

116



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Zejeu

EVALUACION DE LAS EMISIONES DE UN MOTOR
DE GASOLINA CON CONVERSION A GAS LP Y
EFICIENCIA DEL CONVERTIDOR CATALITICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

EDUARDO LOPEZ MARTIN DEL CAMPO

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. Esteban Barrios Bonilla



FALLA DE ORIGEN

CIUDAD UNIVERSITARIA

1995



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Esta tesis se las dedico a mis Papas,

Hermanos,

y en especial

a mi abuela,

Ofelia Saldivar de la Llatat

por todo el amor y cuidados que nos brindo.

México D.F., Noviembre de 1995

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Francisco Solorio Ordáz; Jefe del Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental, de la Facultad de Ingeniería, UNAM; por las facilidades y comprensión para este proyecto.

A DGAPA por su apoyo económico.

Al Dr. Carlos Emilio Romero Jiménez por un invaluable ayuda en la preparación de la experimentación y sus conocimientos de Combustión y Contaminación, durante el tiempo que estuvo en México.

Al Dr. Ricardo Chicuriel Uziel del Instituto de Ingeniería, por su Transductor de presión.

Al M.I. Luis Cerecedo Figueroa por su ayuda con el hilo caliente y algunos tips.

Al Jefe y Personal del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería, por las facilidades prestadas.

Al Sr. Daniel R. Andrade por su ayuda en la experimentación e instalaciones.

en el Instituto Mexicano del Petroleo:

Al Ing. Rafáin Rodríguez Pérez, Gerente de Protección Ambiental y Control Energético

Al Ing. Luis Díaz Gutiérrez, Jefe del Departamento de Contaminación Atmosférica y Combustión Interna.

Al Ing. Luis Morales, Jefe de la División de protección Ambiental y colaboradores, por las facilidades para calibrar el Bacharach 300 NSX.

Al Dr. Antonio Diego Marín, Jefe del Departamento de Sistemas de Combustión del Instituto de Investigaciones Eléctricas en Cuernavaca, por las facilidades para la calibración del Bacharach 300 NSX

y en especial:

Al M.I. Estaban Barrios Bonilla, por la dirección de esta Tesis

A Gerardo Luyando López por su valiosa ayuda en la experimentación.

Y a Margarita, Gabriel, Octavio, Pablo y Rafita.

México D.F., Noviembre de 1995

Í N D I C E

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
CAPITULO 2: CONCEPTOS TEÓRICOS	3
2.1 Motor de combustión interna	3
2.2 Definiciones	4
Relación de compresión	4
Renovación de la carga	4
Traslape de válvulas	4
Avance de la chispa	4
Gases de escape	4
EGR	5
2.3 Sistema de combustible	5
2.4 Sistemas de combustibles del laboratorio para el motor FORD V8	8
2.4.1 Gasolina	8
2.4.3 GAS LP	8
CAPITULO 3: CONTAMINANTES	11
3.1 Naturaleza y alcance del problema	11
3.2 Óxidos de nitrógeno	16
3.2.1 Cinética de formación del NO	16
3.2.2 Formación de NO ₂	23
3.2.3 Formación de NO en motores encendidos por chispa	25
Razón de equivalencia (28); Fracción de gas quemado (29); Exceso de aire y EGR (31); Adelantamiento de la chispa (32)	
3.3 Monóxido de Carbono	34
3.4 Emisiones de Hidrocarburos sin quemar	36
3.4.1 Antecedentes	36
3.4.2 Extinción de la flama y fundamentos de oxidación	38
3.4.3 Emisiones de HC en motores de ignición por chispa	40
Mecanismos de HC en cavidades (41); Absorción y	

desabsorción en el aceite del motor (43); Calidad pobre
de combustión (44); Efectos de los depósitos (45)

CAPITULO 4: CATALIZADORES	47
4.1 Introducción	47
4.2 Historia de los catalizadores automóviles	47
4.3 El catalizador de tres vías	53
4.3.1 El sensor de oxígeno	53
4.4 Notas sobre los catalizadores en el mundo	55
CAPITULO 5: EXPERIMENTACIÓN	57
5.1 INTRODUCCIÓN	57
5.2 Parámetros y variables a considerar	57
5.2.1 Velocidad de giro del motor	58
5.2.2 Carga del motor	58
5.2.3 Ángulo de encendido	59
5.2.4 Razón de equivalencia	59
5.2.5 Temperatura del agua de refrigeración	59
5.2.6 Variables auxiliares para la medición	60
5.3 Protocolos de experimentación	61
5.3.1 Protocolo para el sistema de combustible	61
5.3.2 Protocolo del freno hidráulico	62
5.3.3 Protocolo del sistema de refrigeración	62
5.3.4 Protocolo del BACHARACH 300 NSX	63
5.3.5 Protocolo del KAL	64
5.4 Definición de las pruebas	64
5.4.1 Nomenclatura de las variables	64
Variables de entrada (65); Variables de salida (66); Otras variables (66)	
5.4.2 Velocidad variable	65
Estabilización de las condiciones (67)	
5.4.3 Carga variable	66
5.4.4 Ángulo de avance variable	66
5.4.5 Razones de equivalencia variables y velocidades de hilo caliente	67

5.4.6 Temperatura de agua constante	67
5.4.7 Matriz de mediciones	67
5.5 Mediciones finales de la experimentación	68
5.5.1 Velocidad variable	68
5.5.2 Carga variable	69
5.5.3 Ángulo de avance variable	71
5.5.4 Razón de equivalencia variable	72
CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
6.1 Velocidad variable	75
Reducción en el catalizador	76
Datos numéricos finales	78
6.2 Ángulo de encendido variable.	79
Reducción en el catalizador	81
Datos numéricos finales	83
6.3 Razón de equivalencia variable	84
Reducciones en el catalizador	85
6.4 Temperatura de agua variable	88
Reducción en el catalizador	89
Datos numéricos finales	90
6.5 Carga variable	91
NO _x y HC	91
CO ₂ , CO, O ₂	92
Reducciones en el catalizador	94
Salidas de NO _x y HC	94
Salidas de CO ₂ , CO y O ₂	95
Datos numéricos finales	96
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
7.1 Emisiones	98
7.2 Recomendaciones	100
REFERENCIAS	102

Apéndice A	103
NOMENCLATURA	103
Apéndice B	104
HIDROCARBUROS	104
Apéndice C	105
ESTEQUIOMETRÍA	105
Apéndice D	108
ESPECIFICACIONES DEL BACHARACH 300 NSX	108
Apéndice D.2	110
ESPECIFICACIONES DEL COMPLEMENTO PARA LA MEDICIÓN DE NOx Y SO ₂ DEL	
BACHARACH 300 NSX	110
Curvas de precisión del BACHARACH 300 NSX	111
Apéndice E	112
ESPECIFICACIONES DEL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN PCB PIEZOTRONICS,	
MONTADO EN BUJÍA.	112
Apéndice F	113
F.1 Especificaciones del motor	113
F.2 Especificaciones del KAL equipo	113
Apéndice G	114
CÁLCULO DE LA RAZÓN DE EQUIVALENCIA	114
BIBLIOGRAFÍA	116

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Debido al problema de la contaminación del aire en el Valle de México, se han planteado diversos programas para la disminución de esta, como son el programa "Hoy no circula", el cambio a motores ecológicos por parte de Ruta-100, la utilización del convertidor catalítico y la implementación del sistema de inyección de combustible electrónica en unidades automotoras nuevas, la refinación de combustibles con una mínima cantidad de azufre y plomo (Magna SIN y Diesel SIN) para que puedan ser utilizadas en unidades con sistema de convertidor catalítico y el programa de verificación. Estos programas se han llevado a cabo en colaboración de los sectores público y privado, entre ellos SECOFI, PEMEX, SEDESOL, SEMIP, IMP, UNAM, etc. por parte del sector público y por el privado las compañías automotrices, además de algunas organizaciones no gubernamentales y la industria de conversiones a gas y convertidores catalíticos.

Uno de estos es la utilización de gas L.P. como combustible sustituto de la gasolina empleada generalmente. Se habla de una combustión completa y limpia, de acuerdo a los fabricantes de los equipos de carburación de gas¹. Estos mismos indican que la operación de estos motores resulta ser más económica comparada con la operación del mismo motor utilizando gasolina. Las emisiones nocivas se reducan hasta en un 88%, ya que la gasolina produce el 3.5% de CO, mientras que el gas L.P. produce 1.35%; la gasolina produce 460 ppm de HC sin quemar mientras que el gas produce solamente 53 ppm, además la gasolina produce 1420 ppm de NO_x y el gas 292 ppm a una velocidad de ralenti. Todas las ventajas anteriores son de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes.

La conversión para quemar Gas LP en noviembre de 1994 costaba alrededor de \$5,000.00 con convertidor catalítico de tres vías sin el tanque de almacenamiento.

1.2 Objetivos

El objetivo es realizar las pruebas necesarias para la caracterización de un motor de combustión interna de un automóvil diseñado para utilizar gasolina, al cual se le realizó una adaptación para tener un sistema dual de combustible, esto es que puede utilizar gasolina o gas. Este sistema permite la utilización de cualquiera de los dos combustibles a voluntad del operador mediante un conmutador activado por un interruptor en el tablero del vehículo.

El estudio del motor se centra exclusivamente a la utilización del gas L.P. como combustible, debido a dos factores principales. El primero es la convocatoria del Departamento del Distrito Federal con clave DGE-SEEM-GN-1992-01, la cual propone la exención del programa "Hoy no circula" de las flotillas de carga de unidades automotores que utilicen gas como combustible, mientras no rebasen un peso bruto vehicular de 5,500 kg. El segundo factor es la norma de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, NOM-034-SCFI-1993, "Instalación de equipo de carburación a gas L.P. en motores de combustión interna (revisión de la NMX-D-179-CT-1981)".

De esta norma se extraen los siguientes dos incisos:

- 5.2.1 No se permite en ningún caso, la instalación de sistemas duales como (gas L.P.-gasolina).
- 5.2.2 El vehículo no debe contar con tanque de gasolina.

De acuerdo a lo anterior se descartó la realización de un estudio enfocado al sistema dual, ya que se busca obtener resultados de aplicaciones prácticas además de ya que existe un estudio del mismo motor con gasolina².

Con lo anterior se definen:

- 1- La medición de las emisiones contaminantes a diferentes cargas
- 2- Observación del comportamiento del convertidor catalítico

CAPITULO 2: CONCEPTOS TEÓRICOS

El objetivo de este capítulo es describir de manera breve el funcionamiento general del motor así como el sistema de combustible en general de cualquier vehículo a gasolina o diesel y el de gas LP, marcando sus diferencias y algunos conceptos generales.

2.1 Motor de combustión interna

El motor de un automóvil de cuatro carreras o tiempos transforma la energía térmica derivada de la combustión de un hidrocarburo en energía mecánica transmitida al tren motriz del mismo.

Las carreras del ciclo son las siguientes:

Carrera de admisión: El pistón desciende desde el punto muerto superior, abriéndose la válvula^a de admisión mientras continúa el traslape de la de escape, al descender el pistón dentro del cilindro genera un vacío que con ayuda de la mezcla que viene por el múltiple de admisión renueva la carga del cilindro, llenando este con la mezcla fresca y residuos de la carrera anterior la cual está lista para su oxidación.

Carrera de compresión: Esta carrera comienza cuando el pistón empieza a ascender dentro del cilindro desde el punto muerto inferior, permaneciendo abierta la válvula de admisión en los primeros instantes de esta carrera para garantizar el llenado del cilindro. Al cerrarse la válvula de admisión, el pistón comprime la mezcla de gases y algunos grados antes del punto muerto superior se genera una chispa en los electrodos de la bujía iniciando así la combustión (avance de la chispa).

^a Se menciona válvula, pero también pueden ser válvulas debido a los últimos diseños de los motores

Carrera de expansión: Aunque la combustión puede comenzar algunos grados antes del punto muerto superior, esta carrera comienza después de este, con la expansión de los gases que alcanzaron un pico de temperatura y presión aprovechando esta energía que se genera y transmitiéndola al tren motriz.

Carrera de escape: Una vez que el pistón llega al punto muerto inferior después de la carrera de expansión se abre la válvula de escape y debido a las altas presiones que prevalecen en la cámara de combustión hay un primer escape espontáneo de los gases quemados (60%), lo que queda es expulsado por el pistón en su carrera ascendente, y al llegar a la parte superior se repite el ciclo completo.

2.2 Definiciones

Relación de compresión: La relación de compresión (rc) se define como el cociente de la suma del volumen desplazada más el volumen muerto entre el volumen muerto.

Renovación de la carga: Es la mezcla que viene del carburador o del múltiple de admisión en el caso de inyección sincronizada, y que está lista para su combustión en el nuevo ciclo.

Traslape de válvulas: Es el tiempo que permanecen abiertas al mismo tiempo las válvulas de admisión y escape, entre ambas carreras con el fin de optimizar la salida de los gases quemados al ser desplazados por la mezcla fresca.

Avance de la chispa (timing): Es el tiempo que se le da a la chispa en los electrodos de la bujía para que inicie la combustión, este tiempo se da en grados del cigüeñal antes punto del muerto superior, después de este punto se le denomina retraso.

Gases de escape: Son los gases quemados resultado de la oxidación de los hidrocarburos y otros gases en la cámara de combustión del motor.

EGR (Exhaust gas recirculated): Los gases de recirculación son una porción de los gases de escape que se vuelven a inyectar con la renovación de la carga al cilindro como un método de control en las emisiones de NO_x ^b.

2.3 Sistema de combustible

El sistema de combustible es el encargado de suministrar el energético al motor de una forma dosificada según sea la demanda del mismo. Las principales partes que lo conforman son las siguientes:

ACOMETIDA: Es la parte por donde se carga el depósito de combustible y puede ser de dos formas (a) abierta a la atmósfera cuando se trata de gasolina, alcohol o diesel y (b) cerrada a la atmósfera cuando se contiene el combustible a altas presiones como el metano, gas natural, propano, gas LP, hidrógeno, etc.

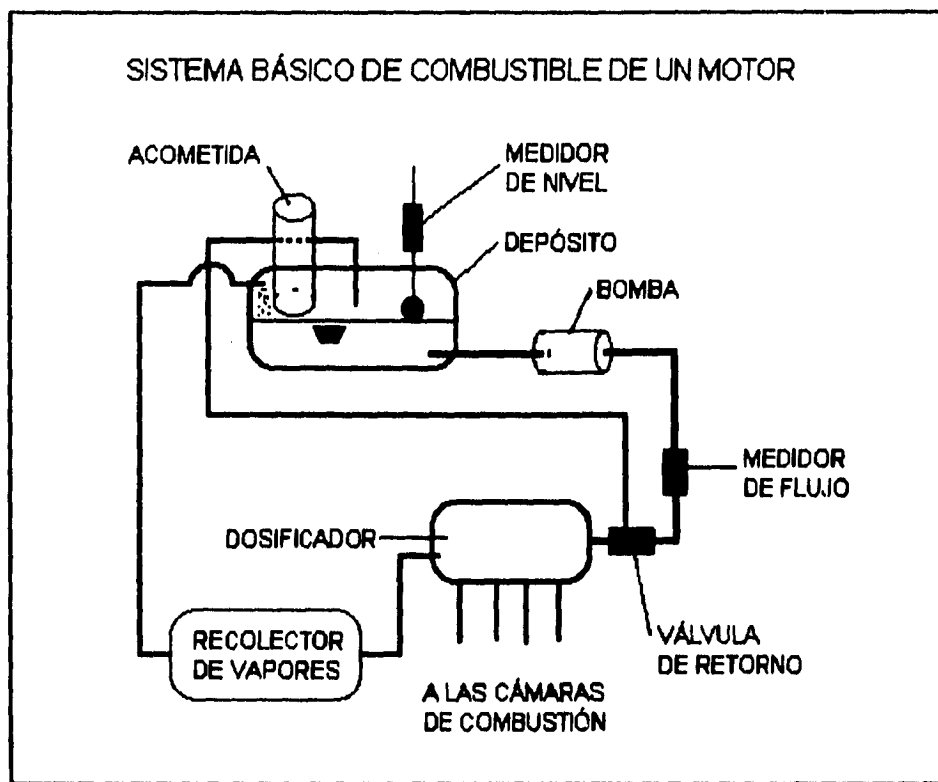
DEPÓSITO: Es un contenedor en donde se almacena el combustible para el motor, ya sea estacionario o móvil, hay dos tipos de depósitos, (a) de presión atmosférica cuando lo que se va a almacenar son líquidos y por lo general tienen un sello para evitar que se evaporen; (b) de alta presión para gases.

MEDIDOR DE NIVEL: Este dispositivo se utiliza para saber la cantidad de combustible que queda dentro del depósito. Hay dos tipos de medir el combustible en un depósito: (a) cuando no está presurizado se utiliza un flotador conectado a una resistencia y según el nivel enviará cierta corriente a un transductor conectado a una escala de medición (b) para los recipientes a alta presión se utiliza un manómetro diferencial y así saber de cuanto combustible disponemos.

MEDIDOR DE VOLUMEN DESPLAZADO: Es un dispositivo que se encarga de medir el volumen de combustible que circula del depósito al dosificador y por medio de cálculos y medición de tiempo se calcula el gasto másico del mismo.

^b El mecanismo de EGR para el control de NO_x se explica en el capítulo 4.

BOMBA: Este dispositivo se encarga de llevar el combustible del depósito al dosificador del sistema (carburador o inyectores) cuando el combustible se encuentra en estado líquido y/o baja presión. Generalmente para los gases y combustibles bajo alta presión no es necesario este dispositivo.



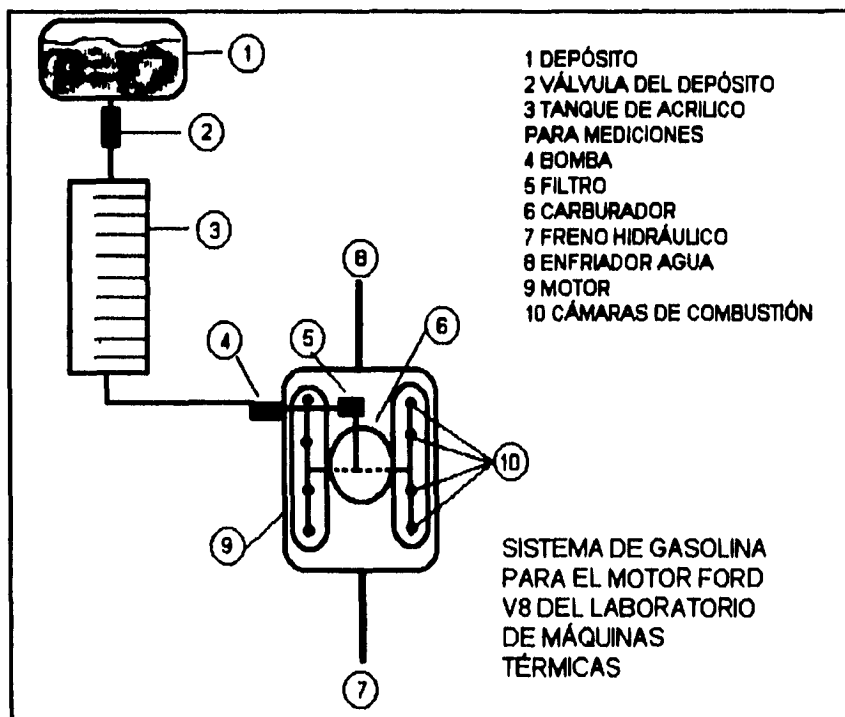
REGULADOR: En los sistemas en que no tengamos bomba de combustible es indispensable la utilización de un regulador de presión.

VÁLVULA DE RETORNO: Esta válvula se encarga de regresar al depósito el combustible que por alguna razón no se necesite en el momento y se encuentre en el dosificador.

TESIS DE LICENCIATURA

DOSIFICADOR: Es el dispositivo que se encarga de mandar la cantidad necesaria de combustible a las cámaras de combustible, ya sea un carburador o los inyectores de un sistema de inyección sincronizada.

RECOLECTOR DE VAPORES DE COMBUSTIBLE(CANNISTER): Este dispositivo tiene el fin de recoger los vapores en los depósitos de baja presión tanto para evitar pérdidas como reducir emisiones. Al evaporarse combustible en el depósito, éste es recogido por el cannister que consiste de filtros de carbón activado y esta sellado, al iniciar la marcha del motor un sistema de aire hace un barrido en el cannister y de esta forma recoge los vapores y los deposita en las cámaras de combustión.



2.4 Sistemas de combustibles del laboratorio para el motor FORD V8

2.4.1 Gasolina

El sistema de gasolina para el motor consta de:

- Depósito de combustible
- Válvula del depósito
- Medidor de volumen desplazado hecho de acrílico
- Válvula a la entrada de la bomba
- Bomba de gasolina
- Filtro de gasolina
- Válvula de retorno
- Carburador

2.4.3 GAS LP

El sistema de gas LP del motor del laboratorio consiste de:

- Depósito estacionario del laboratorio
- Regulador de presión
- Válvula de cierre
- Válvula de paso
- Medidor volumétrico de gas LP
- Conmutador de modo gasolina-gas
- Selenoide de gasolina
- Selenoide de gas
- Evaporador
- Carburador de gas LP
- Convertidor catalítico de 3 vías
- Computadora de dosificación
- Sonda Lambda

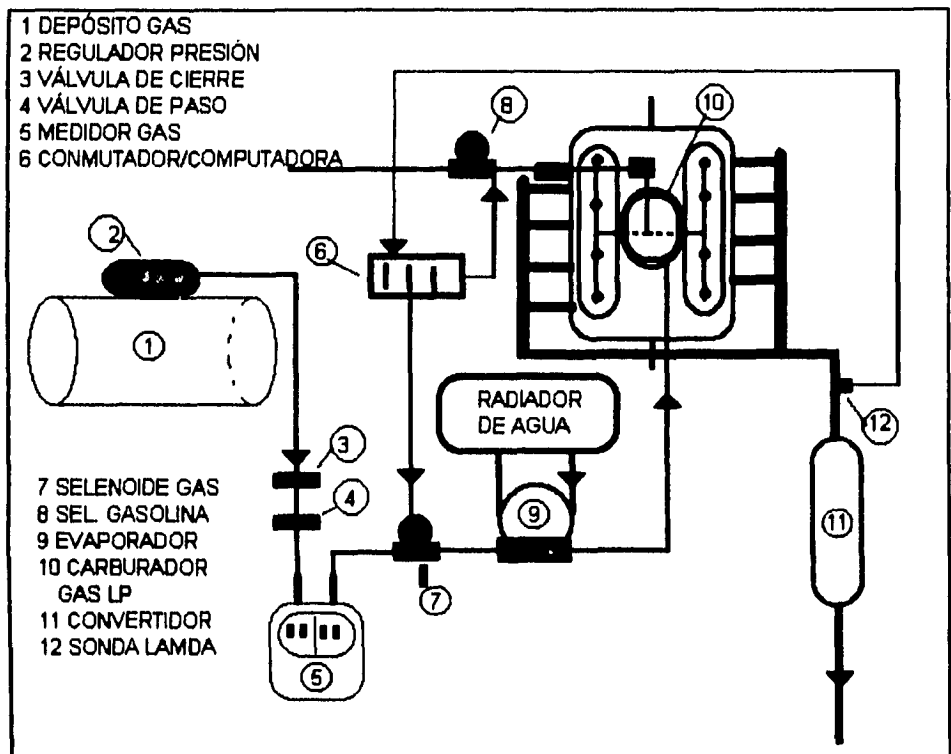
DEPOSITO ESTACIONARIO: Es en donde se almacena el gas LP del motor y demás servicios del laboratorio.

REGULADOR: Regula la presión de línea.

VÁLVULA DE PASO Y CIERRE: Son las válvulas que se tienen como parte del sistema de seguridad.

MEDIDOR VOLUMETRICO DE GAS LP: Se utiliza para medir volúmenes de gas en la experimentación y por medio de cálculos, obtener el gasto másico.

CONMUTADOR: Este hace el cambio del sistema de combustible para quemar gasolina o gas controlando los selenoides correspondientes.



Sistema de alimentación de gas LP para el motor del laboratorio

SELENOIDE DE GASOLINA: Este selenoide es el que controla que entre o no gasolina al respectivo carburador, al estar abierto este, el de gas esta cerrado y viceversa.

SELENOIDE DE GAS: Se encarga de controlar el flujo de gas LP a su respectivo carburador.

EVAPORADOR: Se encarga de pasar de la fase líquida a la gaseosa el gas LP por medio del agua de refrigeración.

CARBURADOR DE GAS LP: Este carburador especial hace la mezcla GAS LP/AIRE para ser introducido a las cámaras de combustión.

CONVERTIDOR CATALÍTICO DE 3 VIAS^c: Reduce químicamente las emisiones de NO_x , HC y CO en CO_2 , H_2O , N_2 y O_2 .

SONDA LAMDA: Esta sonda colocada antes del convertidor catalítico mide la cantidad de oxígeno en forma volumétrica que contienen los gases de escape, para por medio de la computadora hacer las correcciones en la mezcla de gas/aire y trabajar lo más cerca posible de la zona estequiométrica.

COMPUTADORA DOSIFICADORA: Con ayuda de la sonda *lambda* regula la mezcla gas/aire para mantenerla lo más cerca posible de la estequiométrica y de este modo obtener la máxima eficiencia del catalizador.

^c En el capítulo 5 se explica su funcionamiento.

CAPITULO 3: CONTAMINANTES

3.1 Naturaleza y alcance del problema¹

En la actualidad los motores de ignición por chispa^d y los de compresión son las mayores fuentes de contaminación urbana. Los gases que son expulsados por un MEP contienen óxidos de nitrógeno (óxido nítrico NO, y pequeñas cantidades de NO₂, los cuales englobados se denominan NO_x), monóxido de carbono (CO), y compuestos orgánicos, es decir hidrocarburos que están parcialmente o no quemados. Las cantidades relativas dependen del diseño del motor y de las condiciones de operación, pero se puede decir que están en un promedio de condiciones de: NO_x, 500 a 1000 ppm ó 20 g/kg de combustible; CO del 1 al 2% ó 200 g/kg de combustible; y HC, 3000 ppm (como C₁) ó 25 g/kg de combustible. El escape de gases por los anillos del pistón, la evaporación de combustible y lo que se escapa por el sistema de combustible y el sistema de ventilación del carburador al parar la máquina, son también fuentes de contaminación. Sin embargo, en la mayoría de los motores modernos estas fuentes de no-combustión están efectivamente controladas al recircular por medio de la válvula PCV (ventilación positiva del cárter) del cárter que devuelve esos gases al múltiple de admisión y al ventilar el sistema de carburación y el tanque de combustible por medio de un CANNISTER de carbón que absorbe dichos gases, el cual es purgado por una cantidad del aire de entrada durante la operación normal del motor. En las emisiones del motor diesel, la concentración de NO_x son del mismo orden de magnitud a las del motor encendido por chispa. Las emisiones diesel de hidrocarburos resaltan debido a que son más bajas por un factor de 5 a las de un encendido por chispa. Los hidrocarburos en la expulsión pueden llegar a condensarse y formar humo blanco durante el encendido y un calentamiento del motor.

El uso de alcoholes como combustibles alternativos, en cualquiera de los dos tipos de motores (MEC Y MEP) incrementan sustancialmente las emisiones de

^d De aquí y en adelante al motor de encendido por chispa se le denominará MEP (motor de encendido provocado) y al diesel MEC (motor de encendido por compresión)

adhehidos, llegando a ser un contaminante importante en estos combustibles cuando se utilizan en cantidades comparables al combustible que sustituye, por otro lado las gasolinas y el diesel contienen azufre: la gasolina en pequeñas cantidades (≤ 600 ppm de azufre por peso), mientras que el diesel mayores proporciones ($\leq 0.5\%$). El azufre es oxidado para producir bióxido de azufre, SO_2 , del cual una porción, aunque difícilmente puede ser oxidada a trióxido de azufre, SO_3 , el cual se combina con agua para formar vapor de ácido sulfúrico.

En general, las concentraciones de contaminantes en máquinas de combustión interna difieren de los valores al asumir equilibrio químico. De este modo los mecanismos químicos detallados por los cuales estos contaminantes se forman y la cinética de estos procesos son importantes para determinar los niveles de emisión. Para algunas especies de contaminantes, por ejemplo, monóxido de carbono, compuestos orgánicos, y partículas, las reacciones de formación y destrucción están íntimamente ligadas al proceso primario de combustión. Es por eso que para el entendimiento de la formación de estas especies se requieren conocimientos de la química de combustión. Los procesos de formación y destrucción de los óxidos de nitrógeno y azufre no forman parte de los procesos de combustión. Sin embargo, las reacciones que producen estas especies toman lugar en la atmósfera creada por las reacciones de la combustión, por lo tanto los dos procesos están íntimamente ligados. La descripción de los procesos de producción de los contaminantes se explicará a lo largo de este capítulo.

Los procesos por los cuales se forman los contaminantes dentro del cilindro en un motor convencional de ignición por chispa está ilustrada cualitativamente en la figura 3.1^o. El esquema muestra la cámara de combustión en cuatro diferentes fases de la máquina en el ciclo de operación: compresión, combustión, expansión y expulsión.

El óxido nítrico se forma a través de las altas temperaturas de las gases quemados atrás de la flama por medio de reacciones químicas en las cuales se

^o Las gráficas utilizadas en este capítulo provienen del capítulo 11 del "Internal Combustion Engine Fundamentals" de Heywood, excepto en donde se indique.

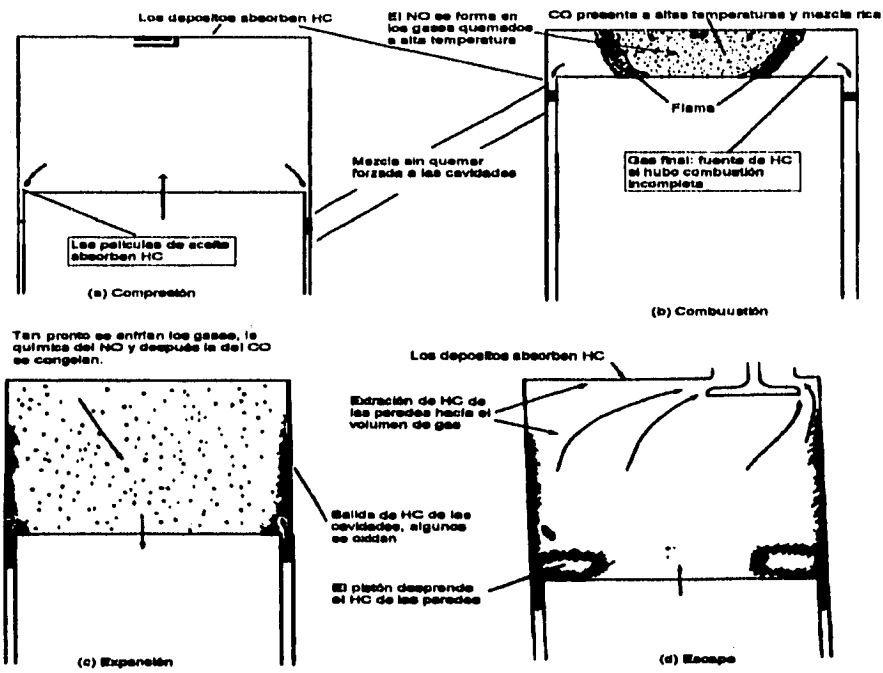


Figura 3.1 Esquema de los mecanismos de formación de HC, CO Y NO en un motor MEP.

involucran átomos y moléculas de nitrógeno y oxígeno, los cuales no consiguen un equilibrio químico. Mientras más alta sea la temperatura de los gases quemados, más alta será la relación de formación de NO. Cuando los gases quemados se enfrían debido a la carrera de expansión las reacciones que involucran la formación de NO se *congelan*, y quedan concentraciones de NO muy por encima a los niveles correspondientes a las condiciones de equilibrio de la expulsión.

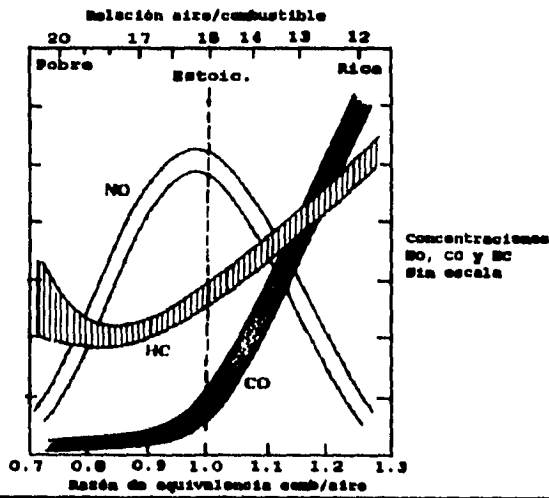
El monóxido de carbono también se forma durante el proceso de combustión. Con mezclas ricas combustible-aire, no hay suficiente oxígeno para quemar totalmente todo el carbono del combustible y llevarlo a CO₂; además, en los productos de alta temperatura, aún en mezclas pobres, hay niveles significantes de CO en la disociación. Después, en la carrera de expansión, los procesos en la oxidación

de CO se congela tan pronto como las temperaturas de las paredes caen.

La producción de los hidrocarburos tiene diferentes fuentes. Durante la compresión y combustión, la presión ascendente del cilindro induce a un volumen del gas en hendiduras o pequeños paquetes, dentro de la cámara de combustión: los volúmenes entre el pistón, anillos y las paredes del cilindro son las más grandes de estos. La mayoría de este gas es mezcla combustible-aire sin quemar; mucho de este escapa del proceso primario de combustión ya que la entrada de estas hendiduras es demasiado estrecha para que pueda entrar la flama. Este gas, el cual abandona estas hendiduras en los procesos de expansión y expulsión, es una de las fuentes de emisión de hidrocarburos sin quemar. Otra de las fuentes son las paredes de la cámara de combustión.

Una capa refrigerante formada de mezcla de combustible sin quemar y parcialmente quemada se deposita en la pared, cuando la flama se acerca a esta se extingue, pero se ha observado que los HC sin quemar de esta delgada película (≤ 0.1 mm) se queman rápido cuando las paredes de la cámara están limpias. También se ha observado que los depósitos porosos en las paredes de las máquinas actuales en

operación incrementan las emisiones de HC.



Variación de las concentraciones de HC, CO y NO en un motor convencional MEP, variando la razón de equivalencia combustible/aire.

Figura 3.2

TESIS DE LICENCIATURA

Se cree que una tercera fuente de hidrocarburos no quemados puede ser una delgada película del aceite del motor dejada en la pared del cilindro, pistón y posiblemente en la cabeza del mismo. Estas capas de aceite pueden absorber y disociar los componentes de hidrocarburos del combustible, antes y después de la combustión, respectivamente, de esta forma permitiendo que una fracción del combustible escape sin quemar a la fase primaria de combustión.

La última fuente por mencionar de HC en los motores es la combustión incompleta debido al enfriamiento del volumen de gases de la flama a medida que los ciclos de los motores tienen una combustión lenta. Tales condiciones suelen ocurrir durante la operación transitoria del motor cuando la relación aire/combustible, el adelantamiento de la chispa, y la fracción de los gases de recirculación para control de emisiones no están ajustadas debidamente.

Los hidrocarburos sin quemar salen del pistón al ser contenidos en el volumen del gas durante la purga al final de la carrera de expulsión cuando el pistón empuja el gas desprendiéndolo de la pared fuera de la cámara de combustión. Hay que mencionar que en las carreras de expansión y expulsión llega a haber una oxidación de estos hidrocarburos.

Una de las variables más importantes en la determinación de las emisiones en un motor de ignición por chispa es la razón de equivalencia $(\text{combustible/aire})_{\text{actual}}/(\text{combustible/aire})_{\text{estequiométrica}}$. La figura 3.2 muestra de forma cualitativa cómo varían las emisiones de NO, CO y HC con este parámetro para los combustibles de hidrocarburos en general. El motor de chispa comúnmente es operado cerca de la zona estequiométrica o ligeramente en mezcla rica, para asegurar una operación suave y segura. La figura 3.2 muestra que las mezclas pobres dan como resultado emisiones más bajas de NO_x y CO al mismo tiempo que disminuye la calidad de la combustión, con el peligro de la extinción de la flama, y es cuando las emisiones de HC se incrementan rápidamente y la operación del motor se vuelve errática.

Los perfiles de estas curvas indican la complejidad del control de emisiones. En

un motor frío cuando la vaporización del combustible es lenta, el gasto de combustible se incrementa para proveer al cilindro una mezcla rica en combustible la cual es fácil de quemar. Es por eso, que hasta que el motor alcanza su temperatura de funcionamiento y se retira la mezcla rica de combustible, que la producción de CO y HC son altas. A condiciones de carga parcial, las mezclas pobres pueden ser utilizadas produciendo bajas emisiones de CO y HC y moderadas de NO.

El uso de gases expulsados para la recirculación y diluidos en las mezclas de admisión del motor disminuyen las emisiones de NO, pero deteriora la calidad de combustión. La recirculación de gases de escape (EGR: exhaust gas of recirculation) es utilizada para la mezcla estequiométrica en los sistemas de control de algunos motores. Hay que hacer hincapié en que los mayores niveles de potencia son obtenidos en motores con una mezcla ligeramente rica y sin dilución de los gases de escape en la carga de entrada al motor. Como se ve, se necesitan muchas técnicas de control de emisiones para reducir las emisiones de contaminantes en todos los rangos de operación del motor.

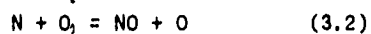
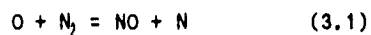
3.2 Óxidos de nitrógeno

3.2.1 Cinética de formación del NO

Por conveniencia el óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO₂) se agrupan como NO_x, de donde el óxido nítrico es de los óxidos de nitrógeno predominante producido dentro del cilindro del motor. La principal fuente de NO es la oxidación del nitrógeno atmosférico molecular. Sin embargo si el combustible contiene cantidades considerables de nitrógeno, la oxidación de los compuestos de nitrógeno llega a ser una fuente adicional. Las gasolinas contienen cantidades insignificantes de compuestos de o con nitrógeno, y a pesar de que el diesel contiene mayores cantidades de éste las emisiones no son considerables.

TESIS DE LICENCIATURA

El mecanismo de formación de NO a partir del nitrógeno atmosférico ha sido estudiada exhaustivamente^f. Generalmente está aceptado que en la combustión cerca de las mezclas de combustible-aire estequiométricas las principales reacciones que gobiernan la formación de NO a partir de nitrógeno molecular (y su destrucción) son:^f



Reacción	Cta. de relación cm ³ /mol s	Rango de temperatura, K	Incertidumbre, factor de ó %
(1) $O + N_2 \rightarrow NO + N$	$7.6 \times 10^{13} \exp[-38e^3/T]$	2000-5000	2
(-1) $NO + N \rightarrow O + N_2$	1.6×10^{13}	300-5000	±20% a 300 K 2 a 2000-5000 K
(2) $N + O_2 \rightarrow NO + O$	$6.4 \times 10^9 \exp[-3150/T]$	300-3000	±30% 300)1500 K 2 a 3000 K
(-2) $O + NO \rightarrow O_2 + N$	$1.5 \times 10^9 \exp[-19500/T]$	1000-3000	±30% a 1000 K 2 a 3000 K
(3) $N + OH \rightarrow NO + H$	4.1×10^{13}	300-2500	±30%
(-3) $H + NO \rightarrow OH + N$	$2 \times 10^{14} \exp[-23650/T]$	2200-4500	2

Las constantes de razón de formación para estas reacciones hacia adelante y de reversa (k_{i+} y k_{i-} respectivamente) han sido determinadas en numerosos estudios experimentales. Los valores recomendados para estas constantes tomados de condiciones extremas se muestran en la tabla 3.1 de donde además se observan los rangos de temperatura para las reacciones en reversa las cuales son útiles para observar las reacciones en el catalizador. Nótese que la constante de equilibrio para cada reacción, $K_{c,i}$, esta relacionada a las razones hacia adelante y de reversa por $K_{c,i} = k_{i+} / k_{i-}$. La razón de formación del NO por medio de las ecuaciones 3.1 a la 3.3 es⁵:

^f Comúnmente llamado el mecanismo de Zeldovich. Zeldovich fue el primero en sugerir la importancia de las dos primeras reacciones y Lavie et al añadieron la tercera al mecanismo; aunque esta no es significativa.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1^+ [O] [N_2] + k_2^+ [M] [O_2] + k_3^+ [N] [OH] - k_1^- [NO] [N] + k_2^- [NO] [O] + k_3^- [NO] [H] \quad (3.4)$$

en donde [] denota concentraciones de especies en moles por centímetro cubico cuando k_i tiene los valores dados en la tabla 3.1 en donde además se observan los rangos de temperatura para las reacciones en reversa que son las que suceden en le catalizador dando una idea de la importancia de (-1) y (-2). La relación constante hacia adelante de la reacción (3.1) y las relaciones constantes para las reacciones en reversa de (3.2) y (3.3) tienen grandes energías de activación lo cual resulta en una relación de formación de NO con una gran dependencia de la temperatura.

Una relación similar a (3.4) puede ser escrita para $d[N]/dt$:

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1^+ [O] [N_2] + k_2^+ [M] [O_2] + k_3^+ [N] [OH] - k_1^- [NO] [N] - k_2^- [NO] [O] - k_3^- [NO] [H] \quad (3.5)$$

Ya que [N] es mucho menor que las concentraciones de otras especies de interés ($\sim 10^{-18}$ fracción molar), es apropiada la aproximación a estado estable: $d[N]/dt$ es equivalente a cero y la ecuación (3.5) se utiliza para eliminar [N]. La relación de formación de NO se transforma en

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1^+ [O] [N_2] \frac{1 - [NO]^2 / (K [O_2] [N_2])}{1 + k_1^- [NO] / (k_2^+ [O_2] + k_3^+ [OH])} \quad (3.6)$$

de donde $K = (k_1^+ / k_1^-) (k_2^+ / k_2^-)$.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1^+ [O] [N_2] + k_2^+ [M] [O_2] + k_3^+ [M] [OH] - k_1^- [NO] [M] + k_2^- [NO] [O] + k_3^- [NO] [H] \quad (3.4)$$

en donde [] denota concentraciones de especies en moles por centimetro cubico cuando k_i tiene los valores dados en la tabla 3.1 en donde además se observan los rangos de temperatura para las reacciones en reversa que son las que suceden en el catalizador dando una idea de la importancia de (-1) y (-2). La relación constante hacia adelante de la reacción (3.1) y las relaciones constantes para las reacciones en reversa de (3.2) y (3.3) tienen grandes energías de activación lo cual resulta en una relación de formación de NO con una gran dependencia de la temperatura.

Una relación similar a (3.4) puede ser escrita para $d[N]/dt$:

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1^+ [O] [N_2] + k_2^+ [M] [O_2] + k_3^+ [M] [OH] - k_1^- [NO] [M] - k_2^- [NO] [O] - k_3^- [NO] [H] \quad (3.5)$$

Ya que [N] es mucho menor que las concentraciones de otras especies de interés ($\sim 10^{-18}$ fracción molar), es apropiada la aproximación a estado estable: $d[N]/dt$ es equivalente a cero y la ecuación (3.5) se utiliza para eliminar [N]. La relación de formación de NO se transforma en

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1^+ [O] [N_2] \frac{1 - [NO]^2 / (K [O_2] [N_2])}{1 + k_1^- [NO] / (k_2^+ [O_2] + k_3^+ [OH])} \quad (3.6)$$

de donde $K = (k_1^+ / k_1^-) (k_2^+ / k_2^-)$.

TESIS DE LICENCIATURA

El NO se forma tanto en el frente de la flama como en los gases de la postflama. En los motores, sin embargo, la combustión se realiza a alta presión por lo que la zona de reacción de la flama es extremadamente delgada ($\sim 0.1 \text{ mm}$)⁶ y el tiempo de residencia dentro de la flama, corto. También, la presión del cilindro aumenta durante casi todo el proceso de combustión, por lo que los gases quemados tempranamente en el proceso de combustión son comprimidos a una mayor temperatura de la que alcanzaron con la combustión. Por eso, la formación de NO en la postflama casi siempre domina cualquier producción de NO en el frente de la flama. Por lo tanto, es conveniente suponer que la combustión y la formación de NO están desacopladas, y para aproximar las concentraciones de O, O₂, OH, H y N₂ se hará por medio de sus valores de equilibrio a la presión local y temperatura de equilibrio.

Para introducir esta suposición de equilibrio es conveniente utilizar la notación $R_1 = k_1^+ [O]_e [N_2]_e = k_1^- [NO]_e [N]_e$, en donde []_e denota concentración en equilibrio, para la reacción (3.1) de equilibrio en un solo sentido, con definiciones similares para $R_2 = k_2^+ [N]_e [O_2]_e = k_2^- [NO]_e [O]_e$ y $R_3 = k_3^+ [N]_e [OH]_e = k_3^- [NO]_e [H]_e$. Sustituyendo [O]_e, [O₂]_e, [OH]_e, [H]_e y [N₂]_e por [O], [O₂], [OH], [H] y [N₂] en la ecuación (3.6) produce

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2x_1(1 - ([NO]/[NO]_e)^2)}{1 + ([NO]/[NO]_e) R_1 / (R_2 + R_3)} \quad (3.7)$$

Los valores típicos de R_1 , R_1/R_2 y $R_1/(R_2 + R_3)$ están dadas en la tabla 3.2. La diferencia entre R_1/R_2 y $R_1/(R_2 + R_3)$ nos indica la importancia de añadir la reacción (3.3) al mecanismo.

Relación de equivalencia	R_1 [‡]	R_1/R_2	$R_1/(R_2 + R_3)$
0.8	5.6×10^{-5}	1.2	0.33
1.0	2.8×10^{-5}	2.5	0.26
1.2	7.6×10^{-5}	9.1	0.14

[†] a 10 atm y 2800 K [‡] Unidades: mol/cm³ s

La fuerte dependencia de la temperatura en la relación de formación del NO^g puede ser demostrada al considerar el valor inicial de d[NO]/dt cuando [NO]/[NO]₀.
 1. Entonces, de la ecuación (3.7),

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2R_1 = 2k_1^+ [O]_0 [N_2]_0 \quad (3.8)$$

El equilibrio atómico de la concentración de oxígeno esta dado por

$$[O]_0 = \frac{K_{p(O)} [O_2]_0^{1/2}}{(RT)^{1/2}} \quad (3.9)$$

de donde K_{p(O)} es la constante de la reacción de equilibrio



y esta dada por

$$K_{p(O)} = 3.6 \times 10^3 \exp \frac{-31090}{T} \text{ atm}^{1/2} \quad (3.10)$$

La relación inicial de formación de NO entonces puede ser escrita [eq. (3.8), (3.9) y (3.10) con k₁⁺ de la tabla 3.1] como: [mol/cm³ 's]

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{6 \times 10^{16}}{T^{1/2}} \frac{O \cdot N}{T} \quad (3.11)$$

La fuerte dependencia de d[NO]/dt a la temperatura es evidente en el término exponencial. Altas temperaturas y altas concentraciones de oxígeno resultan en grandes relaciones de formación de NO. La figura 3.3 nos muestra la relación de formación de NO como función de la temperatura del gas y de la relación de

³ ver rango de temperatura de (1) en tabla 3.1

equivalencia de la mezcla combustible/aire en los gases de la postflama. También se muestra la temperatura de flama adiabática referida a una mezcla de combustible/aire inicialmente a 700 K a una presión constante de 15 atmósferas. Para una combustión adiabática a presión constante (un modelo apropiado para cada elemento del combustible que se quema en el motor), esta relación de formación inicial de NO genera un pico en la composición estequiométrica, y disminuye rápidamente conforme la mezcla se enriquece o empobrece.

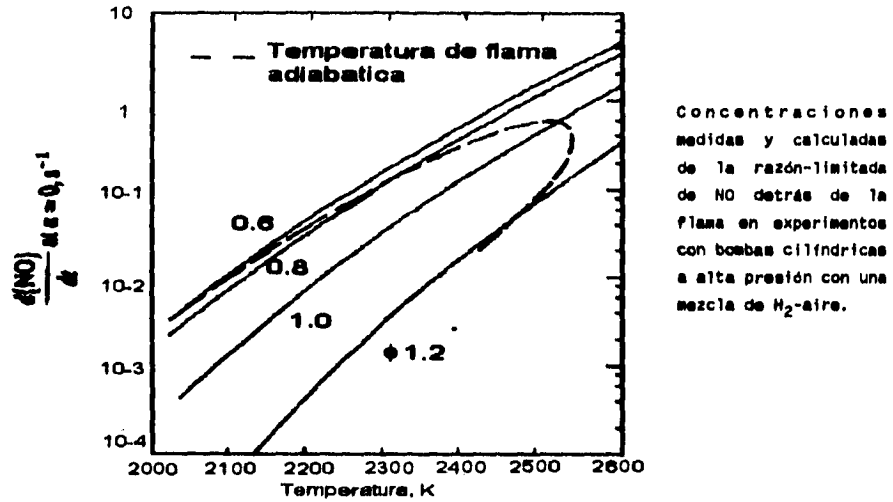


Figura 3.3

El tiempo característico para el proceso de formación de NO, τ_{NO} , puede ser definida por

$$\tau_{NO} = \frac{1}{[NO]_e} \frac{d[NO]}{dt} \quad (3.12)$$

se puede obtener $[NO]_e$ de la constante de equilibrio

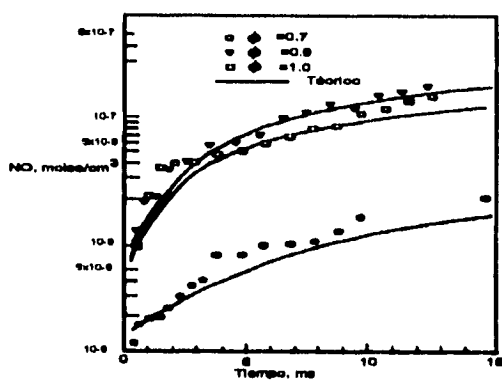
$$K_{NO} = 20.3 \exp(-21650/T)$$

para la reacción: $O_2 + N_2 = 2NO$

como $[NO]_e = (K_{NO} [O_2]_e [N_2]_e)^{1/2}$. Las ecuaciones (3.11) y (3.12) pueden ser combinadas para dar

$$\tau_{NO} = \frac{8 \times 10^{-16} T \exp(58300/T)}{p^{1/2}} \quad (3.13)$$

donde τ_{NO} esta en segundos, T en Kelvin, y p en atmósferas. Para las condiciones de combustión del motor, τ_{NO} usualmente es comparable o mayor al tiempo característico de los cambios de condición en el motor, por lo tanto el proceso de formación es cinéticamente controlado. Sin embargo, en condiciones cercanas a las estequiométricas a las máximas temperaturas y presiones de los gases quemados, τ_{NO} es del mismo orden que los tiempos típicos de combustión (1 ms).



Razón de formación inicial del NO, fracción mísica por segundo (para $[NO]/[NO]_e = 1$), como función de la temperatura para diferentes razones de equivalencia, ϕ y una presión de 15 atm. La línea punteada es para queroseno.

Figura 3.4

La comprobación de que este modelo de formación es válido bajo condiciones de operación típicas de los motores proviene de estudios con bombas de combustión a alta presión. Newhall y Shaded han medido la producción de NO, usando la técnica de absorción de banda- α , detrás de flamas de hidrógeno-aire y propano-aire laminar axialmente en una bomba cilíndrica. Algunos resultados son comparados con predicciones hechas con este esquema cinético en la figura 3.4. Hay que notar que las concentraciones de NO aumentan suavemente desde cerca de

cero, indicando que a esas grandes presiones hay una producción insignificante de NO dentro del frente de la flama.

El nitrógeno del combustible es también una fuente de NO vía de un mecanismo diferente y que aún no está completamente explicado. La tabla 3.3 muestra el contenido típico de nitrógeno de combustibles derivados del petróleo. Durante la destilación, el nitrógeno del combustible se concentra en las fracciones de mayor ebullición. En los combustibles destilados, el nitrógeno llega a existir como aminos y compuestos anillados (piridina, quinolina, y carbazoles). Durante la combustión estos compuestos sufren una descomposición térmica antes de la zona de quemado. Los precursores de la formación de NO pueden ser por lo tanto compuestos de bajo peso molecular que contienen hidrógeno como el NH_3 , HCN, y CN. La información detallada de la cinética está limitada. La oxidación del NO es usualmente rápida, ocurriendo en una escala de tiempo comparable a las reacciones de combustión. La producción de NO a partir del combustible es sensible a la razón de equivalencia combustible/aire. Las producciones relativamente altas de NO son obtenidas para mezclas pobres y estequiométricas; las producciones relativamente bajas se encuentran para las mezclas ricas. La producción de NO de esta fuente es poco dependiente de la temperatura, en contraste de la fuerte relación del NO formado del nitrógeno atmosférico.

Fracción	Nitrógeno promedio, % peso	Rango, % peso
Crudo	0.65	-
Destilados pesados	1.40	0.60-2.15
Destilados ligeros	0.07	0-0.60

3.2.2 Formación de NO_2

Al considerar el equilibrio químico se indica que para los gases quemados a temperaturas típicas de flama, las relaciones de NO_2/NO pueden llegar a ser

despreciables. Esto se ha observado de forma experimental para los motores de encendido por chispa, en los diesel el NO_2 puede ser de un 10 a un 30% del total de las emisiones de los óxidos de nitrógeno. Un mecanismo para la persistencia del NO_2 es el siguiente. El NO formado en la zona de la flama puede ser convertido de una manera rápida a NO_2 por medio de reacciones como



y consecuentemente la conversión del NO_2 a NO por medio de



a menos que el NO_2 formado en la flama sea congelado al mezclarlo con un fluido frío. Esta explicación es consistente con la gran relación NO_2/NO que ocurre a bajas cargas en diesel, cuando las regiones más frías que congelan las reacciones hacia NO son muy extendidas. La figura 3.5 nos muestra ejemplos de emisiones de motores por ignición por chispa con gasolina y un diesel. El máximo valor para la relación de NO_2/NO para el motor de chispa es del 2%, con una relación de equivalencia cerca de 0.85. Para el diesel esta relación es mayor, además de que se encuentra en la zona de baja carga y depende de la velocidad del motor.

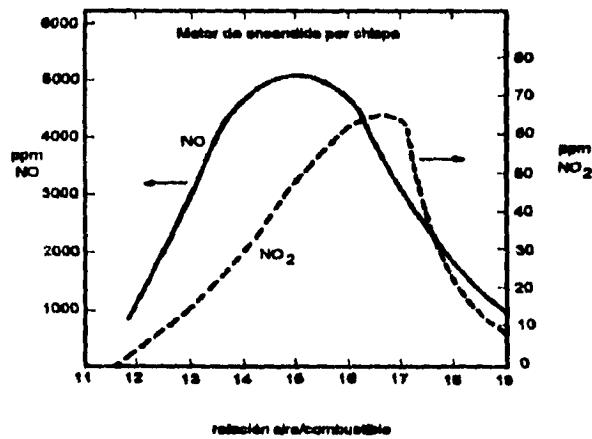


Figura 3.5 Concentraciones de NO y NO_2 en el escape, 1500 rpm.

Comúnmente se miden las emisiones totales de NO_x , NO más NO_2 , con un analizador de quimiluminiscencia. Siempre es importante checar cuidadosamente si las

emisiones específicas de NO_x están dadas en términos de masa de NO o NO_2 , los cuales tienen pesos moleculares de 30 y 46, respectivamente.

3.2.3 Formación de NO en motores encendidos por chispa

En los motores convencionales de encendido por chispa el combustible y aire se mezclan^h en el sistema de admisión del motor, para luego mezclarse con el gas residual dentro del cilindro durante la carrera de admisión. Es por eso que la relación combustible/aire y la cantidad de diluyenteⁱ es aproximadamente uniforme a lo largo de todas las cargas en el interior del cilindro durante la combustión^j. Ya que la composición es esencialmente uniforme, la naturaleza del proceso de formación del NO dentro del cilindro puede ser entendida al acoplar el mecanismo cinético desarrollado en la sección 3.2.1 con la distribución de la temperatura de los gases quemados y la presión en el cilindro durante el proceso de combustión y expansión.

La mezcla que se quema primero es comprimida a altas temperaturas mientras que la presión del cilindro sigue incrementándose, la mezcla que queda es comprimida principalmente como mezcla sin quemar alcanzado después de la combustión una temperatura de gases quemados inferior. La figura 3.6a y b muestra la presión medida de un motor en operación, con estimaciones de la fracción de masa quemada (x_p) y la temperatura de un elemento del gas que se ha quemado justo después de la descarga de la bujía y de una porción del gas quemado al final del proceso de combustión. El modelo utilizado para estimar estas temperaturas asume que no hay mezclado entre los elementos de la mezcla que se queman a diferentes lapsos de tiempo. Si el modelo de formación cinética del NO [Eq. (3.7)] es usado para

^h además de los gases de recirculación EGR en los motores que tengan este dispositivo.

ⁱ EGR + gas residual

^j Es ampliamente conocido que la mezcla dentro del cilindro no es completamente uniforme y varía de un ciclo a otro. Ambos factores contribuyen a las variaciones ciclo-a-ciclo de la combustión. Para la discusión que nos ocupa, la suposición de la uniformidad de la mezcla es adecuada.

calcular concentraciones de NO en estos elementos quemados de gas, usando las concentraciones de equilibrio de las especies de O, O₂, N₂, OH y H correspondientes al promedio de la relación combustible/aire y la fracción de gas quemados de la mezcla además de los perfiles de temperatura y presión, se obtiene límite de los perfiles de concentración de la figura 3.6c. También están las concentraciones de NO que corresponden al equilibrio químico a esas condiciones.

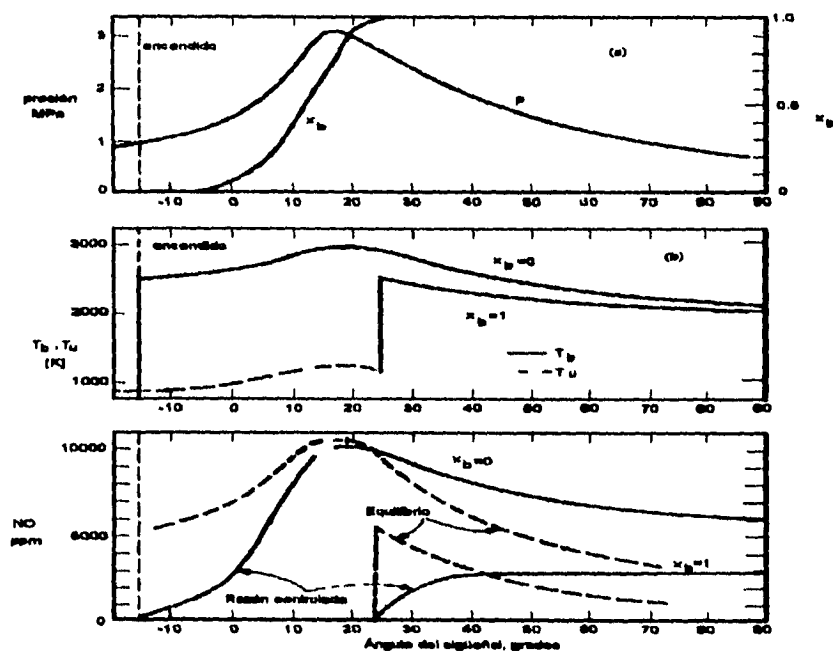


Figura 3.6

Las concentraciones a relación-controlada se incrementan a partir del NO del gas residual, retrasándose los niveles de equilibrio, entonces atraviesan los niveles de equilibrio y se "congelan" por arriba de las condiciones de equilibrio en la salida de los gases de expulsión. Dependiendo de detalles en las condiciones de

TESIS DE LICENCIATURA

operación del motor, las concentraciones de relaciones-controladas pueden o no acercarse a los niveles de equilibrio al pico de presiones y temperaturas del pistón. También, la cantidad de descomposición del pico de niveles de NO que ocurren durante la expansión dependen de las condiciones del motor así como si los elementos de la mezcla se quemaron temprano o con retraso.

Una vez que la química del NO ha sido congelada en la primera parte de la carrera de expansión, la integración de todos los elementos nos dará el promedio final de la concentración de NO en el cilindro, que equivale a la concentración de los gases de expulsión. Es por eso, que si $\{NO\}$ es la fracción de masa local de NO, entonces el promedio a la salida de fracción másica esta dada por

$$\overline{[NO]} = \int_0^1 [NO]_f dx_b \quad (3.16)$$

de donde $[NO]_f$ es la fracción másica refrescada final en el elemento de carga que se quemó cuando la fracción másica quemada es x_b . Hay que notar que $[NO] = [NO]M_{NO}/P$ y la vez $M_{NO}=30$, que es el peso molecular del NO. La concentración promedio en los gases de expulsión resulta ser

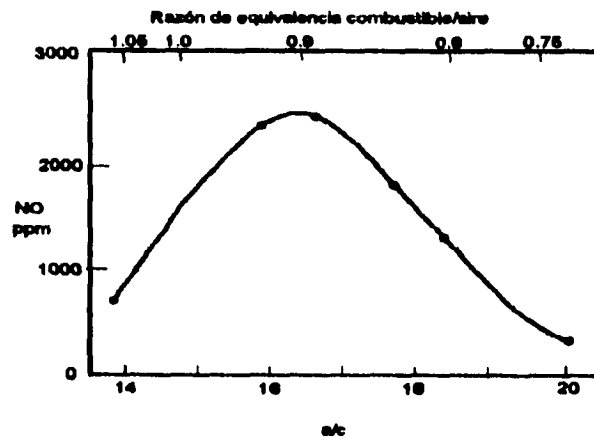
$$x_{NOex} = \overline{[NO]} \frac{M_{exh}}{M_{NO}} \quad (3.17)$$

y la concentración a la salida en ppm es $x_{NOex} \cdot 10^6$. Las fracciones que se queman al principio de la carga contribuyen mucho más a la producción de NO que las que se queman al último: las concentraciones congeladas de NO en estos elementos que se queman primero llegan a ser de un orden de magnitud mayor que las concentraciones en los elementos que se queman al último. En ausencia de movimiento vigoroso de los paquetes de volumen del gas, las más altas concentraciones de NO ocurren cerca de la bujía.

Las variables más importantes del motor que afectan las emisiones de NO son: la razón de equivalencia combustible/aire, la fracción de gas quemado en la mezcla sin quemar dentro del pistón, el adelantamiento de la chispa. La fracción de gases quemados depende de la cantidad de gas de expulsión recirculado (EGR exhaust gas recirculed) usados para el control de emisiones de NO_x, así como los gases residuales. Las propiedades del combustible llegan a afectar las condiciones de los gases quemados. El efecto de la variación de estos parámetros puede ser explicado con el mecanismo de formación del NO descrito anteriormente: cambios en el tiempo de residencia, de temperaturas y concentraciones de oxígeno en los gases quemados durante el proceso de combustión y en la primera parte de la carrera de expansión son factores importantes.

Razón de equivalencia

La figura 3.7 muestra el efecto de las variaciones en la razón de equivalencia combustible/aire (f/a por sus siglas en inglés) en las emisiones de NO. Las máximas temperaturas de los gases quemados ocurren en $\phi=1.1$, sin embargo, a esta razón de equivalencia la concentración de oxígeno es baja. A medida que la mezcla se enriquece, las temperaturas de los gases quemados disminuyen. Conforme se empobrece la mezcla, los incrementos en las concentraciones



los incrementos en las concentraciones iniciales de oxígeno

Variación de las concentraciones de NO en el escape con a/c y la razón de equivalencia combustible/aire. Motor MEP, 1600 rpm, $\eta_v=50\%$.

Figura 3.7

genera un punto de inflexión en las temperaturas de los gases quemados y en las emisiones de NO llegando a un pico en $\phi \approx 0.9$. Predicciones detalladas de las concentraciones de NO en los gases quemados sugieren que la concentración contra el tiempo de residencia bajo condiciones de mezcla pobre son diferentes en carácter de aquellas con mezcla rica. En las mezclas pobres las concentraciones de NO se congelan antes en la carrera de expansión y ocurre una pequeña descomposición del NO a partir de las concentraciones pico presentes cuando la presión del cilindro es la máxima. Es por eso que en las mezclas pobres, las condiciones del gas en el instante del pico de presión son importantes.

Fracción de gas quemado

En el cilindro, la mezcla sin quemar contiene vapor de combustible, aire y gases quemados. Los gases quemados son gases residuales del ciclo previo y algunos gases de escape reciclados a la admisión para el control de las emisiones de NO_x . La fracción de gas residual es influenciada por la carga, el adelantamiento de las válvulas^k, un ángulo más pequeño, la velocidad, la relación aire/combustible y la relación de compresión. Los gases quemados actúan como diluyentes en la mezcla fresca; la temperatura absoluta alcanzada después de la combustión varía inversamente con la fracción másica de gases recirculados. Por consiguiente el incremento de la fracción másica de estos gases disminuye las emisiones de NO. Sin embargo, también reduce la calidad de combustión, llegando a haber con esto inestabilidad en la misma.

La figura 3.8 nos muestra el efecto de incrementar la fracción de gas de recirculación en la admisión del sistema justamente abajo de la mariposa de estrangulamiento. Se logran alcanzar reducciones sustanciales en las emisiones de NO con un porcentaje de EGR del 15 al 25%, el cual es el máximo porcentaje que el motor puede tolerar bajo condiciones parciales de estrangulamiento.

^k (valve timing), el traslape de las válvulas juega un papel importante en la cantidad de gases residuales, ya que puede impedir un mayor barrido de estos.

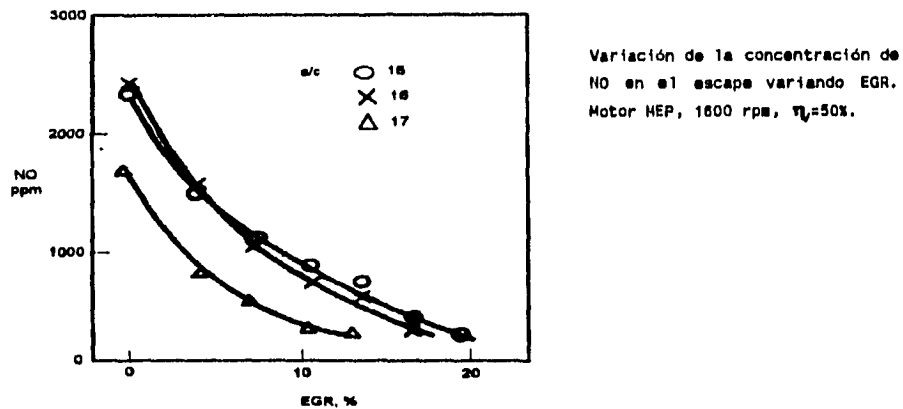


Figura 3.6

El principal efecto de diluir los gases quemados en la mezcla fresca en el proceso de formación del NO es el reducir la temperatura de flama al incrementar el calor específico de la renovación de carga del cilindro por unidad de masa de combustible.

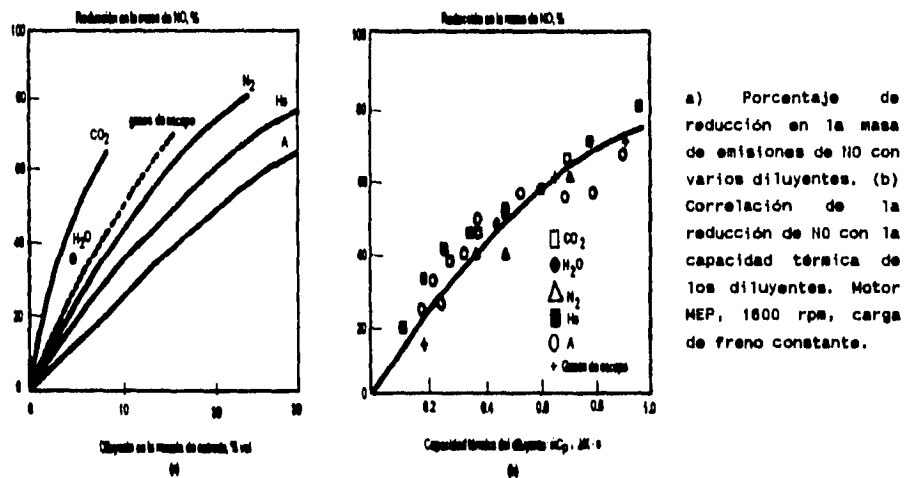


Figura 3.8

La figura 3.9 muestra el efecto de diferentes gases diluyentes añadidos al flujo de admisión del motor, en un motor monocilíndrico operando a velocidad, flujo de combustible y aire constantes. Los datos en 3.9a nos muestra que volúmenes equivalentes de diferentes diluyentes provocan diferentes reducciones en las emisiones de NO. Cuando trazamos la misma gráfica contra la capacidad calorífica de los diluyentes (flujo másico del diluyente x calor específico, C_p) se contraen en una sola curva¹.

Exceso de aire y EGR

Debido a lo anterior, es posible el correlacionar la influencia de las variables de operación del motor (relación aire/combustible, velocidad del motor, y carga) y proponer variables (como el adelantamiento de las válvulas y la relación de compresión) en las emisiones de NO con dos parámetros que definen la composición de la mezcla dentro del cilindro: la razón de equivalencia combustible/aire y la proporción gas/combustible. La proporción gas/combustible (G/C) esta dada por

$$\frac{G}{F} = \frac{\text{masa total en el cilindro}}{\text{masa de combustible en el cilindro}} = \frac{A}{F} \left(1 + \frac{x_b}{1-x_b}\right) \quad (3.18)$$

de donde x_b es la fracción de gases quemados. Todas estas variables juntas definen las proporciones relativas de combustible, aire, gases quemados en la mezcla del cilindro, y por consiguiente pueden correlacionar las emisiones de NO².

En la figura 3.10 se muestra la correlación de las emisiones específicas de NO,

¹ La pequeña dispersión en la figura 3.9 es debido al hecho de que la fracción de gas residual es ligeramente diferente para cada diluyente.

² El adelantamiento de la chispa de la bujía también afecta las emisiones de NO.

de un motor de cuatro cilindros, en un amplio margen de condiciones de operación con la relación aire/combustible y la relación gas/combustible. Se muestran las líneas de relación constante de aire/combustible y rendimiento volumétrico; la dirección del incremento de la disolución con el gas residual y el EGR a relación constante de aire/combustible esta a la derecha. La dilución excesiva acarrea una calidad más pobre de la combustión, quemados parciales, y extinciones de la flama eventuales. La disminución de las emisiones de NO se alcanzan con una mezcla estequiométrica, con un buen quemado del combustible, y con una dilución tal que no deteriore la calidad de combustión.

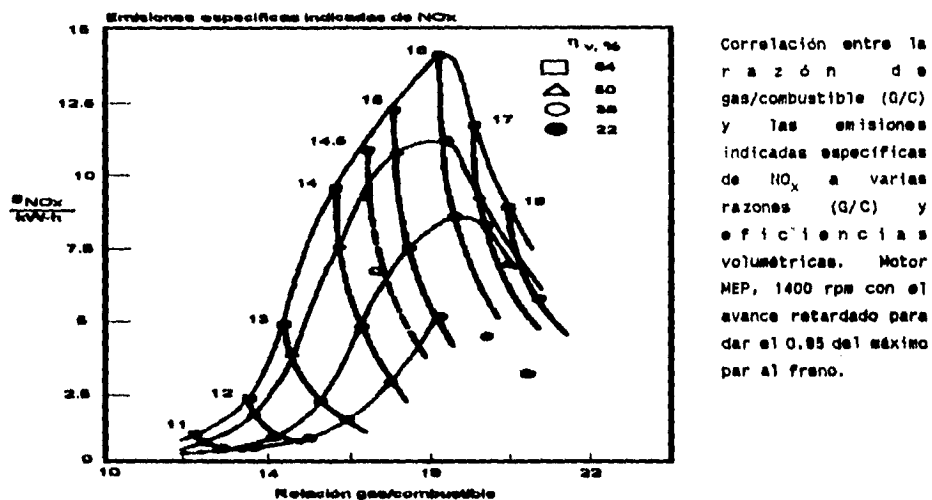


Figura 3.10

Adelantamiento de la chispa (spark timing)

El ángulo de adelantamiento de la chispa de la bujía tiene efecto en las emisiones de NO, ya que al incrementar el ángulo de adelanto de la chispa provoca que la combustión se realice antes, incrementando el pico de presión dentro del

pistón¹; al retrasar el ángulo de encendido disminuye el pico de presión. Mientras mayor sea el pico de presión en el cilindro mayor será el pico de temperatura de gases quemados en la misma, y por consiguiente serán mayores las relaciones de formación de NO. Para menores picos de presión, menores relaciones de formación de NO. La figura 3.11 nos muestra una serie de datos de emisiones típicas de un motor de ignición por chispa como función del ángulo de encendido. Las emisiones de NO disminuyen establemente tanto como el ángulo de encendido se retrase del avance MBT y se acerque al PMS. Debido a que la determinación exacta del MBT es difícil, siempre hay una incertidumbre considerable en las emisiones de NO al avance MBT.

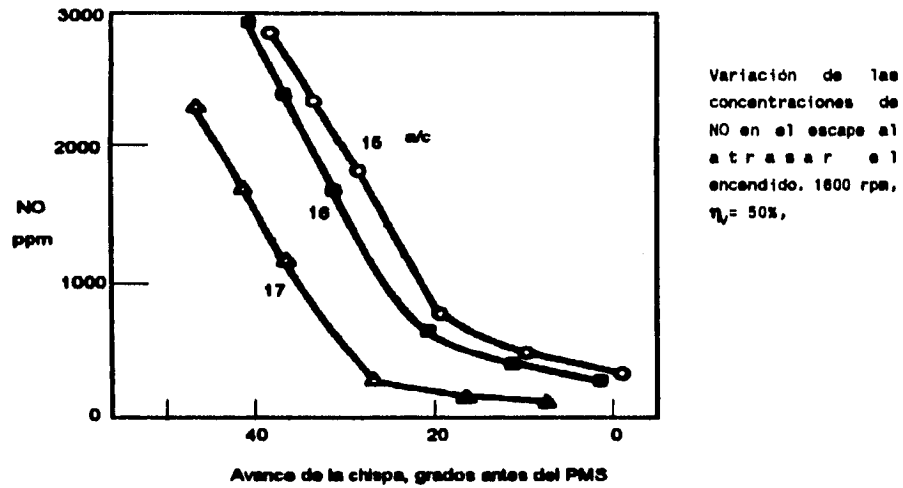


Figura 3.11

Por eso, comúnmente se usa una referencia alternativa para el avance, en donde la bujía es retardada del avance de MBT en donde el par se disminuye en 1 ó 2% del valor máximo. Hay que tener mucho cuidado con el avance de la bujía para

¹ Es debido a que más combustible se quema antes del PMS, provocándose el pico de presión en un menor volumen. Al retrasar el ángulo el combustible se quema después del PMS.

obtener medidas precisas de las emisiones de NO bajo condiciones de operación en avance MBT.

3.3 Monóxido de Carbono

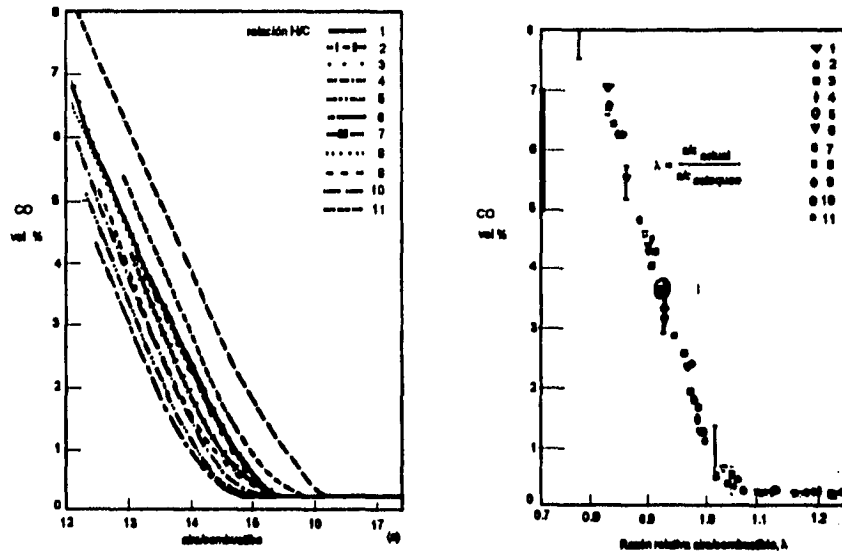


Figura 3.12

Las emisiones de monóxido de carbono de los motores de combustión interna son controladas principalmente por medio de la razón de equivalencia combustible/aire. La figura 3.12 nos muestran los niveles de CO a la salida de los gases de combustión de un motor convencional de encendido por chispa para diferentes composiciones de combustibles. Cuando se trazan los datos contra la razón relativa aire/combustible o la razón de equivalencia, están correlacionados por una curva sencilla. Para mezclas ricas de combustible las concentraciones de

TESIS DE LICENCIATURA

CO en la salida de los gases de escape se incrementan de forma estable al incrementarse la razón de equivalencia, así como aumenta la cantidad de exceso de combustible. Para mezclas pobres, las concentraciones de CO varían poco en la salida de los gases de combustión con la razón de equivalencia y son de un orden de fracción molar de 10^{-1} .

Ya que los motores de ignición por chispa frecuentemente operan cerca de condiciones estequiométricas a carga parcial, y a condiciones ricas en combustible a plena carga, las emisiones de CO son importantes y deben ser controladas. Sin embargo, los motores diesel siempre operan bien en el lado pobre de la estequiometría; las emisiones de CO de los motores diesel son despreciables al ser tan bajas.

Los niveles de CO observados en los gases de salida de los motores de ignición por chispa fueron menores que los máximos detectados dentro de la cámara de combustión, pero son mayores que los valores de equilibrio para las condiciones de expulsión. Es por eso que los procesos que gobiernan las salidas de CO están controlados cinéticamente. En flamas premezcladas de hidrocarburos-aire, la formación de CO es una de las principales reacciones en los pasos de los mecanismos de combustión de los hidrocarburos, que pueden ser resumidos por



en donde R representa a los radicales de los hidrocarburos. El CO formado en los procesos de combustión por medio de esta trayectoria es entonces oxidada en CO_2 en una relación menor. La principal reacción de oxidación del CO en flamas de hidrocarburos-aire es



La constante de razón para esta reacción es

$$k_{CO}^{\dagger} = 6.76 \times 10^{10} \exp(T/1102) \quad \text{cm}^3/\text{gmol} \quad (3.21)$$

Generalmente se asume que los productos de la combustión en la postflama en un motor de encendido por chispa, a temperaturas (2800 K) y presiones (15 a 40 atm) cercanas al pico del ciclo, el sistema carbono-oxígeno-hidrógeno está equilibrado. Es por eso que las concentraciones de CO en los gases que se encuentran inmediatamente después de la postflama están cerca del equilibrio. Sin embargo, a medida que los gases quemados se van enfriando durante las carreras de expansión y expulsión, dependiendo de la temperatura y la proporción de enfriamiento, el proceso de oxidación del CO [reacción (3.20)] localmente puede no llegar a estar equilibrado.

3.4 Emisiones de Hidrocarburos sin quemar

3.4.1 Antecedentes

Los hidrocarburos o emisiones orgánicas, son la consecuencia de combustión incompleta de combustibles fósiles. Los niveles de hidrocarburos (HC) sin quemar en el escape generalmente se especifican en términos de la concentración total de hidrocarburos expresada en partes por millón de átomos de carbono (C_1)⁰. Mientras que la emisión total de hidrocarburos es una medida muy útil de la eficiencia de la combustión, no es necesariamente un índice significativo de la emisión de contaminantes. Los gases de escape del motor contienen una gran variedad de compuestos de hidrocarburos. La tabla 3.4 nos muestra la falla por clase de hidrocarburos en los gases de escape de un motor encendido por chispa, con y sin convertidor catalítico, con gasolina como combustible. Algunos de estos hidrocarburos son casi inertes fisiológicamente y son virtualmente no reaccionan desde el punto de vista del esmog fotoquímico. Otros son altamente reactivos en la química de producción del esmog.

⁰ Esto es debido a la detección estándar del instrumento, un detector de ionización de flama (FID), es efectivamente un contador de átomos de carbono: por ejemplo, una molécula de propano genera tres veces la respuesta generada por una molécula de metano. Algunos datos presentados en la literatura son presentados como ppm propano (C_3), o ppm hexano (C_6); para convertir en ppm C_1 multiplicar por 3 ó 6, respectivamente.

TESIS DE LICENCIATURA

Basados en su potencial de formación de oxidación en la química de esmog fotoquímico, los compuestos de hidrocarburos están divididos en categorías de no-reactivos y reactivos. La tabla 3.5 nos muestra una escala de reactividad de mezclas de hidrocarburos en los gases de escape. Las escalas que asignan altos valores de reactividad a los olefinos (como la tabla 3.5), los cuales reaccionan más rápido en la reacción fotoquímica del esmog, probablemente se aproximen mejor al potencial de formación de esmog cerca de las fuentes de contaminación por hidrocarburos.

La escala más simple, que divide a los hidrocarburos en dos clases, hidrocarburos metanos y no-metanos, probablemente se aproxime mejor al resultado final de todas las emisiones de HC. Todos los hidrocarburos excepto el metano reaccionan, dándoles suficiente tiempo para ello.

La composición del combustible puede influir significativamente en la composición y magnitud de las emisiones orgánicas. Los combustibles que contienen grandes proporciones de aromáticos y olefinas producen concentraciones relativamente grandes de hidrocarburos reactivos. Sin embargo, algunos de los compuestos orgánicos encontrados en el escape no están presentes en el combustible, indicando la significativa pirólisis y síntesis que ocurren durante el proceso de combustión.

Tabla 3.4 Composición de hidrocarburos en el escape del motor encendido por chispa (por clase)				
	Carbono, porcentaje del total de HC			
	Parafinas	Olefinas	Acetileno	Aromáticos
Sin catalizador	33	27	8	32
Con catalizador	57	15	2	26

En el escape están presentes compuestos oxigenados, y se sabe que participan en la formación del esmog fotoquímico. Algunos oxigenados son también irritantes y odorantes. Los oxigenados se catalogan generalmente en carbonilos, fenoles y no-carbonilos. Los carbonilos de interés son aldehídos y cetonas alifáticas de bajo peso molecular. Los aldehídos volátiles son irritantes de los ojos y de la

traquea. El formaldehído es el mayor componente ($\leq 20\%$ del total de los carbonilos). Los carbonilos suman hasta un 10% del total de las emisiones de HC de un motor diésel de un automóvil de pasajeros, pero solamente una pequeña parte de las emisiones de los automóviles de motor encendido por chispa. Los fenoles son odorantes e irritantes: sus niveles son menores a los de los aldehídos. Otros no carbonilos incluyen metanol, etanol y nitrometano. El uso de combustibles de alcohol incrementa las emisiones de compuestos oxigenados.

Hidrocarburos	reactividad relativa [†]
C ₁ -C ₄ parafinas, acetileno, benceno	0
C ₄ y parafinas de mayor peso mol. Bencenos monoalquiles. Bencenos Orto- y para-diaquiles. Parafinas cíclicas	2
Etileno Bencenos Meta-diaquiles Aldehídos	5
1-Oleofinas (excepto etileno) Dioleofinas Bencenos tri- y tetra-alquiles	10
Oleofinas con ligaduras internas	30
Oleofinas con ligaduras internas con sustitución de la doble ligadura Ciclo-oleofinas	100

[†] Escala (0 a 100) de reactividad de General Motors. Basada en la relación de formación del NO₂ para el hidrocarburo relativo a la razón de formación del NO₂ para el 2,3-dimetil-2-benceno

3.4.2 Extinción de la flama y fundamentos de oxidación

La extinción de la flama ocurre en las paredes de la cámara de combustión del motor. Las paredes frías de la cámara actúan como sumideros de calor y de los

radicales activos de las especies generados en la flama. La extinción de la flama ocurre bajo diferentes configuraciones geométricas; la llama se puede estar propagando normal a , paralela a, o con cierto ángulo a la pared; la flama se puede extinguir a la entrada a una cavidad. Cuando la flama se extingue, esta deja una capa o volumen de mezcla sin quemar adelante de ella.

Los procesos de extinción de flama son analizados al comparar el calor que desprende la flama con la pérdida de calor por las paredes en las condiciones de que la flama se extinga. Esta relación, el número de Peclet (Pe), es aproximadamente constante para cualquier configuración geométrica. La configuración más simple para el estudio es la del proceso de extinción en dos placas, en donde se determina es el espacio mínimo entre las dos placas paralelas en las cuales se pueda propagar una flama. El número de Peclet para la configuración de estas dos placas es

$$Pe_2 = \frac{\rho_u S_L C_{p,f} (T_f - T_u)}{k_f (T_f - T_u) / d_{q2}} = \frac{\rho_u S_L C_{p,f} d_{q2}}{k_f} \quad (3.22)$$

la cual es aproximadamente constante en un amplio rango de condiciones. ρ , S_L , c_p , T , y k son la densidad, velocidad de flama laminar, calor específico a presión constante, temperatura del gas, y conductividad térmica, respectivamente, con los subíndices u y f referidos a las condiciones de no-quemados y flama. d_{q2} es la distancia entre las dos placas de extinción. Se asume que la temperatura de pared y gases sin quemar es la misma.

Una correlación razonable para los datos experimentales de HC sin quemar es:

$$\frac{d[HC]}{dt} = -6.7 \times 10^{15} \exp\left(\frac{-18735}{T}\right) x_{HC} x_{O_2} \left(\frac{P}{RT}\right) \quad (3.23)$$

de donde [] denota concentración de HC, x_{HC} y x_{O_2} son las fracciones másicas

de HC y O_2 respectivamente, t esta en segundos, T en Kelvin, y la densidad térmica es (p/RT) tiene unidades de moles por centímetro cúbico.

3.4.3 Emisiones de HC en motores de ignición por chispa

Los niveles de hidrocarburos en el escape de los motores de ignición por chispa bajo condiciones de operación normal están típicamente en el rango de 1000 a 3000 ppm C_1 . Esto corresponde entre 1 y 2.5% del flujo de combustible en el motor; la eficiencia de la combustión del motor es alta. Como se indicó en la figura 3.2, las emisiones de HC se incrementan rápidamente conforme se enriquece la mezcla a partir de la estequiométrica. Cuando la calidad de la combustión se deteriora, como por ejemplo, con mezclas muy pobres, las emisiones de HC se incrementan rápidamente debido a la combustión incompleta por la extinción de la flama en una fracción de los ciclos de operación del motor. Como se vió con anterioridad hay diversos mecanismos que contribuyen al total de las emisiones de HC. También, algo de HC que escapó al proceso primario de combustión puede ser oxidado en las carreras de expansión y escape.

Se han propuesto cuatro mecanismos para la formación de HC en los motores de ignición por chispa (en donde la mezcla de combustible-aire esta esencialmente premezclada): (1) la extinción de la flama en las paredes de la cámara de combustión, depositando una capa de mezcla en la pared de la cámara; (2) el llenado de las cavidades con mezcla sin quemar, ya que la flama se extingue al llegar a estas cavidades, escapando del proceso primario de combustión; (3) absorción de vapor de combustible por medio de capas de aceite en las paredes del cilindro durante las carreras de admisión y compresión, seguido de la desabsorción de éste en las carreras de expansión y escape; (4) combustión incompleta en una fracción de los ciclos de operación del motor (también quemado parcial o no encendido de la flama), ocurriendo cuando la calidad de la combustión es pobre (por ejemplo durante los transitorios del motor cuando A/F, el avance y el EGR no están debidamente controlados). Además, cuando los

depósitos se acumulan en las paredes de la cámara de combustión, las emisiones de HC se incrementan. Todavía no está claro si los depósitos constituyen un mecanismo adicional o si simplemente modifica alguno de los anteriores.

Mecanismos de HC en cavidades

Las cavidades en las paredes de la cámara de combustión -pequeños volúmenes con entradas angostas en las cuales la flama no es capaz de entrar han sido observados como ser las causantes de la mayor fuente de HC sin quemar. La mayor de esta región de cavidades, es la que se forma en el volumen entre el pistón, sus anillos y las paredes del cilindro. Otros volúmenes de cavidad en los motores son las roscas de las bujías, el espacio que existe alrededor del electrodo y la rosca de la bujía, cavidades alrededor de las válvulas de admisión y escape, y las cavidades en los empaques de la cabeza. La tabla CAVIDADES-V6 nos muestra el tamaño y la importancia relativa de las cavidades en un cilindro de un motor V6 de producción determinadas por las mediciones de los componentes de un motor frío. El volumen total de cavidades es un pequeño porcentaje del volumen libre y el lote de pistón-anillos son los que contribuyen con la parte dominante.

Los procesos más importantes de cavidades que ocurren durante el ciclo del motor son los siguientes: conforme la presión del cilindro se eleva durante la compresión, la mezcla sin quemar es forzada hacia las cavidades. Debido a que estos volúmenes son delgados y tienen una gran relación superficie/volumen; el gas que fluye dentro de cada cavidad se enfría por la transferencia de calor hasta cerca de la temperatura de las paredes. Durante la combustión, mientras que la presión continúa en ascenso, la mezcla sin quemar continúa fluyendo en los volúmenes de las cavidades. Cuando la flama llega a cada cavidad, y puede también propagarse en la cavidad y quemar total o parcialmente el combustible o se puede extinguir en la entrada de la cavidad. De todas maneras, la extinción de la flama depende de la geometría de la cavidad, la composición de la mezcla sin quemar y sus propiedades termodinámicas están descritas en la sección 3.4.2. Después de que la flama llega y se extingue, los gases quemados pueden fluir en las

cavidades hasta que la presión del cilindro empieza a disminuir, los gases fluyen entonces de cada cavidad hacia el cilindro.

	cm ³	%
Volumen desplazado por cilindro	632	
Volumen libre por cilindro	89	100
Volumen adelante del primer anillo	0.93	1.05
Volumen atrás del primer anillo	0.47	0.52
Volumen entre anillos	0.68	0.77
Volumen adelante del segundo anillo	0.47	0.52
Volumen total de cavidades en anillos	2.55	2.9
Cavidad en la cuerda de la bujía	0.25	0.28
Cavidad en las juntas de la cabeza	0.3	0.34
VOLUMEN TOTAL DE CAVIDADES	3.1	3.5

† DETERMINADO PARA EL MOTOR FRÍO
 ‡ Namazian, N. y Heywood, J. B.: "Flow in the piston-cylinder-ring cravices of a Spark-ignition engine"

De todas las cavidades las más importantes son: los volúmenes entre el pistón, los anillos del mismo y la pared del cilindro; consisten de una serie de volúmenes, conectados por restricciones de flujo como el lado libre del anillo y la ranura del mismo de los cuales su geometría varía conforme el anillo se mueve en movimiento alternativo de arriba para abajo y viceversa en los sellos, tanto en la superficie de arriba como en la de abajo. Durante la compresión y combustión, la masa fluye dentro de los volúmenes en esta región de cavidades. Una vez que la presión del cilindro empieza a descender (aprox. después de 15° ATC) el gas fluye fuera de las cavidades altas en el cilindro a baja velocidad adyacentes a las paredes del cilindro. El resultado final es que esta fracción de la carga total del cilindro (de un 5 a un 10%) atrapada en estas regiones al tiempo de la presión pico del cilindro se escapa del proceso primario de

combustión. La mayoría de este gas fluye en el cilindro durante el proceso de expansión. Dependiendo de la localización de la bujía en relación con la posición de la ranura del anillo, hasta el 50% de esta mezcla llega a ser gas no quemado. La contribución potencial para los HC sin quemar es obvia.

La tabla 3.6 presenta un resumen de la masa total de gas estimada y de la masa de la mezcla sin quemar en el pistón, anillos, y cavidades en la región de la pared para un motor típico de ignición por chispa. Al compararlo con los niveles de escape de HC, está claro que estas cavidades son la mayor fuente de hidrocarburos sin quemar.

TABLA 3.6 Cantidad de gas fluyendo hacia adentro y afuera de las regiones de cavidades†.		
	g masa	ppm C
Gas total en todas las regiones de cavidades	8.2	5000 a 9400
Gas total de regreso a la cámara de combustión	7.0	
Sin quemar de regreso a la cámara de combustión	3.7-7.0‡	
Sin quemar a la purga	0.5-1.2‡	
Total de los no-quemados que escaparon a la 1ª etapa	4.2-8.2‡	
† Para un motor V6 operando a 2000 rpm y con la mariposa totalmente abierta ‡ Depende de la localización de la bujía y las ranuras para los anillos		

Absorción y desabsorción en el aceite del motor

Es sabido que la presencia del aceite lubricante en el combustible o en las paredes de la cámara de combustión resulta en un incremento de los niveles de escape de hidrocarburos. En experimentos en donde las concentraciones de escape de HC se incrementaron irregularmente con el tiempo, con condiciones nominales constantes de operación, se demostró que había aceite en la parte superior del pistón durante estos períodos de alta emisión. Cuando el aceite se añade al combustible, las emisiones de HC se incrementaron, la cantidad de incremento de

HC en el escape con la cantidad de aceite añadido en el combustible. El incremento de HC en el escape fue principalmente combustible sin reaccionar (iso-octano) y no aceite o sus derivados. El incremento de HC es sustancial: los niveles de escape de HC de un motor limpio se pueden duplicar o triplicar cuando se opera con un combustible que contiene 5% de aceite lubricante en un período de 10 minutos. (Con depósitos de combustible con plomo presentes en las paredes de la cámara de combustión, sin embargo se observó un incremento mucho más pequeño en el escape de HC). Se ha propuesto que la absorción del vapor de combustible y desabsorción por parte de capas de aceite en las paredes de la cámara de combustión puedan explicar este fenómeno.

El mecanismo de absorción y desabsorción puede trabajar de la siguiente manera. La concentración del vapor de combustible dentro de la cámara esta cerca de la concentración en el puerto de entrada durante la admisión y compresión. Es por eso, que casi al dar una vuelta el cigüeñal, cualquier película de aceite en las paredes puede absorber vapor de combustible. Durante la última parte de la compresión, la presión del vapor de combustible se incrementa, por lo tanto por la ley de HENRY, la absorción puede continuar aún si el aceite se ha saturado durante la admisión. Durante la combustión la concentración de vapor de combustible en el volumen de los gases tiende esencialmente a cero por lo que el vapor absorbido se puede desabsorber de la película de aceite líquido en los productos gaseosos de la combustión. La desabsorción puede continuar durante las carreras de expansión y escape.

Algo del vapor de combustible desabsorbido puede llegar a mezclarse con los productos de la combustión que están a altas temperaturas y oxidarse. Sin embargo, el vapor desabsorbido que permanece en la frontera de la capa fría o que se mezcla con los volúmenes más fríos de gas más adelante en el ciclo se escapan de la oxidación y contribuyen a la emisión de HC sin quemar.

Calidad pobre de combustión

La extinción de la flama en el volumen de gas, antes de que todo el frente de

ella alcance la pared, es una fuente de emisiones de HC bajo ciertas condiciones de operación de un motor. Tan pronto como la presión del cilindro se cae durante la carrera de expansión, la temperatura de la mezcla sin quemar delante de la flama desciende. Esto disminuye la relación de quemado [la velocidad de la flama laminar disminuye]. Si la presión y temperaturas caen demasiado rápido, la flama puede llegar a extinguirse. Este tipo de enfriamiento por paquete ha sido observado en los motores de ignición por chispa; lo cual resulta en grandes emisiones de HC para ese ciclo en particular. Las condiciones del motor en donde es más propenso el enfriamiento de paquetes son cuando está ocioso a baja carga y por lo tanto la velocidad del motor es baja y la fracción de gas residual es alta, con gran dilución de EGR excesivo o mezclas pobres y con una combustión sustancialmente retardada. Aún si las calibraciones del motor en estado estable de A/F, EGR y avance de la chispa son las adecuadas para que no ocurra el enfriamiento de paquetes, bajo condiciones transitorias, estas variables no están puestas adecuadamente para evitar el enfriamiento de paquetes, en algunos ciclos del motor debido a las diferentes características dinámicas de los sub-sistemas del motor que controlan esas variables.

Efectos de los depósitos

La acumulación de depósitos en la cámara de combustión (lo cual ocurre en vehículos con varios miles de kilómetros de uso) es conocida por el incremento de emisiones de HC. Con la operación de gasolina con plomo, el incremento de estas emisiones varía entre un 7 y 20%. Al remover los depósitos se reducen las emisiones de HC por cerca de las emisiones de un motor limpio. Con gasolina sin plomo, mientras que la composición del depósito es diferente (carbonáceos en vez de plomo oxidado), el incremento de las emisiones de HC con una acumulación de kilómetros es comparable. Depósitos suaves de cenizas, como los que se acumulan en la máquina después de operarla con mezclas ricas, también causan un incremento en las emisiones de HC. Otra vez, cuando se remueven los depósitos la relación de emisión cae por cerca de un 25% de la emisión original. Los estudios con depósitos simulados (viruta de metal de 0.6 mm de espesor) incrustados en la

cabeza del cilindro y pistón también mostraron incrementos en las emisiones de HC. El incremento varió entre 10 y 100 ppm C/cm² del área de depósito simulada. El efecto de una área dada varía en relación con la posición de la misma. Las localizaciones cerca de la válvula de escape, en donde la dirección del flujo durante el proceso de expulsión se espera que sea directo al puerto de escape, mostraron las mayores emisiones.

Se cree que la absorción y desabsorción de hidrocarburos por estos depósitos superficiales es el mecanismo que conduce a un incremento en las emisiones. Los depósitos también se pueden acumular en las regiones de cavidades de los anillos. Una reducción en el volumen de estas regiones de cavidades puede disminuir las emisiones de HC. Sin embargo, los cambios en el volumen libre entre el cilindro y pistón debido a la acumulación de depósitos afecta el proceso de enfriamiento de la flama y puede incrementar las emisiones.

CAPITULO 4: CATALIZADORES

4.1 Introducción

Un catalizador es un agente que cambia la velocidad de una reacción química. De este modo cualquier reacción que sea termodinámicamente posible ocurre con una razón dependiente de las temperaturas de los reactantes. Las altas temperaturas generalmente proveen de unas razones de reacción más elevadas. En el escape del motor, las reacciones de los gases proceden normalmente a razones muy bajas. En el catalizador, sin embargo, la razón es lo suficientemente rápida para que se realice un control de emisiones de manera práctica.

Los catalizadores para automóviles tienen tres partes principales:

- El soporte, ya sean pellets o una estructura rígida como el tipo panel.
- La cubierta de lavado (washcoat), la cual produce una gran-superficie-área revistiendo el soporte. Su propósito es el proveer de una superficie apropiada para el grupo de metal-platino (PGM).
- El material catalizador: platino, paladio o rodio. Estos PGMs se pueden utilizar solos o en combinación, y son complementados algunas veces por promotores que extienden el desempeño del material.

4.2 Historia de los catalizadores automotrices

La teoría actual de catalizadores se centra alrededor del "sitio activo". Este sitio se puede ver como el punto en donde el material catalítico tiene las fuerzas electrónicas óptimas para la reacción. Este proceso se ilustra con el siguiente ejemplo: el CO y O₂ son quemabsorbidos en el catalizador y pueden reaccionar debido a su proximidad y orientación. El proceso de absorción también trae como consecuencia el debilitamiento de las ligaduras internas del CO ya que

cierta cantidad de energía es compartida con la superficie. De este modo los átomos absorbidos de las moléculas están ligados débilmente a la misma y son atraídos más fácilmente por otras moléculas tales como la de oxígeno. Por eso, la reacción entre CO y O₂ es más rápida y sencilla.

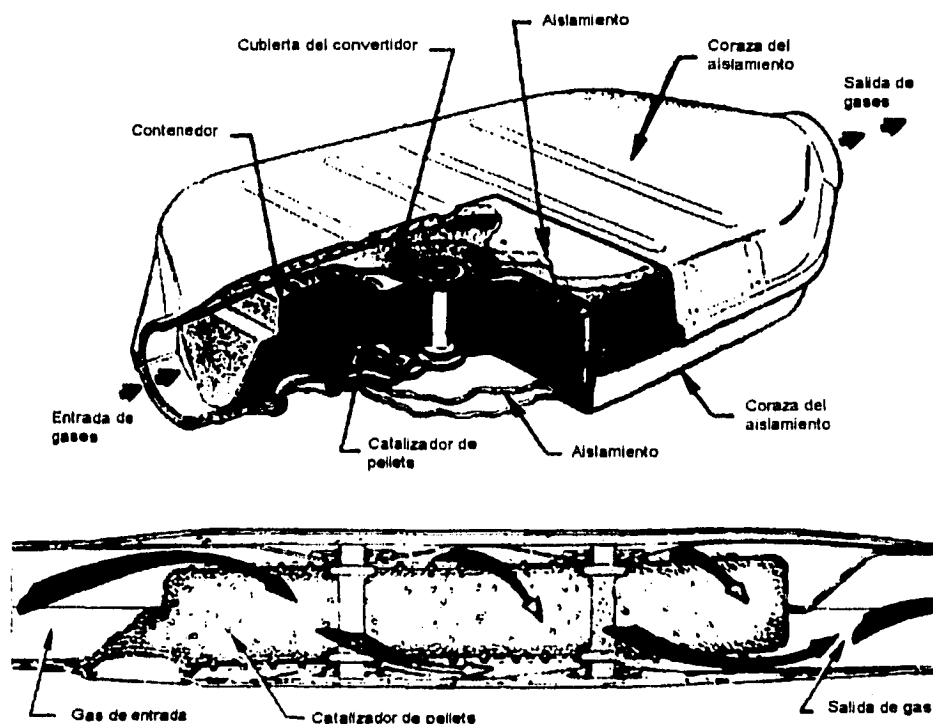


Figura 4.1 Corte esquemático de un convertidor catalítico automotriz

El requerimiento básico de tal catalizador es que este absorba de manera química las moléculas en el rango deseado de temperaturas y que la reacción ocurra de manera eficiente. Entonces los productos que han alcanzado un nivel inferior de energía, se deben desabsorber a la misma temperatura, liberando el sitio activo

TESIS DE LICENCIATURA

para reacciones posteriores. Un constituyente que se absorba en un sitio activo sin que se desabsorba después puede limitar las reacciones, en consecuencia "envenena" el catalizador. Las impurezas en la gasolina con plomo ocasionan esto, independientemente de que el mismo plomo también lo envenena, pero este lo hace al ir cubriendo indiscriminadamente la superficie.

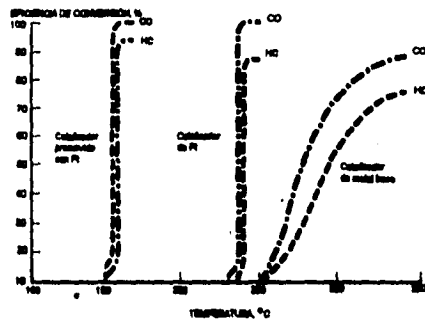
Las moléculas altamente polares son absorbidas más fácilmente, mientras que las menores son desabsorbidas más trabajadas de los catalizadores automotrices de metal y óxidos de metal. Es lógico pensar que el CO es difícil de manipular catalíticamente ya que éste es altamente polar mientras que el CO₂ es menos polar. Desafortunadamente el CO es más polar que el oxígeno en condiciones de mezcla rica. Esto tiende a cubrir las partes activas del catalizador, impidiendo que el oxígeno sea absorbido y provocando que se atrase la reacción. Este fenómeno es llamado envenenamiento por CO.

Los hidrocarburos son más difíciles de manipular catalíticamente, ya que por ejemplo el metano, es esencialmente no-polar provocando que sea el hidrocarburo más difícil de oxidar catalíticamente. Por otro lado, se encuentra presente en el escape acetileno, el cual es completamente polar y bajo ciertas circunstancias es fuertemente absorbido cubriendo el sitio activo, interfiriendo la reacción.

Con catalizadores oxidantes, el CO y HC reaccionan con oxígeno para formar CO₂ y H₂O. Con los catalizadores de reducción de tres vías, el CO y NO reaccionan para formar CO₂ y N₂ mientras que los HC y NO reaccionan para formar además de los mismos gases, H₂O.

Antes de la existencia de los catalizadores con aplicación automotriz, estos se utilizaban para los procesos industriales teniendo controles y normas rígidas de temperatura e impurezas, pero a fin de cuenta en estado estable. Los requerimientos para los catalizadores automotrices son mucho más severos, ya que estos deben trabajar en rangos entre los 200 y 1100 °C mientras que la alimentación de gas varía ampliamente en composición y transporta venenos para el catalizador como plomo (Pb), fósforo (P), y azufre (S).

A mediados de los 60, el Estado de California en los E.U.A. estableció las primeras normas para el control de emisiones, induciendo de esta manera que firmas dedicadas a los catalizadores comenzaran programas de investigación. Al principio las compañías automotrices se manejaban sin catalizadores, pero al volverse estrictos las normas a principio de los 70 requirió de su uso.



Al principio se tuvieron problemas ya que los catalizadores no son efectivos sino hasta que alcanzan la temperatura "light-off" que se define como en la cual el 50% de los componentes reaccionan o se oxidan es un gas aceptable.

4.2 Eficiencia contra temperatura

Los primeros intentos en usar catalizadores con metal base tuvieron éxitos limitados. Las formulaciones minerales como la hopcalita y el pentóxido de vanadio fueron probadas y abandonadas. El ruterio resultó tener buenas propiedades catalíticas, produciendo un poco de amoníaco al reducir NOx, mientras que pequeñas cantidades de platino mejoraban algunos catalizadores de metal base.

El Avanger de Chrysler fue el primer automóvil en cumplir los estándares de emisión de contaminación de los Estados Unidos en 1975, al utilizar un catalizador de oxidación de rodio con platino como promotor para la reacción. Los catalizadores más recientes de PGM utilizan también el platino o mezclas de platino-paladio. Estos catalizadores de oxidación se usaban por lo general con una bomba de aire para asegurar la combustión completa de los componentes en el escape de la mezcla rica.

TESIS DE LICENCIATURA

A mediados de los 70 el costo de Pt y del Pd provocó la utilización de los dos juntos. Con la necesidad automotriz de cerca de un millón de onzas Troy^F de PGM, los metales base mostraron ser promotores de los catalizadores de PGM de una manera similar a la que los PGM promovían los catalizadores de metales base.

Las normas iniciales se encontraron con sistemas de catalizadores de oxidación y bombas de aire controlando CO y HC. Las emisiones de NOx se controlaban con la recirculación de los gases de salida EGR^G, pero los factores que reduzcan la temperatura de combustión también reducen la eficiencia térmica del motor, y de esta manera la economía de combustible y el desempeño del motor.

El sistema de catalizador de oxidación simple fue utilizado por la mayoría de los fabricantes de motores satisfactoriamente por muchos años. Pero la pérdida de eficiencia debida al EGR, relaciones de compresión bajas y los estándares cada vez más estrictos de emisiones estimularon la investigación de otros métodos de control de NOx.

Los catalizadores que se necesitaban fueron los capaces de oxidar CO y HC además de controlar los NOx, el Pt y Pd lo pueden reducir si los gases de escape están reducidos totalmente (reacciones congeladas). Sin embargo siempre hay una cantidad importante de NOx que se reduce en el trayecto en amoníaco (NH₃).

El amoníaco en pequeñas cantidades de ppm no representa problemas de salud o emisión. Pero para realizar un buen trabajo de oxidación, los sistemas automotrices tenían un sistema de bombeo de aire y un catalizador de oxidación adicional. El NH₃ producido en la reducción se reoxidaba en NOx en el catalizador.

Las personas encargadas de formular catalizadores en ese entonces se encontraron con el problema de reducir NOx sin formar amoníaco. Una solución era manteniendo

^F 1 onza troy = 31.1035 gramos

^G Ver introducción capítulo 4

la relación aire/combustible cercana a la estequiométrica, la otra era la utilización de catalizadores que contuvieran rodio.

Para entonces se descubrió un material con muchas ventajas en la fabricación de los catalizadores, el cerio, ya que entre sus funciones en los catalizadores puede ser una o más de las siguientes: a) estabilizar el área superficial de la cubierta de lavado de alúmina, b) actuar como promotor del PGM, c) actuar como un componente de almacenamiento de oxígeno durante las mezclas ricas y pobres en las oscilaciones de la razón de equivalencia de c/a, y d) promover la reacción de transferencia del vapor de agua. Es por esto que a pesar de no conocerse su mecanismo se sabe que su presencia es benéfica.

Los catalizadores de platino/rodio podían reducir NO_x en una mezcla rica o estequiométrica sin que hubiera una producción de NH_3 . Es por eso que se desarrollaron sistemas duales de conversión. Con estos era posible apearse a los estándares más estrictos y recuperar el desempeño del automóvil y consumo de combustible. Estos motores estaban ajustados de tal manera que trabajaban cerca del punto estequiométrico. El NO_x se reducía a nitrógeno y agua en el primer convertidor; entonces se inyecta aire al chorro de gases y el CO y HC que quedaban se oxidaban en el segundo.

Quizá el problema más importante era que las mezclas de aire/combustible provenientes de los carburadores o la inyección en el cuerpo de la garganta (TBI: throttle body injection) no estaban aún distribuidas en los cilindros. Esto significaba que había un cilindro con mezcla más pobre, que generalmente era el más lejano a la garganta, y al que se le necesitaba alimentar con una mezcla más rica, por esto era imposible correr motores con razones de equivalencia estequiométricas en estos sistemas. El sistema de inyección multipunto (MPI) aunado a la optimización de los sistemas de alimentación de aire y los sistemas multi válvulas fueron la solución, ya que con estos se obtiene una mejor distribución de la mezcla ayudando así a la siguiente generación de catalizadores.

4.3 El catalizador de tres vías

4.3.1 El sensor de oxígeno

La llegada de los sensores de oxígeno o sonda lambda fue de gran ayuda para alcanzar la mezcla ideal de combustión, ya que estos miden la cantidad de oxígeno en exceso del escape en relación al aire, de este modo cuando la mezcla varía de rica a pobre, el sensor produce una señal que se utiliza para controlar la razón de equivalencia.

La sonda lambda en principio fue una celda concentrada con zirconia como electrólito, pero debido a que por debajo de los 300°C no conducía electricidad, actualmente se utilizan sondas precalentadas o hechas de titanía.

Para complementar a la sonda lambda algunos diseños de sistema de inyección (BOSCH L-TRONIC) miden la cantidad de aire que entra en el motor y así controlar la mezcla, teniendo un control bastante preciso a pesar de que están cambiando las condiciones de presión y temperatura del aire.

El mejoramiento del control de combustible trajo consigo un sistema de catalizador que funciona de manera óptima cerca de la zona estequiométrica de la mezcla, este catalizador es el conocido como el de tres vías (TWC : three way catalyst) y es el usado más recientemente en los automóviles nuevos. El nombre de tres vías viene del hecho de que este maneja CO, HC y NOx simultáneamente.

El catalizador de tres vías tiene como ventajas un mejor rendimiento de combustible y desempeño del motor, ya que no son necesarias las bombas de aire o aspiradores, resultando en una reducción en costo, consumo de potencia y complejidad. Por otro lado la mayoría de las compañías dedicadas a los convertidores catalíticos están investigando un catalizador que utilice únicamente paladio, de tener éxito se reducirían costos al haber un ahorro en PGM.

Los depósitos de PGM se encuentran en rocas ígneas bastante antiguas cuyo enfriamiento se ha realizado de manera lenta. Estos depósitos solo han sido encontrados en algunos lugares de la tierra, siendo el mayor depósito de mineral metalográfico el "SAUCER SHAPED" en Sudafrica con un diámetro de 500 km. La mayoría de las importaciones de PGM de los Estados Unidos provienen de este depósito y uno que se encuentra 300 metros debajo de este.

Para entender los costos de los metales, basta comparar sus relaciones en las minas y en catalizador^f.

	Pt	Pd	Rh
Depósito superior de la mina [mg/ton ^g]	100	40	8
Carga en el catalizador TWC [mg/cat]	100	0	15 a 20

1988

Como indicador de precios de estos metales, se cotizan en dólares americanos por onza troy (31.1035 g/troy oz). Los costos aproximados de a principios de los 70 y a finales de los 80 se presentan en la siguiente tabla:

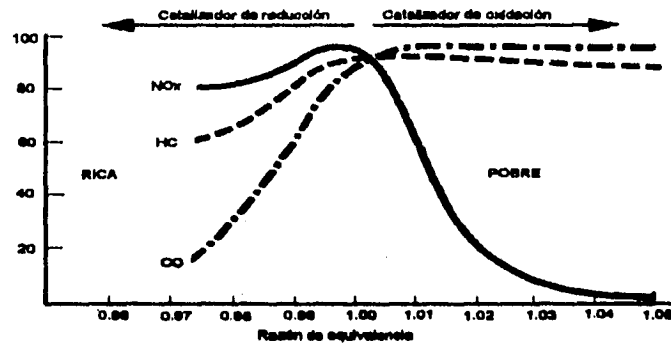
Costos de los PGM. Dólares americanos. Los precios de los 80 no tienen corrección por inflación. Precio por onza Troy.			
	Pt	Pd	Rh
principio 70's	150	40	800
final 80's	800	140	1800

La gráfica 4.2 muestra la eficiencia del convertidor catalítico respecto a la razón de equivalencia, en donde se puede apreciar que el rango de operación es muy cerrado ya que por ejemplo para los NOx, la eficiencia en mezcla rica^h cae desde 0.99 y del lado de mezcla pobre desde menos de 1.01. Para los HC del lado

^f Michael L. Church, Barry J. Cooper, Philip J. Willson; CATALYST IN AUTOMOBILES: A HISTORY, Automotive Engineering, junio 1989, vol. 97, número 6, pag. 69-75

^h Debido a que la razón de equivalencia de la gráfica se da como aire/combustible, cuando $\lambda > 1$ es mezcla pobre, $\lambda = 1$ es mezcla estequiométrica y $\lambda < 1$ es mezcla rica. $\phi = 1/\lambda$

rico cae en 0.99 y del lado pobre se estabiliza, mientras que para el CO cae inmediatamente en 1.0.



Gráfica 4.3 Eficiencias de un catalizador de aleación de platino.

4.4 Notas sobre los catalizadores en el mundo

A continuación se describe brevemente la implementación de los catalizadores en algunas partes del mundo.

Las normas japonesas de emisiones han sido implementadas desde 1975 y son similares a las de los E.U. aunque menos severas, ya que ellos no consideran arranque en frío y las velocidades son menores en el ciclo de prueba.

Los requerimientos europeos son el utilizar catalizador para aquellos motores mayores a 1.4 L a partir de 1992, aunque en la actualidad se busca que también lo utilicen motores de menor desplazamiento.

Las normas norte americanas de 1975 se implementaron en Brasil en 1992, y se espera que las de 1986 se implementen en 1997. El problema del Brasil es que etanol es el principal componente del combustible del Brasil, con una mezcla de 60% del alcohol y 40% de gasolina con 0.375 g de plomo por litro, así el tener gasolina libre de plomo para automóviles con convertidor es un gran problema.

En México se implementaron las normas de 1975 de los E.U. en 1991 y las de 1986 en 1993. La MAGNA SIN tiene un promedio de 0.0125 g/lit de plomo. Por lo que en la actualidad todos los automóviles nuevos traen el convertidor catalítico de fábrica y tenemos una gasolina con bajos contenidos de azufre, pero aún así hay serios problemas.

El primero es el utilizar una gasolina que no es la adecuada para un motor específico, ya que por ejemplo al ponerle gasolina MAGNA SIN a un vehículo que no utiliza ésta, se tienen grandes problemas de contaminación al no tener un convertidor catalítico que elimine principalmente los NO_x , por otro lado la falta de plomo en la gasolina en este tipo de motores provoca a) detonaciones espontáneas de la mezcla dentro del pistón acelerando el desgaste del mismo y b) es esencial en estos motores el plomo para lubricar las válvulas de admisión y escape, al faltar éste se acelera el desgaste de las mismas.

En motores que tengan que utilizar MAGNA SIN, ya que estos cuentan con un convertidor catalítico, si se utiliza la NOVA se genera el proceso de envenenamiento por plomo del catalizador haciendo necesario el reemplazo del dispositivo.

Por último los convertidores catalíticos tienen una vida útil de aproximadamente 4 años, ya que estos aunque no haya plomo en la gasolina, ésta llega a contener entre otros azufre que es otro de los venenos del convertidor, reduciendo su vida en algunos casos hasta en un año².

² Curso de MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, Facultad de Ingeniería - Universidad Politécnica de Valencia; José Miguel Corberán y Rafael Royo.

CAPITULO 5: EXPERIMENTACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

La experimentación es parte fundamental del desarrollo de la ingeniería ya que muchos fenómenos en la cual se basa, especialmente la del área mecánica, tienen gran variedad de ecuaciones complejas que rigen su comportamiento, y que por lo tanto no han sido resueltas o no han sido determinadas. Es entonces cuando la experimentación nos ayuda, ya que al estudiar un fenómeno en particular, como por ejemplo las caídas de presión en tuberías, se recaban resultados estadísticos, los cuales se pueden trazar como es el caso del diagrama de Moody, o darse en tablas como es el caso de las propiedades de las diferentes aleaciones de acero. Ahora bien esto nos acarrea imprecisiones, pero debido a que son muy bajas, para los propósitos de la ingeniería son aceptables.

El objetivo de la experimentación es obtener los valores precisos de la producción de los contaminantes bajo diferentes condiciones de operación a la salida del escape y observar como los trabaja el catalizador. Cabe aclarar que de ninguna manera los datos obtenidos sirvan para caracterizar los niveles de emisión de otros motores, pero en cambio si nos dan una idea cualitativa del comportamiento de los mismos.

5.2 Parámetros y variables a considerar

Se estudiaron los más característicos para definirlos y combinarlos, para así obtener pruebas que sean las más reales en cuanto al comportamiento del motor se refiere⁴.

El criterio que se tomó para la definición de las pruebas, es simular el trabajo

⁴ La simulación se llevo a cabo el motor FORD V8, del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería, UNAM

de un camión de carga y las diferentes condiciones a las que se encuentra. En primer lugar debido a la exención del no circula a flotillas de camiones, el camión al salir de la planta tiene una carga fija (si despreciamos la carga del tanque de combustible que va disminuyendo conforme avanza) antes de hacer la primera entrega o recoger algún material (según sea su servicio), en estas condiciones se puede considerar la carga fija y la velocidad variable ya que el mismo tiene aceleraciones. Ahora bien, una vez que llegó a su primer destino, la carga varía y conforme vaya llegando a sus diferentes destinos ésta irá variando, es entonces cuando definimos que tenemos carga variable a diferentes velocidades. Estas fueron las principales variables de operación del mismo. Ahora por otro lado tenemos los ajustes del motor, como por ejemplo el ángulo de avance de la chispa de encendido, la temperatura del refrigerante y la relación aire/combustible a la que esté ajustado el motor los cuales afectan la producción y descomposición de emisiones. Un último parámetro, que hoy en día es importante, es el que si ese camión tiene o no convertidor catalítico. De todo lo anterior se definen los parámetros y variables.

5.2.1 Velocidad de giro del motor.

Esta primera variable nos indica en qué régimen se encuentra el motor, siendo de mucha importancia ya que ésta nos define la potencia en un instante determinado, al ser esta directamente proporcional al producto de velocidad por el par del motor. Al variar ésta simulamos las aceleraciones (tanto positivas como negativas) que tendría el camión.

5.2.2 Carga del motor

La carga del motor no es más que el par que hay a la salida del mismo, este es la otra variable para el cálculo de la potencia. Ahora bien al variar éste variamos la potencia pero a la vez simulamos el trabajo que haría el camión al ir de subida, llevar carga o la combinación de ambas.

5.2.3 Ángulo de encendido

También llamado ángulo de avance de la chispa respecto al cigüeñal (tiempo). Aunque este parámetro se ajusta en la afinación como un valor nominal del fabricante, varía respecto a las condiciones de operación ya que tiene dos sistemas de control: uno neumático de vacío, que aprovecha el vacío del múltiple de admisión en regímenes de baja velocidad adelantando la chispa para optimizar la combustión; el otro sistema es mecánico y varía el ángulo en alta a ser un sistema centrífugo de regulación. Estos sistemas en la actualidad se controlan por medio de la computadora del motor la cual lleva una base de datos en su memoria de los ajustes a realizar.

La importancia de variar este parámetro es ver las consecuencias que puede traer consigo una afinación fuera del tiempo nominal por un lado, o tratar de optimizar el tiempo para ciertas condiciones dadas.

5.2.4 Razón de equivalencia

Quizá sea el parámetro más importante de la afinación de un motor, ya que éste nos proporciona la relación de aire por combustible. Se sabe que al arrancar en frío y en aceleraciones rápidas tenemos una mezcla rica para garantizar que se queme todo el aire que está en el cilindro, aunque tengamos los más altos niveles de contaminación. En las demás condiciones de operación se trata de tener la mezcla estequiométrica en el lado de la mezcla pobre preferentemente. Al variar este parámetro podemos determinar la importancia de la calidad de las mezclas en las emisiones.

5.2.5 Temperatura del agua de refrigeración

La temperatura del agua de refrigeración del motor influye en la eficiencia de la combustión y en la cantidad de emisiones producidas. Del lado de la eficiencia mientras más fría esté el agua habrá una mayor transferencia de calor del interior del cilindro hacia el agua y de ésta hacia la atmósfera, ya que al ser

menor la temperatura es mayor el gradiente y así el flujo de calor y por lo tanto las pérdidas de energía en la cámara de combustión. Por el lado de las emisiones hay dos efectos, mientras mayor sea la transferencia de calor de las paredes al agua menor será la temperatura de la pared y por lo tanto habrá mayor capacidad de extinguir la flama y producir más hidrocarburos sin quemar; el otro efecto es que al aumentar la temperatura del agua, aumenta la temperatura en el interior del cilindro y por lo tanto hay mayor generación de óxidos de nitrógeno en la combustión. En el caso experimental la temperatura nominal es de 70°C aunque en los motores más recientes con radiadores de alta presión oscile entre los 90°C y 110°C. El objetivo de variar este parámetro es observar la variación de las emisiones respecto a la variación del refrigerante.

5.2.6 Variables auxiliares para la medición

Estas variables nos complementan los datos de experimentación.

Tiempo: para saber cuanto se tarda en consumir determinado volumen de gas además de utilizarlo de parámetro de estabilización [segundos].

Gasto volumétrico de gas: Es la variable directa que podemos leer del medidor de gas, aunque es la diferencia de la lectura final menos la inicial [m³].

Presión de gas: Se requiere para utilizar la ecuación de gas ideal y obtener la densidad del mismo [kg/cm²].

Temperatura del gas: Se utiliza también en la ecuación de gas ideal [Kelvin].

Temperaturas: De los gases de escape antes y después del catalizador, del agua de enfriamiento, de las sondas, del medio ambiente, etc [°C].

5.3 Protocolos de experimentación

No son más que las indicaciones a seguir para cada instrumento del sistema, para obtener siempre los datos de una manera constante y evitar averías en los mismos. A continuación se presenta una tabla en donde se diferencian los sistemas de los instrumentos (aunque estos últimos pueden ser sistemas). Para así poder entender la importancia de llevar un protocolo en su utilización.

SISTEMAS	
Gasolina	
Gas	
Refrigeración	
Freno hidráulico	
Catalizador	
INSTRUMENTOS	
Medidor Becharach 300	
Medidor KAL	
Termopar FLUKE	
Hilo caliente	
Osciloscopio	
Transductor de presión	
Medidor de gas	
Tacómetro óptico	
Cronómetro	
Mánómetro diferencial	
Báscula del freno	
Tacómetro del freno	

TABLA 5.1 Sistemas e instrumentos.

5.3.1 Protocolo para el sistema de combustible

AL EMPEZAR:

- 1- Cerrar la válvula de gasolina.

- 2- Poner los interruptores en "GAS LP".
- 3- Conectar la manguera del extremo izquierdo del medidor a la toma de gas.
- 4- Conectar la manguera del extremo derecho del medidor al selenoide de gas.
- 5- Abrir la válvula de paso y después la globo de la línea de gas.
- 6- Revisar fugas en los extremos.

AL TERMINAR:

- 1- Cerrar la válvula de paso de gas con el motor encendido para que se agote el gas de la manguera.
- 2- Desconectar y enrollar las mangueras cuidando de que no se golpee el medidor.
- 3- Poner los interruptores en gasolina (no necesario).

5.3.2 Protocolo del freno hidráulico

AL EMPEZAR:

- 1- Antes de encender el motor abrir la válvula de entrada y la de salida de agua del freno.
- 2- Verificar que las marcas en la báscula coincidan, de lo contrario nivelar.
- 3- Para dar carga en freno mover el volante horizontal en sentido de las manecillas del reloj para incrementar, cuidando que las marcas coincidan.
- 4- También se puede regular carga manipulando las válvulas de entrada y salida.

AL TERMINAR:

- 1- Antes de apagar el motor, reducir la carga al mínimo sin cerrar las válvulas.
- 2- Cerrar las válvulas de agua.

5.3.3 Protocolo del sistema de refrigeración

AL EMPEZAR:

- 1- Una vez encendido el motor, cuando el termómetro de entrada del sistema de refrigeración marque poco arriba de 70°C, abrir la válvula de entrada al tanque $\frac{1}{2}$ de vuelta aproximadamente, y esperar unos minutos antes de que empiece a salir

el agua caliente.

2- Cuando descienda la temperatura por abajo de los 70°C cerrar la válvula de entrada al recipiente. Después de cerrada seguirá saliendo agua. Con este método se mantendrá el agua de refrigeración cerca de la temperatura nominal.

3- Repetir el ciclo tantas veces como sea necesario.

AL TERMINAR:

1- Una vez que se apagó el motor, si la temperatura está por arriba de los 70°C dejar correr el agua por unos minutos, si está por debajo cerrarla de inmediato.

5.3.4 Protocolo del BACHARACH 300 NSX

AL EMPEZAR:

1- Verificar que esté cargada la batería.

2- Desenrollar la manguera de la sonda.

3- Prenderlo y esperar la alarma CAL.

4- Al aparecer la alarma "CAL" presionar el botón "CALIBRATION", para que se autocalibre la sonda de oxígeno, cuidando que la sonda esté fuera de cualquier emisión.

5- Al aparecer la alarma de "FUEL" en el monitor, escoger "LPG" como combustible.

6- Cuando vayamos a medir emisiones de NOx, apretar el botón "RUN" para que funcione la bomba de vacío del BACHARACH.

7- Al acabar de medir apretar "RUN" para que quede en modo de espera (standby), para las siguientes mediciones. Si es necesario purgar dejando en modo "RUN" la sonda a la atmósfera.

AL TERMINAR:

1- Antes de apagarlo, si la sonda está muy caliente dejarlo corriendo a la atmósfera para que se enfríe y halla un purgado de la misma.

2- Una vez listo, enrollar la manguera de la sonda y guardarlo.

3- Si es necesario, dejar cargando la batería toda la noche.

5.3.5 Protocolo del KAL

AL EMPEZAR:

- 1- Antes de encender el motor se debe conectar el KAL a los bornes de la batería y se debe mantener prendido todo el día, ya que si se apaga y prende constantemente se deteriora el instrumento.
- 2- Antes de cualquier medición se debió haber dejado calentar por lo menos durante 20 minutos con la sonda fuera de cualquier emisión. Durante este proceso puede llegar a haber varias autocalibraciones.
- 3- Al hacer las mediciones se debe de meter la sonda solamente en el instante de medición en el puerto, no es necesario que esté más de tres minutos en el puerto para que se estabilice, ya que esta es rápida, y por el contrario si se deja mucho tiempo se pueden acumular condensados en el sistema.
- 4- Para hacer mediciones se aprieta el botón "STANDBY/RUN" para que pase al modo de operación.
- 5- Cuando se retira la sonda del puerto se presiona "STANDBY/RUN" para que pase al modo de espera.

AL TERMINAR:

- 1- Apagar el KAL, y desconectarlo de los bornes de la batería cuando se esté seguro de ya no utilizarlo.
- 2- Aunque durante su operación se va drenando su trampa de partes, es necesario drenarla y secarla totalmente antes de guardarla.

5.4 Definición de las pruebas

5.4.1 Nomenclatura de las variables

Variables de entrada:

- N: velocidad del motor [rpm]
W: carga en el freno hidráulico [kgf]

TESIS DE LICENCIATURA

ϕ : razón de equivalencia $[(\text{kg}_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{aire}})_{\text{real}}/(\text{kg}_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{aire}})_{\text{teórica}}]$

PMS: punto muerto superior del cilindro. Esta posición al final de la carrera de compresión es el punto de referencia de 0°.

θ : ángulo de avance de la chispa [grados del cigüeñal antes del PMS]

T_y : Temperatura del agua de enfriamiento [°C]

Variables de salida:

ppm: partes por millón en forma volumétrica

NO_x : óxidos de nitrógeno ($\text{NO} + \text{NO}_2$) [ppm]

HC: compuestos orgánicos o hidrocarburos C_x [ppm]

O_2 : Oxígeno molecular [% volumétrico]

CO: monóxido de carbono [% volumétrico]

CO_2 : bióxido de carbono [% volumétrico]

V_{LP} : Lectura inicial de gas en el medidor [m^3]

V_{LPf} : Lectura final de gas en el medidor [m^3]

t: tiempo [seg]

P: presión en la línea de gas [kg/cm^2]

Otras variables:

T_x : cualquier temperatura x (se especificará x) [°C]

5.4.2 Velocidad variable

La intención de esta prueba es de mantener constante la carga en el freno hidráulico (aunque la potencia no sea constante), la razón de equivalencia en 1.0, la temperatura del agua en 70°C, el ángulo de avance de la chispa en $\theta_s=8^\circ$ e ir variando la velocidad del motor para obtener: ppm NO_x y HC, % de CO, O_2 y CO_2 , la lectura inicial y final en el medidor de gas, el tiempo transcurrido entre las dos lecturas, la presión de la línea de gas. Para el caso de las emisiones antes y después del convertidor catalítico.

Estabilización de las condiciones. Para garantizar la estabilidad de las mediciones en cada una de las condiciones se realizará el siguiente procedimiento: La primera vez que se prenda el motor en el día y esté frío, se dejara calentar a condiciones de ralenti durante un período mínimo de 25 minutos; cuando por alguna causa se apague el motor y se deba prender de nuevo se dejara un período de estabilización de 10 minutos aproximadamente.

Para las pruebas, el tiempo de estabilización para la primera muestra de una serie de tres será de 10 minutos al igual que el período entre cada una de las demás. Por ejemplo para velocidad variable a 750 rpm y carga de 5 kgf se harán tres pruebas para promediar las emisiones.

Este procedimiento de estabilización se realizará para cada prueba excepto en donde se indique. Además de que se medirán emisiones antes y después del catalizador.

5.4.3 Carga variable

En esta prueba se busca variar la carga a cuatro velocidades del motor, es decir que a una velocidad constante se medirán cinco puntos de carga variable, manteniendo los otros parámetros constantes e iguales que en la de velocidad variable, para después repetir a otra velocidad y así hasta haber realizado las cuatro velocidades.

5.4.4 Ángulo de avance variable

Esta prueba se hará solamente a dos velocidades siendo los puntos de medición 6 diferentes ángulos de avance en donde la carga será la que resulte a la velocidad de referencia quedando constante la razón de equivalencia y temperatura de agua.

5.4.5 Razones de equivalencia variables y velocidades de hilo caliente

Se variará la razón de equivalencia en el carburador y se realizara a dos velocidades del motor, con la carga que resulte de dicha razón, manteniendo el ángulo de avance constante en 7° y la temperatura del agua en 70°C. Los límites de mezcla más rica y más pobre serán los que limite el motor, es decir en condiciones estables antes de que se apague.

Las velocidades de hilo caliente se medirán para cada una de las relaciones estequiométricas anteriores para poder determinar el flujo másico de aire.

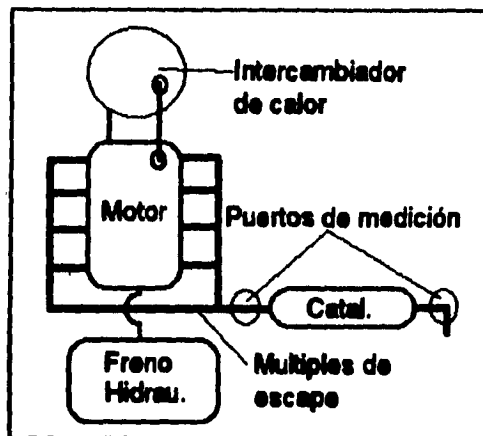
5.4.6 Temperatura de agua constante

Es esta última prueba lo único que variará será la temperatura de enfriamiento, haciéndose a una carga, una velocidad y las demás constantes.

5.4.7 Matriz de mediciones

Relación de las variaciones en las pruebas de medición. Antes y después del catalizador.					
Prueba	Velocidad N	Carga M	ϕ	T _w	T _w
Velocidad variable	3	cte	cte	cte	cte
Carga variable	4	3	cte	cte	cte
Ángulo avance variable	2	res	3	cte	cte
Rel. estequio. variable	2	res	cte	3	cte
Temperatura agua variable	cte	cte	cte	cte	3

NOTAS: el número significa las variaciones en la prueba; cte: significa sin cambio en toda la prueba; res: no es constante ni se ajusta, sino que se le como resultado de las condiciones.



ESQUEMA 5.1 Localización de los puertos de medición de emisiones del motor Ford V8, para el BACHARACH 300 NSX (NO_x) y el KAL EQUIPE (ppmC1 HC, % CO_2 , CO y O_2).

5.5 Mediciones finales de la experimentación

5.5.1 Velocidad variable

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %	VI LP m³	Vf LP m³	t seg
750	5.00	2.51	80	345	11.8	3.07	0.4	4.012	4.181	600
1000	5.00	3.34	93	254	12.4	2.37	0.4	4.259	4.485	600
1250	5.00	4.18	137	172	12.2	2.62	0.5	4.637	4.832	600
1500	5.00	5.02	200	241	12.2	2.83	0.6	5.170	5.480	600
1750	5.00	5.85	246	254	13.0	2.19	0.5	6.330	6.709	660

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %
750	5.00	2.51	1	382	13.7	3.44	0.1
1000	5.00	3.34	1	270	13.7	2.59	0.1
1250	5.00	4.18	1	228	13.7	2.42	0.0
1500	5.00	5.02	1	272	13.7	2.03	0.0
1750	5.00	5.85	1	258	13.7	1.85	0.0

TESIS DE LICENCIATURA

5.5.2 Carga variable

900 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2	V1 LP	Vf LP	t
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%	m ³	m ³	seg
900	1.00	0.60	58	335	8.1	1.94	0.4	23.01	23.30	287.45
900	4.20	2.53	100	372	11.6	4.52	0.3	23.33	23.47	150
900	6.30	3.79	150	346	11.6	3.73	0.5	23.32	23.70	522
900	12.50	7.53	366	397	11.9	3.80	0.6	23.75	23.88	290.55

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%
900	1.00	0.60	2	356	12.5	4.28	0.0
900	4.20	2.53	1	395	11.8	4.33	0.0
900	6.30	3.79	2	366	12.0	3.58	0.2
900	12.50	7.53	2	409	12.2	3.53	0.2

1 000 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2	V1 LP	Vf LP	t
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%	m ³	m ³	seg
1000	0.30	0.20	55	235	12.7	3.43	0.2	9.55	10.08	1800
1000	4.80	3.21	95	184	13.0	2.44	0.3	10.88	11.18	780
1000	7.00	4.68	142	134	12.9	2.19	0.3	11.28	12.62	2700
1000	10.50	7.02	349	135	12.9	2.25	0.8	13.21	14.01	2180

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%
1000	0.30	0.20	0	137	12.9	3.33	0.0
1000	4.80	3.21	1	186	14.2	1.68	0.0
1000	7.00	4.68	2	145	13.6	1.88	0.0
1000	10.50	7.02	3	185	15.1	0.58	0.0

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

1 300 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2	V1 LP	Vf LP	t
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%	m ³	m ³	seg
1300	1.00	0.87	84	180	12.2	2.80	0.2	14.08	14.91	2340
1300	6.00	5.22	144	189	12.3	2.40	0.6	14.98	15.72	1500
1300	10.20	8.87	370	438	11.7	3.80	0.8	24.75	24.80	144.1
1300	13.70	11.81	390	480	12.3	0.10	3.6	24.91	25.17	780

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%
1300	1.00	0.87	2	188	13.1	2.10	0.0
1300	6.00	5.22	3	177	13.8	1.44	0.1
1300	10.20	8.87	0	443	12.0	3.40	0.2
1300	13.70	11.81	0	64	12.8	0.02	3.2

1500 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2	V1 LP	Vf LP	t
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%	m ³	m ³	seg
1500	2.30	2.31		229	11.4	4.01	0.5	24.88	25.08	448.5
1500	4.40	4.41		282	11.4	3.97	0.8	25.15	25.40	450.4
1500	8.50	8.53		400	11.8	3.40	0.8	25.45	25.83	388.8
1500	10.00	10.03		329	13.7	0.98	0.7	25.88	25.81	288.85

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
RPM	kgf	kW	ppm	ppm	%	%	%
1500	2.30	2.31	1	245	11.5	3.88	0.2
1500	4.40	4.41	0	305	11.5	4.03	0.2
1500	8.50	8.53	2	402	12.2	3.31	0.2
1500	10.00	10.03	1	323	14.3	0.74	0.2

TESIS DE LICENCIATURA

5.5.3 Ángulo de avance variable

1100 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

F kgf	Pot kW	Ángulo	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %	VI LP m³	VF LP m³	t seg
2.10	1.55	20	64	353	9.4	3.55	4.4	31.48	31.54	248.15
2.20	1.62	15	68	238	8.6	3.81	4.3	31.76	31.88	360
2.30	1.69	10	66	171	8.1	3.61	5.1	32.16	32.28	334.67
2.20	1.62	7	65	263	9.8	3.75	2.2	32.57	32.65	233
2.20	1.62	0	64	208	10.9	3.96	0.4	32.95	33.05	254.23
2.20	1.62	-4	0	162	11.4	3.80	0.2	33.44	33.47	67.23

Con convertidor catalítico

F kgf	Pot kW	Ángulo	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %
2.10	1.55	20	2	276	7.4	2.70	7.3
2.20	1.62	15	6	178	6.6	2.87	8.1
2.30	1.69	10	3	115	6.1	2.63	9.0
2.20	1.62	7	3	236	6.5	3.31	4.2
2.20	1.62	0	2	212	11.3	3.88	0.0
2.20	1.62	-4	0	170	11.8	3.84	0.0

1500 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

F kgf	Pot kW	Ángulo	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %	VI LP m³	VF LP m³	t seg
3.30	3.31	20	64	364	11.4	4.30	0.4	31.61	31.65	96.15
3.10	3.11	15	68	270	11.2	4.21	0.8	31.94	31.87	73.12
3.20	3.21	10	92	225	11.1	4.37	0.4	32.32	32.38	133.78
3.30	3.31	7	89	304	10.8	4.24	0.3	32.75	32.78	80.24
3.30	3.31	0	0	233	11.1	4.13	0.2	33.21	33.23	23.85
3.20	3.21	-4	4	173	11.8	3.07	0.1	33.52	33.57	80.77

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

1 300 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %	V1 LP m³	V2 LP m³	t seg
1300	1.00	0.87	84	180	12.2	2.80	0.2	14.08	14.91	2340
1300	6.00	5.22	144	168	12.3	2.40	0.6	14.98	15.72	1500
1300	10.20	8.87	370	436	11.7	3.80	0.6	24.75	24.80	144.1
1300	13.70	11.91	390	480	12.3	0.10	3.6	24.91	25.17	760

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %
1300	1.00	0.87	2	168	13.1	2.10	0.0
1300	6.00	5.22	3	177	13.6	1.44	0.1
1300	10.20	8.87	0	443	12.0	3.40	0.2
1300	13.70	11.91	0	84	12.6	0.02	3.2

1500 rpm

SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO

N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %	V1 LP m³	V2 LP m³	t seg
1500	2.30	2.31		228	11.4	4.01	0.5	24.88	25.08	448.5
1500	4.40	4.41		292	11.4	3.87	0.5	25.15	25.40	490.4
1500	8.50	8.53		400	11.8	3.40	0.8	25.45	25.63	398.8
1500	10.00	10.03		328	13.7	0.88	0.7	25.88	25.81	288.85

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %
1500	2.30	2.31	1	245	11.5	3.88	0.2
1500	4.40	4.41	0	305	11.5	4.03	0.2
1500	8.50	8.53	2	402	12.2	3.31	0.2
1500	10.00	10.03	1	323	14.3	0.74	0.2

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAH

CON CONVERTIDOR CATALÍTICO

F kgf	Pot kW	Ángulo	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %
3.30	3.31	20	18	255	7.7	2.96	6.7
3.10	3.11	15	11	190	8.3	3.13	5.5
3.20	3.21	10	3	173	8.7	3.65	3.1
3.30	3.31	7	5	282	11.3	3.87	0.0
3.30	3.31	0	0	234	11.3	3.87	0.0
3.20	3.21	-4	0	178	12.0	2.81	0.0

5.5.4 Razón de equivalencia variable

Φ a/c	SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO										
	N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %	VI LP m³	VF LP m³	t seg
D2 1.3	1000	0.70	0.47	40	478	7.2	8.73	0.8	30.68	30.82	272.74
D1 1.1	1000	0.70	0.47	47	388	8.8	8.76	0.5	30.41	30.48	187.26
C 1.1	1000	4.10	2.74	78	284	11.4	3.88	0.5	30.10	30.18	218.88
I1 0.8	1000	2.50	1.87	78	188	13.7	2.17	0.2	28.24	28.38	402.82
I2 0.8	1000	5.70	3.81	111	214	0.8	1.5	1	28.87	28.88	312.58

Φ a/c	Con convertidor catalítico							
	N RPM	F kgf	Pot kW	NOx ppm	HC ppm	CO2 %	CO %	O2 %
D2 1.3	1000	0.7	0.47	18	384	7.4	7.88	0.1
D1 1.1	1000	0.7	0.47	7	387	8.1	8.72	0.2
C 1.0	1000	4.1	2.74	0	280	11.8	3.74	0.2
I1 0.8	1000	2.5	1.87	8	188	11.3	1.82	3.2
I2 0.8	1000	5.7	3.81	0	180	18.4	0.50	0.0

TESIS DE LICENCIATURA

		Sin convertidor catalítico										
◆	N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2	V1 LP	Vf LP	t	
a/c	RPM	kgP	kW	ppm	ppm	%	%	%	m³	m³	seg	
D2	1.3	1300	1.60	1.38	82	305	8.1	5.8	0.4	30.88	30.87	244.84
D1	1.1	1300	1.60	1.38	58	270	8.8	2.73	0.4	30.51	30.81	372.84
C	1.0	1300	2.10	1.88	78	228	11.4	3.93	0.4	30.23	30.42	390
I1	0.8	1300	2.50	2.17	78	171	2.75	2.72	0.8	28.88	30.03	203.48
I2	0.8	1300	2.00	1.74	80	132	13.5	1.87	0.8	28.05	28.15	85.82

		Con convertidor catalítico							
◆	N	F	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2	
a/c	RPM	kgP	kW	ppm	ppm	%	%	%	
D2	1.3	1300	1.8	1.38	18	137	3.0	1.88	13.3
D1	1.1	1300	1.8	1.38	7	280	10.1	8.52	0.2
C	1.0	1300	2.1	1.88	4	80	2.0	0.78	18.5
I1	0.8	1300	2.5	2.17	0	160	13.1	2.17	0.0
I2	0.8	1300	2	1.74	8	117	14.8	1.24	0.0

CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan las gráficas de emisiones contra la variable o parámetros de interés. Para fines prácticos las emisiones se han dividido en dos grupos, NO_x y HC por un lado; y CO_2 , CO, y O_2 por el otro, ya que la producción del CO_2 depende principalmente de la oxidación del CO por el O_2 , excepto en donde se indique.

Las gráficas que muestran el comportamiento del convertidor catalítico son las de salida o reducción en el catalizador. La salida en catalizador se define como las emisiones de una especie a la salida a una condición específica entre las emisiones de la misma especie a las mismas condiciones, es decir:

$$\text{Salida}_{\text{especie}} = \frac{[\text{especie}]_{\text{salida}}}{[\text{especie}]_{\text{entrada}}}$$

donde [especie] denota la concentración de la especie a la salida o entrada del catalizador y se deduce que:

$\text{salida}_{\text{especie}} < 1$, hubo reducción de la especie

$\text{salida}_{\text{especie}} = 1$, no hubo reducción ni producción aparente

$\text{salida}_{\text{especie}} = 0$, se redujo por completo la especie o no hubo entrada de la misma

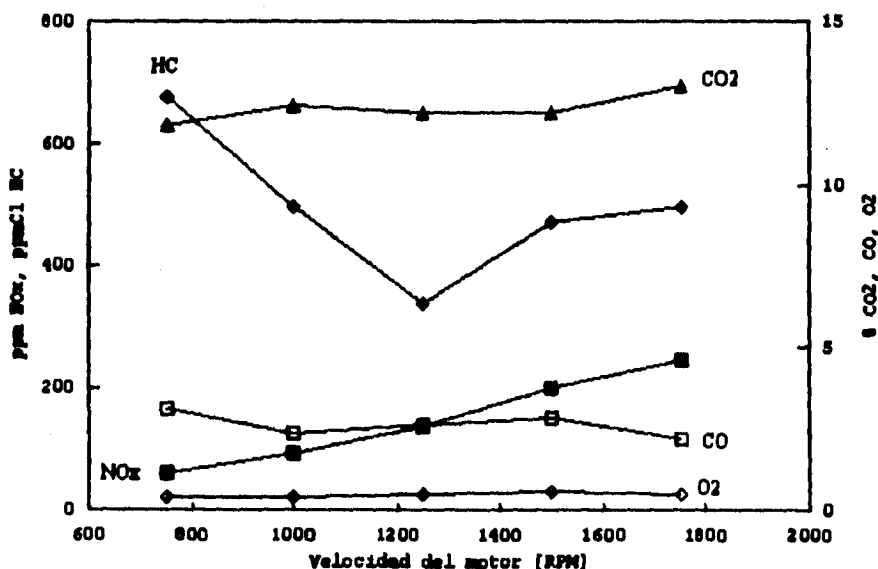
$\text{salida}_{\text{especie}} > 1$, hubo producción de la especie en el catalizador.

Por último se hace la aclaración que a las emisiones de HC se les debe hacer una corrección, ya que al utilizar gas LP se dan las concentraciones en ppmC3, y por norma se deben dar en ppmC1, por lo tanto la corrección es:

$$\text{ppmC1} = \text{ppmC3} / 0.51$$

6.1 Velocidad variable

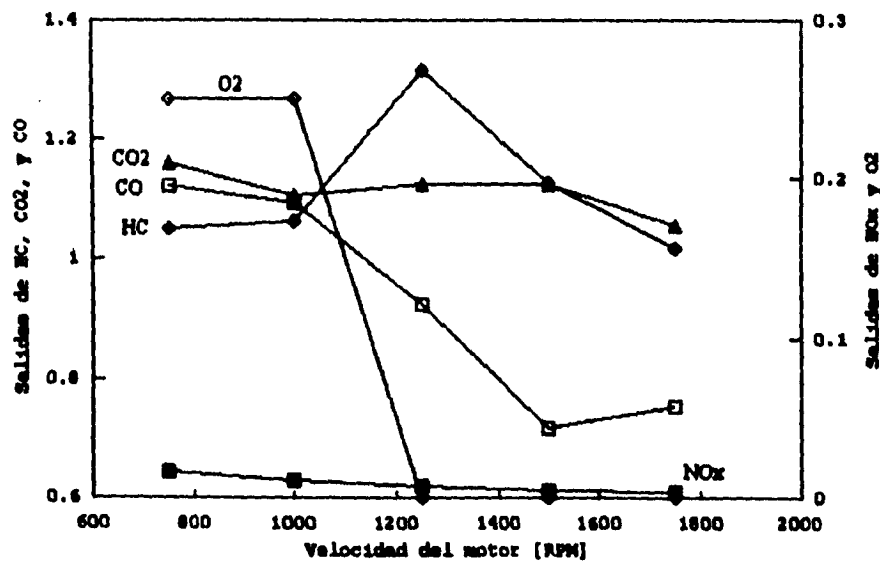
El trazado de los resultados de esta prueba se encuentran en la gráfica 6.1, en donde podemos apreciar que conforme aumenta la velocidad aumentan las emisiones de NO_x , a la vez que van disminuyendo las de HC excepto en el punto de 1250 rpm, en donde se vuelven a incrementar. La explicación del comportamiento de los HC es que en la zona de ralenti (u ociosa) hay mayor producción de HC al haber condiciones pobres de combustión al ser necesaria una mezcla rica para que no se apague el motor. Conforme se aumenta la velocidad del motor se empobrece la mezcla ya que el trabajo de bombeo del motor necesita menos energía de la generada (hasta un 20%) y disminuyen los HC pero aumentan los NO_x , lo cual es normal, ya que al haber más oxígeno disuelto las moléculas de N_2 tienen mayor probabilidad de oxidarse. Quizá el punto de inflexión de HC se deba a que los tiempos reales de residencia de la mezcla en el pistón sean menores pero no justifican los incrementos de NO_x .



Gráfica 6.1 Emisiones de NO_x , HC, CO_2 , CO y O_2 . V=var, F=5 kgf. $\theta=-7$, $\phi=1.0$, T(agua)=70 °C.

Las otras emisiones tienen un comportamiento tal que los niveles de CO y aún más los de O_2 están muy por abajo de los niveles de CO_2 . Se nota que cuando tenemos un cambio de pendiente, por ejemplo hacia arriba en la curva de CO_2 , en la de CO lo tenemos hacia abajo y viceversa. Tendencia que se nota más en el rango de 750 a 1000 rpm y de 1500 a 1750 lo que significa que la producción de CO_2 es dependiente de la producción de CO además de que la oxidación del CO en CO_2 no se está llevando al 100% debido al oxígeno residente que quedó sin trabajar.

Reducción en el catalizador. Idealmente esperamos una salida al 0 de las emisiones de NO_x , HC y CO, por medio del O_2 que llevan los gases de escape esperando una salida de H_2O , N_2 y CO_2 .

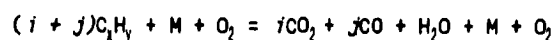
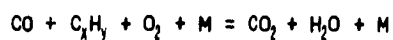


Gráfica 6.2 Salidas en el catalizador. Velocidad variable

En la gráfica 6.2 la reducción del NO_x se está llevando en todos los casos cercana al 100% ya que tenemos salidas de entre 0.004 y 0.017. Para los

hidrocarburos todas las salidas están por arriba de 1, lo que demuestra que hay producción de los mismos en el catalizador lo cual no es deseable. Al revisar las especificaciones del catalizador se nota que no puede reducir hidrocarburos del tipo $C_iH_i^v$, ya que la combustión empieza en una mezcla principalmente de C_3H_8 con C_4H_{10} , y se debe llegar a una combustión parcial de C_1H_4 , las especies empiezan a descender sus contenidos de carbono, habiendo hidrocarburos sin quemar de las familias C_1 hasta la C_4 . Parte de los HC diferentes a C_1 se oxidan en el catalizador con ayuda de O_2 en H_2O y CO_2 , pero dentro de esta oxidación puede faltar tiempo de reacción y/u oxígeno, entonces algunos se quedan como C_1 sumándose a los anteriores, por lo que se incrementen los niveles de HC a la salida del catalizador, además en la tabla 4.6 se observa que la salida de parafinas después del catalizador es mayor que la entrada. En el motor a gasolina es menor el impacto ya que la oxidación empieza en C_8H_{18} y por lo tanto los residuales son mayores a C_1 .

Para el CO_2 tenemos producciones en todo el rango al detectar salidas desde un 0.05 hasta un 0.2 mayores que las entradas al catalizador, aunque hasta las 1000 rpm tenemos una salida mayor a 1 de CO para lo cual hay dos posibles razones: (1) aunque para el CO_2 hay producción directa a partir del CO, cabe la posibilidad de que se produzca directamente de los hidrocarburos sin quemar (2) la producción de CO se puede deber a que en la oxidación de los hidrocarburos no hay tiempo y/u oxígeno suficientes y por lo tanto no lleguen a CO_2 . Los dos puntos se muestran en las siguientes reacciones:



^y x puede ser cualquier número que nos de hidrocarburos de las familias: $C_n H_{2n+2}$, $C_n H_{n+2}$, etc.

Tabla 6.1 Comparación de salidas de las especies después del catalizador, figura 6.2

Velocidad	750 rpm	1000 rpm	1250 rpm	1500 rpm	1750 rpm
Mayor	+CO ₂	+CO ₂	+HC	+HC	+CO ₂
	+CO	+CO	+CO ₂	+CO ₂	+HC
	+HC	+HC	CO	CO	CO
	O ₂	O ₂	NO _x	NO _x	NO _x
Menor	NO _x	NO _x	*O ₂	*O ₂	*O ₂

* salida mayor a 1, # salida de cero

En la tabla 6.1 se muestra el orden de salidas de mayor a menor en cada condición de operación. Se nota que a 750 y 1000 rpm tenemos salidas mayores a 1 para el CO y HC, siendo mayor la de CO, pero solamente en donde hay salida de oxígeno, ya que al agotarse éste a 1250, 1500 y 1750 las salidas de HC son mayores a las de CO, quizá estén involucrados los tiempos de residencia, ya que a mayores velocidades los gases circulan más rápido. Ahora bien las deficiencias en la reducción de CO y HC a bajas velocidades, aún cuando hay oxígeno para continuar las reacciones se puede deber a las siguientes causas (1) el catalizador no ha alcanzado su temperatura mínima de LIGHT-OFF^M, (2) el catalizador es pequeño para el motor ó (3) no esta hecho para combustión con gas LP.

Datos numéricos finales

Velocidad variable y carga fija. Datos para graficar

N	ppm NDx	ppmCi HC	% CO2	% CO	% O2
750	80	878	11.80	3.07	0.40
1000	93	498	12.40	2.37	0.40
1250	137	337	12.20	2.62	0.50
1500	200	473	12.20	2.83	0.57
1750	248	498	13.00	2.19	0.48

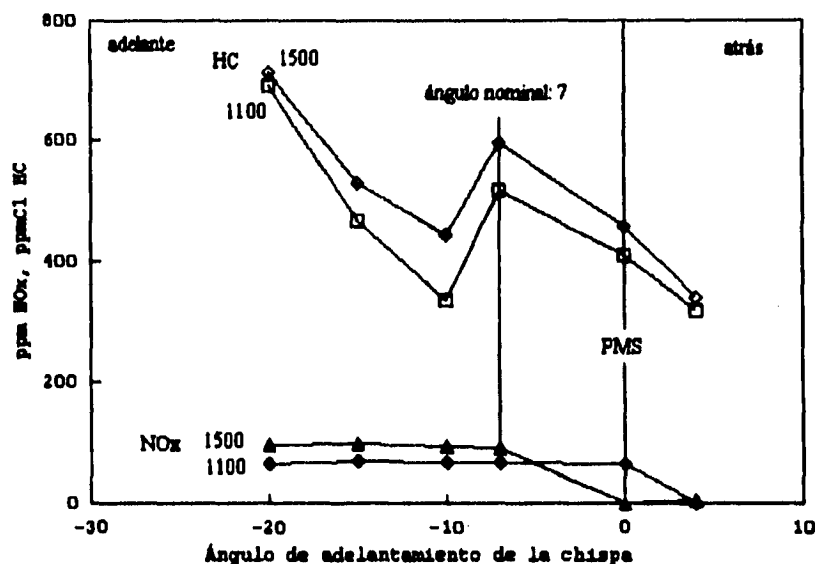
^ ver página 50

TESIS DE LICENCIATURA

Salidas después del catalizador. (salidas/entrada) $\phi=100\%$

N	NOx	HC	CO2	CO	O2
750	1.7%	104.9%	116.1%	112.1%	25.0%
1000	1.1%	106.3%	110.5%	109.3%	25.0%
1250	0.7%	131.4%	112.3%	92.3%	0.0%
1500	0.5%	112.7%	112.3%	71.6%	0.0%
1750	0.4%	101.6%	105.4%	75.3%	0.0%

6.2 Ángulo de encendido variable.



Gráfica 6.3 Emisiones de NOx y HC. $V=1100$ y 1500 rpm, F_{cte} , $\phi=var$, $\phi=1.0$, $T_{(agua)}=70^{\circ}C$.

Al observar la figura 6.3 se observa que el adelantar la chispa no tienen gran impacto en la disminución de las emisiones de NO_x , pero conforme se atrase la chispa disminuyen las concentraciones de NO_x hasta llegar a ser cero al dar la

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

chispa en el PMS y después de éste siendo mayores las emisiones a 1500 rpm, excepto en 0 grados en donde esta curva cruza a la de 1100 cayendo sus emisiones a cero en este punto. En la figura 4.11 se observa la misma tendencia al descender suavemente las emisiones desde -20 hasta 0 aunque sea mayor la pendiente y las concentraciones, ya que estas son medidas directamente en la cámara de combustión, por medio de una electroválvula de alta velocidad conectada a una bomba de vacío que aspira la mezcla en el cilindro congelandola con un intercambiador de calor.

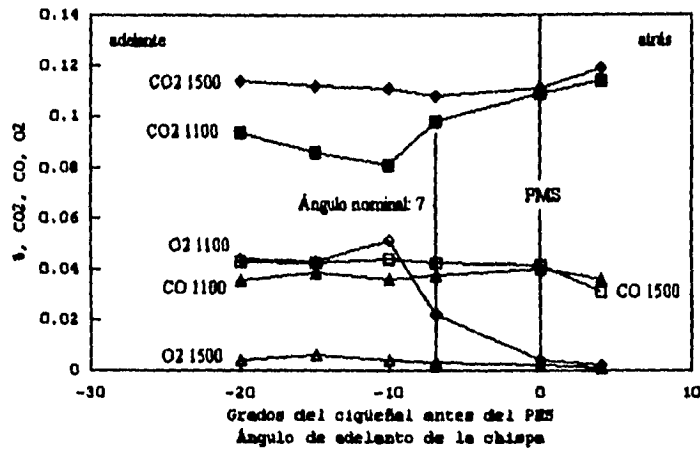
Las curvas de HC son casi paralelas repitiendo que la de 1100 esta por debajo de la de 1500 rpm corroborando la experimentación previa que afirma que conforme se adelante la chispa mayores son las emisiones de HC, disminuyendo conforme se atrasa hasta que en los -7 grados, que coincide con el tiempo nominal del motor, hay un pico de emisiones para volver a tener su tendencia a la disminución.

Es difícil asegurar que el pico en los 7 grados es caso aislado ya que repitió en dos regímenes, pero tampoco hay pruebas para asegurar que sea un comportamiento del motor con gas LP, habría que revisar ese punto experimentando alrededor de él, aunque cabe otra posibilidad. Como se sabe, los medidores de HC miden por lo general un solo tipo de ellos, por ejemplo pueden medir a partir de C1, C3 ó C6, y en casos aislados más de uno. Entonces la posible causa del pico en -7 se deba al cambio de concentración de hidrocarburo que se utiliza para medir, originando con esto el error reportado. Por último no se puede descartar un error de cualquier otra índole al tomar esta medición.

El otro grupo de emisiones (gráfica 6.4) tienen un comportamiento diferente a los NO_x y HC. Por ejemplo a 1100 rpm se nota que conforme se adelante la chispa de 4 a -10 grados va disminuyendo la cantidad de producción de CO_2 y aumentando la cantidad de O_2 , en -10 hay un pico y cambian las pendientes de ambas curvas, pero el CO_2 no llega a superar su valor en 4. Se nota un comportamiento casi constante del CO en todo el rango de avances.

Si regresamos a la gráfica 6.3, cuando disminuyen los HC en el atraso, aumenta

el nivel de CO_2 , lo que quizá explique que se queden constantes los niveles de CO , es decir que la producción de CO_2 es partir de los HC y del O_2 .

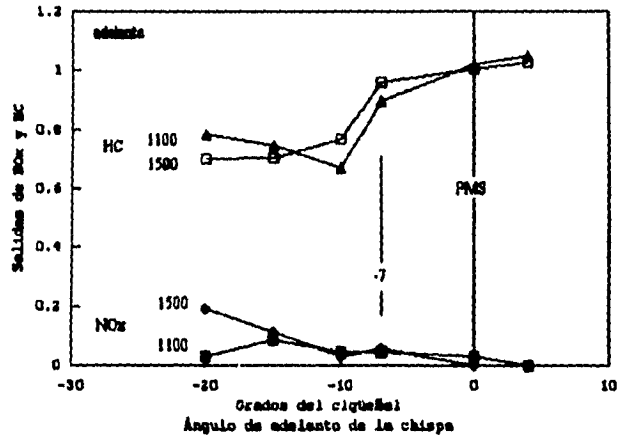


Gráfica 6.4 Emisiones de CO_2 , CO y O_2 . $V=1100$ y 1500 rpm, $F=cte$, $\theta=var$, $\phi=1.0$, $T(agua)=70^\circ C$.

Para 1500 rpm tenemos una producción casi constante de CO_2 desde los -20 grados hasta los -7 , de los -7 a los 4 hay un incremento sensible a la vez que hay una disminución de CO y O_2 . Se puede observar que en todo el rango de CO_2 las curvas de CO y O_2 se comportan como un reflejo en un espejo de ésta, lo que indica una clara producción de CO_2 a partir de la oxidación del CO por medio del O_2 .

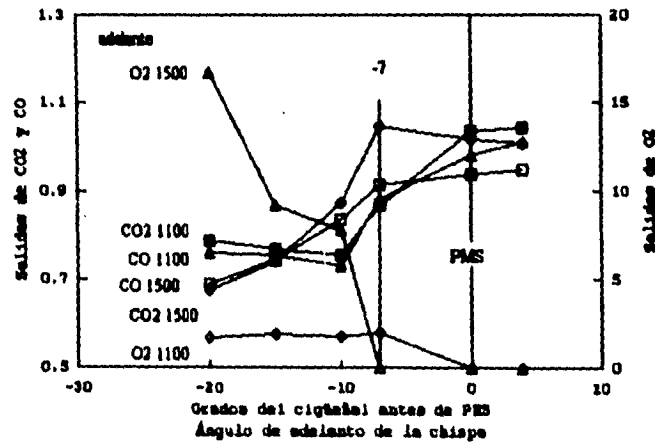
Reducción en el catalizador

Al observar la gráfica 6.5 se observa que la mayor eficiencia del catalizador se lleva en el lado de los NO_x , en la curva de 1100 rpm con salidas menores a 0.1 ; en la de 1500 hasta 0.2 . Se debe aclarar que en ninguno de los dos casos siguientes, 0 grados a 1100 rpm y en 4 grados en 1500 rpm, hubo producción de NO_x .



Gráfica 8.5 Salidas en el catalizador de NOx y HC. Ángulo de encendido variable.

Para los HC tenemos desde salidas menores a 1 desde -20 hasta los 0 grados, desde 0 inclusive hasta 4 las salidas son mayores a 1.



Gráfica 8.6 Salidas en el catalizador de CO2, CO y O2. Ángulo de encendido variable.

TESIS DE LICENCIATURA

Pero surgen dudas respecto al proceso, ¿Porqué aumentan los HC si el NO_x se descompone en N_2 y O_2 ?, ¿Porqué se agota el O_2 ? (Ver figura 6.6)

La posible razón a lo anterior es que aunque el sistema tenga una sonda lambda para medir el exceso de oxígeno a la salida del motor, por el otro, no tiene forma de medir los HC, de tal manera que puede haber una concentración excesiva de estos y no alcanza el oxígeno que entró al catalizador para su oxidación.

En la gráfica 6.6 el CO tiene una reducción que va de mayor a menor de -20 a 0 grados, produciéndose emisión en 4 grados, pero el comportamiento es extraño ya que por ejemplo se tienen reducciones de CO_2 en -20, -15, -10 grados para ambas velocidades y en -7 grados para 1500 rpm, a la vez de reducciones en -20, -15 y -10 para 1100 rpm y en -7, 0 y 4 para 1500 rpm, teniendo un comportamiento caótico.

Datos numéricos finales

1100 rpm					
Ángulo	ppm NO_x	ppmC1 HC	% CO_2	% CO	% O_2
-20	64	692	8.40	3.55	4.40
-15	68	467	8.60	3.61	4.30
-10	68	335	8.10	3.61	5.10
-7	65	516	9.60	3.75	2.20
0	64	408	10.90	3.86	0.40
4	0	316	11.40	3.60	0.20

1500 rpm					
Ángulo	ppm NO_x	ppmC1 HC	% CO_2	% CO	% O_2
-20	94	714	11.40	4.30	0.40
-15	96	529	11.20	4.21	0.60
-10	92	441	11.10	4.37	0.40
-7	89	598	10.80	4.24	0.30
0	0	457	11.10	4.13	0.20
4	4	339	11.90	3.07	0.10

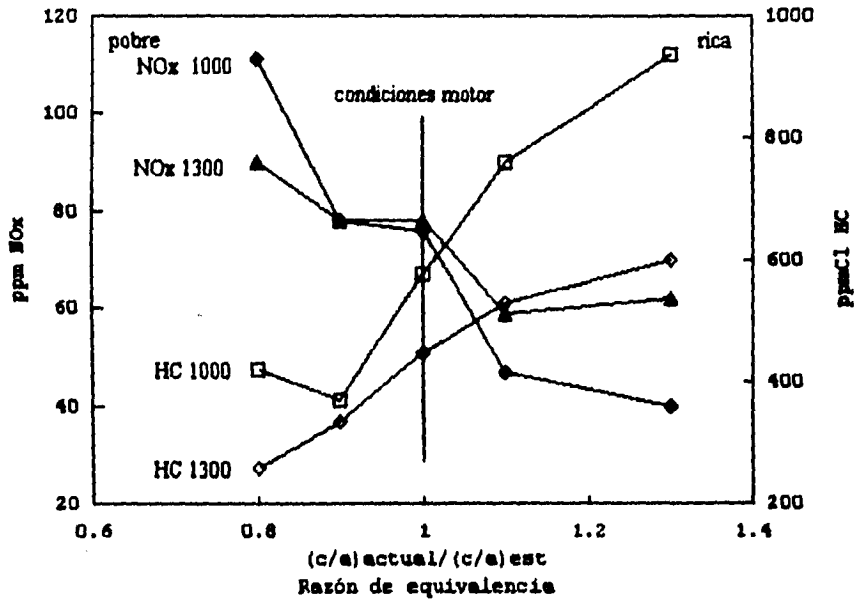
Salida de emisiones después del catalizador

Ángulo	NO_x @ 1100	NO_x @ 1500	HC @ 1100	HC @ 1500
-20	3.13%	18.15%	78.19%	70.05%
-15	6.82%	11.46%	74.79%	70.37%
-10	4.55%	3.26%	67.25%	76.89%
-7	4.82%	5.62%	89.73%	96.05%
0	3.13%	0.00%	101.92%	100.43%
4	0.00%	0.00%	104.94%	102.89%

FACULTAD DE INGENIERIA, UIAM

Ángulo	CO2 @ 1100	@ 1500	CO @ 1100	@ 1500	O2 @ 1100	@ 1500
-20	78.7%	87.5%	76.1%	88.8%	165.9%	1675.0%
-15	76.7%	74.1%	75.3%	74.3%	188.4%	916.7%
-10	75.3%	87.4%	72.9%	63.5%	176.5%	775.0%
-7	88.7%	104.8%	88.3%	91.3%	190.9%	0.0%
0	103.7%	101.8%	98.2%	93.7%	0.0%	0.0%
4	104.4%	100.8%	101.1%	94.8%	0.0%	0.0%

6.3 Razón equivalencia variable



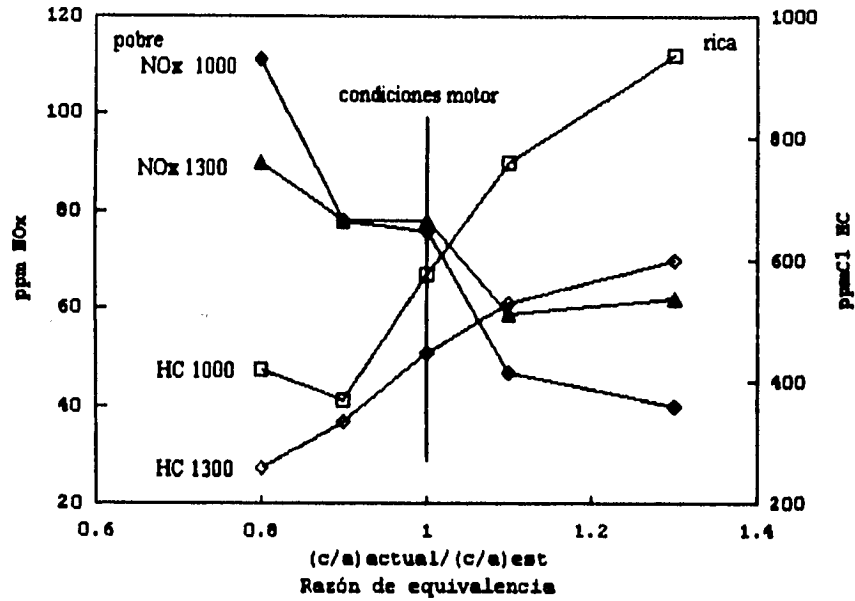
Gráfica 6.7 Emisiones de NOx y HC. V=1000 y 1300 rpm, F=cte, θ=-7, φvar, T(agua)=70°C.

En la figura 6.7 se muestra el comportamiento de las emisiones de NO_x y HC complementada con la 6.8 en donde aparece el CO, las cuales nos muestran que en mezclas pobres hay máximas emisiones de NO_x y mínimas de HC y CO y en ricas las mínimas de NO_x y máximas de HC y CO, podemos comprobar el comportamiento con la figura 4.2. Al comparar ambas curvas de velocidad, se tiene la mayor producción de HC, CO y de NO_x a la velocidad de 1000 rpm, recordando que este punto está cerca de la velocidad de ralentí en donde se tiene mezcla rica.

FACULTAD DE INGENIERIA, UNIH

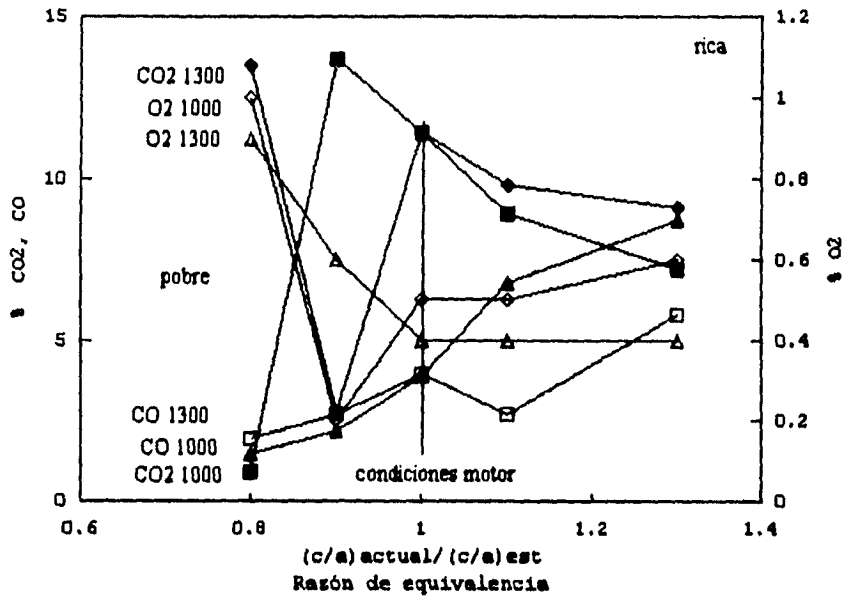
Ángulo	CO2 @ 1100	@ 1500	CO @ 1100	@ 1500	O2 @ 1100	@ 1500
-20	78.7%	87.5%	78.1%	88.8%	185.9%	1875.0%
-15	76.7%	74.1%	75.3%	74.3%	188.4%	918.7%
-10	75.3%	87.4%	72.9%	83.5%	178.5%	775.0%
-7	86.7%	104.8%	88.3%	91.3%	190.9%	0.0%
0	103.7%	101.8%	98.2%	93.7%	0.0%	0.0%
4	104.4%	100.8%	101.1%	94.8%	0.0%	0.0%

6.3 Razón equivalencia variable



Gráfica 6.7 Emisiones de NOx y HC. V=1000 y 1300 rpm, F=cte, $\theta = -7^\circ$, ϕ var, T(agua)=70°C.

En la figura 6.7 se muestra el comportamiento de las emisiones de NO_x y HC complementada con la 6.8 en donde aparece el CO, las cuales nos muestran que en mezclas pobres hay máximas emisiones de NO_x y mínimas de HC y CO y en ricas las mínimas de NO_x y máximas de HC y CO, podemos comprobar el comportamiento con la figura 4.2. Al comparar ambas curvas de velocidad, se tiene la mayor producción de HC, CO y de NO_x a la velocidad de 1000 rpm, recordando que este punto esta cerca de la velocidad de ralenti en donde se tiene mezcla rica.



Gráfica 6.8 Emisiones de CO₂, CO y O₂. V= 1000 y 1300 rpm, F=cte, $\theta = -7$, $\phi = var$, T(agua)= 70 °C.

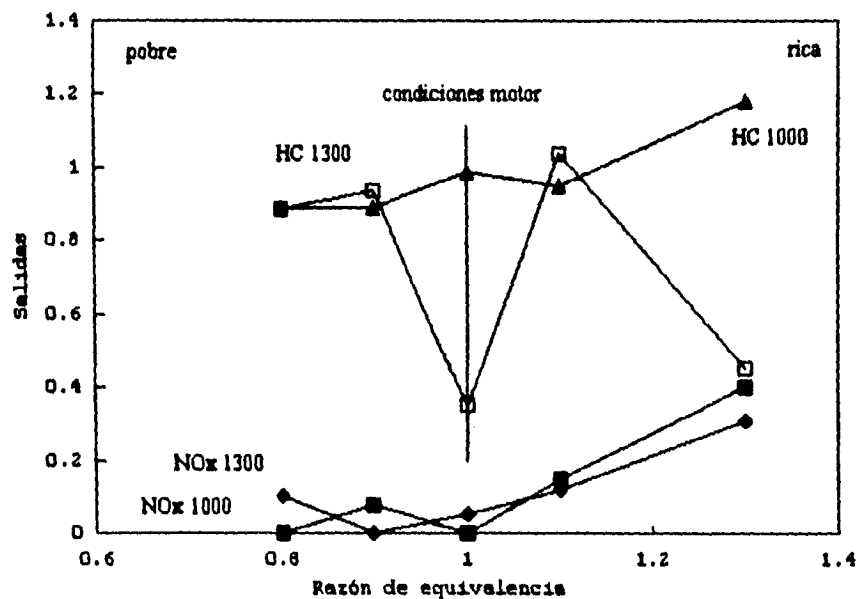
Observando la gráfica 6.8 se aprecia que la producción de CO₂ está fuertemente ligada a la oxidación del CO por medio del O₂.

Reducciones en el catalizador

Como se sabe la ventana de trabajo del catalizador^x es muy cerrada alrededor de la razón de equivalencia igual a uno, por lo que es de esperarse que al tener una mezcla o muy pobre o muy rica baje su rendimiento, por otro lado el rendimiento para la reducción de NO_x del catalizador a lo largo de estos análisis ha sido el

^x ver gráfica de selectividad de un catalizador de platino, capítulo 4, en donde se muestra la eficiencia de conversión.

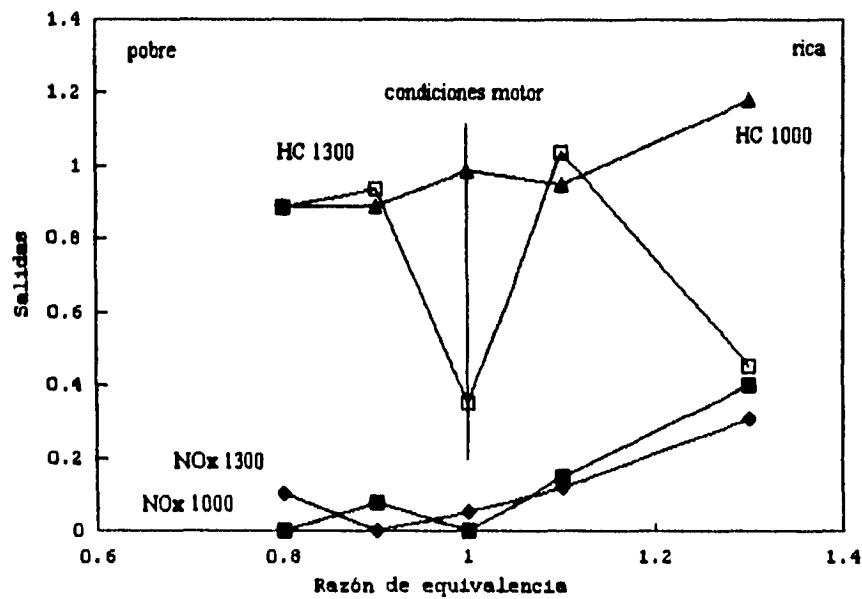
Único que ha estado en alrededor de 1 en todos los casos, es por eso que se tomarán en primera instancia las salidas de NOx para comparar el comportamiento del mismo. Al observar la gráfica 6.9 se comprueba que las salidas más bajas se encuentran cuando la razón de equivalencia es igual a uno. Del lado rico de la mezcla bajan considerablemente las reducciones de NO_x hasta llegar a salidas de 0.4 lo cual es mucho más elevado que cualquier caso anterior; por el lado de mezclas pobres el rendimiento no baja tanto llegando a lo mucho con un 0.1 de salidas de NO_x.



Gráfica 6.9 Salidas en el catalizador de NOx y HC. Variando estequiometría.

Para los HC tenemos salidas menores a uno del lado de mezcla pobre, llegando a la unidad en ϕ 1, para después ser mayor a uno excepto en ϕ 1 para 1300 rpm y ϕ 1.3 para 1100 rpm.

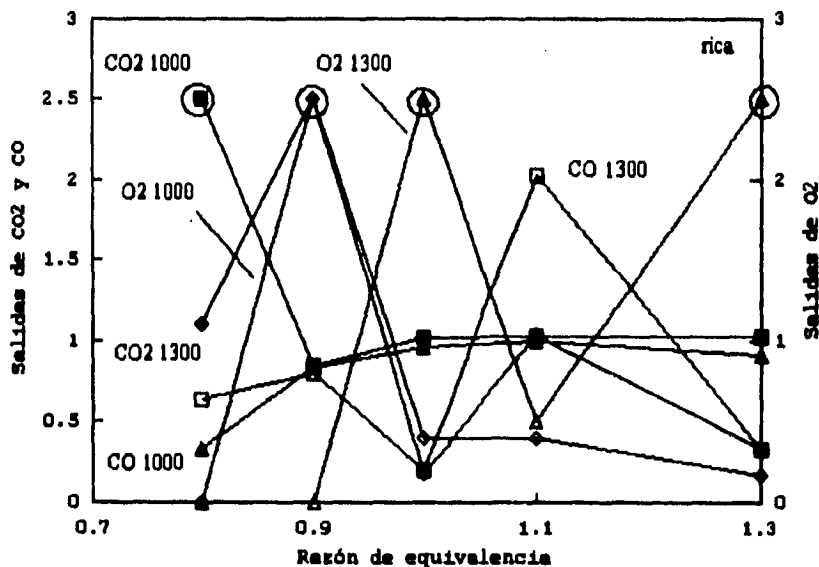
único que ha estado en alrededor de 1 en todos los casos, es por eso que se tomarán en primera instancia las salidas de NO_x para comparar el comportamiento del mismo. Al observar la gráfica 6.9 se comprueba que las salidas más bajas se encuentran cuando la razón de equivalencia es igual a uno. Del lado rico de la mezcla bajan considerablemente las reducciones de NO_x hasta llegar a salidas de 0.4 lo cual es mucho más elevado que cualquier caso anterior; por el lado de mezclas pobres el rendimiento no baja tanto llegando a lo mucho con un 0.1 de salidas de NO_x.



Gráfica 6.9 Salidas en el catalizador de NO_x y HC. Variando estequiometría.

Para los HC tenemos salidas menores a uno del lado de mezcla pobre, llegando a la unidad en $\phi=1$, para después ser mayor a uno excepto en $\phi=1$ para 1300 rpm y $\phi=1.3$ para 1100 rpm.

Al resumir los resultados de la gráfica se tiene que del lado pobre de la razón de equivalencia, las mayores salidas son para los HC a 1000 y 1300 rpm, seguidas de las de NO_x a 1300 y NO_x a 1000. Del lado de la mezcla rica con una salida muy alta tenemos a los HC a 1000, seguidos con los HC a 1300 que sufrieron reducción ya que su salida es de 40% aproximadamente, seguido de los NO_x a 1000 y 1300 respectivamente. Entre los puntos extremos de la mezcla se cruzan varias veces los HC y NO_x entre ellos mismos.

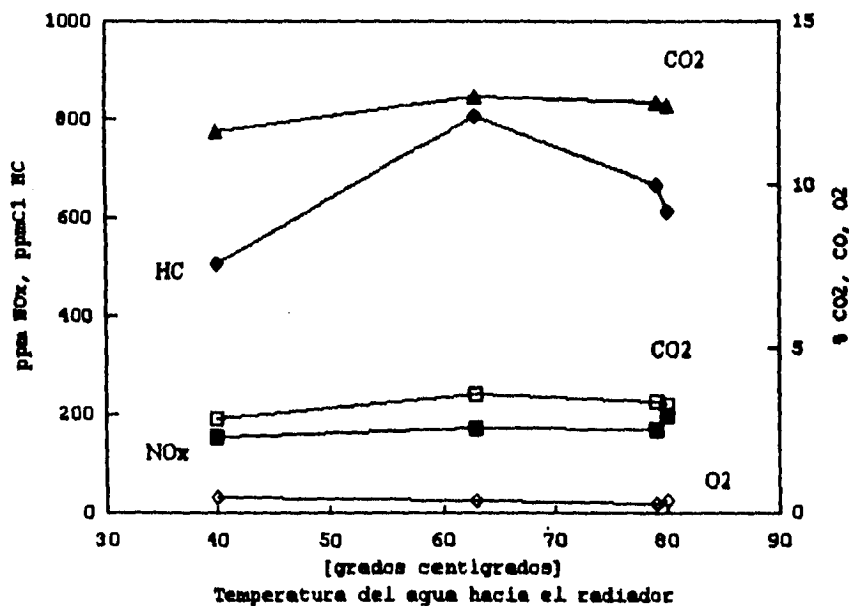


Gráfica 8.10 Salidas de CO_2 , CO y O_2 en el catalizador. Variando estequiometría.

Las salidas para las otras tres emisiones no muestran un comportamiento regular, por lo que resulta difícil el tratar de explicar, de este modo se omite cualquier explicación al respecto, pero se muestra la gráfica para su observación.

6.4 Temperatura de agua variable

Quizá por ser un motor de banco, y anular el mecanismo de intercambio de calor por medio de las corrientes de aire que circulan alrededor del mismo al estar en movimiento, los datos no presentaron mucha variación (gráfica 6.11), ya que las emisiones de NO_x , HC, CO_2 y CO aumentan hasta aproximadamente el punto de 64°C para luego descender. El NO_x , CO_2 y CO lo hacen de una manera suave tanto en la pendiente positiva como en la negativa, los HC lo hacen de manera brusca en ambos lados.



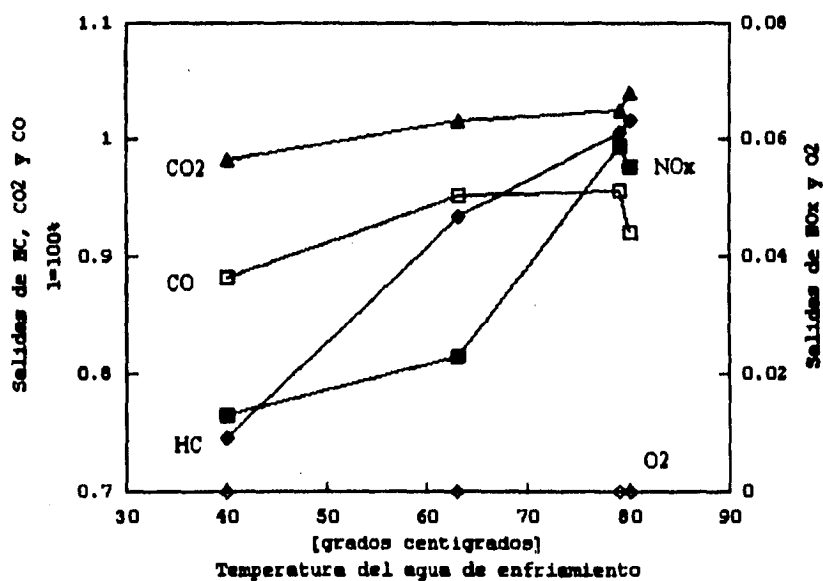
Gráfica 6.11 Emisiones de NO_x , HC, CO_2 , CO y O_2 variando la temperatura del agua.

Ahora bien, el O_2 se comporta de manera inversa al tener pendiente negativa mientras las otras son positivas y viceversa, al que aclarar que sus pendientes son las más suaves, casi cero.

Reducción en el catalizador

Otra vez se demuestra la eficiencia del catalizador para la reducción del NO_x y la máxima utilización del O_2 para las otras oxidaciones, ya que los niveles de reducción de ambos oscilan en la mayoría de los casos en el 100%.

Para los otros tres (CO , HC y CO_2) Solamente hubo dos procesos no deseados, una pequeña reducción de CO_2 a 63°C , y una pequeña producción de HC en 80°C . Fuera de ahí hubo reducciones (o producciones de CO_2) en los demás casos por pequeñas que fueran.



Gráfica 8.12 Salidas de emisiones en el catalizador. Variando temperatura de agua.

FACULTAD DE INGENIERIA, UHAM

Datos numéricos finales

Ts[°]	ppm NOx	ppm C1 HC	CO2	CO	O2
40.00	155	508	11.80	2.88	0.50
83.00	173	806	12.70	3.61	0.40
79.00	170	667	12.50	3.39	0.30
80.00	189	614	12.40	3.28	0.40

SALIDA DE CONTAMINANTES

Ts[°]	NOx	HC	CO2	CO	O2
40.00	1.3%	74.5%	96.3%	88.2%	0.0%
83.00	2.3%	93.4%	101.6%	95.3%	0.0%
79.00	5.9%	100.6%	102.4%	95.6%	0.0%
80.00	5.5%	101.6%	104.0%	92.1%	0.0%

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAH

Datos numéricos finales

T _e [°]	ppm NOx	ppm C1 HC	CO2	CO	O2
40.00	155	508	11.60	2.88	0.50
63.00	173	806	12.70	3.81	0.40
79.00	170	667	12.50	3.39	0.30
80.00	189	614	12.40	3.28	0.40

SALIDA DE CONTAMINANTES

T _e [°]	NOx	HC	CO2	CO	O2
40.00	1.3%	74.5%	98.3%	88.2%	0.0%
63.00	2.3%	93.4%	101.8%	95.3%	0.0%
79.00	5.9%	100.6%	102.4%	95.6%	0.0%
80.00	5.5%	101.6%	104.0%	92.1%	0.0%

6.5 Carga variable

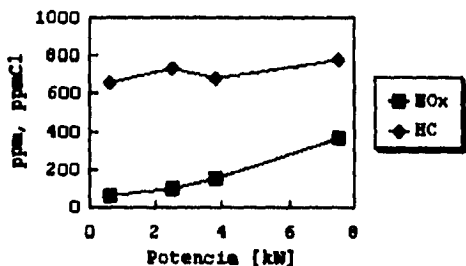
Debido a que en esta prueba no se forzó para que diera valores de carga pre-establecidos, en un primer análisis no se pudieron relacionar las curvas de velocidad a un solo eje de referencia de potencia sin hacer una correlación de ellos, y puesto que esta correlación no es válida para presentar datos experimentales, se muestran como gráficas separadas de velocidad del motor.

Para lograr un análisis mejor, se irán enumerando las característica gráfica por gráfica y al final sacar conclusiones.

NO_x y HC

900 rpm. Conforme aumenta la potencia aumentan los óxidos de nitrógeno desde una

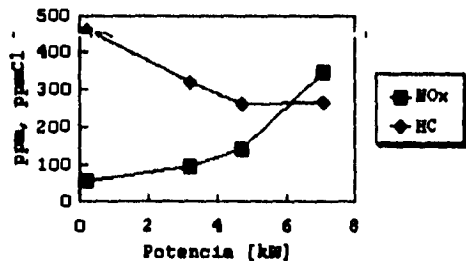
concentración baja, mientras que los HC empiezan con concentraciones muy altas aumentando poco respecto a la potencia hasta llegar a concentraciones ligeramente mayores a las de los óxidos.



900 rpm

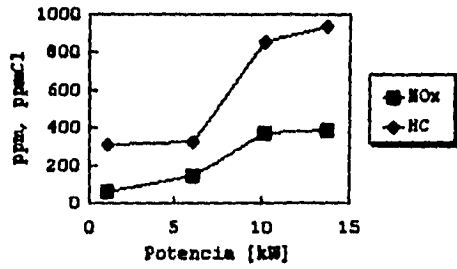
1000 rpm. Los óxidos de nitrógeno tienen el mismo comportamiento y

aproximadamente las mismas concentraciones. Por el lado de HC, su concentración comienza en 100 ppm por abajo de las de 900 rpm y disminuye hasta 4.5 kW en donde se estabilizan las concentraciones hasta 7 kW.



1000 rpm

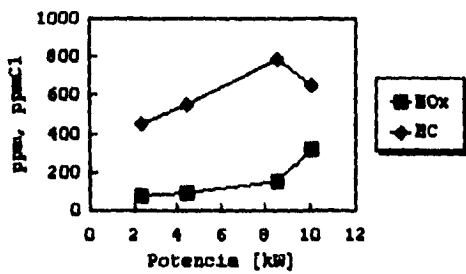
1300 rpm. Los óxidos de nitrógeno repiten su comportamiento y concentraciones



hasta más o menos 8 kW de donde se sigue incrementando hasta 400 ppm en 10 kW, disminuyendo drásticamente su pendiente hasta llegar a 15 kW con \approx 440 ppm. Los HC crecen de modo paralelo con una diferencia de +100 ppm más o menos en su punto más alejado.

1300 rpm

1500 rpm. Aunque hay una caída drástica en las concentraciones de los óxidos de nitrógeno, sigue teniendo el mismo comportamiento llegando a 100 ppm

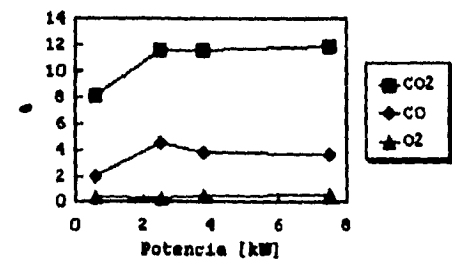


menos en su máxima concentración. Aquí los HC crecen de manera casi lineal desde 2 kW con 200 ppm hasta 8 kW con 400 ppm y de ahí caen hasta 10 kW con 300 ppm.

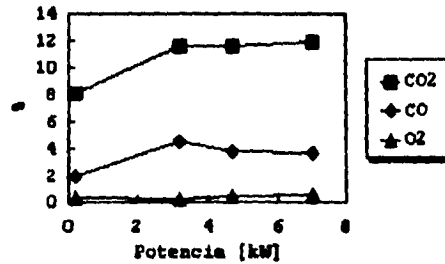
1500 rpm

CO₂, CO, O₂

900 Y 1000 rpm. Las concentraciones de bióxido y monóxido de carbono empiezan a aumentar desde 8 y 2% aproximadamente



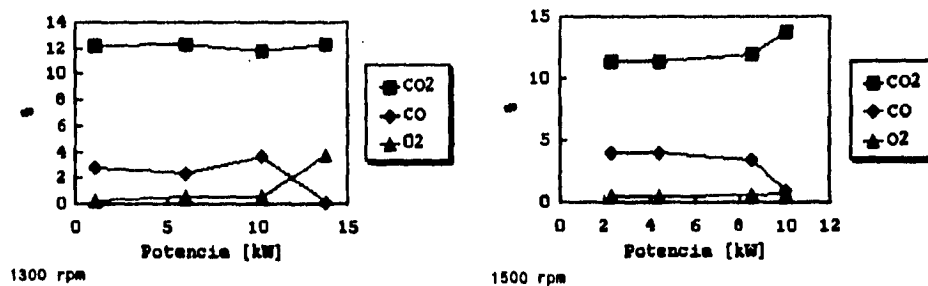
900 rpm



1000 rpm

paralelamente hasta 2.5 kW con 12 y 4.5% respectivamente, mientras la concentración de oxígeno disminuye. A partir de este punto las concentraciones se estabilizan para ambos, aunque para el CO primero hay una pequeña disminución; la de oxígeno se incrementa. De lo anterior se observa la producción de CO₂ a partir de CO y oxígeno.

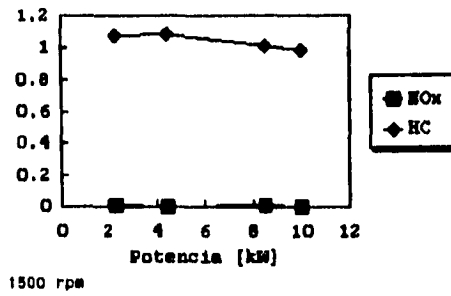
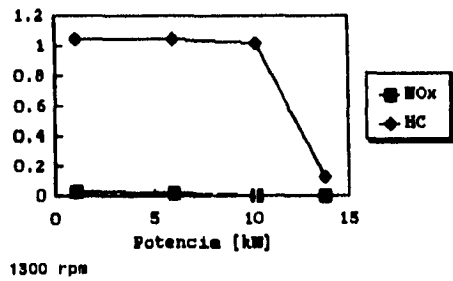
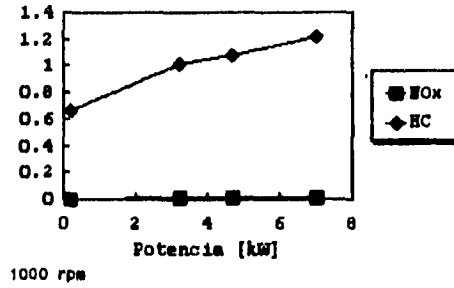
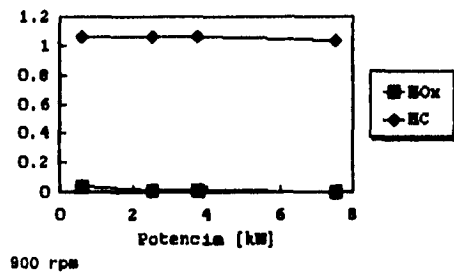
1300 y 1500 rpm. Manteniendo casi constantes sus concentraciones iniciales de 12% CO₂ y 2.8% CO, a partir de 5 kW la primera disminuye y la segunda aumenta, formando las curvas tipo reflejo de espejo, para cambiar de signo de pendiente después de 10 kW. El oxígeno sigue las tendencias del bióxido de carbono aunque su última pendiente es mucho mayor en 1300 rpm, suavizándose en 1500 rpm.



De lo anterior se concluye que: a) la producción de NO_x, CO₂, CO y O₂ tienen tendencias definidas, variando únicamente sus concentraciones iniciales y las pendientes al incrementar la potencia; y b) los HC no tienen un comportamiento definido, aunque se puede asegurar que tienden a subir conforme la potencia.

Reducciones en el catalizador

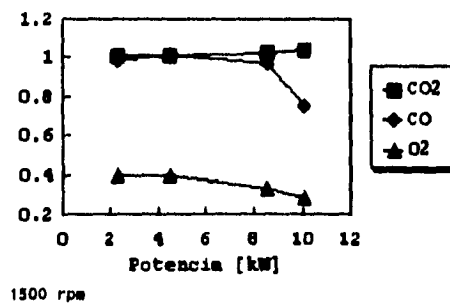
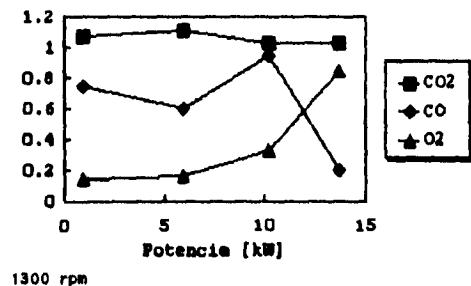
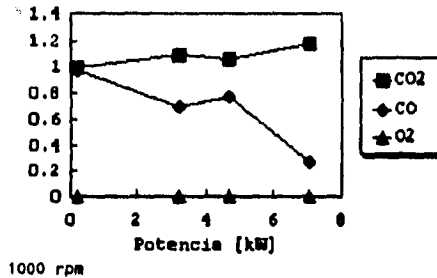
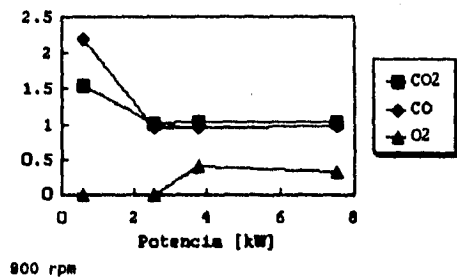
Salidas de NO_x y HC. Para el NO_x , sin importar la potencia o velocidad tenemos reducciones cercanas al 100% por parte del catalizador, por lo que se puede asegurar que el catalizador tiene la capacidad de llevarla a cabo en todo el rango de operación del motor, siempre y cuando esté caliente.



La reducción de HC es mas selectiva ya que por ejemplo en la curva de 900 rpm tenemos salidas casi constantes de HC en alrededor de 105% hasta 4 kW, disminuyendo hasta 100% en 8 kW, mientras que en la de 1000 rpm se tiene una

salida de 60% alrededor de 0 kW y se incrementan de manera gradual hasta 120% con 7 kW. En 1300 rpm vuelven a ser casi constantes en alrededor de 100% desde 1 kW hasta 10 kW cayendo a 10% en 15 kW y si se observa a 1500 rpm volver a repetir constante entre 100 y 110% desde 2 kW y 10 kW. De lo anterior se deduce que a diferentes velocidades hay diferentes condiciones de combustión y por lo tanto producción de hidrocarburos sin quemar, y dependiendo de estos el catalizador tendrá cierta capacidad de reducirlos.

Salidas de CO₂, CO y O₂



FACULTAD DE INGENIERIA, UIAH

En todos los casos se nota una dependencia en la producción de CO₂ a partir del CO y O₂, ya que mientras crecen las salidas de dióxido de carbono en las curvas de 1000, 1300 y 1500 rpm disminuyen las de monóxido de carbono agotando todo el oxígeno en 1000 rpm y dejando remanentes en 1300 y 1500.

En 900 rpm resulto lo contrario, la salida de CO fue mayor a la de CO₂ hasta un poco arriba de 2 kW mientras que se agoto el oxígeno en esa región ya que se trabaja con mezcla rica al estar cerca de la velocidad de ralenti.

hay remanentes de oxígeno y las salidas de CO son más bajas que las de CO₂. Respecto a las salidas de CO₂, CO y O₂ se nota también la gran dependencia que tiene la combustión a la potencia y velocidad del motor en las emisiones y quizá estén involucrados también los tiempos de residencia que tengan las especies para su oxidación en las cámaras del convertidor catalítico.

Datos numéricos finales

Valores de carga variable
900 rpm

W	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
1.0	0.602	58	657	8.10	1.94	0.40
4.2	2.528	100	729	11.80	4.52	0.30
8.3	3.793	150	878	11.60	3.73	0.50
12.5	7.525	368	778	11.90	3.60	0.60

1000 rpm

W	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
0.3	0.201	55	461	8.10	1.94	0.40
4.8	3.211	95	322	11.80	4.52	0.30
7.0	4.682	142	283	11.60	3.73	0.50
10.5	7.023	349	265	11.90	3.60	0.60

1300 rpm

W	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
1.00	1.003	64	314	12.20	2.80	0.20
8.00	8.020	144	331	12.30	2.40	0.60
10.20	10.234	370	855	11.70	3.60	0.60
13.70	13.746	390	941	12.30	0.10	3.80

TESIS DE LICENCIATURA

1500 rpm

W	Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
2.30	2.308	80	449	11.4	4.01	0.5
4.40	4.415	83	553	11.4	3.97	0.5
8.50	8.528	154	784	11.9	3.4	0.6
10.00	10.033	320	645	13.7	0.98	0.7

salidas en el catalizador

Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
0.6	3.5%	106.3%	154.3%	219.6%	0.0%
2.5	1.0%	106.2%	101.7%	95.8%	0.0%
3.8	1.3%	105.8%	103.4%	96.0%	40.0%
7.5	0.5%	103.0%	102.5%	98.1%	33.3%

Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
0.2	0.0%	68.7%	99.2%	97.0%	0.0%
3.2	1.1%	101.0%	108.6%	69.3%	0.0%
4.7	1.6%	108.2%	105.2%	78.7%	0.0%
7.0	1.0%	122.2%	117.7%	28.3%	0.0%

Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
1.0	3.1%	104.6%	107.4%	75.0%	15.0%
6.0	1.8%	104.9%	110.6%	60.0%	16.7%
10.2	0.0%	101.6%	102.6%	94.4%	33.3%
13.7	0.0%	13.3%	102.4%	20.0%	84.2%

Pot	NOx	HC	CO2	CO	O2
2.3	1.3%	107.0%	100.9%	98.8%	40.0%
4.4	0.0%	108.2%	100.9%	101.5%	40.0%
8.5	1.3%	100.5%	102.5%	97.4%	33.3%
10.0	0.3%	98.2%	104.4%	75.5%	28.6%

CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**7.1 Emisiones**

Al observar la tabla 7.1 de emisiones típicas, se nota que:

- en muchas condiciones de operación se sobrepasan los límites de CO y HC.
- tenemos límites aceptables de CO₂ y O₂

Y ya que esta tabla es para vehículos con motor a gasolina, se observa que al utilizar gas LP se generan mayores niveles de emisión para HC y CO, además de que el convertidor catalítico no es capaz de reducir las emisiones de HC, ya que estos llegan en su mayoría como compuestos de metano, el cual como se ha venido mencionando no tan fácil de oxidar catalíticamente.

año	%CO	%CO ₂	ppmC1 HC	NO ₂
1968-1969	menor 4%	mayor 8%	menor 450 ppm	0.1 - 4%
1970-1974	menor 3.5%	mayor 8%	menor 450 ppm	0.1 - 5%
1975-1978	menor 2%	mayor 8%	menor 250 ppm	0.1 - 5%
1979	menor 2%	mayor 8%	menor 220 ppm	0.1 - 5%
1980	menor 1.2%	mayor 8%	menor 220 ppm	0.1 - 5%
1981 y posteriores				
ralenti	menor 1.2%	mayor 8%	menor 220 ppm	0.1 - 5%
2500 rpm	menor 1%	mayor 8%	menor 200 ppm	0.1 - 5%

Respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno, no hay problema con ellas ya que la máxima a la salida del escape se encuentra en 349 ppm y se tiene la ventaja de que el catalizador tiene una eficiencia de casi el 100% en la reducción de estos.

^y Debido a que el KAL no mide NO_x no se tienen las normas para esta emisión.

TESIS DE LICENCIATURA

Con el análisis del capítulo 6 se comprueba que:

1- Al tener bajas velocidades de motor, tenemos máximas emisiones de HC y CO y mínimas de NO_x , y conforme se aumente la velocidad disminuyen HC y CO, aumentando los HC en muy altas velocidades y los NO_x , de forma casi lineal en todo el proceso de aceleración.

2- Conforme se aumente la potencia del motor, aumentan las emisiones de NO_x , HC y CO, aunque este último se estabiliza después de cierta potencia para caer más adelante.

3- El adelantar la chispa afecta de manera mínima a las emisiones de NO_x y CO, mientras que para los HC disminuye su concentración conforme se atrase la misma.

4- En mezclas pobres tenemos máximas emisiones de NO_x y mínimas de HC y CO, mientras que para mezclas ricas máximas de HC y CO, y las mínimas de NO_x .

5- La temperatura de agua de enfriamiento no tuvo mucha influencia en los niveles de emisiones de NO_x , mientras que para los HC y CO fue un poco más marcada.

Si se considera que el convertidor catalítico para un motor con gas LP, solamente es efectivo para la reducción de NO_x y no de HC y CO; lo que se trataría de hacer desde el motor es reducir las emisiones de HC y CO, aunque aumenten las de NO_x , ya que como se ha visto éste puede ser oxidado en todos los casos.

Entonces las condiciones óptimas para el funcionamiento del motor con gas LP y convertidor catalítico son:

- Trabajar con un ángulo de adelanto de chispa menor
- Una razón de equivalencia menor a 1.0, es decir mezcla pobre
- Una mayor temperatura del agua de enfriamiento

Respecto a la carga y velocidad del motor, son parámetros difíciles de controlar ya que un motor de un vehículo tiene variaciones en su funcionamiento y lo único

que se puede recomendar es evitar la velocidad de ralenti de las siguientes maneras:

- No calentar el vehículo por más 30 segundos en la mañana.
- No dejar el motor prendido por tiempos prolongados.

Por último se hacen las siguientes observaciones respecto al convertidor catalítico usado para la experimentación:

- Aunque este dispositivo se compro para gas LP, cabe la posibilidad de que sea para usarse con gasolina, y de ahí su baja eficiencia para HC y CO.
- Se piensa que el dispositivo es pequeño para el motor, y por lo tanto esta trabajando fuera de rango.
- La computadora puede tener una programación deficiente, ya que está importada directamente de los EU, y es difícil que tenga correcciones para México.

7.2 Recomendaciones

Como se sabe, los óxidos de nitrógeno a lo largo del cilindro y el múltiple de escape reaccionan constantemente con el oxígeno e hidrógeno transformándose en NO_2 , NH_3 y otros compuestos de nitrógeno. Lo anterior trae como consecuencia que las mediciones de NO_x no se realizan de una manera correcta, para minimizar lo anterior se muestran las siguientes recomendaciones para el muestreo de gases de escape en donde se desea medir emisiones de NO_x^B :

- La sonda debe ser de acero inoxidable con refrigeración por medio de agua o en su defecto hecha de cuarzo.
- Filtro de vidrio precalentado con entradas de cuarzo (110°C).

TESIS DE LICENCIATURA

- Línea de muestreo de teflón precalentada (110°C).
- Convertidor de NO_x (NO_2 a NO)
- Trampa de agua en miniatura en forma de espiral y de acero inoxidable.

Respecto al gas para quemar este debe ser de carburación, ya que este entra en estado líquido al motor y no de vapor como el convencional, asegurando de este modo el gasto adecuado del mismo para llevar a máximas condiciones de funcionamiento el motor.

Se recomienda también el caracterizar el convertidor catalítico a diferentes temperaturas de operación, para así obtener sus curvas de operación.

REFERENCIAS

- [1.] Ochoa Reyes, Alfonso; Hurtado Ruiz, Rodolfo: Tesis "Sistema Dual Gas-Gasolina Para un Motor de Combustión Interna"
- [2.] Riveros, H.; López, V.: Emisiones Contaminantes en Motores de Gasolina
- [3.] Heywood, John B.: "Internal Combustion Engine Fundamentals," Mc Graw Hill, Singapore 1988
- [4.] Bowman, C. T.: "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion," Prog Energy Combust. SCI., vol 1, pp 33-45, 1975
- [5.] referencia 1 capítulo 11
- [6.] referencia 1, página 574
- [7.] Manual de operación del Analizador para 4 gases por medio de Infrarrojos, KAL Equipe, modelo 4650
- [8.] Evans, Alison B.; Pont, Jennifer N.; Moyeda, David K.; England, Glenn C.: EMISSIONS SAMPLING PROTOCOL FOR MEASURING NO/NOx IN THE PRESENCE OF HIGH CONCENTRATIONS OF NO2, Energy and Environmental Research Corporation, 18 Mason, Irvine, California 92718

APÉNDICE A

NOHENCLATURA

a/c: relación másica aire combustible
 ATC: Después del punto muerto superior (After top center)
 CO: monóxido de carbono
 CO₂: dióxido de carbono
 C₃H₈: propano
 EGR: Gases de escape recirculados (Exhaust gas recirculated)
 HC: hidrocarburos
 MEP: Motor de encendido provocado, Motor encendido por chispa
 NO: óxido nítrico
 NO_x: óxidos de nitrógeno (NO + NO₂)
 NO₂: dióxido de nitrógeno
 %x: porcentaje volumétrico de la especie en el volumen de control
 PMS: punto muerto superior del pistón dentro del cilindro. Cambio de dirección lineal del pistón entre la carrera de compresión y expansión
 ppm: partes por millón volumétrica de la especie (% E⁻⁶)
 ppmC₁: partes por millón contando especies de hidrocarburos tipo C₁H_x
 θ: ángulo de avance de la chispa [grados del cigüeñal antes de PMS]
 φ: relación estequiométrica. $(C/A)_{\text{actual}} / (C/A)_{\text{estequiométrica}}$

APENDICE B

HIDROCARBUROS

Alcano: Cadena abierta de hidrocarburos en el cual todos los enlaces carbono-carbono son enlaces sencillos, su fórmula general es C_nH_{2n+2} . El más sencillo es el metano CH_4 .

Alcohol: Derivado de un alcano en el cual el grupo hidróxilo (OH) reemplaza a un átomo de hidrógeno.

Aldehído: Un compuesto que tiene un carbono con doble enlace con el oxígeno y enlaces sencillos con un radical y con el hidrógeno.

Alqueno (olefinas): Hidrocarburo de cadena abierta que contiene un doble enlace carbono-carbono, su fórmula es C_nH_{2n} . El más sencillo es el eteno o etileno C_2H_4 .

Alquino (acetilénica): Son las moléculas que tienen triple enlace carbono-carbono, su fórmula general es C_nH_{2n-2} . El primer miembro de esta serie es el etino o acetileno: C_2H_2 .

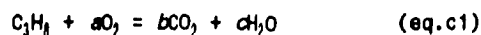
Cetona: Compuesto carbonilo, con un enlace doble para el oxígeno y dos sencillos para los radicales.

Compuesto aromático: Compuestos que tienen estructuras basadas en el benceno (C_6H_6).

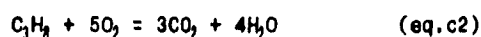
Compuesto carbonilo: Un átomo con un doble enlace con oxígeno.

ESTEQUIOMETRÍA

Si se dispone de suficiente oxígeno, el combustible de hidrocarburo puede ser oxidado completamente. El carbono del combustible se oxida para formar dióxido de carbono, CO_2 , y el hidrógeno para formar agua H_2O . Consideremos la ecuación química general para la combustión completa de una mol de propano C_3H_8 :

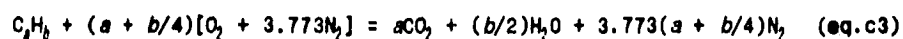


Un balance entre los reactivos y productos nos da para $b=3$. Para el hidrógeno tenemos $2c=8$ ó $c=4$. Por último para el oxígeno $2b + c = 10 = 2a$, ó $a=5$, es por lo anterior que (eq.c1) se transforma en:



La ecuación (eq.c2) nos muestra la composición elemental de los reactivos y productos, de ninguna manera nos describe el proceso de combustión.

El aire contiene nitrógeno, el cual a bajas temperaturas y presiones no es afectado de manera significativa por la reacción. Considerando la combustión completa de un hidrocarburo en general de una composición molecular promedio C_xH_y con aire. La ecuación general de combustión completa es:



La ecuación anterior define las proporciones estequiométricas de combustible y aire, en donde hay el oxígeno suficiente para oxidar todo el combustible en los productos. Por otro lado la composición del combustible se puede escribir como CH_y de donde $y=b/a$.

La relación estequiométrica combustible/aire o aire/combustible depende de la composición de combustible, entonces de la ecuación (eq.c3):

$$\left(\frac{a}{C}\right)_a = \left(\frac{C}{a}\right)_a^{-1} = \frac{(1-y/4)(32+3.773(28.16))}{12.011+1.008y} = \frac{34.56(4y)}{12.011+1.008y} \quad (\text{eq.c4})$$

Los pesos moleculares del oxígeno, nitrógeno atmosférico, carbono atómico e hidrógeno atómico son: 32, 28.16, 12.011, y 1.008 respectivamente. $(a/c)_y$ depende únicamente de y .

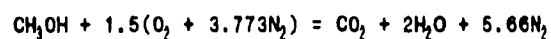
La razón de equivalencia combustible aire se define como:

$$\phi = \frac{(c/a)_{\text{actual}}}{(c/a)_{\text{estequiométrico}}}$$

y tenemos que:

para mezclas pobres: $\phi < 1$
 para mezclas estequiométricas $\phi = 1$
 para mezclas ricas $\phi > 1$

Para combustibles oxigenados, el procedimiento para determinar la combustión es el mismo excepto que el combustible oxigenado es incluido en el balance entre reactivos y productos. Para el metil-alcohol (metanol), CH_3OH , la ecuación de combustión estequiométrica es:



CALCULOS PARA EL COMBUSTIBLE EN LA EXPERIMENTACIÓN

Composición del gas LP del laboratorio de máquinas térmicas. El análisis se hizo en el Instituto Mexicano del Petróleo, por medio de un cromatógrafo de gases, resultando en la siguiente composición:

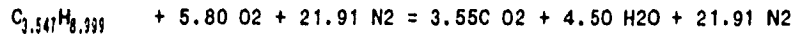
Componentes	% MOL	Composición molar		Proporción molar	
		C	H	%C	%H
metano	0.01	1	4	0.0001	0.0004
etano	0.57	2	6	0.0114	0.0342
propano	45.59	3	8	1.3677	3.6472
propileno	0.58	3	6	0.0174	0.0348
iso butano	14.56	4	10	0.5824	1.456

TESIS DE LICENCIATURA

n butano	32.63	4	10	1.3052	3.263
buteno 1	1.16	4	8	0.0464	0.0928
iso butileno	0.72	4	8	0.0288	0.0576
trans buteno	1.33	4	8	0.0532	0.1064
iso pentano	1.38	5	12	0.069	0.1656
cis buteno	0.87	4	8	0.0348	0.0696
n pentano	0.44	5	12	0.022	0.0528
1-3 butadieno	0.03	4	6	0.0012	0.0018
pentano 1	0.02	5	12	0.001	0.0024
metil butano	0.01	4	10	0.0004	0.001
metil pentano	0.02	5	12	0.001	0.0024
hexano	0.08	6	14	0.005	0.0111
Total	100			3.5468	8.9992

El combustible equivalente es: $C_{3.5468}H_{8.9992}$

Sustituyendo los valores en la ecuación (eq.c3) tenemos:



Balance especies

$$\begin{aligned} C &= 3.55 = C \\ H &= 9.00 = H \\ O_2 &= 5.80 = O_2 \\ N_2 &= 21.91 = N_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= 2.53727303484831397 \\ (A/F) &= 17.3537257918701691 \\ (F/A) &= 0.0576245131445189453 \end{aligned}$$

APENDICE D

ESPECIFICACIONES DEL BACHARACH 300 NSX

GENERALES:

Dimensiones: Estuche - 45.7 x 35.6 x 20.3 cm

Sonda - 29.2 cm x 1/8 pulg

Manguera - 6.7 m

Peso: 6.8 kg

Materiales: Cubierta gris medio de HPDE; interruptores en membrana de policarbonato; sonda de acero inoxidable.

Alimentación: 120/240 VAC, 50/60 Hz.

Intervalo de calibración: 60 segundos

Condiciones de almacenamiento: -20 a 50°C. Humedad relativa de 0 a 100%

Condiciones de operación: 0 a 40°C. Humedad relativa de 0 a 99%, sin condensación.

Flujo de muestreo de gas: 0.7 a 1.5 litros por minuto.

LÍMITES DE TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE LA SONDA

38-538°C Ilimitado
538-649°C 30 minutos por exposición
649-760°C 10 minutos por exposición

PRECISIÓN (20°C, 45% de humedad relativa)

Temperatura: ± 1% a escala completa.

Oxígeno: ± 0.6 % O₂

Monóxido de carbono: ± 10% de la lectura ó ± 10 ppm, el que resulte mayor.

TESIS DE LICENCIATURA

FUNCIONES

Mediciones directas y lecturas:

- Temperatura hasta 760°C.
- Nivel de monóxido de carbono:
0-3900 ppm en el rango de 0 a 40°C,
0-4000 ppm a 22°C
- Nivel de oxígeno de 0.1 hasta por lo menos 23.5%
- Salida del sensor de oxígeno en milivolts.

Cálculos y lecturas:

- Eficiencia de la combustión: 1 al 99.9%
- Pérdidas: 1 al 99.9%
- Nivel de dióxido de carbono: 1 al 20%
- Exceso de aire: 1 al 250%

Lecturas adicionales:

- Combustible seleccionado:

- | | |
|------|------------------------------|
| NGAS | - Gas natural |
| OIL2 | - Combustible de petróleo #2 |
| OIL6 | - Combustible de petróleo #6 |
| LPG | - Propano líquido |
| COAL | - Carbón |
| WOOD | - Madera (17% de humedad) |
| BAGA | - Bagaso |

- Errores o alarmas del analizador:

- | | |
|------|-------------------------------------------------|
| OK | - Reporte de NO-ERROR o alarmas |
| W*CO | - Alarma del canal de CO |
| E*O2 | - Error en el canal de oxígeno |
| E*TC | - Error en el canal del termocople |
| E*AM | - Error en el canal de temperatura ambiente |
| OR/A | - Sensor de temperatura ambiente fuera de rango |
| OR/T | - Termocople fuera de rango |
| OR/C | - Sensor de CO fuera de rango |
| OR/O | - Sensor de O ₂ fuera de rango |

APENDICE D.2

**ESPECIFICACIONES DEL COMPLEMENTO PARA LA
MEDICIÓN DE NO_x Y SO₂ DEL BACHARACH 300 NSX**

GASES DETECTADOS

además de CO y O₂: NO_x y SO₂

PRECISIÓN

NO_x - ± 5% de la lectura o ± 10 ppm, la que resulte mayor.

SO₂ - ± 5% de la lectura o ± 10 ppm, la que resulte mayor.

FUNCIONES

Lecturas adicionales:

Tiempo: Horas y minutos, en formato seleccionable de 12 ó 24 horas.

Niveles de NO_x y SO₂:

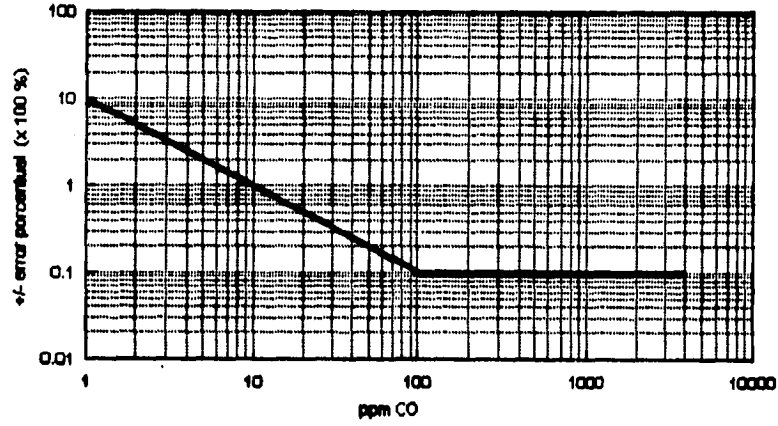
- Nivel de NO_x de 0 a 1999 ppm
- Nivel de SO₂ de 0 a 1999 ppm

Mensajes de alarmas, fallas y errores:

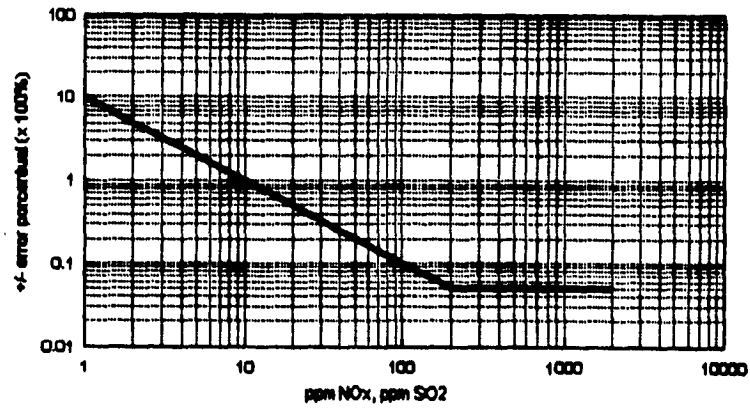
LOW BATT	-Baterías de la polarización del sensor de NO _x bajas
BATT FAIL	-Baterías muertas de la polarización del sensor de NO _x
W*NO	-Sensor de NO _x fuera de calibración
W*SO	-Sensor de SO ₂ fuera de calibración
E*NO	Falla del sensor de NO _x
E*SO	Falla del sensor de SO ₂
****	Batería del modulo del reloj muerta

Curvas de precisión del BACHARACH 300 NSX

Curva de precisión para CO
BACHARACH 300 NSX



Curva de precisión para NOx y SO2
BACHARACH 300 NSX



APENDICE E

**ESPECIFICACIONES DEL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN PCB
PIEZOTRONICS, MONTADO EN BUJÍA.**

Modelo:		111A24	
Sensibilidad:	mV/Psi	5 ± 0.5	
Resolución:	Psi	0.04	
Frecuencia de resonancia:	KHz	400	
Constante de tiempo:	seg	100	
Frecuencia baja, -5%	Hz	0.005	
Linealidad	%FS	2	
Rango a escala completa, 5 V out	Psi	1,000	
Rango para salida de 10 volts	Psi	24,000	
Presión Máxima	Psi	10,000	
Impedancia de salida	ohms	100	
Voltaje de polarización de salida 32		Volts, nom	11
Vibración, pico, máx.	± G	2,000	
Instantanea máxima	G	20,000	
Sensibilidad a la aceleración	Psi/G	0.002	
Rango de temperatura	°F	-100 a +275	
Sensibilidad de temperatura	%/°F	0.03	
Temperatura instantanea, máxima	°F	3,000	
Material de la cubierta	Acero inoxidable 17-4 PH		
Material del diafragma	Invar		
Peso, con conector completo	gm	6	
Conector	10-32 Microdot, coaxial		
Fuente de Poder	volts	18 @ 24, 30 máx.	
Corriente suministrada	mA	2-20 mA a través de un diodo limitador de corriente (o circuito equivalente). No +20 mA	

APENDICE F
VARIOS

F.1 Especificaciones del motor

Marca:	Ford
Número de cilindros:	8 en v
Carrera, pulg (mm):	3 (76.2)
Diámetro, pulg (mm):	4 (101.6)
Desplazamiento pulg ³ , (lt):	302 (4.942)
Potencia, HP @ rpm	130 @ 3600
Relación de compresión:	8.4

F.2 Especificaciones del KAL equipo

Mediciones:
%CO (0.00 a 9.99%)
%CO₂ (0.0 a 20%)
ppmC1 HC (0 a 1999 ppmC1)
%O₂ (0.0 a 25%)

APÉNDICE G

CÁLCULO DE LA RAZÓN DE EQUIVALENCIA

Calculos con el gas LP

	C:	H:
Hidrocarburo equivalente	3.5468	8.9992
Peso molecular elementos	12.01115	1.00797
Peso Molecular especie	51.672070444	
Formula de gas ideal	p=rRT	
Constante universal gases	8.3143	kJ/kgmol K
Const. Particular Gas LP	0.1609051	kJ/kgmol K
Presión de la línea de Gas	0.3	kg/cm ²
	29419.95	Pa
Presión absoluta	107494.9932 Pa	

Propiedades del aire

Densidad del aire	r=p/RT	kg/m ³
Presión "p" del D.F.	78075.0432	Pa
Constante universal aire	0.28702661	kJ/kg K

Estequiometría de la combustión

Rel molar COMBUSTIBLE/AIRE	0.05762	kgc/ kga
	17.35	kga/kgc

Datos de entrada y primeros calculos

1000 rpm	F= 1.5 kgf					
VI	VII	T	Vol i	Vol f	Tiempo	Gv
volts		K	m ³	m ³	min,seg	m ³ /s
0.25	0.28	290.55	33.80	33.87	3:26.17	0.00030072

TESIS DE LICENCIATURA

Calculos finales

V1	V2	Q1	Q2	Qtota1	ρ_{aire}	m aire	ρ_{LP}	m LP	mLP/ma
m/s		m ³ /s		m ³ /s	kg/m ³	kg/s	kg/m ³	kg/s	
1.25	1.40	0.00070	0.00134	0.93620	1.3E-03	2.299	0.00089	0.0462	.80

Para la condición extrema $\phi = 0.80$, mezcla pobre

BIBLIOGRAFÍA

Libros

FUNDAMENTALS OF AIR POLLUTION ENGINEERING

Richard C. Flagan, John H. Seinfeld

Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1988

INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS

John B. Heywood

Mc. Graw Hill

INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Colin R. Ferguson

John Wiley & Sons, Singapore 1985

QUIMICA

Charles E. Mortimer

Grupo Editorial Iberoamérica, México 1983

TERMODINÁMICA

Kenneth Wark, Jr.

Mc Graw Hill, México 1990

Artículos

CATALISTS IN AUTOMOBILES: A HISTORY

Michael L. Church, Barry J. Cooper, Phillip J. Willson

Automotive Engineering, Junio 1989, vol 97, número 6, pags. 69-75

CONVOCATORIA PARA EXENTAR A LAS FLOTILLAS DE CARGA DEL PROGRAMA "HOY NO CIRCULA"
CUANDO EMPLEEN GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE Y LAS UNIDADES NO REBASEN UN PESO
BRUTO VEHICULAR DE 5 500 KG.

TESIS DE LICENCIATURA

DDF

PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-034-SCFI-1993 INSTALACIÓN DE EQUIPO DE CARBURACIÓN A GAS LP EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA (REVISIÓN A LA NMX-D-179-CT-1981)

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial

12 de noviembre de 1993, México D.F.

MODEL FOR NITRIC-OXIDE FORMATION IN A LARGE BORE SPARK GAS ENGINE

R.P. Wilson *et al.*

Society of Automotive engineers, Inc.

400 Commonwealth Drive

Warrendale, Pennsylvania 15096

EMISSIONS SAMPLING PROTOCOL FOR MEASURING NO/NO_x IN PRESENCE OF HIGH CONCENTRATIONS OF NO_x

Alison B. Evans, Jennifer N. Pont, David K. Moyeda, Glenn C. England

Energy and Environment Research Corporation

18 Mason

Irvine, California 92718

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF NITRIC OXIDE FORMATION IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

George A. Lavoie, John B. Heywood, James C. Keck

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

COMBUSTION AND THE ENVIRONMENT

Ian M. Kennedy

Course of University of Davies.

REMOVAL OF NO_x POLLUTANT BY CATALYTIC COMBUSTION REACTIONS

F. Solymost, J. Kiss

Gas Kinetics Research Group, The University, Szeged, Hungary

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

POLLUTANT FORMATION AND CONTROL IN SAPRK IGNITION ENGINES

John B. Heywood

MIT

SIMULACIÓN NÚMÉRICA DE LA FORMACIÓN DE NO EN UN MOTOR A GAS LP

Gerardo Luyando, Eduardo López, Esteban Barrios

Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, Coyoacan 04510, México D.F.

Carlos Emilio Romero

Instituto de Ingeniería