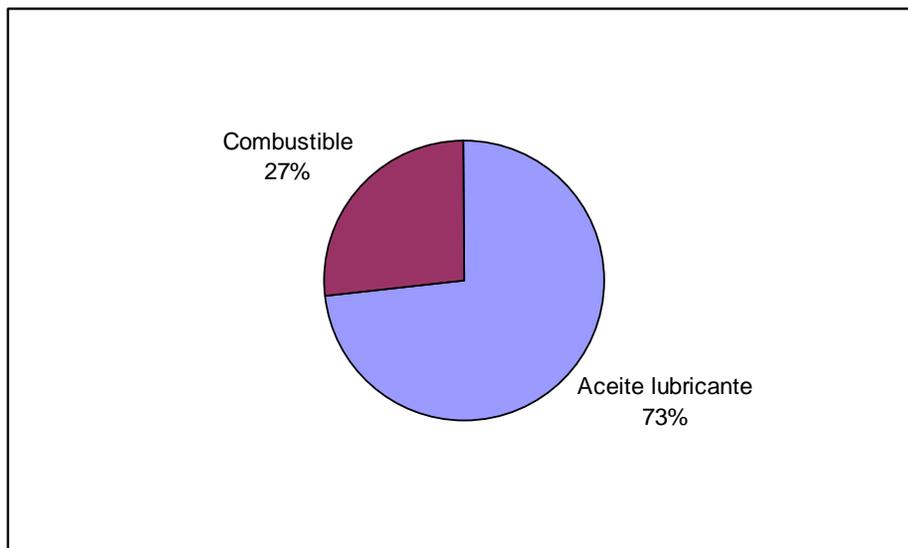
## **Fracción Soluble Orgánica.**

Para su análisis, a las partículas se les separa en dos partes o fracciones:

La Fracción Soluble Orgánica (soluble organic fraction, SOF) y la Fracción Orgánica Insoluble (insoluble organic fraction, IOF). Esta última (IOF) está representada principalmente por el hollín, la cual, frecuentemente se le denomina material no extractable o material sólido.

La parte denominada SOF reviste una gran importancia debido a que contiene compuestos que se presumen, son peligrosos para la salud (hidrocarburos poliaromáticos) y han recibido mucha atención en los últimos años. Esta fracción se determina por medio de la técnica Soxhlet, que consiste en disolver el material de las partículas con tolueno-etanol durante 9 horas. Como ya se ha mencionado, la composición de las partículas puede variar y por tanto, también la SOF. Una distribución a grandes rasgos de dicha composición, tanto en partículas provenientes de motores de inyección directa como de inyección indirecta, la constituyen hidrocarburos derivados del combustible no quemado, del aceite lubricante y de componentes térmicamente sintetizados.

Un esquema muy general de la composición de las partículas atendiendo a las fracciones orgánicas soluble e insoluble se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3 Composición Aproximada de la Fracción Soluble e Insoluble que conforman a una partícula diesel característica.**

El peso molecular promedio del material extractable está en el rango de 360 a 400 para ciertas condiciones de operación y tipo de motor. El del aceite lubricante, es de aproximadamente 443 cuando es de recién elaboración y 489 cuando ya ha estado mucho tiempo almacenado. Respecto al combustible, su peso molecular es aproximadamente 199 luego como podrá observarse que el peso molecular de la SOF indica una composición entre aceite y combustible, predominando el primero.

Técnicas de análisis utilizando trazas radioactivas han permitido conocer también, aproximadamente la proporción con que contribuye el aceite de lubricación y el combustible para la formación de la SOF, sin embargo, se insiste, no es una proporción constante sino dependiente de multitud de factores.

La fracción soluble es significativamente dependiente del dosado y de las propiedades del combustible, ensayos experimentales han mostrado que a dosados pobres, la formación de SOF se incrementa debido a que se incrementa la descomposición de las fracciones pesadas y, cuando los dosados son ricos (por encima de 0.6), no solo se incrementa la formación de SOF sino también la fracción sólida (hollín).

La suma de las fracciones polares, hidrocarburos aromáticos y de los hidrocarburos aromáticos policíclicos nitrurados ( $\text{NO}_2$ -PAHs), que se forman mediante las reacciones de postcombustión entre los PAHs y los óxidos de nitrógeno, constituyen la materia de la SOF donde se detecta el 90% de la actividad de mutación genética. [10]

## **Sulfatos y Agua.**

Una fracción de partículas está compuesta de sulfatos y agua (21% de la materia insoluble y 13% del total de la partícula, aproximadamente).

La fuente principal de esta porción es el combustible. En cualquier sistema de combustión, donde esté presente azufre o compuestos de azufre, el producto predominante es el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

No se conoce el mecanismo mediante el cual el azufre se oxida, sin embargo, cuando se quema el combustible, el azufre también se transforma en  $\text{SO}_2$  que es su forma más estable termodinámicamente a elevadas temperaturas. Por el contrario, el  $\text{SO}_3$  es más estable a bajas temperaturas y, en las llamas frías, el  $\text{SO}_2$  puede convertirse a  $\text{SO}_3$  pero dichas llamas se apagan rápidamente. En el motor diesel, más del 95 por ciento del azufre contenido en el combustible se convierte en dióxido de azufre y el resto sale como trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), niebla de ácido sulfúrico o alguna otra forma de óxido.

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

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

Algunos investigadores han reportado que cerca del 2% del azufre contenido en el combustible se convierte en  $\text{SO}_3$  y es recolectado como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en el filtro de la prueba. Otros más, indican la presencia de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en porcentajes de 2 a 3% e inclusive, en ciclos transitorios en frío, el rango es de 2 a 5.2%.

Los fabricantes de motores han impuesto como condición para alcanzar los estándares establecidos por la normativa de emisiones, el regular el contenido de azufre en el combustible.

Se tiene conocimiento de que, será necesario utilizar uno o más dispositivos de postratamiento de los gases de escape para alcanzarlos niveles mínimos de emisiones en los próximos años, sin embargo, al utilizar catalizadores en el sistema de escape (principalmente para terminar de oxidar hidrocarburos y aceite lubricante no quemados) y un combustible con alto contenido de azufre, la conversión de  $\text{SO}_3$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  es igual o mayor que la reducción de la masa de hidrocarburos.

El porcentaje de sulfatos y agua asociada, presente en las partículas, se incrementará en proporción inversa a la reducción de otras fracciones, mientras no se reduzca el contenido de azufre en el combustible.

## **Otros Componentes.**

Existen otros componentes, distintos de los que ya se han mencionado y que, a la vez que se incluyen como parte de las partículas recolectadas o que salen a la atmósfera, también participan en la formación de ellas. Como ejemplo, se pueden mencionar las cenizas que resultan de compuestos orgánicos e inorgánicos. Algunas de ellas, se forman desde los crudos que son refinados y constituyen la mayoría de las trazas metálicas contaminantes.

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

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

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

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

Las trazas metálicas no sólo son peligrosas para la salud, sino que pueden actuar como catalizadores en los diferentes procesos de formación de partículas.

El aluminio, calcio, hierro, magnesio, níquel, sodio, silicio, y vanadio se pueden encontrar en una proporción de 0.01 a 0.05% de las cenizas mientras que, estaño, potasio, manganeso, cromo, cobalto, plata, litio, estroncio, titanio, bismuto, cadmio y molibdeno se encuentran en cantidades de 0.001 a 0.01%.

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

## **Efectos Fisiológicos.**

El punto de contacto entre el hombre y las partículas diesel están en el medio ambiente, después de los procesos de mezcla y dilución conocidos. No sólo afectan al cuerpo humano mediante una multitud de vías, sino que también alcanza a los animales y plantas que constituyen su alimento.

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

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

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

El profesor Festy, del laboratorio de higiene de París, ha indicado que:

Los bioensayos a corto plazo in vitro y en vivo, realizados con extractos de partículas diesel y expuestos sobre bacterias o células de mamíferos en cultivo, revelan una actividad genética mutante y un efecto cancerígeno sobre la piel de ratones.

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

El CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) clasificó las emisiones diesel en el grupo 2A de los cancerígenos potenciales, admitiendo que las pruebas cancerígenas no son determinantes sobre los hombres pero sí suficientes sobre los animales, debido a los productos de condensación y no por las emisiones totales.[10]

Ya existe un espectrómetro (Cambustion LTD DMS500 Fast Particulate Spectrometer) que cuenta, clasifica y mide la masa de partículas en un rango de 5nm a 2.5µm en tiempo real. La medición en tiempo real es de gran ayuda para optimizar la calibración de sistemas del motor diesel, como el sistema de recirculación de gases. También presenta la ventaja de que puede hacer mediciones en las emisiones de partículas que no se pueden hacer con los sistemas convencionales como el gravimétrico.

### **2.3 Analizadores de gases.**

Un correcto análisis de la concentración de los gases de escape puede dar lugar a diagnósticos muy importantes del funcionamiento del motor. Para determinar la concentración de algunos de los gases emitidos por un motor de combustión interna se utiliza un analizador de gases.

Actualmente existen diversos tipos de sistemas para análisis de gases de escape. A continuación se describen algunos

#### **Aparatos de rayos infrarrojos no dispersivos (N.D.I.R).**

La energía infrarroja es una forma de luz. La longitud de onda de esta energía es más larga que la de la luz que nosotros podemos llegar a ver, existen algunos dispositivos que pueden detectar la presencia de ondas de luz infrarroja.

Muchos gases tienen la propiedad de absorber ondas de luz específicas. Los gases principales en el campo de trabajo automotriz como lo son: monóxido de carbono, hidrocarburos, dióxido de carbono, etc. tienden a absorber las bandas estrechas de longitudes de ondas infrarrojas 5 ó 6 veces más largas que la luz visible.

Es posible detectar la presencia de un gas, por medición del equivalente de la luz infrarroja absorbida en una onda particular de energía infrarroja que pasa a través de las células contenidas en la mezcla de un gas. Si un gas absorbe un espectro de luz infrarroja, y este espectro es característico y específico de dicho gas, entonces la indicación de esta absorción puede ser usada como indicación de la concentración de dicho gas.

La concentración de un gas que se quiere medir puede ser expresada porcentualmente de acuerdo a la absorción de IR que pasa a través de una celda que contenga ese gas en una mezcla de gases.

El método frecuentemente usado en analizadores de gases de escape para poder medir la concentración de algunos de los gases presentes en la mezcla, consiste en hacer pasar luz infrarroja por una celda que contiene el gas, y detectar la energía absorbida por cada uno de los gases con detectores apropiados. Estos detectores consisten en un filtro óptico formado por un lente que permite sólo pasar las longitudes de onda del espectro infrarrojo correspondientes al gas cuya concentración se quiere medir.

Son aparatos cuyo esquema básico se muestra en la figura 2.4. El analizador está constituido por dos fuentes de rayos infrarrojos,  $S_1$  y  $S_2$  que tienen igual intensidad; por dos celdas cilíndricas  $C_1$  y  $C_2$  con las bases transparentes a los rayos infrarrojos de las cuales la primera  $C_1$ , contiene aire puro cuyas moléculas no absorben los rayos infrarrojos, y la segunda  $C_2$  el gas a analizar; por dos cámaras  $R_1$  y  $R_2$  con la parte superior transparente a los rayos infrarrojos, separadas por una membrana metálica elástica  $M$  y llenas con el gas a analizar (por lo tanto  $CO$  y  $CO_2$  o bien, en el caso de los HC, hexano normal).

La membrana  $M$  está frente a un electrodo  $E$ ;  $M$  y  $E$  constituyen las armaduras de un condensador. Después de la puesta a cero, conseguida haciendo pasar aire puro por  $C_2$ , se

hace fluir por ella la mezcla gaseosa examinada que presumiblemente contiene el gas del que están llenas las cámaras  $R_1$  y  $R_2$ . Mientras  $R_2$  sólo recibe una parte de la energía emitida por  $S_1$ , el gas contenido en  $R_1$ , al recibir una cantidad de energía mayor, se recalienta más que el gas contenido en  $R_2$ ; en consecuencia en  $R_1$  se alcanza una presión mayor que en  $R_2$ .

Así, la membrana elástica  $M$  se deforma y un circuito electrónico mide la consiguiente variación de capacidad del condensador  $M-E$ , variación que es proporcional a la absorción de energía en  $C_2$  y por lo tanto a la concentración a medir.

Por necesidades inherentes al circuito electrónico de medición, el aparato está provisto de un obturador giratorio de sectores que periódicamente interrumpe los dos haces de rayos infrarrojos. De este modo el circuito electrónico mide la amplitud de la variación periódica de capacidad del condensador  $M-E$ . En la figura 2.4 se representan las dos condiciones a y b, de obturador abierto y obturador cerrado. [27]

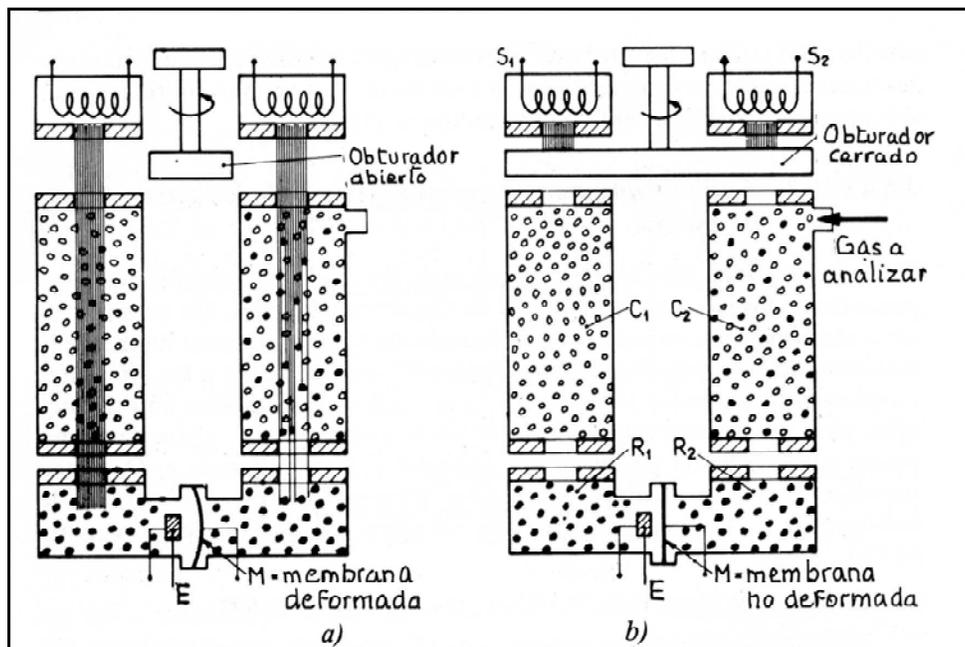


Figura 2.4 Analizador de gases N.D.I.R.

### Aparatos de quimioluminiscencia.

Se les emplea en la medición de los  $NO$  que es la forma predominante bajo la cual los óxidos de nitrógeno  $NO_x$  están presentes en los gases de escape de los motores de combustión interna.

Este método de medición se basa en la reacción quimioluminiscente entre  $NO$  y  $O_3$ .



Cuando las moléculas electrónicamente excitadas de  $NO_2$  vuelven a su estado primitivo no excitado, se manifiesta una emisión de luz ( $h$ ).

En la práctica el gas a analizar, que contiene una concentración desconocida de NO, es puesto en contacto en un reactor con O<sub>3</sub> producido por un ozonizador. La quimioluminiscencia que resulta es detectada por un fotomultiplicador. Los parámetros que intervienen en la reacción pueden ser variados de modo tal que la respuesta del fotomultiplicador varíe linealmente con la concentración de NO. [27]

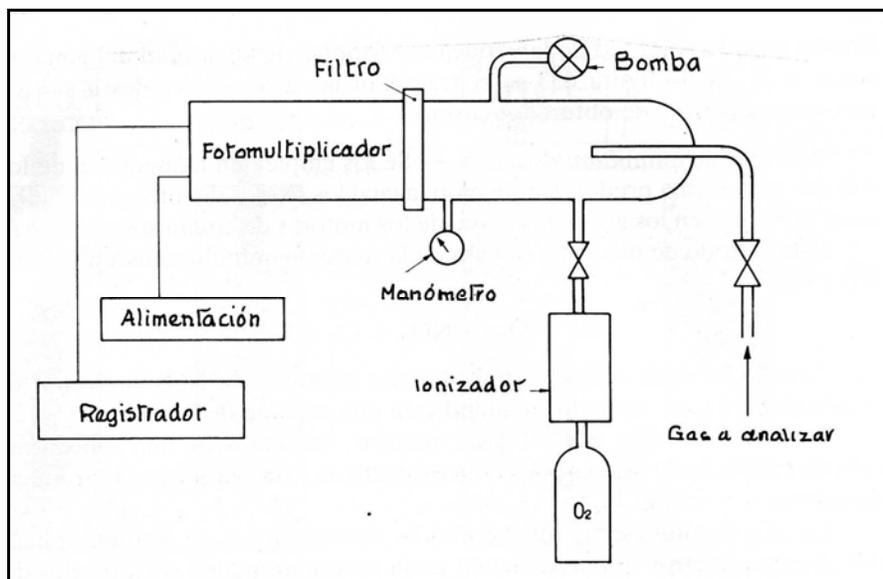


Figura 2.5 Aparato de quimioluminiscencia.

#### Aparatos a ionización de flama (F.I.D.).

Están destinados a la medición continua de la concentración de HC presente en un gas. Estos analizadores se basan en el principio de la ionización de flama.

El sensor es un quemador en el cual un flujo calibrado de gas a analizar atraviesa una flama producida por la combustión de aire e hidrógeno.

En el interior de la flama los hidrocarburos presentes en el flujo a examinar sufren una total ionización que produce iones positivos y electrones. Estos iones son recogidos en unos electrodos produciendo un flujo de corriente que es enviado a un circuito de medición. El flujo de corriente así generado es proporcional a la velocidad a la cual los átomos de carbono entran en el quemador. [27]

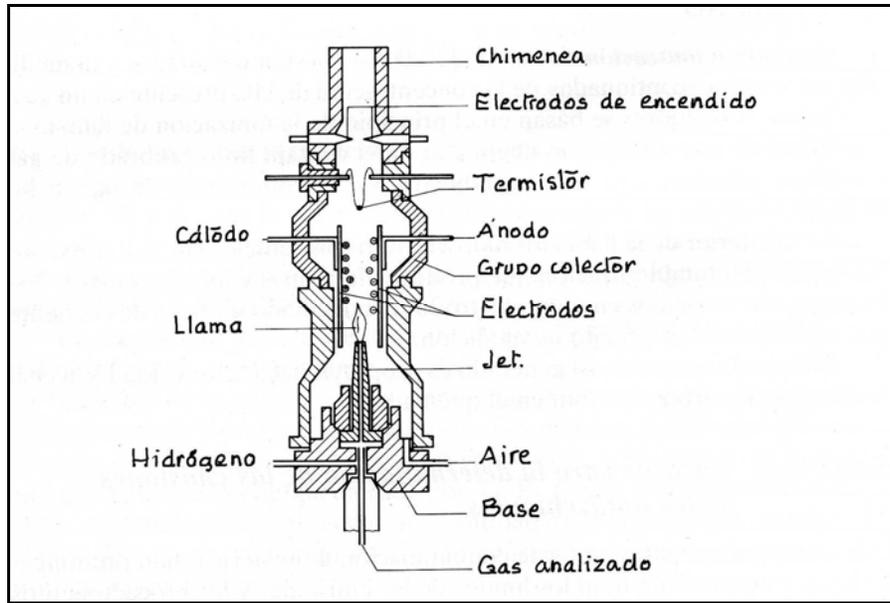


Figura 2.6 Aparato de quimioluminiscencia.

## 2.4 RAVEM.

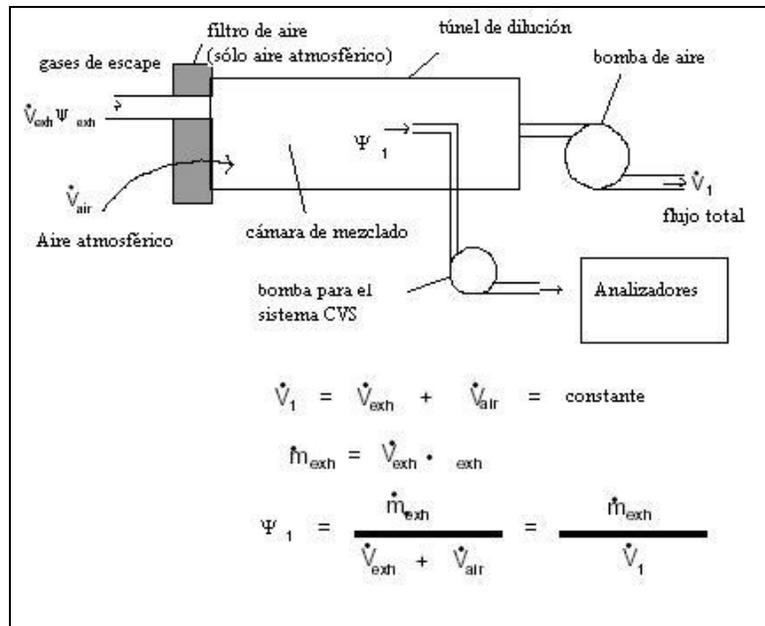
Las mediciones de partículas y emisión de gases, especialmente  $\text{NO}_x$ , de motores de servicio pesado, móviles y estacionarios, a diesel y gasolina son de gran importancia para los inventarios de emisiones, y para el desarrollo y validación de medidas de control.

No se tenía un método práctico para medir las emisiones de equipo móvil o estacionario en condiciones normales de funcionamiento, como en el caso de equipos de construcción, los cuales era difícil de llevar a un laboratorio u operar en un dinamómetro; hasta que investigadores del laboratorio Warren Spring en Inglaterra demostraron exitosamente el uso de un sistema de muestreo de volumen constante (CVS Constant Volume Sampling) portátil que puede viajar junto con el vehículo, eliminando la necesidad de un dinamómetro de chasis.

El RAVEM (Ride-Along Vehicle Emission Measurement) es un sistema de medición de emisiones desarrollado especialmente para funcionar donde los métodos convencionales de medición con dinamómetro de chasis no son aplicables, por ejemplo, en bulldozers, locomotoras, buques marinos, equipos de construcción. El sistema es adecuado para hacer mediciones de emisiones en vehículos bajo condiciones de operación que son difíciles o imposibles reproducir en un laboratorio convencional. Tres ejemplos de aplicaciones son: el uso del dispositivo para la medición de emisiones de una turbina de gas usada para la propulsión de una locomotora, mientras ésta se encontraba en servicio, la evaluación de los corredores de transporte recientemente implementados en el Distrito Federal y el uso en camiones de recolección de basura. El sistema fue diseñado para medir emisiones de motores a diesel, gasolina y aquellos que usan combustibles alternativos.

El funcionamiento del RAVEM está basado en el principio del muestreo a volumen constante (CVS) mismo que es usado en los procedimientos oficiales de pruebas de emisiones para vehículos de la EPA. El sistema es capaz de medir emisiones en masa de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , y MP (material particulado) provenientes del tubo de escape de un motor mientras éste se encuentra trabajando. El sistema está diseñado de tal forma que permite mantener un muestreo proporcional durante cambios de régimen y carga en el motor, y flujo en los gases de escape. Pruebas de correlación han mostrado mucha similitud entre las emisiones medidas con el RAVEM y un laboratorio convencional.

La ventaja de un sistema CVS es que la concentración de contaminantes en el túnel de dilución es proporcional al flujo másico de contaminantes en el escape. Un túnel de dilución es una cámara a la cual se lleva una muestra de gases de escape del motor para mezclarla con aire atmosférico filtrado hasta alcanzar la temperatura de equilibrio, después, la mezcla se hace pasar por un venturi, a fin de lograr una mezcla homogénea y de esta forma poder llevar a cabo todas las mediciones correspondientes. Mediante un sistema de extracción y bombeo la muestra diluida se hace pasar por un filtro para capturar partículas, a la vez que se efectúan las mediciones correspondientes de los contaminantes. La dilución se hace con objeto de simular las condiciones ambientales que se presentan en la conducción normal del vehículo. [8]



**Figura 2.7 Funcionamiento del RAVEM.**

La figura 2.7 muestra el funcionamiento de un sistema CVS. Los gases crudos ( $\dot{V}_{exh}$ ) entran al túnel de dilución junto con aire atmosférico ( $\dot{V}_{air}$ ) del lado izquierdo del túnel. Los gases crudos y el aire se mezclan en el túnel de dilución, y la mezcla homogénea es bombeada hacia el lado derecho del túnel. Justo frente a la salida del túnel un pequeño tubo de muestreo recoge una muestra de la mezcla del túnel de dilución.

Como las ecuaciones de la figura 2.7 lo muestran, la concentración de contaminante en la mezcla a la salida del túnel de dilución es proporcional al flujo másico de ese contaminante en el escape e inversamente proporcional al flujo volumétrico total  $\dot{V}_1$ . La concentración de cada contaminante puede ser medida usando técnicas comunes para gases, y para las partículas se pueden usar filtros prepesados.

El flujo volumétrico total es una cantidad constante conocida. Por lo tanto, el flujo másico de contaminante emitido puede ser determinado mediante la última ecuación de la figura 2.7. Este cálculo se hace despreciando las concentraciones de contaminantes del aire de dilución; el cálculo se vuelve un poco más complejo cuando dichas concentraciones son importantes, como en algunos casos de mediciones en equipo móvil. Las partículas se miden pasando mezcla diluida a flujo volumétrico constante a través de un filtro prepesado. El aumento en el peso de los filtros se divide por el volumen de mezcla pasado a través del filtro para dar un promedio de las partículas generadas durante la prueba.

Para los gases, la medición se puede hacer mediante dos métodos, colectando una muestra en una bolsa apropiada para después medir las concentraciones promedio de contaminantes, o mediante medición electrónica de las concentraciones instantáneas de cada contaminante. El RAVEM usa estos dos métodos, midiendo y registrando segundo a segundo flujos másicos de los contaminantes, así como también recolectando muestras de gases de escape diluido y aire de dilución. [8]

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 e.g. una falla en las bolsas durante la prueba.

### Principio de funcionamiento.

El principio de operación del RAVEM es similar a un sistema CVS, pero con una diferencia clave. Esta diferencia consiste en que el RAVEM extrae y diluye solamente una pequeña porción o fracción constante del caudal en el escape, usando un sistema de muestreo proporcional patentado.

Este sistema funciona manteniendo condiciones isocinéticas en la entrada de la sonda de muestreo. El muestreo isocinético se mantiene mediante un sistema de control que reacciona con la diferencia de presión estática entre el interior y el exterior de la sonda.

La ecuación de Bernoulli nos dice que la diferencia de presión entre el interior y el exterior es inversamente proporcional a la diferencia de velocidades, y es cero cuando las velocidades son las mismas.

El sistema de control del RAVEM ajusta el flujo volumétrico a través de la sonda para provocar que la diferencia de presión sea cero. Bajo esta condición la velocidad de la muestra de gas fluyendo dentro de la sonda es igual que la del resto del gas por fuera de la sonda. El flujo volumétrico de la muestra a través de la sonda es entonces proporcional al flujo volumétrico en el resto de los gases de escape. El diámetro interior de la sonda es de 6.16 [mm]. El diámetro típico del tubo de escape de un vehículo de servicio pesado es de 72 a 123 [mm], entonces la fracción del volumen que pasa a través de la sonda de muestreo es de alrededor del 0.22% al 0.66%. Esto hace posible el uso de una alta relación de dilución. [8]

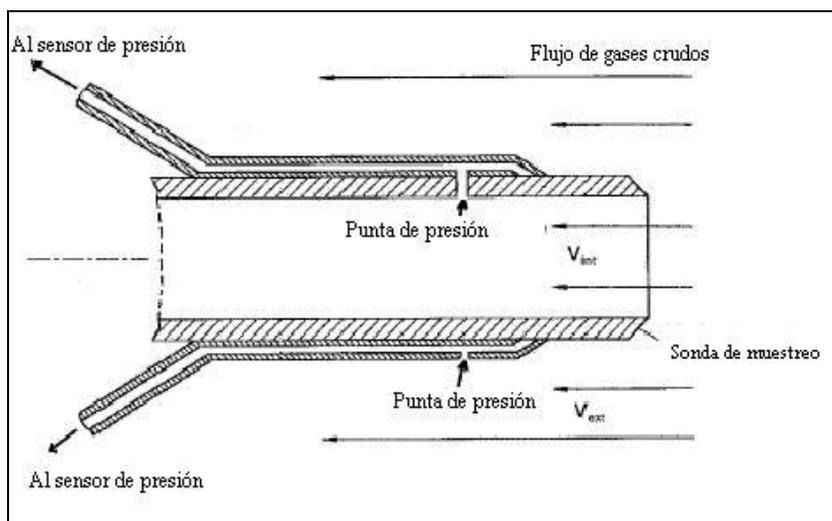


Figura 2.8 Sonda de muestreo.

### Descripción del sistema.

La figura 2.9 muestra el diagrama del RAVEM.

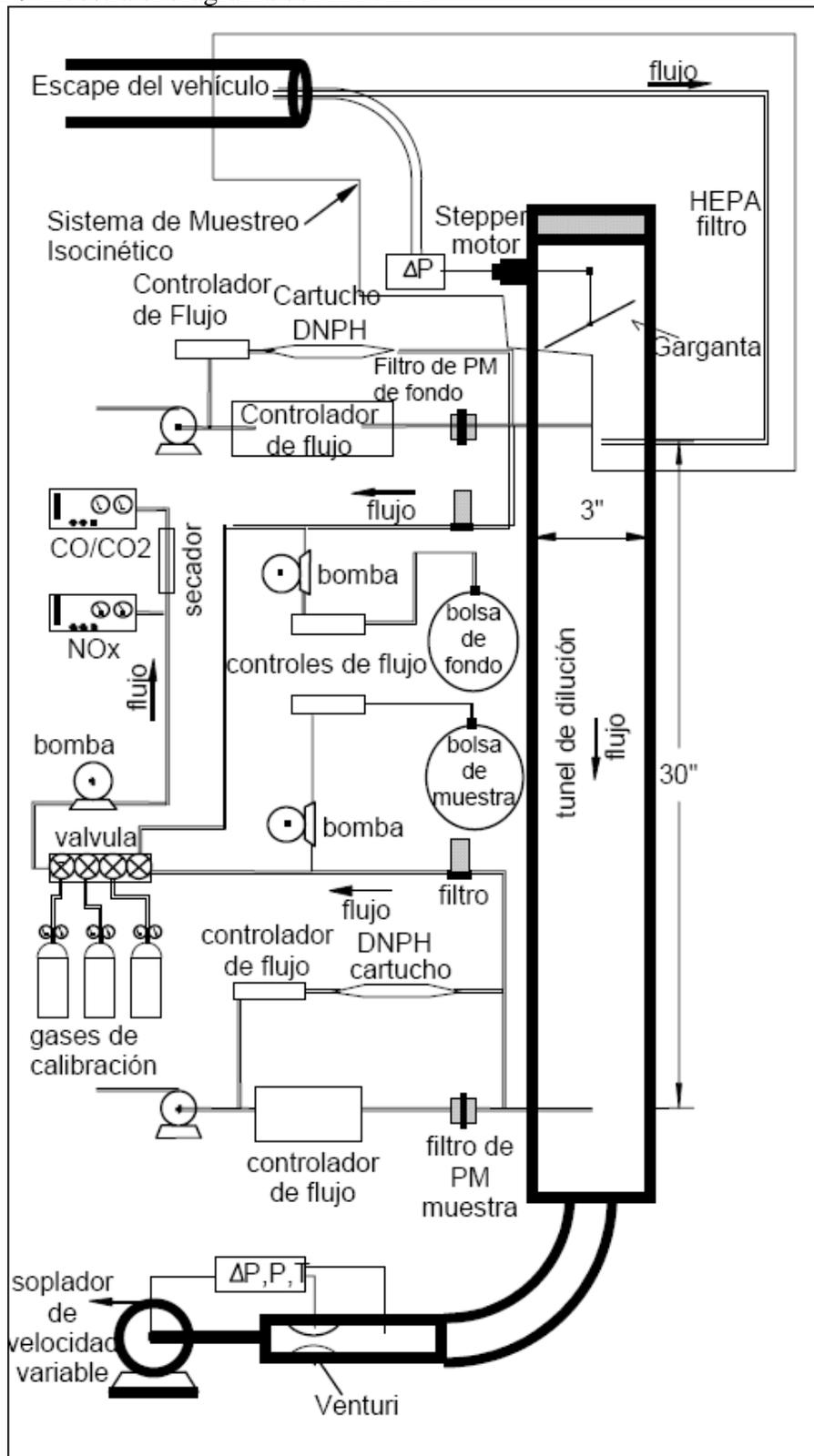


Figura 2.9 Diagrama del RAVEM.

El sistema de muestreo isocinético está formado por la sonda de muestreo, línea de muestreo, un medidor de presión sensible y un motor de pasos acoplado a la mariposa de entrada al túnel de dilución. Abriendo y cerrando dicha mariposa cambia la presión dentro del túnel de dilución y por lo tanto el flujo a través de la línea de muestreo.

Un sistema de control electrónico ajusta continuamente la posición de la mariposa para llevar la diferencia de presión a cero, esto es lo que mantiene las condiciones isocinéticas a la entrada de la sonda de muestreo. El resto del RAVEM comprende el sistema CVS con un túnel de dilución y dispositivos para el muestreo de gases y partículas, similares a los que se usan en laboratorios convencionales de medición de emisiones.

El túnel de dilución mide 102 [mm] de diámetro por 1.3 [m] de largo, haciendo al sistema muy fácil de transportar. Un ventilador de velocidad variable y un sistema de flujo de aire van conectados al final del túnel de dilución para controlar el flujo del sistema CVS. El flujo del sistema CVS puede variar entre 0.4 [m<sup>3</sup>/min] y 1.6 [m<sup>3</sup>/min] para optimizar la relación de dilución en función de los cambios de régimen del motor.

Como en todos los sistemas CVS, la concentración de contaminantes en los gases diluidos en el túnel de dilución es proporcional al flujo másico de gases crudos que entran al túnel. Emisiones en tiempo real de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> pueden ser determinadas mediante la medición de las concentraciones de dichos contaminantes en los gases diluidos. Las concentraciones de los gases son medidas mediante un analizador de gases California Analytical Instruments (CAI) modelo ZRH-2, con un analizador que emplea el principio de medición de tipo infrarrojo no dispersivo (NDIR) para el CO y CO<sub>2</sub>, y un analizador por quimioluminiscencia CAI 400S-HCLD para los NO<sub>x</sub>.

La medición de hidrocarburos no se recomienda ya que puede ser peligrosa, debido al uso de una flama de hidrógeno. Ambos analizadores están montados en una cubierta especial de tipo militar para su transporte. Las emisiones son medidas en unidades de masa por viaje, por unidad de tiempo y por unidad de combustible consumido.

A parte de las mediciones en tiempo real, se pueden coleccionar muestras de gases diluidos y aire de dilución en bolsas Tedlar, para un análisis posterior.

Para mediciones de partículas, muestras de gases diluidos y aire de dilución son tomados en los extremos del túnel de dilución. Estos gases pasan a través de filtros prepesados (Pallflex 37 mm) que coleccionan las partículas, como los mostrados en la figura 2.10. Los filtros son pesados posteriormente para determinar la concentración de partículas en cada prueba. El flujo en la muestra para determinar las partículas es controlado mediante controles de flujo programables. El aire de dilución se hace pasar a través de un filtro HEPA, haciendo que su contenido de partículas sea efectivamente cero. [8]



**Figura 2.10 Filtros para muestreo de partículas.**

### **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. [20]

## **Capítulo 3.**

### **Dispositivos y métodos de control.**

En este capítulo se mencionan los diferentes dispositivos y métodos de control con los que debe contar un motor diesel, para que junto con un combustible de alta calidad se tenga una excelente disminución de emisiones.

### **3. Dispositivos y métodos de control.**

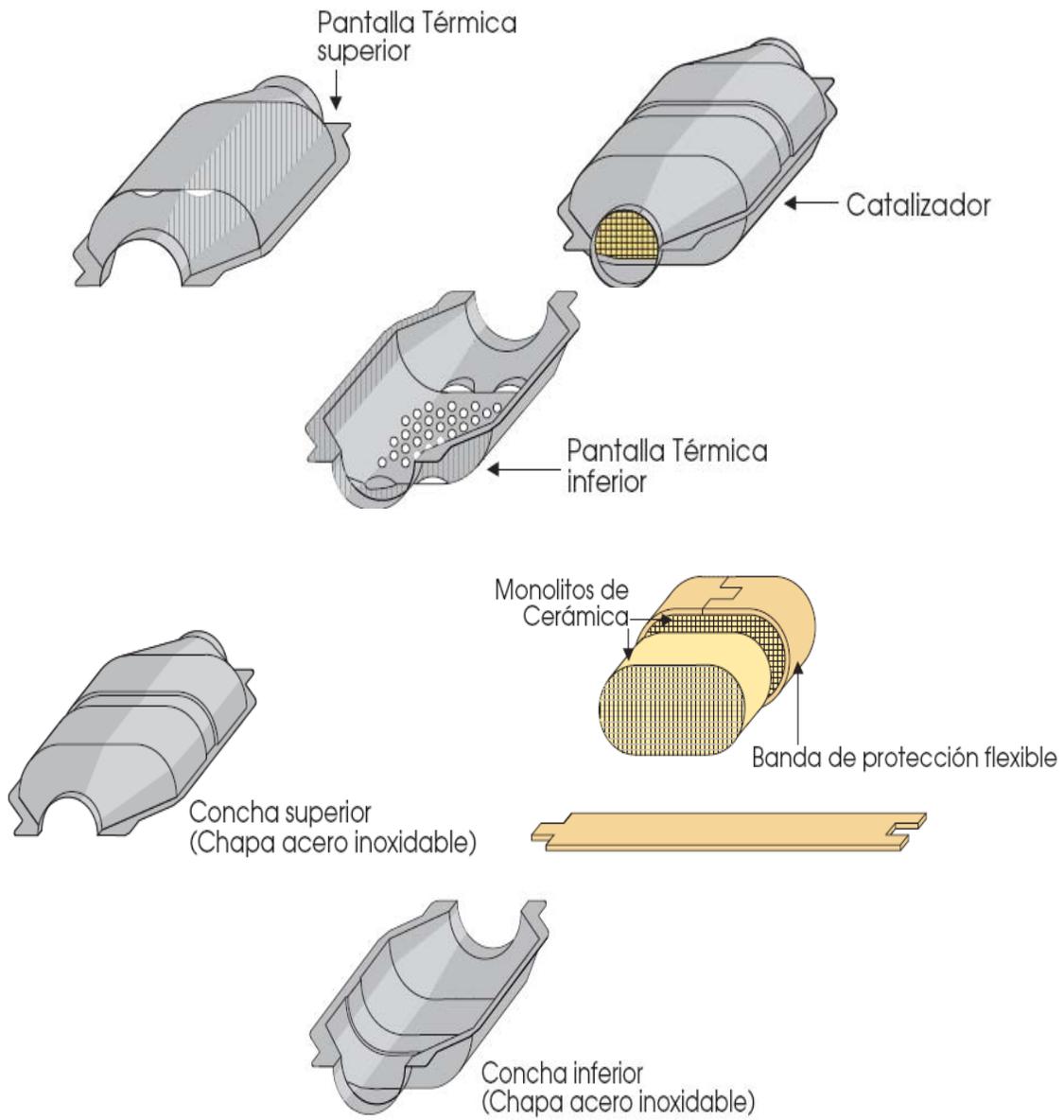
A nivel internacional existen diferentes tecnologías para los vehículos a diesel para controlar sus emisiones, mismas que se agrupan en dos grandes grupos, **siendo la primera de ellas** concerniente a realizar modificaciones al motor, como lo es el retardar el tiempo de inyección y a su vez incrementar la presión de inyección, incorporación de válvulas de recirculación de gases, etc. Con relación al **segundo grupo** se tienen las tecnologías de tratamiento de los gases de escape, es decir acciones después de la combustión, como por ejemplo:

#### **3.1 Convertidores catalíticos.**

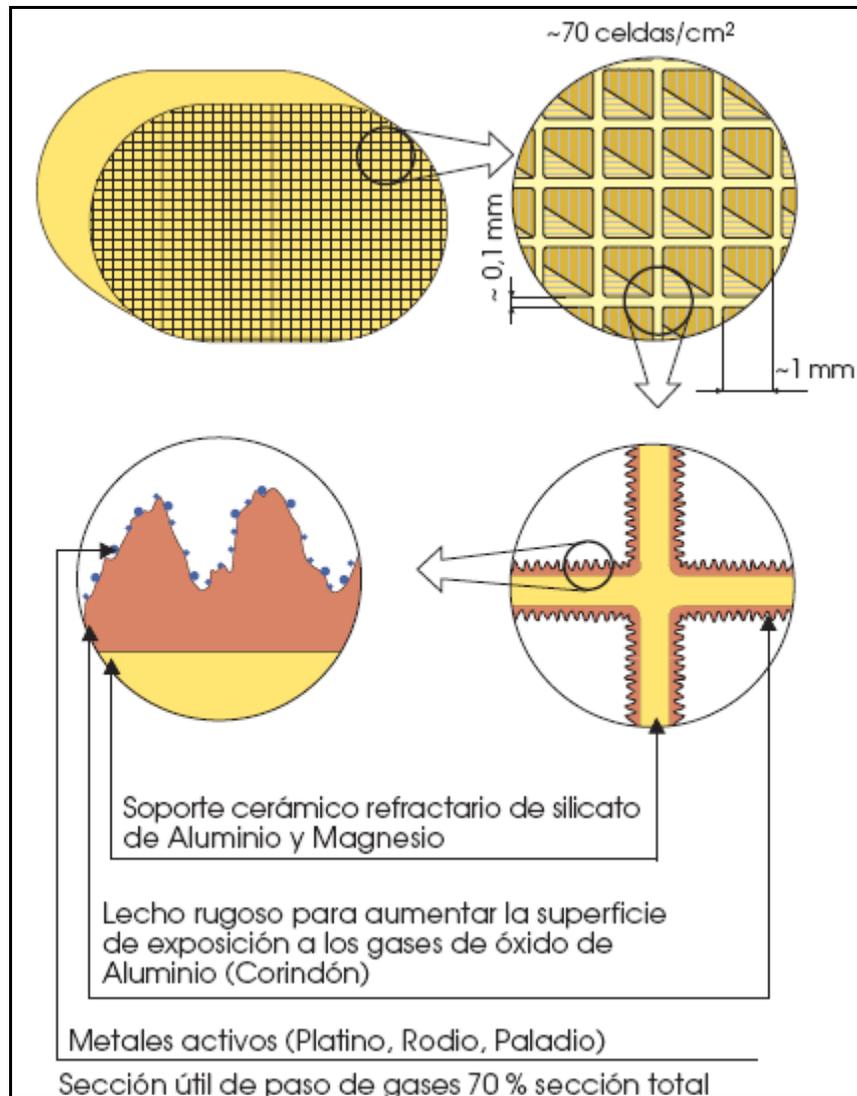
El convertidor catalítico oxidante para vehículos diesel reduce los niveles de monóxido de carbono e hidrocarburos en el gas de escape, y también reduce las emisiones de partículas (hollín). A diferencia del convertidor catalítico de tres vías para los motores de gasolina, no puede convertir los óxidos de nitrógeno en nitrógeno más compatible con el medio ambiente (motivo: se trata de un proceso de reducción química, opuesto al proceso de oxidación aquí utilizado). Por este motivo, los motores diesel cuentan con una recirculación de los gases de escape que tiene lugar durante el proceso de combustión para reducir la cantidad de óxidos de nitrógeno.

Se trata de un dispositivo instalado en el tubo de escape, cerca del motor, ya que ahí los gases mantienen una temperatura elevada. Esta energía calorífica pasa al catalizador y eleva su propia temperatura, circunstancia indispensable para que este dispositivo tenga un óptimo rendimiento, que se alcanza entre los 400 y 700 grados centígrados. A nivel experimental, ya existen catalizadores precalentados eléctricamente, de forma tal que el catalizador ya está caliente aún después de un arranque en frío.

Exteriormente el catalizador es un recipiente de acero inoxidable, frecuentemente provisto de una carcasa-pantalla metálica térmicamente aislada, igualmente inoxidable, que protege algunas partes del vehículo de las altas temperaturas alcanzadas. En su interior contiene normalmente un soporte cerámico o monolito, de forma ovalada o cilíndrica, con una estructura de múltiples celdillas en forma de panel, con una densidad de éstas de aproximadamente 450 celdillas por cada pulgada cuadrada (unas 70 por centímetro cuadrado). La superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene elementos metálicos, tales como Platino (Pt) y Paladio (Pd), que permiten la función de oxidación, y Rodio (Rh) en el caso de los de tres vías, que interviene en la reducción. Estos metales preciosos actúan como elementos activos catalizadores; es decir, inician y aceleran las reacciones químicas entre otras sustancias con las cuales entran en contacto, sin participar ellos mismos en estas reacciones. Los gases de escape contaminantes generados por el motor, al entrar en contacto con la superficie activa del catalizador son transformados parcialmente en elementos no contaminantes. [21]



**Figura 3.1 Partes de un convertidor catalítico.**



**Figura 3.2 Parte interna de un convertidor catalítico.**

Al emplear catalizadores en motores Diesel, debe tenerse en cuenta lo siguiente: debido a las características inherentes al proceso de combustión, el diesel trabaja con un exceso de aire. Una reducción de los óxidos de nitrógeno no podría conseguirse, puesto que ésta sólo se logra con la falta de aire. Y decimos que no podría porque hay esperanzas de aplicar un nuevo tipo de catalizador y que actúa sobre el óxido de nitrógeno. 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, por lo que baja la temperatura de la combustión y se reduce el nivel de emisiones.

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.

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 proporción 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 autos diesel de serie dentro de pocos años.

El catalizador Diesel no puede retener partículas si no va asociado a la llamada "trampa de partículas", la que ya se instala en algunos camiones livianos y también en automóviles.

### **3.2 Trampas de partículas.**

Las trampas de partículas son sistemas que, mediante el filtrado 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 diferentes soluciones de regeneración, entre las cuales se mencionan las siguientes:

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 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 una fuente de energía es la que ofrece mayor eficiencia, será descrita brevemente.

Esta trampa en términos generales, está compuesta por:

- \* Un filtro monolítico de cerámica, que recolecta las partículas emitidas por el motor.
- \* Una 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

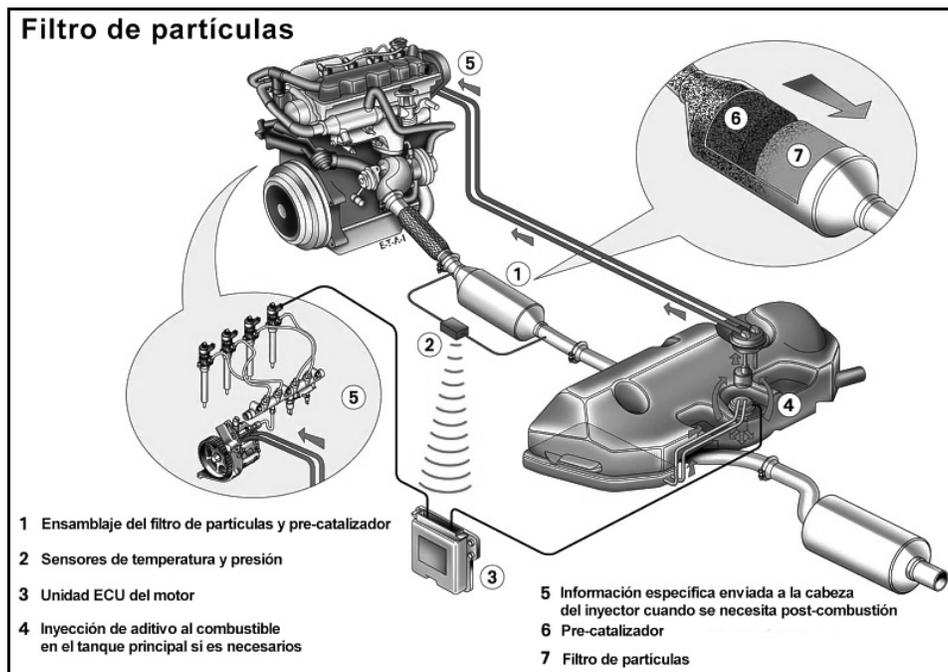
- \* Un sistema de control, que ordena el inicio y el fin del proceso de regeneración entre otras cosas.
- \* Una desviación (by pass), que permite conducir a los gases de escape hacia otro filtro mientras éste se regenera, en caso que operen dos filtros en paralelo, o hacia el silenciador.

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 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.



**Figura 3.3 Trampa de partículas de regeneración activa.**

### 3.3 Sistema de recirculación de gases.

Los óxidos de nitrógeno no se ven afectados por la instalación de un catalizador, por lo que dicho contaminante hay que tratarlo antes de que llegue al escape. Esta es la razón por la que se utiliza el sistema EGR en los motores.

Para reducir las emisiones de gases de escape, principalmente el óxido de nitrógeno (NOx), se utiliza el Sistema EGR (Exhaust gas recirculation) que reenvía una parte de los gases de escape al colector de admisión, con ello se consigue que disminuya el contenido de oxígeno en el aire de admisión que provoca un descenso en la temperatura de combustión con lo que se reduce el óxido de nitrógeno (NOx). Un exceso de gases de escape en el colector de admisión, aumentaría la emisión de hollín. Si bien el contenido de azufre en el combustible no afecta la eficiencia de control de estos dispositivos, sí implica reducciones en la durabilidad y confiabilidad del sistema, debido a la presencia de ácido sulfúrico, que se forma al enfriar los gases de salida para introducirlos al sistema de recirculación. [22]

La activación del sistema EGR y la cantidad de gases de escape que deben ser enviados al colector de admisión es calculada por la ECU (Unidad Electrónica de Control), teniendo en cuenta el régimen motor (RPM), el caudal de combustible inyectado, el caudal de aire aspirado, la temperatura del motor y la presión atmosférica.

Normalmente el sistema EGR solamente está activado a una carga parcial y temperatura normal del motor.

Para efectuar la recirculación de los gases, se utiliza una válvula EGR que permite el reciclado de una parte de los gases, 30% como máximo, entre el colector de admisión y el múltiple de escape. [23]

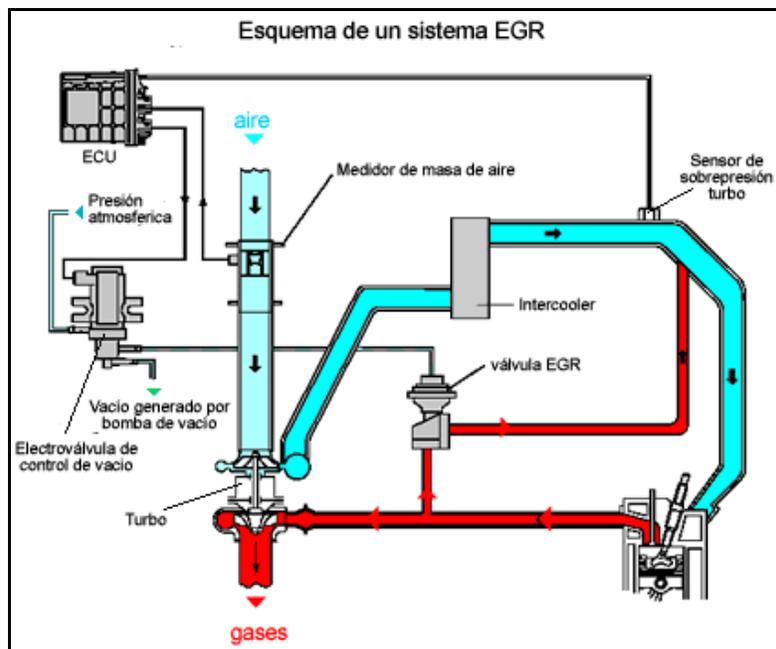
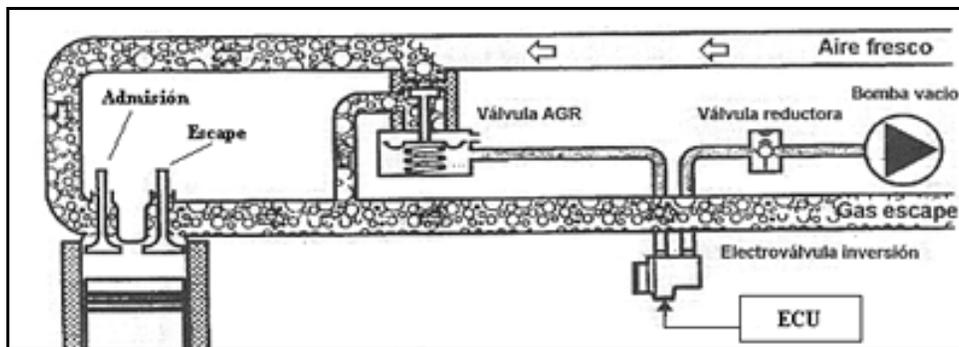


Figura 3.4 Esquema de un sistema de recirculación de gases.

De acuerdo con los datos obtenidos, la ECU actúa sobre una electroválvula controladora de vacío (convertidor EGR). Esta válvula da paso o cierra la depresión procedente de la bomba de vacío. De esta forma la válvula de recirculación de gases (válvula EGR) abre o cierra permitiendo o no la recirculación de gases del colector de escape al colector de admisión.

En la figura 3.5 se ve un sistema EGR montado en otro tipo de motor, de acuerdo con los datos obtenidos, la unidad de mando ECU actúa sobre la "válvula inversora" electroneumática. Esta válvula da paso o cierra la depresión que genera la "bomba de vacío", de esta forma la "válvula EGR" abre o cierra el circuito de recirculación de gases de escape.



**Figura 3.5 Esquema de un sistema EGR.**

Por otro lado, una "relación" demasiado alta de recirculación puede ser negativa respecto a la vida útil del motor, la cual puede verse disminuida por contaminación interna y desgaste. [23]

### 3.4 Normas que regulan emisiones de vehículos en circulación.

Debido a que los gases y partículas contaminantes de motores diesel participan en el deterioro ambiental y pueden ocasionar problemas específicos de salud, se han adoptado ciertas normas que limitan su emisión.

A continuación se mencionan las normas oficiales mexicanas en vigor referentes a las emisiones de motores diesel, así como la norma referente a las especificaciones de los combustibles fósiles.

#### **Norma oficial mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental. [12]**

Esta norma se elaboró considerando varios aspectos determinantes para la protección del medio ambiente, entre los cuales destacan:

- Las industrias y vehículos automotores que usan combustibles generan contaminantes cuya emisión produce deterioro en la calidad del aire, lo cual hace necesario mejorar la calidad de los combustibles, la de los procesos de combustión y, en su caso, la de los equipos de control.
- La definición de especificaciones sobre protección ambiental para los combustibles tiene por objeto disminuir significativamente las emisiones a la atmósfera y debe ser acorde con las características de los equipos y sistemas de combustión que los utilizan en fuentes fijas y en el transporte.
- Para atender los problemas de contaminación en el país es necesario mejorar la calidad de los combustibles, en particular en lo que se refiere a su contenido de azufre, para poder incluir en los vehículos los sistemas más avanzados de control de emisiones.

Para este trabajo sólo se tomarán en cuenta las especificaciones relevantes para el combustible diesel de uso automotriz.

**Tabla 3.1 Especificaciones del diesel para uso automotriz.**

Numero de cetano	48 mínimo
Índice de cetano	48 mínimo
Azufre total	500 ppm peso máximo. ZFN <sup>1</sup> Enero 2007 15 ppm máximo. ZMVM <sup>2</sup> , ZMG <sup>3</sup> , ZMM <sup>4</sup> Enero 2009 15 ppm máximo. Resto del país Septiembre 2009 15 ppm máximo.
Contenido de aromáticos	30% vol. Máximo

<sup>1</sup>ZFN: Zona Fronteriza Norte

<sup>2</sup>ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México

<sup>3</sup>ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara

<sup>4</sup>ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey

### **Norma oficial mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003.**

Esta norma establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos **automotores nuevos** cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos. Esta norma aplica tanto a vehículos nuevos fabricados en México, como a los fabricados en otros países que se importen a territorio nacional. [13]

### **Norma oficial mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006.**

Esta norma establece los límite máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas 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 nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3.857 Kg, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3857 Kg equipadas con este tipo de motores. [14]

### **Norma Oficial Mexicana NOM-045-SEMARNAT-2006**

Esta norma aplica a los vehículos en circulación que usan diesel como combustible y establece los límites máximos permisibles de opacidad, procedimiento de prueba y características técnicas del equipo de medición. [15]

### **3.5 Combustibles.**

Las características químicas del diesel así como sus propiedades tienen un efecto directo en las emisiones y en la formación de contaminantes de estos motores.

Un gran número de investigadores están constantemente trabajando en combustibles alternativos, dirigiendo sus actividades a que sean poco contaminantes y eficientes en la combustión. Algunos ejemplos de éstos pueden ser: gas natural, biodiesel, alcoholes, combustibles gas-liquido, entre otros.

Por ejemplo, el gas natural ha sido usado en Argentina, Delhi y otras cuantas ciudades del mundo, de esta manera es posible que se extienda su uso a otros lugares si presenta buenas ventajas, como es el caso, no solo de contaminación sino también de costo. Así como este caso Existe la necesidad de estudiar el posible uso de otros combustibles alternativos a gran escala así como su impacto en la salud y en el medio ambiente. [4]

#### **Biocombustibles.**

Los biocombustibles son sustancias procedentes de materias orgánicas renovables (biomasas) que pueden ser empleadas como combustibles. La biomasa, es toda forma 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, hidrogeno y oxigeno producida en áreas de la superficie terrestre por organismos específicos [24]. Se suele utilizar para hacer referencia al combustible 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 neutro, es decir que la biomasa no afecta la contaminación del ambiente.

En la actualidad los biocombustibles más 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.

- 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.
- 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 esto agravará el problema de la deforestación.
- A bajas temperaturas puede empezar a solidificar y formar cristales, que pueden obstruir los conductos del combustible.
- Por sus propiedades solventes, 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 más 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.

## Biodiesel.

El biodiesel es un éster (similar al vinagre) 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.

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 por 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.

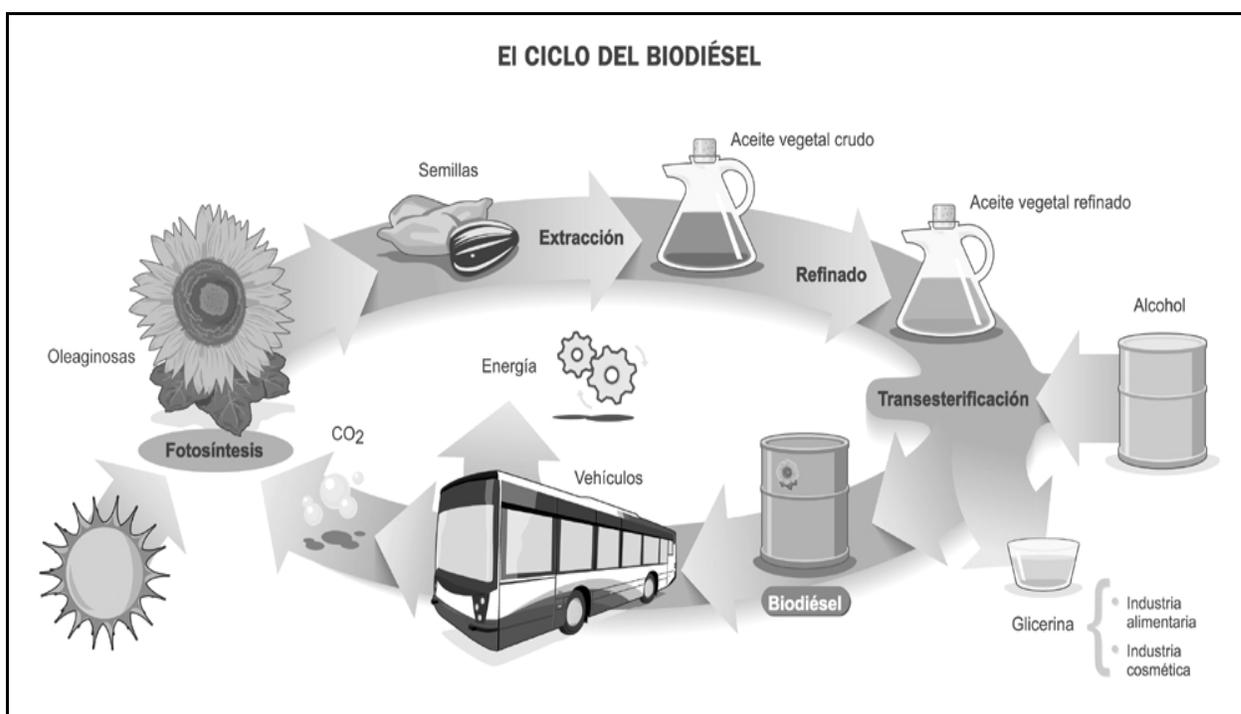


Figura 3.6 Ciclo del biodiesel.

El biodiesel puede mezclarse con diesel procedente 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. [24]

## **Biodiesel de origen animal.**

Además de los aceites vegetales, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca, grasas porcinas y grasas de pollo, pueden utilizarse como materia prima de la transesterificación para obtener biodiesel. Esta alternativa es cada vez más viable debido al bajo costo de este tipo de grasas (en comparación a las grasas vegetales) las cuales eran utilizadas solo 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. Estudios han encontrado 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, en zonas con altas temperaturas donde no llegue a cristalizarse. A partir de los 15 grados comienza a formar sólidos que no permiten su eficaz comportamiento. Pero esto se soluciona agregando un 20% de diesel o trabajando con sistemas de calentamiento. De esta forma mejora el comportamiento en frío y puede ser utilizado a temperaturas más bajas. [24]

## **Capitulo 4.**

### **Ensayos experimentales utilizando Diesel de Ultra Bajo Azufre.**

En este apartado se hace una descripción de los ensayos realizados en el laboratorio, se describirán los procesos realizados así como el equipo utilizado para los ensayos, y mostrando al final del capítulo los resultados junto con su análisis.

#### 4.1 Planeación de los ensayos.

La planeación de las pruebas que se realizaron en el Laboratorio de Control de Emisiones de la Facultad de Ingeniería, tuvo como propósito, como lo menciona el título de la tesis, conocer el efecto del diesel de ultra-bajo azufre (UBA) en las prestaciones del motor y en las emisiones contaminantes producidas. Para ello se escogió la prueba ESC o ciclo 13 modos, correspondiente a la directiva europea 2005/55/CE que se describe a continuación.

##### 4.1.1 Ensayo 13 modos (Prueba ESC).

A lo largo de un ciclo con diferentes condiciones de funcionamiento del motor, 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 par 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.

El ciclo indica 13 modos, a los cuales se llevará el motor en cuanto a régimen y torque, dichos modos se pueden observar en la siguiente tabla.

Modo	Velocidad	Carga, %	Factor de ponderación	
			R49	US
1	Ralentí	-	0.25/3	0.20/3
2	Velocidad de Torque Máximo	10	0.08	0.08
3		25	0.08	0.08
4		50	0.08	0.08
5		75	0.08	0.08
6		100	0.25	0.08
7	Ralentí	-	0.25/3	0.20/3
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 4.1 Prueba ESC o 13 modos.**

Con el fin de obtener la velocidad de torque máximo y la velocidad de potencia máxima que pide la tabla, primero se tuvieron que hacer las curvas de potencia y par.

#### 4.1.2 Curvas de potencia.

Para desarrollar las curvas de potencia se parte de las especificaciones que da el fabricante del motor, en este caso Mercedes Benz, y de ahí se examina si el motor aún es capaz de alcanzar el par y potencia (a las revoluciones respectivas) que cuando nuevo, y como no fue el caso, pues este motor ya tiene varios años de uso, se acelera y se aplica carga a fin de estimar cual es la máxima carga que soporta y a que régimen, y lo mismo con la potencia, de esta manera se estiman las curvas que se mencionan.

Así pues, las pruebas para realizar las curvas de potencia consistieron en acelerar el motor desde 600 RPM hasta 2400 RPM aumentando 200 RPM en cada punto, a la vez que se agregaba carga, hasta el punto en el que ya no aceleraba el motor, esto para garantizar los valores máximos de par y potencia.

**Tabla 4.2 Velocidades teóricas.**

<b>Nt [RPM]</b>	<b>n [RPM]</b>	<b>M [lbf*pie]</b>	<b>Ne[HP]</b>
600			
800			
1000			
1200			
1400			
1600			
1800			
2000			
2200			
2400			

Nt- Velocidad Teórica. [RPM]

n- Velocidad Real. [RPM]

M- Par. [lbf\*pie]

Ne- Potencia [HP]

La tabla anterior se llenaba con las velocidades alcanzadas por el motor, el par suministrado al motor y la potencia desarrollada por el motor. Con estos datos se realizaron las curvas de **n** vs **M** y **n** vs **Ne**, para poder determinar los valores máximos de par y potencia, así como sus velocidades características. Donde **n** es el régimen de giro (RPM).

Para la realización de estas curvas de potencia se utilizó combustible diesel de ultra-bajo azufre UBA, esto se hizo para no contaminar la línea de combustible con diesel convencional, las curvas también se hicieron sin convertidor catalítico en el escape del motor. Se utilizó un motor Mercedes Benz, un dinamómetro Clayton y un banco de ensayos del laboratorio de control de emisiones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Posteriormente se realizó la prueba 13 modos haciendo mediciones continuas en las emisiones del motor con el equipo RAVEM. Se realizaron tres pruebas con diesel convencional (alto azufre 350 ppm) que sirvieron como línea base para poder hacer

comparaciones entre diesel convencional y diesel de ultra-bajo azufre. A su vez se probó la eficiencia de un convertidor catalítico, con el cual se realizaron las mismas pruebas, es decir, 13 modos y curvas de potencia.

#### **4.1.3 Prueba de opacidad.**

Esta prueba consistía en acelerar el motor sin carga desde ralentí hasta el corte de gobernador, se mantenía unos segundos al máximo régimen y cuando el opacímetro lo indicara se desaceleraba hasta que el motor regresara a la velocidad de ralentí. El régimen de aceleración iba de las 600 RPM hasta las 2400 RPM.

#### **4.2 Equipo utilizado.**

El equipo utilizado para este proyecto es propiedad del Laboratorio de Control de Emisiones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a excepción del opacímetro y el RAVEM.

##### **4.2.1 Banco de ensayos.**

Este es un equipo que fue diseñado y fabricado por alumnos de la Facultad de Ingeniería, este dispositivo era donde se trabajaba, aquí se hacían los ajustes de Par (torque) y régimen al motor, así como también se tomaron las lecturas de torque, potencia y las temperaturas. Este dispositivo también permite encender otros dispositivos como la torre de enfriamiento, la bomba de agua que alimenta el dinamómetro, los ventiladores y el extractor de aire dentro de la sala de motores.



**Figura 4.1 Consola de mando del Banco de ensayos.**

La figura 4.2 es una imagen del panel de control, en este se pueden observar los botones con los que se aplicaba el torque al dinamómetro, los botones de encendido de otros dispositivos dentro de la sala de motores como los ventiladores, extractores de aire, bomba de agua para alimentar al dinamómetro y torre de enfriamiento.



Figura 4.2 Panel de control.

#### 4.2.2 Opacímetro.

El opacímetro usado no es propiedad del laboratorio, fue prestado por la empresa FEMSA. Las pruebas de opacidad se hicieron acelerando el motor desde ralentí (600 RPM) hasta el máximo régimen (2400 RPM), el opacímetro marcaba el momento en el que se debía hacer dicha aceleración, así como el tiempo que tenía que durar.



Figura 4.3 Opacímetro.

### 4.2.3 RAVEM.

Este dispositivo fue prestado por el gobierno del distrito federal, la operación la llevó a cabo personal especializado ya que es muy delicado. Este era una pieza fundamental para realizar las pruebas, debido a que era el que se encargaba de hacer las mediciones de los contaminantes. Para su operación se contaba con un software, en el cual se introducían los datos y condiciones de cada prueba. Se debía hacer una calibración del dispositivo para cada ensayo.



Figura 4.4 RAVEM.

### 4.2.4 Torre de enfriamiento.

Esta torre se encargaba de enfriar el agua utilizada en el funcionamiento del dinamómetro, así como el agua empleada en el sistema de enfriamiento del motor. La torre se encuentra en la parte trasera del laboratorio. Con el banco de ensayos se encendía este dispositivo.



Figura 4.5 Torre de enfriamiento.

#### 4.2.5 Consumo de combustible.

Para la alimentación de combustible se tuvo que realizar un arreglo con las tuberías de suministro de combustible del laboratorio y el tanque rojo mostrado en la figura 4.6, la alimentación y el retorno de combustible estaban conectados al tanque. Para calcular el consumo de combustible se pesaba el tanque antes y después de cada prueba, la diferencia de pesos era el consumo de combustible de la prueba. Al iniciar una prueba se activaban unas válvulas que permitían el uso del combustible contenido en el tanque, cabe señalar que las válvulas y el RAVEM tenían que activarse al mismo tiempo.



**Figura 4.6 Tanque de combustible**

#### 4.2.6 Motor diesel.

Para todas las pruebas se utilizó un motor diesel con las siguientes características:

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

Al motor se le tuvieron que hacer varias adecuaciones, como la tubería de escape, el sistema de enfriamiento estaba conectado a la torre de enfriamiento para evitar un sobrecalentamiento del motor.



**Figura 4.7 Motor Diesel.**

#### 4.2.7 Dinamómetro.

Las especificaciones del dinamómetro marca Clayton eran las siguientes:

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

Con este dispositivo se suministraba la carga (Par) al motor, era necesario mantener una bomba de agua encendida para su funcionamiento ya que es un dinamómetro hidráulico, la descarga de agua estaba conectada a la torre de enfriamiento. El control del dinamómetro se hacía desde el banco de ensayos.



**Figura 4.8 Dinamómetro.**

La figura 4.9 muestra la instalación del equipo.



**Figura 4.9 Instalación del equipo.**

### 4.3 Datos experimentales.

Debido a la gran cantidad de datos arrojados por los instrumentos de trabajo se decidió incluir sólo los datos de más relevancia, como son los promedios de los ensayos 13 modos, las curvas de potencia y la opacidad para cada combustible.

#### 4.3.1 Curvas de par y potencia.

Dichas curvas son una gráfica del par y de la potencia que entrega el motor en toda su régimen de revoluciones, en este caso se utilizarán para determinar el desempeño del motor con los diferentes combustibles utilizados.

Para el diesel de 350 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

$n_p$ [RPM]	$n$ [RPM]	$M$ [lbf*pie]	$Ne$ [HP]
600	610.000	169.933	20.000
800	801.333	183.667	28.133
1000	1001.667	243.267	46.633
1200	1205.667	310.600	71.700
1400	1403.333	415.300	111.567
1600	1606.000	415.933	127.833
1800	1803.667	415.033	143.367
2000	2004.667	396.367	151.867
2200	2197.000	378.200	158.900
2400	2398.333	353.067	161.767

Tabla 4.3 Lecturas de par y potencia diesel 350 ppm sin DOC.

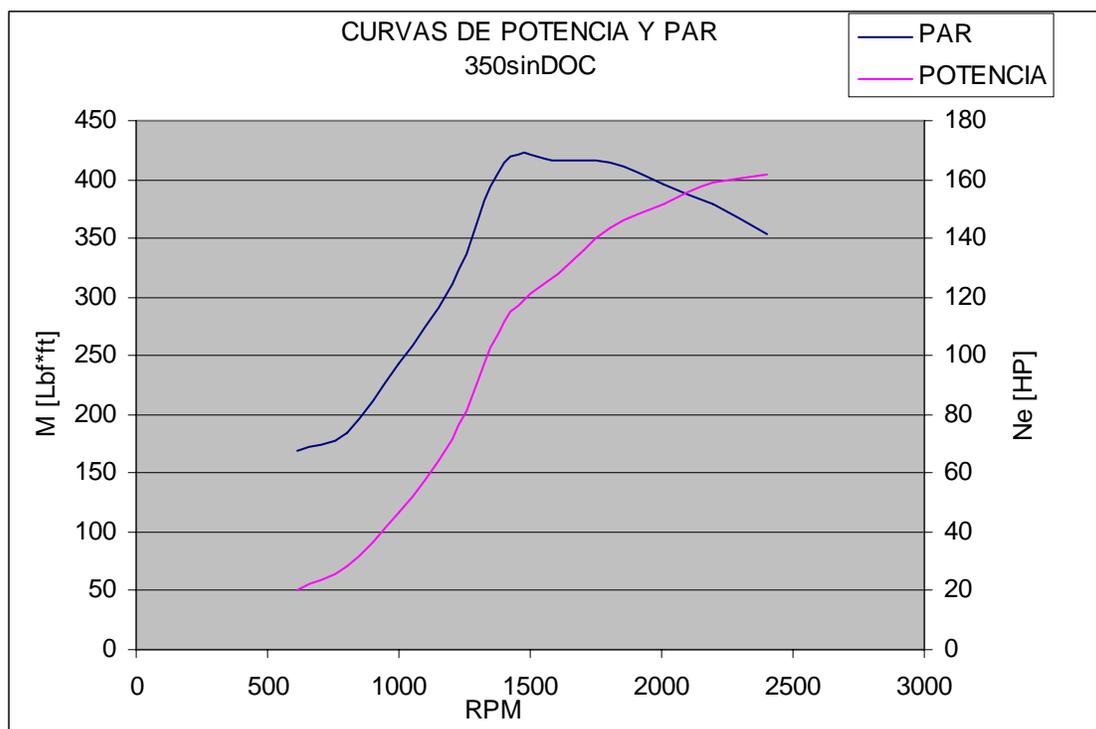
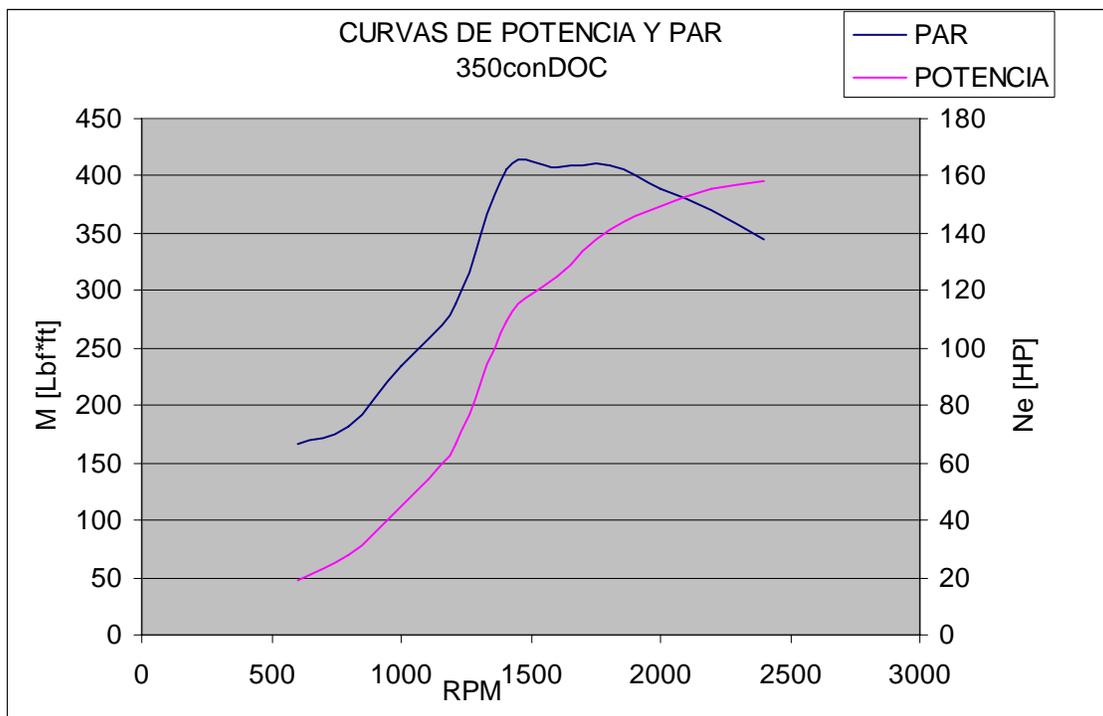


Figura 4.10 Curvas de par y potencia diesel 350 ppm sin DOC.

Para el diesel de 350 ppm de azufre con convertidor catalítico:

$n_p$ [RPM]	$n$ [RPM]	$M$ [lbf*pie]	$Ne$ [HP]
600	604.667	165.600	19.233
800	797.667	181.433	27.800
1000	998.667	233.933	44.767
1200	1208.000	288.133	66.600
1400	1405.667	406.600	109.433
1600	1600.333	407.633	124.833
1800	1805.333	408.533	141.067
2000	2003.333	389.100	149.133
2200	2198.000	370.633	155.600
2400	2398.333	345.267	158.400

**Tabla 4.4** Lecturas de par y potencia diesel 350 ppm con DOC.

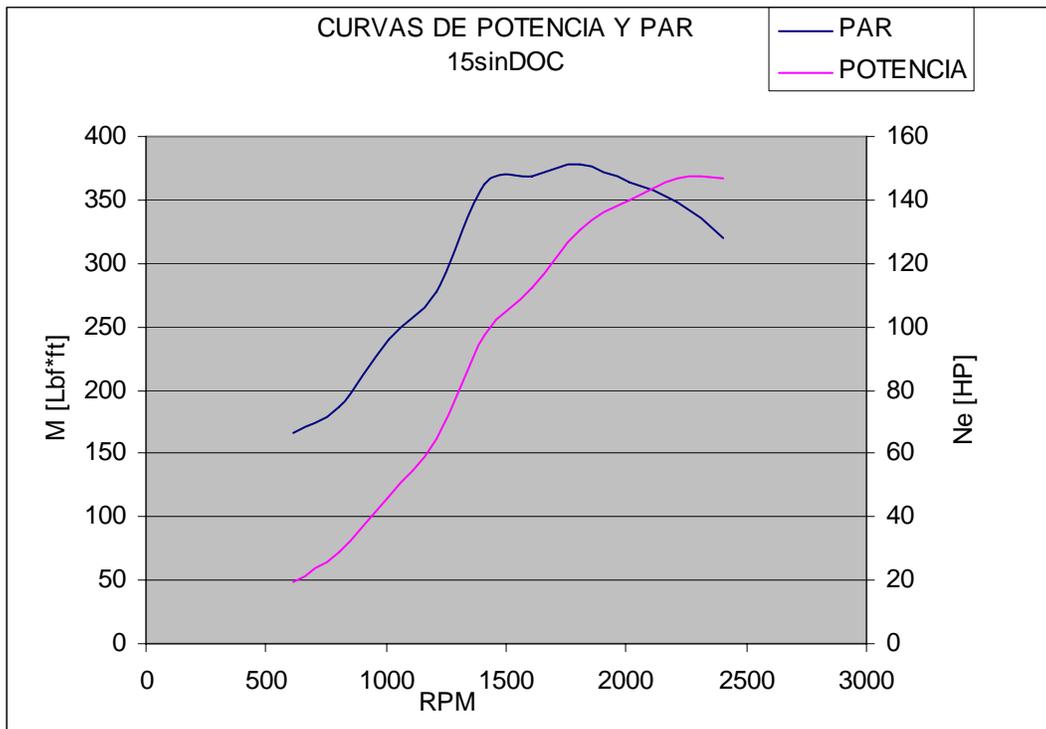


**Figura 4.11** Curvas de par y potencia diesel 350 ppm con DOC.

Para el diesel de 15 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

$n_p$ [RPM]	$n$ [RPM]	$M$ [lbf*pie]	$Ne$ [HP]
600	610.333	166.233	19.433
800	804.667	186.867	29.067
1000	1007.000	240.267	46.500
1200	1212.000	276.967	64.467
1400	1405.333	362.633	97.433
1600	1605.667	368.367	112.567
1800	1807.333	378.333	130.500
2000	2013.667	364.100	139.800
2200	2209.333	348.000	146.900
2400	2405.333	320.633	146.733

**Tabla 4.5** Lecturas de par y potencia diesel 15 ppm con DOC.



**Figura 4.12** Curvas de par y potencia diesel 15 ppm sin DOC.

Para el diesel de 15 ppm de azufre con convertidor catalítico:

$n_p$ [RPM]	$n$ [RPM]	$M$ [lbf*pie]	$Ne$ [HP]
600	605.333	168.633	19.600
800	805.667	180.800	27.833
1000	1001.333	230.267	44.067
1200	1209.000	280.867	64.633
1400	1402.667	391.433	104.733
1600	1598.667	394.500	120.333
1800	1802.000	395.200	135.900
2000	2000.000	377.200	143.833
2200	2202.333	361.800	151.033
2400	2415.000	328.533	150.833

Tabla 4.6 Lecturas de par y potencia diesel 15 ppm con DOC.

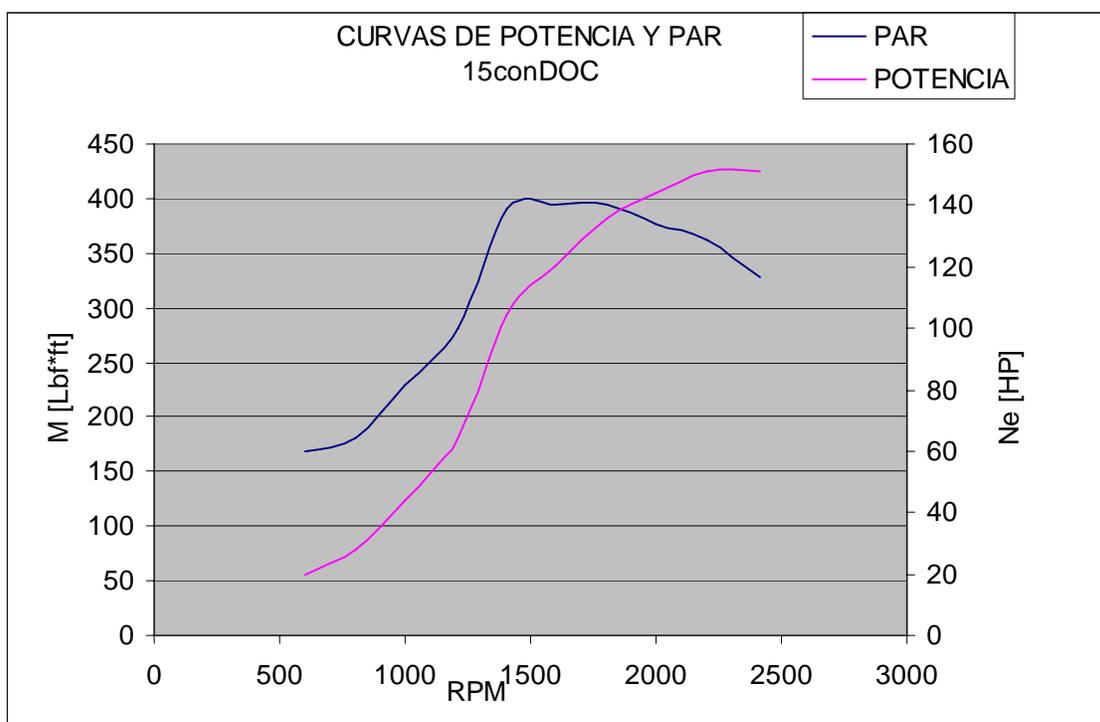


Figura 4.13 Curvas de par y potencia diesel 15 ppm con DOC.

### 4.3.2 Ensayo 13 modos.

Los datos arrojados por el RAVEM para estos ensayos son muy extensos por lo que se muestran sólo los datos que se obtuvieron en el banco de ensayos, en el análisis de resultados se mostrará un resumen de los datos arrojados por el RAVEM. La tabla 4.3.2.1 muestra las diferentes fases que se llevaron a cabo en el ciclo 13 modos, la tabla fue desarrollada con los datos de la curva de potencia del diesel de 15 ppm sin convertidor catalítico.

Modo	Velocidad Teórica	Carga
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 4.7 Ciclo 13 modos construido.**

Para el diesel de 350 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

Ensayo 1

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	37	78	80	600	574	0	0.4	0.1
2	2	38	151	161	1800	1791	37.8	38	13.1
3	2	37	203	215	1800	1782	94.5	44.7	32.2
4	2	36	279	290	1800	1806	189.1	191.7	66
5	2	39	365	375	1800	1818	283.7	284.2	98.5
6	2	42	434	438	1800	1802	378.3	378.3	130.2
7	4	44	279	297	600	567	0	1.9	0.3
8	2	50	413	416	2200	2155	378.3	372.5	153.1
9	2	51	426	428	2200	2173	283.7	280.5	116.1
10	2	49	392	393	2200	2211	189.1	187.7	79
11	2	50	332	341	2200	2164	94.5	94.2	38.8
12	2	53	275	283	2200	2158	37.8	37	15.3
13	3	56	176	182	600	591	0	1	0.2

**Tabla 4.8 Datos 13 modos diesel 350 ppm sin DOC ensayo 1.**

T<sub>ac</sub>: Temperatura del motor

T<sub>1c</sub>: Temperatura antes del catalizador

T<sub>2c</sub>: Temperatura después del catalizador

n<sub>p</sub>: Régimen propuesto

M<sub>p</sub>: Par propuesto

Ensayo 2

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	35	76	78	600	571	0	0.6	0.2
2	2	36	159	166	1800	1813	37.8	38.2	13.3
3	2	32	207	218	1800	1840	94.5	95	33.3
4	2	36	288	301	1800	1817	189.1	189.5	65.6
5	2	36	360	367	1800	1845	283.7	282	99.3
6	2	40	427	432	1800	1812	378.3	379.1	130.8
7	4	43	285	297	600	571	0	1	0.2
8	2	49	405	410	2200	2158	378.3	370.1	152.2
9	2	50	440	442	2200	2205	283.7	287	120
10	2	51	412	418	2200	2152	189.1	187	77
11	2	51	343	352	2200	2203	94.5	93.6	39.3
12	2	52	273	282	2200	2171	37.8	37.5	156
13	3	54	194	199	600	561	0	0.7	0.2

Tabla 4.9 Datos 13 modos diesel 350 ppm sin DOC ensayo 2.

Ensayo 3

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	44	78	79	600	561	0	0.7	0.2
2	2	40	156	165	1800	1771	37.8	37.6	12.8
3	2	40	200	209	1800	1799	94.5	94.6	32.4
4	2	38	284	297	1800	1810	189.1	189.4	65.3
5	2	38	360	369	1800	1845	283.7	283.7	99.7
6	2	39	428	431	1800	1820	378.3	378.9	131.4
7	4	46	295	306	600	600	0	0.4	0.1
8	2	50	425	428	2200	2155	378.3	370.1	152.3
9	2	50	428	430	2200	2189	283.7	284.8	118.7
10	2	49	398	403	2200	2178	189.1	188.9	78.5
11	2	51	341	348	2200	2183	94.5	93.9	39.1
12	2	55	284	292	2200	2173	37.8	37.3	15.5
13	3	56	210	218	600	573	0	1.2	0.2

Tabla 4.10 Datos 13 modos diesel 350 ppm sin DOC ensayo 3.

Para el diesel de 350 ppm de azufre con convertidor catalítico:

Ensayo 1

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	30.61	77.1	79.47	600	614	0	1.6	0.3
2	2	33.14	155.99	169.47	1800	1851	37.8	38.2	13.6
3	2	32.56	201.4	209.3	1800	1815	94.5	95.5	33.1
4	2	33.43	283.8	300.9	1800	1785	189.1	194.4	66
5	2	35.1	353.7	371.5	1800	1797	283.7	283.7	97.4
6	2	37.36	427.2	442.1	1800	1829	378.3	377.9	131.9
7	4	44.17	294.1	324.1	600	561	0	0.8	0.2
8	2	51.01	426.7	437.2	2200	2180	378.3	370	153.9
9	2	50.34	436.5	444.5	2200	2197	283.7	283.7	118.9
10	2	52.6	399.1	408.3	2200	2216	189.1	1882	79.6
11	2	54.91	343.3	356.2	2200	2170	94.5	94.5	39.2
12	2	55.42	275.9	292.4	2200	2191	37.8	37.6	15.8
13	3	57.21	200.15	218.54	600	601	0	3	1.4

Tabla 4.11 Datos 13 modos diesel 350 ppm con DOC ensayo 1.

Ensayo 2

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	36.7	79.6	81.1	600	626	0	1.1	0.2
2	2	34.6	138.7	143.7	1800	1781	37.8	37.6	12.8
3	2	35.5	212.7	225.4	1800	1792	94.5	95	32.6
4	2	36.2	283.6	297.2	1800	1829	189.1	190.9	66.5
5	2	39.3	386.3	400.5	1800	1832	283.7	284.1	99.3
6	2	40	440.4	451.1	1800	1808	378.3	379.6	130.9
7	4	47.5	268.8	296.5	600	594	0	1.2	0.2
8	2	51.3	439.1	446.9	2200	2157	378.3	371.2	152.8
9	2	51.3	441.9	449	2200	2194	283.7	285.3	119.3
10	2	55.8	405.6	414.9	2200	2183	189.1	188.6	78.5
11	2	56.5	335.1	348.2	2200	2174	94.5	93.6	38.8
12	2	57.3	270.4	284.6	2200	2169	37.8	38	15.8
13	3	59.5	195.3	212.9	600	613	0	1.7	0.3

Tabla 4.12 Datos 13 modos diesel 350 ppm con DOC ensayo 2.

Ensayo 3

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	80.8	83.7	600	626	0	1.7	0.3	0.3
2	2	153.5	164.1	1800	1797	37.8	37.8	13	13
3	2	216.5	228.6	1800	1830	94.5	93.5	32.7	32.7
4	2	290.3	308.3	1800	1846	189.1	188.1	66.1	66.1
5	2	370.8	385.12	1800	1819	283.7	282.4	98	98
6	2	440.6	449.1	1800	1830	378.3	378.9	132.9	132.9
7	4	276.3	307.4	600	596	0	0.6	0.1	0.1
8	2	435.7	445.6	2200	2150	378.3	364.8	149.8	149.8
9	2	444.2	449.9	2200	2191	283.7	282.3	118	118
10	2	400.8	410.7	2200	2161	189.1	190	78.4	78.4
11	2	337.3	348.7	2200	2184	94.5	94.1	39.3	39.3
12	2	273.9	289.6	2200	2196	37.8	37.3	15.7	15.7
13	3	186.1	202.4	600	631	0	0.7	0.2	0.2

**Tabla 4.13 Datos 13 modos diesel 350 ppm con DOC ensayo 3.**

Para el diesel de 15 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

Ensayo 1

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	32	74	76	600	571	0	2.5	0.4
2	2	33	146	154	1800	1807	37.8	38.4	12.3
3	2	31	199	210	1800	1811	94.5	93	32.1
4	2	31	276	289	1800	1759	189.1	191.7	64.2
5	2	32	362	372	1800	1835	283.7	286.7	100.3
6	2	36	421	425	1800	1776	378.3	382.8	129.7
7	4	38	301	318	600	575	0	0.8	0.2
8	2	41	398	400	2200	2156	378.3	373.3	153.1
9	2	46	417	419	2200	2217	283.7	282.8	114.3
10	2	44	389	393	2200	2180	189.1	189.1	78.4
11	2	49	335	343	2200	2161	94.5	92.2	38.1
12	2	47	264	267	2200	2177	37.8	38.2	15.9
13	3	46	199	207	600	576	0	1.5	0.3

**Tabla 4.14 Datos 13 modos diesel 15 ppm sin DOC ensayo 1.**

Ensayo 2

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	38	86	81	600	582	0	1.3	0.2
2	2	38	148	156	1800	1811	37.8	38.2	13.3
3	2	35	206	217	1800	1842	94.5	94.9	33.3
4	2	37	284	297	1800	1815	189.1	191.1	66.2
5	2	38	360	370	1800	1809	283.7	283	97.6
6	2	39	425	429	1800	1830	378.3	380	132.6
7	4	43	280	290	600	575	0	0.3	0.2
8	2	47	428	427	2200	2141	378.3	371	151
9	2	47	398	406	2200	2163	283.7	276	113
10	2	47	395	396	2200	2169	189.1	191	79
11	2	50	321	329	2200	2174	94.5	94	39.3
12	2	50	265	272	2200	2189	37.8	37.1	15.6
13	3	50	186	196	600	603	0	1.2	0.3

**Tabla 4.15 Datos 13 modos diesel 15 ppm sin DOC ensayo 2.**

Ensayo 3

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	42	77	78	600	591	0	0.7	0.2
2	2	39	146	152	1800	1800	37.8	37.8	13.1
3	2	38	196	207	1800	1831	94.5	95.3	33.4
4	2	38	276	290	1800	1790	189.1	190.9	65
5	2	38	360	370	1800	1821	283.7	284.6	98.7
6	2	40	429	436	1800	1815	378.3	378.6	130.9
7	4	47	287	296	600	603	0	0.5	0.2
8	2	48	418	419	2200	2183	378.3	366	152.3
9	2	49	428	431	2200	2168	283.7	280.7	115.8
10	2	48	392	397	2200	2169	189.1	188.6	77.8
11	2	50	334	341	2200	2190	94.5	94	39.2
12	2	53	267	273	2200	2179	37.8	37.5	15.6
13	3	52	187	198	600	578	0	1.2	0.3

**Tabla 4.16 Datos 13 modos diesel 15 ppm sin DOC ensayo 3.**

Para el diesel de 15 ppm de azufre con convertidor catalítico:

Ensayo 1

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	39	84	85	600	676	0	0.8	0.2
2	2	39.5	148.3	161.1	1800	1821	37.8	37.7	13.2
3	2	39.4	205.8	217.2	1800	1824	94.5	95.4	33.2
4	2	38.7	288.1	310.2	1800	1819	189.1	189.4	65.6
5	2	40.3	367.3	380.8	1800	1795	283.7	281.9	96.4
6	2	41.1	443.5	452	1800	1821	378.3	380.1	132
7	4	47.9	614.6	235.1	600	595	0	1.9	0.3
8	2	97.9	437.9	443.8	2200	2165	378.3	372.1	153.6
9	2	51	432.5	440.2	2200	2179	283.7	286	119.1
10	2	50.3	392.5	401.1	2200	2207	189.1	187.7	78.9
11	2	51.8	329.8	341.2	2200	2205	94.5	94.5	39.8
12	2	52.6	266.3	379.4	2200	2198	37.8	37.8	15.9
13	3	53.4	181.6	198.6	600	617	0	1.9	0.3

Tabla 4.17 Datos 13 modos diesel 15 ppm con DOC ensayo 1.

Ensayo 2

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	41.1	72.9	75.1	600	562	0	0.8	0.2
2	2	38.9	150	160.7	1800	1819	37.8	37.3	13
3	2	39.7	202.6	213.9	1800	1828	94.5	94.5	32.9
4	2	38.8	276.3	282.9	1800	1800	189.1	189.1	64.8
5	2	39.1	367.6	380.4	1800	1833	283.7	283.5	99
6	2	42.1	436	443.8	1800	1807	378.3	378.9	130.5
7	4	51.8	182.5	195.7	600	601	0	0.3	0.1
8	2	51.2	445.3	453	2200	2112	378.3	371	149.4
9	2	51.9	437.5	446.1	2200	2237	283.7	280.4	119.4
10	2	52.7	400.5	408.4	2200	2167	189.1	188.2	77.7
11	2	50.5	335.6	349.2	2200	2189	94.5	94.3	39.4
12	2	54.2	271.6	285.7	2200	2189	37.8	37.4	15.9
13	3	55.7	182.4	197.3	600	629	0	1.5	0.3

Tabla 4.18 Datos 13 modos diesel 15 ppm con DOC ensayo 2.

Ensayo 3

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	38	80	83	600	619	0	1.2	0.3
2	2	36.6	154.3	165.7	1800	1820	37.8	37.6	13.1
3	2	34.4	211	221	1800	1842	94.5	94.5	33.2
4	2	32.9	291.4	309.7	1800	1837	189.1	188.7	66
5	2	38.2	375.3	388.1	1800	1834	283.7	282.1	98.6
6	2	39.7	438	447.9	1800	1833	378.3	378.5	132.3
7	4	44.9	275.6	301	600	573	0	0.9	0.2
8	2	49.5	433.7	441.6	2200	2157	378.3	367.9	151.1
9	2	49.5	439.5	447.3	2200	2206	283.7	284.3	99.7
10	2	50.3	397.5	407.5	2200	2170	189.1	189.8	78.5
11	2	54	338.3	352.6	2200	2178	94.5	95	39.5
12	2	55.6	275.3	286.4	2200	2193	37.8	38.6	16.2
13	3	50.3	177.3	193.6	600	590	0	0.9	0.2

**Tabla 4.19 Datos 13 modos diesel 15 ppm con DOC ensayo 3.**

**4.3.3 Opacidad**

Para el diesel de 350 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

OPACIDAD SIN DOC [m <sup>-1</sup> ]
0.840
0.810
0.930

**Tabla 4.20 Opacidad diesel 350 ppm sin DOC.**

Para el diesel de 350 ppm de azufre con convertidor catalítico:

OPACIDAD CON DOC [m <sup>-1</sup> ]
0.750
0.490
0.700

**Tabla 4.21 Opacidad diesel 350 ppm con DOC.**

Para el diesel de 15 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

OPACIDAD SIN DOC [m <sup>-1</sup> ]
0.970
0.810
0.840

**Tabla 4.22 Opacidad diesel 15 ppm sin DOC.**

Para el diesel de 15 ppm de azufre con convertidor catalítico:

OPACIDAD CON DOC [ $m^{-1}$ ]
0.700
0.690
0.790

**Tabla 4.23 Opacidad diesel 15 ppm con DOC.**

#### 4.4 Análisis de resultados.

El tratamiento estadístico de los datos se realizó mediante la paquetería Excel, para hacer la evaluación de las emisiones se tomaron los últimos 60 segundos de cada modo y se obtuvo un promedio para cada modo, después se hizo la ponderación que señala el procedimiento de la prueba 13 modos, es decir, sólo se multiplicó el valor promedio obtenido anteriormente por un factor de ponderación. Debido a que son demasiados datos los que se analizaron, sólo se mostrarán los resultados obtenidos.

De los datos arrojados por el banco de ensayos, se obtuvo un promedio de los 3 ensayos.

A continuación se muestran todas las tablas obtenidas después del análisis hecho.

Para el diesel 350 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

Modo	CO g/min	NOx g/min	CO2 g/min
1	0.041	0.099	4.323
2	0.154	0.234	20.103
3	0.087	0.372	28.117
4	0.093	0.603	49.610
5	0.123	0.751	69.563
6	0.555	2.906	290.107
7	0.015	0.080	3.421
8	0.289	1.077	155.852
9	0.026	0.195	22.883
10	0.020	0.143	15.625
11	0.018	0.087	9.112
12	0.028	0.052	5.999
13	0.024	0.075	3.310
<b>SUMA</b>	<b>1.474</b>	<b>6.674</b>	<b>678.026</b>
PM g	CONSUMO DE COMBUSTIBLE Kg	Opacidad [m <sup>-1</sup> ]	
3.519	4.637	0.86	

**Tabla 4.24 Promedio de emisiones, consumo de combustible, opacidad y partículas (PM) diesel 350 ppm sin DOC.**

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	38.667	77.333	79.000	600	568.667	0.0	0.567	0.167
2	2	38.000	155.333	164.000	1800	1791.667	37.8	37.933	13.067
3	2	36.333	203.333	214.000	1800	1807.000	94.5	78.100	32.633
4	2	36.667	283.667	296.000	1800	1811.000	189.1	190.200	65.633
5	2	37.667	361.667	370.333	1800	1836.000	283.7	283.300	99.167
6	2	40.333	429.667	433.667	1800	1811.333	378.3	378.767	130.800
7	4	44.333	286.333	300.000	600	579.333	0.0	1.100	0.200
8	2	49.667	414.333	418.000	2200	2156.000	378.3	370.900	152.533
9	2	50.333	431.333	433.333	2200	2189.000	283.7	284.100	118.267
10	2	49.667	400.667	404.667	2200	2180.333	189.1	187.867	78.167
11	2	50.667	338.667	347.000	2200	2183.333	94.5	93.900	39.067
12	2	53.333	277.333	285.667	2200	2167.333	37.8	37.267	62.267
13	3	55.333	193.333	199.667	600	575.000	0.0	0.967	0.200

**Tabla 4.25 Promedio datos 13 modos diesel 350 ppm sin DOC.**

Para el diesel 350 ppm de azufre con convertidor catalítico:

Modo	CO g/min	NOx g/min	CO2 g/min
1	0.042	0.102	4.512
2	0.177	0.250	21.910
3	0.104	0.398	32.740
4	0.079	0.604	50.598
5	0.048	0.763	74.537
6	0.173	2.992	312.789
7	0.001	0.082	3.321
8	0.155	1.068	163.585
9	0.009	0.187	24.231
10	0.008	0.141	16.234
11	0.007	0.085	9.464
12	0.022	0.052	6.184
13	0.019	0.076	3.574
<b>SUMA</b>	<b>0.846</b>	<b>6.799</b>	<b>723.679</b>
<b>PM g</b>	<b>CONSUMO DE COMBUSTIBLE Kg</b>	<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	
3.623	4.755	0.647	

**Tabla 4.26 Promedio de emisiones, consumo de combustible, opacidad y partículas (PM) diesel 350 ppm con DOC.**

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	37.837	79.167	81.423	600	622.000	0.000	1.467	0.267
2	2	36.013	149.397	159.090	1800	1809.667	37.800	37.867	13.133
3	2	36.087	210.200	221.100	1800	1812.333	94.500	94.667	32.800
4	2	36.377	285.900	302.133	1800	1820.000	189.100	191.133	66.200
5	2	38.487	370.267	385.707	1800	1816.000	283.700	283.400	98.233
6	2	40.187	436.067	447.433	1800	1822.333	378.300	378.800	131.900
7	4	47.190	279.733	309.333	600	583.667	0.000	0.867	0.167
8	2	51.737	414.541	443.233	2200	2162.333	378.300	368.667	152.167
9	2	51.513	440.867	447.800	2200	2194.000	283.700	283.767	118.733
10	2	54.533	401.833	411.300	2200	2186.667	189.100	753.533	78.833
11	2	55.270	338.567	351.033	2200	2176.000	94.500	94.067	39.100
12	2	56.440	273.400	288.867	2200	2185.333	37.800	37.633	15.767
13	3	58.270	193.850	211.280	600	615.000	0.000	1.800	0.633

**Tabla 4.27 Promedio datos 13 modos diesel 350 ppm con DOC.**

Para el diesel 15 ppm de azufre sin convertidor catalítico:

Modo	CO g/min	NOx g/min	CO2 g/min
1	0.012	0.094	3.121
2	0.164	0.219	19.645
3	0.074	0.356	28.779
4	0.110	0.592	47.176
5	0.168	0.730	73.690
6	1.060	2.824	311.334
7	0.029	0.091	3.904
8	0.408	0.988	158.721
9	0.036	0.182	24.443
10	0.025	0.142	16.246
11	0.026	0.087	9.701
12	0.036	0.052	6.309
13	0.030	0.077	3.664
<b>SUMA</b>	<b>2.180</b>	<b>6.433</b>	<b>706.735</b>
<b>PM g</b>	<b>CONSUMO DE COMBUSTIBLE Kg</b>	<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	
4.896	4.670	0.873	

**Tabla 4.28 Promedio de emisiones, consumo de combustible, opacidad y partículas (PM) diesel 15 ppm sin DOC.**

modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	37.333	79.000	78.333	600	581.333	0.000	1.500	0.267
2	2	36.667	146.667	154.000	1800	1806.000	37.800	38.133	12.900
3	2	34.667	200.333	211.333	1800	1828.000	94.500	94.400	32.933
4	2	35.333	278.667	292.000	1800	1788.000	189.100	191.233	65.133
5	2	36.000	360.667	370.667	1800	1821.667	283.700	284.767	98.867
6	2	38.333	425.000	430.000	1800	1807.000	378.300	380.467	131.067
7	4	42.667	289.333	301.333	600	584.333	0.000	0.533	0.200
8	2	45.333	414.667	415.333	2200	2160.000	378.300	370.100	152.133
9	2	47.333	414.333	418.667	2200	2182.667	283.700	279.833	114.367
10	2	46.333	392.000	395.333	2200	2172.667	189.100	189.567	78.400
11	2	49.667	330.000	337.667	2200	2175.000	94.500	93.400	38.867
12	2	50.000	265.333	270.667	2200	2181.667	37.800	37.600	15.700
13	3	49.333	190.667	200.333	600	585.667	0.000	1.300	0.300

**Tabla 4.29 Promedio datos 13 modos diesel 15 ppm sin DOC.**

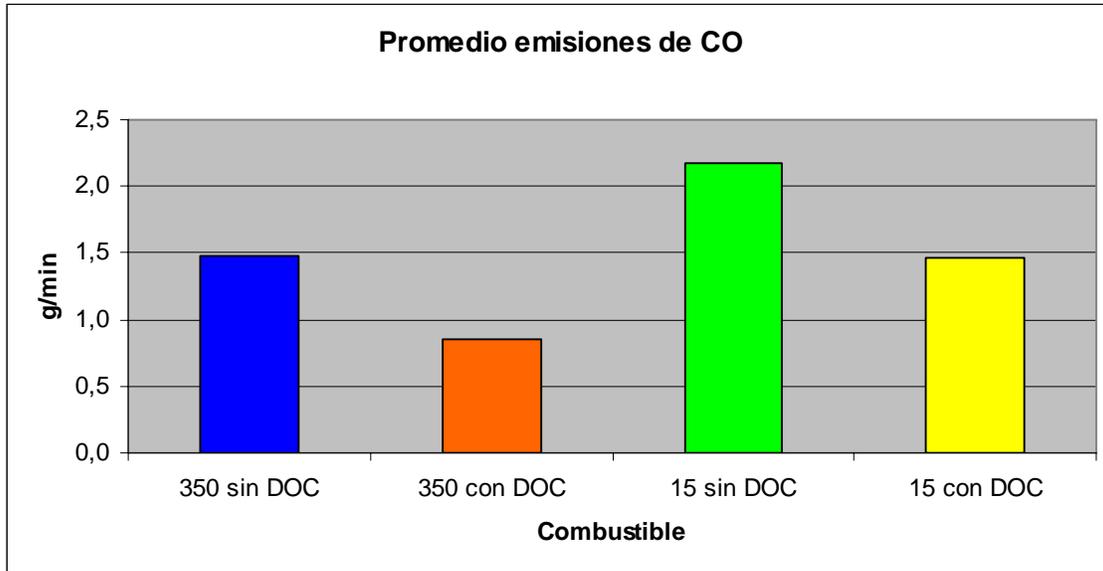
Para el diesel 15 ppm de azufre con convertidor catalítico:

Modo	CO g/min	NOx g/min	CO2 g/min
1	0.094	0.091	4.782
2	0.199	0.241	21.258
3	0.058	0.369	29.125
4	0.065	0.601	49.705
5	0.084	0.736	72.138
6	0.320	2.858	309.820
7	0.059	0.079	4.251
8	0.239	1.027	158.477
9	0.034	0.189	24.777
10	0.044	0.143	17.409
11	0.053	0.088	10.716
12	0.048	0.053	6.996
13	0.167	0.078	5.876
<b>SUMA</b>	<b>1.464</b>	<b>6.553</b>	<b>715.330</b>
<b>PM g</b>	<b>CONSUMO DE COMBUSTIBLE Kg</b>	<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	
4.119	4.635	0.727	

**Tabla 4.30 Promedio de emisiones, consumo de combustible, opacidad y partículas (PM) diesel 15 ppm con DOC.**

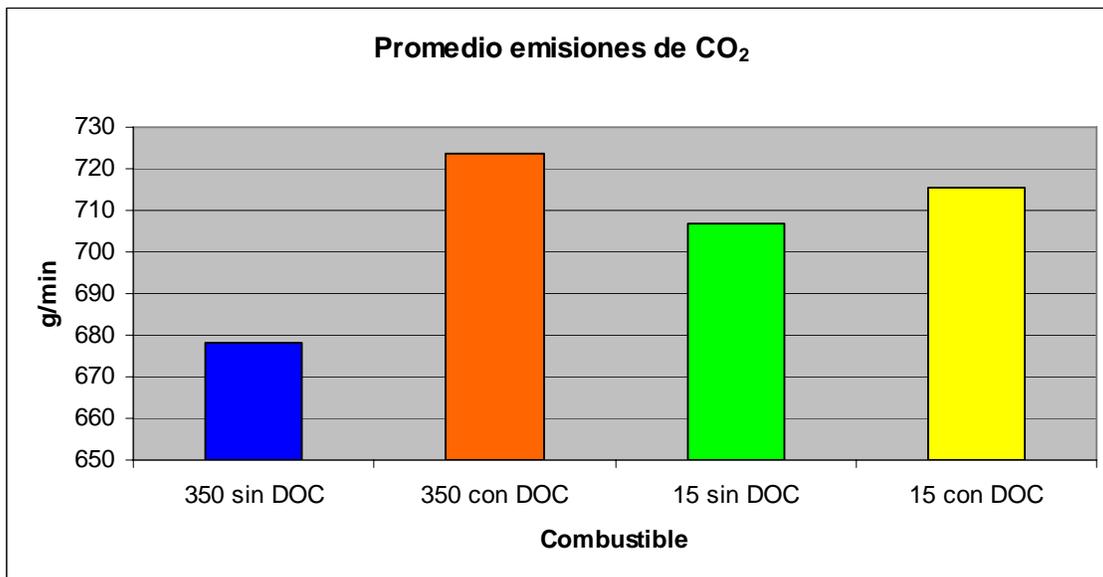
modo	t[ <b>min</b> ] por modo	T <sub>ac</sub> [°C]	T <sub>1c</sub> [°C]	T <sub>2c</sub> [°C]	n <sub>p</sub> [RPM]	n [RPM]	M <sub>p</sub> [lbf*pie]	M [lbf pie]	N <sub>e</sub> [HP]
1	3	39.367	78.967	81.033	600	619	0	0.933	0.233
2	2	38.333	150.867	162.500	1800	1820	37.8	37.533	13.100
3	2	37.833	206.467	217.367	1800	1831.333	94.5	94.800	33.100
4	2	36.800	285.267	300.933	1800	1818.667	189.1	189.067	65.467
5	2	39.200	370.067	383.100	1800	1820.667	283.7	282.500	98.000
6	2	40.967	439.167	447.900	1800	1820.333	378.3	379.167	131.600
7	4	48.200	357.567	243.933	600	589.667	0	1.033	0.200
8	2	66.200	438.967	446.133	2200	2144.667	378.3	370.333	151.367
9	2	50.800	436.500	444.533	2200	2207.333	283.7	283.567	112.733
10	2	51.100	396.833	405.667	2200	2181.333	189.1	188.567	78.367
11	2	52.100	334.567	347.667	2200	2190.667	94.5	94.600	39.567
12	2	54.133	271.067	317.167	2200	2193.333	37.8	37.933	16.000
13	3	53.133	180.433	196.500	600	612	0	1.433	0.267

**Tabla 4.31 Promedio datos 13 modos diesel 15 ppm con DOC.**



**Figura 4.14 Promedio emisiones CO.**

El CO es un gas que indica una combustión incompleta, la figura 4.14 muestra que el convertidor catalítico funciona, debido a que los niveles de CO se reducen en ambos combustibles. También se puede notar que las emisiones de CO son mucho mayores con el diesel de ultra-bajo azufre, se puede notar que la reducción de este contaminante para el diesel de 15 ppm con DOC es casi equivalente a las emisiones con diesel convencional sin DOC. Por lo tanto no se presenta algún beneficio usando el diesel de bajo azufre, en cuanto a la reducción de emisiones de CO.



**Figura 4.15 Promedio emisiones CO<sub>2</sub>.**

El CO<sub>2</sub> es un gas producto de una combustión completa, en la figura 4.15 se puede observar que se tiene una mejor combustión con el diesel de 15 ppm en comparación con el diesel de 350 ppm, ambos sin la presencia de convertidor catalítico, el aumento de los niveles de CO<sub>2</sub> para cada combustible con la presencia del convertidor catalítico se debe a que el

funcionamiento de dicho dispositivo es el correcto, ya que se está oxidando el CO y los HC que escaparon al proceso de combustión.

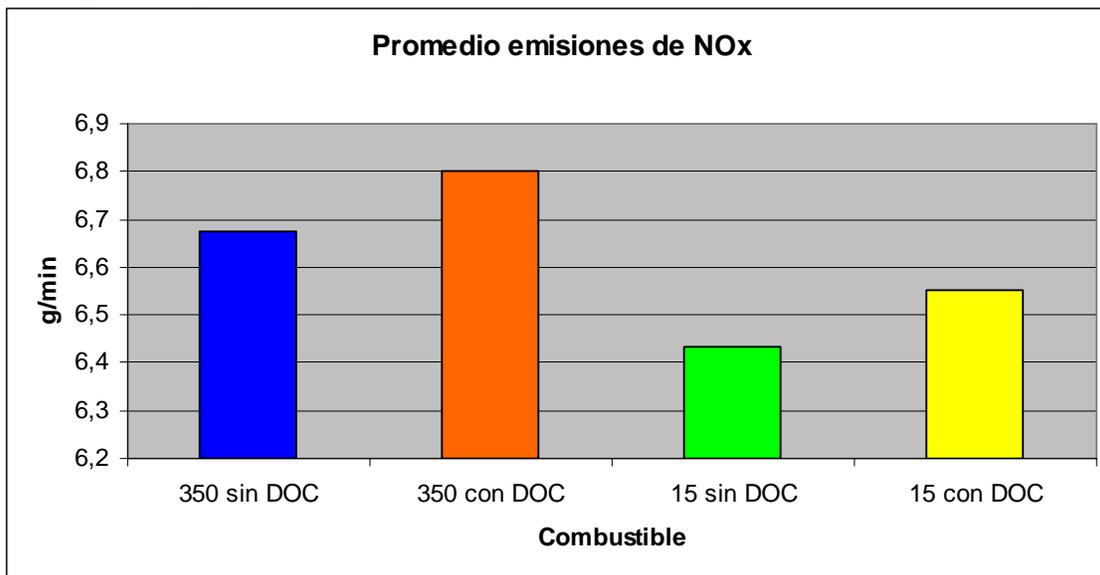


Figura 4.16 Promedio emisiones NOx.

En ambos combustibles se nota un aumento en la emisión de NO<sub>x</sub> cuando se coloca el convertido catalítico, cuestión que hace suponer que durante las reacciones que ocurren en el catalizador se eleva la temperatura y esto ocasiona formación de NO<sub>x</sub>, sin embargo es notable una menor cantidad de NO<sub>x</sub> con el diesel de ultra-bajo azufre con y sin convertidor, lo cual es de gran beneficio ya que los contaminantes que más se tratan de reducir con este tipo de combustible son los NO<sub>x</sub>, además de que este gas es un precursor del ozono y consecuentemente del smog fotoquímico. El peor caso es el del diesel de 350 ppm con convertidor. El diesel UBA presenta una gran ventaja en este ámbito.

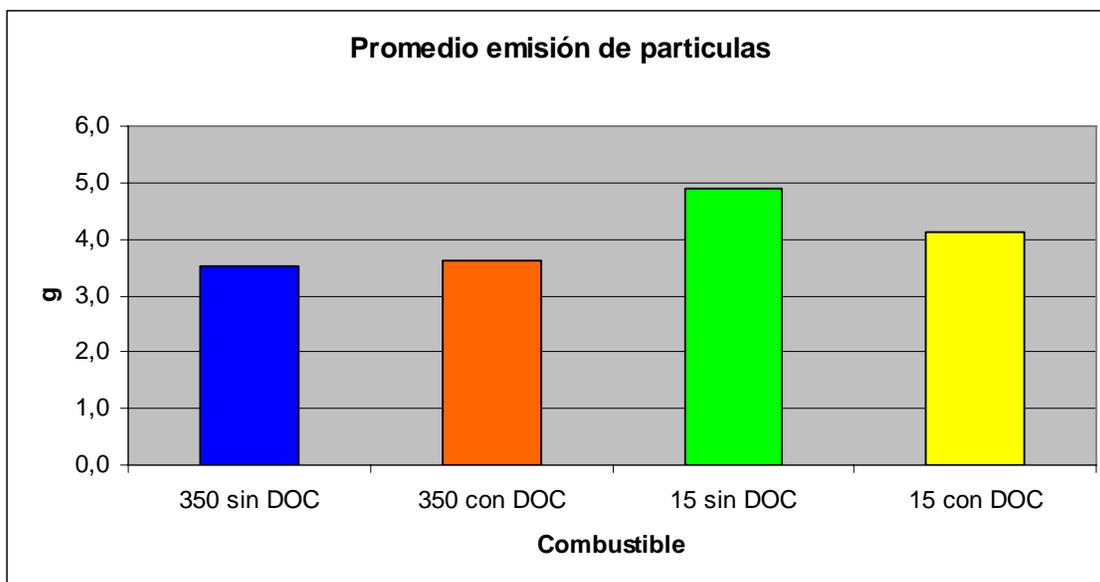
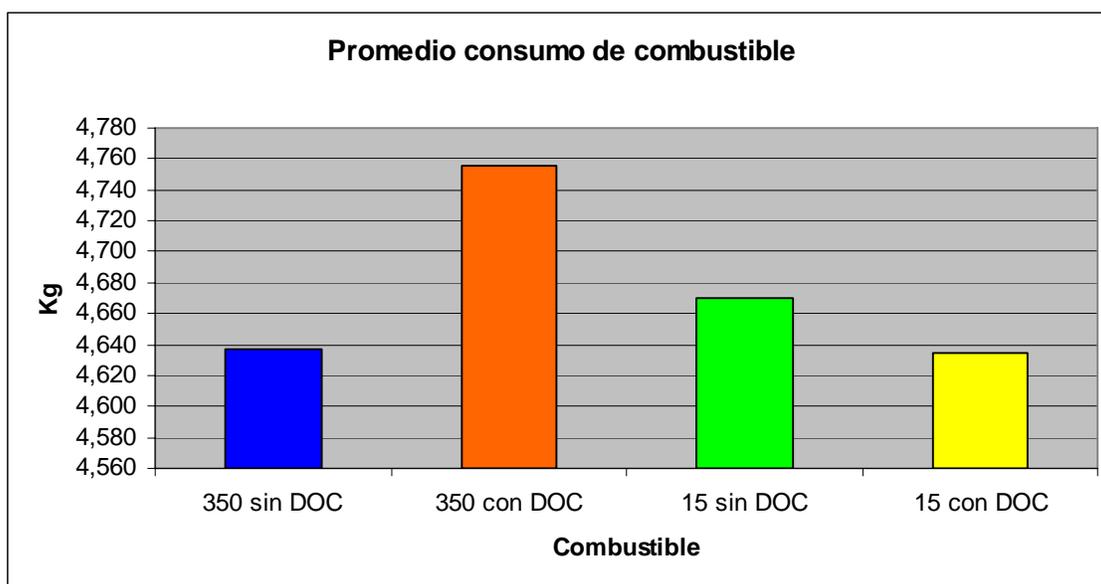


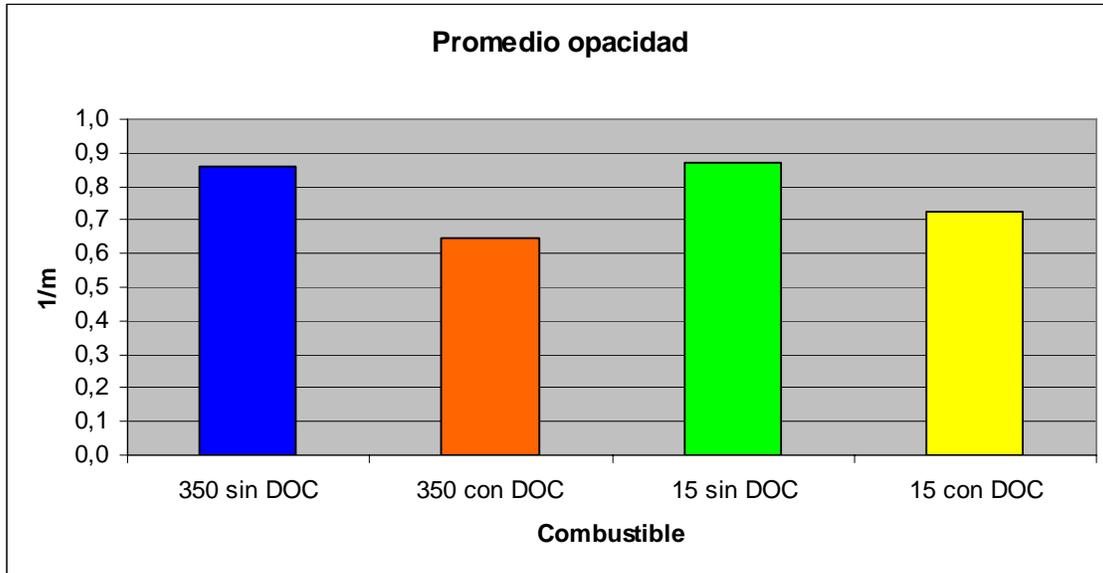
Figura 4.17 Promedio partículas.

En lo que respecta a este contaminante, se puede notar en la figura 4.17 que la emisión es muy parecida en las diferentes condiciones de prueba, salvo por el diesel de 15 ppm sin convertidor que es la prueba en la que se tiene la mayor emisión de partículas, pero cabe destacar que cuando se coloca el convertidor catalítico las emisiones disminuyen, caso contrario a lo que pasa con el diesel de 350 ppm, en el cual se ve un aumento en la emisión de partículas cuando se coloca el dispositivo. Es también muy probable que la medición de partículas no se haya realizado de la mejor manera posible ya que es un tanto improbable que el diesel de ultra-bajo azufre provoque una emisión mayor de partículas, o bien que sea un combustible contaminado. Esto también porque el consumo de combustible es mayor cuando se emplea el diesel de mayor contenido de azufre, que cuando se usa el UBA. No obstante debe aclararse que tal medición no estuvo en nuestras manos, que ha sido un equipo prestado por la Dirección General de Gestión del Aire del Gobierno del Distrito Federal, y fue prestado a condición de que un técnico especializado manejase tal equipo (RAVEM).



**Figura 4.18 Promedio consumo de combustible.**

En la figura 4.18 es notable un mayor consumo de combustible con el diesel de 350 ppm con DOC, pero lo más importante es la disminución del consumo en el diesel de 15 ppm con DOC con respecto al diesel de 15 ppm sin DOC, ya que la obstrucción en el escape debería representar un aumento en el consumo. Haciendo la comparación sin DOC el menor consumo lo tiene el diesel convencional. Estos resultados son un tanto contradictorios con los esperados de acuerdo a la literatura consultada, sin embargo la medición del combustible también fue llevada a cabo por el RAVEM.



**Figura 4.19 Promedio opacidad.**

El menor coeficiente de absorción de luz lo presenta el diesel de 350 ppm con DOC, se puede observar en la figura 4.19 que el uso del convertidor catalítico ayuda a reducir los niveles de opacidad en ambos combustibles, pero aun así el diesel convencional presenta ventaja sobre el diesel de ultra-bajo azufre ya que los niveles de éste son mayores. El opacímetro utilizado es independiente de los otros equipos utilizados, así que estas lecturas deben tomarse como muy objetivas. Es claro que el catalizador hace muy bien su papel de disminuir los humos porque incinera el carbón y otros elementos que componen los gases de escape, al grado de que mejora la opacidad incluso con el uso del diesel UBA con catalizador conectado. También es pertinente mencionar que si se trata de un equipo independiente, con un protocolo de medición también independiente, y que muestra los mismos niveles de opacidad para diesel convencional y UBA, es posible que el combustible UBA esté contaminado o que este combustible en particular, no posea las características ecológicas que uno esperaba por lo que se ha leído en la literatura especializada.

Desempeño del motor:

Combustible	M [lbf*pie]	Ne[HP]
350 sin DOC	415.933	161.767
350 con DOC	408.533	158.400
15 sin DOC	378.333	146.900
15 con DOC	395.200	151.033

Tabla 4.32 Valores máximos de par y potencia.

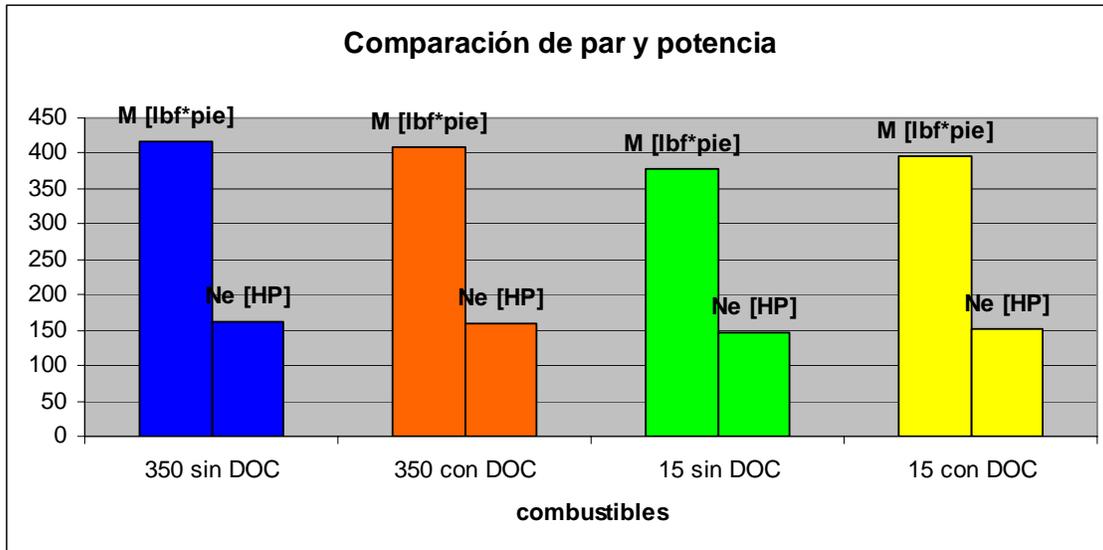


Figura 4.20 Comparación de par y potencia.

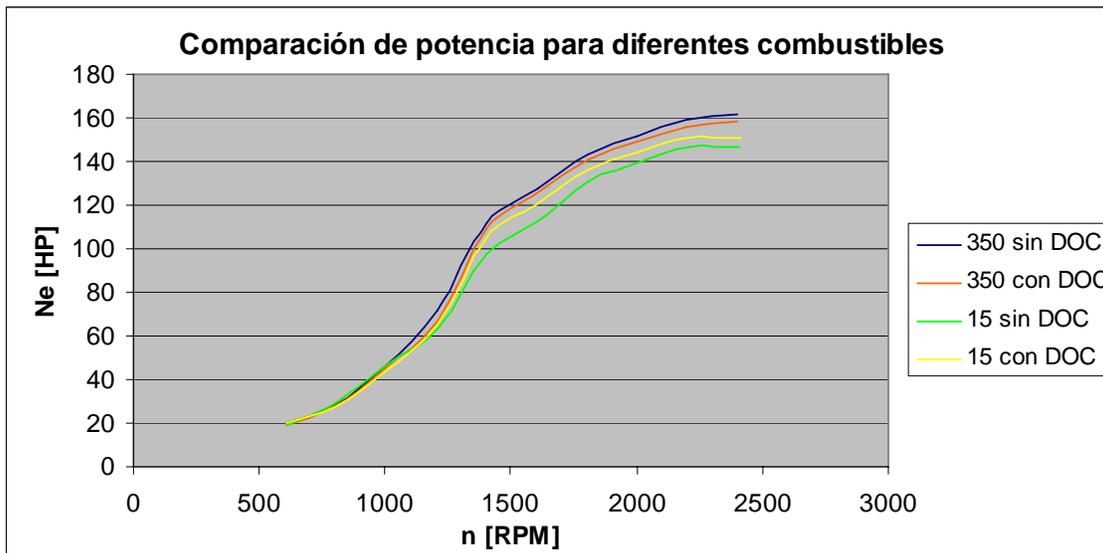
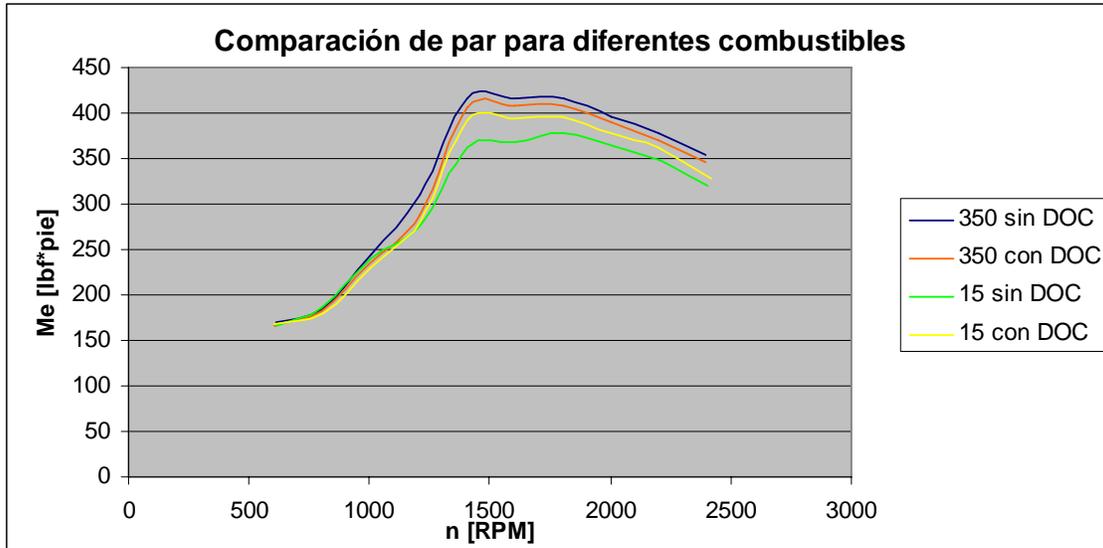


Figura 4.21 Comparación de potencia.



**Figura 4.22 Comparación de par.**

En lo que respecta al Par, se puede observar en la figura 4.22 que con el diesel convencional se obtiene mayor Par (torque) en todo el régimen de velocidad, pero lo más importante es notar que con el uso de diesel de ultra-bajo azufre aumenta el par del motor al colocar el convertidor catalítico. Lo mismo sucede con la potencia, ya que el par y la potencia se relacionan entre sí. Independientemente de esto, la pérdida de potencia y par con el uso de diesel de 15 ppm es notable en comparación con el diesel convencional, como lo muestran las figuras 4.21 y 4.22.

Los resultados utilizando el diesel convencional son bastante lógicos, ya que es de esperarse que al colocar una obstrucción por pequeña que parezca en el sistema de escape, siempre habrá una disminución en el par y potencia del motor, debido a que crece el trabajo de bombeo, lo cual reduce el trabajo efectivo del motor, incluso podría ser lógico que la curva de par y potencia del diesel convencional estuviese por encima de la curva de par y potencia del diesel UBA, pensando en que el poder calorífico de este último fuera inferior al del diesel convencional. Lo que no es lógico es que al comparar las curvas del diesel UBA con y sin catalizador, muestre mejores prestaciones cuando se coloca la obstrucción que significa el catalizador en el sistema de escape. Esto hace suponer que al operar la consola del banco de ensayos, no llevamos al motor hasta las condiciones extremas cuando se ensayó con UBA y el catalizador, por ello los resultados han sido un tanto incongruentes en esta parte.

Temperaturas:

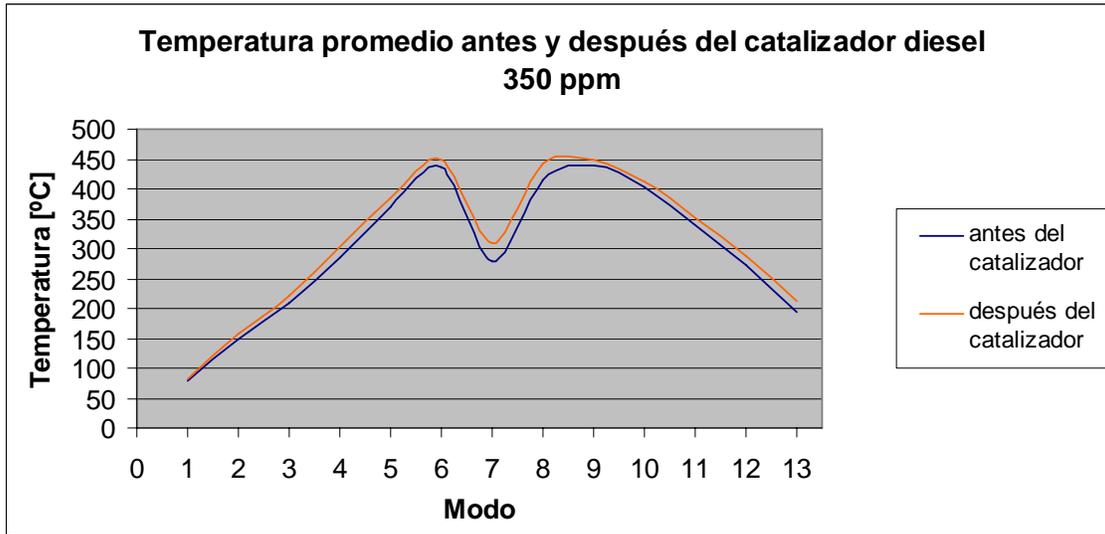


Figura 4.23 Temperatura promedio antes y después del catalizador 350 ppm.

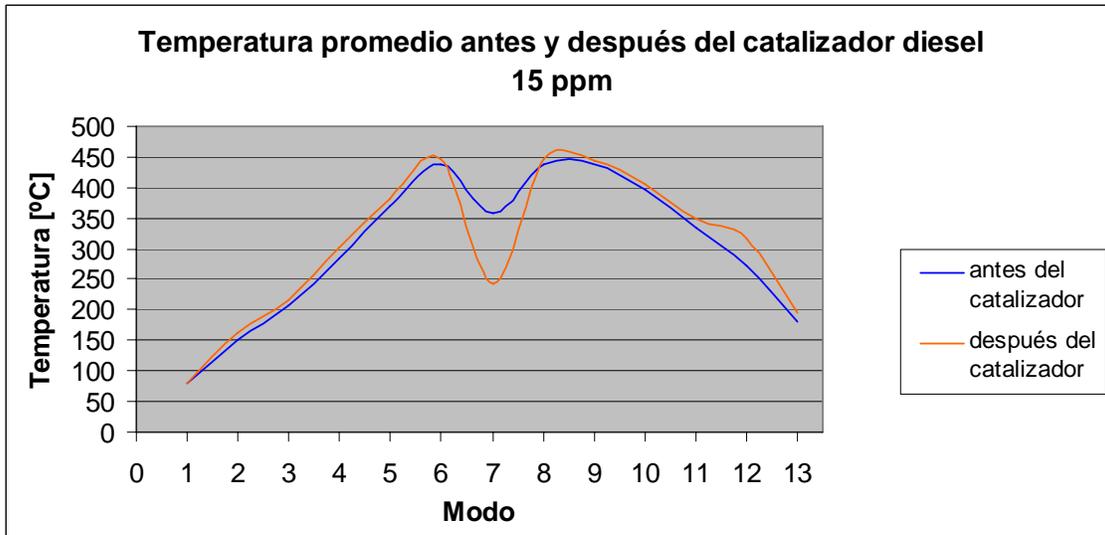
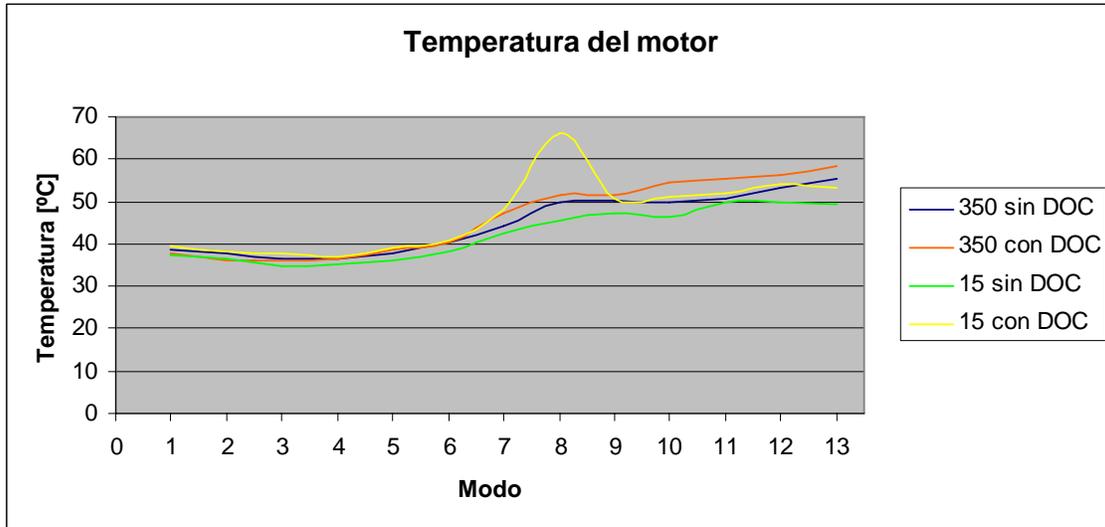


Figura 4.24 Temperatura promedio antes y después del catalizador 15 ppm.

Las temperaturas antes y después del catalizador son un indicativo del funcionamiento del mismo, es decir, si la temperatura después del catalizador es mayor que la temperatura antes del catalizador, quiere decir que éste está funcionando correctamente (ver tablas 4.27 y 4.31). Las figuras 4.23 y 4.24 muestran las temperaturas antes y después del catalizador para cada combustible, se puede observar en ambos casos que la temperatura después del catalizador siempre es mayor. Resalta el caso del diesel de ultra-bajo azufre, es muy notorio un descenso de temperatura después del catalizador (figura 4.24) en el modo 7 del ciclo, en el que el régimen del motor es ralentí, este hecho puede deberse a que con diesel de ultra-bajo azufre en ralentí no se alcance la temperatura de operación óptima del catalizador y no funcione correctamente. En el caso de la temperatura antes del catalizador, es notable también una mayor temperatura en el modo 7 del ciclo.



**Figura 4.25 Temperatura promedio del motor.**

En la figura 4.25 se puede observar que la variación de temperatura para el motor en las diferentes condiciones de prueba es muy poca, salvo por el pico que se ve con el diesel de 15 ppm con DOC, este aumento de temperatura puede ser consecuencia del cambio tan repentino de carga que se presenta en el cambio del modo 7 al modo 8 del ciclo, ya que la variación de carga va de 0 a 100% en muy poco tiempo. En los casos que se tiene instalado el DOC se puede observar una mayor temperatura de funcionamiento del motor, provocada por la obstrucción en el escape que representa el convertidor.

## **Capítulo 5.**

### **Conclusiones.**

## 5. Conclusiones.

- De acuerdo al análisis de resultados anterior, se puede concluir que el diesel de ultra-bajo azufre no presenta grandes ventajas contra el diesel comercial, al menos el utilizado en estos ensayos. Sin embargo no se puede generalizar porque sería arriesgado sacar conclusiones antagónicas a las de los investigadores que han hecho ensayos en diferentes partes del mundo, y sin duda, con mayor experiencia que la nuestra. Las emisiones de CO son mayores con el diesel de ultra-bajo azufre, la reducción de CO del diesel 15 ppm con DOC con respecto al diesel de 350 ppm sin DOC es del 0.6%, en cambio el uso de convertidor catalítico con diesel de 350 ppm representa una disminución del 42% con respecto al mismo combustible sin DOC. También existe un aumento del 47.8% de emisiones de CO con el diesel de 15 ppm sin DOC con respecto al diesel de 350 ppm sin DOC, lo cual no presenta ningún beneficio al ambiente.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> indican una buena combustión del diesel de ultra-bajo azufre, tomando en cuenta las escalas de las gráficas, el CO va de 0 a 2.5 g/min y el CO<sub>2</sub> de 0 a 720 g/min aproximadamente, como se produce más CO<sub>2</sub> se puede inferir que la combustión es buena ya que sin el convertidor catalítico la emisión de CO<sub>2</sub> es más alta que la del diesel de 350 ppm sin convertidor. Con el dispositivo instalado los niveles de CO<sub>2</sub> aumentan para ambos combustibles, en el caso del diesel de 350 ppm el aumento es consecuencia de la oxidación mucho mayor de CO y HC en el convertidor, en comparación con el diesel de 15 ppm ya que en éste la oxidación de CO y HC es mucho menor, esto lo puedo deducir por las alturas de las barras de la figura 4.15.
- Una de las emisiones que más se cuidan con el uso del diesel son los óxidos de nitrógeno, en las pruebas hechas la disminución de este contaminante es muy notoria, esto con respecto a cada combustible. El uso del convertidor catalítico aumenta la emisión de los NO<sub>x</sub>, esto se debe al aumento de temperatura, consecuencia del uso del convertidor, ya que este actúa como un tapón en el escape haciendo que la temperatura de funcionamiento del motor se incremente y la producción de los óxidos de nitrógeno se debe a una combustión a temperaturas elevadas. Independientemente de lo anterior, el diesel de 15 ppm presenta una gran ventaja en cuanto a la emisión de NO<sub>x</sub>, la disminución con respecto al diesel convencional es del 3.6%. Para que haya una reducción de óxidos de nitrógeno se debe contar con un convertidor catalítico de 3 vías para diesel o que el motor cuente con un sistema de recirculación de gases.
- Otro de los contaminantes en los que se debe poner mayor cuidado son las partículas, en este ámbito los resultados no fueron los esperados, debido a la disminución del azufre en el diesel se esperaba una disminución en la emisión de partículas lo cual no ocurrió. El aumento de partículas con el diesel de ultra-bajo azufre es muy notable como se muestra en la figura 4.17, donde se observa que la producción de las partículas depende de la calidad del combustible, de su composición y de las condiciones en las que se lleva a cabo la combustión.

- Los niveles de opacidad son más altos con el diesel de ultra-bajo azufre, la diferencia es mínima ya sea con el convertidor o sin el, pero el uso del convertidor sí disminuye el coeficiente de absorción de luz en ambos combustibles, es decir el nivel de humo disminuye. Debido a que gran parte del humo emitido es hollín y la mayor parte de las partículas emitidas también son hollín, se puede deducir que el aumento en la opacidad se debe al aumento de las partículas también.
- En lo que respecta al desempeño del motor, la disminución de la potencia y del par no se ve muy afectada con el uso del diesel de ultra-bajo azufre. El inconveniente aquí es el aumento de par y potencia cuando se usa convertidor catalítico con diesel de 15 ppm, que se puede observar en las figura 4.21 y 4.22, este resultado puede ser consecuencia de una mala operación del banco de ensayos al momento de hacer las curvas de potencia de este combustible.
- Del uso del convertidor catalítico se puede concluir que es un dispositivo benéfico para el ambiente y funciona de manera correcta ya que reduce las emisiones de CO y la opacidad y aumenta las emisiones de CO<sub>2</sub>. El aumento de la temperatura después del catalizador es un indicativo del buen funcionamiento del dispositivo ya que las reacciones generadas en él liberan calor. Este dispositivo no es benéfico para la reducción de NO<sub>x</sub>, al contrario, su uso los aumenta, esto se debe al incremento en la temperatura de funcionamiento del motor. Como se mencionó en uno de los puntos de la tesis, el tratamiento de este tipo de gases se hace con el sistema de recirculación de gases.
- En conclusión, podría afirmarse que según estas pruebas, el diesel de ultra-bajo azufre usado en estas pruebas no tiene beneficio alguno respecto al diesel de uso convencional, a pesar de la reducción de NO<sub>x</sub> presentada, ya que existe también un aumento en la emisión de partículas, siendo estos dos los contaminantes del diesel de mayor importancia. Estos resultados también pueden ser consecuencia de alguna falla en los equipos de medición, ya que poco después de realizadas las pruebas se presentó una falla en el banco de ensayos y dinamómetro. A mi parecer creo que a estas pruebas les faltó hacer más ensayos para poder concluir algo concreto, ya que 3 ensayos para cada combustible es muy poco.
- Este tipo de pruebas son de gran relevancia ya que el uso de nuevos combustibles, combustibles alternos o combinación de combustibles es un tema para el futuro, no sólo hablando por el tema ambiental, sino por el energético también, pues la dependencia de los combustibles fósiles se va a ver afectada por la disminución del petróleo.
- El uso de diesel de ultra-bajo azufre también podría traer beneficios para la industria petrolera mexicana pues la demanda de este combustible a nivel nacional incrementaría la producción de las refinerías e inclusive la construcción de nuevas plantas.

- Una cosa si puedo asegurar y es que independientemente de que los resultados hayan sido congruentes y válidos para publicarse en un medio de difusión masiva como una revista, puedo asegurar que esta tarea me ha dado una capacitación práctica que me ha servido para desempeñar cualquier actividad profesional en la que se tenga que meter las manos en los equipos, de trabajar en equipo, de tenerme confianza, de aplicar muchos de los conocimientos adquiridos durante la carrera, y de conocer un poco más del ámbito de los motores de combustión interna alternativos, y también he constatado de que se requiere una mayor preparación si se desea incursionar en el campo de la investigación.
- Hoy en día se siguen haciendo investigaciones de forma exhaustiva, no sólo con el biodiesel y diesel normal, sino con mezclas de diesel-biodiesel-etanol, precisamente en la Escuela de Tecnología de la Oxford Brookes University se han iniciado pruebas con diferentes porcentajes de estos combustibles, y ya existen resultados de otros, como lo menciona la referencia [28], con etanol y diesel, así que este trabajo constituye un importante incursión en este ámbito de la ingeniería automotriz.

## **Bibliografía.**

- [1] Webreport bosch, *Diesel, la tecnología alternativa más factible para la industria automotriz en México.*  
[http://www.portalautomotriz.com/content/2/module/news/op/displaystory/story\\_id/4328/highlight/diesel%20UBA/format/html/](http://www.portalautomotriz.com/content/2/module/news/op/displaystory/story_id/4328/highlight/diesel%20UBA/format/html/)
- [2] Secretaría de hacienda y crédito público. Comunicado de prensa: *Nota técnica sobre los combustibles de ultra-bajo azufre.*
- [3] Valderrama Brenda y Téllez-Sosa Juan, *Microbiología del petróleo y sus derivados.* Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [4] Dipankar Dwivedi, Avinash Kumar Agarwal, Mukesh Sharma. *Particulate emission characterization of a biodiesel vs diesel-fuelled compression ignition transport engine: A comparative study.* Atmospheric Environment 40 (2006) 5586–5595. Mayo 2006.
- [5] Iniciativa de aire limpio en ciudades de america latina, *Diesel más limpio.*  
[http://www.cleanairnet.org/infopool\\_es/1525/article-55074.html](http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-55074.html)
- [6] O. Blumberg Katherine, P. Walsh Michael, Pera Charlotte. *Gasolina y Diesel de Bajo Azufre: La Clave para Disminuir las Emisiones Vehiculares.* Mayo 2003.
- [7] Aquino Cortés Juan Manuel, Arenas Ramos Oscar, Domínguez Salinas José Gilberto, Olguín Mejía Andres Aarón. *Sustento técnico para modificar las normas oficiales mexicanas ecológicas 045 y 077, a fin de mejorar las emisiones de humo de los vehículos en circulación que usan diesel como combustible.* Facultad de Ingeniería UNAM. 2006.
- [8] Weaver, C.S. and Balam-Almanza M.V, *Development of the 'RAVEM' Ride-Along Vehicle Emission Measurement System for Gaseous and Particulate Emissions,* SAE Paper No. 2001-01-3644.
- [9] Weaver C.S and Petty L.E “*Reproducibility and Accuracy of On-Board Emission Measurements Using the RAVEM System* “, SAE Paper No. 2004-01-0965, March, 2004.
- [10] Rojas Tapia, A. Padilla Martínez, C. *Muestreo, medición y análisis de partículas diesel.* Facultad de Ingeniería UNAM. 1996.
- [11] Mendoza Acosta Alexander, *Desulfuración de diesel: comparativo tecnológico.* Facultad de Química. UNAM. 2004.
- [12] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Norma oficial mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.*

[13] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Norma oficial mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 Kg, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos.*

[14] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Norma oficial mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas 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 nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 Kg, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3,857 Kg, equipados con este tipo de motores.*

[15] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Norma oficial mexicana NOM-045-SEMARNAT-2006, Protección ambiental.- vehículos en circulación que usan diesel como combustible. Límites máximos permisibles de opacidad, procedimientos de prueba y características técnicas del equipo de medición.*

[16] Diario oficial de las comunidades europeas, *Directiva 1999/96/CE del parlamento Europeo y del consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre las medidas que deben adoptarse contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de motores diesel destinados a la propulsión de vehículos, y contra la emisión de gases contaminantes procedentes de motores de encendido por chispa alimentados con gas natural o gas licuado del petróleo destinados a la propulsión de vehículos.*

[17] Patricia Cantalejo. *Llegan los híbridos populares: Hybride HDi.*  
[http://motor.terra.es/motor/contactos/articulo/llegan\\_hybride\\_hdi\\_29286.htm](http://motor.terra.es/motor/contactos/articulo/llegan_hybride_hdi_29286.htm)

[18] Enkerlin Ernesto, Cano Gerónimo, Garza Raúl, Voguel Enrique. *Ciencia ambiental y desarrollo sostenible.* Internacional Thomson Editores. 1<sup>ra</sup> edición. México, 1997.

[19] Glynn Henry, Heinke Gary W. *Ingeniería ambiental.* Prentice Hall, segunda edición, México, 1999.

[20] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Pruebas en campo de autobuses de tecnologías alternativas en la Ciudad de México, reporte final.* México 2006.

[21] García Camilo, *En qué consiste el catalizador.*  
[http://www.as-sl.com/pdf/info\\_catalizador.pdf](http://www.as-sl.com/pdf/info_catalizador.pdf)

[22] Secretaría 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 opacidad, contrapresión y temperatura),* México 2007.

- [23] Mecánica virtual, *Sistema EGR*.  
[http://www.mecanicavirtual.org/sistema\\_egr.htm](http://www.mecanicavirtual.org/sistema_egr.htm)
- [24] Creus Solé Antonio, *Energías renovables*. Ed. Ceysa, 2004.
- [25] Audi, *convertidores catalíticos*.  
[http://www.audi.es/audi/es/es2/tools/glosario/engine\\_driveline/oxidising\\_catalytic\\_converter.html](http://www.audi.es/audi/es/es2/tools/glosario/engine_driveline/oxidising_catalytic_converter.html)
- [26] Nebel Bernard J. *Ciencias ambientales, Ecología y desarrollo sostenible*. Prentice hall, sexta edición, México, 1999.
- [27] Giacosa Dante. *Motores Endotérmicos*. Ediciones Omega, decimocuarta edición, Barcelona 1988.
- [28] Alan C. Hansen, Qin Zhang, Peter W.L. Lyne *Ethanol–diesel fuel blends—a review*, Bioresource Technology 96 (2005) 277–285, Science Direct Elsevier