



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACION DE UN SISTEMA DE CIRCUITO CERRADO
CON CONVERTIDOR CATALITICO DE TRES VIAS
PARA MOTORES CON CARBURADOR

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO
PRESENTA:
OMAR RAFAEL RODRIGUEZ GUADARRAMA

DIRECTOR DE TESIS: DR. ROGELIO GONZALEZ OROPEZA

CIUDAD UNIVERSITARIA

MEXICO D. F. 2005

m341969





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.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Título

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CIRCUITO
CERRADO CON CONVERTIDOR CATALÍTICO DE
TRES VÍAS PARA MOTORES CON CARBURADOR**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A

OMAR RAFAEL RODRÍGUEZ GUADARRAMA

DIRECTOR DE TESIS: DR. ROGELIO GONZÁLEZ OROPEZA

CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO D.F. 2005



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	5
CAPITULO 1. CONVERTIDORES CATALITICOS	6
1.1 Catalizadores.	6
1.2 Combustión.	9
1.3 Características generales de los convertidores catalíticos.	16
CAPITULO 2. MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO	25
2.1 Parámetros de funcionamiento del motor.	25
2.2 Sistemas de alimentación de combustible.	28
2.3 Sistema de admisión de aire.	31
CAPITULO 3. SISTEMA DE CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES	35
3.1 Descripción del sistema retrofit.	35
3.2 Métodos alternos para el control de emisiones.	39
3.3 Factores que afectan el buen desempeño del convertidor catalítico.	42
3.4 Descripción de diagnóstico a bordo.	43

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
 NOMBRE: Omar Rafael Rodríguez
Guadarrama
 FECHA: 14/03/05
 FIRMA: 

CAPITULO 4. DESARROLLO DE PRUEBAS	46
4.1 Instrumentación y equipos de medición.	46
4.2 Procedimiento de Prueba.	57
CAPITULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES	69
5.1 Condensación e Interpretación de resultados.	69
5.2 Conclusiones.	83
APÉNDICE	85
REFERENCIA	90
ÍNDICE	92

INTRODUCCIÓN

Gestión Ambiental

Los vehículos impulsados por motores de combustión interna, siguen siendo la principal fuente de contaminantes a la atmósfera, seguida por la industria, los comercios y servicios, el sector doméstico y la de origen natural. Los vehículos privados representan más del 97% del total de vehículos que circulan en la ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México) y es predominantemente un transporte de baja capacidad, que se estima cubre menos del 20% de los viajes que se realizan en la ciudad. Los microbuses, las combis, y los taxis representan cerca del 6% del total de vehículos que circulan en la ZMVM, pero son los que prestan un servicio intensivo y constante con una captación del 60% de los viajes [14].

El principal problema de estos vehículos es que sólo el 30% de ellos están en buenas condiciones, mientras que el resto de esta flota es obsoleta. Los vehículos de pasaje y carga con motores a diesel, tanto locales como foráneos, rebasan en promedio los 15 años de servicio y producen emisiones significativas de partículas y óxidos de nitrógeno. Gran parte del transporte de carga es federal y buena parte de esta flota se registra en Hidalgo y Morelos, en donde las medidas de verificación de contaminantes son menos estrictas.

La contaminación relacionada con la erosión de los suelos, provoca un aumento de las partículas suspendidas totales de origen natural y esto está íntimamente relacionada con procesos como la desecación y la deforestación de bosques y del suelo de conservación.

Programa Integral de Reducción de Emisiones Contaminantes (PIREC)

Este programa dio inicio durante el segundo semestre de 1999, y su objetivo es inducir la sustitución de los convertidores catalíticos de las unidades modelos 1993, 1994 y 1995. Esto mediante la exención del programa hoy no circula (HNC) de aquellas unidades en que se realizará la sustitución; de esta forma se han sustituido cerca de 205 mil convertidores de unidades matriculadas en el D. F.

Los convertidores catalíticos son el sistema de control de emisiones vehiculares más eficiente en la actualidad. Sin embargo, dado el diseño y el principio de operación de los mismos, son equipos sensibles a las condiciones de mantenimiento inadecuadas del motor, por lo cual, actualmente se aplica un programa de sustitución de estos equipos.

El programa vigente obliga al cambio del convertidor catalítico de aquellas unidades que han alcanzado cierto uso y cuyos propietarios deseen obtener el holograma Cero de verificación vehicular. Esta aplicación del programa, obliga al cambio del convertidor de vehículos cuyo dispositivo pudiera aún estar en buenas condiciones de operación.

En relación con este tema el Laboratorio de Control de Emisiones de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. ha apoyado un proyecto que plantea reducir las emisiones contaminantes mediante la retroadaptación de sistemas de control de emisiones (retrofit) y que, a su vez, propone simultáneamente el uso de un convertidor catalítico de tres vías para los autos con sistema de dosificación de combustible de carburador.

La realización del presente trabajo obedece a la inquietud de dar a conocer la funcionalidad de beneficios permanentes que se logran al implementar en los vehículos el sistema retrofit, y convertidor catalítico. Para ello, se propone efectuar pruebas en el banco de motor, en el banco de flujo y en el dinamómetro de chasis y determinar mediante éstas, si el convertidor representa una obstrucción al paso de los gases de escape y la capacidad de abatir las emisiones al instalar el sistema retrofit y convertidor en los vehículos con carburador.

OBJETIVOS

El desarrollo de este trabajo de investigación tiene como objetivos:

- Conocer la eficiencia que tiene el convertidor catalítico de tres vías para reducir y oxidar los gases de escape, emitidos por vehículos ligeros que trabajan con sistema de dosificación de combustible con carburador.
- Conocer la obstrucción que representa el convertidor catalítico, al hacer circular un flujo de aire a través de él.
- Comprobar que el sistema “retrofit” logra que el motor del vehículo trabaje en circuito cerrado y, de esta forma, comprobar que las emisiones disminuyen al implementar dicho sistema en motores de combustión interna con carburador.

CAPÍTULO 1 CONVERTIDORES CATALÍTICOS

1.1 CATALIZADORES

1.1.1; ¿Qué es catálisis?. Antecedentes históricos

En la Edad Media, los conocimientos relacionados con las transformaciones químicas eran manejados a nivel de magia y poderes sobrenaturales por un grupo de iniciados: En este contorno los iniciados o alquimistas observaron que la presencia de algunos elementos extraños en una mezcla, hacían posible la obtención de algunos productos útiles al hombre. Desconociendo la naturaleza del fenómeno, llegaron a imaginar que debería haber alguna sustancia que fuese capaz de cambiar al hierro y plomo en oro. A esta misteriosa sustancia nacida de la imaginación del hombre se le llamó “la piedra filosofal”. Analizando su significado, se puede deducir que el vocablo “piedra” posiblemente provino de la observación generalizada de que un mineral o sustancia sólida era el causante de los fenómenos observados. El vocablo “filosofal”, es claramente calificativo de una concepción puramente imaginativa del fenómeno. Siglos pasaron en esta búsqueda sin que se lograra transformar más que el hierro en sulfato de hierro (pirita), al que se le conoce como el “oro de los tontos”, por el brillo y color similares que este material tiene con el oro.

La acumulación de experiencias y observaciones en este campo de las transformaciones casi mágicas, llevó a la asimilación de estos fenómenos en una definición propuesta por Berzelius en 1836.

La descripción textual del fenómeno es la siguiente: “ Se ha probado que algunas sustancias simples o compuestas, solubles o insolubles, tienen la propiedad de ejercer sobre otras sustancias un efecto muy diferente al de la afinidad química. A través de este efecto, ellas producen descomposición en los elementos de esas sustancias y diferentes re combinaciones de esos elementos, de los que ellas permanecen separadas. Esta nueva fuerza desconocida hasta hoy, es común a la naturaleza orgánica e inorgánica. Yo no creo que sea una fuerza completamente independiente de las afinidades electroquímicas, por el contrario, es una nueva manifestación de esa afinidad. Sin embargo, como no podemos ver su conexión y mutua dependencia, es más conveniente dar a esta fuerza un nombre separado. Yo la llamaré *fuerza catalítica* y nombraré a la descomposición de sustancias por esta fuerza *catálisis*, de manera similar que a la descomposición de sustancias por la afinidad se le llama análisis.”

1.1.2 Aplicaciones de los catalizadores en distintas áreas

La importancia de los catalizadores en las operaciones industriales, difícilmente puede exagerarse. *Los catalizadores son materiales o sustancias que incrementan la velocidad de un proceso sin consumirse* [3]. Como las velocidades suelen aumentar por órdenes de magnitud, el tamaño de la planta que se necesita para lograr una producción dada se reduce en concordancia. Sin embargo, existe otra ventaja que suele ser aún más importante. En muchos sistemas son posibles varias reacciones y, si todas éstas tuvieran lugar en la mezcla resultante de productos, se desperdiciarían reactivos y ésta tendría que tratarse para separar el producto requerido de los subproductos. Así pues, suele observarse que un catalizador sólo acrecienta la velocidad de la reacción deseada y de este modo aumenta la proporción del producto deseado. En la mayor parte de los casos, el proceso resultaría impráctico sin el catalizador.

No obstante, a pesar de estas cualidades formidables de los catalizadores, es necesario mencionar una limitación importante: Un catalizador sólo puede acelerar una reacción hacia el equilibrio; no puede hacer que un proceso vaya más allá del equilibrio, ni puede modificar su posición.

La aplicación de los catalizadores es muy variada y su máximo valor reside en su selectividad, su capacidad para acelerar un proceso en particular. Por ejemplo:

El craqueo¹ ha llegado a ser muy importante en las refinerías de petróleo, como un medio de aumentar la producción de gasolina a expensas de productos más pesados y menos valiosos, como el queroseno y el petróleo combustible. Los procesos catalíticos más conocidos, que han suplantado con mucho a los antiguos procesos térmicos, son la técnica de lecho fluidizado y la de fluido catalítico, que usan polvos de gel de aluminio-silice como catalizadores.

La hidrogenación² se usa también con moléculas más complicadas, obteniéndose gran variedad de productos sintéticos importantes en el laboratorio y en la industria.

Los compuestos orgánicos no saturados tienen como mínimo un par de átomos de carbono unidos por un doble o un triple enlace. Al tratar un compuesto no saturado con hidrógeno a la temperatura adecuada y en presencia de un catalizador, como por ejemplo níquel, platino o paladio finamente dividido, el enlace múltiple entre los átomos de carbono se rompe y a

¹ Craqueo o Cracking, proceso químico por el cual un compuesto químico, normalmente orgánico, se descompone o fracciona en compuestos más simples. El craqueo se realiza ya sea por la aplicación de calor y alta presión, mediante el proceso conocido como craqueo térmico, o bien por el craqueo catalítico, que es la combinación de calor y una catálisis.

² Hidrogenación, reacción que implica la combinación de hidrógeno con ciertos compuestos orgánicos no saturados, especialmente con los hidrocarburos.

cada átomo de carbono se une un átomo de hidrógeno. Por ejemplo, al hidrogenar el eteno (C_2H_4) se obtiene etano (C_2H_6).

Los aceites son ésteres de ácidos grasos que contienen uno o varios dobles enlaces entre los átomos de carbono; las grasas sólidas son compuestos saturados. Así pues, la industria alimenticia al hidrogenar los aceites, que suelen tener un gusto y olor desagradable, se obtienen grasas cuyo olor y gusto son lo bastante inocuos como para poder utilizarlas en la cocina. Hay numerosos aceites vegetales baratos y abundantes, como el aceite de soja o soya y el aceite de semilla de algodón, que pueden hidrogenarse lo suficiente como para producir sólidos cremosos semejantes a la manteca a temperatura ambiente. Estos productos se usan a menudo en los alimentos. Los aceites de baja calidad, como por ejemplo los aceites de pescado, se hidrogenan y se usan en la fabricación de jabón y cera.

Los compuestos organolíticos y organoaluminicos, se utilizan como catalizadores en reacciones de polimerización.

El trietilaluminio, $Al(C_2H_5)_3$, forma parte del catalizador de Ziegler-Natta, que se utiliza, por ejemplo, para la producción de polietileno y polipropeno. Este catalizador hace posible la polimerización del etileno a una temperatura inferior a $50\text{ }^\circ\text{C}$ y una presión inferior a 50 atmósferas, en contra de los $300\text{ }^\circ\text{C}$ y las 2,000 atmósferas que se necesitarían en ausencia del catalizador.

Las preocupaciones ecologistas sobre las emisiones de gases de escape, los congestionamientos en las ciudades y el ruido, han hecho que en los países más desarrollados se aprueben leyes destinadas a reducir el impacto negativo de los vehículos. El empleo de catalizadores incorporado a los sistemas de escape del automóvil, tiene por objetivo reducir las emisiones contaminantes. El convertidor catalítico utiliza paladio o platino como catalizadores para oxidar el monóxido de carbono e hidrocarburos, productos de la combustión y obtener dióxido de carbono y agua.

Muchos países en todo el mundo, están aprobando medidas cada vez más severas para el control de emisiones, y son numerosos los países que ya comercializan gasolina sin plomo. Para ajustarse a la normativa vigente sobre emisiones contaminantes, desde principios de los años noventa todos los coches llevan ya incorporado el catalizador.

La mayoría de las reacciones que ocurren en los sistemas vivos son catalizadas por proteínas conocidas con el nombre de enzimas. Éstas reciben su nombre en función de su actividad específica. Así, por ejemplo, la enzima "ureasa" cataliza con eficiencia la hidrólisis de la urea, las proteasas actúan sobre las proteínas, las amidasas sobre las amidas, etc. Así pues, como podemos observar, son tantas y tan variadas las aplicaciones que aún en resumen breve, sería demasiado extenso aquí.

1.2 COMBUSTIÓN

La “producción” de energía de ningún modo es producción, sino más bien la conversión de energía en una forma que pueda distribuirse económicamente y que el consumidor utilice de modo conveniente. Un depósito natural de energía recibe el nombre de fuente primaria de energía. Las fuentes más importantes son el petróleo, el gas natural, la hulla y las caídas de agua. La madera es una fuente primaria de importancia decreciente, en tanto que el uranio es la fuente en la que se basa la energía nuclear y es de importancia creciente. La mayor parte de la energía que se obtiene de las fuentes primarias proviene del empleo del petróleo, del gas natural y de la hulla como combustibles; se libera energía de estas fuentes como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar en la combustión.

La combustión es un proceso de oxidación rápida de una sustancia, acompañado de una disipación de calor y, a veces, de luz [3]. Al ser la combustión una oxidación, habrán de intervenir, para que ésta se produzca, un material que se oxide, al que llamaremos COMBUSTIBLE³, y un elemento oxidante, que llamaremos COMBURENTE⁴. Para que la reacción de oxidación comience, habrá que disponer, además, de una cierta cantidad de energía, que llamaremos ENERGIA DE ACTIVACION⁵ (habitualmente CALOR). Sin la presencia simultánea de estos tres elementos, no es posible la combustión. De esta manera, la energía química contenida en el combustible se libera bajo forma de calor cuando el combustible se quema gracias a la presencia del oxígeno del aire.

Combustibles

Los combustibles pueden clasificarse según su estado físico en condiciones ambientales, en gaseosos, líquidos y sólidos (fig. 1.1)[6].

³ Sustancia que en presencia de oxígeno y aportándole una cierta energía de activación, es capaz de arder.

⁴ Sustancia en cuya presencia el combustible puede arder. De forma general, se considera al oxígeno como el comburente típico. Se encuentra en el aire en una concentración del 21% en volumen. Existen otros, como el ácido perclórico, el ozono, el peróxido de hidrógeno, etc.

⁵ Es la energía necesaria para que la reacción se inicie. Las fuentes de ignición que proporcionan esta energía pueden ser: sobrecargas o cortocircuitos eléctricos, rozamientos entre partes metálicas, equipos de soldadura, estufas, reacciones químicas, chispas, etc.

Clasificación de combustibles por su estado físico			
	Estado	Producto	Características
Combustibles	Gaseosos	Gas natural, GLP, Hidrógeno, Etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Útiles en motores estacionarios. • Se obtiene buena formación de mezcla • Se pueden quemar mezclas más pobres • Sus gases de escape no son tan contaminantes.
	Líquidos	Gasolina, Diesel, Etanol, Etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Útiles en MCI. • Generan mayor cantidad de energía por unidad de volumen. • Fácil y seguro manejo, almacenamiento y transporte. • Proceden en un 99% de la destilación del petróleo. • Son una mezcla de diversos HC's
	Sólidos	Carbón pulverizado, Carbón hulla, Leña	<ul style="list-style-type: none"> • Útiles principalmente en caldera y hornos. • Se ensayan actualmente mezclas de combustibles líquidos con carbón pulverizado en motores diesel.

Figura 1.1. Estados físicos de los combustibles.

Los elementos esenciales de los combustibles son el carbono y el hidrógeno. El azufre y otros elementos arden, pero no son importantes como combustibles. Tanto el hidrógeno como el carbono tienen muy alto valor calorífico. Estos elementos básicos de los combustibles se hallan en muchas combinaciones, las que se conocen como hidrocarburos, algunos de ellos normalmente son gases, otros líquidos y otros sólidos.

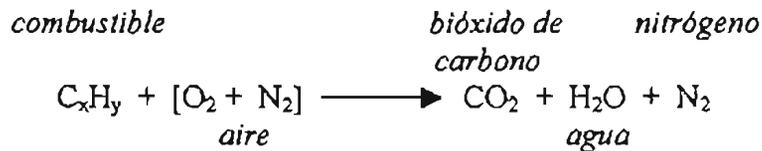
Los combustibles que presentan un alto número de átomos de oxígeno en su molécula no necesitan comburente para arder (peróxidos orgánicos).

Comburente

En nuestro caso, el comburente es el aire que está, en forma aproximada, compuesto por 77 partes de nitrógeno y 23 partes de oxígeno. Contiene también pequeñas cantidades de otros gases, pero estos se comportan en la combustión como gases inertes y pueden ser considerados desde el punto de vista de los motores, como nitrógeno [1].

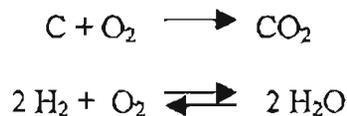
1.2.1 Razón estequiométrica

El punto de partida para analizar la formación de los productos de la combustión, es el proceso de *combustión ideal*; esto simplemente expresa que, si fuera posible mezclar completamente el oxígeno del aire con el carbono e hidrógeno durante la combustión, estos serían totalmente quemados, -en el caso de un combustible "ideal", que contenga únicamente carbono e hidrógeno-. Por ejemplo, para un combustible, dado el proceso de combustión ideal, se puede expresar de la siguiente manera:

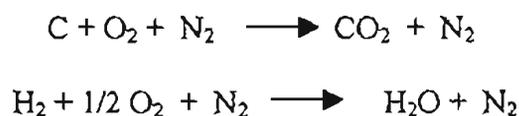


Esta reacción se conoce como combustión completa, teórica, ideal, o reacción estequiométrica.

El carbono y el hidrógeno reaccionan con el oxígeno según las siguientes ecuaciones elementales:

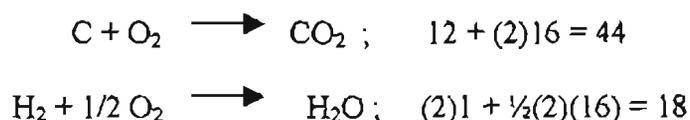


La combustión se produce en presencia del nitrógeno que forma parte del aire, por lo que las ecuaciones de arriba se transforman en:



Los productos de la combustión son, por lo tanto, bióxido de carbono, agua y nitrógeno, si se desprecian los otros gases presentes en el aire y se considera la combustión como teóricamente completa.

De las ecuaciones de la reacción podemos eliminar N_2 , debido a que aparece en igual medida en ambos lados de la ecuación y, conociendo que la masa atómica para el hidrógeno es 1, para el carbono es 12 y para el oxígeno 16. Se tiene que:



1.2.2 Tipos de combustión anormal

La forma en que una gasolina resiste al golpeteo de la chispa, es decir la detonación, determina si va a ocurrir una combustión normal o una combustión anormal dentro de la cámara de combustión de un motor de encendido provocado. La detonación es una segunda explosión, no controlada, de la mezcla aire-combustible que se presenta una vez que la chispa ha ocurrido en la bujía.

Durante la combustión que llamamos normal (fig. 1.2(a)), el frente de llama se propaga a través de la cámara de combustión, quemando toda la mezcla. Esto produce una elevación uniforme de la presión. La combustión anormal, causada por la detonación, se muestra en la figura 1.2(b). Después que ocurre la chispa en la bujía, la llama se traslada por la cámara de combustión. Sin embargo, antes que la llama alcance la mezcla que se encuentra en el extremo opuesto a la bujía, el calor y presión que actúan sobre la mezcla todavía no quemada hace que ésta explote. Los dos frentes de llama se unen, provocando que la presión se eleve rápidamente. El resultado es un golpeteo metálico, que se conoce como cascabeleo.

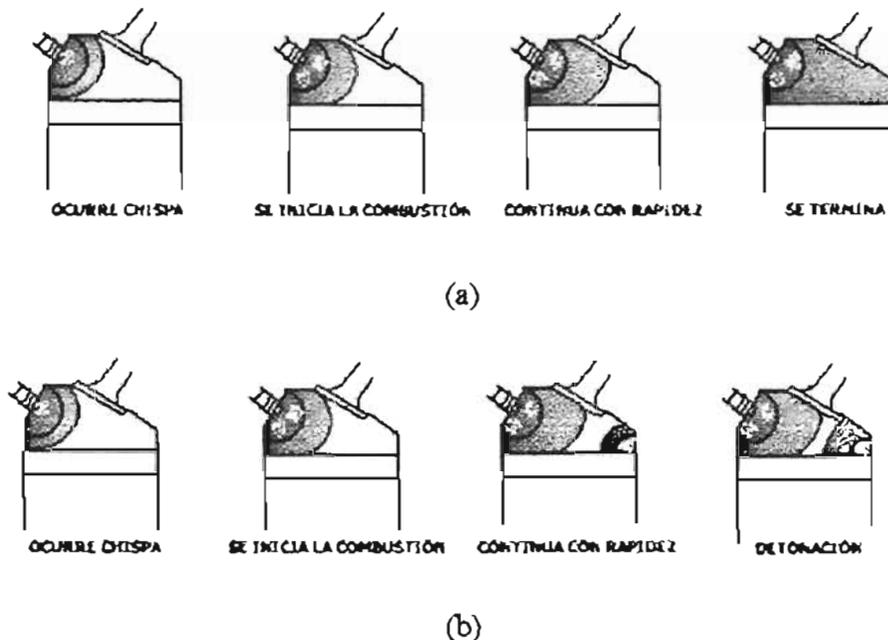


Figura 1.2. Combustión normal (a), combustión anormal (b).

La detonación puede dañar seriamente un motor, debido a que los pistones ejercen una elevada carga sobre los cojinetes y otros componentes del motor. Como consecuencia, los pistones se pueden astillar o romper. Una detonación severa, puede llevar a una preignición sin control que a la vez puede sobrecalentar y hacer perforaciones a través de la parte superior de los pistones (apartado 3.3).

Otro tipo de combustión anormal es la preignición (fig. 1.3). Ésta es la ignición de la mezcla aire-combustible antes que ocurra la chispa en la bujía. La mezcla comienza a quemarse partiendo de puntos calientes en la cámara de combustión. Las causas posibles incluyen una válvula de escape caliente, una bujía caliente o depósitos de carbón. Dado que estas superficies pueden ponerse tan calientes que causan la ignición, esto se conoce como ignición superficial.

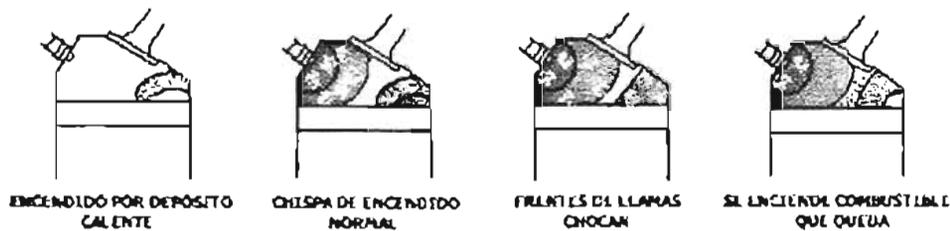


Figura 1.3. La preignición de la mezcla aire-combustible.

La ignición superficial puede ocurrir antes o después de la chispa, ocasionando retumbos en el motor, una operación áspera y una detonación de ligera a severa [17].

1.2.3 Productos de la combustión

La combustión de cualquier materia combustible, produce contaminación a la atmósfera.

En los siguientes párrafos se expondrán los agentes contaminantes emitidos por los motores de combustión interna y se comenta más al respecto, en el apartado 3.3.

Las emisiones de los motores de encendido provocado, provienen, en su mayor parte, de los gases de escape y, en menor medida, de los gases que se filtran entre cilindros y pistones. La evaporación de gasolina que puede provenir de la instalación de alimentación es también causa de emisiones nocivas.

Como se dijo, el hecho que los hidrocarburos y el aire no son puros y que la combustión no se produce de manera ideal, los gases producidos por los motores no son solamente agua y bióxido de carbono, sino que también están constituidos por monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre.

El monóxido de carbono (CO), es un gas tóxico que se produce en combustiones incompletas y se manifiesta su presencia cuando vemos humo negro. Reacciona con la hemoglobina, impidiendo el transporte de oxígeno a través de la sangre. Su inhalación puede ser mortal.

La concentración en volumen y en peso de CO en los gases de escape, está esencialmente en función de la razón aire-combustible (fig. 1.4)[1].

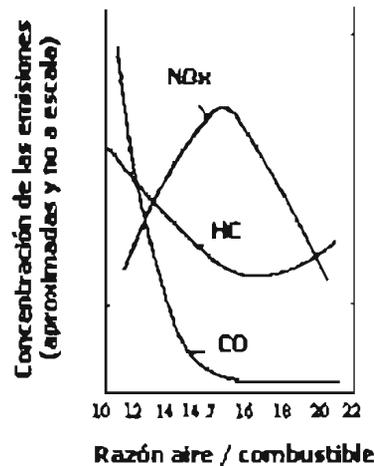


Figura 1.4. Emisiones en función de la relación aire-combustible.

Los hidrocarburos (HC's), son productos de una combustión incompleta, pueden reaccionar con óxidos de nitrógeno y con luz UV para formar smog fotoquímico. Puede ocasionar trastornos en las vías respiratorias. Se manifiesta su presencia cuando vemos humo negro.

Los hidrocarburos están presentes en los gases de escape en todas las condiciones de funcionamiento del motor.

Los óxidos de nitrógeno (NOx), se forman cuando el nitrógeno del aire se combina con el oxígeno a temperaturas que exceden de 1371°C. Son extremadamente venenosos.

Los óxidos de azufre (SO_x), provienen de la oxidación del azufre que contiene el combustible. El SO₂ es un gas incoloro, con olor picante, que al oxidarse y combinarse con el agua forma ácido sulfúrico, principal componente de la lluvia ácida.

Si existiera un motor de combustión interna ideal, éste podría quemar su combustible puro totalmente. Los productos de combustión de este escape de emisiones con CO₂ y H₂O, serían ideales. Así pues, para lograr una " combustión perfecta ", la máquina debe proveer una mezcla estequiométrica (químicamente idéntica) de aire-combustible de 14.7:1[17].

1.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CONVERTIDORES CATALÍTICOS

1.3.1 Funcionamiento de catalizadores automotrices.

El convertidor catalítico (fig. 1.5), es un dispositivo pasivo que forma parte del sistema de control de emisiones del vehículo. Aunque la formulación específica es normalmente mantenida en secreto y protegida por patentes, un convertidor típico contiene platino, paladio y rodio, mismos que están clasificados como metales de transición, metales catalíticos. Su función consiste en oxidar los hidrocarburos (HC) y el monóxido de carbono (CO) y, en algunos casos, reducir los óxidos de nitrógeno (NO_x), que son gases producto de la combustión.

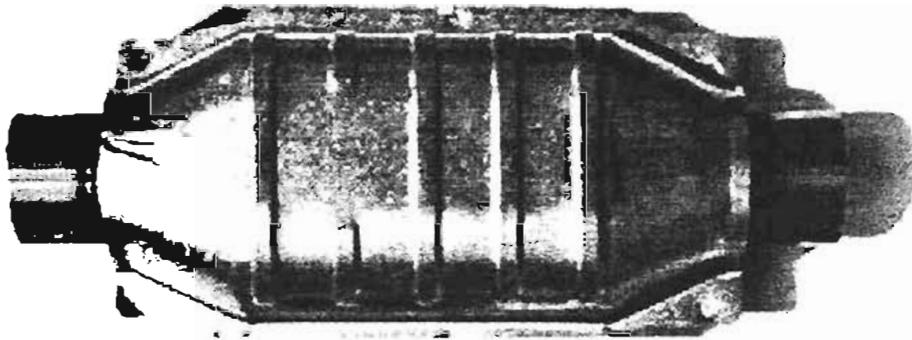


Figura 1.5. Convertidor catalítico.

Al circular los gases de escape en el interior del convertidor catalítico, estos tienen contacto con una superficie tipo panal de abeja, la que está hecha de un material cerámico con un recubrimiento de platino, paladio y rodio. Cuando los gases de poca estabilidad molecular como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x), tienen contacto con esta superficie y en presencia de calor, se generan reacciones químicas que transforman los gases nocivos en productos de alta estabilidad molecular y con casi nula reactividad, en condiciones normales de presión y temperatura, tales como el dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y nitrógeno (N_2) que no perjudican a los seres vivos (fig. 1.6).

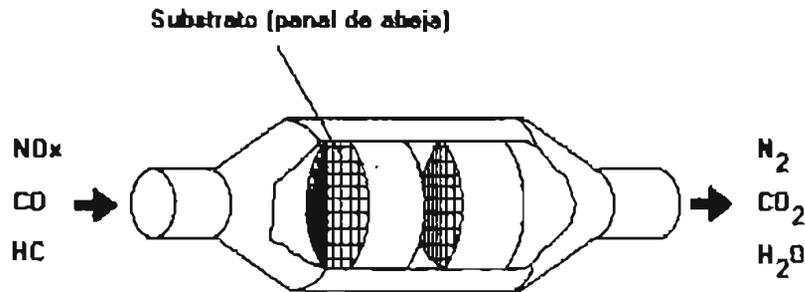


Figura 1.6. Convertidor catalítico tres vías.

Las reacciones químicas que se generan en el convertidor catalítico de tres vías, son de reducción y oxidación. El proceso de reducción comprende la primer etapa del convertidor catalítico, en la que el rodio permite que los óxidos de nitrógeno liberen rápidamente oxígeno, logrando así la reducción de los óxidos de nitrógeno. La segunda etapa del convertidor catalítico la comprende el proceso de oxidación. En esta etapa, el platino y paladio hacen que se combine más rápido el CO y HC con el oxígeno que existe en ese entorno, teniendo así la oxidación de estos gases. De esta manera, se tiene a la salida del convertidor catalítico agua, dióxido de carbono y nitrógeno, elementos inofensivos para el medio ambiente.

1.3.2 Construcción del convertidor catalítico

En este apartado, se citan los elementos que conforman al convertidor catalítico. Así también podremos ver que no es factible brindar algún servicio de mantenimiento en forma directa a este dispositivo, debido a que no tiene partes removibles que puedan ser remplazadas por otras. Un convertidor típico está constituido por las siguientes partes, tal como lo muestra la figura 1.7.

- Conchas
- Boquillas
- Tipos de substrato
- Colchoneta térmica protectora

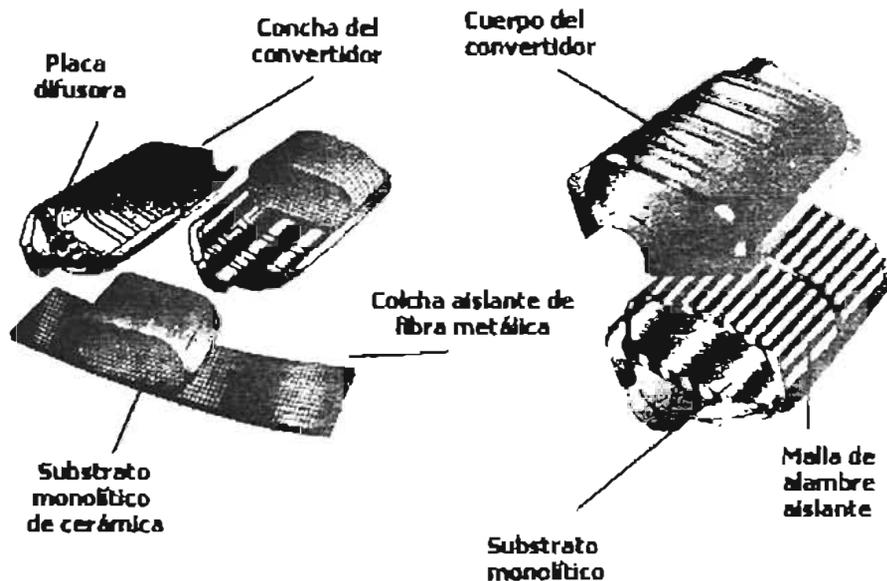


Figura 1.7. Partes que componen al convertidor catalítico.

Conchas

La forma de la concha está diseñada para alojar y proteger al sustrato. Esta concha forma el cuerpo del convertidor y se fabrica de acero inoxidable (409).

Boquillas

Son fabricadas en acero aluminizado y soldadas a la concha, ya que éstas serán el medio para poder acoplar el convertidor con el tubo de escape. El diámetro de la boquilla no debe ser reducido, pero sí puede ser expandido hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada [9].

Tipos de sustrato

Pelletizados: El convertidor puede contener de 100,000 a 200,000 pellets cerámicos (camas), que tienen un recubrimiento con los metales catalíticos. Este tipo de sustrato no es utilizado por los fabricantes de repuesto y la mayoría son de uso restringido.

Cerámica monolítica: Algunas veces llamado panal de abeja, ladrillo o bisquet. Está hecho a base de silicato de magnesio resistente a altas temperaturas, tiene 64 celdas por cm^2 que forman canales, a través de los cuales fluyen los gases productos de la combustión. Requieren de un recubrimiento de óxido de aluminio, que incrementa la efectividad del área de contacto del catalizador en un factor de 7000 veces. La carga del catalizador sobre el recubrimiento base (algunas veces llamado "cubierta de metales preciosos"), consiste principalmente de platino y paladio para la oxidación y rodio para la reducción.

Colchoneta térmica protectora: Es una hoja de asbesto que sirve como aislante térmico, rodeando y protegiendo al sustrato de cerámica; sirve también para compensar las tolerancias de fabricación, expansión térmica, esfuerzos mecánicos y la fuerza de los gases de escape, al chocar con las paredes del sustrato monolítico. Puede ser construida de acero inoxidable o cerámica.

1.3.3 Tipos de convertidores catalíticos

A raíz del descubrimiento de los mecanismos de formación de ozono troposférico, debido a las altas concentraciones de óxidos de nitrógeno emitidas por los vehículos, los prestadores de servicios de la rama automotriz se vieron en la necesidad de combinar los tipos de convertidores para reducir los óxidos de nitrógeno NO_x , y oxidar HC y CO con mayor eficiencia. Cada tipo de convertidor catalítico adopta su nombre de acuerdo a la función que desempeña. En los siguientes párrafos se describen los tipos de convertidores catalíticos que se utilizan para lograr lo antes mencionado.

Convertidores de oxidación.

Los primeros catalizadores (1975-1979) contenían platino y paladio como componentes que aceleran el proceso de oxidación para convertir HC y CO en CO_2 y H_2O .

Existen dos diseños internos básicos utilizados por los convertidores catalíticos para la oxidación:

- a) El diseño monolítico
- b) El diseño de pellets (gránulos o bolitas de cerámica)

Ambos tipos de convertidores de oxidación utilizan alrededor de 70% de platino y 30% de paladio.

El convertidor monolítico consiste en un flujo difusor, un panel monolítico y una malla de acero inoxidable. El difusor de flujo esparce hacia fuera los gases del escape y los dirige a través de pequeños pasillos en el panel, proporcionando espacios para la conversión de los gases.

El elemento monolítico, es un material cerámico cubierto con una capa muy delgada de platino y paladio. La malla de acero inoxidable la protege del daño causado por vibraciones e impactos.

El convertidor de tipo pellets consiste en deflectores, pellets de aislamiento y de óxido de aluminio. Un deflector desvía los gases de escape hacia arriba y luego hacia abajo a través

de una cama de pellets de óxido de aluminio, donde las emisiones son convertidas. Las pellets están cubiertas con platino y paladio.

Características:

- Utiliza platino y/o paladio para oxidar el HC y CO.
- Requiere exceso de aire (O_2), del sistema de admisión de aire o una baja relación aire-combustible.
- Generalmente no cuenta con computadora del motor, ni sensor de oxígeno.

Pre-Convertidores (convertidores de Reducción).

Un catalizador de reducción controla emisiones de NO_x , reduciendo los compuestos oxidados (NO y NO_2), de regreso a sus componentes no oxidados (N_2 y O_2).

Rodio es el metal catalizador que ayuda a reaccionar al NO_x con el CO para formar N_2 (nitrógeno), CO_2 y O_2 inofensivos. La mezcla óptima para el proceso de reducción es un rango de mezcla aire-combustible ligeramente más rico que 14.7:1 porque la reacción necesita CO.

Los convertidores de reducción aparecen en los sistemas de vehículos en dos formas: en pre-convertidores y en convertidores de dos camas.

El pre-convertidor es en realidad un convertidor de reducción. Los pre-convertidores son más pequeños que los convertidores comunes y se encuentran situados más cerca del motor. Debido a que estos operan a una mayor temperatura que el convertidor principal, estos contienen una mayor cantidad de rodio. El rodio también oxida y tiene un punto más alto de fusión que el platino o el paladio. Una vez que el motor se calentó, el pre-convertidor trabaja como la cama de reducción del convertidor principal.

Características:

- Mejora la eficiencia general del sistema de control de emisiones, suministrando gases limpios de combustión al convertidor principal montado en la posición, bajo piso tradicional.
- Reduce las emisiones de HC por “arranque en frío”
- Debido a la localización de convertidores pequeños –más cerca del motor-, estos se calientan más rápido y alcanzan su temperatura de operación en menor tiempo.

Convertidores de doble cama.

Un convertidor de dos camas es realmente un convertidor de reducción (para NO_x) y de oxidación (para HC y CO), integrados en una sola concha. Primero, los gases de escape se mueven pasando el agente reductor, reduciendo NO_x en N₂ y O₂. Luego los gases de escape se mueven pasando los agentes oxidantes, convirtiendo HC y CO en H₂O y CO₂. El N₂ (nitrógeno) producido por el convertidor de reducción es inerte, entonces pasa a través de la segunda cama del convertidor sin reaccionar.

Normalmente no hay suficiente oxígeno producido por el proceso de reducción para poder oxidar HC y CO profundamente, por lo que los convertidores de dos camas generalmente obtienen oxígeno adicional de otra fuente, que frecuentemente es del sistema de aire.

Catalizadores tres vías.

Los convertidores de tres vías tienen ese nombre porque pueden reducir y oxidar las tres emisiones en el mismo punto.

Los convertidores de tres vías pueden oxidar HC y CO hasta y durante el punto rico del ciclo. Esto es porque el convertidor realmente sustrae y adsorbe oxígeno cuando los gases están pobres. Los convertidores generalmente contienen alúmina o cerio para almacenar oxígeno. Cuando la mezcla se vuelve rica, el sustrato libera el oxígeno para permitirle al convertidor continuar oxidando el HC y CO, hasta cuando está reduciendo NO_x.

Existen varias similitudes de una configuración a otra, pero cada una tiene requisitos específicos para reducir emisiones eficientemente.

1.3.4 Condiciones de operación

Como se mencionó, los convertidores catalíticos no requieren de mantenimiento, pero deben tenerse en cuenta condiciones y recomendaciones que hacen los fabricantes para garantizar su buen desempeño en la reducción de emisiones contaminantes. Una de las condiciones que requiere el convertidor catalítico para poder llevar a cabo su cometido, es que necesita de una temperatura mínima de aproximadamente 482°F (250°C) para que los materiales catalíticos contenidos en el sustrato se activen y comience la reacción química de catálisis, valiéndose para ello del calor generado en el proceso de combustión [9].

Un convertidor catalítico no compensará a un motor que esté en mal estado mecánicamente; es decir, el convertidor requiere estar libre de cualquier situación o defecto que sea causa de que el sustrato sufra algún tipo de contaminación, ya sea por residuos de aceite, ceniza (hollín), anticongelante o compuestos de plomo. La contaminación del sustrato reduce el efecto de catálisis, debido a que se obstruyen los poros del catalizador activo y la superficie catalítica, reduciendo el área efectiva del convertidor.

Otra de las condiciones que se requiere, es que el convertidor esté libre de cualquier tipo de daño o maltrato físico, ya que al romperse, el sustrato puede ocasionar taponamientos, alterando así la trayectoria que deben seguir los gases de escape para tener un buen contacto con la superficie catalítica, inclusive pudiendo provocar situaciones no deseables para el motor.

1.3.5 Volumen de desplazamiento y materiales catalíticos contenidos en el convertidor catalítico

Como sabemos, existe una variedad de vehículos impulsados por motores que utilizan gasolina como combustible y cuyas prestaciones⁶, en condiciones de operación, difieren de uno a otro vehículo, debido a esto, las autoridades de protección al medio ambiente, han establecido que de acuerdo al volumen de desplazamiento⁷ del motor, el convertidor catalítico que debe ser instalado en el sistema de escape, debe contener una cantidad determinada de materiales catalíticos que garantice los porcentajes de conversión mínimos establecidos por dichas entidades⁸.

Los fabricantes proporcionan un manual con información técnica que sirve para guiar al usuario en la operación e instalación del convertidor catalítico. En este manual, podemos encontrar especificaciones tales como: la masa total de los materiales activos contenidos en el sustrato o núcleo cerámico (carga total en gramos), el volumen del sustrato (volumen cm^3), **la relación** entre sí de los pesos de cada uno de los metales activos contenidos en el sustrato, expresada por tres números (platino: paladio: rodio); que sirven para seleccionar el convertidor catalítico, con el cual, se puedan obtener los porcentajes de oxidación y reducción mínimos de los gases de escape, al ser instalado en el vehículo con determinado volumen de desplazamiento, tal como se muestra en las tablas 1.1, 1.2 y 1.3 [18].

⁶ Las prestaciones representan la respuesta del motor ante las condiciones de aceleración y desaceleración.

⁷ Volumen de desplazamiento: Volumen del cilindro estando el pistón en el punto muerto inferior, incluyendo la cámara de compresión, multiplicado por el número de cilindros del motor.

⁸ La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, prevén que las emisiones de contaminantes a la atmósfera generadas, entre otras, por fuentes móviles, deben ser reducidas y controladas para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.

Volumen de desplazamiento cm ³	Convertidor catalítico			Conversión mínima (%)		
	Volumen cm ³	Carga total gramos	Relación de metales	HC	CO	NOx
Hasta 1800	1235	1.74	5:0:1	60	60	25
De 1801 a 3200	1475	2.08	5:0:1	60	60	25
De 3201 a 5900	1988	2.77	5:0:1	60	60	25

Tabla 1.1. Características del convertidor catalítico para automóviles.

Volumen de desplazamiento cm ³	Convertidor catalítico			Conversión mínima (%)		
	Volumen cm ³	Carga total gramos	Relación de metales	HC	CO	NOx
Hasta 1800	1235	1.74	5:0:1	60	60	25
De 1801 a 5900	2477	3.49	5:0:1	60	60	25

Tabla 1.2. Características del convertidor catalítico para camiones comerciales de 400 a 2,727 kilogramos de peso bruto vehicular.

Volumen de desplazamiento cm ³	Convertidor catalítico			Conversión mínima (%)		
	Volumen cm ³	Carga total gramos	Relación de metales	HC	CO	NOx
Hasta 5900	2477	3.5	5:0:1	60	55	20

Tabla 1.3. Características del convertidor catalítico para camiones ligeros de 2,728 a 5,500 kilogramos de peso bruto vehicular.

CAPÍTULO 2 MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO

2.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

Es importante entender el comportamiento de las prestaciones del motor en condiciones de operación; estas prestaciones representan la respuesta del motor ante las condiciones de aceleración y desaceleración. Cuando se habla de una prestación indicada, se hace referencia a lo que sucede en el interior de la cámara de combustión; del mismo modo, el término efectivo se refiere a los parámetros a la salida. Por ejemplo, la rotación del eje del cigüeñal debido al movimiento cíclico del pistón.

Par

El par es una magnitud física que nos da una idea de cómo evoluciona la potencia de un motor con la velocidad del mismo, y representa la capacidad del motor para producir trabajo. La explosión en la cámara de combustión empuja al pistón hacia abajo, su movimiento alternativo se convierte en giros del cigüeñal, así se manifiesta la fuerza de la explosión, aplicada a una cierta distancia del centro del eje, como un par de torsión.

El par que puede desarrollar un motor, varía con la velocidad de éste, es decir, depende del régimen de giro, pues la fuerza de las explosiones depende del llenado de la cámara. El par se muestra mucho mayor a velocidades intermedias que a velocidades elevadas, debido a que a velocidades menores se tiene más tiempo para que la mezcla entre en la cámara de combustión. A velocidades más altas se dispone de un tiempo menor para que la mezcla entre a la cámara, siendo así menor el volumen de mezcla quemada y con ello la presión y potencia desarrolladas por el motor, por esta razón existe un régimen determinado en el que se obtiene el par máximo.

El par efectivo es obtenido en el eje del motor. Este par es proporcional al trabajo del ciclo y a la presión media efectiva. La curva que describe cómo varía el par durante toda su gama de revoluciones aprovechables, se muestra en la figura 2.1 [2].

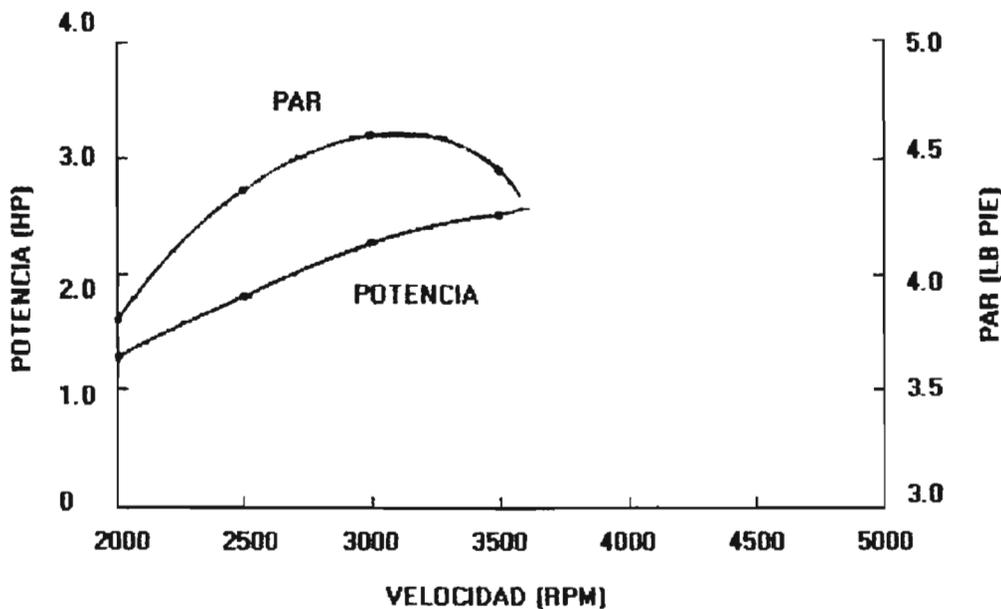


Figura 2.1. Curvas de par y potencia de un MEP, el eje vertical izquierdo muestra la magnitud de la potencia y el eje vertical derecho muestra la magnitud del par.

Potencia

La potencia es la velocidad a la que el motor realiza trabajo, y teniendo en cuenta que el trabajo se define como la energía⁹ empleada para mover un objeto a lo largo de una distancia [2], entonces podemos decir que la potencia, es la velocidad con la que el motor proporciona energía. La energía que el motor recibe de la combustión del combustible se traduce en energía mecánica, que es la que efectúa trabajo.

La potencia ideal depende de la relación de compresión y del desplazamiento del pistón (condiciones de diseño), pero no toda la potencia ideal es aprovechada: las pérdidas en la combustión y refrigeración consumen parte de la energía, por lo tanto la potencia indicada es la realmente desarrollada en el interior del cilindro por el proceso de expansión de los gases.

A su vez, la potencia entregada por el motor se ve mermada por los efectos de rozamiento en los mecanismos acoplados al cigüeñal como bomba de gasolina, árbol de levas, etc., y otros accesorios que consumen una cantidad de dicha potencia, por tal motivo la potencia al freno (que es la potencia realmente utilizable del motor), es la estudiada a efectos de definir el comportamiento de operación del motor.

⁹ Energía se puede definir en términos sencillos como la capacidad de realizar trabajo [2].

La potencia al freno se mide mediante un dispositivo de absorción de potencia, como un dinamómetro que proporciona además de la potencia, el par proporcionado por el cigüeñal del motor y la velocidad a la que éste gira. De este modo, conocidos el par y la velocidad de giro del motor, es posible conocer la potencia desarrollada por el motor.

En la figura 2.1, se muestra cómo la potencia aumenta conforme aumenta la velocidad, es decir, se observa que a mayores velocidades aumenta la potencia aunque el par se mantenga constante o incluso disminuya. También, para la potencia al freno, existe una velocidad a la cual la potencia es máxima, ello se debe al tiempo disponible que se tiene para que la mezcla entre en la cámara de combustión.

Entre algunos factores que afectan la potencia del motor se encuentran la humedad del aire, la compresión de la mezcla de combustible, el tipo de combustible, la cantidad y naturaleza de la mezcla.

Régimen

El régimen o velocidad angular referido a un motor, se expresa normalmente como revoluciones por minuto (rpm). El régimen de ralentí es la velocidad en la cual el motor no posee carga alguna acoplada al cigüeñal. El régimen máximo es el límite de la aceleración del motor.

Se puede rebasar el régimen máximo, si se acopla una carga demasiado pequeña con el motor a altas velocidades, la inercia del coche puede entonces acelerar el motor por encima de su régimen máximo, aunque los sistemas de protección hayan cortado la alimentación. Se dice entonces que el motor ha sufrido un sobre-régimen.

El régimen de par máximo o de potencia máxima, es la velocidad angular en la que el motor alcanza esos estados.

Consumo de combustible

Consideremos un motor, que opera con la mariposa del carburador totalmente abierta y carga constante. En estas condiciones el valor de la razón de mezcla influye tanto sobre la potencia como sobre el consumo específico, que es el consumo requerido por un motor para suministrar una determinada unidad de potencia por unidad de tiempo.

En la figura 2.2 [1], se describe el comportamiento que tiene el consumo específico al variar la razón aire-combustible debido a las demandas de potencia del motor.

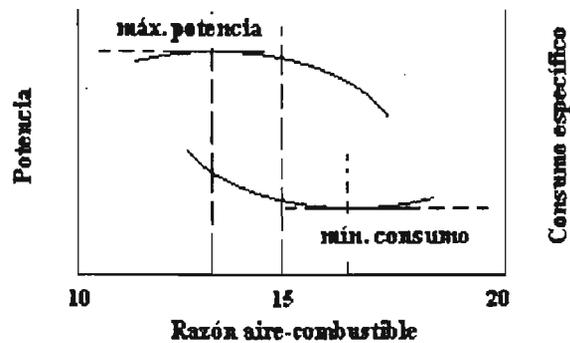


Figura 2.2. Efecto de la razón de la mezcla aire-combustible en la potencia y el consumo específico.

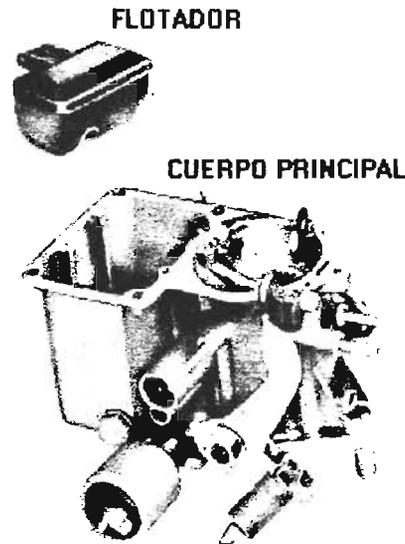
Coincidiendo con el punto de potencia máxima la razón aire-combustible generalmente tiene un valor diferente y menor que el estequiométrico. Hay que notar también que en la curva del consumo específico coincide un punto de mínima potencia al cual corresponde la razón de mezcla de máxima economía. De las curvas indicadas en la figura 2.2 se puede apreciar que para la máxima potencia la mezcla tiene que ser más rica que la estequiométrica, mientras que para la máxima economía tiene que ser más pobre.

2.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE

El sistema de alimentación, es el encargado de llevar el combustible desde el tanque hasta ser quemado por los cilindros y expulsado por los colectores de escape. Desde el depósito, el combustible es enviado, mediante la bomba de alimentación, por sus conductos al sistema de admisión del motor.

En un motor de encendido provocado, el sistema típico de admisión, consiste de un filtro de aire, un carburador, obturador o inyector de combustible y válvula de estrangulación o de admisión con inyectores individuales de combustible en cada puerto de admisión, y admisión múltiple. Dado el enfoque que tiene esta obra hacia los motores con carburador, se expondrá en los siguientes párrafos la descripción y funcionamiento del carburador como parte principal del sistema de admisión. Así también se dará una breve descripción de los sistemas de inyección con que cuentan los vehículos hoy en día [8].

2.2.1 Sistema con carburador



Este elemento, destinado a pulverizar o dosificar la gasolina, mezclándola con aire atmosférico de manera que se obtenga una mezcla explosiva de máxima potencia, es de funcionamiento muy sencillo. La gasolina llega al carburador impulsada por la bomba aspirante-impelente e ingresa a través de una válvula reguladora, accionada por la palanca de un pequeño flotador, generalmente plástico o de bronce laminado. La combinación flotador-válvula mantiene un nivel constante de combustible en el pequeño depósito de reserva del carburador, que está protegido con una tapa atornillada, provista de una junta o empaquetadura, pero con un pequeño conducto que permite el ingreso de la presión atmosférica y desde donde el líquido cumplirá diversas funciones. Una de ellas es el alimentar los atomizadores de alta y baja velocidad. Otra es el alimentar a una pequeña bomba aspirante-impelente, de diafragma o de émbolo, destinada a inyectar un volumen adicional de gasolina pulverizada en el instante en que se acelera la máquina, y en el que existe un punto crítico del paso de baja a alta velocidad. Una tercera es la de dar paso a un volumen adicional de gasolina, mientras el motor funciona frío, lo que habitualmente hacemos jalando el ahogador, que acciona la válvula de mariposa, la cual estrangula el paso de aire a la entrada o boca del carburador y que, al mismo tiempo, acciona levemente el mecanismo inyector.

Funcionamiento del sistema de admisión.

Se acumula un volumen normal de gasolina en el depósito del carburador y en circunstancias que el motor funciona en baja velocidad (unas 650 revoluciones por minuto), la succión de aire o vacío producido en la boca del carburador por los tiempos de admisión en los cilindros, hace que la gasolina líquida se desplace por los conductos y llegue

hasta el pulverizador de baja velocidad, el que atomizará la gasolina mezclándola con el aire succionado que pasa a través del filtro de aire y alimentando de esa manera a los cilindros a través del colector de admisión y las válvulas de admisión correspondientes a cada cilindro. Ahora bien, si aceleramos el motor hasta alta velocidad (3.000 ó 4.000 rpm), la succión será proporcionalmente superior y, entonces, la gasolina llegará hasta el pulverizador de alta, que por tener una perforación más amplia, atomizará un mayor volumen de gasolina, satisfaciendo las nuevas necesidades adicionales. En cuanto a la válvula de aceleración, sólo consiste en una válvula de mariposa que abre o cierra a voluntad la boca inferior del carburador y que no es otra que la que accionamos mediante pedal. Las características de funcionamiento en alta velocidad, así como el buen funcionamiento en baja o ralentí, dependen del adecuado ajuste de los tornillos cónicos de regulación de la mezcla, que debe ser lo más explosiva posible, debiendo efectuarse dicha regulación con la ayuda de un analizador de gases y un tacómetro o medidor de rpm. Un gas de escape que no contenga mezcla cruda, estará revelando una combustión completa y una buena regulación de la carburación y el aire. El problema del paso de baja a alta velocidad, como ya hemos visto, consiste en que siempre es más veloz la entrada de aire al acelerar, que la pulverización de la gasolina en los atomizadores, lo cual hace necesaria una pequeña bomba que es accionada por el propio acelerador, enriqueciendo momentáneamente la mezcla. La correcta regulación de la mezcla en baja o ralentí es muy importante, tanto para el buen funcionamiento del motor como para obtener una mayor potencia con un menor consumo, pues de la regulación en baja depende la mezcla en alta, por lo que un error de regulación en baja aumentará en alta sus consecuencias.

Una falla muy común en los motores con carburador, es la evaporación de combustible en los conductos del circuito en días calurosos, siendo éste uno de los problemas en emisión de contaminantes a la atmósfera.

2.2.2 Descripción de sistemas de inyección actuales

La razón de existir de los sistemas de inyección de combustible, radica en que la aportación de éste, sea directa e independientemente del caudal de aire que penetre por el tubo de admisión. De esta forma, la longitud o forma de los conductos de admisión no influye, ya que el inyector está situado junto a la válvula de admisión y orientado hacia el punto más conveniente para mandar el combustible cuando la válvula de admisión se abra. La presencia obligada de un inyector en cada cilindro elimina el defecto de una alimentación irregular en los cilindros, como es frecuente que pase en los motores alimentados por medio de carburador.

La aplicación de la electrónica a los sistemas de inyección, ha elevado a cotas altísimas el grado de eficacia a la hora de introducir en un cilindro la cantidad exacta de combustible que necesite. Las grandes posibilidades de la electrónica aplicada a la alimentación, permite medir todos los parámetros indispensables para conseguir una dosificación perfecta, en función de múltiples parámetros que influyen directamente en este proceso, hasta el punto

de que sistemas combinados de control de inyección y encendido, son aplicados con profusión en los modelos que se fabrican hoy día.

Gracias a las últimas tecnologías desarrolladas en los sistemas electrónicos de inyección-encendido, la alimentación de los motores de encendido provocado se acerca a los límites de la perfección y, para conseguirlo, existe una serie de condiciones que han de cumplirse.

La alimentación debe tener un sistema de medición del peso específico del aire y de la gasolina, de forma que en cualquier condición se obtenga la dosificación adecuada. De la misma manera, debe controlar la temperatura tanto del aire como de la gasolina, que hace variar sus pesos. Con estos parámetros bajo control, el sistema electrónico permite modificar la aportación de gasolina con respecto a la del aire y así mantener siempre una dosificación correcta para cada uno de los múltiples estados de funcionamiento del motor.

Otra parcela a controlar por los sistemas electrónicos de inyección, es el régimen de giro del motor para determinar la dosificación correcta y así enriquecer o empobrecer la mezcla gaseosa según sea necesario. Otro tanto de lo mismo ocurre en función de la temperatura de funcionamiento del motor; en el momento del arranque en frío se requiere una mezcla mucho más rica en gasolina y, progresivamente, ha de ir empobreciéndose según aumenta la temperatura del motor.

Otra de las características importantes de los sistemas electrónicos de inyección de combustible, consiste en que sus centrales inteligentes disponen de analizadores de gases de escape, que permanentemente proporcionan información sobre las proporciones de gases contaminantes de los residuos de la combustión, de forma que estos se corrijan inmediatamente, con la consiguiente reducción de emisiones nocivas a la atmósfera.

Como se dijo en su momento, los sistemas de inyección de gasolina que actualmente se utilizan en motores de encendido provocado son múltiples y variados, y su aplicación y nivel de sofisticación tecnológica depende de las características del motor al que vaya destinado. Para establecer una clasificación global de los sistemas de inyección de combustible que se emplean, hay que recurrir a la naturaleza del sistema utilizado para el control de funcionamiento de la dosificación y, desde ese punto de vista, tenemos los sistemas de inyección de accionamiento mecánico y de inyección electrónicos, además de un tercer grupo denominado mixto, en el que la electrónica aporta algunas mejoras al sistema clásico de accionamiento mecánico.

2.3 SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE

Los motores carburados y algunos motores de inyección de combustible, calientan el aire para mezclarlo con el combustible durante el periodo en que están fríos. El aire caliente vaporiza el combustible más rápido y ayuda en la distribución de combustible a todos los cilindros.

El control del sistema de aire caliente a la entrada, es una válvula de sensor bimetalico que controla el vacío del motor. Cuando la cinta bimetalica está fría, ésta se dobla hacia un lado haciendo que la conexión de la purga de aire permanezca sellada. El vacío que procede de la conexión del carburador se dirige directo a la puerta de vacío. Ésta es accionada por el motor de vacío y permite la entrada del aire hacia el filtro de aire, que atravesó la estufa de calentamiento. Segundos después de que se echa a andar el motor frío, el aire que entra al carburador se calienta con el calor que viene del múltiple de escape, entonces la gasolina comienza a vaporizarse con más rapidez.

El aire caliente que pasó por el filtro de aire es percibido por la válvula bimetalica, que comienza a doblarse para el otro lado, abriendo la conexión para que el aire entre al circuito del vacío. La puerta de la válvula del motor de vacío se mueve para bloquear parcialmente el aire caliente. Esto permite que entre un poco de aire frío y se mezcle con el caliente. Pronto se establecerá una mezcla de aire que permitirá la vaporización de la gasolina y así obtener una razonable mezcla aire-combustible.

Cuando el motor se calienta, se requiere menos calor en el aire que entra. Puede utilizarse un interruptor térmico de vacío en el circuito de vacío, para cortarlo hacia el sistema después que el motor ha alcanzado la temperatura de operación (fig. 2.3) [4].

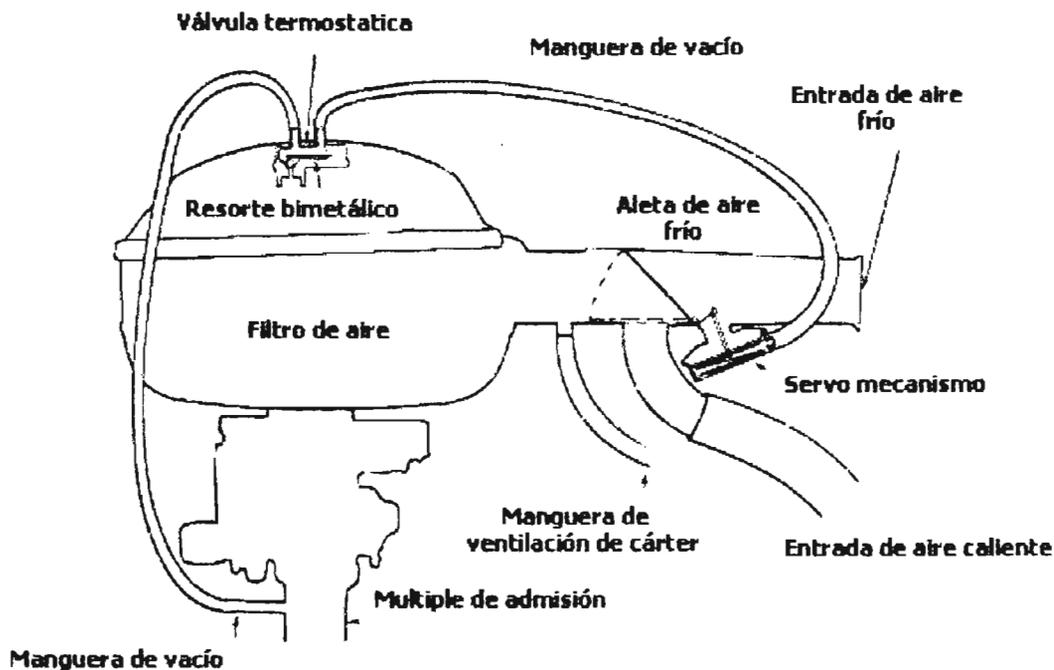


Figura 2.3. Dispositivo precalentador del aire de admisión controlado por vacío y temperatura.

Existen dos sistemas básicos de inyección de aire. Uno utiliza una bomba de inyección de aire para suministrarlo al sistema de escape. El otro, conocido como “pulsos de aire” o sistema de “aspiración”, está diseñado para utilizar pulsos de presión negativos del sistema de escape para llevar aire fresco a la salida del cabezal.

La inyección de aire al interior del sistema de escape se usa en muchos sistemas de control de emisiones contaminantes. Cuando los gases de escape salen de la cámara de combustión, como se mencionó, todavía contienen combustible que no se ha quemado. La adición de aire a estos gases hará que la combustión sea más completa.

En el sistema que utiliza una *bomba de inyección* se tendrá un filtro en el lado de admisión de la bomba, o un ventilador centrífugo, para evitar que entre la suciedad. Una válvula de control dirige el aire bombeado al convertidor catalítico o al sistema de escape, o lo desvía hacia la atmósfera o al filtro de aire, cuando no se necesita para los controles de emisiones. Una válvula de retención evita que los gases regresen a la cámara o a la bomba.

La válvula con derivación de los automóviles antiguos es accionada por un diafragma y una señal de vacío desde una fuente de vacío de múltiple (Fig. 2.4). Cuando el vacío es bajo, durante la aceleración y accionamiento eléctrico más elevado del motor, se inyecta aire a los gases de escape. Cuando el vacío del múltiple es elevado, durante la desaceleración o en régimen de marcha mínima, el aire que viene de la bomba se desvía a un silenciador.

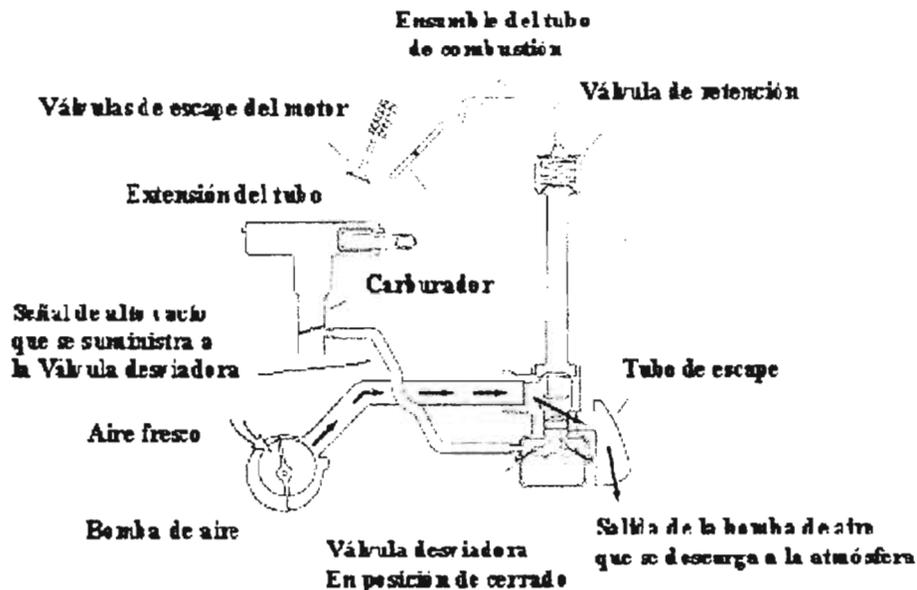


Figura 2.4. Sistema de inyección de aire en la válvula desviadora activada por vacío.

Algunos vehículos están equipados con un sistema de inyección de aire que, para funcionar, dependen de los *pulsos de presión negativa* que hay en el sistema de escape. Esos pulsos son muy fuertes en régimen de marcha mínima o precisamente fuera de éste. El aire puro es succionado al interior del sistema de escape entre los pulsos de la presión de escape. Este sistema permanece cerrado cuando el motor está funcionando a velocidad más elevada.

Los sistemas de control de emisiones, controlados por computadora, pueden usar una válvula accionada por el vacío controlada por solenoide. La función de la válvula es la misma, pero el solenoide controla con más exactitud el vacío que va hacia la válvula. La computadora envía la señal al solenoide para que pase o no el vacío a la del desviador.

Este exceso de aire oxidará los HC y CO en los puertos de escape o el cabezal que suministrará aire para los convertidores de oxidación, y dará aire para la segunda cama de un catalizador de tres vías con aire.

CAPÍTULO 3 SISTEMA DE CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A EVALUAR (sistema retrofit)

El sistema RETROFIT es de marca Neutronics y consta de un módulo de control electrónico (micro controlador), cable con conector de cinco terminales, un sensor de oxígeno y de una válvula de control de aire. Este sistema fue diseñado para que los vehículos que operan con sistema de carburador, puedan trabajar en circuito cerrado [19].

Este sistema puede ser instalado en vehículos con o sin bomba de aire, tomando en cuenta que los automóviles que no cuenten con bomba de aire, deben tener una válvula de ventilación positiva de cárter (PCV) u otro medio para proveer de aire al múltiple de admisión.

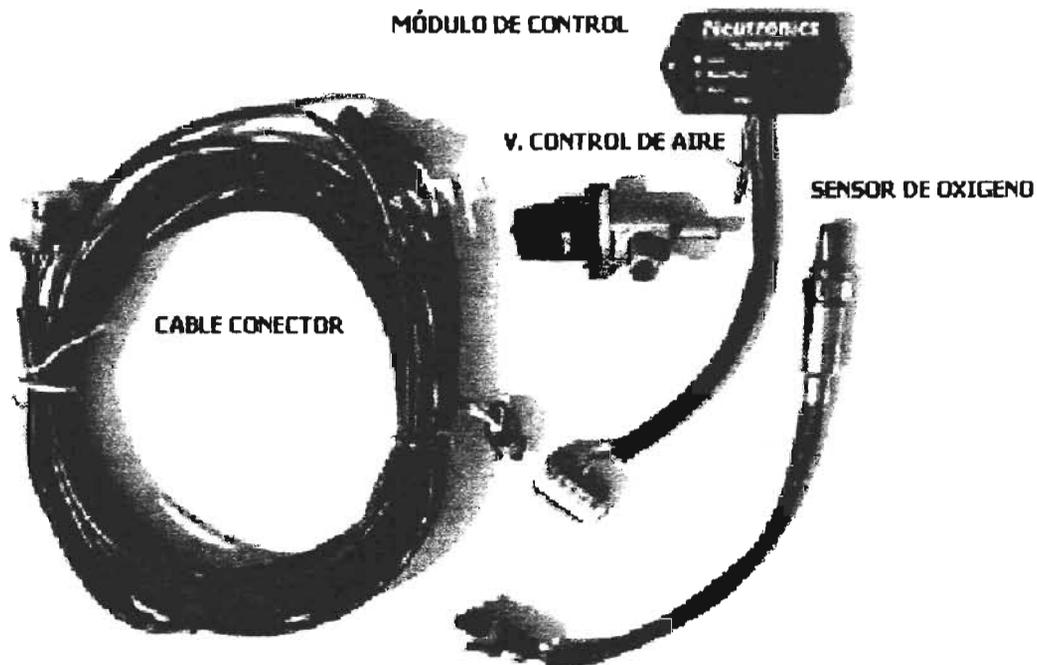


Figura 3.1. Sistema Retrofit.

El sistema de retroalimentación de O_2 (RETROFIT), controla -y es controlado- por los niveles de oxígeno contenidos en los gases del escape. Para ello, se auxilia de un sensor de oxígeno, que se instala a la entrada del convertidor catalítico de tres vías para detectar la cantidad de oxígeno contenido en los gases del escape. El módulo de control electrónico, recibe una señal eléctrica del sensor de oxígeno (ver sensor de oxígeno) la cual interpreta como gases de combustión ricos o pobres y mediante una válvula de control de aire, el

módulo de control electrónico puede controlar la cantidad de aire que se necesita para obtener una mezcla de aire-combustible cercana a la estequiométrica, es decir, cuando el sensor de oxígeno detecta niveles elevados de oxígeno, quiere decir que la mezcla es pobre, entonces manda la señal eléctrica al módulo de control para que la válvula de control de aire estrangule el flujo de éste hacia el múltiple de admisión, logrando con ello que la mezcla se enriquezca. Luego, mientras que los niveles de oxígeno del escape comienzan a bajar, las señales del sensor muestran al módulo de control que la mezcla es ahora rica y el módulo manda la señal a la válvula de aire para que permita el paso de más aire hacia el múltiple de admisión, volviendo a la mezcla nuevamente pobre. *Se dice por esto que el sistema está operando en circuito cerrado.*

Cuando el motor está en circuito cerrado, decimos que el módulo de control electrónico está regulando la mezcla aire-combustible al mantenerla cerca del nivel estequiométrico a 14.7:1.

3.1.1 Micro Controlador Neutronics

El módulo de control tiene tres luces indicadoras (de colores verde, amarillo y rojo) que nos describen cómo está trabajando el motor. Cuando se enciende el switch del vehículo, las tres luces se prenderán momentáneamente, indicando que el sistema está listo. Entonces la luz verde permanecerá encendida.

Una vez que el motor alcanza cierta temperatura, la luz verde comenzará a parpadear. Este parpadeo es en proporción a la velocidad del motor (entre más velocidad alcance el motor más rápido parpadeará).

Después de que el motor ha alcanzado su temperatura de operación, las luces roja y amarilla alternarán encendiendo y apagando (la luz verde permanecerá parpadearando). Lo que significa que el módulo de control está regulando la mezcla aire-combustible llevándola de rica a pobre y de pobre a rica, según lo requiera el motor. La luz roja nos indica que se tiene una mezcla rica en combustible y amarilla una mezcla pobre.

Para la instalación del módulo de control, el sistema cuenta con un conector de cinco terminales destinadas para lo siguiente:

Una terminal (cable rojo), que será conectada a la terminal de 12 Volts del switch de encendido.

Una terminal (cable negro), que se conectará a tierra.

Una terminal (cable verde), que se conectará a la terminal negativa de la bobina de ignición; este cable es la entrada para registrar la velocidad del motor.

Una terminal donde se conectará la válvula de control de aire.

Y una más para conectar el sensor de oxígeno que se localizará a la entrada el convertidor catalítico.

3.1.2 Sensor de oxígeno

El sensor de oxígeno es una parte integral del sistema de control de emisiones. Este sensor tiene la forma de un dedal y está hecho de zirconia (dióxido de zirconio), produce una señal de voltaje basándose en la diferencia del nivel de oxígeno que hay dentro del escape y en el aire exterior.

La zirconia actúa como un electrolito sólido para los iones de oxígeno. Ambos lados, interior y exterior del sensor, están cubiertos con una capa de platino. El aire exterior, rico en oxígeno, fluye a través de la cinta de platino interna, mientras que los gases producto de la combustión, fluyen por la cubierta exterior de platino (fig. 3.2).

Cuando los gases de combustión alcanzan una temperatura aproximadamente de 600 °F (315.6 °C), el sensor genera una señal eléctrica debida a la alta carga estática sobre la cinta interior de platino, comparada con la baja carga estática en su capa exterior. Este voltaje oscila desde 100 milivolts hasta por arriba de los 900 milivolts.

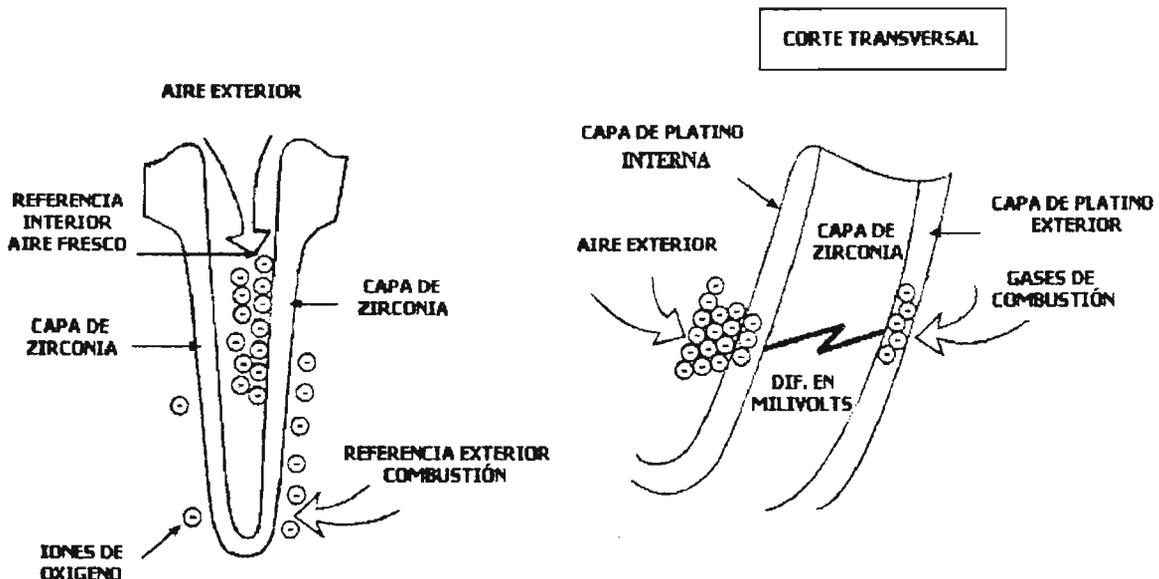


Figura 3.2. Principio de operación del sensor de oxígeno.

Si el sensor de oxígeno está en buen estado y el motor funciona adecuadamente, el voltaje mínimo que emita el sensor debe ser menor de 0.175 Volts y el máximo debe estar, por lo

menos, en 0.800 Volts, y el promedio debe andar alrededor de 0.450 Volts. En la siguiente figura se muestra la señal del sensor de oxígeno.

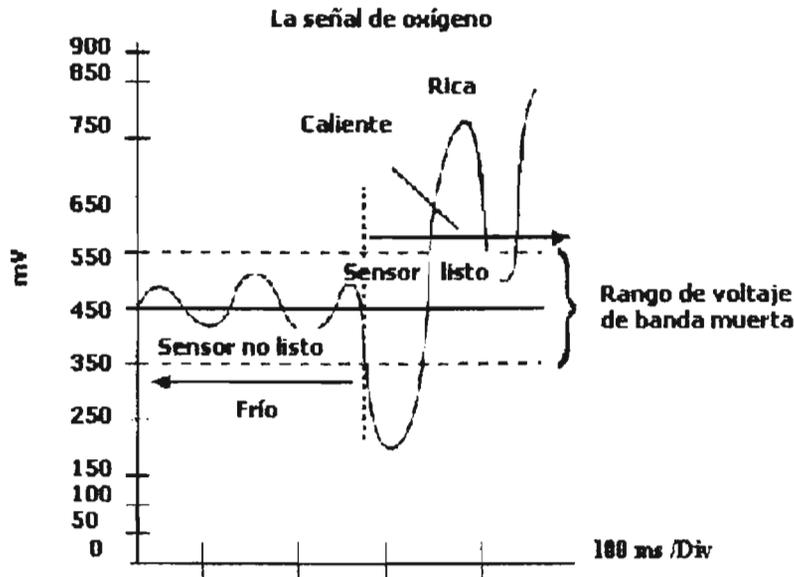


Figura 3.3. Señal eléctrica del sensor de oxígeno, el eje vertical muestra la magnitud de voltaje en milivolts y el eje horizontal muestra el tiempo de respuesta en milisegundos.

Cuando el módulo de control recibe una señal del sensor de oxígeno, la registra como gases de combustión ricos o pobres, y ajusta la relación de la mezcla proporcionalmente para adecuarla a la ideal. Para el módulo de control, un voltaje del sensor de oxígeno de 0.450 Volts le indica que el motor está recibiendo una mezcla con una variación de más-menos 0.3 de la mezcla ideal de 14.7:1. Una señal del sensor de oxígeno menor a 0.450 Volts, le indica que la mezcla aire-combustible que se está entregando al motor es pobre y para una señal mayor a 0.450 Volts le indica que la mezcla es rica en combustible.

3.1.3 Convertidor catalítico tres vías

El convertidor de tres vías, con objeto de oxidar los HC y CO, requiere de una relación de mezcla aire-combustible menor a 14.7:1, pero también para reducir los NOx, el convertidor requiere de una mezcla de aire-combustible mayor a 14.7:1 para trabajar eficientemente.

La siguiente figura muestra el efecto de la relación aire-combustible en la eficiencia del convertidor

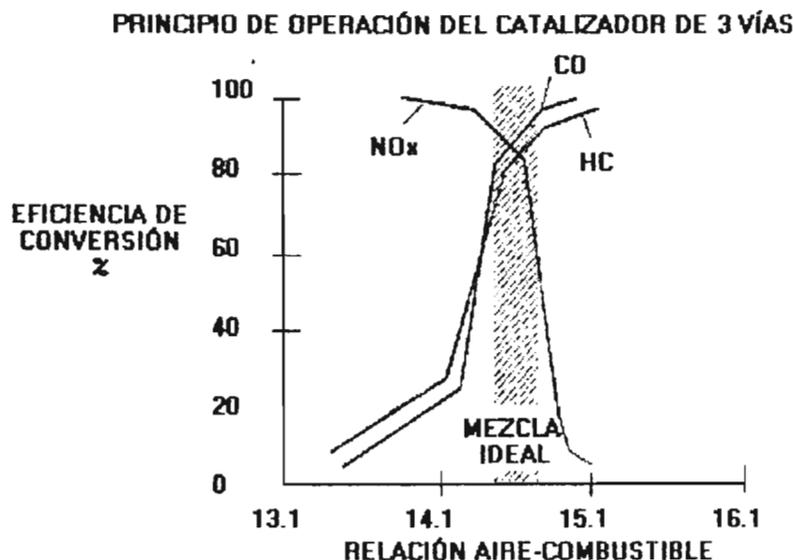


Figura 3.4. Eficiencia de conversión del convertidor catalítico tres vías.

Como se mencionó, los sistemas de alimentación de combustible auxiliados de la electrónica son mucho más eficientes hoy en día en el control de emisiones contaminantes, ya que pueden controlar y proporcionar las mezclas de aire-combustible requeridas por el motor en sus diferentes condiciones de operación y dada la relación aire-combustible que necesita el convertidor para un mejor desempeño, podemos darnos cuenta que el convertidor de tres vías requiere de un módulo de control electrónico auxiliado de un sensor de oxígeno que registre el contenido de éste en los gases de combustión y retroalimente, con esta información, al módulo de control electrónico.

3.2 MÉTODOS ALTERNOS PARA EL CONTROL DE EMISIONES

3.2.1 Recirculación de los gases de escape (EGR)

El sistema (EGR) fue diseñado para reducir el nivel de óxidos de nitrógeno de las emisiones del escape. Parte del gas de escape es desviado, precisamente, antes de entrar al tubo de escape y es enviado a un filtro ciclónico, encerrado (rodeado) por serpentines enfriadores.

El gas caliente de escape es sometido a un proceso de limpieza y enfriamiento, después del cual es realimentado en el múltiple de admisión, listo para ser vuelto a quemar dentro de las cámaras de combustión. (recordando que a altas temperaturas se generan NOx).

Una válvula de recirculación accionada por vacío, que se encuentra en el múltiple de admisión y en la trayectoria de retorno del gas de escape tratado, controla el flujo del gas al múltiple de admisión y a las cámaras de combustión.

3.2.2 Sistema de ventilación de cárter

El motor está equipado con un sistema sellado de ventilación del cárter, construido alrededor del conjunto de la boquilla de llenado de aceite y el respiradero.

En este tipo de sistema la tapa de la boquilla de llenado de aceite, está sellado (herméticamente) y no se le proporciona al cárter una entrada de aire fresco para ventilación.

La pequeña cantidad de aire necesaria para expulsar los gases, entra al cárter por el conducto de la varilla medidora y por los diferentes sellos, etc., guiado, dicho aire, por la influencia del vacío parcial existente en el cárter, cuando el motor está funcionando.

El aire se mezcla con el gas que sale del cárter, y son guiados dentro de la admisión del conjunto del filtro de aire y de ahí, la mezcla es conducida hacia dentro del motor y consumida en la cámara de combustión.

3.2.3 Sistema de evaporación

Este sistema es otro intento para reducir las emisiones de hidrocarburos en los gases de escape. Se ha calculado que aproximadamente el 10% de todas las emisiones automotrices de hidrocarburos, son el resultado de pérdida por evaporación proveniente del tanque de combustible y del carburador.

Cuando el motor está parado, los vapores del combustible causados por la evaporación, llenan gradualmente el espacio de aire del tanque de combustible, del tanque de expansión y del separador de vapores-líquido.

Como el tanque de combustible está equipado con un tapón de llenado sellado efectivamente, se crea una presión de vapores de gasolina dentro del sistema. El tanque de expansión está interconstruido en la sección superior del tanque de combustible

El separador vapores-líquido, como su nombre lo dice, separa el combustible líquido de los vapores. Ambos lados del separador están equipados con mangueras de desagüe y ventilación, lo cual asegura una ventilación adecuada al filtro de carbón activado y un retorno al tanque de combustible.

Los vapores de gasolina, provenientes del separador, son encaminados al bote de carbón, que absorbe los vapores. Uno de los extremos del filtro de carbón activado está conectado a la cubierta del ventilador del motor y el otro al filtro de aire del carburador.

Cuando el motor arranca, el aire de enfriamiento proveniente del ventilador es forzado a entrar en el filtro de carbón activado para ser regenerado.

La manguera de succión del filtro de aire guía los vapores cargados de hidrocarburos, provenientes del filtro de carbón, para que puedan ser consumidos durante el proceso de combustión del motor (fig. 3.5).

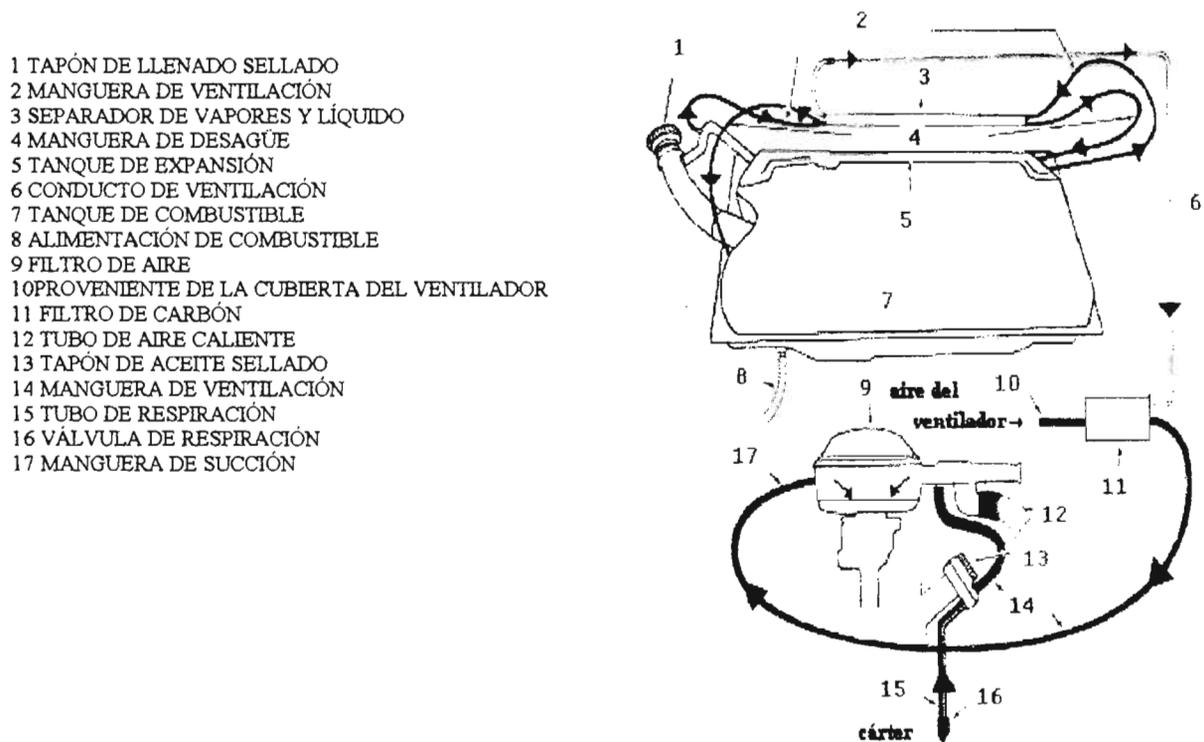


Figura 3.5. Disposición de los sistemas de evaporación y ventilación de cárter.

3.3 FACTORES QUE AFECTAN EL BUEN DESEMPEÑO DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO

El sistema de control de emisiones incorpora numerosos dispositivos para cumplir con la tarea de mantener al mínimo las emisiones de CO, NO_x, HC, y todo ello bajo cualesquiera condiciones de operación del motor, es decir, a baja o alta velocidad, cuando el motor está frío, en demanda de mayor potencia, etc.,

Se ha encontrado que el factor más crítico para reducir estas emisiones en el sistema de escape, es la relación aire-combustible de la mezcla de inducción. El tiempo de encendido, la temperatura del motor y el estado en que se encuentra el motor. Son también factores que se deben tomar en cuenta:

- a) Cuando la relación aire-combustible es mayor a la estequiométrica (14.7:1). En los productos de la combustión tendremos O₂ y NO_x como consecuencia del exceso de aire en la mezcla. Si la relación aire-combustible es menor a la estequiométrica, en los productos de la combustión aparecen nuevos compuestos parcialmente oxidados como CO, H₂, aldehídos, peróxidos e hidrocarburos (HC's) sin quemar.
- b) La mezcla suministrada que se encuentra en la superficie del pistón, del cilindro y de la culata, puede evacuar calor fácilmente debido a que las superficies del cilindro y de la culata, principalmente, están enfriadas por aire o por agua, por lo que se generan gradientes de temperatura que no son suficiente para que la llama originada por la chispa de encendido progrese, deteniéndose a cierta distancia de la superficie, ocasionando que la mezcla no se queme y sea arrastrada durante la carrera de expulsión a través del conducto de escape, con una cantidad de hidrocarburos sin quemar. Esto conduce a la formación de compuestos contaminantes de escape, principalmente HC's y CO.
- c) El exceso de combustible en la mezcla puede ocasionar que los electrodos de las bujías y válvulas de escape se quemen, trayendo como consecuencia, problemas en la generación de la chispa y mal asentamiento de las válvulas, permitiendo con esto la salida de hidrocarburos sin quemar.
- d) En el proceso de combustión, la temperatura elevada en la cámara de combustión desplaza el equilibrio de la reacción hacia productos intermedios (reacciones intermedias), produciéndose una serie de radicales como O⁻, H⁺, N+C_x, H-y, etc.; que al reaccionar entre sí generan compuestos contaminantes.
- e) Un excesivo flujo de aceite a través del sistema de escape, producido por desgaste de los anillos del pistón, paredes del cilindro y guías de válvulas, contaminan el catalizador e inhiben la acción de convertidor catalítico.

Así como otros factores deben tomarse en cuenta para garantizar que el motor no tenga desperfectos que puedan propiciar la generación de compuestos contaminantes y poder tener niveles de emisiones bajas que sean aceptables para el medio ambiente.

3.4 DIAGNÓSTICOS A BORDO (OBD)

En los siguientes párrafos se describe brevemente la evolución y características generales de los sistemas de diagnósticos a bordo, como antecedente de los avances tecnológicos que se han logrado para el control de emisiones contaminantes, tratando de no desviar nuestra atención del objetivo principal de este trabajo.

Como sabemos ahora, las computadoras evolucionan constantemente, de tal manera que la capacidad de procesamiento de los últimos adelantos en computación, no tendría porqué ser ajenos a los vehículos. Gracias a estos avances tecnológicos, hoy en día se cuenta con dispositivos y sistemas que pueden proporcionar un diagnóstico de las condiciones en las cuales está operando el vehículo.

El OBD es un sistema computarizado que detecta cualquier falla que afecte el buen funcionamiento del vehículo.

El OBD I comenzó a funcionar en California con el modelo del año 1988, que monitoreaba algunas partes del sistema como son: sonda lambda, sistemas EGR y ECM (módulo de control). El gran problema encontrado en este sistema fue que no era capaz para detectar ciertas fallas, como por ejemplo, problemas relacionados con emisiones de gases, fallas en el convertidor catalítico, así como también, que no estaban normalizados, dificultando con esto el diagnóstico de fallas.

En 1989, comenzaron los estudios para establecer una norma completa con normalización llamada OBD II, que fue implantada inicialmente en California en 1994. Solamente, a partir de 1996, la norma fue adoptada en todos los Estados Unidos de América.

Los sistemas OBD II, reúnen los requisitos adecuados para monitorear y detectar fallas permanentes o intermitentes que podrían hacer que el vehículo contamine el medio ambiente. Almacena una gran cantidad de códigos generales de problemas, junto con códigos específicos de los fabricantes.

La computadora del sistema OBD II controla la relación aire-combustible, la velocidad de marcha en vacío, el avance por vacío y los controles de emisiones; en algunos casos también la transmisión, los frenos y el sistema de suspensión.

Los códigos obtenidos deben ser interpretados en forma específica, reuniendo el manual del vehículo, ya que cada fabricante programa su computadora con sus propios códigos. Esto

podría ser un inconveniente, pero la ventaja es que en la red (web) existen direcciones de fácil acceso, que tienen a disposición del visitante bancos de datos de estos códigos totalmente gratis.

CONECTOR DE DIAGNÓSTICO

Es del tipo de 16 pines:



Debe estar localizado en la zona del conductor, debajo del panel de instrumentos.

Descripción de los Pines

- 2 - Comunicación SAE VPW/PWM
- 4 - MASA Vehículo
- 5 - MASSA Señal
- 7 - Comunicación ISO 9141-2 (Línea K)
- 10 - Comunicación PWM
- 15 - Comunicación ISO 9141-2 (Línea L)
- 16 - POSITIVO BATERIA

COMUNICACIÓN CON EL ESCÁNER

Existen básicamente tres tipos de comunicación que pueden ser utilizadas y son escogidas por la montadora:

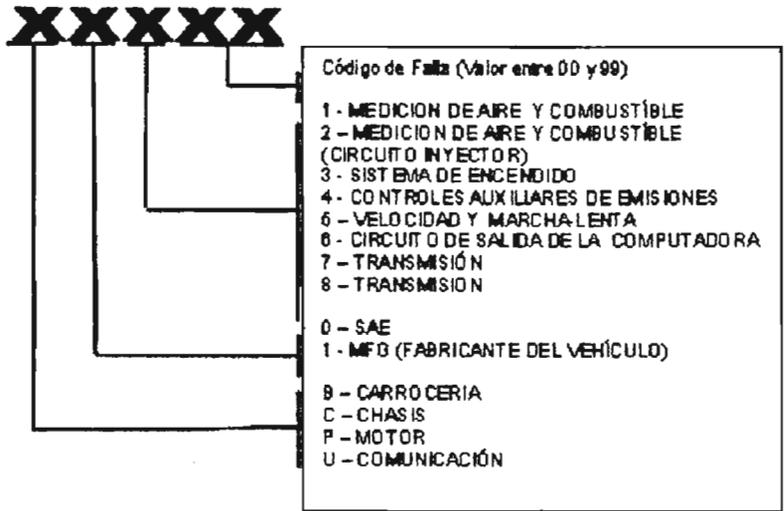
- SAE VPW - modulación por ancho de pulso variable
- SAE PWM - modulación por ancho de pulso
- ISO 9141-2 - comunicación serial

Estos sistemas de comunicación obedecen a patrones de pedido-respuesta llamado "protocolo de comunicación". Fueron detectados los siguientes patrones utilizados por las montadoras:

- VPM -- GM
- PWM -- FORD
- ISO -- MITSUBISHI, NISSAN, VOLVO, DODGE, JEEP y CHRYSLER

CÓDIGOS DE DEFECTOS

El formato de los códigos de defectos debe tener la siguiente presentación:



LECTURAS

Además de códigos de defecto OBD II, permiten la verificación de varias lecturas en tiempo real como por ejemplo: rpm, sonda lambda, temperatura del motor, carga del motor, velocidad del vehículo, avance al encendido, temperatura del aire, sondas después del catalizador, etc.

Las lecturas son genéricas y los valores dependen del tipo de inyección analizada.

Lecturas congeladas: son lecturas que quedan fijadas con los valores que presentaban en el momento en que fue identificado un defecto. Están además previstas en la norma monitoreos de componentes como: lámpara de advertencia, sonda lambda después del catalizador (para verificar su eficiencia), monitoreo de la válvula EGR y canister, monitoreo del sistema ABS y sistema de cambio, suspensión, etc.

CAPÍTULO 4 DESARROLLO DE PRUEBAS

4.1 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE MEDICIÓN

4.1.1 Banco de motor

En el Laboratorio de Control de Emisiones (LCE) se cuenta con diferentes motores de banco que se han empleado en diversas investigaciones y ensayos. Particularmente y con el interés de este trabajo, el LCE cuenta con un motor de combustión interna alternativo de cuatro tiempos (fig. 4.1).

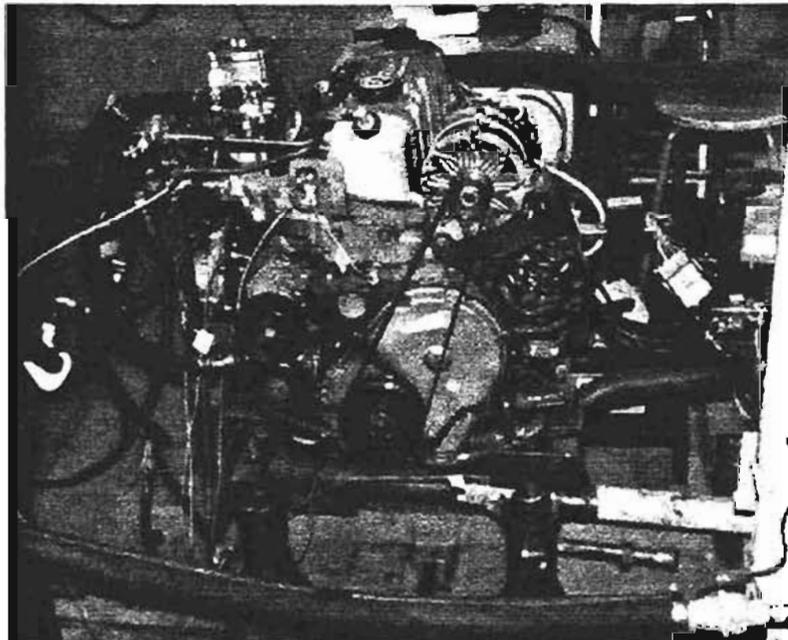


Figura 4.1. Motor de banco

Este motor, es de marca Ford modelo 1989, cuatro tiempos, carburado, enfriado por agua, cuatro cilindros dispuestos en línea que representan en conjunto una cilindrada total de 2309 cm³, tiene una carrera de 8.4 cm, un diámetro de pistón de 9.35 cm, una potencia máxima de 100 HP @ 5000 rpm, un par máximo de 120 lb*ft @ 3400 rpm, con una relación de compresión de 9:1. Originalmente es alimentado con gasolina, pero fue acondicionado para poder alimentarlo con diversos combustibles alternos.

Como accesorios adicionales del motor, se tienen una flecha de acoplamiento, guarda de seguridad y torre de enfriamiento. Cabe mencionar que el motor de banco es controlado desde la sala de control a través de una consola que gobierna y adquiere información del motor [12].

4.1.2 Freno hidráulico

El freno hidráulico (fig. 4.2) con el que cuenta el LCE , es de marca CLAYTON modelo A-31050 de la serie CAM-250-10456, cuya capacidad máxima es de 250 HP @ 8000 rpm.

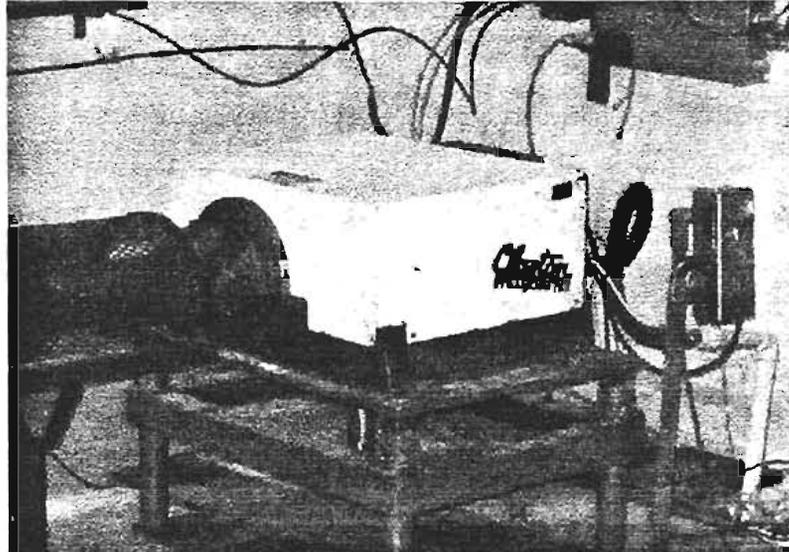


Figura 4.2. Freno hidráulico Clayton.

El eje de salida de potencia del motor, se conecta por medio de una brida al eje de lo que se conoce como Unidad de Absorción de Potencia (PAU por sus siglas en inglés), haciendo girar de esta manera al rotor de la PAU. Un sensor de velocidad convierte el giro en una señal de velocidad; a su vez una celda de carga convierte la resistencia de la PAU en una señal de torque. La potencia absorbida como calor en el agua de la PAU es extraída y disipada con agua fría en un intercambiador de calor. El volumen de agua en la PAU, determina el nivel de resistencia mostrado por el motor.

El freno hidráulico CLAYTON lleva incorporado un tacómetro de tipo magnético que cuenta los pulsos de un disco perforado. De esta forma, a partir del par y el régimen, puede determinarse la potencia.

El sensor de velocidad que proporciona los pulsos, es un generador especial de señal eléctrica, produce un pulso de corriente directa cada vez que el sensor magnético detecta una discontinuidad por las perforaciones que tiene el disco de lectura de velocidad.

4.1.3 Analizador de gases

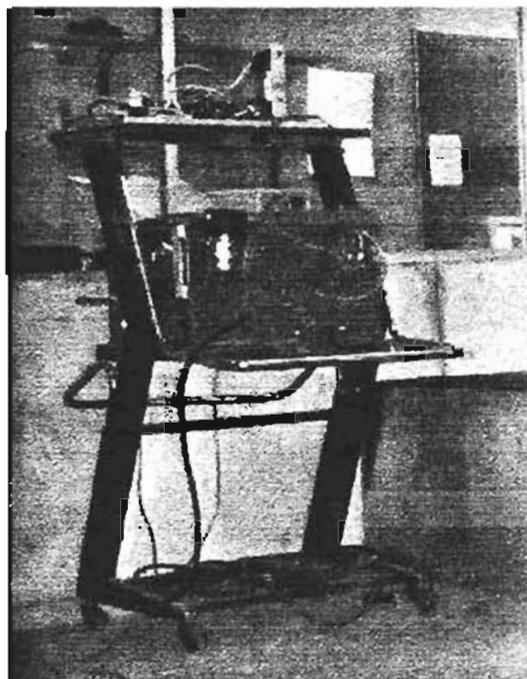


Figura 4.3. Analizador de gases Andros.

Para llevar a cabo el análisis de los gases de escape del motor, el LCE cuenta con un analizador de cinco gases de marca ANDROS Incorporated Modelo 6600 (fig. 4.3).

Este analizador es controlado por un sistema central de procesamiento digital que es capaz de comunicarse con la computadora personal a través de una interfaz serial asíncrona. Este dispositivo fue ensamblado en el Laboratorio de acuerdo a una configuración propia, con el fin de contar con un instrumento acorde a ciertas necesidades específicas. Puesto que forma parte de un instrumento "virtual", el conjunto carece de indicadores y controladores físicos. Todo el conjunto puede gobernarse por medio de software dedicado, que puede adaptarse a las más exigentes necesidades. De esta forma, el usuario decide qué variable desea monitorear y en qué formato (gráfico, alfanumérico, etc.)

Este analizador utiliza el método de infrarrojo no dispersivo (NDIR). Este método se basa en los principios de absorción de energía de los gases. En un instrumento NDIR sencillo, la energía infrarroja pasa a través de dos tubos idénticos y termina en un detector. El primer tubo es la celda de referencia y es llenada con un gas no absorbente como el nitrógeno. El segundo tubo es la celda de medición y contiene la muestra de gas que va a ser analizada, la energía en la región de interés es absorbida por el gas en la celda de medición, atenuando la energía que pasa a través de la celda, para terminar en el detector.

Esta atenuación de energía es comparada con la señal no atenuada de la celda de referencia, la diferencia es proporcional a la cantidad de gas absorbente en la celda de medición.

El analizador 6600 utiliza el principio de NDIR para caracterizar las concentraciones de HC, CO, y CO₂. La concentración de un volumen de gas es una función de la cantidad de moléculas de gas en la muestra. La absorción de luz infrarroja se incrementa con el número de moléculas de gas que pasan por el haz de luz. Podemos decir, entonces, que la concentración del gas incrementa la absorción de luz infrarroja, haciendo que la transmisión de esta luz disminuya.

La concentración de O₂ y NO_x es medida por medio de sensores electroquímicos; los sensores proporcionan una respuesta eléctrica que es proporcional a la concentración del gas en la muestra.

El gas es dirigido desde la celda de muestreo a un multicolector que sirve como una plataforma de montaje para los sensores electroquímicos de O₂ y NO_x. El gas de la muestra es liberado a los sensores de O₂ y NO_x a través del multicolector. El sensor de O₂ proporciona una salida lineal de 9 a 13 mV que es proporcional a la concentración de oxígeno de 0 a 100 % en la muestra. El sensor de NO_x proporciona una salida lineal de aproximadamente 50 nanoampers sobre ppm (partes por millón) de óxido de nitrógeno en el rango de 0 a 5000 ppm en la muestra. Una batería de 3 V es incluida con el sensor de NO_x para mantener un voltaje cuando la fuente de poder no esté operando.

La salida del sensor es enviada a un transductor que proporciona un valor digital que representa la concentración del gas. Esta concentración es determinada por la comparación de la salida del sensor calibrado con la salida obtenida de la muestra.

4.1.4 Banco de flujo estacionario

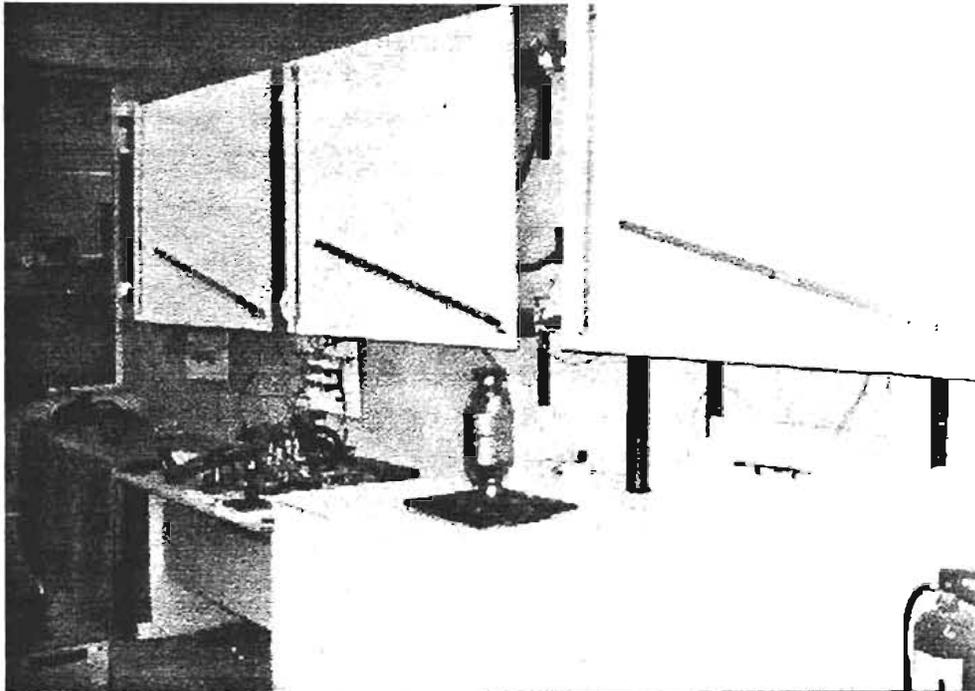


Figura 4.4. Banco de flujo estacionario.

A menudo es deseable medir la masa o volumen que pasa por un conducto. Para ello, el LCE cuenta con un banco de flujo estacionario (fig. 4.4).

Este banco es un equipo que basa su principio de funcionamiento en la teoría de la obstrucción [5]. Cuenta con instrumentos de medida con pérdida de carga (orificio en placa delgada) que obstruyen el flujo y provocan una caída de presión; esta caída nos sirve para cuantificar el flujo que circula a través de accesorios y dispositivos que se pretendan evaluar en el laboratorio.

El banco de flujo está constituido por los siguientes equipos y accesorios:

- Equipo generador de flujo de aire, (turbo soplador) que tiene una capacidad de caudal máximo de $0.222 \text{ m}^3/\text{s}$ y una presión máximo de 508 milímetros de columna de agua (mm H_2O). Tiene la dualidad de aspirar e impulsar el flujo de aire.
- Dos líneas de conducción de aire. Cada una tiene acoplada por medio de bridas, una placa de orificio. Las secciones reducidas de cada línea (1 y 2) son 12.5 mm y 27 mm respectivamente.

- Una toma de aire, que se regula con una válvula de bola que permite el paso de aire hacia el depósito de remanso y, posteriormente, a los elementos a caracterizar.
- Un depósito de remanso cuya función es atenuar los efectos pulsatorios y disipar las turbulencias que produzca el generador de flujo; de este modo se evita generar errores en la toma de lecturas. En este depósito se colocan los dispositivos a evaluar.
- Tres paneles de válvulas de control compuestos de circuitos de aire conectados a los manómetros y controlados por válvulas de bola de precisión, que modifican el flujo de aspiración o de impulsión y para cambiar la línea de conducción de aire.
- Un módulo de control de temperatura, que consta de un conjunto de termopares crómel-alumen, multímetro digital de canal múltiple y sensores situados aguas abajo de la válvula de cada línea, aguas arriba de la válvula previa al depósito de remanso.
- Tres paneles con manómetros de tubos de cristal, donde se mide la presión en columnas de agua.

El banco de flujo tiene un programa que nos ayuda a procesar los datos obtenidos de dichas pruebas y, de esta manera, obtener el coeficiente de flujo. Este programa está pensado expresamente para la estructura del Banco de Flujo Estacionario del Laboratorio de Control de Emisiones, en función de los parámetros geométricos y las consideraciones termodinámicas del equipo como son las dimensiones de sus componentes, tales como los diámetros de conductos, las dimensiones de las placas de orificio utilizadas para medir el flujo y otras consideraciones particulares de cada caso [11].

4.1.5 Dinamómetro de chasis

El dinamómetro de chasis del LCE, es un modelo "Road-a-Matic" tipo "XI/1", manufacturado por Sun Dynamometers en la década de los 70's. Cuenta con una unidad de control que permite coordinar la ejecución de una secuencia en marcha, (variando potencia, velocidad), con un sistema que integra e interrelaciona el analizador de gases, permitiendo la cuantificación de los productos contaminantes emitidos durante la misma.

Los elementos que conforman el dinamómetro se pueden observar en la figura 4.5.

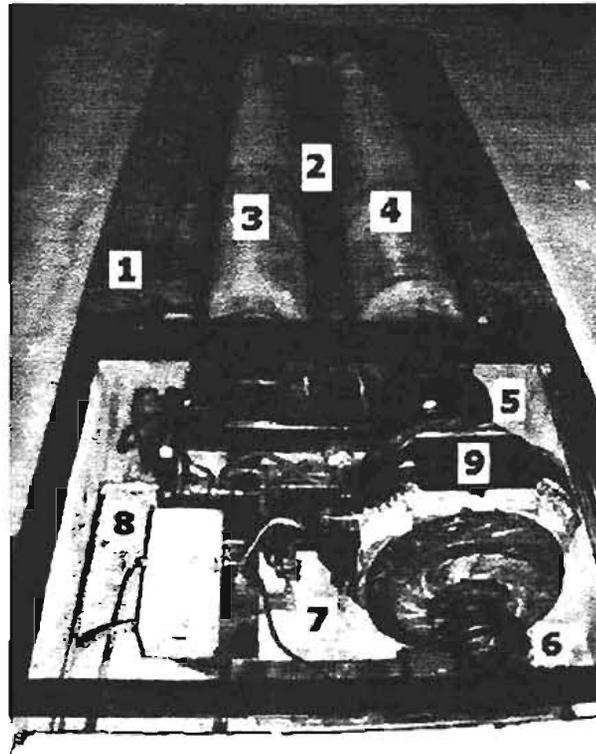


Figura 4.5. Dinamómetro de chasis.

Los elementos que integran al dinamómetro de chasis se describen a continuación:

1 Chasis

El chasis es la estructura que soporta los rodillos, la PAU, las placas antiderrapantes y al propio vehículo (cuando se hace una prueba).

2 Colchón

Es un dispositivo utilizado para liberar el vehículo de los rodillos, se utiliza una plataforma de colchón de aire, controlado por medio de una válvula neumática, tomando el aire comprimido de la red, pasando por un regulador a una presión de 20 psi.

La figura 4.6, presenta las acciones para sujetar o liberar un vehículo. En la posición del inciso a) el vehículo se encamina hacia la dirección dependiendo del tipo de tracción motriz (delantera o trasera); en el inciso b) se ilustra la posición del colchón de aire activado y el vehículo se puede colocar para el ensayo o retirarlo del dinamómetro si el ensayo ya se

efectuó. En la posición del inciso c) el colchón se encuentra desactivado y el vehículo descansa sobre los rodillos del dinamómetro, listo para realizar el ensayo.

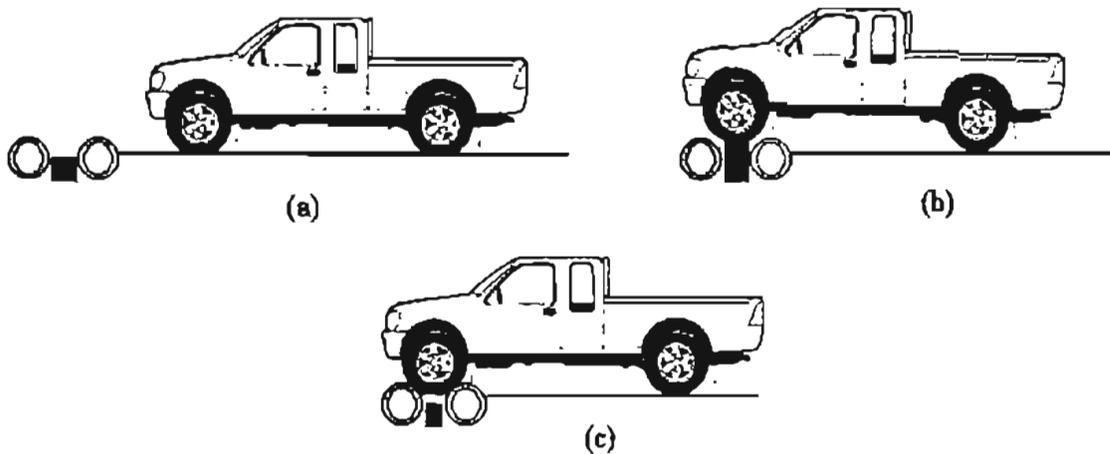


Figura 4.6. Posiciones del colchón de aire y vehículo.

3, 4 Rodillos trasero y delantero.

Los rodillos sirven de plataforma de manejo y están constituidos por un cilindro de acero de 2.15 [m] de longitud, un radio exterior de 0.16 [m] y un espesor de 7.93 [mm], montados en un eje (flecha) y apoyados en rodamientos (chumaceras).

El rodillo delantero se encuentra acoplado a una PAU y un sistema de medición de velocidad angular (tacómetro), mientras que el rodillo trasero es usado únicamente para la medición de velocidad angular.

5 Unidad de acoplamiento.

Es un sistema de acoplamiento rígido, que une al rodillo delantero directamente con la PAU.

6 Sensor de velocidad.

Los sensores de velocidad angular consisten de dos partes: la primera está conformada por dos discos metálicos acoplados directamente al eje de los rodillos delantero y trasero, los discos cuenta con 16 perforaciones en su semicircunferencia; la segunda parte es un sistema de emisor y receptor de luz que se encuentra ubicado de tal manera que las perforaciones de los discos, al pasar, interrumpen el haz de luz, proporcionando una señal eléctrica en el receptor.

7 Celda de carga.

Es una barra de acero con galgas extensiométricas montadas en su superficie, que al ser aplicada una fuerza o un peso a lo largo de su eje, ésta proporciona una señal de voltaje en función del cambio de resistencia que presentan las galgas. De esta forma se cuantificará el par de frenado.

8 Válvula neumática.

Ésta es parte del sistema neumático, compuesto por un compresor, líneas de transporte y válvulas neumáticas; se encarga de suministrar de aire comprimido a la plataforma de colchón de aire.

9 Unidad de Adsorción de Potencia.

La PAU del dinamómetro es de corrientes parásitas, que frenar a las ruedas motrices del vehículo, tanto como la prueba lo requiera. La PAU se encuentra acoplada al rodillo delantero por medio de un acoplamiento rígido.

Con un programa preestablecido, se pretende simular una “carga de camino” que representa la potencia demandada al motor para mover el vehículo a una cierta velocidad y aceleración, así como la resistencia de rodadura y la de arrastre del aire. Un sistema de freno de potencia que por corrientes parásitas actúa solidario a uno de los rodillos del dinamómetro, ejerciendo en cada instante del ciclo en marcha, una fuerza que se opone al libre desplazamiento de las ruedas.

Se cuenta con un monitor en donde se despliega el ciclo de manejo que debe seguir el conductor durante la simulación.

4.1.6 Ciclos de manejo

Es un perfil de velocidades, trazado en un plano: velocidad – tiempo, que representa una forma típica de conducir en una ciudad y/o autopista, tomando en cuenta la tecnología del vehículo, las características del tráfico, de las carreteras, climáticas y geográficas (altitud, entre las más importantes) y también características de los mismos conductores. Estos ciclos de manejo tienen una gran importancia, entre otros fines, para planear adecuadamente el progreso de alguna ciudad, en el desarrollo de tecnología para los nuevos automóviles, en la validación de modelos que predicen el comportamiento de los vehículos en la vía pública, y en los inventarios de emisiones contaminantes en las grandes urbes, los que a su vez, permiten establecer estrategias para controlar el equilibrio ecológico del lugar (ciudad o región).

Ciclo de prueba IM240.

El IM240 es una prueba que fue desarrollada por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) para ayudar a reducir los niveles de emisiones contaminantes. En esta prueba se miden las emisiones, mientras el vehículo es conducido en un dinamómetro, en donde se simula el servicio del vehículo en condiciones reales de manejo. La prueba mide los gases emitidos por el vehículo como HC, CO y NO_x y, con la información de esta prueba, se pueden generar diagnósticos que ayudan en el proceso de reparación de los vehículos que fracasan la prueba.

La prueba actual del IM240 es completamente automatizada y comienza con una inspección de preparación, conduciendo el vehículo en el dinamómetro. El vehículo es refrenado, se le coloca en el tubo de escape la sonda del analizador de gases y se sitúa frente al motor un ventilador para evitar un sobrecalentamiento. El inspector "conduce" el vehículo como si condujera un carro en un juego de video, y consiste en aplicar el acelerador y el freno de acuerdo al ciclo prescrito desplegado en una pantalla de video computarizada. El tiempo máximo para la prueba es de doscientos cuarenta segundos (de donde viene el 240 de IM240), con una distancia recorrida de 3.1 kilómetros, a una velocidad promedio de 47.3 km/h y una máxima de 91.2. Las emisiones se reportan en unidades de masa por distancia recorrida y no se requiere de rutinas de pre-acondicionamiento como es el caso de los dos siguientes ciclos de prueba.

Ciclo de manejo Federal Test Procedure 75 (FTP-75)

En México, el ciclo de prueba FTP-75 se utiliza para la certificación de vehículos nuevos con un peso bruto vehicular menor a 3856 kg., la prueba simula una conducción de 17.7 kilómetros con una velocidad promedio de 32 km/h, el procedimiento de prueba está constituido por cuatro fases:

- Fase de transición en frío. Esta etapa simula la puesta en marcha del vehículo por la mañana, después de haber estado estacionado toda la noche. Se inicia con el arranque del motor y tiene una duración de 505 segundos.
- Fase de estabilización. Es cuando el motor alcanza cierta temperatura, siguiendo la secuencia del programa sin interrupciones.
- Apagado de motor. Una vez que se concluye la fase anterior, después de 1372 segundos, el motor es apagado por un periodo de 600 segundos.
- Fase en caliente. Esta fase es equivalente a reencender el vehículo después de haber sido calentado, conducido y detenido por un periodo de 505, segundos hasta terminar la prueba.

Prueba de aceleración simulada.

Es el procedimiento de prueba utilizado en la Zona Metropolitana del Valle de México, aplicado a vehículos en circulación con peso bruto vehicular de hasta 3856 kg, que utilizan como combustible gasolina, gas licuado de petróleo o gas natural, consiste en tres etapas:

- Revisión de humo y pre-acondicionamiento. Etapa correspondiente a la prueba de aceleración simulada (PAS); el vehículo, en el dinamómetro, es llevado a una velocidad constante de 24 km/h, en donde el motor es sometido a un requerimiento de potencia equivalente al 50% de la necesaria para acelerarlo a 1.556 m/s^2 durante un periodo de 30 segundos.
- Etapa 5024. Etapa similar a la revisión de humo, sólo que el periodo de prueba es de 60 segundos.
- Etapa 2540. Corresponde a la prueba de aceleración simulada; el vehículo en el dinamómetro es llevado a una velocidad constante de 40 km/h, en donde el motor es sometido a un requerimiento de potencia, equivalente al 25% de la requerida para acelerar al vehículo a 1.556 m/s^2 .

Ciclos de manejo característicos de la Ciudad de México

El LCE a desarrollado 5 ciclos de manejo representativos de la ZMVM para la investigación y desarrollo de proyectos en cuanto a emisiones se refiere [15].

Cada ciclo de manejo representa un recorrido diferente sobre la zona geográfica del distrito federal. Las rutas que describen a estos ciclos de manejo son las siguientes:

Ruta Noroeste:

Av. Cuitláhuac y Calz. Vallejo, Egipto, Floresta, Heliopolis, Av. 5 de Mayo, Santa Lucía, Calz. de la Naranja, Calz. de las Armas, Av. De las Culturas. Eje 5 Norte, San Pablo, Av. Gasoducto, Eje 4 Norte, antigua Calz. de Guadalupe, Eje 4 Norte, Calz. Azcapotzalco la Villa, Eje 4 Norte, y Eje 1 Poniente. El tiempo máximo de la prueba es de 966 segundos, con una distancia recorrida de 4.88 km, a una velocidad promedio de 18.2 km/h y una máxima de 77 km/h.

Ruta Noreste:

Av. de los 100 Metros, Insurgentes Norte, Othon de Mendizabal Oriente, Juan de Dios Batis, Miguel Bernal, Río de los Remedios, A. Acueducto de Guadalupe, Av. Morelos, Cerrada de Allende, Allende, Av. Morelos, Paseo de Zumárraga, Calz. de Guadalupe, Talismán, Eje 4 Norte, Av. José Loreto Fabela, Av. 608, Circuito Interior, Río Consulado, Paganini, A. Insurgentes y A. de los 100 Metros. El tiempo de duración es de 1000 segundos, con un recorrido de 6.2 km, a una velocidad promedio de 22.3 km/h y una máxima de 65 km/h.

Ruta Centro:

Av. Fray Servando, Circunvalación, Av. Consulado, Eje 2 Norte, Reforma, Insurgentes, Av. Chapultepec, Eje Central, República de Perú, Bolívar, República del Salvador, Circunvalación. El tiempo de prueba es de 995 segundos, con un recorrido de 5.16 km, a una velocidad promedio de 18.7 km/h y una máxima de 63 km/h.

Ruta Suroeste:

Circuito Escolar, Ingeniería, Cerro del Agua, Moctezuma, Miguel A. de Quevedo, Av. América, Pensylvania, División del Norte, Río Churubusco, Félix Parra, Barranca del Muerto, Macedonio Alcalá, Av. Revolución, Estadio Olímpico, Circuito Escolar. El tiempo de prueba es de 991 segundos, con un recorrido de 7.5 km, a una velocidad promedio de 27.3 km/h y una máxima de 72.3 km/h.

Ruta Sureste:

Cafetales y Calz. del Hueso, Eje 3 Oriente, Ermita Iztapalapa, Rojo Gómez, Av. Río Frio, Ciudad Deportiva, Palacio de los Deportes, Viaducto Tlalpan, Av. Taxqueña, Miramonates y Calz. del Hueso. El tiempo de prueba es de 985 segundos, con un recorrido de 7.2 km, a una velocidad promedio de 26.4 km/h y una máxima de 67 km/h.

La prueba es completamente automatizada y comienza conduciendo el vehículo en el dinamómetro a modo de generar una línea base de las condiciones del vehículo. Como medida de seguridad, el vehículo es anclado al piso para evitar se deslice hacia uno de los lados y las llantas de tracción se salgan de los rodillos. Se le coloca en el tubo de escape la sonda del analizador de gases y se pone frente al motor un ventilador para evitar un sobrecalentamiento. El inspector "conduce" el vehículo, siguiendo el ciclo prescrito desplegado en un monitor de pantalla.

4.2 PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA

En este apartado se describe, en forma detallada, los eventos y procedimientos que se llevaron a cabo para realizar la evaluación del sistema Retrofit y convertidor catalítico.

Mediante las siguientes pruebas, se pretende evaluar y conocer la influencia que tienen estas dos tecnologías sobre las emisiones contaminantes.

4.2.1 Prueba en banco de motor

La prueba se llevó a cabo en el banco de motor del LCE. Con ella se pretende evaluar la eficiencia del convertidor catalítico, así como comparar la potencia desarrollada por el motor antes y después de instalar el sistema RETROFIT y el convertidor catalítico.

Se entiende como eficiencia de un convertidor catalítico de uso automotriz, a la capacidad que tiene tal dispositivo para reducir los óxidos de nitrógeno y oxidar a los hidrocarburos y al monóxido de carbono. Dicha eficiencia se calcula mediante la diferencia que existe entre los niveles de emisiones crudas aguas abajo y aguas arriba del convertidor dividida entre la concentración de dichas emisiones aguas abajo del mismo catalizador y cuyas expresiones se muestran en las siguientes ecuaciones [18].

$$\eta_{NOx} = (NOx_a - NOx_d) / NOx_a \quad \text{ec. (1)}$$

$$\eta_{HC} = (HC_a - HC_d) / HC_a \quad \text{ec. (2)}$$

$$\eta_{CO} = (CO_a - CO_d) / CO_a \quad \text{ec. (3)}$$

$$\eta_{O_2} = (O_2_a - O_2_d) / O_2_a \quad \text{ec. (4)}$$

$$\eta_{CO_2} = (CO_2 - CO_2_d) / CO_2_a \quad \text{ec. (5)}$$

Como punto de partida, y a modo de poder comparar los resultados obtenidos, se procedió a poner en marcha al motor llevándolo a la velocidad de ralenti (1000 ± 50 rpm) para tomar la lectura de potencia (HP), del régimen de giro (rpm) y emisiones de escape (CO_2 , CO, HC, NO_x , O_2) sin la instalación del sistema Retrofit, sin convertidor catalítico y carburador en condiciones originales.

Las lecturas registradas se tomaron a cada 500 ± 50 rpm, hasta el régimen máximo que permitiera el motor (fig. 4.7). En la tabla 4.1 se presentan los resultados como primera etapa de esta evaluación.

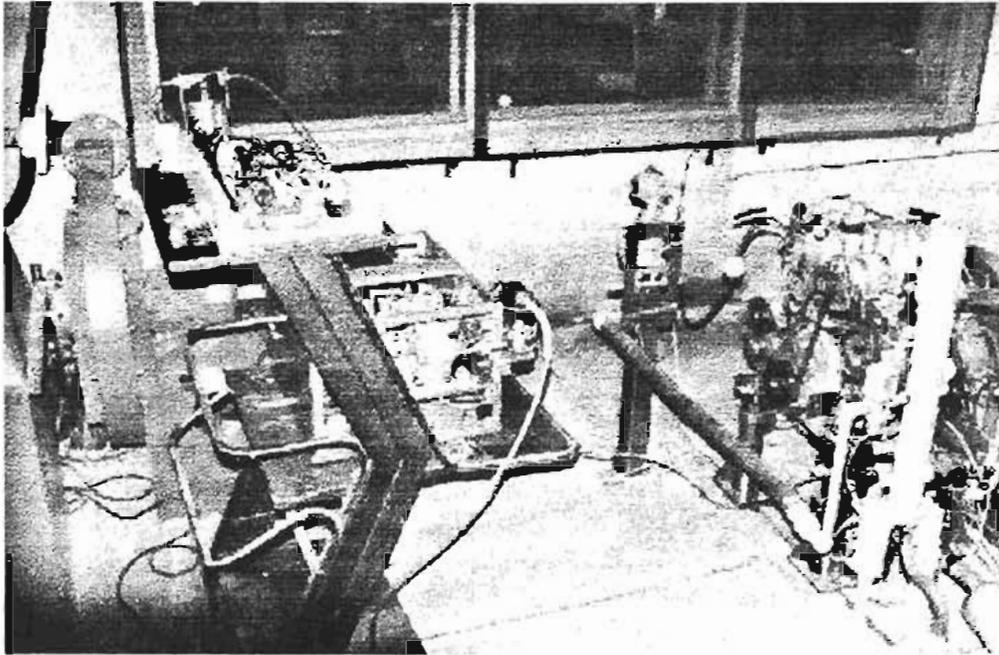


Figura 4.7. Medición de emisiones en el banco de motor.

Régimen (rpm)	Potencia (hp)	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)
1021	20.81	9.82	0.163	84	65	8.40
1540	35.68	11.5	1.105	217	172	5.34
1987	43.72	12.15	2.348	257	535	3.69
2489	53.21	12.85	2.748	280	740	3.30
3025	54.79	13.23	3.132	228	988	2.58
3520	49.28	12.43	3.275	252	1059	2.70

Tabla 4.1. Emisiones y potencia que se registraron en el banco de motor, sin modificaciones en el carburador.

Posteriormente, se instaló el sistema Retrofit, pero sin el convertidor catalítico, con el propósito de conocer como se comporta la curva de potencia al operar el motor con dicho sistema.

Para la instalación del sistema Retrofit, fue necesario ajustar las espreas del carburador para lograr que las luces indicadoras del módulo de control, alternaran de rico-pobre y de pobre-rico, siendo ésta la señal de que el carburador estaba suministrando, una mezcla de aire-combustible adecuada.

Una vez instalado el sistema Retrofit, y ajustado el carburador, se prosiguió a realizar los mismos eventos mencionados, procurando mantener lo más cercano posible la velocidad del motor en los regímenes establecidos. La tabla 4.2 muestra los resultados de tal evento.

Régimen (rpm)	Potencia (hp)	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)
989	18.25	10.73	0.105	32.10	66	4.09
1495	32.48	11.13	0.115	31.05	271	3.81
2043	37.78	12.19	0.134	16.58	385	3.38
2495	41.25	12.00	0.274	10.08	546	3.36
3025	42.25	12.23	0.313	25.09	865	2.95
3079	38.07	12.42	0.351	26.35	1079	2.98

Tabla 4.2. Emisiones y potencia generadas en el banco de motor con sistema Retrofit, sin convertidor catalítico (con ajuste en el carburador).

Como parte final de esta prueba, se instaló el convertidor catalítico de tres vías en el sistema de escape del motor para medir las concentraciones de los gases antes y después del convertidor catalítico.

Nuevamente, con todo el equipo preparado, se prosiguió a poner en operación el motor con el convertidor catalítico y dos analizadores de gases colocados uno a la entrada y otro a la salida del convertidor, registrando los resultados obtenidos en la tabla 4.3.

Antes del convertidor

Después del convertidor

Régimen (rpm)	Potencia (hp)	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)
1015	18.35	10.93	0.109	33.10	73	3.99	11.90	0.01	17.09	28	4.03
1504	31.8	12.18	0.112	32.26	268	3.77	12.20	0.01	7.08	67	3.80
2026	37.28	11.79	0.126	15.08	378	3.26	12.50	0.01	2.25	64	3.32
2487	40.85	12.00	0.271	10.12	537	3.27	12.50	0.03	1.14	280	3.30
2978	41.05	12.03	0.311	24.64	836	2.89	12.60	0.03	1.25	325	2.95
3098	37.27	12.92	0.348	26.82	1098	2.78	13.25	0.04	2.14	378	2.90

Tabla 4.3. Emisiones y potencia generadas en el banco de motor con sistema Retrofit y convertidor catalítico.

Todos estos ensayos se llevaron a cabo a plena admisión, es decir, con la válvula de mariposa completamente abierta, y la carga aplicada fue la necesaria para que el motor pudiera estabilizarse al régimen establecido para dicha prueba.

4.2.2 Prueba en banco de flujo

Esta prueba tiene como objetivo conocer y cuantificar la obstrucción que ocasiona el convertidor catalítico en el sistema de escape.

Cabe mencionar que al disminuir la presión en el sistema de escape, se pueden presentar dos efectos importantes: Uno de estos, es que, puede existir un reflujo de los gases de escape hacia el cilindro en alguna etapa del proceso de descarga, con el consecuente deterioro del rendimiento volumétrico del motor, debido a que existirá mayor porcentaje de gases residuales en la cámara de combustión en los siguientes ciclos de trabajo.

El otro efecto es que, al disminuir la presión de escape, el trabajo de bombeo de combustible es mayor, se presenta un deterioro del rendimiento efectivo, etc. En otras palabras, el motor tiene que realizar un mayor esfuerzo para renovar la carga, esto es, expulsar los productos de la combustión y suministrar mezcla fresca a los cilindros.

Para determinar si el convertidor representa una obstrucción para los gases de escape, se propone determinar el coeficiente de flujo, haciendo circular un flujo de aire a través del convertidor catalítico. Para ello se empleará el banco de flujo descrito en el apartado 4.1.4.

Se determinará el coeficiente de flujo para el convertidor catalítico, trabajando el banco de flujo en modo de impulso para simular la dirección de salida que tienen los gases de escape a través del convertidor. Con la lectura registrada en el manómetro del segundo tablero (presión de diafragma), se mostrará la caída de presión que provoca el convertidor en estas condiciones de prueba.

Una vez aclarado lo anterior, continuaremos con el desarrollo de esta prueba en el banco de flujo.

Para comenzar con esta evaluación, se necesitó maquinar una brida para adaptar y montar el convertidor sobre el depósito de remanso; así también, se requirió adaptar un juego de bridas a la entrada y salida del convertidor para su instalación en el banco (fig. 4.8).

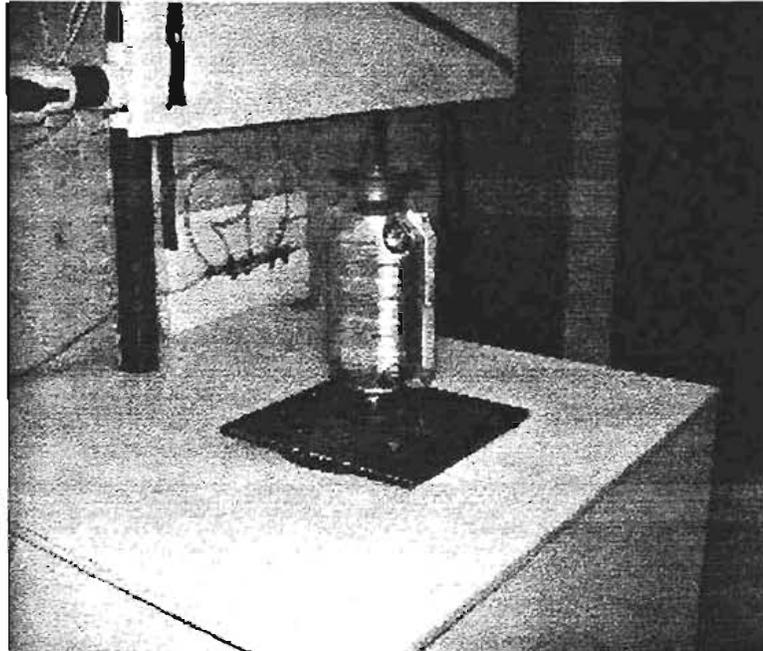


Figura 4.8. Convertidor catalítico tres vías, instalado en el banco de flujo.

Como primera parte de esta evaluación, se puso en operación el equipo, ajustando los manómetros diferenciales de cada tablero y permitiendo que se estabilizaran los manómetros, se comenzó a recopilar los datos del formato correspondiente para el banco de flujo (tablas 4.4 y 4.5). Estos datos se ingresaron a un programa de cálculo que nos proporciona el coeficiente de flujo y cuyas ecuaciones se muestran en el apéndice.

Se tomaron las lecturas registradas en termómetros y manómetros cada cinco minutos, con el fin de detectar alguna variación importante en el evento.

Con el propósito de garantizar que la información fue correcta, se realizaron dos pruebas, cada una, en diferentes días de la semana. Las siguientes tablas (4.4 y 4.5) muestran los datos obtenidos de las pruebas.

Prueba # 1: con Carga (con catalizador).

Fecha: 22 – Oct - 2003

Línea de trabajo: L2 (Inferior).

Dirección de flujo: Impulso.

Diámetro de garganta (entrada del dispositivo a evaluar): 0.058 m.

Presión atmosférica: 580 mmHg.

Evento	Hora	T. ambiente °C	T. entrada °C	T. salida °C	Tablero # 1	Tablero # 2	Tablero # 3
					(aguas arriba)	(diafragma)	(remanso)
					mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O
1	13:30	20.0	20.5	20.5	366	348	51
2	13:35	20.5	20.5	20.5	365	360	51
3	13:40	20.5	20.8	20.9	365	360	51
4	13:45	21.0	21.0	21.0	363	360	51
5	13:50	21.0	21.0	21.0	363	359	51
6	13:55	21.0	21.0	21.0	362	359	51
7	14:00	21.3	21.0	21.3	362	358	51
8	14:05	21.3	21.0	21.3	362	358	51

Tabla 4.4. Presiones registradas en los manómetros del banco de flujo al pasar el flujo de aire a través del convertidor catalítico, durante la prueba # 1.

Prueba # 2: con Carga (con catalizador).

Fecha: 29 – Oct - 2003

Línea de trabajo: L2 (Inferior).

Dirección de flujo: Impulso.

Diámetro de garganta (entrada del dispositivo a evaluar): 0.058 m.

Presión atmosférica: 580 mmHg.

Evento	Hora	T. ambiente °C	T. entrada °C	T. salida °C	Tablero # 1	Tablero # 2	Tablero # 3
					(aguas arriba)	(diafragma)	(remanso)
					mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O
1	15:40	20.9	20.9	21.1	362	350	51
2	15:45	20.9	21.3	21.3	362	357	51
3	15:50	21.0	21.0	21.3	361	357	51
4	15:55	21.0	21.3	22.0	361	357	51
5	16:00	21.8	22.0	22.1	361	357	51
6	16:05	21.8	22.0	22.0	361	357	51
7	16:10	21.5	22.0	22.0	361	358	51
8	16:15	21.5	22.0	22.0	361	358	51

Tabla 4.5. Presiones registradas en los manómetros del banco de flujo al pasar el flujo de aire a través del convertidor catalítico, durante la prueba # 2.

4.2.3 Prueba en dinamómetro de chasis

En esta prueba se pretende evaluar el sistema RETROFIT, comparando las emisiones de CO₂, CO, HC y NO_x que el vehículo expulsa hacia la atmósfera, con y sin el uso de dicho sistema. Cabe aclarar que durante esta evaluación, el sistema Retrofit incluye la instalación del convertidor catalítico de tres vías. Para ello, se colocará un vehículo en el dinamómetro de chasis, donde se simularán las demandas de operación que tiene el motor durante un ciclo de manejo. De esta manera, se medirán las emisiones de los gases de escape en forma continua durante el ciclo de manejo IM240.



Figura 4.9. Vehículo en el dinamómetro de chasis del LCE.

Como se mencionó en su momento, el Laboratorio de Control de Emisiones y el Laboratorio IM240 a cargo de la Dirección General de Gestión del Aire del Gobierno del D. F. trabajaron conjuntamente para llevar a cabo la evaluación del sistema Retrofit.

De acuerdo a las características de dicha evaluación, se decidió utilizar el ciclo de prueba IM240 que tiene una duración máxima de 240 segundos (de donde viene el 240 de IM240), simulando un recorrido de 3.1 kilómetros, a una velocidad promedio de 47.3 km/h y una máxima de 91.2. Las emisiones se reportan en unidades de masa por distancia recorrida y no se requiere de rutinas de pre-acondicionamiento.

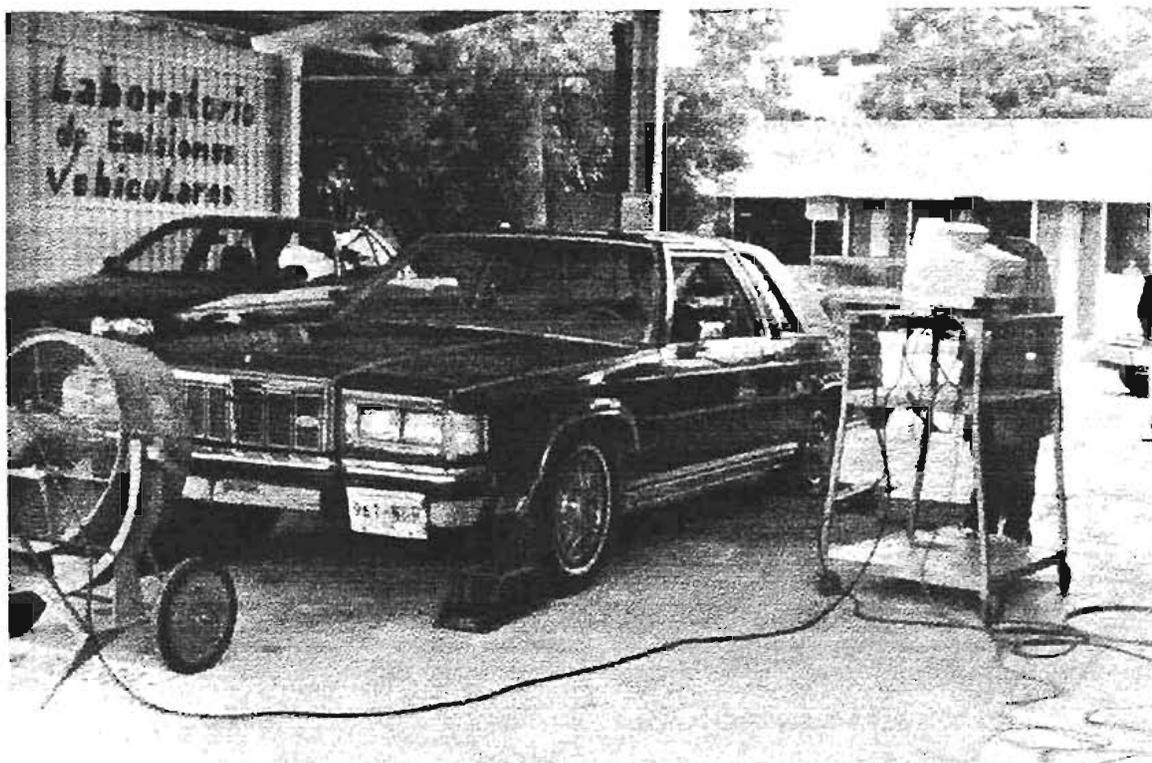


Figura 4.10. Vehículo durante la prueba en dinamómetro de chasis en el laboratorio IM240.

Para evaluar el sistema Retrofit, se propuso un lote de siete vehículos (Tabla 4.6), de los cuales, los cuatro primeros ya contaban con la instalación del Retrofit.

Modelo	Submarca	Nº de cilindros	Desplazamiento (cm ³)	Sistema de dosificación de combustible
1981	Rambler	6	4200	carburador
1992	Golf	4	1800	carburador
1991	Pickup	4	2400	carburador
1989	Tsuru	4	1600	carburador
1982	Marquis	8	5800	carburador
1980	Mustang	8	5000	carburador
1993	Ichi-van	4	2400	carburador

Tabla 4.6. Vehículos utilizados para evaluar el sistema Retrofit.

Con relación a los vehículos que ya contaban con el sistema Retrofit, no se dispone de resultados avalados por alguna autoridad ambiental en cuanto a su seguimiento.

A modo de tener un punto de referencia y poder comparar posteriormente los resultados obtenidos, se les tomaron las emisiones de escape a todos los vehículos tal y como estaban circulando, siguiendo el ciclo de prueba IM240. Los resultados de las concentraciones de cada gas analizado se muestran en la siguiente tabla.

Modelo	Submarca	Gases de escape			
		CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
1982	Rambler	261.2265	17.5111	1.5145	1.2369
1992	Golf	179.2411	7.0732	0.5877	0.9095
1991	Pickup	243.5958	17.9427	0.4189	0.5521
1989	Tsuru	165.2055	5.3929	1.2398	2.1766
1982	Marquis	264.3619	36.4002	1.8453	0.0448
1980	Mustang	238.7090	27.1081	2.4149	1.3287
1993	Ichi-van	259.5749	10.1165	1.2416	1.7749

Tabla 4.7. Emisión de gases de escape como punto de referencia para la evaluación del sistema Retrofit.

La prueba IM240 es completamente automatizada y comienza con una inspección de preparación. El inspector "conduce" el vehículo sobre el dinamómetro, como si condujera un carro en un juego de video, y consiste en aplicar el acelerador y el freno de acuerdo al ciclo desplegado en una pantalla de video computarizada. , se le coloca en el tubo de escape la sonda del analizador de gases y se sitúa frente al motor un ventilador para evitar un sobrecalentamiento. Las emisiones de los gases de escape son desplegadas y almacenadas en una base de datos del sistema de computo.

Después de medir las emisiones de dichos vehículos, se enviaron al taller con el propósito de tener en mejores condiciones el motor de cada uno de ellos. Cabe aclarar que a los vehículos que ya tenían instalado el sistema Retrofit (Rambler, Golf, Pickup, Tsuru), sólo se les retiró para tomarles nuevamente emisiones de escape y los resultados se muestran en la tabla 4.8.

Modelo	Submarca	Gases de escape			
		CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)
1982	Rambler	214.5892	42.2486	2.4051	0.8878
1992	Golf	165.5917	16.3726	2.0107	1.8278
1991	Pickup	188.0737	60.7069	4.1529	0.9061
1989	Tsuru	171.2565	10.5074	1.7295	2.4709
1982	Marquis	312.8467	38.0662	2.2820	1.4624
1980	Mustang	213.8089	90.3312	3.2986	0.4581
1993	Ichi-van	244.9440	33.0081	1.4835	0.2455

Tabla 4.8. Masa de contaminantes emitidos durante el ciclo de prueba IM240, sin sistema Retrofit instalado.

La prueba anterior se repitió para todos los vehículos, pero ahora con el sistema Retrofit instalado y cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.9. Cabe aclarar que, a los vehículos que les hacía falta darles mantenimiento (Rambler, Golf, Pickup, Tsuru) fueron enviados al taller, para brindarles dicho servicio e instalarles el sistema Retrofit.

Modelo	Submarca	Gases de escape			
		CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)
1982	Rambler	222.6200	11.4000	1.0800	0.0920
1992	Golf	175.0790	4.9354	0.5667	0.9567
1991	Pickup	208.2086	19.6164	0.4474	0.6211
1989	Tsuru	163.6978	3.4877	0.4442	0.4923
1982	Marquis	289.6598	3.6860	0.3152	0.2556
1980	Mustang	269.6797	15.4146	2.3966	1.4446
1993	Ichi-van	288.0376	7.6973	0.8983	0.0461

Tabla 4.9. Masa de contaminantes emitidos durante el ciclo de prueba IM240, con sistema Retrofit instalado.

Los resultados obtenidos en las tablas 4.7 a 4.9, son los valores del promedio aritmético de cada evento de la evaluación.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES

5.1 CONDENSACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1.1 Resultados del banco de motor

En este apartado se reunirán, siguiendo el mismo orden, los resultados obtenidos de las experiencias descritas en el apartado 4.3.

Una vez reunidos los datos requeridos para el cálculo de la eficiencia del convertidor catalítico de tres vías, instalado en el banco de motor del LCE, mostrados en la tabla 4.3 y con las ecuaciones (1) a (5) del apartado 4.2.1, se obtuvieron los siguientes resultados:

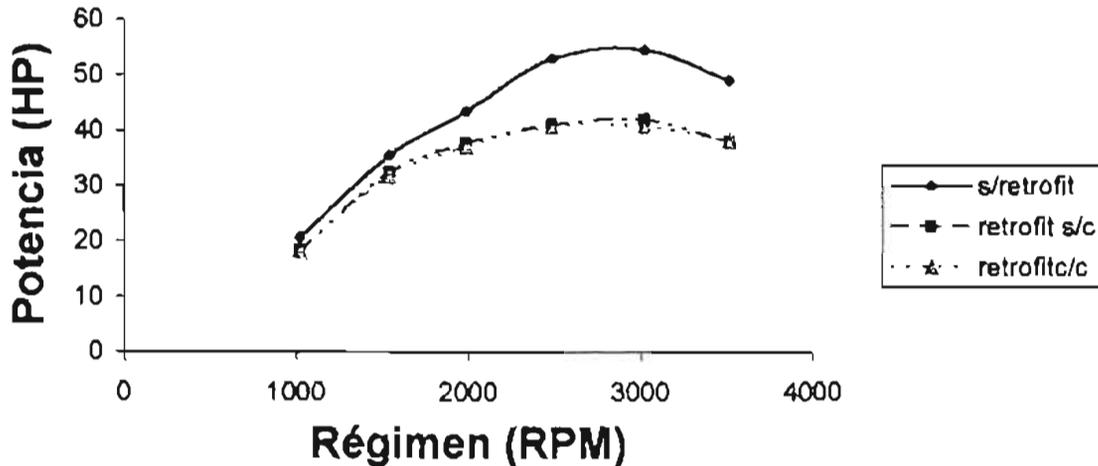
Régimen (rpm)	Eficiencia CO ₂ (%)	Eficiencia CO (%)	Eficiencia HC (%)	Eficiencia NO _x (%)	Eficiencia O ₂ (%)
1015	8.874656908	90.82568807	48.36858006	61.64383562	1.002506266
1504	0.164203612	91.07142857	78.0533168	75	0.795755968
2026	6.022052587	92.06349206	85.0795756	83.06878307	1.840490798
2487	4.166666667	88.9298893	88.73517787	47.858473	0.917431193
2978	4.738154613	90.35369775	94.92694805	61.12440191	2.076124567
3098	2.554179567	88.50574713	92.02087994	65.57377049	4.316546763
Promedio	4.419985659	90.29165715	81.19741305	65.71154401	1.824809259

Tabla 5.1. Reducción y oxidación de gases contaminantes.

La tabla anterior nos muestra la capacidad que tuvo el convertidor catalítico para evitar que los gases tóxicos, producto de la combustión, salieran a la atmósfera en concentraciones mayores, es decir, con el convertidor catalítico instalado en el sistema de escape, se logró disminuir las emisiones contaminantes de CO en un 90.29 % en promedio, ocurriendo lo mismo para los HC y NO_x en 81.19 % y 65.71 % respectivamente. Para el caso del oxígeno se puede decir que el 1.82 %, en promedio, no fue aprovechado en el proceso de catálisis, permitiéndole salir a la atmósfera junto con los demás gases de la combustión. Así también podemos apreciar que a la salida del convertidor, se registró un incremento en las emisiones de CO₂ del 4.41 % en promedio (gráfica 5.1), sabiendo que al existir una mejor combustión el CO, HC y otros compuestos, producto de la combustión, salen por el convertidor como CO₂.

A continuación se presentan las gráficas comparativas de los resultados obtenidos en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Curvas de Potencia del Motor



Gráfica 5.1. Comparación de las curvas de potencia desarrolladas sin sistema Retrofit (s/retrofit), con sistema Retrofit y sin convertidor catalítico (retrofit s/c), con sistema Retrofit y convertidor catalítico (retrofit c/c).

La gráfica 5.1 muestra en el eje vertical la magnitud de la potencia desarrollada por el motor de banco, al variar el régimen de giro desde 1000 ± 50 rpm hasta 3500 ± 500 rpm.

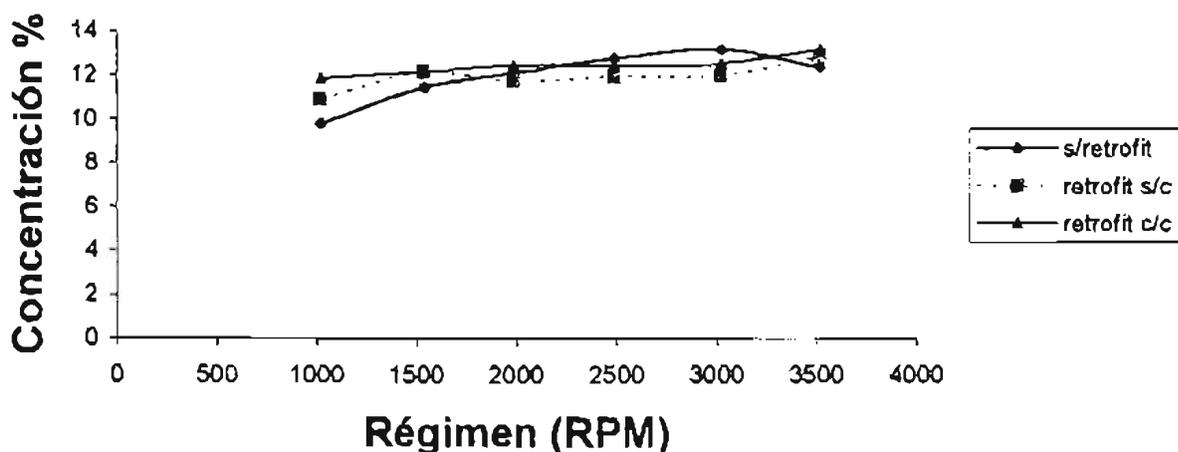
En la gráfica podemos observar, que la potencia desarrollada por el motor fue mayor al operar éste sin el sistema Retrofit; siendo razonables estos resultados porque el motor trabajó con su carburador original.

La potencia del motor se vio afectada considerablemente al instalar el sistema Retrofit y el motivo de ésta pérdida de potencia, fue por la modificación que se le hizo al carburador, al cambiar las espreas que tenía originalmente. Cabe recordar, que las espreas se cambiaron al instalar el sistema retrofit, para lograr que el sistema fuese capaz de controlar el suministro de aire hacia el carburador y obtener una relación de aire-combustible cercana a la estequiométrica.

También se puede apreciar que desciende un poco más la potencia al incorporar el convertidor; lo que nos indica, que el convertidor catalítico influye en las prestaciones del motor, pero juega un papel muy importante en el control de las emisiones contaminantes, tal y como lo muestran los siguientes resultados.

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de los gases de escape durante la evaluación en el banco de motor.

Emisión de CO₂

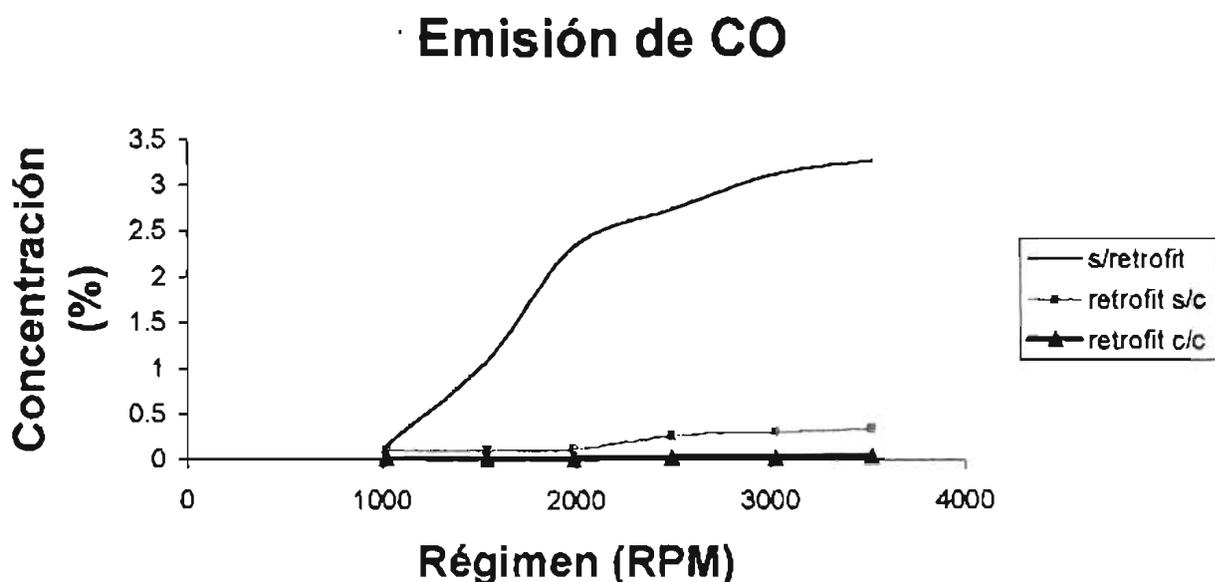


Gráfica 5.2. Comparación de las concentraciones de CO₂ contenidas en los gases de escape durante las tres condiciones de prueba.

En esta gráfica se muestran tres curvas que describen el comportamiento de emisiones de CO₂, que se generaron al operar el motor en los rangos de velocidad mostrados en el eje horizontal de esta gráfica y cuyas condiciones de prueba fueron s/retrofit (sin Retrofit), retrofit s/c (con Retrofit y sin convertidor catalítico) y retrofit c/c (con Retrofit y convertidor catalítico).

Podemos observar que, al incorporar el sistema Retrofit, la emisión de este gas tiende a describir una línea horizontal, en comparación con la curva que describe la prueba sin el sistema Retrofit; tal efecto se debe a que el sistema Retrofit en todo momento de la prueba fue capaz de controlar y proporcionar la cantidad de aire requerido por el carburador, el cual se encargó de suministrar al interior de las cámaras de combustión una mezcla de aire-combustible cercana a la estequiométrica.

Así también se puede ver que, al incorporar el convertidor catalítico, la concentración de CO₂ aumenta ligeramente debido a que existe una mejor combustión, gracias a la incorporación del sistema Retrofit y convertidor catalítico.

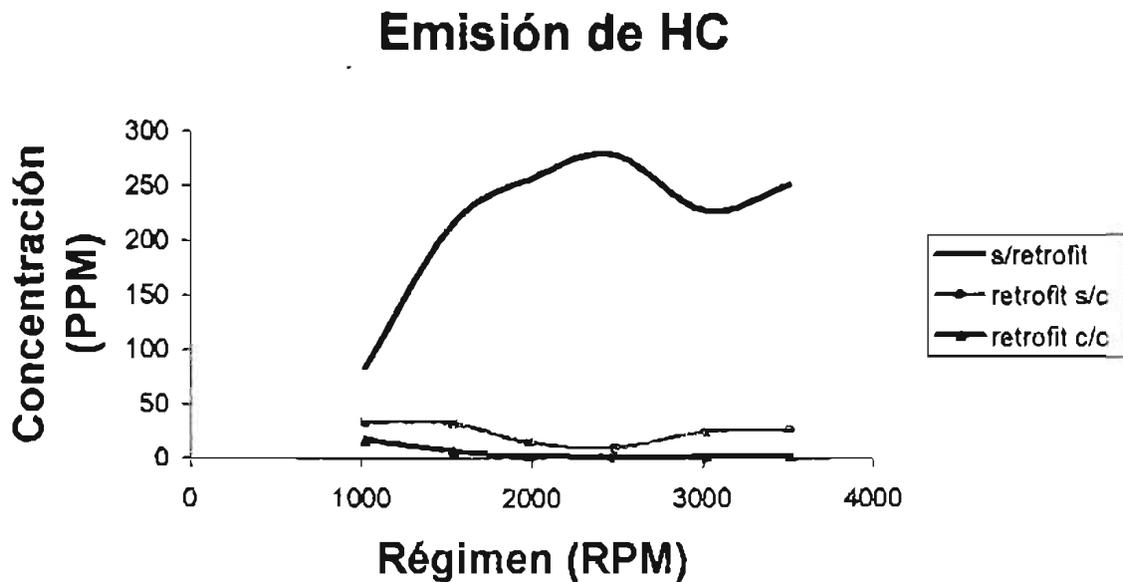


Gráfica 5.3. Comparación de las concentraciones de CO contenidas en los gases de escape durante las tres condiciones de prueba.

La gráfica 5.3 nos muestra el comportamiento de las concentraciones de CO que se emitieron a la atmósfera durante la prueba en el banco de motor.

Se puede observar que los niveles de emisión se incrementan conforme aumenta la velocidad; de lo cual se puede deducir que, al demandarle más potencia al motor, éste se ve obligado a quemar más combustible, lo que trae como consecuencia una cantidad mayor de gases contaminantes.

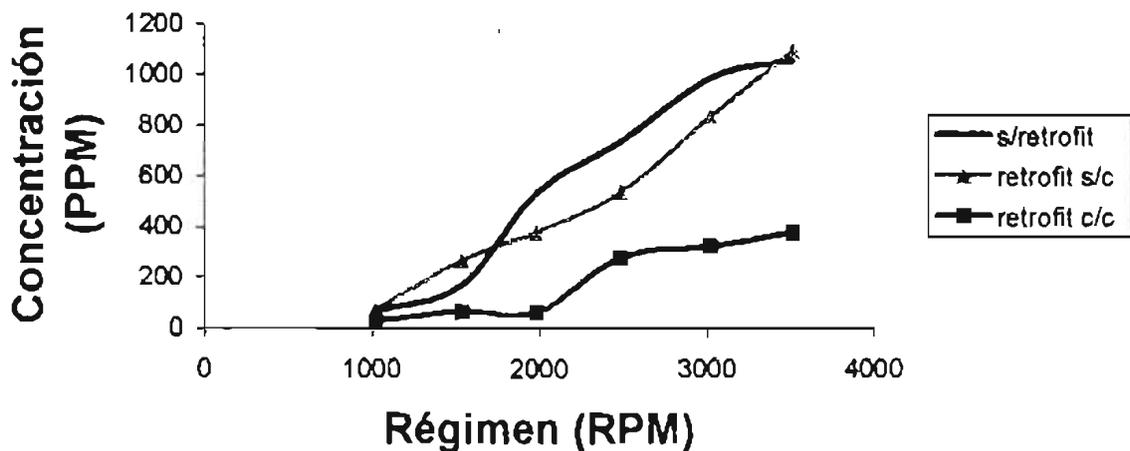
En esta gráfica, se puede ver que el motor operando en condiciones normales, es decir, con carburador original, (sin sistema Retrofit), emite a la atmósfera concentraciones de CO mucho mayores, que al operar con el sistema Retrofit. Así también, se puede apreciar que las emisiones de dicho gas disminuyen aún más al instalar el convertidor.



Gráfica 5.4. Comparación de la concentración de HC contenidos en los gases de escape durante las tres condiciones de prueba.

En la gráfica se muestran las curvas que describen la formación de hidrocarburos. Se puede observar el mismo comportamiento que presentó el gas CO, es decir, se descargaron a la atmósfera concentraciones de HC mucho menores con la incorporación del sistema Retrofit y convertidor catalítico.

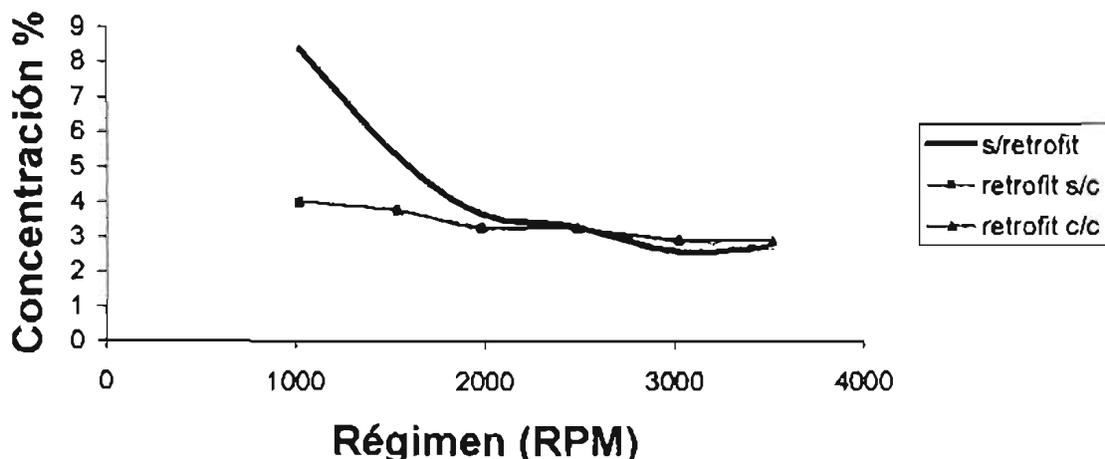
Emisión de NOx



Gráfica 5.5. Comparación de las concentraciones de NOx contenidos en los gases de escape durante las tres condiciones de prueba.

Como sabemos, otro de los gases nocivos a controlar son los óxidos de nitrógeno (NOx); en la gráfica 5.5 se puede ver como al incorporar el sistema Retrofit, las emisiones de NOx descienden un poco durante el rango de velocidad de 1800 a 3500 rpm aproximadamente, esto nos indica que aún con el control de la mezcla, las concentraciones de NOx contenidas en los gases de escape son altas. Se puede apreciar un descenso considerable en las emisiones de éste gas, al incorporar el convertidor catalítico de tres vías en el sistema de escape.

Emisión de O₂



Gráfica 5.6. Comparación de las concentraciones de O₂ contenidas en los gases de escape durante las tres condiciones de prueba.

La gráfica anterior muestra como al instalar el sistema Retrofit, la cantidad de oxígeno en los gases de escape es mucho menor, debido a que se tiene un mayor control en el suministro de aire, siendo éste sólo el necesario para lograr una mezcla estequiométrica a cada instante y durante las condiciones de operación a las que está sometido el motor.

5.1.2 Resultado del banco de flujo

A continuación se presentan los resultados obtenidos al concluir la prueba en el banco de flujo.

Como se dijo en su momento, después de haber reunido y capturado los datos necesarios para llevar a cabo dicha prueba, se ingresaron en el programa diseñado para calcular el coeficiente de flujo, en función de los parámetros geométricos y las consideraciones termodinámicas del banco de flujo estacionario del Laboratorio de Control de Emisiones.

Para el convertidor catalítico tres vías, los coeficientes de flujo obtenidos son los siguientes:

Prueba # 1

	Tablero # 1 aguas arriba	Tablero # 2 diafragma	Tablero # 3 remanso	
Evento	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	Coef. Flujo
1	366	348	51	0.3657821
2	365	360	51	0.3717937
3	365	360	51	0.3718555
4	363	360	51	0.3717448
5	363	359	51	0.3712462
6	362	359	51	0.371223
7	362	358	51	0.3709127
8	362	358	51	0.3709127

Tabla 5.2. Coeficiente de flujo con convertidor catalítico.

Prueba # 2

	Tablero # 1 aguas arriba	Tablero # 2 diafragma	Tablero # 3 remanso	
Evento	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	Coef. Flujo
1	362	350	51	0.3668268
2	362	357	51	0.3702222
3	361	357	51	0.3703891
4	361	357	51	0.3706388
5	361	357	51	0.3702586
6	361	357	51	0.3702586
7	361	358	51	0.3702586
8	361	358	51	0.3702586

Tabla 5.3. Coeficiente de flujo con convertidor catalítico.

En las tablas 5.2 y 5.3 se muestran el coeficiente de flujo y presiones que se generan en el interior del conducto del banco de flujo, al circular el flujo de aire a través del convertidor catalítico.

La presión aguas arriba, es la presión (manométrica) en el interior de la línea 2 antes de la placa de orificio. Esta presión, dada en milímetros en la columna de agua, es mayor porque el flujo de aire se encuentra con la reducción de área antes de pasar a través de la placa de orificio, y sirve como referencia para el cálculo del coeficiente de flujo.

La presión de diafragma, es la presión absoluta en el interior de la línea 2, provocada por la obstrucción de la placa de orificio. Esta presión es un poco menor que la presión aguas arriba debido a las pérdidas de carga no recuperables. Con esta caída de presión y las ecuaciones de continuidad y Bernoulli [5], se puede conocer realmente la medida del flujo.

La presión de remanso, es la presión (manométrica) en el depósito de remanso. Esta presión es menor y se mantiene constante porque allí la corriente desacelera hasta velocidad nula, y también sirve como referencia para el cálculo del coeficiente de flujo.

Los coeficientes de flujo, nos muestran la relación que hay entre el flujo real y el de referencia que circula en la línea 2. El flujo de referencia es tomado a la entrada o salida, dependiendo de la dirección del flujo, que para nuestro caso es a la salida por trabajar en modo impulso.

Haciendo un promedio de los coeficientes de flujo de la prueba # 1, nos resulta de 0.370 y para la prueba # 2, es de 0.369. Estos valores, prácticamente iguales, nos quieren decir que el flujo real que pasa por la línea 2 es mayor que el flujo teórico o de referencia que se tiene en el depósito de remanso, lo que significa que la obstrucción provocada por el convertidor catalítico no es grande.

Podemos ver que la presión de diafragma en promedio es de 357.75 mm H₂O (0.50856 lb/pulg²) en la prueba # 1 y 356.375 mm H₂O (0.50661 lb/pulg²) en la prueba # 2, y sabiendo que en un motor, operando en condiciones moderadas, la presión en el sistema de escape con convertidor catalítico no debe exceder de 3 lb/pulg² [10], podemos decir que la obstrucción es aceptable en estas condiciones de prueba.

5.1.3 Resultados del dinamómetro de chasis

Como se mencionó en su momento, el dinamómetro, el analizador de gases y el monitor de pantalla interactúan conjuntamente gracias a un panel de control (un sistema computarizado), situado en la sala de control de dichos laboratorios. Los datos recopilados durante la evaluación son capturados y procesados por la computadora del panel de control, de esta manera se obtuvieron los resultados aquí expuestos.

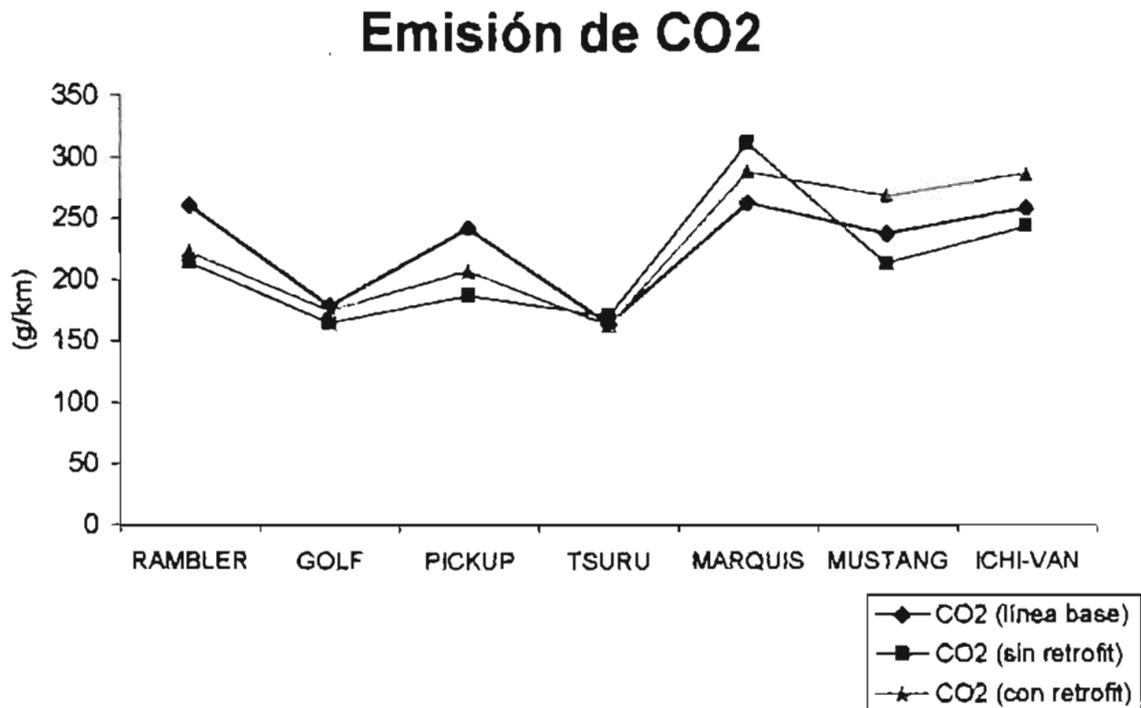
En este apartado se reunirán los resultados obtenidos durante la evaluación, se presentarán gráficamente y se interpretarán dichos resultados.

Cabe aclarar y como se mencionó en el apartado 4.2.3, que para la evaluación del sistema Retrofit, se propuso un lote de siete vehículos (Tabla 4.6), de los cuales, la Rambler, Golf, Pickup y Tsuru ya contaban con la instalación del Retrofit y como primera etapa de la evaluación, a modo de tener un punto de referencia y poder comparar posteriormente los resultados obtenidos, se midieron las emisiones de escape en todos los vehículos tal y como estaban circulando, siguiendo el ciclo de prueba IM240 (tabla 4.7). Después de medir las emisiones en dichos vehículos, se enviaron al taller con el propósito de tener en mejores condiciones los motores de cada uno de ellos. Cabe aclarar que a los vehículos que ya tenían instalado el sistema Retrofit (Rambler, Golf, Pickup, Tsuru), sólo se les retiró para tomarles nuevamente emisiones de escape.

Como segunda etapa de la evaluación, se volvió a medir las emisiones en todos los vehículos siguiendo el mismo ciclo de prueba, pero ahora ningún vehículo tenía instalado el sistema Retrofit (tabla 4.8).

Como parte final de la evaluación, se volvió a medir los gases de escape en cada vehículo, pero ahora con el sistema Retrofit instalado y cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.9. Cabe aclarar que, a los vehículos que les hacía falta darles mantenimiento (Rambler, Golf, Pickup, Tsuru) fueron enviados al taller, para brindarles dicho servicio e instalarles el sistema Retrofit junto con todos los demás vehículos.

Las gráficas siguientes nos muestran las emisiones de CO₂, CO, HC, NO_x que se obtuvieron al someter los vehículos seleccionados al ciclo de prueba IM240. También se muestran de forma comparativa dichas emisiones al operar los vehículos: a) en las condiciones que fueron recibidos, con el fin de establecer una línea base; b) sin el sistema Retrofit y c) con el sistema Retrofit,



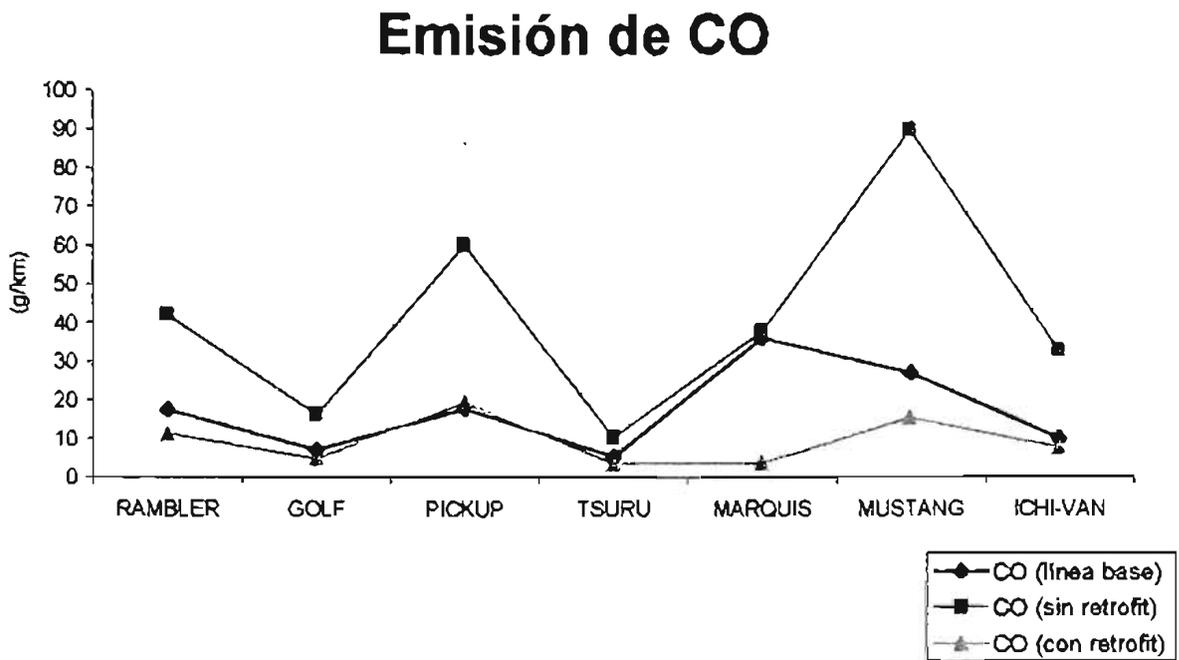
Gráfica 5.7. Comparación de las emisiones de CO₂ durante el ciclo de prueba IM240.

En gráfica 5.7, podemos observar que los vehículos Rambler y Pickup, que ya tenían instalado el sistema Retrofit en un principio, no mostraron mucha mejoría en este aspecto, es decir, se hubiese esperado que al brindarles un servicio de mantenimiento y posteriormente instalarles el sistema Retrofit, las emisiones de CO₂ se mantuvieran en el mismo orden tal y como sucedió con el Golf y Tsuru que si mantuvieron prácticamente los mismos niveles de emisión; esta situación pudo deberse a modificaciones realizadas para la nueva instalación del sistema Retrofit.

Para el caso del Marquis, Mustang e Ichi-van, se puede apreciar que sí les benefició la instalación del sistema Retrofit, ya que al emitir mayor concentración de CO₂ nos indica que el proceso de combustión fue mejor.

De cualquier forma, en la gráfica 5.7 podemos observar que la curva que describe la emisión de CO₂ con sistema Retrofit está por encima de la curva descrita sin el Retrofit, indicándonos un incremento en la emisión de CO₂ debido a que el CO, HC y otros compuestos, producto de la combustión incompleta, salen por el escape como CO₂.

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

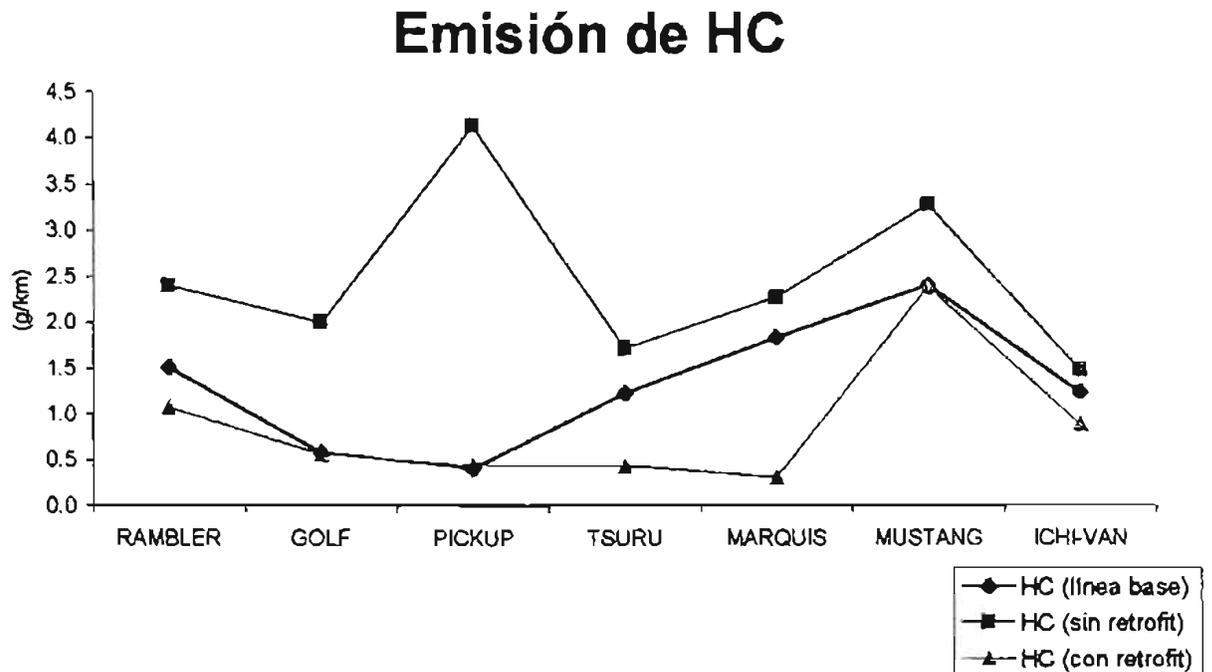


Gráfica 5.8. Comparación de las emisiones de CO durante el ciclo de prueba IM240.

En la gráfica 5.8 se puede observar claramente como los vehículos que ya tenían instalado el sistema Retrofit (cuatro primeros), al comparar sus emisiones con los valores obtenidos al instalar el sistema por segunda vez, no difieren mucho unos de otros, debido a que el sistema ayudaba a tener una mezcla cercana a la estequiométrica, pero definitivamente se puede apreciar como al retirar el Retrofit los niveles de CO se incrementan.

Para el caso de los vehículos a los que por primera vez se les instaló el sistema Retrofit, se puede apreciar que emitan menos CO antes de llevarlos al taller; sin embargo, esto se puede deber a las modificaciones que se les realizaron en las espreas del carburador, ya que esto fue necesario para la adaptación del sistema Retrofit. De cualquier modo, se puede observar como al incorporar el Retrofit, la curva que describe este evento está por debajo de las otras dos condiciones de la evaluación.

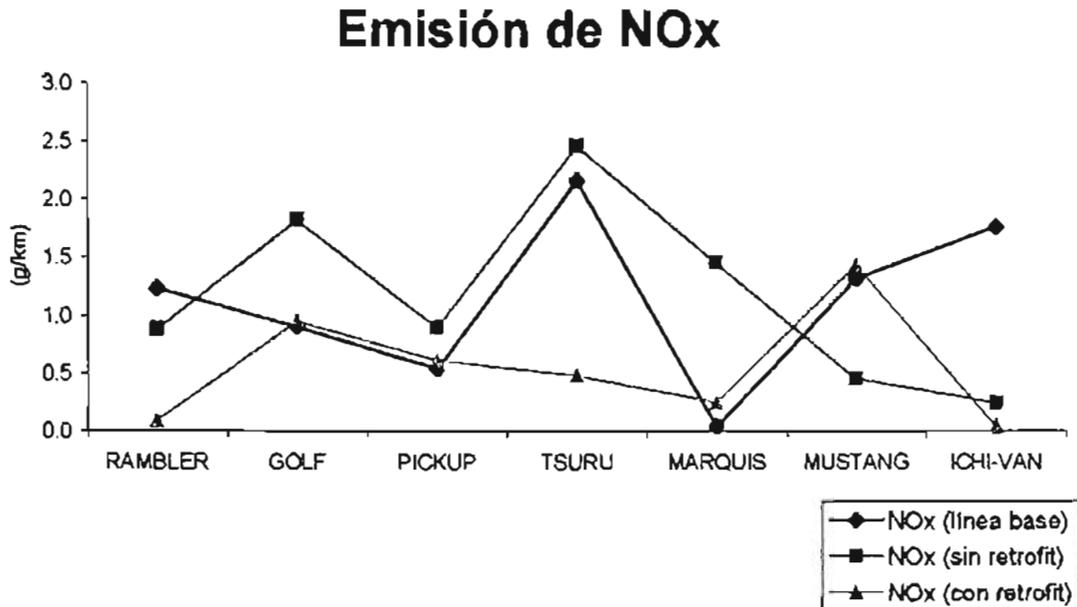
Durante la evaluación del sistema Retrofit, se puede observar, con base a los resultados obtenidos, que las emisiones de CO se redujeron al incorporar dicho sistema.



Gráfica 5.9. Comparación de emisiones de HC generadas durante el ciclo de prueba IM240.

En la gráfica 5.9 se puede apreciar la influencia que tiene el sistema Retrofit sobre las emisiones de hidrocarburos contenidos en los gases de escape, generados por los vehículos en cuestión.

Se puede observar en esta gráfica, como la curva que describe las emisiones de HC producidas por los vehículos con sistema Retrofit, está muy por debajo de la curva que describen las emisiones de HC generadas, al conducir el vehículo sin sistema Retrofit; con base a esto podemos decir que, con el sistema Retrofit se logra que, los vehículos emitan y se generen menos cantidades de hidrocarburos, que son productos de una mala combustión.



Gráfica 5.10. Comparación de las emisiones de NOx durante el ciclo de prueba IM240.

En esta gráfica, correspondiente a las emisiones de los óxidos de nitrógeno generados durante la prueba IM240, podemos observar lo siguiente:

De los vehículos que inicialmente tenían instalado el sistema Retrofit, como son el Golf y Pickup, se puede observar que mantuvieron prácticamente los mismos niveles de emisión al instalarles por segunda vez el sistema. Para el caso de la Rambler y Tsuru, se puede observar que sí les beneficio la segunda instalación de dicho sistema, ya que se logró disminuir las cantidades de NOx contenidas en los gases de escape.

Como podemos apreciar nuevamente, la curva que describe las cantidades óxidos de nitrógeno emitidas por los vehículos con sistema Retrofit se mantiene por debajo de la curva descrita por las emisiones de los vehículos sin dicho sistema, lo que quiere decir que se están emitiendo a la atmósfera menos cantidades de NOx al operar los vehículos con un sistema que les permita trabajar en circuito cerrado.

Para el caso del Mustang, se puede observar un incremento en la emisión de NOx al tener instalado el sistema Retrofit, siendo una posible causa, un sobrecalentamiento que haya experimentado el motor al tratar de mantener la velocidad requerida durante el ciclo de prueba, es decir, posiblemente el conductor no siguió correctamente la trayectoria del ciclo y trató de recompensarlo en algún momento durante la prueba.

5.2 CONCLUSIONES

Como se mencionó al principio de este trabajo, los automotores constituyen la principal fuente de contaminación a la atmósfera. Siendo éste el problema, los empresarios y prestadores de servicios de la rama automotriz, se han dado a la tarea de buscar alternativas y realización de acciones que ofrezcan novedosas y estimulantes muestras de respuesta a favor de la salud de la población.

De esta manera, y conforme a los resultados obtenidos durante el análisis de las dos tecnologías descritas, se puede citar las siguientes observaciones y conclusiones:

De la prueba realizada en el banco de motor (gráfica 5.1) se observa que al instalar el sistema Retrofit se presenta una pérdida en la potencia del motor, debido principalmente a que se modificaron las condiciones de diseño del motor, al cambiar las espreas del carburador original, con el propósito de obtener una dosificación de combustible con tendencia a ser rica, para lograr que el sistema Retrofit, fuese capaz de mantener una mezcla aire-combustible cercana a la estequiométrica, al controlar el suministro de aire hacia el múltiple de admisión y de esta manera, garantizar un mejor desempeño del convertidor catalítico de tres vías.

Cabe mencionar, que los resultados de esta prueba han sido de un solo motor, de manera que no son representativos de un parque vehicular. Si bien puede existir cierta similitud con otros motores respecto a la potencia desarrollada, o bien su comportamiento sea diferente, recordando que existen motores diseñados con diferentes requerimientos.

Así también, durante la prueba en el banco de motor, se logró abatir las emisiones de CO y HC al incorporar solamente el sistema Retrofit, sin mostrar una mejora en cuanto a los NOx emitidos hasta la instalación del convertidor catalítico de tres vías, siendo éste el momento cuando las emisiones de CO, HC y NOx se ven abatidos considerablemente, tal y como lo muestran las gráficas 5.3–5.5.

Por otra parte, se pudo determinar, -mediante las presiones obtenidas durante la prueba en el banco de flujo- que un convertidor catalítico nuevo y en óptimas condiciones, no representa en forma significativa ser una obstrucción para el flujo de aire que circula a través de él.

Con las emisiones obtenidas durante la prueba en el dinamómetro de chasis, se puede constatar que al emplear conjuntamente el sistema Retrofit y el convertidor catalítico de tres vías en un vehículo que emplea un sistema de dosificación de combustible con carburador, se logra disminuir las emisiones contaminantes hacia la atmósfera, gracias a la retroalimentación que tiene el módulo de control, por medio del sensor de oxígeno que le dice cuando abrir o cerrar la válvula de control de aire y así obtener una mezcla de aire-combustible lo más cercana a la estequiométrica en el interior de la cámara de combustión. Cuando esto sucede se dice que el motor opera en circuito cerrado.

De este modo, el convertidor catalítico de tres vías puede cumplir su cometido, que es oxidar y reducir los productos generados por la deficiencia de la combustión.

A través del estudio desarrollado durante este trabajo, se logró entender que los convertidores catalíticos son equipos sensibles a las condiciones de mantenimiento inadecuadas del motor, viéndose en esta forma afectada la capacidad de oxidar y reducir los gases de escape del vehículo.

Finalmente, es importante destacar que aún cuando se cuente con una tecnología eficiente y capaz de abatir la contaminación generada por los vehículos, si ésta no es empleada adecuadamente, muchos vehículos seguirán contaminando y deteriorando la calidad del aire atmosférico, siendo en vano cualquier intento por erradicar o aminorar el problema.

APÉNDICE

El cálculo del coeficiente de flujo, se determinó mediante el programa pensado expresamente para la estructura del banco de flujo estacionario del Laboratorio de Control de Emisiones, y que sigue el siguiente algoritmo.

Comenzaremos por definir las variables y ecuaciones involucradas:

DVAL.: Diámetro garganta válvula [m] (es el diámetro de entrada del accesorio en estudio, en nuestro caso es la entrada del convertidor catalítico)

$$DVAL = 0.058 \text{ [m]}$$

AVAL.: Área de la válvula

$$AVAL = (PI * (DVAL)^2) / 4 \text{ [m}^2\text{]}$$

PATM.: Presión atmosférica [mmHg] (esta presión se introduce en el programa en mmHg y el programa la multiplica por un factor de conversión para trabajarla en [Pa]).

$$1Pa - 0.0075 \text{ mmHg}$$

$$PATM = PATM[\text{mmHg}] * 133.322 \text{ [Pa]}$$

DDIAF: Diámetro de diafragma

$$DDIAF = 0.0125 \text{ [m]} \text{ (L1 superior)}$$

$$DDIAF = 0.027 \text{ [m]} \text{ (L2 inferior)}$$

DTUB: Diámetro del tubo

$$DTUB = 0.0488 \text{ [m]}$$

B: Relación de diámetros

$$B = DDIAF / DTUB$$

ADIAF: Área del diafragma

$$ADIAF = (PI * (DDIAF)^2) / 4 \text{ [m}^2\text{]}$$

Se requiere saber la temperatura ambiente en °K.

TAMB: Temperatura ambiente

$$TAMB = TAMB[°C] + 273.15 \quad [°K]$$

De la ecuación $PV = RT$ de gases ideales, en este caso el gas de trabajo es aire.

VATM.: Volumen atmosférico

$$VATM = 287 * TAMB / PATM \quad [m^3/kg]$$

donde 287 es la constante particular del aire en $[m^2/s^2°K]$, $PATM [N/m^2]$ y $TAM [°K]$.

Las presiones antes y después de las placas de orificio en milímetros columna de agua $[mm H_2O]$ las que son obtenidas de los manómetros diferenciales de los tableros correspondientes, las definiremos de la siguiente manera:

PAAD.: Presión aguas arriba del diafragma

PDIAF.: Presión en el diafragma

PDEP.: Presión del depósito

La presión aguas arriba corresponde a la altura de la columna de agua registrada en el manómetro del primer tablero (viendo el equipo de frente, de izquierda a derecha).

La presión del diafragma corresponde a la altura de la columna de agua registrada en el manómetro del tablero central del equipo.

La presión del depósito corresponde a la registrada en el tercer y último tablero.

Ahora si la *dirección del flujo es impulso* (que es nuestro caso en estudio), se debe considerar una presión aguas arriba del diafragma.

$$PAAD = PATM - (PAAD * 9.795) \quad [Pa]$$

La presión que se lee del manómetro en $mm H_2O$ se multiplica por 9.795 que es un factor de conversión para obtener $[Pa]$.

$$1Pa = 0.102 \text{ mm } H_2O$$

Si la *dirección del flujo es aspiración*, la presión es:

$$PAAD = PATM + (PAAD * 9.795) \quad [Pa]$$

La presión del diafragma es:

$$PDIAF = PDIAF * 9.795 \quad [Pa]$$

Lo mismo ocurrirá con la presión del depósito sólo que ésta dependerá del sentido del flujo, es decir, *si el sentido es impulso* la presión del depósito será:

$$PDEP = PATM - (PDEP * 9.795) \quad [Pa]$$

Si el sentido es aspiración, entonces:

$$PDEP = PATM + (PDEP * 9.795) \quad [Pa]$$

Ahora se definen las temperaturas de los mismos puntos en estudio.

TAA: Temperatura aguas arriba del diafragma

$$TAA = TAA[°C] + 273.15 \quad [°K]$$

TDEP: Temperatura del depósito

$$TDEP = TDEP[°C] + 273.15 \quad [°K]$$

El programa comenzará a realizar los siguientes cálculos para la obtención del coeficiente de descarga.

De la ecuación de gases ideales $PV = RT$ se tendrá:

VDEP.: Volumen del depósito

$$VDEP = 287 * (TDEP / PDEP) \quad [m^3/kg]$$

Sabiendo que $1/V = \rho$

DEN: Densidad

$$DEN = PAAD / (287 * TAA) \quad [kg/m^3]$$

Con el fin de sintetizar la ecuación que se empleara para el cálculo del coeficiente de flujo, se definen GA1, GA2 y GA3 como:

$$GA1 = 2\gamma / \gamma - 1 \quad ; \quad GA2 = 2 / \gamma \quad ; \quad GA3 = \gamma + 1 / \gamma \quad ; \quad \text{donde } \gamma = 1.4$$

Definiendo las siguientes relaciones de presión como E1 Y E2.

$$E1 = P_{ATM} / P_{DEP}$$

$$E2 = P_{DEP} / P_{ATM}$$

Por el estudio del flujo viscoso se define el número de Reynolds:

$$RE = 10^6$$

Para medidores de fluidos la International Organization for Standardization (ISO) [5] recomienda la siguiente interpolación para el cálculo del coeficiente de descarga para orificio en placa delgada para tomas en las esquinas.

$$C_d \approx 0.5959 + 0.0312B^{2.1} - 0.184B^8 + (0.0029B^{2.5})(10^6 / RE)^{0.75} \quad (a)$$

Se define el factor de velocidad E

$$E : \text{factor de velocidad} \quad (b)$$

$$E = (1 - B^4)^{-1/2}$$

Se define el factor de velocidad en términos de la presión como:

$$EP = 1 - (0.41 + 0.35B^4) PDIAF / \gamma PAAD ; \quad \gamma = 1.4$$

De la teoría de medidores de flujo se sabe que el flujo volumétrico se obtiene de la siguiente manera:

$$Q = C_d A_t [(2 \Delta P / \rho) / (1 - B^4)]^{1/2} \quad [m^3 / s] \quad (c)$$

Donde t indica garganta de la obstrucción

Sustituyendo las ecuaciones (b) en la ecuación (c) y haciendo el álgebra correspondiente, podremos expresarla en términos de nuestras variables en estudio como lo muestra la ecuación (d), con la cual podremos determinar el gasto real que circula por el conducto de la línea utilizada en el banco de flujo.

$$G_{REAL} = C_d * E * EP * A_{DIAF} * (2 * PDIAF * DEN)^{1/2} \quad [kg / s] \quad (d)$$

Sólo se multiplicó por EP y por la densidad para obtener el gasto o flujo másico que pasa a través de la placa de orificio o diafragma en este caso.

Dado que se requiere conocer cómo se comporta el flujo de aire en su recorrido por la tubería, se recurre a la teoría de flujo viscoso y calcular el número de Reynolds.

Se requiere hacer algunos cálculos antes de poder determinar el gasto másico y, consecuentemente, el coeficiente de flujo. De esta manera se tiene que:

ATUB: Área de la tubería

$$ATUB = 3.1416 DTUB^2 / 4 \quad [m^2]$$

Sabiendo que el gasto másico se expresa como $m = VA\rho$ [kg / s], entonces

$$V = m / A\rho \quad [m / s]$$

De esta manera, se tiene que la velocidad U es

$$U = GREAL / ATUB * \rho \quad [m / s]$$

Para el número de Reynolds $Re = VD / \nu$; donde ν es la viscosidad cinemática, así pues, para el aire $\nu = 1.51 \times 10^{-5}$ [m² / s]

$$RE1 = U DTUB / 0.0000153$$

El programa hace una comparación entre los números de Reynolds, si la diferencia entre estos es menor que 5, es decir, $(RE - RE1) < 5$ entonces debe hacerse el cálculo del gasto másico dependiendo de la dirección del flujo (aspiración o impulso) que se utilizó para la prueba; si la diferencia es mayor, entonces que haga iteraciones calculando nuevamente C_d .

El gasto másico para el modo *Aspiración*

$$GREF = AVAL * (GA1 * PATM / VATM * (E2^{GA2} - E2^{GA3}))^{1/2} \quad [kg / s]$$

Para el modo *Impulso*

$$GREF = AVAL * (GA1 * PDEP / VDEP * (E1^{GA2} - E1^{GA3}))^{1/2} \quad [kg / s]$$

El coeficiente de descarga o de flujo

$$CF = GREAL / GREF$$

REFERENCIAS

1. Giacosa D. Motores endotérmicos. Ediciones Omega, 3ª edición, 1970
2. Wasdyke G. Snyder D. Motor de gasolina de cuatro tiempos, Limusa, 1976
3. Breck W. G., Brown R. J. Química para ciencia e ingeniería, Editorial Continental, México 1987
4. Volkswagen. Biblioteca de mecánica básica, Editorial Continental, México, 1987
5. Frank M. White. Mecánica de fluidos, McGraw-Hill. México, 1988
6. Muñoz F., Payri A. Motores de combustión interna alternativos, Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales. Fundación General UPM, España 1989
7. Galván Zacarías, Antonio. Restauración y modernización del dinamómetro de chasis del laboratorio de control de emisiones; Tesis de licenciatura de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1998
8. Bosch. Manual de la técnica del automóvil, 1999
9. Curso básico para mecánicos del programa integral de reducción de emisiones contaminantes, México, 1999
10. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Manual técnico para la instalación de convertidores catalíticos, México, 2000
11. Díaz Cano, Luis M. Medición de los coeficientes de flujo de un sistema de admisión, mediante un banco de flujo estacionario, Tesis de licenciatura de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2001
12. Godínez Rosales R. Manual de operación y ajuste del banco de ensayos para motores de combustión interna alternativos. Laboratorio de Control de Emisiones, UNAM, México, 2002
13. Martínez Galván, I., Méndez Díaz, S. Análisis cromatográfico de los productos de la combustión de un motor de encendido provocado usando combustibles alternos, Tesis de licenciatura de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2002
14. Gobierno del Distrito Federal, México, Secretaria del Medio Ambiente, Programa de Protección Ambiental del D. F. 2002-2006

15. González Oropeza, R., Galván Zacarías, A. Desarrollo de ciclos de manejo, característicos de Cd. de México, SOMIM, 2003, en evaluación.
16. Huerta, M. Instrumentación del dinamómetro de chasis; Tesis de licenciatura de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2003, en evaluación
17. William H. Crouse, Donald L. Anglin, Puesta a punto y rendimiento del motor, Alfaomega; 3ª edición
18. Instituto Nacional de Ecología, Acuerdo en el que se establece las características y de eficiencia de conversión mínima de gases contaminantes, <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gasetes/207/>
19. Neutronics Enterprises Inc. Emision retrofit kit manual

- Admisión
 de aire, 31
 de combustible, 29
 Analizador de gases, 48
 Aplicaciones de los catalizadores en distintas áreas, 7
- Banco
 de flujo estacionario, 50
 de motor, 46
- Características generales de los convertidores catalíticos, 16
 Carburador, 29
 Catálisis, 6
 Catalizadores, 7
 Ciclos de manejo
 de aceleración simulada, 56
 de característicos de la ciudad de México, 56
 FTP-75, 55
 de prueba IM240, 55
 Comburente, 10
 Combustibles, 9
 Combustión, 9
 anormal, 13
 ideal, 11
 normal, 13
 Condiciones de operación, 21
 Construcción del convertidor, 17
 Control de emisiones, 39
 Convertidor catalítico tres vías, 38
- Diagnósticos a bordo, 43
 Dinamómetro de chasis, 51
- Equipos de medición, 46
- Freno hidráulico, 47
 Funcionamiento de catalizadores automotrices, 16
- Micro controlador, 36
- Parámetros de funcionamiento del motor, 25
 Preignición, 14
 Productos de la combustión, 14
 Prueba
 en banco de flujo, 61
 en banco de motor, 58
 en dinamómetro de chasis, 65
- Razón estequiométrica, 11, 12
 Resultados del banco de flujo, 75
 Resultados del banco de motor, 69
 Resultados del dinamómetro de chasis, 78
- Sensor de oxígeno, 37
 Sistema
 de evaporación, 40
 de recirculación de los gases de escape (EGR), 39
 de ventilación del cárter, 40
 retrofit, 35
 de alimentación de combustible, 28
 Sistemas de inyección de combustible, 30
- Tipos de convertidores catalíticos, 19
- Volumen de desplazamiento y convertidor catalítico, 22