

163  
2es-

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA



“CARBURACION OXIGENADA: UN METODO PARA  
REDUCIR EMISIONES EN UN MOTOR DE  
COMBUSTION INTERNA A GASOLINA”

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO  
ELECTRICISTA  
(AREA MECANICA)**  
P R E S E N T A :  
**EDGAR VILLASEÑOR FRANCO**

DIRECTOR: M.I. ESTEBAN BARRIOS BONILLA.

MEXICO, D. F.

1998



**FALLA DE ORIGEN**

267416.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

Este trabajo está dedicado a mis padres, Rosendo Villaseñor y Felicitas Franco, por todo el apoyo que me brindaron a cada momento, especialmente en los instantes en que más lo necesité.

A Miriam, porque siempre fuiste mi inspiración y mi punto de equilibrio (123').

A mis hermanos: Raúl, Alma, Hugo y los demás, por apoyarme cuando tuve la necesidad, y por estar conmigo siempre.

A Javier e Iván, mis grandes hermanos.

A Carlos, Oscar, Genaro, Adriana, Mauricio, Beatriz, Gilberto, Francisco, etc., de lo mejor de mi paso por la Facultad.

A Alejandro Montejo, Dirk, Victor Hugo, Claudia, Magnolia, Patricia, y a todos aquellos que me brindaron asesoría cuando la necesité.

A todos aquellos que no menciono por olvido, pero que me apoyaron de alguna u otra manera.

**Agradecimientos:**

Al M.I. Esteban Barrios, director de esta tesis, por haber confiado en mí, por su paciencia y gran apoyo brindado.

Al Dr. Rogelio González Oropeza por las facilidades brindadas en la utilización del motor y el Laboratorio de Control de Emisiones de esta Facultad y por sus consejos aportados.

Al M.I. Vicente López, al Ing. Armando Maldonado y al Ing. Javier García O. y en general al Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental, por sus enseñanzas y apoyo brindado.

Al Dr. Víctor Rodríguez Padilla, por su apoyo y consejos en este tiempo de duda y preocupación.

Al Ing. Ubaldo Márquez Amador, por las facilidades brindadas en las facilidades brindadas por el préstamo del tanque de oxígeno.

A Marco, Toño, Chuy, Paco y todos los compañeros y técnicos del laboratorio que me ayudaron en todo momento que lo necesité, además de su experiencia compartida.

A la Facultad de Ingeniería, donde viví los mejores años de mi vida...

México, D.F. noviembre de 1998

# INDICE

	Página
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES.	5
Conceptos involucrados en el rendimiento de este sistema.	5
1.1. Eficiencia volumétrica.	5
1.2. Presión media efectiva (PME).	5
1.3. Eficiencia térmica.	6
1.4. Trabajo neto.	6
1.5. Combustibles.	7
1.5.1. Parafina (alcanos).	7
1.5.2. Olefinas (alquenos).	8
1.5.3. Diolefinas.	8
1.5.4. Naftenos.	8
1.5.5. Aromáticos.	9
1.5.6. Naftalenos.	9
1.5.7. Isómeros.	9
1.5.8. Combustibles gaseosos.	9
1.5.9. Gasolinas y Diesel.	10
1.5.10. Alcoholes.	10
1.6. Propiedades de los combustibles.	
1.6.1. Poder calorífico.	10
1.6.2. Volatilidad.	11
1.6.3. Inflamabilidad.	11
1.6.4. Poder antidetonante (octanaje).	12
1.7. Combustión.	12
1.8. Composición del aire.	13
1.9. Combustión estequiométrica.	14
1.10. Relación aire/combustible.	15
1.11. Exceso y deficiencia de aire.	15
1.12. Relación de equivalencia aire/combustible.	16

1.13.	Procesos de combustión reales.	16
1.14.	Entalpía de formación.	17
1.15.	Balance de energía para mezclas reactivas en estado estable.	18
1.16.	Temperatura de flama adiabática.	18
1.17.	Carburación.	19
1.18.	Carburación oxigenada.	19
1.19.	Carburadores.	20
	<b>CAPÍTULO II. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.</b>	<b>25</b>
2.1.	Contaminación en la Ciudad de México.	25
2.2.	Contaminantes atmosféricos.	26
2.2.1.	Efectos de los contaminantes en la salud.	
2.2.1.1.	Óxidos de azufre.	27
2.2.1.2.	Compuestos de carbono.	
2.2.1.2.1.	Óxidos de carbono.	27
2.2.1.2.2.	Hidrocarburos y aldehídos.	28
2.2.1.3.	Oxidantes fotoquímicos.	
2.2.1.3.1.	Ozono.	29
2.2.1.3.2.	Nitratos de peroxiacilo.	29
2.2.1.4.	Contaminantes minerales diversos.	
2.2.1.4.1.	Plomo.	30
2.2.1.5.	Partículas en suspensión.	30
2.2.1.6.	Óxidos de nitrógeno.	30
2.3.	Límites permitidos de contaminantes atmosféricos.	31
2.4.	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).	32
2.5.	Situación Ambiental en la Ciudad de México.	34
2.6.	Mecanismos de formación de los óxidos de nitrógeno.	
2.6.1.	Óxido nítrico (NO).	35
2.6.2.	Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).	40
2.6.3.	Formación de NO en motores de combustión interna a gasolina.	42
	<b>CAPÍTULO III. MEDIDAS Y MÉTODOS EMPLEADOS PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES.</b>	<b>45</b>
3.1.	Métodos de medición de óxidos de nitrógeno.	
3.1.1.	Métodos manuales para NO y NO <sub>2</sub> .	45

3.1.2.	Métodos de monitoreo continuo para NO y NO <sub>2</sub> .	48
3.2.	Análisis de Orsat.	49
3.3.	Control de Emisiones vehiculares en la Ciudad de México.	49
3.3.1.	Mejoramiento en calidad ambiental debido a combustibles.	50
3.3.2.	Más y mejor transporte colectivo y vehículos ambientalmente limpios.	50
3.3.3.	Modernización Industrial y Control de Emisiones.	51
3.3.4.	Restauración Ambiental del valle de México.	51
3.3.5.	Investigación, Educación y Participación Ciudadana.	51
3.4.	Equipos usados para reducir contaminantes.	
3.4.1.	Convertidores catalíticos.	52
3.4.2.	Catalizadores de tres vías.	54
3.4.3.	Convertidores térmicos.	55
3.5.	Dispositivos para la reducción de óxidos de nitrógeno.	
3.5.1.	Recirculación de gases de escape (EGR- Exhaust Gas Recirculation).	55
3.5.2.	Reactores catalíticos para NO <sub>x</sub> .	57
3.5.3.	Variación de la relación aire/combustible.	58
3.5.4.	Modificando el avance.	59
3.5.5.	Modificación de la relación de compresión.	60
3.6.	Carburación oxigenada.	60
CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN NUMÉRICA.		63
CAPÍTULO V. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS Y ANÁLISIS.		66
5.1.	Descripción del equipo utilizado para las pruebas.	
5.1.1.	Motor Volkswagen.	66
5.1.2.	Dinamómetro Clayton.	67
5.1.3.	Rotámetro (medidor de flujo).	68
5.1.4.	Tanque de oxígeno Infra.	69
5.1.5.	Ventilador para enfriamiento EVISA.	69
5.1.6.	Analizador de emisiones AVL.	70
5.2.	Procedimiento para la realización de pruebas.	71
5.3.	Resultados obtenidos en las pruebas.	74
-	Tablas 5.1 a 5.5. con resultados de las pruebas al inyectar oxígeno al motor.	77
-	Tablas 5.6 a 5.10. con promedios de los resultados obtenidos.	82

- Figuras 5.11. a 5.17. Comportamiento de emisiones y parámetros graficados contra el torque para los distintos valores del oxígeno inyectado.	83
5.4. Análisis de los resultados.	84
5.5. Adimensionalización de variables.	96
- Tablas 5.11 a 5.15. con los parámetros calculados a partir de las pruebas, incluyendo la eficiencia volumétrica y los números adimensionales $\Pi_1$ y $\Pi_2$ .	98
- Figuras 5.18. a 5.24. Comportamiento de emisiones y parámetros graficados contra el número adimensional $\Pi_1$ , que muestra la relación oxígeno/combustible real contra la estequiométrica.	99
- Figuras 5.25. a 5.29. Comportamiento de emisiones graficados contra el número adimensional $\Pi_2$ , que representa la relación de temperatura	113
- Figura 5.30. Gasto de combustible contra potencia al freno.	121
- Figura 5.31. Consumo específico de combustible contra potencia media efectiva al freno.	123
- Figura 5.32. Comportamiento de la eficiencia volumétrica contra el torque.	125
 CONCLUSIONES.	 128
 APÉNDICE A. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.	 132
 APÉNDICE B. LISTA DE SÍMBOLOS, SUBÍNDICES Y ABREVIATURAS.	 139
 APÉNDICE C. MÉTODO DE LOS DIECIOCHO PASOS PARA MEDICIÓN DE EMISIONES DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO.	 143
 BIBLIOGRAFÍA.	 145

# INTRODUCCIÓN.

La contaminación atmosférica en la ciudad de México es un problema que día con día se agrava debido, entre otras cosas, al aumento desmedido de la población, y como consecuencia de esto, al aumento de la industrialización y modernización. Cotidianamente aumenta el número de vehículos que circulan por nuestra ciudad trayendo como consecuencia un incremento en las emisiones contaminantes enviadas a la atmósfera. Por lo mismo se han creado infinidad de programas de combate a la contaminación, así como innovaciones técnicas que han permitido la reducción de emisiones.

Sin embargo todo esto no es suficiente, ya que la contaminación es un problema que crece paulatinamente y por lo mismo, todo lo que se hace para combatirla es bueno pero no suficiente, por lo que constantemente se tiene que seguir trabajando en la creación de nuevas técnicas que ayuden a prevenirla y combatirla, intentando llegar definitivamente a la erradicación de este mal que nos afecta e involucra a todos.

Las emisiones en los vehículos automotores son una fuente importante que contribuye ampliamente a contaminar la atmósfera, por lo que su reducción es muy importante para el combate a la contaminación. La combustión es el proceso en el cual se suministra un combustible y éste reacciona al mezclarse con un comburente, quemándose el primero. Pero desafortunadamente este proceso, que se usa para que el vehículo tenga movimiento, produce compuestos, la mayoría de los cuales afectan la concentración natural de la atmósfera, es decir, son contaminantes. Algunos de estos son los óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), etc.

El proceso normal de combustión (en un motor de combustión interna encendido por chispa) implica la admisión de un combustible (gasolina, gas L.P., diesel, etc.), que se mezcla con un oxidante en un carburador o en los inyectores, en el caso de motores recientes. El aire, oxidante usual en la combustión, tiene una composición de 79 % de nitrógeno y 21 % de oxígeno<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Realmente estos porcentajes varían, ya que el aire contiene muchos otros componentes: argón, xenón, bióxido de carbono, vapor de agua, etc., los cuales se encuentran en cantidades muy pequeñas en el aire, por lo que en este trabajo se utilizarán los porcentajes anteriormente indicados.

Para cuestiones estequiométricas, no se considera el nitrógeno contenido en el aire que reacciona en la combustión, debido a que es una cantidad muy pequeña la que se forma. Sin embargo, los productos formados de la reacción del nitrógeno del aire con el combustible utilizado, combinados con las altas temperaturas que se alcanzan en el motor, ocasionan que se disocie el nitrógeno y forme óxidos, los que se despreciaban por su pequeña contribución en las emisiones. Sin embargo, al combinarse las emisiones en los distintos procesos de combustión, dichos gases de escape contaminantes sí eran considerables, es decir, al hablar de impacto ambiental, ya había problemas con esas emisiones. Además, indirectamente estos ocasionan que se forme el ozono al reaccionar con la luz ultravioleta del sol. Estos contaminantes son muy nocivos en la atmósfera, de lo cual nos podemos dar cuenta en el D.F. y Valle de México.

La finalidad de este trabajo es observar si se disminuyen las emisiones contaminantes: óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y/o monóxido de carbono, en un motor de combustión interna, al reducir el porcentaje de nitrógeno que entra en la cámara de combustión del motor dejando pasar sólo una cantidad determinada de aire enriquecido con oxígeno. Asimismo se observará el comportamiento que se presenta en algunos parámetros de la combustión.

La solución propuesta para disminuir las emisiones contaminantes mencionadas, se conoce como carburación oxigenada, con la cual se trabajará en este trabajo. La intención de la misma es reducir emisiones contaminantes, ya que supondremos que al eliminar nitrógeno del aire (inyectando oxígeno extra al carburador), no existirá suficiente concentración de materia prima de donde formarse los mismos. Además, se observarán algunos efectos en otros parámetros, ya que estudios anteriores con enriquecimiento de oxígeno han demostrado que se puede, por ejemplo, reducir el consumo de combustible en fuentes fijas [1], por lo que se espera que también se obtengan beneficios importantes en algunos de estos (ya sea reducción de combustible o disminución de algunas otras emisiones).

Para la realización de este trabajo se hizo una simulación numérica con varios combustibles, de tal forma de obtener para cada uno de ellos el comportamiento de su temperatura de flama adiabática, al variar la relación nitrógeno/oxígeno, es decir, al realizar una carburación oxigenada, y esto aplicándolo para una combustión estequiométrica y para varios excesos de aire. Esto para ver hasta donde se podía variar dicha relación sin que se disparase la temperatura del motor al momento de hacer las pruebas.

Una vez realizado lo anterior se procedió a hacer una serie de ensayos en un motor (banco de pruebas), al cual se le inyectó en el carburador, una cantidad predeterminada de oxígeno que

servió para variar la relación nitrógeno/oxígeno hasta las condiciones que queríamos y eran posibles de crear. Al realizar esto se midieron varios de los parámetros característicos en el funcionamiento de un motor, de tal forma que se llegara a observar el comportamiento de los mismos para finalmente llegar a una conclusión.

La estructura de este trabajo se muestra a continuación:

En el capítulo 1 se mencionan todos los parámetros que intervienen en la combustión, con el objetivo que se entienda cómo es posible, al variar alguno de ellos, mejorar otros, o incrementar la eficiencia, disminuir la cantidad de combustible consumido, etc. Asimismo se habla acerca de los mecanismos de reacción en la combustión, mostrando cómo es posible variar algunos parámetros. Para esto se mencionan brevemente los diferentes tipos de combustibles que existen y cómo intervienen en la combustión. En el capítulo 2 se habla de los contaminantes producidos por la combustión, especialmente en la Ciudad de México, se hace énfasis en los óxidos de nitrógeno, que son el contaminante que se piensa se va a reducir primero al usar la carburación oxigenada. De igual forma se mencionan los mecanismos de formación de los NOx (llamados mecanismos de Zeldovich). En el capítulo 3 se hace referencia a los métodos usados hasta el momento para reducir las emisiones de los contaminantes, así como el efecto que tiene en la salud y se da un enfoque más detallado a la carburación oxigenada. Se recapitula la información acerca de los procesos de combustión, pero ahora mostrando más claramente como se generan los contaminantes mencionados y mostrando qué es la carburación oxigenada, cómo funciona y en base a qué estudios anteriores se fundamenta su aplicación. En el capítulo 4 y retomando los tres capítulos anteriores, se menciona cómo es la combustión al reducir el nitrógeno admitido en el carburador, cómo se verían afectados los parámetros de la combustión al hacer esta misma variación: cómo aumenta la temperatura de flama adiabática. Para esto se muestra la simulación teórica hecha con varios combustibles al reducir gradualmente la cantidad de nitrógeno en el aire y calcular todos los parámetros anteriores, para ver cómo nos afecta a las pruebas el aumento en la temperatura de flama adiabática. Por último en el capítulo 5 se transcriben los procedimientos realizados al hacer una experimentación en un banco de pruebas con un motor real. Todos los parámetros mostrados en los capítulos anteriores, se muestran y se observa cómo varían al hacer la simulación en este motor, con el objetivo de que se muestre en la realidad todas las ventajas de aplicar el método de la carburación oxigenada. Se hace una comparación de usar el aire como comburente y cómo es al variar el porcentaje de oxígeno que es admitido en el carburador y por lo tanto en el motor.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA INTRODUCCIÓN.

[1] Kimura, S. G. Browall, W.R. MEMBRANE OXYGEN ENRICHMENT. DEMONSTRATION OF MEMBRANE OXYGEN ENRICHMENT FOR NATURAL GAS COMBUSTION. Journal of Membrane Science, 29 (1986) 69-77. Amsterdam, Netherlands.

# CAPITULO I.

## CONCEPTOS GENERALES.

En este capítulo se van a mostrar algunos de los conceptos básicos de la Termodinámica, mostrando algunos de los parámetros necesarios para conocer el funcionamiento de un motor a gasolina, además se dan las características principales de los combustibles y sus propiedades, para de esta forma observar el porque de escoger un combustible u otro.

También se mencionan de manera breve y concreta cómo se realiza el análisis para el balance de energía en un ciclo ideal, y a partir de éste obtener la temperatura de flama adiabática a partir de las entalpías de formación de los reactivos y productos en el proceso de combustión. Esto va a servir de mucha utilidad porque al momento de realizar la simulación numérica se utilizarán casi todos los conceptos manejados en este capítulo, así como algunas suposiciones y consideraciones basadas en los principios dados en el mismo.

Por último se hace mención al hablar de la carburación, de la carburación oxigenada, tema de este trabajo, aunque sólo se comenta brevemente, ya que en el siguiente capítulo se explicará de una forma más clara y detallada.

### CONCEPTOS INVOLUCRADOS EN EL RENDIMIENTO DE ESTE SISTEMA.

#### 1.1. EFICIENCIA VOLUMÉTRICA.

Este parámetro define la masa que realmente entra al motor y cómo está ligada a la potencia. Se define de la siguiente manera [1]:

$$\eta_v = (m_a + m_{comb}) / m_{VD}$$

(1.1.)

Donde  $\eta_v$  es la eficiencia volumétrica,  $m_a + m_{comb}$  son la masa de aire y combustible que realmente entra en el motor y  $m_{VD}$  es la masa de aire que en las condiciones ambientales ocuparía el volumen desplazado, siendo éste [1]:

$$m_{VD} = \frac{p_a \times V_{VD}}{R_{aire} \times T_a}$$

(1.2.)

Donde  $p_a$  es la presión del aire a la entrada,  $V_{VD}$  es el volumen desplazado,  $R_{aire}$  es la constante de gas ideal para el aire y  $T_a$  es la temperatura del mismo a la entrada.

### 1.2. PRESION MEDIA EFECTIVA (PME).

Es un parámetro auxiliar usado para describir el comportamiento de un motor. Es proporcional al par motor y nos sirve como índice para obtener la capacidad de hacer trabajo de un motor. Dependiendo del trabajo que se realice, la presión media efectiva puede ser indicada, teórica o al freno [2].

$$W_{ocio} = (PME)(\text{área del pistón})(\text{longitud del pistón}) = (PME)(\text{volumen desplazado}) \quad (1.3.)$$

### 1.3. EFICIENCIA TÉRMICA.

Es el cociente de la producción neta de trabajo entre la alimentación o entrada de calor. Teóricamente se representa de la siguiente forma [3]:

$$\eta_t = |W_{neto}| / Q_{entrada} \quad (1.4a.)$$

Sin embargo para nuestro ciclo Otto ideal representado en el diagrama 1.1 es la siguiente [4]:

$$\eta_t = (c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)) / c_v(T_3 - T_2) \quad (1.4b.)$$

### 1.4. TRABAJO NETO.

Es una interacción entre un sistema y sus alrededores, para el ciclo de Otto de aire ideal se calcula de la siguiente forma [4]:

$$W_{neto} = c_v(T_3 - T_2) \quad (1.5.)$$

### 1.5. COMBUSTIBLES.

**Combustible.** Es una sustancia que reacciona con algún comburente, de forma ampliamente exotérmica y liberando una gran cantidad de energía térmica (calor).

**Comburente:** Sustancia que al combinarse con un combustible libera energía, un ejemplo de estos son el oxígeno y los halógenos.

**Composición.** Casi todos los combustibles líquidos y gaseosos provienen de la refinación del petróleo crudo, el cual está compuesto de muchos hidrocarburos diferentes, azufre e impurezas. Los combustibles por su estado físico se clasifican en:

- a) sólidos
- b) líquidos
- c) gaseosos

Además, se pueden clasificar según el tipo de enlace entre sus moléculas de la siguiente forma:

#### 1.5.1. Parafinas (alcanos).

Estos combustibles poseen estructura de cadena abierta con átomos unidos por un enlace covalente simple. Su fórmula general es  $C_nH_{2n+2}$ . Algunos de los compuestos de esta familia más utilizados son los siguientes:

- Metano ( $CH_4$ ).
- Etano ( $C_2H_6$ ).
- Propano ( $C_3H_8$ ).
- Butano ( $C_4H_{10}$ ).
- Pentano ( $C_5H_{12}$ ).
- Hexano ( $C_6H_{14}$ ).
- Heptano ( $C_7H_{16}$ ).
- Octano ( $C_8H_{18}$ ).

Conforme aumenta el tamaño de la cadena, este tipo de combustibles pasa de ser gas a ser un líquido. Debido a que existe otro tipo de combustible (isómeros) con la misma fórmula, se le añade a la de estos compuestos el prefijo *n-*, que quiere decir normal, leyéndose para el siguiente ejemplo: *n*,  $CH_4$ ; *n*, metano o metano *normal*.

### 1.5.2. Olefinas (alquenos).

Su fórmula general es  $C_nH_{2n}$ . Poseen un enlace covalente doble con uno de los átomos de carbono. La estructura es en forma de cadena y forman un hidrocarburo no saturado. El nombre de los compuestos se forma cambiando la terminación –ano- por –eno- de la raíz original vista en las parafinas. Algunos de los compuestos de esta familia son los siguientes:

- Eteno ( $C_2H_4$ ).
- Propeno ( $C_3H_6$ ).
- Buteno ( $C_4H_8$ ).
- Penteno ( $C_5H_{10}$ ).
- Hexeno ( $C_6H_{12}$ ).

Para indicar en que lugar de la molécula se encuentra el enlace covalente doble se antepone un dígito al nombre de la molécula o a la fórmula (3,  $C_7H_{14}$  o 3, hepteno, por ejemplo, que indica que en el tercer átomo de carbono se encuentra el enlace doble).

### 1.5.3. Diolefinas.

Poseen dos enlaces covalentes dobles de los átomos de carbono en cualquier lugar de la molécula. Su fórmula general es  $C_nH_{2n-2}$ . Para nombrar a estos compuestos se utiliza nuevamente la raíz parafínica, pero sustituyendo las terminaciones –ano- y –eno- por –dieno-. Asimismo, se anteponen al nombre o fórmula dos dígitos, los cuales indican en que átomos de carbono se encuentran los enlaces (3,5, heptadieno o 3,5,  $C_7H_{12}$ , por ejemplo).

### 1.5.4. Naftenos (cicloparafinas).

Estos poseen enlace covalente sencillo con los átomos de carbono, pero en forma de anillo. Su fórmula general es  $C_nH_{2n}$ . También el número átomos de hidrógeno es el máximo posible, por lo que son hidrocarburos no saturados. Para nombrarlos regresamos a la terminación –ano- en la raíz parafínica, pero además añadimos la raíz ciclo a los compuestos. Los más comunes de éstos son:

- Ciclopropano ( $C_3H_6$ ).
- Ciclobutano ( $C_4H_8$ ).
- Ciclopentano ( $C_5H_{10}$ ).
- Ciclohexano ( $C_6H_{12}$ ).
- Ciclooctano ( $C_8H_{16}$ ).

#### 1.5.5. Aromáticos.

Estos tienen un anillo bencénico al que van unidos átomos de hidrógeno o radicales formados por átomos de hidrógeno y carbono (radicales metilo). Su fórmula general es  $C_nH_{2n-6}$ . Casi no poseen tendencia a la autoinflamación. Se usan en la formulación de gasolinas principalmente como aditivos. Algunos de los compuestos de esta familia son:

- Benceno ( $C_6H_6$ ).
- Tolueno o metil-benceno ( $C_7H_8$ ).
- Xileno o dimetil-benceno ( $C_8H_{10}$ ).

Según la ubicación del radical benceno en el anillo, a la fórmula del compuesto se le agrega el prefijo p (para), o (orto) o m (meta) además de dos dígitos, los que indican en que átomo de carbono se une el o los radicales.

#### 1.5.6. Naftalenos.

Su fórmula general es  $C_nH_{2n-12}$ . También poseen cadenas en forma de anillo. Su primer miembro es el naftaleno y a partir de éste se forman los demás compuestos con radicales metilo. Su estructura es la de dos anillos bencénicos unidos.

#### 1.5.7. Isómeros.

Tienen una composición química idéntica pero difieren en estructura molecular. En general poseen una estructura ramificada no perteneciente a ninguna de las familias anteriormente mencionadas. Se identifican con una letra -i- antes de la fórmula y con el prefijo -iso- antes del nombre. Para nombrarlos se puede mencionar la posición del radical metilo en la molécula raíz (i,  $C_8H_{18}$ , isooctano o 2,2,4 trimetil pentano, que es el mismo compuesto, por ejemplo). Si se quiere observar como son las cadenas que se forman en estos combustibles, se puede recurrir a libros más específicos [5].

#### 1.5.8. Combustibles gaseosos.

Son mezclas de hidrocarburos ligeros, en estos la mezcla con el comburente es simple formando flamas premezcladas, entre los cuales se encuentran:

- Gas natural (generalmente metano)
- Gas de horno alto.
- Gas de horno de coque.

Para los gases licuados se tiene:

- Gas propano-butano (gas LP).

#### 1.5.9. Gasolinas y diesel.

No todos los combustibles anteriormente mencionados poseen las características que se desean, es por eso que es necesario realizar mezclas de varios de ellos para lograr las condiciones de operación requeridas. Las gasolinas y diesel se encuentran en este caso; ambos son mezclas y varían en su composición dependiendo del país, zona geográfica, altitud, etc. En México la gasolina Magna SIN tiene un 30 % en vol. de aromáticos, 15 % en volumen de olefinas, 2 % de benceno, detergente 280 ppm y el resto está compuesto de hidrocarburos parafínicos, nafténicos, antidetonantes e inhibidores [6], pero las cantidades exactas se las reserva PEMEX (Petróleos Mexicanos), por cuestiones de seguridad. Además la gasolina está hecha de tal forma que sólo se encienda por medio de una chispa, en cambio el diesel sólo necesita ciertas condiciones de presión y temperatura para que lo haga. Es importante saber que también se le agregan a los combustibles en general sustancias (aditivos) que varían las propiedades normales de un combustible, de tal forma que se obtengan las que nosotros requerimos.

#### 1.5.10. Alcoholes.

En su fórmula general se añade el radical OH ( $C_xH_yO_2$ ). Algunos de los principales compuestos de esta familia son:

- Alcohol metílico,  $(CH_3)OH$ , conocido como metanol.
- Alcohol etílico,  $(C_2H_5)OH$ , conocido como etanol en ausencia de agua.
- Acetona,  $(C_3H_5)OH$ .
- Alcohol n-butílico, n- $(C_4H_9)OH$ , butanol.
- Eter dietílico,  $(C_4H_9)OH$ .

### 1.6. PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES.

Los combustibles poseen ciertas características que los hace diferentes uno de otro y que permiten determinar su utilización en los motores. Algunas de las más importantes son:

#### 1.6.1. Poder Calorífico.

Es el calor extraído por la combustión completa de 1 kg de combustible o  $1\text{ m}^3$  (metro cúbico normal) de gas del mismo, tomados a las condiciones normales de 298 K y 1 atm. El poder calorífico se conoce también como entalpia de combustión  $\Delta h_c$  y es la entalpia de reacción de un proceso de combustión [ 7]. Se tienen dos valores del poder calorífico:

- Los productos de la combustión contienen agua. Se conoce como poder calorífico superior (PCS) y es cuando los productos de la combustión poseen agua en estado líquido [7].
- Los productos de la combustión contienen agua en forma de vapor. A éste se le denomina poder calorífico inferior (PCI) debido a que el agua de los productos se encuentra en forma de vapor [7].

Sin embargo, la relación entre el poder calorífico superior e inferior no se determina de una forma fácil, y las relaciones que existen son obtenidas experimentalmente por lo que existen infinidad de ellas las cuales tienen un distinto valor de exactitud y utilización. A continuación se presenta una de ellas [8]:

$$PCI = PCS - 2442(m_{a0}/m_c) \quad (1.6.)$$

Donde  $m_{a0} / m_c$  es la masa de agua formada por unidad de combustible.

#### 1.6.2. Volatilidad.

Es la tendencia de un líquido a evaporarse. Con este nombre se define a la temperatura a la que se forma una mezcla aire-vapor dada en condiciones de equilibrio, a una atmósfera. En las mezclas de vapor de combustible y aire que entran a un motor, la relación vapor – aire no debe de ser mayor a 0.5 veces la estequiométrica [9], para lograr una ignición correcta y una buena propagación de la flama. Se debe de tener una volatilidad equilibrada, ya que si tenemos gran volatilidad, se tendrán buen funcionamiento del motor en condiciones de arranque, cuando la máquina está fría, pero esta condición ocasiona un tapón de vapor. Por otra parte, una baja volatilidad ocasiona que representa un mayor poder calorífico por litro de combustible, pero se presenta el problema de dilución en el cárter.

#### 1.6.3. Inflamabilidad.

La inflamabilidad también es conocida como poder de ignición, calidad de ignición, calidad de encendido. Es la capacidad que tiene un combustible para quemarse en presencia del aire. Los parámetros que se necesitan conocer son la temperatura de ignición, el punto de anilina y el número de cetano (NC). El cetano (hexadecano),  $C_{16}H_{34}$ , tiene asignado un NC = 100 y el metilnaftaleno,  $C_{11}H_{10}$  tiene un NC=0 [10]

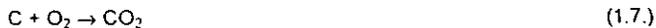
#### 1.6.4. Poder antidetonante (octanaje).

Cuando se comprime la mezcla aire-combustible en un motor, aumentan la presión y la temperatura, lográndose condiciones que propician la combustión espontánea del combustible. La relación de compresión a la cual se realiza esto se llama relación de compresión crítica; en los combustibles esto se cuantifica por medio del número de octano (NO). La eficiencia térmica aumenta con la relación de compresión en un motor, por lo que se necesita utilizar combustibles con un alto número de octano para evitar el golpeteo, ocasionado por la autoinflamación del combustible.

Al n-heptano se le ha asignado un valor de referencia de NO = 0. El iso-octano tiene un valor de referencia de 100. Para aumentar el octanaje de un combustible se utilizan aditivos antidetonantes como el alcohol etílico y los aromáticos. Sin embargo, el primero ocasiona problemas en la mezcla alcohol-gasolina, y los segundos tienen un elevado costo, por lo que se utilizó durante mucho tiempo al tetraetil de plomo (TEL),  $(C_2H_5)_4Pb$ , que sin embargo era un gran contaminante atmosférico. Actualmente se utilizan otros aditivos que tienen una función similar a la que tenía el plomo.

#### 1.7. COMBUSTIÓN.

La combustión es una reacción química que puede ser una oxidación o una halogenación, en la cual aprovechamos la energía química de un combustible para transformarla en energía térmica. Además, para que se pueda llevar a cabo esta reacción, es necesario contar con la presencia de un comburente, que normalmente es el aire. Un ejemplo de combustión es el siguiente [11]:



A esta reacción se le denomina combustión completa, ya que en los productos sólo se encuentra el dióxido de carbono. Sin embargo esto sólo es ideal, ya que en la realidad siempre es incompleta y se obtienen otros productos de la combustión, realmente se tendría una reacción de este tipo [11]:



El objetivo de la combustión es aprovechar al máximo el poder calorífico del combustible, lo que implicaría una combustión completa; para lograr esto debe existir el oxígeno suficiente para la combustión. Es poco frecuente usar el oxígeno como comburente por lo que usamos el aire como tal

### 1.8. COMPOSICIÓN DEL AIRE.

El aire es una mezcla de gases que tiene una composición representativa como sigue:

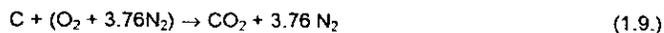
TABLA 1.CONSTITUYENTES DEL AIRE [12].

Gas	PPM por volumen	Masa molecular	Fracción molar	Relación molar
O <sub>2</sub>	209,500	31.998	0.2095	1
N <sub>2</sub>	780,900	28.012	0.7905	3.773
Ar	9,300	38.948		
CO <sub>2</sub>	300	40.009		
AIRE	1,000,000	28.962	1.0000	4.773

La tabla 1 nos muestra algunos de los componentes más notorios del aire, sin embargo estos no son los únicos, ya que existen otros compuestos en el mismo: vapor de agua, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, etc. Estos varían dependiendo de la ubicación geográfica de la región donde analicemos el aire, así como de la altitud, condiciones climáticas, y por supuesto, de la concentración de contaminantes en la atmósfera. Además en las columnas de fracción y relación molar solamente se están tomando en cuenta el oxígeno y el nitrógeno, esto es debido a que para fines prácticos y de cálculos, sólo se toman en cuenta estos dos, despreciándose por sus pequeños porcentajes y su poca o nula reactividad en la combustión, a las demás sustancias presentes en el aire.

Sin embargo, el vapor de agua contenido en el aire puede variar dependiendo de las condiciones climatológicas; por esto es necesario conocer la humedad relativa, la cual compara el vapor contenido en el aire con el que se necesita para saturarlo, es decir, es la relación existente entre la presión parcial del vapor de agua con la presión de saturación a la misma temperatura. El vapor de agua se mide con un psicrómetro y los demás datos, como la presión de saturación y la humedad relativa se encuentran leyendo una carta psicrométrica.

Por lo tanto la combustión estequiométrica con aire es de la siguiente forma [13]:



Para lograr una buena combustión se necesitan los siguientes factores:

- a) Temperatura. Del valor de ésta dependen las condiciones adecuadas para la cinética de la reacción; además, a mayor temperatura se tendrán más efectos relacionados con la disociación de los productos de la combustión.
- b) Tiempo. Dependiendo de éste, una combustión puede clasificarse en rápida o detonación, y una combustión lenta, que es la más adecuada para tener una mayor eficiencia energética. En nuestro motor dependerá de la velocidad del motor y la geometría de la cámara de combustión. Se recomienda que el combustible permanezca en ésta el tiempo suficiente para quemarse totalmente.
- c) Homogeneidad en la mezcla. La masa de aire y combustible que entran a la cámara de combustión deben de estar bien mezcladas para quemarse totalmente.
- d) Concentración de reactivos. Es decir, qué cantidad de combustible y comburente se tiene, así como la proporción de sustancias que los forman a cada uno. En el caso del aire, es su relación nitrógeno/oxígeno, y en la del combustible, la composición del mismo, o sea, cuántas moles de carbón por cuántas de hidrógeno posee el mismo.

#### 1.9. COMBUSTIÓN ESTEQUIOMÉTRICA.

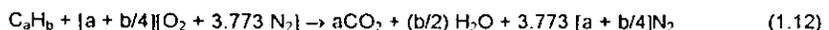
Si se dispone de la suficiente cantidad de oxígeno y tiempo de residencia, un combustible puede ser completamente oxidado. Si el combustible que se quema es un hidrocarburo, el carbón se convertirá en dióxido de carbono(CO<sub>2</sub>); y el hidrógeno en vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Como ejemplo se muestra la combustión completa para el octano (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) [14]:



Haciendo el balance para el carbón, hidrógeno y oxígeno encontramos que b=8, c=9 y a=12.5, quedando la ecuación anterior de la siguiente forma [14]:



Como el aire contiene nitrógeno, pero a bajas temperaturas, no es afectado por la reacción, sin embargo, la ecuación completa para un combustible es la siguiente [14]:



Esta última ecuación define la estequiometría para proporciones químicamente correctas (o teóricas). Por arriba o por debajo de esta cantidad de aire suministrado, se tendrá un exceso o deficiencia de aire respectivamente.

En las ecuaciones de combustión, como la del octano, los coeficientes calculados representan el número de moles necesarios para hacer la reacción planteada, y para los gases nos representan los volúmenes necesarios que se deben usar.

#### 1.10. RELACION AIRE/COMBUSTIBLE.

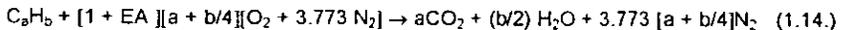
Si definimos la composición de cualquier combustible como  $CH_y$ , donde  $y=(b/a)$ , podemos encontrar la relación aire combustible estequiométrica de la siguiente forma [14]:

$$\begin{aligned} [A/C]_{\text{est}} &= [1 + y/4][32 + (3.773 \times 28.16)] / [12.011 + 1.008y] = \\ &= [34.56 (4+y)] / [12.011 + 1.008y] \end{aligned} \quad (1.13.)$$

Donde los valores de 32, 28.16, 12.011 y 1.008 representan la masa molecular del oxígeno, nitrógeno, carbón atómico e hidrógeno atómico respectivamente, y 3.773 es la relación molar entre el nitrógeno y el oxígeno.

#### 1.11. EXCESO Y DEFICIENCIA DE AIRE.

Si la mezcla aire/combustible es ligeramente mayor o menor que la estequiométrica, también puede ser quemada; sin embargo, los productos y su composición variarán, esto se puede ver en la siguiente fórmula para exceso de aire, deducida de 1.14.



Donde EA corresponde al exceso de aire y su valor está dado en fracción decimal. En esta fórmula es notable la aparición del oxígeno en los productos, resultado del exceso de aire; además los coeficientes varían respecto de los estequiométricos, suponiendo una combustión completa.

Cuando hay menor cantidad de oxígeno que el necesario para oxidar todo el combustible, en los productos encontramos una mezcla de agua ( $H_2O$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ). La composición de los productos no puede ser determinada fácilmente por un análisis elemental, por lo que es necesario hacer una serie de suposiciones que ayuden a determinar sus valores [15]. El exceso y la deficiencia de aire se calculan de la siguiente forma:

$$EA = [(A - A_{est})/A_{est}] \times 100 \quad (1.15.)$$

$$DA = [(A_{est} - A)/A_{est}] \times 100 \quad (1.16.)$$

$$A_t = (A/A_s) \times 100 \quad (1.17.)$$

Donde:

EA es el exceso de aire (%).

DA es la deficiencia de aire (%).

$A_{est}$  es el 100% de aire estequiométrico.

$A_t$  es la cantidad de aire evaluada como porcentaje de aire teórico (%).

A es el aire usado en un proceso de combustión.

La relación aire/combustible también se calcula de la siguiente forma [15]:

$$[A/C]_{masa} = [A/C]_{mol} \times [M_{aire}/M_{comb}] = A \quad (1.18.)$$

Donde  $M_{aire}$  y  $M_{comb}$  son la masa molecular del aire y del combustible respectivamente.

### 1.12. RELACIÓN RELATIVA DE EQUIVALENCIA AIRE/COMBUSTIBLE.

La composición de los productos de la combustión es diferente cuando se tiene una mezcla pobre o una mezcla rica; por esto es importante conocer un parámetro de gran importancia para este estudio, llamado la relación de equivalencia relativa combustible/aire  $\lambda$  [16].

$$\lambda = \phi^{-1} = [A/C]_{real}/[A/C]_{est} \quad (1.19)$$

Para mezclas pobres:  $\phi < 1$ ,  $\lambda > 1$ .

Para mezclas estequiométricas:  $\phi = \lambda = 1$ .

Para mezclas ricas:  $\phi > 1$ ,  $\lambda < 1$ .

### 1.13. PROCESOS DE COMBUSTIÓN REALES.

En un proceso real se pueden obtener sustancias en los productos que normalmente no aparecerían en el cálculo ideal, como encontrar monóxido de carbono en una combustión con exceso de aire. Además no es tan fácil obtener una medición real de la relación aire / combustible. Asimismo se tienen involucradas cientos de reacciones químicas intermedias antes de llegar a los productos finales, donde no se logra llegar a un equilibrio químico.

Se pueden utilizar muchos métodos experimentales para determinar la concentración de diversos componentes de los gases producto de la combustión. Los análisis de gases se pueden presentar en base seca o húmeda. Si no se proporciona el dato del vapor de agua de los productos, entonces se habla de una base seca. Un método muy utilizado durante mucho tiempo para hacer estas mediciones fue el analizador de Orsat, el cual es un equipo que hace el reporte del análisis total en base seca.

#### 1.14. ENTALPÍA DE FORMACIÓN.

Haciendo un balance de energía en un sistema simple y comprensible [17]:

$$Q + W_{\text{eje}} = \Delta H + \Delta E_C + \Delta E_P \quad (1.20.)$$

Donde Q es el calor suministrado al sistema,  $W_{\text{eje}}$  es el trabajo de flecha producido,  $\Delta H$  es la variación de la entalpía entre dos estados del mismo sistema, y  $\Delta E_C$  y  $\Delta E_P$  son las variaciones de energía cinética y energía potencial entre los mismos estados del sistema.

Si el sistema es químicamente reactivo [17]:

$$\Delta H = H_{\text{prod}} - H_{\text{reac}} \quad (1.21.)$$

$$= \sum (N_i h_i)_{\text{prod}} - \sum (N_i h_i)_{\text{reac}} \quad (1.22.)$$

donde  $h_i$  es la entalpía molar de cualquier producto o reactivo a la temperatura y presión de la reacción y  $N_i$  es el número de moles de cualquier producto o reactivo.

La entalpía de formación ( $\Delta h_f$ ) es el cambio de entalpía que ocurre cuando un compuesto químico se forma isotérmicamente a partir de sus elementos estables a presión constante [18].

$$\Delta h_f = h_{\text{compuesto}} - \sum_i (v_i h_i)_{\text{elementos estables}} \quad (1.23.)$$

Es necesario elegir una temperatura y presión de referencia, las cuales se les reconocerá por el superíndice "o" (1 atm y 298 K). La entalpía de formación de cualquier elemento estable tiene el valor cero.

Por lo anterior, la entalpía de un compuesto es la siguiente [18]:

$$h_{\text{compuesto}} (\text{a } 25^\circ\text{C y } 1 \text{ atm}) = \Delta h_{f,298}^\circ \quad (1.24.)$$

La relación que existe entre la entalpía de formación en fase gaseosa y en fase líquida es la siguiente [19]:

$$\Delta h_{f,298}^{\circ} \text{ (fase gaseosa)} = \Delta h_{f,298}^{\circ} \text{ (fase líquida)} + h_{f_0} \quad (1.25.)$$

Ahora bien, si lo que se desea encontrar es la entalpía de formación a una temperatura dada, tenemos que utilizar la siguiente relación [19]:

$$h_{i,T,P} = \Delta h_{f,298,i}^{\circ} + (h_{T,P} - h_{298K,1 \text{ atm}})_i \quad (1.29.)$$

Si se trata de mezclas reactivas con gases ideales, la entalpía de cada gas es independiente de la presión.

#### 1.15. BALANCE DE ENERGÍA PARA MEZCLAS REACTIVAS EN ESTADO ESTABLE.

Combinando las ecuaciones, el balance de energía en estado estable para reacciones químicas es [19]:

$$Q + W_{eje} = \sum_{\text{prod}} N_i (\Delta h_{f,298}^{\circ} + \Delta h)_i - \sum_{\text{reac}} N_i ((\Delta h_{f,298}^{\circ} + \Delta h)_i) \quad (1.26.)$$

Donde  $\Delta h = h_{T,P} - h_{298K,1 \text{ atm}}$ , y además se desprecia la energía cinética y potencial. Pero además en la mayoría de los procesos de combustión no existe trabajo mecánico para el volumen de control elegido y el efecto de la presión sobre la entalpía es despreciable, quedando la ecuación anterior como sigue [19]:

$$Q = \sum_{\text{prod}} N_i (\Delta h_{f,298}^{\circ} + h_{T,P} - h_{298K,1 \text{ atm}})_i - \sum_{\text{reac}} N_i ((\Delta h_{f,298}^{\circ} + h_{T,P} - h_{298K,1 \text{ atm}})_i) \quad (1.27.)$$

#### 1.16. TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA.

Como lo muestra la ecuación anterior, la energía liberada por una reacción química aparece en dos formas: calor hacia el medio ambiente y aumento de la temperatura de los productos. Para cálculos ingenieriles, la máxima temperatura que alcancen los productos se conoce como temperatura de flama adiabática o combustión adiabática. Para la ecuación 1.31, si  $Q = 0$ , tenemos [20]:

$$\sum_{\text{prod}} N_i (\Delta h_{f,298}^{\circ} + h_{T,P} - h_{298K,1 \text{ atm}})_i = \sum_{\text{reac}} N_i ((\Delta h_{f,298}^{\circ} + h_{T,P} - h_{298K,1 \text{ atm}})_i) \quad (1.28.)$$

Al conocer las condiciones iniciales de los reactivos, el lado derecho de la igualdad es conocido, y por tablas se conocen los valores de  $\Delta h_{f,298}^{\circ}$  y  $h_{298}$ , por lo que las incógnitas son  $h_T$

para cada uno de los productos encontrados a la temperatura desconocida. La solución se encuentra por iteración, es decir, suponemos una temperatura, hallamos los valores de la entalpia de los productos a esa temperatura. Si la temperatura es correcta, los valores numéricos del lado izquierdo y derecho de la ecuación deben de ser iguales, de lo contrario se supone otro valor de temperatura hasta encontrar la correspondiente a la solución de la ecuación.

#### 1.17. CARBURACIÓN.

La carburación es un proceso muy importante en el funcionamiento de los motores y aún más en la combustión, ya que de ésta depende la potencia generada y la operación correcta del motor, emisión de contaminantes del mismo, etc.

La carburación consiste en regular la cantidad de combustible (carburos e hidrocarburos, por lo general) y el oxidante (aire, casi siempre). Todo esto se realiza con la finalidad de lograr una mezcla cercana a la estequiométrica, una mezcla pobre o una rica en combustible según se requiera, para que al llegar a la cámara de combustión, se logre quemar la mezcla y al mismo tiempo se logre el funcionamiento óptimo del motor, disminuyendo las emisiones de contaminantes ocasionadas entre otras cosas, por combustiones defectuosas.

#### 1.18. CARBURACIÓN OXIGENADA.

Este punto es el más importante del trabajo, pues es el tema en sí. Como ya se había mencionado, la mezcla se realiza con un combustible y un oxidante, pero este casi siempre es el aire. Y si nos referimos al tema de la contaminación, podemos ver que las emisiones no se reducen, aún cuando se hable de métodos para eliminarlas [21] (ya sea tratando de mejorar combustibles, limpiando gases de salida en el motor, o haciéndolos pasar por convertidores o quizá creando proyectos de control vehicular), es entonces cuando pensamos en el uso de mejores alternativas y en el tema de nuestro estudio, que es el introducir una mayor cantidad (o porcentaje) en volumen de oxígeno contenido en el aire como oxidante.

Como ya se vio, el aire contenido en la atmósfera está compuesto de oxígeno, nitrógeno, otros compuestos en cantidades más pequeñas (dióxido de carbono, vapor de agua, etc.), aunque para cálculos y operaciones aritméticas consideramos al aire formado por un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno en volumen. Normalmente cuando el aire reaccionaba con un combustible, se consideraba que el nitrógeno contenido en el mismo no reaccionaba, sin embargo, con el tiempo y mediante muchos estudios, se fue observando que una parte del nitrógeno se disociaba a ciertas temperaturas y condiciones para formar otros compuestos, como lo son los óxidos de nitrógeno y

otros compuestos formados por reacciones a partir de estos, como es el caso del ozono, los PAN (nitrato de peroxiacilo), etc.

Hablar de combustión enriquecida con oxígeno no es algo nuevo, aunque realmente se profundizó muy poco en éste tópic. Investigaciones anteriores con membranas [22] demostraron que en la combustión de ciertas aplicaciones industriales, en las cuales se aumentaron los porcentajes de oxígeno en el aire de combustión (mediante el uso de membranas ultradelgadas de silicón/policarbonato) de 25 a 35%, y se suministró aire a razón de 14,151 l/min, y operado en un vacío con una relación de presiones de 10 a 1. Con esto se logró reducir el consumo de combustible (gas natural) en un 41% y la eficiencia térmica se logró aumentar en un 10%.

Sin embargo, a pesar de los logros obtenidos con ésta práctica de combustión enriquecida, no se profundizó más en éste tema ni se ha investigado pertinentemente acerca de nuestro tema de interés, hasta ahora que con esta tesis se trata de aclarar un poco este tema y sus ventajas.

### 1.19. CARBURADORES.

El carburador fue un sistema auxiliar en los motores de combustión interna, dentro del cual se realiza la mezcla del combustible y del oxidante, para que ésta salga con rumbo a la admisión de la cámara de combustión. El diseño del carburador se ha perfeccionado de tal forma que proporciona, según las necesidades, una regulación adecuada de la mezcla (aumentar el flujo de combustible al acelerar, por ejemplo).

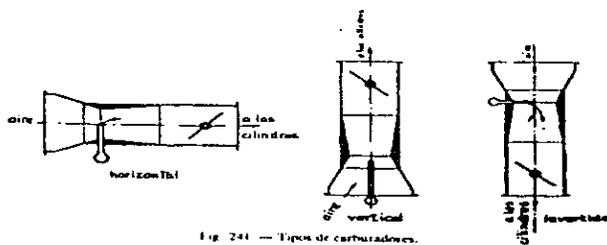


FIGURA 1.1.  
TIPOS DE CARBURADORES

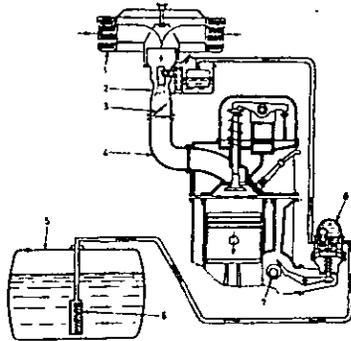


FIGURA 1.2.  
CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN CON CARBURADOR

En la figura 1.1. se puede ver un esquema básico de tres tipos de carburadores: horizontal, vertical e invertido, en donde se aprecia en primer plano la mariposa, que va a regular la cantidad de aire que entra al carburador. En la figura 1.2. se ve un esquema del circuito de alimentación con carburador, donde la numeración indicada es la siguiente: (1) filtro de aire, (2) carburador, (3) Mariposa del carburador, (4) colector o múltiple de aspiración, (5) depósito de la gasolina, (6) filtro del depósito, (7) leva del árbol de levas, (8) bomba mecánica para la alimentación de la gasolina.

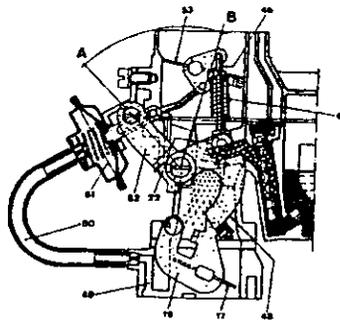


FIGURA 1.3.  
CARBURADOR TIPO WEBER

La figura 1.3. muestra un carburador tipo WEBER 32 ICEV (automóvil FIAT ritmo). Actualmente el sistema de carburadores ha sido reemplazado por el de inyección, el cual se realizó primero bajo la idea de conseguir mejores condiciones de potencia y después, recientemente, para reducir las emisiones nocivas y el consumo de combustible.

La inyección tiene la posibilidad de brindar un mayor rendimiento volumétrico por la ausencia del tubo Venturi y del calefactor en la entrada de aire, y por lo tanto también de un menor consumo, un mayor par motor y mayor potencia, además hace posible realizar una dosificación precisa de la gasolina en relación a la carga en cualquier condición de revoluciones y fases de transición.

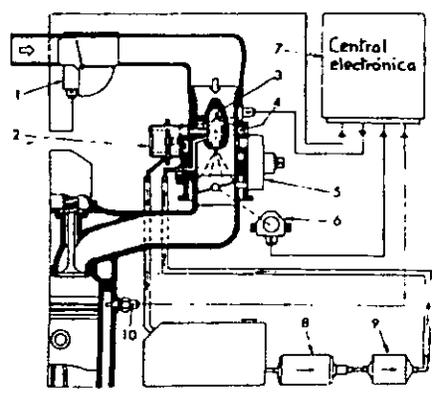


FIGURA 1.4.  
CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN CON INYECTOR

La figura 1.4. muestra el esquema del circuito de alimentación con un inyector (single point injection), donde la numeración indicada corresponde a lo siguiente: (1) sensor de aire, (2) regulador de la presión del combustible, (3) inyector, (4) calentador por agua, (5) dispositivo de aire suplementario, (6) mando de la válvula de mariposa, (7) central electrónica, (8) bomba eléctrica, (9) filtro, (10) sensor de temperatura del motor.

Algunas otras ventajas son la ausencia de formación de hielo, fácil arranque en frío, ninguna forma de condensación de gasolina, no hay problema en el caso de fuertes aceleraciones positivas o negativas cualquiera que sea la posición del motor, no siendo necesaria la cuba característica de nivel constante de los carburadores tradicionales. Sus desventajas son el costo más elevado y la mayor complejidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 1.

- [1] Heywood, John B. INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS. Edit. McGraw-Hill. USA. 1989. Pág. 54.
- [2] Wark, Kenneth. TERMODINÁMICA. Edit. McGraw-Hill. México 1991. Pág. 610.
- [3] Idem, pág. 210.
- [4] Idem, pág. 613.
- [5] Obert, Edward F. INTERNAL COMBUSTION ENGINES. International Text Book Company. USA, 1970. Pp. 222-241.
- [6] PEMEX. Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD PARA SUBSTANCIAS. Pág. 7.
- [7] Aguillón, Javier. APUNTES DE INGENIERÍA DE PROCESOS INDUSTRIALES. Instituto de Ingeniería, Facultad de Ingeniería. UNAM. México, 1997.
- [8] Wark, Kenneth. TERMODINÁMICA. Pág. 544.
- [9] Muñoz, M. Payri, F. et alii. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS. Sección de Publicaciones de la ETS de Ingenieros Industriales. Fundación General UPM. España, 1989. Pág. 240.
- [10] Medina H., Eduardo. APUNTES DE MÁQUINAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1995. Pág. 74.
- [11] Idem. Pág. 75.
- [12] Heywood, ob. cit., pág. 65.
- [13] Medina, ob. cit., pág. 76.
- [14] Heywood, ob. cit., pág. 69.
- [15] Medina, ob. cit., pág. 80.
- [16] Idem, pág. 71.
- [17] Wark, ob. cit., pág. 525.
- [18] Idem, pág. 526.
- [19] Idem, pág. 527.
- [20] Idem, pág. 532.
- [21] Red de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. INFORME ANUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE 1995. Comisión Metropolitana para Prevención y control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. DDF. 1995. Pág. 21.

[22] Kimura, S. G. Browall, W.R. MEMBRANE OXIGEN ENRICHMENT. DEMONSTRATION OF MEMBRANE OXYGEN ENRICHMENT FOR NATURAL GAS COMBUSTION. *Journal of Membrane Science*, 29 (1986) 69-77. Amsterdam, Netherlands.

## CAPÍTULO II.

### CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

En este capítulo se hablará del gran problema que es la contaminación atmosférica en la Ciudad de México, así como los distintos contaminantes que se encuentran en ella, con la idea de dar a conocer el efecto nocivo que se presenta en la misma. Para esto, se mencionan los distintos contaminantes que existen en la atmósfera de esta ciudad, hablando de algunos de los efectos ocasionados por su presencia, tanto en el ser humano, como en animales, plantas y en general a la sociedad. También se mencionan las concentraciones permitidas al ser humano de los distintos contaminantes, así como de su conversión a puntos IMECA y los criterios tomados en la ciudad para hacer planes de contingencia ambiental. Al ser los óxidos de nitrógeno uno de los puntos principales de este trabajo, se da énfasis en sus efectos, además de mostrar ampliamente los mecanismos de formación de los mismos. Estos mecanismos servirán al trabajo para determinar las concentraciones de óxidos de nitrógeno en las simulaciones realizadas.

#### 2.1. CONTAMINACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

La contaminación es un problema internacional originado por el constante incremento poblacional, y por lo mismo, el aumento en la construcción de recursos que satisfagan las necesidades básicas de la misma gente. El desarrollo constante de nuevas tecnologías, el aumento de fábricas que elaboran desde los productos básicos de satisfacción humana hasta los más sofisticados, el aumento del parque vehicular, necesario para moverse en una urbe muy grande y llevar bienes y servicios necesarios a toda la población, estas son algunas de las razones por las cuales se han creado las mismas fuentes que ocasionan el daño que presenta nuestra ciudad, así como miles en todo en el mundo. En esta ocasión se hablará específicamente del problema ocasionado por la contaminación atmosférica en la misma.

Se debe recordar del capítulo anterior que el aire en concentraciones promedio está formado aproximadamente por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de varias sustancias más (dióxido de carbono, vapor de agua, etc.), pero al estar esas sustancias en concentraciones mayores a las consideradas como normales, es cuando se está hablando de un problema de contaminación.

En la atmósfera existen ciclos de gases atmosféricos, los cuales comprenden una serie de procesos físicos y químicos, además de los formados por la propia atmósfera en procesos

químicos (fotoquímica), y los formados por actividad biológica como actividades industriales y humanas.

La atmósfera se encarga de eliminar los gases en concentraciones normales, por procesos físicos tales como la formación de partículas de mayor tamaño (aglomeración), sedimentación y asimilación del agua y de la tierra.

## 2.2. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

Como ya se mencionó, por contaminante se conoce a cualquier sustancia que esté en cantidades mayores a las consideradas como normales, dependiendo del lugar donde se realice este criterio y de las condiciones climatológicas. Los contaminantes atmosféricos se dividen en dos grandes grupos:

- a) Contaminantes primarios. Son aquellos que tienen su origen directamente en la fuente generadora de emisiones.
- b) Contaminantes secundarios. Son aquellos originados por la interacción química (fotoquímica) entre los contaminantes atmosféricos principales y los componentes normales de la atmósfera en presencia o ausencia de la luz solar.

La información sobre el tipo y cantidad de los contaminantes primarios se realiza en términos de especie química y estado físico en que se encuentran mientras que para los contaminantes secundarios se pueden realizar mediciones en la atmósfera.

Los contaminantes secundarios resultan de las siguientes reacciones químicas en la atmósfera:

1. Reacciones térmicas en fase gaseosa. Proviene de la colisión de las moléculas con los niveles de energía apropiados. Son el tipo normal de reacciones químicas.
2. Reacciones fotoquímicas. Implican la disociación o excitación de una molécula una vez que ésta ha absorbido radiación ultravioleta directa.

A continuación se mencionarán los contaminantes principales de la atmósfera y los efectos que tienen sobre el cuerpo humano y sobre las plantas y animales.

## 2.2.1. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EN LA SALUD.

### 2.2.1.1. Óxidos de azufre.

Tienen su origen en la combustión de hidrocarburos fósiles (carbón de distinta calidad y aceites minerales), así como la descomposición y la combustión de materia orgánica. Todos estos combustibles pueden llegar a contener hasta un 6% de azufre. Con la combustión, el azufre se reintegra a la atmósfera como bióxido y trióxido de azufre ( $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$  respectivamente).

El  $\text{SO}_3$  reacciona casi inmediatamente con el agua de la combustión con hidrocarburos, para formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), el cual a su vez se combina a nivel atmosférico con gotas de agua (rocío) para dar origen a una solución del mismo ácido, denominada lluvia ácida.

El bióxido de azufre es altamente soluble y por lo tanto es absorbido por los conductos húmedos del sistema respiratorio superior. Exposiciones de  $\text{SO}_2$  mayores a 1 ppm (partes por millón) producen constricción de vías respiratorias. Con la presencia de partículas en el aire la reacción irritante provocada por el  $\text{SO}_2$  se triplica debido a que dichas partículas en suspensión lo transportan hasta el fondo de los pulmones. Las consecuencias a su exposición prolongada son bronquitis y cáncer pulmonar [1].

En lo que respecta a las plantas, altos niveles de  $\text{SO}_2$  dañan sus células, seguidos por daños en la palizada. El ataque inicial aparece con el agua succionada después de secarse, en las áreas afectadas aparecen colores blanquicos o amarillentos. Los daños en las hojas aparecen con valores de 0.3 ppm para exposiciones de 8 h aproximadamente. Para exposiciones prolongadas de 0.3 a 0.5 ppm, se pueden provocar daños internos a las plantas que pueden acabar con ellas.

Como ácido, al ser causante de la lluvia ácida, el azufre puede ocasionar la corrosión de metales y debilitamiento o desintegración de textiles, papel y mármol, además el sulfuro de hidrógeno ennegrece las pinturas hechas a base de plomo en los interiores, y cambia la acidez del suelo, matando a la vegetación.

### 2.2.1.2. Compuestos de carbono.

#### 2.2.1.2.1. Óxidos de carbono.

Los más importantes son el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El  $\text{CO}$  es un gas incoloro, inodoro y no irritante, pero muy tóxico. Es el producto de combustiones incompletas de sustancias orgánicas (carbón y combustibles fósiles) cuando el oxígeno es insuficiente.

Naturalmente se produce por erupciones volcánicas, descomposición de clorofila, incendios forestales y acción microbiológica en océanos. El hombre lo produce por incendios, producción de acero y principalmente por los gases de escape de los automóviles. En la estratósfera es destruido por reacciones fotoquímicas [2].

El bióxido de carbono es un componente normal del aire y parte del ciclo de carbono de la biósfera, es el producto normal de combustiones de toda materia orgánica (carbón, petróleo y gas natural) o de la descomposición biológica.

Las moléculas del  $\text{CO}_2$  tienen la propiedad de absorber la radiación infrarroja del sol ayudando a evitar un exceso de calentamiento en la superficie terrestre. Sin embargo, en grandes concentraciones puede llegar a perjudicar este proceso normal y contribuir al calentamiento global, al calentar directamente al aire atmosférico.

El monóxido de carbono afecta la capacidad de la sangre para transportar oxígeno. Durante su funcionamiento normal, las moléculas de hemoglobina contenida en los glóbulos rojos de la sangre transportan oxígeno que se intercambia por el dióxido de carbono en los vasos capilares que unen las arterias y las venas.

El CO es relativamente insoluble y llega fácilmente a los alveolos pulmonares junto con el oxígeno. El CO se difunde a través de las paredes alveolares y compite con el oxígeno por uno de los cuatro átomos de hierro de la molécula de la hemoglobina. El átomo de hierro es 200 veces más afín al CO que al oxígeno, por lo que tiene una gran ventaja en la competencia de moléculas de hemoglobina [3].

Cuando una molécula de hemoglobina adquiere una molécula de CO se convierte en carboxihemoglobina (COHb) disminuyendo la capacidad total de la sangre de llevar oxígeno a las células. Los daños al organismo pueden ir desde una ligera intoxicación hasta el ocasionar la muerte

#### 2.2.1.2.2. Hidrocarburos y aldehídos.

Los hidrocarburos y los aldehídos tienen efectos tóxicos mucho mayores cuando son aspirados al árbol traqueobranqueal que cuando simplemente se han ingerido. Aspirar una cantidad pequeña como un mililitro puede provocar una neumonitis arrolladora. La presencia de bencena en la gasolina aumenta su toxicidad.

Los productos destilados del petróleo son solventes de las grasas y alteran la función de los nervios produciendo depresión, estado de coma y algunas convulsiones. Los efectos sobre el hígado, riñones y médula ósea, pueden ser debidos a la presencia de productos contaminantes como el benceno. Debido a que los hidrocarburos y aldehídos, en su mayoría, tienen baja tensión superficial y baja viscosidad (especialmente cuando son destilados del petróleo), por lo que pequeñas cantidades se extenderán sobre grandes superficies como el pulmón [4].

### 2.2.1.3. Oxidantes fotoquímicos,

#### 2.2.1.3.1. Ozono.

Es un componente normal de la atmósfera y del aire que respiramos en concentraciones de hasta 12 ppm, es un gas incoloro, su concentración aumenta con la altura, es venenoso para el organismo humano. Es una sustancia sumamente reactiva, compuesta por tres átomos de oxígeno.

La mayor parte del ozono se encuentra en una capa a 20 km de la superficie terrestre y con un ancho de 5 km. Esta capa retiene la mayor parte de la luz ultravioleta que llega al planeta desde el sol y comúnmente se le denomina ozonósfera. Al llegar la luz del sol, la energía de la luz ultravioleta de longitud de onda corta rompe el enlace de algunas moléculas de ozono. Los átomos de oxígeno libres son muy inestables, por lo que al encontrarse dos de ellos se unirán para formar moléculas de oxígeno. La luz ultravioleta de onda larga al chocar con esta nueva molécula pierde su energía y ya no alcanza a llegar a la superficie del planeta. Normalmente el ozono desaparece al reaccionar con los hidrocarburos, pero en ciudades muy contaminadas como la Ciudad de México, y en presencia de vapores oxidantes como los óxidos de nitrógeno, esto no sucede, y al contrario propicia que se forme el smog oxidante [5].

En concentraciones de 0.1 ppm el ozono puede afectar la capacidad pulmonar, así como provocar un envejecimiento acelerado de tejidos pulmonares por oxidación de ciertos compuestos en las proteínas. Irrita ojos y garganta y disminuye la capacidad para realizar ejercicios físicos.

El ozono no permite a las plantas verdes llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, blanquea y vitrifica algunas plantas como la lechuga y la alfalfa. En general provoca la muerte de muchas plantas en concentraciones excesivas. Por último, el ozono produce grietas en el caucho.

#### 2.2.1.3.2. Nitratos de peroxiacilo.

Algunos miembros de esta familia son el nitrato de peroxiacilo (PAN) y el nitrato de peroxibenzoilo (PBZN). Estos irritan los ojos, y presentan muchas similitudes al ozono, en cuanto a efectos sobre plantas y seres humanos.

#### 2.2.1.4. Contaminantes minerales diversos.

##### 2.2.1.4.1. Plomo.

Los efectos tóxicos más graves del plomo son sobre el encéfalo y sistema nervioso periférico. En envenenamiento agudo, los hallazgos patológicos incluyen inflamación de la mucosa gastrointestinal y degeneración de los túbulos renales. En la intoxicación crónica con plomo, ocurren edema cerebral y degeneración de los nervios y las células musculares. Puede haber infiltración celular alrededor de los capilares y arteriolas [6].

Su fuente son las fábricas que preparan o utilizan este metal en estado de fusión. En la atmósfera su presencia se debe a la adición de compuestos orgánicos en los combustibles líquidos para motores de automóviles, los cuales confieren un cierto poder antidetonante en las gasolinas. El plomo se encuentra en el gas de escape en forma de metal, de óxido e incluso de compuestos que reaccionaron con otros constituyentes (halogenados, por ejemplo).

##### 2.2.1.5. Partículas en suspensión.

Las partículas se distinguen tanto por su composición química como por su tamaño. Se les denomina aerosoles. Los aerosoles se dividen en fuentes primarias y fuentes secundarias. Los aerosoles primarios son emitidos directamente de la fuente en forma de partículas, como el polvo en suspensión y las emisiones de las chimeneas en las industrias. Los secundarios consisten en partículas suspendidas producidas en la misma atmósfera, por reacciones químicas gaseosas que producen especies consideradas como partículas, las cuales son muy pequeñas en comparación a las producidas por las fuentes primarias. Una gran parte de la materia orgánica producida por el hombre se da en forma de humo y cenizas provenientes de la combustión del carbón, petróleo, madera y basura.

Las partículas, arrastradas a grandes velocidades por el viento producen una erosión destructiva de las superficies de las construcciones. En el ser humano se acumulan partículas muy pequeñas en los alveolos pulmonares producen cáncer, además de que ocasionan infinidad de enfermedades a las vías respiratorias [7].

##### 2.2.1.6. Óxidos de nitrógeno.

Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) importantes en la contaminación de la atmósfera y en las reacciones que forman los oxidantes atmosféricos, incluyen al óxido nítrico ( $\text{NO}$ ), el cual es un gas incoloro; dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), gas color pardo; trióxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ), gas incoloro; ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y peróxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ), gas incoloro.

Los estudios ambientales en hombres han empleado  $\text{NO}_2$ , ya que es razonablemente estable y pueden establecer y reproducir las condiciones especiales que se desean estudiar. El olor y sabor de este compuesto puede detectarse con 1 ppm durante 1 hora por individuos experimentados. Ocurren molestias torácicas a concentraciones de 1 a 15 ppm durante 1 hora; la sensación se vuelve muy desagradable con una concentración de 25 ppm. Después de un minuto a 55 ppm, los sujetos tienen dolor subesternal. Exposiciones mayores a esta concentración provocan cambios inflamatorios en los pulmones, que por lo general son irreversibles. Concentraciones mayores causan la muerte, siendo la principal manifestación la disnea [8].

Por último, los óxidos de nitrógeno, al combinarse con el agua de la atmósfera forman ácidos (nitríco y nitroso, principalmente), y al precipitarse a la superficie terrestre en forma de lluvia ácida, provocan infinidad de malestares a la población, ya sea directa (lesiones en la piel, infecciones estomacales, caída del cabello, irritación de ojos, etc.) o indirectamente (daños en el acabado de edificios, principalmente en los antiguos, desprendimiento de la pintura de vehículos y casas, corrosión en metales, etc.).

### 2.3. LIMITES PERMITIDOS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

Para saber qué cantidad de sustancias en la atmósfera se consideran contaminantes, se hace uso de las normas emitidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), las cuales determinan la dosis mínima de cada sustancia existente en el ambiente a la cual el organismo humano comienza a tener síntomas de alguna enfermedad o algún malestar.

A continuación se muestran los límites permitidos en el cuerpo humano de los contaminantes atmosféricos.

TABLA 2.1 LIMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS [9].

CONTA-MINANTE	OZONO	$\text{NO}_2$	$\text{SO}_2$	CO	PLOMO	PST	PM10
VALOR MÁXIMO PERMITIDO	0.13 partes por millón (ppm)	0.21 ppm	0.13 ppm	13 ppm	1.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	275 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Donde  $\text{NO}_2$  es el bióxido de nitrógeno;  $\text{SO}_2$ , bióxido de azufre; CO, monóxido de carbono; PST, partículas suspendidas totales; PM10, partículas suspendidas menores a 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y el valor indicado es el máximo que puede emitir una fuente para que no se vea afectado el organismo humano.

## 2.4 ÍNDICE METROPOLITANO DE LA CALIDAD DEL AIRE (IMECA).

En la Ciudad de México los contaminantes principales son los que muestran en la tabla 2.1. y observamos los valores máximos de exposición, es decir, una cantidad mayor a la indicada, logrará que el organismo humano empiece a sentir molestias y se presenten síntomas de varias enfermedades y/o insuficiencias en el organismo.

Sin embargo, presentar los valores arriba mostrados a la opinión pública, no mostraría realmente la magnitud del problema, además de que no son tan fáciles de entender los valores mostrados si no se conoce lo suficiente de sistemas de unidades. Es por esto que se creó en México el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), el cual es un índice que nos permite comprender más fácilmente el comportamiento de los contaminantes y su incremento, es decir, encontrar un contaminante en cantidades fuera de la norma.

Este índice se fija de la siguiente manera: a cada uno de los valores mostrados en la tabla 2.1. se les asigna el valor de referencia de 100 IMECA, y éste es llamado el valor de la norma, es decir, 100 IMECA es el límite de cualquier contaminante que el organismo humano puede tolerar antes de empezar a manifestar malestares. Si se obtienen valores arriba de 100 IMECA, entonces es cuando se está presentando un efecto de contaminación en la atmósfera.

Sin embargo, no es tan fácil como parece. ya que conocemos solamente el IMECA correspondiente a la norma, pero cualquier otro valor mayor o menor a la misma, no se determina por algún método conocido, y para esto se crearon una serie de ecuaciones para determinar los IMECA, y éstas son distintas para cada uno de los contaminantes y no son lineales. Estas ecuaciones son conocidas como los algoritmos para el cálculo del IMECA y se muestran a continuación:

TABLA 2 2 CONVERSIÓN DE PARTES POR MILLÓN O MICROGRAMOS POR METRO CÚBICO A PUNTOS IMECA

{10}

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN	ECUACIÓN A UTILIZAR
PST	0 a 275 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IMECA PST = 0.36363636 X CONCENTRACIÓN DE PST
PST	275 a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IMECA PST = 0.55172413 X CONCENTRACIÓN DE PST-51.72413
SO <sub>2</sub>	0 a 0.13 ppm	IMECA SO <sub>2</sub> = 769.230769 X CONCENTRACIÓN DE SO <sub>2</sub>
SO <sub>2</sub>	0.13 a 1.0 ppm	IMECA SO <sub>2</sub> = 459.770114 X CONCENTRACIÓN DE SO <sub>2</sub> - 40.22989

CO	0 a 13 ppm	IMECA CO = 7.69230769 X CONCENTRACIÓN DE CO
CO	13 a 50 ppm	IMECA CO = 10.8108109 X CONCENTRACIÓN DE CO - 40.545
NO <sub>2</sub>	0 a 0.21 ppm	IMECA NO <sub>2</sub> = 476.190476 X CONCENTRACIÓN DE NO <sub>2</sub>
NO <sub>2</sub>	0.21 a 2 ppm	IMECA NO <sub>2</sub> = 223.463687 X CONCENTRACIÓN DE NO <sub>2</sub> + 53.07264
OZONO (O <sub>3</sub> )	0 a 0.11 ppm	IMECA O <sub>3</sub> = 909.090909 X CONCENTRACIÓN DE O <sub>3</sub>
OZONO (O <sub>3</sub> )	0.11 a 0.6 ppm	IMECA O <sub>3</sub> = 816.32653 X CONCENTRACIÓN DE O <sub>3</sub> + 10.20409

TABLA 23. CONVERSIÓN DE PUNTOS IMECA A PARTES POR MILLÓN Y MICROGRAMOS POR METRO CÚBICO [11].

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN	ECUACIÓN A UTILIZAR
PST	0 a 100 IMECA	CONCENTRACIÓN DE PST = IMECA PST / 0.36363636
PST	100 A 500 IMECA	CONCENTRACIÓN DE PST = (IMECA PST + 51.72413) / 0.55172413
SO <sub>2</sub>	0 a 100 IMECA 0	CONCENTRACIÓN DE SO <sub>2</sub> = IMECA SO <sub>2</sub> / 769.230769
SO <sub>2</sub>	100 A 500 IMECA	CONCENTRACIÓN DE SO <sub>2</sub> = (IMECA SO <sub>2</sub> + 40.22989) / 459.770114
CO	0 a 100 IMECA	CONCENTRACIÓN DE CO = IMECA CO / 7.69230769
CO	100 A 500 IMECA	CONCENTRACIÓN DE CO = (IMECA CO + 40.545) / 10.8108109
NO <sub>2</sub>	0 a 100 IMECA	CONCENTRACIÓN DE NO <sub>2</sub> = IMECA NO <sub>2</sub> / 476.190476
NO <sub>2</sub>	100 A 500 IMECA	CONCENTRACIÓN DE NO <sub>2</sub> = (IMECA NO <sub>2</sub> - 53.07264) / 223.463687
OZONO (O <sub>3</sub> )	0 a 100 IMECA	CONCENTRACIÓN DE O <sub>3</sub> = IMECA O <sub>3</sub> / 909.090909
OZONO (O <sub>3</sub> )	100 A 500 IMECA	CONCENTRACIÓN DE O <sub>3</sub> = (IMECA O <sub>3</sub> - 10.20409) / 816.32653

## 2.5. SITUACIÓN AMBIENTAL EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

El criterio en la Ciudad de México para determinar si existe contaminación excesiva como para aplicar planes de contingencia ambiental, se basa en la siguiente escala:

TABLA 2.4. CRITERIOS DE CALIFICACIÓN PARA CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

[12]

IMECA	CALIDAD DEL AIRE
0-100	SATISFACTORIA
100-200	NO SATISFACTORIA
200-300	MALA
300-500	MUY MALA

Como ya habíamos comentado, la norma indica que 100 IMECA es el límite que puede aceptar el organismo humano Sin que empiece a sufrir de algún sintoma o afección, pero los criterios en la Ciudad de México no toman alguna medida cuando se rebasa éste valor. La tabla 2.5 nos muestra el número de veces que se rebasó la norma (100 IMECA):

TABLA 2.5 DÍAS POR AÑO EN LOS CUALES SE REBASÓ LA NORMA (100 IMECA) EN LA CIUDAD DE MÉXICO [13]

AÑO	DÍAS QUE SE REBASÓ LA NORMA
1988	67
1989	19
1990	86
1991	192

Es importante hacer notar que no es sino hasta concentraciones de 225 IMECA cuando se considera que se está en una situación de peligro para la salud, y por lo tanto se toman una serie de medidas parte del llamado Plan de Contingencia Ambiental, como es el doble "Hoy no circula" y la reducción en los procesos industriales a un 75 % de su capacidad. Pero sin embargo, realizar estas medidas sólo hasta que se alcanzan límites exageradamente altos, ha hecho que poco a poco las autoridades se olviden que los daños a la salud se presentan desde valores de 100 IMECA, y es necesario que se apliquen medidas para su reducción aún más estrictas que las existentes en la actualidad.

## 2.6. MECANISMOS DE FORMACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO.

Ya que el estudio principal de este trabajo se enfoca hacia las emisiones de óxidos de nitrógeno y los métodos usados para su reducción, es importante que se hable de los mecanismos de formación de los mismos, para explicar el comportamiento que estos presentan y su estrecha relación con los incrementos de temperatura en su formación.

### 2.6.1 Oxido nítrico (NO):

El óxido nítrico (NO) es el óxido de nitrógeno predominante, el cual se produce en los cilindros del motor. La principal fuente de NO es la oxidación del nitrógeno atmosférico, sin embargo la oxidación de cualquier combustible que contenga nitrógeno o que se oxide con aire (el cual contiene nitrógeno), será una fuente de NO.

Los mecanismos de formación de los óxidos de nitrógeno han sido ampliamente estudiados y se conocen como mecanismos de Zeldovich<sup>1</sup>. En una combustión cercana a la estequiométrica, las reacciones de formación de óxidos de nitrógeno a partir de del nitrógeno molecular son [14]:



La siguiente tabla nos presenta las velocidades de reacción para los mecanismos de formación de los óxidos de nitrógeno.

TABLA 2.6. CONSTANTES DE VELOCIDAD DE FORMACIÓN PARA MECANISMOS DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO [15].

REACCIÓN	CONSTANTES DE VELOCIDAD (k), cm <sup>3</sup> /mol*s	RANGO DE TEMPERATURAS, K	FACTOR DE INCERTIDUMBRE, %
(1) O + N <sub>2</sub> = NO + N	7.6 x 10 <sup>13</sup> exp (- 38,000/T)	2000 – 5000	2
(-1) N + NO = N <sub>2</sub> + O	1.6 x 10 <sup>13</sup>	300 – 5000	±20% a 300 K, 2 a 2000 – 5000 K

<sup>1</sup> Zeldovich fue el primero que estudió la importancia de estas reacciones.

(2) $N + O_2 = NO + O$	$6.4 \times 10^9 T \exp(-3150/T)$	300 – 3000	$\pm 30\%$ a 1000 K, 2 a 3000 K
(-2) $O + NO = O_2 + N$	$1.5 \times 10^9 T \exp(-19,500/T)$	1000 – 3000	$\pm 30\%$ a 1000 K, 2 a 3000 K
(3) $N + OH = NO + H$	$4.1 \times 10^{13}$	300 – 2500	$\pm 80\%$
(-3) $H + NO = OH + N$	$2.0 \times 10^{14} \exp(-23,650/T)$	2200 – 4500	2

La reacción de velocidad de formación del NO está dada por [15]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1^+[O][N_2] + k_2^+[N][O_2] + k_3^+[N][OH] - k_1^-[NO][N] - k_2^-[NO][O] - k_3^-[NO][H] \quad (2.4.)$$

Donde [ ] indica la concentración de los compuestos en moles por centímetro cúbico ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ). La tabla 2.6. nos indica los valores de  $k$ , expresados en moles por centímetro cúbico por segundo ( $\text{mol}/\text{cm}^3\text{s}$ ). Para el nitrógeno molecular se puede escribir una relación similar a la anterior [15]:

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1^+[O][N_2] - k_2^+[N][O_2] - k_3^+[N][OH] - k_1^-[NO][N] + k_2^-[NO][O] + k_3^-[NO][H] \quad (2.5.)$$

Dado que [N] es mucho menor que las concentraciones de otras sustancias de interés ( $\approx 10^{-8}$  fracción de mole), se puede aproximar a estado estable:  $d[N]/dt$  es igual a cero y podemos eliminar [N] de la ecuación anterior. La velocidad de formación del NO se convierte en [15]:

$$d[NO]/dt = (2k_1^+[O][N_2])^* / (1 + k_1^-[NO] / (k_2^-[O_2] + k_3^-[OH])) \quad (2.6.)$$

$$\text{Donde: } K = (k_1^+ / k_1^-)(k_2^- / k_2^+)$$

La formación de NO ocurre en el frente de la flama y en los gases postflama. La formación de NO en estos últimos es mayor que en los frentes de flama. Por lo anterior es conveniente

suponer que la combustión y la formación de NO puede ser dividida y aproximar las concentraciones de O, O<sub>2</sub>, OH, H y N<sub>2</sub> por sus valores de equilibrio a las condiciones de presión local y temperatura de equilibrio.

Definiendo la siguiente notación:  $R_1 = k_1^+ [O]_e [N_2]_e = k_1^- [NO]_e [N]_e$ , donde  $[ ]_e$  denota concentración de equilibrio; del mismo modo para velocidad de reacción de equilibrio de una ruta:  $R_2 = k_2^- [N]_e [O_2]_e = k_2^+ [NO]_e [O]_e$  y  $R_3 = k_3^+ [N]_e [OH]_e = k_3^- [NO]_e [H]_e$ . Substituyendo  $[O]_e$ ,  $[O_2]_e$ ,  $[OH]_e$ ,  $[H]_e$  y  $[N_2]_e$  por  $[O]$ ,  $[O_2]$ ,  $[OH]$ ,  $[H]$  y  $[N_2]$  en la ecuación anterior [16]:

$$d[NO]/dt = \{ 2R_1 (1-[NO]/[NO]_e) \} / \{ (1+[NO]) / [NO]_e (R_1 / (R_2+R_3)) \} \quad (2.7.)$$

Los valores típicos de  $R_1$ ,  $R_1/R_2$  y  $R_1/(R_2 + R_3)$  se dan en la tabla 2.7. a continuación:

TABLA 2.7. VALORES TÍPICOS DE  $R_1$ ,  $R_1/R_2$  Y  $R_1/(R_2 + R_3)$  [16].

RELACION DE EQUIVALENCIA	$R_1^*$	$R_1/R_2$	$R_1/(R_2 + R_3)$
0.8	$5.8 \times 10^{-5}$	1.2	0.33
1.0	$2.8 \times 10^{-5}$	2.5	0.26
1.2	$7.6 \times 10^{-6}$	9.1	0.14

La fuerte dependencia entre la formación del NO puede ser demostrada considerando el valor inicial de  $d[NO]/dt$  cuando  $[NO]/[NO]_e \ll 1$ . La ecuación anterior se convierte en [16]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2 R_1 = 2 k_1^+ [O]_e [N_2]_e \quad (2.8.)$$

La concentración de equilibrio del oxígeno atómico está dada por [16]:

$$[O]_e = K_{p(O)} [O_2]_e^{1/2} / RT^{1/2} \quad (2.9.)$$

Donde  $K_{p(O)}$  es la constante de equilibrio para la reacción [17]:

$$\frac{1}{2} O_2 = O \quad (2.10.)$$

Y está dada por [17]:

$$K_{p(O)} = 3.6 \times 10^3 \exp(-31,090/T) \text{ atm}^{1/2} \quad (2.11.)$$

Combinando las tres últimas ecuaciones y con  $k_1^*$  de la tabla 2.6. tenemos que [17]:

$$d[NO]/dt = (6 \times 10^5 / T^{1/2}) \exp(-69090/T) [O_2]^{1/2}_e / [N_2]_e \quad \{\text{mol/cm}^3 \cdot \text{s}\} \quad (2.12.)$$

Como se puede observar, altas temperaturas y altas concentraciones de oxígeno resultan en grandes velocidades de formación de NO. La siguiente figura nos muestra el comportamiento de la velocidad de formación de NO en función de una temperatura de los gases de salida y una relación de equivalencia combustible/aire en los gases postflama. Para una combustión adiabática a presión constante, la velocidad de formación del NO es un pico a la composición estequiométrica, y disminuye rápidamente cuando la mezcla se vuelve pobre o rica.

Un tiempo característico para el proceso de formación del NO,  $\tau_{NO}$ , se define como [17]:

$$\tau_{NO}^{-1} = \frac{1}{[NO]_e} \frac{d[NO]}{dt}$$

(2.13.)

[NO] puede ser obtenido de la constante de equilibrio [18]:

$$K_{NO} = 20.3 \times \exp(-21,650/T) \quad (2.14.)$$

Por la reacción [18]



Como  $[\text{NO}]_e = (K\text{NO}[\text{O}_2]_e [\text{N}_2]_e)^{1/2}$ . De esta forma podemos reordenar la ecuación que determina  $\tau$  de la siguiente manera [18]:

$$\tau_{\text{NO}} = \frac{8 \times 10^{-16} T \exp(58,300 / T)}{p^{1/2}}$$

(2.16.)

Donde  $\tau$  está en segundos, T en Kelvin y p en atmósferas. La Fig. 2.1. [18] nos muestra las concentraciones de NO medidos en una bomba cilíndrica de medición en un cilindro de alta presión. Se puede ver que la concentración de NO aumenta considerablemente desde valores cercanos al cero, por lo que a grandes presiones la formación de NO es casi despreciable.

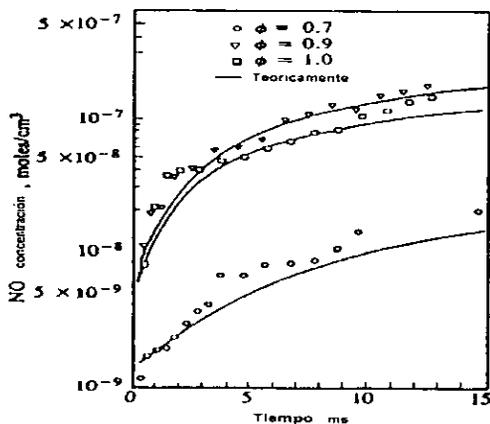


FIGURA 2.1.  
CONCENTRACIONES DE NO EN UNA BOMBA  
EXPERIMENTAL DE ALTA PRESIÓN

Si obtenemos las concentraciones de equilibrio para el oxígeno y el hidrógeno de la siguiente forma [19]:

$$k_{eO} = \frac{[O]}{[O_2]^{1/2}}$$

(2.17.)

$$k_{eH} = \frac{[OH][O]}{[H][O_2]}$$

(2.18.)

Además, si de la ecuación (2.8.), en lugar de usar las concentraciones en equilibrio usamos la siguiente aproximación [20]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O]$$

(2.19.)

Con la ecuación (2.17.) al sustituirla en la (2.19) podemos obtener una relación más sencilla para obtener las concentraciones de NO [20]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1 k_{eO} [N_2][O_2]^{1/2}$$

(2.20.)

### 2.6.2. Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

A temperaturas típicas de flama, las relaciones NO<sub>2</sub>/NO pueden ser despreciablemente pequeñas, lo cual resulta ser cierto al experimentar con motores de gasolina (no así para motores diesel, donde el NO<sub>2</sub> ocupa de un 10 a un 30 % de las emisiones de NO<sub>x</sub> [29]). El NO formado en

la zona de flama puede ser rápidamente convertido a  $\text{NO}_2$  por medio de las siguientes reacciones [21]:



Ocurren reacciones subsecuentes de  $\text{NO}_2$  a  $\text{NO}$  de la siguiente forma [21]:



La figura 2.2. muestra emisiones de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  en un motor a combustión interna. El valor máximo para la relación  $\text{NO}_2/\text{NO}$  para éste es de 2% con una relación de equivalencia de 0.85. Es común medir el total de emisiones de óxidos de nitrógeno, es decir  $\text{NO}$  más  $\text{NO}_2$ , con un analizador de quimiluminiscencia y llamar a la combinación  $\text{NO}_x$ . Para hacer esto es muy importante verificar si esos datos de  $\text{NO}_x$  están dados en términos de masa de  $\text{NO}$  o de  $\text{NO}_2$ , que tienen una masa molecular de 30 y 46 respectivamente.

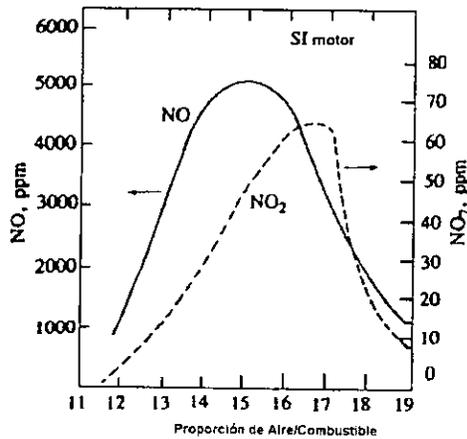


FIGURA 2.2.  
CONCENTRACIONES DE  $\text{NO}$  Y  $\text{NO}_2$  COMO FUNCIÓN  
DE LA RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE

### 2.6.3. Formación de NO en motores de combustión interna encendidos por chispa.

En los motores convencionales de combustión interna, el aire y la gasolina (y los gases reciclados) son mezclados vigorosamente en el sistema interno del motor dentro del cilindro durante el proceso de admisión. Es decir, la relación aire/combustible y la cantidad de diluyente (cualquier gas de escape reciclado) hacen una mezcla casi uniforme a través de la carga dentro del cilindro durante la combustión. En este motor las mezclas que arden primero son comprimidas a mayores temperaturas después de la combustión; como la presión del cilindro continúa aumentando, la mezcla que arde después es comprimida primero como una mezcla no quemada y finaliza después de la combustión a una temperatura menor del gas quemado. La siguiente figura nos muestra presiones medidas de un motor en operación, estimando la fracción de la masa quemada ( $x_b$ ) y la temperatura de un elemento del gas que arde exactamente después de la descarga de la chispa y un elemento del gas que arde al final del proceso de combustión

Si el modelo cinético de formación del NO es usado para calcular concentraciones de NO en esos elementos de gas quemado, usando las concentraciones de equilibrio del O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, OH y H correspondientes al promedio de la relación de equivalencia y fracción de gas quemado de la mezcla con esos perfiles de temperatura y presión, se obtienen los perfiles de concentración a velocidad limitada mostrados en la figura 2.3.c. También se muestran aquellas que corresponderían al equilibrio químico a esas condiciones. Las concentraciones a velocidad controlada aumentan a partir de la concentración de NO del gas residual, retrasando los niveles de equilibrio, por lo que el cruce de estos y su congelamiento será arriba de los valores de equilibrio correspondientes a las condiciones del escape. La cantidad descompuesta a partir de los niveles pico de NO que ocurren durante la expansión dependen de las condiciones del motor y si la mezcla es quemada antes o después.

Una vez que la estructura del NO se ha estabilizado durante la primera parte de la carrera de expansión, la integración sobre todos los elementos se puede dar con la concentración final promedio del NO en el cilindro que es igual a la concentración de salida. Esto es, si  $\{NO\}$  es la fracción de masa local de NO, entonces el promedio de salida de la fracción de masas de NO está dada por [22].

$$\{NO_p\} = \int_0^1 \{NO\} dx_b \quad (2.23.)$$

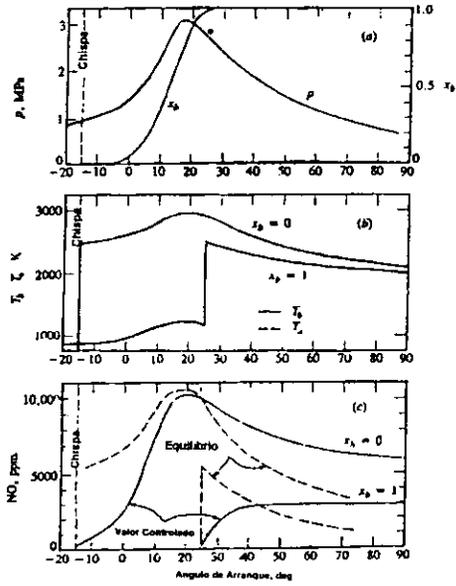


FIGURA 2.3 a, b y c.

MODELO DE FORMACIÓN DEL NO: (a) PRESIÓN DEL CILINDRO Y FRACCIÓN DE MASA QUEMADA  $x_b$ ; (b) TEMPERATURA DEL GAS NO QUEMADO  $T_u$  Y QUEMADO  $T_b$ ; (c) CONCENTRACIONES DE NO, TODAS COMPARADAS CONTRA EL ÁNGULO DE ENCENDIDO [23].

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 2

- [1] Quiñones Valenzuela, Alfonso. EL AMBIENTE EN LAS ALTERACIONES DE LA SALUD. Colegio de Bachilleres. Publicaciones Cultural. México. 1980. Pp. 194-195.
- [2] Idem, pp. 242-245
- [3] Idem, pp. 240-242.
- [4] Idem, pp. 175-182.
- [5] Idem, pp. 192-194.
- [6] Idem, pp. 225-226.
- [7] Idem, pp. 244-252
- [8] Idem, pág. 195-198
- [9] Red de Monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. INFORME ANUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE 1995. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. México. 1996. Pp. 8 – 16.
- [10] Idem. Pp. 24 – 25.
- [11] Idem. Pp. 25 – 26.
- [12] Idem. Pág. 30.
- [13] Idem. Pág. 35.
- [14] Heywood, John B. INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS. McGraw-Hill. USA. 1989. Pág. 572.
- [15] Idem. Pág. 273.
- [16] Idem. Pág. 274.
- [17] Idem. Pág. 275.
- [18] Idem. Pág. 276.
- [19] Ramos, J.I. INTERNAL COMBUSTION ENGINE MODELING. Hemisphere Publishing Corporation. U.S.A. 1989. Pág. 305
- [20] Idem. Pág. 306
- [21] Heywood, ob. cit., pág. 577.
- [22] Idem. Pág. 580.
- [23] Idem. Pág. 579.

# CAPÍTULO III.

## MEDIDAS Y MÉTODOS EMPLEADOS PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES.

En este capítulo se mencionará la forma de medir los contaminantes, específicamente de los óxidos de nitrógeno, además de la forma de reducir y eliminar contaminantes de la atmósfera. De manera un poco general se hablará de los planes y medidas aplicadas en la Ciudad de México para reducir las emisiones contaminantes, además de las tecnologías aplicadas en los vehículos automotores para lograr el mismo objetivo. Por último, para enfocarse al problema de los óxidos de nitrógeno, se mencionan los métodos usados y los que son técnicamente viables para poder reducir las emisiones de estos. Asimismo, se habla acerca de la carburación oxigenada, qué es, en qué consiste y las opciones que presenta para reducir emisiones de óxidos de nitrógeno.

### 3.1. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO [1].

3.1.1. Métodos manuales para NO y NO<sub>2</sub> Se les denomina de esta forma por que constantemente se tienen que estar cambiando los reactivos de forma manual, de igual forma la preparación de las sustancias que sirven como tales se tiene que realizar de esta forma y las mediciones se verifican constantemente de forma aislada.

#### 3.1.1.1. Método de análisis para dióxido de nitrógeno del Comité Intersociedad.

Este método está basado en el colorímetro de Griess Sattzman, y es el más sensible de varios métodos manuales disponibles para el análisis de NO<sub>2</sub>. El reagente absorbente consiste en una solución de ácido sulfanílico anhidroso, 140 ml de ácido glacial acético y 20 ml de una solución de N - (1-naftil) dihidroclorito de etilenodiamina por litro de agua destilada. Para muestras de aire con menos de 5 ppm de NO<sub>2</sub>, un flujo de la misma de 0.4 l /min es pasado a través de una burbuja de vidrio que contiene 10 ml del reagente absorbente por 10 a 30 minutos (o más) hasta que se haya conseguido un color final adecuado. Concentraciones mayores a 100 ppm deben medirse con 10 ml del reagente en la botella. Después de 15 minutos, usualmente se agita la botella hasta que se tenga una buena absorción y el color se descubra totalmente. La reacción con el NO<sub>2</sub> produce un color rojo - violeta. Después de esto se mide el color en un espectrofotómetro y los valores se calculan de la siguiente manera:

$$\text{NO}_2 \text{ (ppm)} = (\text{absortancia corregida}) \times (\text{K/V})$$

donde K es aproximadamente 0.73 para celdas de 1 cm y V es el volumen de aire introducido a la muestra en litros por mililitro del reagente.

#### 3.1.1.2. Método para NO<sub>2</sub> de La Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés).

Es una prueba de 24 horas para el dióxido de nitrógeno. La muestra de gas es pasada a través de un absorbedor que contiene un tubo de dispersión de gas con una punta porosa de 70 a 100 µm de diámetro, usando una solución 0.1 N de hidróxido de sodio (50 ml) como reagente. Un flujo de 0.20 litros/minuto es medido antes y después de la muestra por un medidor de flujo que determina el volumen de aire de la muestra. El análisis es mejorado reemplazando el agua perdida por evaporación durante la muestra, poniendo con la pipeta una cantidad de 10 ml del reagente en una probeta. A ésta se agregan 10 ml de una solución de ácido sulfanilamida-fosfórico y 1.4 ml de N-(1-naftil) dihidroclorito de etilenodiamina. Después de un intervalo de 10 minutos para que aparezca el color, la absortancia es medida a 540 nm contra un blanco. El rango de análisis es 0.04 a 1.5 µg de NO<sub>2</sub> / ml. Con 50 ml de reagente y una muestra a 200 ml por minuto durante 24 horas, el rango es 20 a 740 µg / m<sup>3</sup> (0.01 a 0.4 ppm) de NO<sub>2</sub>. La interferencia del dióxido de azufre es eliminada por la conversión al ácido sulfúrico por parte del peróxido de hidrógeno, previa al análisis. Por usar hidróxido de sodio como reagente, este método se vuelve menos eficiente.

#### 3.1.1.3. Método de Levaggi et al para dióxido de nitrógeno (promedio de 24 horas).

Es más confiable que los anteriores. El NO<sub>2</sub> es absorbido en una solución de trietanolamina acuosa. Esta solución contiene 15 g de trietanolamina y 3 ml de n-butanol por litro. Después se sigue el procedimiento del reagente de Griess-Saltzman y medido el color en un espectrofotómetro a 540 nm. El método puede ser usado con certeza en el rango de 0.005 a 0.50 ppm de NO<sub>2</sub>, en un periodo de 24 horas. No existe interferencia del dióxido de azufre en concentraciones mayores a 0.7 ppm si el peróxido de hidrógeno es añadido a la solución absorbente después de tomar la muestra y antes de revelarse el color. El ozono no causa interferencia en concentraciones mayores a 1000 µg/m<sup>3</sup> y el óxido nítrico no interfiere en concentraciones arriba de 0.6 ppm en un promedio de 24 horas. La eficiencia de absorción está en el rango de 95 a 99 %, usando 50 ml de la solución en un matraz de plástico.

#### 3.1.1.4. Procedimiento de arsenita de sodio para dióxido de nitrógeno.

El dióxido de nitrógeno es colectado pasando la muestra de aire a un flujo de 200 ml / minuto a través de 50 ml de una solución que contiene 4 g de hidróxido de sodio y 1 g de arsenita de sodio por litro de agua destilada. El método es conveniente para muestras recolectadas durante

24 horas en campo y análisis subsecuentes en el laboratorio. El ión nitrito es producido en la solución absorbente reacciona con peróxido de hidrógeno diluido, sulfanilamida, ácido fosfónico y N-(1-naftil) dihidroclorito de etilendiamina hasta formar una tintura y entonces se determina colorimétricamente. El rango de este método es de 0.04 a 2 µg de NO<sub>2</sub> / ml a un flujo de 200 l / min en 24 horas a través de 50 ml del reagente absorbente. El óxido nítrico puede constituir una interferencia aumentando la respuesta del NO<sub>2</sub> en un 5 a un 15% del NO<sub>2</sub> realmente presente.

#### 3.1.1.5. Método de ácido fenoldisulfónico para óxidos de nitrógeno.

Este método ha sido adoptado por la American Society of Testig Materials (ASTM), para el análisis de productos de combustión en el rango de 2 a 50 ppm de NO<sub>2</sub>. Este método está ampliamente establecido y fue primero empleado para la determinación del nitrato en el agua, aunque después se adaptó para la medición de óxidos de nitrógeno. El óxido nítrico (NO), el anhídrido nitroso (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el tetraóxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), el vapor o niebla de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y el ácido nitroso (HNO<sub>2</sub>), pero no el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), pueden ser colectados y oxidados al ión nitrato en una matraz que contenga ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno. El componente amarillo resultante de la reacción del ión nitrato con ácido fenoldisulfónico es medido colorimétricamente a 400 nm. Las aplicaciones de este método en el aire ambiental sólo toman lugar en zonas industriales donde las concentraciones de óxidos de nitrógeno están en el rango de 25 ppm por volumen o más. A niveles menores de concentración, la absorción de la muestra del gas por el reagente en el matraz es muy lenta e incompleta, incluso después de varios días. Nitratos inorgánicos, los nitritos y los compuestos orgánicos nitrados causan interferencias por resultados altamente eficientes. Los cloruros en concentraciones elevadas pueden ser eliminados añadiendo nitrato de plata, ya que causan interferencias negativas.

#### 3.1.1.6. Método del xilenol para óxidos de nitrógeno.

En este método la muestra de aire es recolectada en un matraz conteniendo 62.5 % de ácido sulfúrico y el reagente absorbente. Después de reposar por dos horas, una gota (0.05 ml) de permanganato de potasio al 2 % es añadido al matraz y vigorosamente mezclado con el ácido sulfúrico de forma que se oxide cualquier ácido nitroso presente en el ácido nítrico. 0.02 ml de 2,4, xilenol al 1% disuelto en propilen-glicol es añadido para formar el compuesto de xilenol nitrado. Después de un periodo de 10 minutos de la nitración, la mezcla es diluida con 100 ml de agua destilada y el nitroxilenol es destilado en 25 ml de agua fría con 1 ml de hidróxido de sodio al 2 %. Del destilado resultante teñido de amarillo se separan 10 ml que después se analizan en el espectrofotómetro a 435 nm. Este método se aplica en el rango de 2 a 500 ppm del nitrato. Este método es más eficiente que los anteriores y las sustancias presentes no presentan interferencia alguna.

3.1.2. Métodos de monitoreo continuo para NO y NO<sub>2</sub>. Se les denomina de esta forma por que la realización de las pruebas se tiene para periodos largos de tiempo, en los cuales los aparatos de medición tienen que estar calibrados y preparados para el tiempo que dure funcionando dicho monitoreo.

Los analizadores continuos por colorimetría para la medición de NO y NO<sub>2</sub> en el aire ambiental normalmente operan en el rango de 0.01 a 2 ppm. Una muestra mensurable de un flujo es puesta en contacto con un flujo de un reagente líquido para producir un color correspondiente al del NO<sub>2</sub>. El óxido nítrico es transformado en dióxido de nitrógeno por un oxidante sólido en el tren de pruebas corriente arriba del absorbedor. Este oxidante está compuesto de pelets impregnados de trióxido de cromo tal cual se indica en los métodos manuales mencionados anteriormente. La solución del líquido absorbente es el reagente de Griess - Saltzman. Un fotómetro de grabación mide los cambios en la absorbancia del reagente líquido o tinte a 550 nm. La escala del aparato puede ser ajustada a los valores de concentración del NO<sub>2</sub>.

En la técnica de espectrometría se tiene la absorción de una banda en el espectro visible o en el ultravioleta conteniendo espectros rotacionales o vibracionales que son comparados con una réplica de esta banda espectral almacenada dentro del espectrómetro. Cada espectrómetro tiene un patrón de longitud de onda de 2.5 m que ha sido probado en distintos lugares del mundo. Sin embargo este método resulta ser más caro que la colorimetría o la quimiluminiscencia.

Actualmente se tiene también la técnica de rayo láser, en la cual se usa el mismo para la detección de contaminantes gaseosos en el aire, usando un detector de mercurio - cadmio sensitivo, enfriado en nitrógeno líquido. Para el óxido nítrico en el rango de ppm, se ha empleado un láser con radiación infrarroja en el rango de un espectrómetro óptico - acústico.

De igual forma se tiene un analizador infrarrojo de dispersión, el cual usa un rayo simple, de longitud de onda dual. Este rayo pasa a través de una celda simple y es enfocado a la hendidura de entrada de un receptor monocromático. La radiación incidente es dispersada por un plato discordante. Dos longitudes de onda adyacentes, una donde la muestra absorbe y otra donde no, son medidas alternativamente y después son relacionadas (se dividen). La concentración de NO es proporcional a esta relación,  $I / I_0$ .

#### 3.1.2.1. Análisis para N<sub>2</sub>O por cromatografía de gases.

Una columna de gel sílico, activada por calentamiento durante 5 horas a 160 °C, es empleada para concentrar el N<sub>2</sub>O en la muestra de gas. Para remover el dióxido de carbono se introduce un cartucho de carbonato de sodio entre la muestra en el interior y la columna de gel. Durante el muestreo de aire a 500 ml / minuto, la concentración de la columna de gel (tubo en U,

30 cm x 6 mm), es sumergida en un matraz de Dewar lleno con acetona y hielo seco (-70 °C). El N<sub>2</sub>O es deabsorbido de la columna primero, inyectando helio, y después sumergiendo la columna de concentración en agua a temperatura del cuarto y conectando una columna de separación.

La columna de separación (10.5 x 6 mm) contiene una fase mezclada de 19 % de carbonato de polipropileno y 16.5 % de glutaronitrilo. Helio, a un flujo de 60 ml / minuto es utilizado como el gas de transporte a 20 °C. El pico de aire aparece 6 minutos después y el pico de N<sub>2</sub>O después de 13 minutos. Cuando la concentración de la muestra de aire es de 10 litros, el límite de detección de N<sub>2</sub>O es 0.05 ppm.

### 3.2. ANÁLISIS DE ORSAT.

Éste es un análisis por absorción química que se hace en base seca. Normalmente se obtiene un análisis que incluye a los siguientes productos en volumen: CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO y N<sub>2</sub> (éste último por balance). Los reactivos que se utilizan para la absorción son el hidróxido potásico, el ácido pirogálico y el cloruro cuproso, que absorben el CO<sub>2</sub>, el O<sub>2</sub> y el CO respectivamente.

Durante mucho tiempo, este método fue uno de los más utilizados para determinar la concentración de gases de escape tanto en fuentes fijas como móviles, pero tiene varias desventajas este método, como lo es el manejar muestras, lo que imposibilita el monitoreo continuo, y la pobreza del análisis, ya que es muy limitado. Con el uso de este análisis es posible determinar la ecuación de combustión, la relación aire/combustible y el exceso de aire; también puede determinarse la composición media del combustible.

En caso de conocerse el combustible, el exceso de aire puede calcularse aproximadamente conociendo los porcentajes de CO<sub>2</sub> y CO en base seca de la siguiente manera [2]:

$$\% EA = 100 \left\{ \frac{(\text{CO}_2)_s}{(\text{CO}_2 + \text{CO})} - 1 \right\}$$

(3.1.)

### 3.3. CONTROL DE EMISIONES VEHICULARES EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

En la Ciudad de México, existen 2.5 vehículos por cada 10 habitantes [3], lo que representa el cuarto lugar en densidad vehicular de los países de la cuenca del Pacífico, sólo atrás de las ciudades de Los Angeles, Taipei y Bangkok, con 6.6, 5.1, y 3.9 vehículos por cada 10

habitantes, respectivamente. Esto nos da una idea de la cantidad de vehículos existentes, y por ende de las emisiones emitidas a la atmósfera por este medio. Desde 1986 que se creó la Ley General de Equilibrio Ecológico, en la cual se prevén a corto plazo infinidad de proyectos, se han tomado muchas medidas en la Ciudad de México para contrarrestar la contaminación. Algunas de éstas se presentan a continuación:

#### 3.3.1. Mejoramiento en la calidad ambiental debido a los combustibles [4].

- a) De 1986 a 1993 se redujo en un 92% el nivel de plomo en la gasolina.
- b) En 1989 surgieron las gasolinas oxigenadas.
- c) En 1990 surgió la gasolina sin plomo MAGNA SIN.
- d) En 1992 se establecieron normas de calidad ambiental para gasolinas (aromáticos, olefinas, bencenos, presión de vapor, etc.).
- e) En 1993 se cambiaron las Normas Técnicas Ecológicas (NTE), a Norma Oficial Mexicana (NOM), teniendo éstas mayor peso y validez.
- f) En 1991 el combustófeo se sustituyó por diesel, con menos de 2% de azufre (para las industrias).
- g) En 1992, se empezó a usar gas LP para microbuses y transporte de carga.
- h) En 1993 se creó el Diesel SIN con 0.05% de azufre y control de aromáticos.
- i) En 1993 se empezó a usar el gas natural comprimido para vehículos de uso intensivo.
- j) Desaparece la gasolina Nova y se crea la gasolina PREMIUM, en 1996.

#### 3.3.2. Más y mejor transporte colectivo y vehículos ambientalmente limpios [4].

- a) 1989 a la fecha, incremento en las líneas del metro.
- b) Vehículos nuevos con convertidor catalítico de tres vías (1991).
- c) Sustitución de taxis viejos por taxis MAGNA SIN (1991).
- d) Microbuses nuevos MAGNA SIN (1991).
- e) Motores nuevos y de baja emisión para autobuses urbanos (1991).
- f) En 1989 se pone en marcha el programa "Hoy no circula".
- g) En 1991 se procede a la detención de vehículos ostentosamente contaminantes.
- h) En 1993 se procede a la verificación vehicular (V V) con analizador BAR-90 (Analizador de emisión de gases computarizado).
- i) En 1993 se procede a la verificación de vehículos dos veces por año.

- j) En 1998 se pone a discusión la opción de canje de vehículos anteriores al año de 1980, por parte del gobierno de la Ciudad de México, por vehículos eléctricos. Este programa actualmente es opcional, pero la intención es que para el año 2000 se haga obligatorio por lo que no podrían circular los vehículos anteriores a 1980.

#### 3.3.3. Modernización Industrial y Control de Emisiones [4].

- a) En 1989 se implanta el uso del Gas Natural en las termoeléctricas y las industrias.
- b) En 1991 se procede al cierre de la refinería "18 de Marzo".
- c) Verificación Industrial obligatoria (1992).

#### 3.3.4. Restauración Ambiental del Valle de México [4].

- a) De 1990 a 1993 se plantaron 33 millones de árboles en el Valle de México.
- b) Se extendió el vivero de la Ciudad de México (18 millones de árboles por año).
- c) De 1989 a 1993 se duplicaron las áreas verdes.

#### 3.3.5. Investigación, Educación y Participación Ciudadana [4].

- a) De 1990 a la fecha se tienen investigaciones conjuntas del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y del Laboratorio Nacional de los Alamos (EUA).
- b) De 1989 a la fecha se ha investigado y creado programas de certificación en el laboratorio de emisiones del IMP.
- c) Desde 1989 se ha recibido apoyo técnico por parte de Estados Unidos, Inglaterra, Alemania, Francia, Canadá y Japón.
- d) De 1992 a la fecha se realizan investigaciones en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el centro científico de IBM y el Departamento del Distrito Federal (DDF).
- e) Se han realizado planes de Educación Ambiental.
- f) Por medio de la televisión, radio, medios impresos, etc., se han enviado mensajes ambientales de concientización a toda la población.
- g) Desde 1996 funciona el Laboratorio de Control de Emisiones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Asimismo, en 1986 la Red Automática de Monitoreo Atmosférico entró en funcionamiento para medir continuamente, hora tras hora, las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

### 3.4. EQUIPOS USADOS PARA REDUCIR CONTAMINANTES.

Las emisiones en los motores de combustión interna se reducían de dos formas: a) mejorando los combustibles utilizados (disminuyendo el nivel de plomo, azufre, nitrógeno y fósforo y b) eliminando los contaminantes que se encuentran en los gases producto de la combustión. Para el segundo caso se cuenta actualmente con los siguientes sistemas: convertidores catalíticos (oxidan HC y CO y reducen los NO<sub>x</sub>), reactores térmicos (oxidan HC y CO) y filtros para partículas (se usan en los motores diesel).

#### 3.4.1. Convertidores catalíticos.

Su primera aplicación fue en la industria química, pero se utilizaron en motores de combustión interna hasta mediados de la década de los 70's. La catálisis es una reacción química heterogénea, la cual se acelera mediante un agente externo. En este proceso se tienen de manera simultánea fenómenos de transferencia de masa y calor. Un catalizador es el agente químico que va a alterar la velocidad de reacción sin sufrir algún cambio. En la catálisis no existe dependencia entre la concentración de los reactantes y la velocidad de reacción. Para los vehículos automotores, el control de emisiones contaminantes se hace con una combustión catalítica para completar el proceso de combustión y acercarlo lo más posible al proceso ideal.

Los convertidores catalíticos utilizados en los motores encendidos por chispa consisten de un material catalítico activo dentro de una estructura metálica diseñada para esto, y por donde los gases producto de la combustión fluyen a través del lecho catalítico. Los materiales activos utilizados para la oxidación del CO y HC y la reducción de los NO<sub>x</sub> deben ser distribuidos en una superficie amplia para que se cumpla la transferencia de masa entre la fase gaseosa y la superficie catalítica activa, para que de esta manera permita una eficiencia de conversión cercana al 100%. La figura (3.1.) muestra un esquema con los dos tipos de convertidores catalíticos existentes. El primero muestra un convertidor catalítico por oxidación, el cual oxida hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono a agua y bióxido de carbono. El segundo muestra un convertidor catalítico de tres vías, el cual reduce óxidos de nitrógeno a nitrógeno y oxígeno. Además oxida hidrocarburos y monóxido de carbono a agua y bióxido de carbono. Un sistema emplea una estructura cerámica de tipo panal de abeja sostenida en un recipiente metálico. Los materiales catalíticos se encuentran impregnados en alúmina de gran porosidad, la cual tiene un espesor de aproximadamente 20 mm y se encuentra aplicada en las paredes de los pasajes del convertidor. El típico convertidor de

estructura monolítica tiene una sección transversal cuadrada de dimensiones interiores de aproximadamente 1 mm separado por una pared porosa de 0.15 a 0.3 mm. El número de pasajes por centímetro cuadrado varía de 30 a 60. La alúmina pesa el 15% del monolito con una superficie de 100 a 200 m<sup>2</sup>/kg.

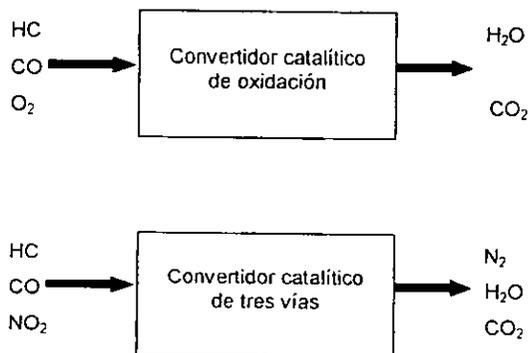


FIGURA 3.1.  
PROCESO DE CATALIZACIÓN POR OXIDACIÓN  
Y DE TRES VÍAS

El otro convertidor catalítico utiliza un lecho de pellets cerámicos de geometría esférica, los cuales dan una gran área superficial al contacto con el flujo. El metal noble que realiza la catalización está impregnado por una superficie porosa del pellet de alúmina de 3 mm de diámetro. El material de los pellets debe tener buena resistencia al impacto a la abrasión y soportar temperaturas del orden de 1000 °C. En estos convertidores el flujo debe ser turbulento, mientras que en los anteriores debe de ser laminar.

Los metales nobles, debido a su gran actividad intrínseca, son excelentes para utilizarse como catalizadores en los convertidores. Una mezcla de platino (Pt) y paladio (Pd) es lo más utilizado comúnmente. Como el comportamiento catalítico se muestra en la superficie, los metales nobles se deben distribuir finamente en la superficie de la alúmina la cual previene el contacto de una partícula con otra, con lo cual se evita el sinterizado. El tamaño de las partículas de los metales nobles en los catalizadores nuevos es de menos de 50 nm, y puede aumentar a 100 nm si el convertidor está expuesto a altas temperaturas de los gases de escape del vehículo.

Para altas temperaturas, la eficiencia de conversión en estado estable de una oxidación va del 98 al 99% para el CO y 95% o más para los HC. La catalización no es efectiva sino hasta temperaturas mayores de 250 °C. Se utiliza el término "light-off" para nombrar la temperatura a la cual la eficiencia de la catalización es superior al 50%.

### 3.4.2. Catalizadores de tres vías.

Para motores funcionando con relaciones aire/combustible cercanas a la estequiométrica, tanto la oxidación de CO y HC, como la reducción de NO<sub>x</sub> se pueden realizar en el mismo convertidor. La efectividad del catalizador trae consigo un estado cercano al equilibrio en la composición de los gases de escape, que sería una composición de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Suficientes gases reductores estarán presentes para actuar sobre el NO y suficiente oxígeno para oxidar los hidrocarburos y el CO. Estos dispositivos son llamados catalizadores de tres vías, ya que eliminan simultáneamente los tres contaminantes.

Es necesario trabajar no con un carburador ordinario para lograr esto, sino utilizar un sofisticado sistema de inyección electrónica de combustible, para mantener la relación correcta aire/combustible. Un sensor de oxígeno se coloca en el múltiple de escape para detectar cuando el motor se encuentra operando con una mezcla rica o pobre de acuerdo a la relación estequiométrica y manda una señal para ajustar al sistema de inyección la mezcla aire/combustible deseada.

La base que contiene a los materiales catalíticos debe tener las siguientes características:

- a) Alta resistencia mecánica a temperaturas elevadas.
- b) Resistencia al choque térmico.
- c) Bajo coeficiente de expansión térmico.
- d) Estabilidad química a altas temperaturas.
- e) Alta relación de área superficial/volumen.
- f) Ser inertes respecto a los gases que se forman o los subproductos.
- g) Bajo peso y costo.

Una desventaja de los convertidores de este tipo es que deben alcanzar cierta temperatura antes de llegar a la máxima eficiencia. Se necesitan dos minutos para lograrlo. Una opción para lograr buenas eficiencias es precalentar el convertidor, para que desde el encendido se tengan buenas eficiencias. Los convertidores se pueden calentar por los siguientes métodos:

- a) Catalizador calentado mediante electricidad.
- b) Catalizador calentado mediante un quemador.

- c) Catalizador con sustrato de adsorción.
- d) Catalizador con trampa para hidrocarburos.

### 3.4.3. Convertidores térmicos.

La oxidación de CO y HC puede realizarse después del múltiple de escape con un reactor térmico, que es una estructura alargada que se coloca a la salida del cilindro. Su función es mezclar rápidamente los gases producto de la combustión con aire secundario inyectado al puerto de escape (el motor debe operar con una mezcla rica para producir una atmósfera oxidante), esto se hace para regular la temperatura y la composición de los gases de escape, además se mantiene una temperatura suficiente para oxidizar la mayor cantidad de HC y CO que salga del cilindro.

Las temperaturas utilizadas en el reactor son 600 y 700 °C para el HC y CO respectivamente. La temperatura en el múltiple de escape no es suficiente como para lograr la reducción de emisiones. Para que la disminución se logre eficientemente, el reactor debe de ser diseñado para que se tengan pérdidas mínimas de calor, así como un tiempo máximo de residencia. Aislando térmicamente la coraza interior del reactor se puede lograr mantener en un mínimo las pérdidas de calor.

La eficiencia del reactor depende de la temperatura de operación, la disponibilidad de oxígeno en exceso mezclado en los gases de la reacción y el volumen del reactor. La temperatura de operación del reactor depende de la temperatura de entrada de los gases producto de la combustión, las pérdidas de calor y de la cantidad de HC, CO y H<sub>2</sub> que se quemen en el reactor. Los reactores que funcionan con gases producto de una mezcla rica en combustible y aire secundario dan una mayor reducción en las emisiones de HC y CO que aquellos reactores que trabajan con una mezcla pobre y sin aire secundario. Para una mezcla pobre, la temperatura de reactor es cientos de grados menor que si fuera una operación con mezcla rica, y por lo tanto se dificulta la reducción de emisiones de CO; para mezcla muy pobre, la reducción de HC es marginal.

## 3.5. DISPOSITIVOS PARA LA REDUCCIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO.

### 3.5.1. Recirculación de gases de escape (EGR – Exhaust Gas Recirculation).

Al aumentar la temperatura máxima de combustión, la concentración de óxidos aumenta. Durante la carrera de expansión la temperatura de los productos de combustión disminuye y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) no se descomponen debido a que son muy lentas las reacciones de descomposición y no tienen tiempo de completarse durante el desarrollo del ciclo. Debido a lo anterior es preciso reducir la temperatura de combustión, para poder reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>.

La disminución se puede conseguir, aparte de una correcta relación aire/combustible y un avance del encendido menor al normal, con la dilución de la carga aspirada por el motor con un gas o con una mezcla de gases inertes que no interfieran en la combustión. La siguiente gráfica nos muestra las curvas de reducción porcentual de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en función del gas recirculado para diferentes gases diluyentes, obtenidas experimentalmente en un motor monocilíndrico.

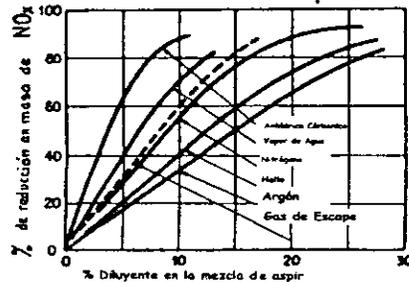


FIGURA 3.2.  
REDUCCIÓN DE  $\text{NO}_x$  AL RECIRCULAR  
DISTINTOS DILUYENTES [5].

La gráfica anterior nos muestra cuánto se reducen las emisiones óxidos de nitrógeno al recircular en el motor monocilíndrico distintos gases; como se puede ver, se pueden usar gases inertes como el argón y el helio, y otros como el vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno, sin embargo se puede observar que los gases de recirculación del escape son los que reducen en mayor cantidad a los óxidos de nitrógeno. El uso de los gases de escape es más conveniente y práctico, ya que una parte de ellos es reaspirada por el motor, obteniéndola en zonas adecuadas del motor.

Emissiones más bajas de  $\text{NO}$  consistentes de buenos consumos de combustibles (evitando las mezclas ricas en combustible) se obtienen con una mezcla estequiométrica con tanta dilución como el motor tolere sin deterioro en la calidad de combustión.

El uso de la recirculación de gases trae efectos negativos, como reducción de la potencia, ocasiona el engrase del lubricante y de las bujías superior al normal y puede provocar fenómenos de adherencia de los segmentos del pistón. Debido a esto el porcentaje de gas recirculado que se puede manejar es del 5 al 10 %, que reducen las emisiones de  $\text{NO}_x$  hasta en un 30%.

Para la recirculación el gas puede ser aspirado por el motor antes del filtro de aire o en la zona del carburador comprendida entre el difusor y la mariposa o, por último, directamente en el múltiple de admisión (Figura 3.3.).

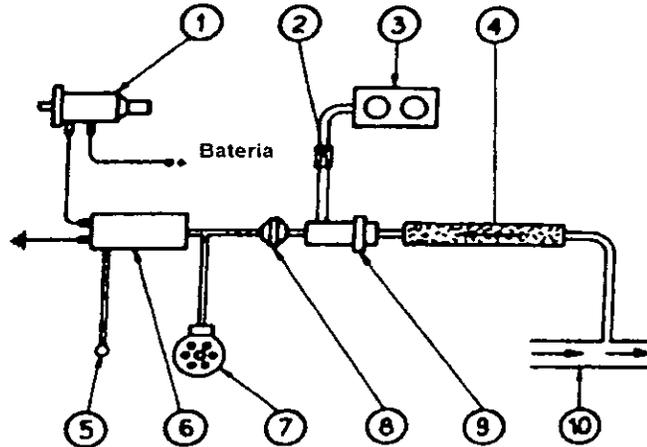


FIGURA 3.3.  
SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES [6].

En la figura 3.3, la numeración corresponde a lo siguiente: (1) interruptor comandado por la velocidad del motor, (2) agujero calibrado, (3) dispositivo de entrada de gas en el carburador, (4) enfriador de los gases, (5) toma de depresión, conducto de aspiración, (6) electroválvula de control de depresión, (7) distribuidor de encendido, (8) resorte de retorno, (9) válvula de cierre comandada por la depresión, (10) tubo de escape. Por último. La recirculación de gases inertes reduce la temperatura máxima del ciclo y la velocidad de combustión, lo que permite encendidos más avanzados y recuperar parte de la potencia perdida.

### 3.5.2. Reactores catalíticos para NO<sub>x</sub>.

La descomposición de los NO<sub>x</sub> es tan lenta que no puede producirse espontáneamente, sin embargo se puede completar la reacción de los NO<sub>x</sub> con hidrocarburos (HC), H<sub>2</sub>, CO, en presencia de catalizadores adecuados. Para que esta reacción pueda llevarse a cabo es necesario que las concentraciones de los diferentes productos cumplan lo siguiente [7]:

$$0.5 \% \text{ Vol. CO} + 0.5\% \text{ Vol. H}_2 + \% \text{ Vol. HC} = \% \text{ Vol. O}_2 \quad (3.3.)$$

Los catalizadores son similares a los utilizados para la reducción de CO de HC. Pueden usarse metales nobles (platino, paladio, rodio, rutenio, etc.), cromatos de cobre, todos sobre soportes granulares o monolíticos de alúmina.

Debido a que el plomo ataca al catalizador es necesario usar gasolinas sin plomo, con un número de octano alto ( $92 < NO < 94$ ). Las características más importantes de los catalizadores son:

1. Actividad prolongada en el tiempo.
2. Temperatura de activación.
3. Temperatura máxima de trabajo.

### 3.5.3. Variación de la relación aire/combustible.

Utilizando relaciones A/C ricas se logra una disminución en las emisiones de NOx. Esto se logra al producir bajas temperaturas en la cámara de combustión, sin embargo al hacerlo aumentan las emisiones de HC y CO (Figura 3.4.).

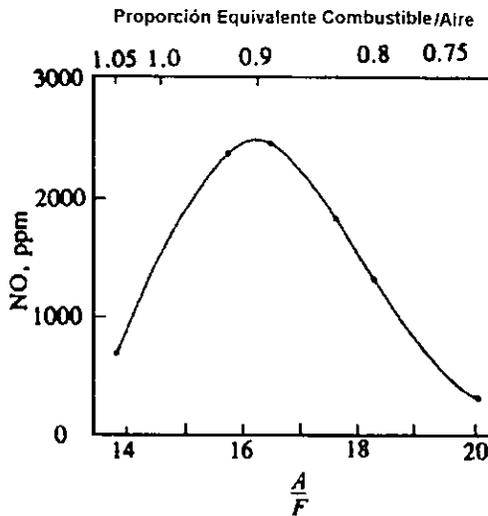


FIGURA 3.4.  
VARIACIÓN DE NO<sub>x</sub> EN FUNCIÓN DE LA  
RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE [8]

### 3.5.4. Modificando el avance (tiempo en el cual la bujía proporciona la chispa).

Retardando la chispa se reduce el tiempo disponible para la producción de altas temperaturas. Aumentando el tiempo en el que la combustión ocurre en el ciclo se incrementa el pico de presión del cilindro (ya que es quemado más combustible antes del TC (posición más alta de la biela) y el pico de presión se mueve más cerca del TC donde el volumen del cilindro es menor); retardando el tiempo disminuye el pico de presión del cilindro (ya que la mayor parte del combustible se quema después del TC). Picos de presión más altos en el cilindro producen picos en las temperaturas de gas quemado y por lo tanto, mayor producción de NO. Para picos de presión menores en el cilindro, se produce menor cantidad de NO. La figura (3.5.) muestra niveles de emisión de NO típicos para un motor de combustión interna como una función del tiempo de encendido (chispa). Los niveles de emisión de NO disminuyen cuando el tiempo de encendido es retardado del tiempo MBT (antes del punto más alto de la biela) y movido cerca del TC. Dado que la determinación exacta del MBT es difícil (y no es crítico para el consumo de combustible y potencia donde la variación con el tiempo alrededor del MBT es poco notoria). Siempre hay considerable incertidumbre en las emisiones de NO al tiempo MBT. Incluso es posible tomar una referencia de tiempo, donde la chispa es retardada del tiempo MBT al punto donde el torque disminuye entre 1 y 2 % del valor máximo. Se necesita tener mucho cuidado con el tiempo de encendido para obtener una correcta medición de emisiones de NO bajo las condiciones de operación del tiempo MBT.

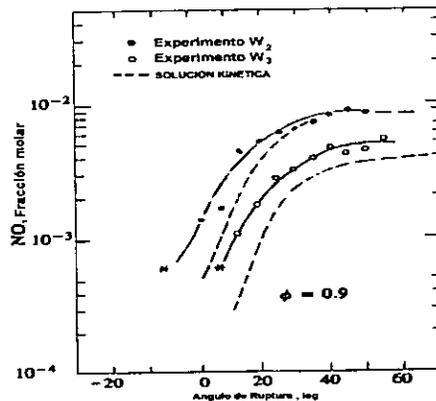


FIGURA 3.5.  
VARIACIÓN DE NO EN FUNCIÓN DEL ANGULO  
DE RUPTURA [9]

### 3.5.5. Modificando la relación de compresión.

Antes de la ignición, la mezcla aire-combustible es comprimida por el movimiento ascendente del pistón. Con una relación de compresión (cociente entre el volumen inicial y final de la cámara de combustión) pequeña, se producen bajas temperaturas en la cámara de combustión. Actualmente las relaciones de combustión se encuentran entre 8:1 y 8.5:1 para reducir las emisiones de NO, y facilitar el uso de gasolinas de bajo octanaje.

### 3.6. CARBURACIÓN OXIGENADA.

Este método de reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno es el tema principal de este trabajo, por lo que se hablará con detalle acerca del mismo. Como ya vimos en el capítulo 1, la composición promedio del aire es de 78% nitrógeno, 21% oxígeno y 1% de otros gases, como argón, xenón, dióxido de carbono, vapor de agua, etc. Esta composición varía mucho de un lugar a otro, entre otras cosas por la variación en la altura, la temperatura del lugar, y en general las condiciones ambientales del mismo. Sin embargo, para fines de estudio, se toman como valores fijos en el aire la cantidad de 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno.

Anteriormente se creía que el nitrógeno contenido en el aire no reaccionaba en la combustión, es decir, se creía totalmente inerte, pero con el tiempo se descubrió que debido a las altas temperaturas alcanzadas en la combustión, el nitrógeno se disociaba y procedía a formar óxidos de nitrógeno, uno de los contaminantes más nocivos en la atmósfera, especialmente en la Ciudad de México, además uno de los precursores en la formación de ozono, que en la atmósfera baja es el principal contaminante de esta ciudad.

Ahora bien, el proceso de la carburación oxigenada consiste en disminuir la concentración de nitrógeno en el aire, y aunque al hacer esto aumentara la temperatura de la cámara de combustión, con la consecuencia de obtener mayor disociación del nitrógeno, al tener menor cantidad del compuesto formador (nitrógeno), se lograría reducir la cantidad de óxidos de nitrógeno formados.

Reacciones en las que se involucre solamente el combustible y oxígeno como comburente, ya son ampliamente conocidas por los científicos, tal es el caso de la investigación en cohetes y proyectiles, en las que el comburente utilizado casi siempre es el oxígeno [10], y en esta reacción los productos de la combustión son únicamente vapor de agua y dependiendo del combustible, dióxido de carbono y/o otras sustancias.

Por lo anterior, el estudio en los siguientes capítulos consistirá en demostrar que al reducir la relación nitrógeno/oxígeno, ya sea deteniendo el nitrógeno o suministrando más oxígeno, se

pueden lograr reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno, observando al mismo tiempo el comportamiento de otros parámetros como la potencia y la eficiencia térmica.

Las opciones viables para lograr esta reducción se pueden dar de dos formas: la primera, y la que mayor potencial tiene para aplicaciones comerciales, es la utilización de membranas que logren retener el nitrógeno del aire, dejando pasar solamente la cantidad que nosotros necesitemos. La segunda forma es utilizando tanques de oxígeno que aumenten el contenido del mismo que lleva el aire, para lograr de la misma forma obtener la relación que necesitemos. Esta última alternativa es la que se utilizó para realizar las pruebas necesarias para el experimento.

Es importante hacer notar que el uso de membranas para disminuir la relación nitrógeno/oxígeno no es nuevo, y que investigadores como Kimura [11] ya han hecho investigaciones acerca del tema, pero con otro enfoque, el de la reducción del consumo de combustible y no la reducción de emisiones contaminantes, específicamente la de los óxidos de nitrógeno. Por esta razón, con las bases anteriormente establecidas, es que se realizarán las pruebas necesarias en los siguientes capítulos para demostrar que la carburación oxigenada es un método que tiene grandes opciones para poder reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 3.

[1] Stern, Arthur C. AIR POLLUTION. Third Edition. Volumen III. Measuring, Monitoring, and Surveillance of Air Pollution. Academic Press. U.S.A. 1976. Pp. 259-301.

[2] Medina H, Eduardo. APUNTES DE MÁQUINAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, 1995. Pág. 85.

[3] Sánchez Martínez, Sergio. CONTROL DE EMISIONES VEHICULARES. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación en el Valle de México. México, 1993.

[4] Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. AVANCES A SEPTIEMBRE DE 1993. Comisión Metropolitana para prevención y Control de la Contaminación en el Valle de México. México, 1994. Pp. 6 – 18.

[5] Giacosa, Dante. MOTORES ENDOTÉRMICOS. Ediciones Omega. Barcelona España. 1988. Pág. 522.

[6] Idem. Pág. 523.

[7] Idem. Pág. 524.

[8] Heywood, John B. INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS. Edit. McGraw-Hill. U. S. A. 1989. Pág. 582.

[9] Idem. Pág. 581.

[10] Sutton, Georges Paul. ROCKET PROPULSION ELEMENTS. John Wiley and Sons. USA. 1992. Pp. 205-207.

[11] Kimura, S.G. Browall, W.R. MEMBRANE OXYGEN ENRICHMENT. Journal of Membrane Science, 29 (1986) 69-77. Amsterdam, Netherlands.

## CAPÍTULO 4.

# SIMULACIÓN NUMÉRICA.

En el presente capítulo se muestra la simulación numérica realizada con los siguientes combustibles:

- a) Metano ( $\text{CH}_4$ )
- b) Propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ).
- c) Butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ).
- d) Benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ).
- e) Octano ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ).
- f) Cetano ( $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ).
- g) Metanol,  $\text{CH}_3(\text{OH})$  (Alcohol metílico)
- h) Etanol,  $\text{C}_2\text{H}_5(\text{OH})$  (Alcohol etílico).

La elección de estos combustibles para la simulación fue por que casi todos estos son de uso frecuente comercial, excepto el benceno, ya que la composición de la gasolina se puede aproximar a la del octano y la del diesel a la del cetano (aunque se sabe que los combustibles comerciales son una mezcla de una gran cantidad de hidrocarburos y aditivos. Además, el gas LP es una mezcla de propano y butano y otros combustibles, y el metanol y etanol se eligieron por tratarse de combustibles alternativos (alcoholes).

Esta simulación numérica sirvió para observar el comportamiento de la temperatura de flama adiabática en la combustión, al variar la relación nitrógeno/oxígeno. Dicha variación empezó desde la relación correspondiente al aire atmosférico, de 3.77 (21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno), hasta inyectar puro oxígeno (0% de nitrógeno). Con estas gráficas se obtuvo una idea de lo tanto que se puede elevar la temperatura (teóricamente), y sirvió para que al realizar la prueba experimental con el motor<sup>1</sup>, solamente se inyectara oxígeno hasta determinada cantidad, para que no se elevara la temperatura del motor hasta rangos donde se afectase la integridad del mismo. Pero estos cálculos no se concretaron a una mezcla estequiométrica, sino que también se procedió a hacer el mismo tipo de cálculo para excesos de aire del 50% ( $\phi=1.5$ ), 100% ( $\phi=2$ ), 150% ( $\phi=2.5$ ), 200% ( $\phi=3$ ) y 250% ( $\phi=3.5$ ).

---

<sup>1</sup> Ésta se muestra en el capítulo 5

Resumiendo lo anterior, se presentaron las gráficas para cada combustible, donde se muestra el comportamiento de la temperatura de flama adiabática al reducir la relación nitrógeno/oxígeno desde 3.76 hasta 0, para mezclas que van desde la estequiométrica, hasta un exceso de 250%.

Para la temperatura de flama adiabática se utilizaron los siguientes valores de entalpías de formación ( $\Delta h_f^\circ$ ) y entalpías de vaporización ( $h_{ig}$ ) siguientes:

- $\text{CH}_4$ ,  $\Delta h_f^\circ = -74,850 \text{ kJ/kmol}$ .
- $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\Delta h_f^\circ = -103,850 \text{ kJ/kmol}$ ,  $h_{ig} = 15,060 \text{ kJ/kmol}$ .
- $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\Delta h_f^\circ = -126,150 \text{ kJ/kmol}$ ,  $h_{ig} = 21,060 \text{ kJ/kmol}$ .
- $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\Delta h_f^\circ = 82,930 \text{ kJ/kmol}$ ,  $h_{ig} = 33,830 \text{ kJ/kmol}$ .
- $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ,  $\Delta h_f^\circ = -249,910 \text{ kJ/kmol}$ ,  $h_{ig} = 41,460 \text{ kJ/kmol}$ .
- $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ,  $\Delta h_f^\circ = -454,500 \text{ kJ/kmol}$ ,  $h_{ig} = 80,908 \text{ kJ/kmol}$ .
- $\text{CH}_3(\text{OH})$ ,  $\Delta h_f^\circ = -238,810 \text{ kJ/kmol}$ ,  $h_{ig} = 37,900 \text{ kJ/kmol}$ .
- $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ,  $\Delta h_f^\circ = -277,690 \text{ kJ/kmol}$ ,  $h_{ig} = 42,340 \text{ kJ/kmol}$ .

Además para obtener las entalpías a temperaturas dadas, del estado de referencia y entalpías de formación para los productos de la combustión (dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno, para exceso de aire) se utilizaron las tablas A-6M, A-7M, A-9M Y A-10M del Wark [1]. En estas tablas se encuentran los valores de las entalpías de formación para el nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua respectivamente para diversas temperaturas.

Con éstas y siguiendo un proceso estequiométrico, se realizó el cálculo de las temperaturas de flama adiabática, para el cual se tuvo que interpolar, de tal forma que se encontrase la temperatura a la cual la suma de las entalpías de formación de los reactivos fuese igual a la suma de la entalpía de los productos, en condiciones en las que no hubiese transferencia de calor fuera del sistema (adiabáticas). Para agilizar todos los cálculos anteriores se realizó una hoja de cálculo en Excel 97, misma con la cual se hicieron las gráficas.

Todos los resultados parciales se encuentran dentro de la misma hoja de cálculo. Finalmente, en el Apéndice A, de nombre – Resultados de la simulación numérica -, se muestran las tablas con los valores obtenidos de temperatura adiabática al variar la relación nitrógeno/oxígeno en los distintos combustibles. Además, en ese mismo apéndice aparecen las gráficas con los resultados obtenidos, que por ser muy ilustrativas, se incluyen aquí

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 4.

[1] Wark, Kenneth. TERMODINÁMICA. Editorial McGraw-Hill. Edición en español. México, 1991. Pp. 810.819.

## CAPITULO V. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS Y ANÁLISIS.

En este capítulo se va a mostrar el procedimiento realizado para obtener la parte experimental de este trabajo, por lo cual se menciona cómo fue la preparación de las pruebas, material y equipo utilizado, normas consultadas, pasos realizados y presentación de los resultados obtenidos al realizar las pruebas, así como un análisis que indique una interpretación funcional de los mismos.

### 5.1. Descripción del equipo utilizado para las pruebas.

#### 5.1.1. Motor (ver figura 5.1.).

Marca: Volkswagen.

Año: 1984

Cilindrada: 1600 cc, 4 cilindros opuestos, diámetro interno de 8.6 cm, carrera de 6.91 cm.

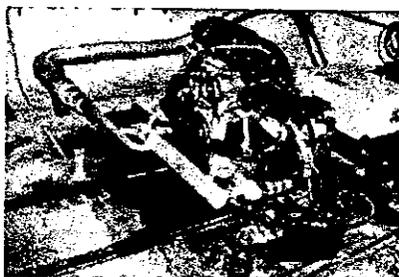


FIGURA 5.1.  
MOTOR VOLKSWAGEN UTILIZADO EN LAS PRUEBAS

5.1.2. Dinamómetro (ver fig. 5.2 para el tablero de control del dinamómetro y fig. 5.3. para el dinamómetro).

Marca: Clayton

Instrumentación Digital de Lectura modelo CD-2000, medición de velocidad de 0-19,999 RPM ó 0- 1,999 km/h. Potencia: 0- 1,999 HP ó 0 – 19,999 kW. Torque: 0-1999.9 lb.pie ó 0- 19,999 N.m con 0.015 % de incertidumbre en la lectura. La temperatura de operación es de 0 –122 °F (0-50 °C).

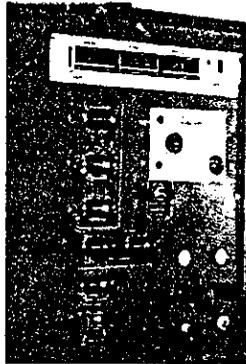


FIGURA 5.2.  
TABLERO DE CONTROL DEL DINAMÓMETRO

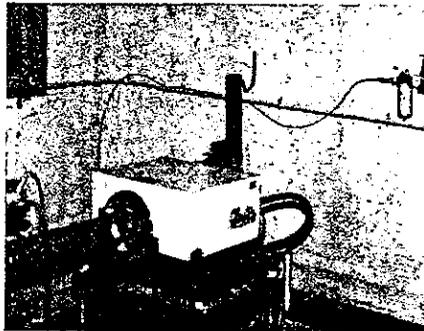


FIGURA 5.3.  
DINAMÓMETRO CONECTADO AL MOTOR

### 5.1.3. Rotámetro (medidor de flujo).

En la fig. 5.4. se aprecia la conexión del rotámetro al motor (señalada por una flecha), mientras que en la fig. 5.5. se observa la medición del flujo en el mismo rotámetro.

Capacidad: 30 pies cúbicos por hora a condiciones estándar.



FIGURA 5.4.  
CONEXIÓN DEL ROTÁMETRO AL MOTOR

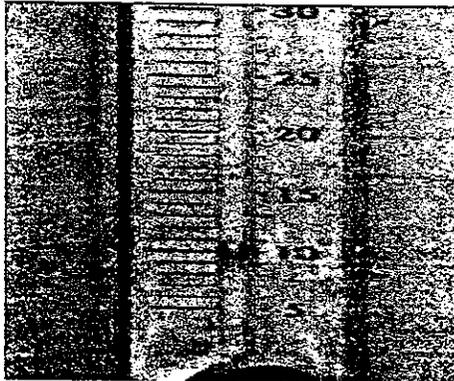


FIGURA 5.5.  
CARÁTULA DEL ROTÁMETRO MOSTRANDO  
UNA MEDICIÓN REALIZADA EN SCFH  
(Standard Cubic Feet per Hour)

5.1.4. Tanque de oxígeno:

Marca: Infra

Capacidad: 1 m<sup>3</sup>

5.1.5. Ventilador para enfriamiento. Se puede observar en las figuras 5.6 y 5.7, en una de frente y en la otra de perfil respectivamente. En ambas se encuentra señalado por una flecha.

Marca: EVISA, modelo AF, arreglo EHR.

Potencia: 0.5 HP A 1160 RPM

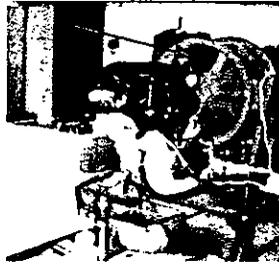


FIGURA 5.6.  
VENTILADOR UTILIZADO EN LAS PRUEBAS  
(INDICADO CON LA FLECHA)

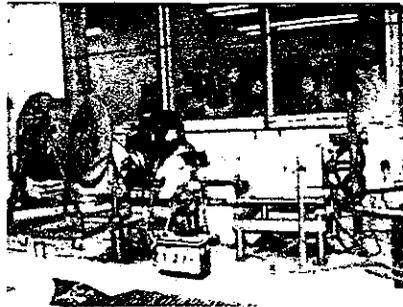


FIGURA 5.7.  
LABORATORIO DE PRUEBAS DONDE SE APRECIA  
EL VENTILADOR UTILIZADO

5.1.6. Analizador de emisiones. En la figura 5.8. se observa el analizador, junto con su base, vistos de frente, mientras que en la figura 5.9 se observa la carátula de mediciones en el preciso instante de estar realizando una de éstas.

Marca: AVL DiGas 4000

Ident. Number: AT0406E

Parámetros de medición. Rangos de lecturas que tiene el equipo:

- Velocidad de motor: 250 – 8000 rpm con 10 rpm de resolución.
- Temperatura de aceite: 0 – 120 °C con 1 °C de resolución.
- Emisión de CO: 0 – 10% por volumen con 0.01% por volumen de resolución.
- Emisión de CO<sub>2</sub>: 0 – 20% por volumen con 0.1% por volumen de resolución.
- Emisión de HC: 0 – 20,000 ppm por volumen con 1 ppm vol de resolución.
- Emisión de O<sub>2</sub>: 0 – 23% por vol. con 0.01 % por vol de resolución. Todas las anteriores se realizan dentro del aparato por luz infrarroja, excepto los NO<sub>x</sub>, los cuales son determinados por luminiscencia química.

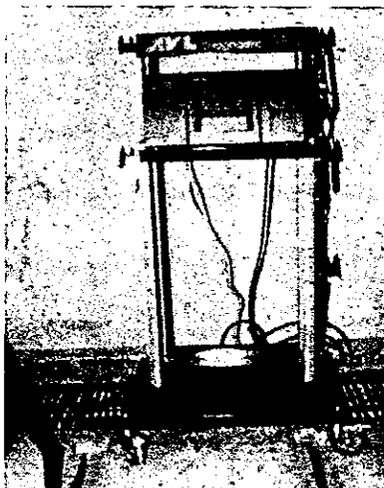


FIGURA 5.8.  
ANALIZADOR DE GASES AVL

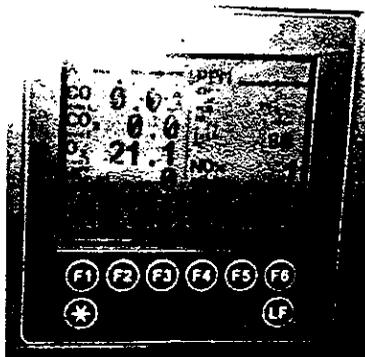


FIGURA 5.9.  
CARÁTULA DEL ANALIZADOR MOSTRANDO  
UNA MEDICIÓN REALIZADA

#### 5.2. Procedimiento para la realización de pruebas.

En el laboratorio de control de emisiones del Departamento de Termoenergía, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se procedieron a realizar las pruebas, en el motor que se encontraba acoplado al dinamómetro en un banco de pruebas. Una vez realizado lo anterior se conectó al tanque de oxígeno una manguera, la cual a su vez se conectaba a uno de los extremos del rotámetro, y por la salida de éste, se conectó otra manguera, misma que se insertó directamente al carburador del motor. Para realizar las pruebas se tomó como referencia el método para medición de emisiones " 18 pasos " para motores a gasolina, establecido por el Código Federal de Regulaciones [1], en el cual para una velocidad constante, se procede a variar el torque aplicado en el dinamómetro, estableciendo un tiempo para estabilización y un tiempo para medición. En el apéndice B se explica con todo detalle el procedimiento para realizar esta prueba.

Debido a la capacidad del tanque de oxígeno se redujo a la mitad de observaciones el método de los 18 pasos, es decir a 9 pasos (en realidad el método son dos series de 9 pasos, pero uno en condiciones tibias y otro con el motor caliente). Sin embargo, lo anterior sirvió para que se pudieran hacer mayor cantidad de observaciones variando la cantidad de oxígeno añadido al carburador.

Para regular la cantidad de oxígeno admitido, se abrió la válvula del tanque, y con el rotámetro, que tiene un regulador de apertura y cierre de flujo, se pudo variar la cantidad de oxígeno que pasaba, pero de una forma medible y controlable. Para obtener confiabilidad en las pruebas, cada una de ellas se repitió tres veces, y las que se realizaron fueron las siguientes:

- a) Motor bien carburado(en condiciones de operación normal), sin oxígeno.
- b) Motor bien carburado. 10 pies cúbicos por hora estándar de oxígeno inyectado.
- c) Mezcla rica (deficiencia de aire). 5 pies cúbicos por hora estándar de oxígeno inyectado.
- d) Mezcla rica (deficiencia de aire). 15 pies cúbicos por hora estándar de oxígeno inyectado.
- e) Mezcla rica (deficiencia de aire). 20 pies cúbicos por hora estándar de oxígeno inyectado.

Las unidades del flujo de oxígeno están dadas en pies cúbicos por hora estándar (a una Temperatura de 0 °C y 1 atm.) que es como lo mide el rotámetro, más adelante se hará la conversión a condiciones de la Ciudad de México y del Sistema Internacional. Las mediciones se realizaron de esa forma, porque al inyectar oxígeno con el motor bien carburado, la temperatura se incrementó bastante, y hubo riesgo de que no se pudieran seguir las pruebas por posibles daños al motor. Debido a esto, se decidió trabajar con deficiencia de aire para que no se dispararan las temperaturas y pudiese existir confiabilidad en los resultados y la posibilidad de hacer pruebas con varias cantidades de oxígeno suministrado. Sin embargo con esta deficiencia de aire no se muestran datos del motor trabajando sin añadirle oxígeno, debido a que en dichas condiciones el motor dejaba de funcionar, por lo que los resultados obtenidos son los realizados en las pruebas indicadas anteriormente.

Por último se conectó el analizador de gases, el cual tiene una boquilla que se inserta al medidor de aceite del motor (la cual nos mide la temperatura del aceite del motor, que es la mejor aproximación de la temperatura del mismo), además de una pipeta que se inserta en el tubo de escape del motor

Como una observación, al principio se intentó hacer una derivación del conducto de gases de escape del laboratorio hacia donde teníamos el analizador en el exterior, pero al realizarlo, se diluían bastante los gases de escape, por lo que de común acuerdo con los encargados del Laboratorio, se decidió reducir la tubería de gases de escape y hacer las pruebas lo más cercano al tubo de escape del motor para evitar errores en las lecturas o imprecisiones.

Para hacer la prueba, una vez encendido el motor, y el ventilador, se comenzaron a variar las condiciones del torque en el motor. Como es un dinamómetro viejo y accionado neumáticamente, el tiempo para llegar a los valores de torque establecidos por el Código Federal de Regulaciones, fue muy lento, aproximadamente de 10 minutos entre cambio y cambio, después de lo cual se tiene un tiempo de 35 segundos para estabilización, y 15 segundos para la toma de datos. Una vez estabilizados los valores de torque y velocidad en el dinamómetro, con las tolerancias indicadas, se anotaron de la consola del mismo las lecturas de torque, velocidad y potencia dentro del rango de tolerancia, así como flujo, temperatura y densidad del combustible. Con lo anterior se procedió a ir hacia el motor (la consola del dinamómetro se encuentra en un cuarto independiente al de pruebas), insertando la sonda en el tubo de escape y tomando lecturas en el analizador de gases de la temperatura del aceite, emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), al final de lo cual se retiraba la sonda regresando al tablero de mando del dinamómetro para volver a variar el torque en el motor (la sonda necesitaba ser retirada en cada ajuste al dinamómetro, porque el repentino cambio en la potencia del motor, da un repentino cambio en las emisiones, y éstas pueden descalibrar el analizador).

En la figura 5.10. se observa el cuarto donde se realizaron las pruebas, y con números se observa con mayor detalle el equipo utilizado: (1) ventilador para enfriamiento, (2) motor Volkswagen, (3) dinamómetro, (4) la flecha nos señala el tablero de control del dinamómetro, ubicado en el cuarto de control, (5) cuarto de control, separado del de pruebas por el cristal, protegido por una malla a prueba de impactos, (6), la flecha señala la manguera que estaba conectada, por un lado, al tanque de oxígeno, que no se ve en la foto por estar fuera del cuarto de pruebas por precaución, y por el otro, al rotámetro (no se observa en la figura), el cual a su vez está conectado al motor.

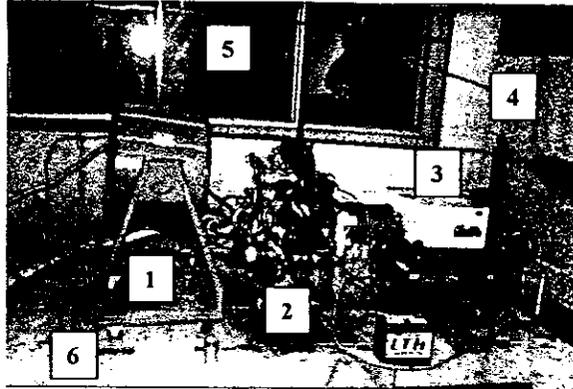


FIGURA 5.10.  
LABORATORIO DE PRUEBAS DE CONTROL DE  
EMISIONES DEL DEPARTAMENTO DE TERMOENERGÍA

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas.

### 5.3. Resultados obtenidos en las pruebas.

Antes de mostrar la tabla con los valores obtenidos de las mediciones, realizaremos la conversión de unidades del oxígeno inyectado, primero a unidades del Sistema Internacional y después a condiciones atmosféricas del Distrito Federal.

a) Relación de pies<sup>3</sup>/h a m<sup>3</sup>/h:

$$1 \text{ pies}^3/\text{h} = 0.028317 \text{ m}^3/\text{h}$$

b) De la ley del gas ideal:

$$P_s/\rho_s T_s = P_a/\rho_a T_a$$

Donde P es la presión, T es la temperatura y  $\rho$  es la densidad, el subíndice - s - indica condiciones estándar y el subíndice - a - condiciones atmosféricas de la Ciudad de México. Por lo anterior, la densidad corregida quedaría:

$$\rho_a = P_a \rho_s T_s / P_s T_a$$

Y como la masa del combustible permanece constante, podemos convertir esta relación a una función del flujo volumétrico:

$$V_a = V_s / (P_s T_s / P_a T_a)$$

$$Q_a = Q_s / (P_s T_s / P_a T_a)$$

Donde Q es el flujo volumétrico.

$$Q_a = (0.028317 \times Q_s) / (P_s T_s / P_a T_a) \quad (5.1.)$$

Que es la relación que nos transforma directamente de la lectura medida en el rotámetro a  $m^3/h$  en condiciones de la Ciudad de México, siendo el valor 0.028317 el factor de conversión de pies cúbicos por hora estándar, a metros cúbicos por hora en esta ciudad. De esta forma tenemos que:

$$P_s = 1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$T_s = 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ }^\circ\text{K}$$

$P_a = 76208.7 \text{ Pa}$  (presión atmosférica en la Ciudad de México), valor obtenido experimentalmente en los laboratorios de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería.

$$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ }^\circ\text{K} \text{ (temperatura del laboratorio)}$$

$$Q_s = 0, 5, 10, 15 \text{ y } 20 \text{ pies}^3/\text{h}$$

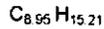
$$Q_a = 0, 0.0975, 0.195, 0.2926 \text{ y } 0.39 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (utilizando la fórmula 5.1.)}$$

De la misma forma, se necesitaba obtener la relación nitrógeno/oxígeno para cada uno de los distintos experimentos, para lo cual se hizo un balance y se planteó la reacción. Hay que recordar que los datos obtenidos en el analizador de gases están dados en base seca, es decir, son porcentajes de emisiones sin incluir el agua de los productos, por lo que en realidad los porcentajes de emisiones van a variar al incluirla en el balance:



A partir de esta ecuación, se procedió a encontrar la cantidad de nitrógeno,  $N_2$  (igual a 1-productos en base seca). Para el primer grupo de resultados (sin inyección de oxígeno), se encontró el valor de g (coeficiente del agua), y después de esto se calcularon nuevamente las fracciones molares de los productos, pero ahora en base húmeda, es decir, tomando en cuenta el

agua a la salida (tablas 5.6. a 5.10.). A continuación se tomó una media de los valores y algebraicamente se calculó la composición aproximada del combustible, que se muestra a continuación:



Composición aproximada del combustible (gasolina) utilizada.

Con lo que se ve que muestra una relación hidrógeno/carbono de 1.7, la cual no está muy alejada de la presentada por Heywood [2], que es de 1.87. Para este combustible se tiene una relación aire /combustible estequiométrica de 14.3, misma que nos servirá después para obtener otros resultados. Con la composición del combustible se realizó un balance para las demás pruebas, con la finalidad de obtener la relación nitrógeno/oxígeno utilizada en cada prueba. Ésta se calculó de los productos, que ya conocíamos, y se dividió la cantidad de nitrógeno entre el oxígeno de los distintos componentes del mismo. De esta forma encontramos los siguientes resultados:

- a) Condiciones normales (sin inyección de oxígeno):  $N_2 = 3.772 O_2$ .
- b) Deficiencia de aire, inyectando  $0.0975 m^3/h$  de oxígeno:  $N_2 = 3.691 O_2$
- c) Condiciones normales, inyectando  $0.195 m^3/h$  de oxígeno:  $N_2 = 3.757 O_2$
- d) Deficiencia de aire, inyectando  $0.2926 m^3/h$  de oxígeno:  $N_2 = 3.589 O_2$
- e) Deficiencia de aire, inyectando  $0.39 m^3/h$  de oxígeno:  $N_2 = 3.636 O_2$

O lo que es igual: 21 %, 21.32 %, 21.02 %, 21.79 % y 21.57% de oxígeno para a), b), c), d) y e) respectivamente.

MODO	TORQUE DEFINIDO lb.pie	TORQUE REAL lb.pie	VELOCIDAD RPM	POTENCIA AL FRENO HP	FLUJO DE COMBUSTIBLE lb/min	DENSIDAD COMBUSTIBLE gr/cm3	TEMPERATURA COMBUSTIBLE ° F	EMISION CO2 % vol	EMISION CO % vol	EMISION HC ppm vol	EMISION O2 % vol	EMISION NOx ppm vol	TEMPERATURA ACEITE ° C
1	0.0	0.0	798	0.00	0.06	0.660	83.2	4.3	5.13	217	10.80	3	96
2	7.5	7.7	1986	26.69	0.10	0.666	82.3	6.8	2.13	48	9.80	44	98
3	16.5	16.4	1919	54.93	0.08	0.655	82.3	6.6	2.14	49	9.70	74	101
4	7.5	7.7	2086	28.03	0.10	0.651	82.3	6.5	2.10	50	9.80	43	104
5	3.0	3.3	2086	12.03	0.08	0.657	82.2	7.0	1.80	50	10.00	31	100
6	7.5	7.5	1914	25.05	0.10	0.659	81.7	6.5	2.04	53	9.50	40	98
7	27.0	27.3	2015	96.01	0.10	0.659	81.1	6.6	1.37	41	10.40	131	100
8	7.5	7.6	2073	27.50	0.07	0.660	81.3	6.3	2.40	54	9.80	39	105
9	0.0	0.0	803	0.00	0.12	0.670	81.4	4.5	5.92	244	9.80	4	100
1	0.0	1.1	810	1.56	0.00	0.660	83.0	4.4	5.56	220	10.70	6	97
2	7.5	7.5	2050	28.83	0.10	0.666	82.1	6.8	2.22	50	9.80	46	98
3	16.5	16.5	1986	57.54	0.08	0.655	82.1	6.7	2.12	51	9.70	77	100
4	7.5	7.6	1973	28.17	0.11	0.654	82.0	6.5	2.10	53	9.8	40	101
5	3.0	3.0	1977	10.35	0.09	0.656	2.0	7.1	1.98	54	10.20	35	104
6	7.5	7.4	2050	26.48	0.11	0.660	81.8	6.5	2.00	52	9.60	42	100
7	27.0	27.3	1982	93.48	0.10	0.658	81.0	6.5	1.35	40	10.40	140	99
8	7.5	7.5	2010	26.31	0.07	0.660	81.2	6.0	2.45	55	9.70	40	105
9	0.0	0.0	0.9	0.00	0.02	0.658	81.4	4.5	6.00	262	10.70	4	99
1	0.0												
2	7.5												
3	16.5												
4	7.5												
5	3.0												
6	7.5												
7	27.0												
8	7.5												
9	0.0												

TABLA 5.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS DOS PRUEBAS REALIZADAS CON COMBUSTION CERCANA A LA ESTEQUIOMETRICA Y SIN INYECTOR OXIGENO AL CARBURADOR.

MODO	TORQUE DEFINIDO lb.pie	TORQUE REAL lb.pie	VELOCIDAD RPM	POTENCIA AL FRENO HP	FLUJO DE COMBUSTIBLE lb/min	DENSIDAD COMBUSTIBLE gr/cm <sup>3</sup>	TEMPERATURA COMBUSTIBLE ° F	EMISIÓN CO <sub>2</sub> % vol	EMISIÓN CO % vol	EMISIÓN HC ppm vol	EMISIÓN O <sub>2</sub> % vol	EMISIÓN NOx ppm vol	TEMPERATURA ACEITE ° C
1	0.0	2.0	548	1.91	0.00	0.672	71.9	2.8	5.43	390	13.10	3	37
2	7.5	7.5	1977	25.88	0.07	0.683	71.8	6.9	2.71	80	9.40	39	52
3	16.5	16.5	1934	55.70	G	0.671	71.9	6.5	2.35	65	10.00	54	82
4	7.5	7.5	2052	26.86	0.07	0.670	73.0	6.1	2.40	62	10.30	38	93
5	3.0	3.1	1980	10.71	0.04	0.667	73.6	6.8	2.89	75	10.40	30	94
6	7.5	7.5	2046	26.78	0.06	0.674	74.3	6.4	2.99	64	9.90	35	94
7	27.0	27.0	2084	98.21	0.14	0.664	75.0	6.0	2.48	52	10.70	86	97
8	7.5	7.5	1938	25.37	0.06	0.668	75.4	6.4	2.79	59	10.70	32	102
9	0.0	0.6	679	0.71	0.00	0.666	75.5	3.3	6.11	430	11.30	3	98
1	0.0	0.4	668	0.47	0.00	0.668	75.5	3.2	5.92	460	11.90	6	95
2	7.5	7.5	2045	26.77	0.07	0.661	75.3	6.2	2.93	68	10.50	42	94
3	16.5	16.5	1980	57.02	0.10	0.665	75.4	6.0	2.60	58	10.50	52	95
4	7.5	7.5	2002	26.21	0.05	0.667	75.5	6.1	3.15	64	9.90	38	97
5	3.0	3.1	1944	10.52	0.04	0.663	75.7	6.4	3.04	74	9.80	27	97
6	7.5	7.5	2013	26.35	0.06	0.672	76.2	6.2	2.78	64	10.10	30	97
7	27.0	26.9	1997	93.76	0.14	0.663	76.7	5.8	2.00	41	11.00	105	99
8	7.5	7.4	1993	25.74	0.06	0.669	77.2	6.0	2.62	53	10.20	35	103
9	0.0	0.7	669	0.82	0.00	0.662	77.3	3.0	5.61	383	12.50	4	98
1	0.0	0.1	617	0.11	0.00	0.668	77.2	2.6	5.05	364	13.00	1	95
2	7.5	7.2	1927	24.22	0.06	0.661	77.1	6.4	2.78	70	10.30	32	96
3	16.5	16.5	1980	57.02	0.08	0.671	77.2	5.7	2.72	60	10.60	56	96
4	7.5	7.5	1955	25.59	0.07	0.666	77.3	6.2	2.59	72	10.10	45	98
5	3.0	3.0	1956	10.24	0.03	0.654	77.4	6.1	3.05	70	9.90	28	98
6	7.5	7.5	2034	26.62	0.07	0.661	77.5	6.3	2.48	60	10.00	45	95
7	27.0	27.0	1965	92.60	0.12	0.669	77.5	5.8	2.17	50	11.00	103	98
8	7.5	7.5	2057	26.93	0.07	0.662	78.1	6.1	2.48	60	10.40	35	103
9	0.0	0.7	593	0.72	0.00	0.660	78.4	2.8	5.16	440	12.10	2	98

TABLA 5.2. RESULTADOS DE LAS TRES PRUEBAS REALIZADAS AL MOTOR INYECTANDO 5 PIES CÚBICOS POR HORA DE OXÍGENO AL CARBURADOR.

# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

MODO	TORQUE DEFINIDO lb.pie	TORQUE REAL lb.pie	VELOCIDAD RPM	POTENCIA AL FRENO HP	FLUJO DE COMBUSTIBLE lb/min	DENSIDAD COMBUSTIBLE gr/cm3	TEMPERATURA COMBUSTIBLE ° F.	EMISION CO2 % vol	EMISION CO % vol	EMISION HC ppm vol	EMISION O2 % vol	EMISION NOx ppm vol	TEMPERATURA ACEITE ° C
1	0.0	2.1	910	3.34	0.07	0.660	84.2	5.4	4.71	174	10.10	10	59
2	7.5	7.7	2087	28.05	0.08	0.660	82.4	7.2	1.94	53	9.40	89	91
3	16.5	16.8	2076	60.87	0.08	0.662	83.1	6.9	1.75	45	9.80	128	100
4	7.5	7.4	1931	24.94	0.04	0.660	83.9	7.3	2.10	45	9.20	92	103
5	3.0	3.0	2029	10.62	0.06	0.654	84.4	7.5	2.10	55	9.20	59	102
6	7.5	7.9	2080	28.68	0.05	0.662	84.5	6.9	1.82	48	9.80	76	102
7	27.0	27.4	1931	92.34	0.12	0.659	84.5	6.6	1.41	42	10.40	188	102
8	7.5	7.8	2073	28.22	0.03	0.660	84.5	7.1	1.81	49	9.50	67	107
9	0.0	1.0	1061	1.85	0.09	0.661	84.5	5.9	5.71	123	8.40	8	102
1	0.0	1.0	1073	1.87	0.07	0.654	84.4	6.5	6.01	147	7.80	13	100
2	7.5	7.7	2039	27.40	0.05	0.654	83.3	7.4	1.65	50	9.60	73	97
3	16.5	16.8	2068	60.64	0.03	0.648	82.8	7.0	1.63	45	10.40	113	99
4	7.5	7.5	2058	26.94	0.02	0.667	82.7	7.1	1.75	44	9.60	85	101
5	3.0	3.2	2026	11.32	0.15	0.644	82.8	7.3	0.73	34	10.00	56	101
6	7.5	7.6	2020	26.79	0.06	0.665	83.1	7.1	1.96	49	10.50	168	101
7	27.0	27.1	2006	94.88	0.09	0.659	82.8	6.7	1.38	41	9.50	81	107
8	7.5	7.5	1965	25.72	0.02	0.658	83.5	7.6	1.72	46	9.50	79	106
9	0.0	0.0	1045	0.00	0.03	0.654	83.5	6.0	5.95	141	8.40	12	101
1	0.0												
2	7.5												
3	16.5												
4	7.5												
5	3.0												
6	7.5												
7	27.0												
8	7.5												
9	0.0												

TABLA 5.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS TRES PRUEBAS REALIZADAS AL MOTOR INYECTANDO 10 PIES CÚBICOS POR HORA DE OXIGENO AL CARBURADOR.

MODO	TORQUE DEFINIDO lb. pie	TORQUE REAL lb. pie	VELOCIDAD RPM	POTENCIA AL FRENO HP	FLUJO DE COMBUSTIBLE lb/min	DENSIDAD COMBUSTIBLE g/ccm <sup>3</sup>	TEMPERATURA COMBUSTIBLE ° F	EMISION CO <sub>2</sub> % vol	EMISION CO % vol	EMISION HC ppm vol	EMISION O <sub>2</sub> % vol	EMISION NOx ppm vol	TEMPERATURA ACEITE ° C
1	0.0	0.0	873	0.00	0.00	0.660	76.8	4.3	4.0	130	12.80	5	82
2	7.5	7.6	1986	26.34	0.07	0.664	75.4	6.2	2.70	60	10.60	40	89
3	16.5	16.8	1932	56.65	0.06	0.665	74.5	5.6	3.38	63	10.70	45	94
4	7.5	7.6	2079	27.58	0.03	0.667	73.8	5.8	3.08	59	10.90	33	96
5	3.0	3.2	2065	11.53	0.04	0.668	73.7	6.5	3.01	59	9.80	41	95
6	7.5	7.5	1950	25.53	0.07	0.671	73.7	6.2	3.23	62	10.30	37	95
7	27.0	27.2	2054	97.51	0.13	0.667	73.6	4.6	4.50	60	10.90	26	97
8	7.5	7.5	2048	26.81	0.06	0.668	73.7	5.7	3.22	62	11.00	42	100
9	0.0	0.0	876	0.00	0.00	0.669	73.7	3.7	4.42	140	13.30	4	95
1	0.0	0.0	897	0.00	0.00	0.672	73.7	3.8	4.22	145	13.10	10	93
2	7.5	7.5	1993	26.09	0.07	0.666	73.4	6.3	2.90	58	10.30	41	93
3	16.5	16.5	1975	56.88	0.06	0.669	73.2	5.0	4.35	68	10.60	25	95
4	7.5	7.5	2044	26.76	0.07	0.669	73.3	6.0	2.81	59	10.00	39	97
5	3.0	3.2	1982	11.07	0.06	0.666	73.4	6.6	3.04	61	9.90	40	95
6	7.5	7.6	2052	27.22	0.04	0.663	73.5	6.0	2.93	59	10.20	44	94
7	27.0	27.0	1939	81.37	0.13	0.663	73.5	4.7	4.51	61	11.00	26	96
8	7.5	7.5	2014	26.36	0.06	0.667	73.6	6.3	3.17	56	10.80	40	99
9	0.0	0.0	869	0.00	0.00	0.668	73.6	3.5	4.47	150	12.70	4	95
1	0.0	1.1	868	1.67	0.00	0.669	73.6	3.5	4.60	142	13.30	4	93
2	7.5	7.7	1976	26.56	0.04	0.666	73.3	6.2	3.09	62	10.30	32	93
3	16.5	16.7	1966	57.30	0.08	0.668	73.1	5.5	3.46	63	10.50	28	95
4	7.5	7.5	1940	25.39	0.06	0.663	73.1	6.2	3.08	61	10.60	40	95
5	3.0	2.8	2018	10.21	0.02	0.675	73.2	6.4	3.20	63	10.80	36	95
6	7.5	7.6	1983	26.30	0.08	0.670	73.3	6.0	3.00	60	10.90	45	94
7	27.0	27.2	2021	95.94	0.14	0.669	73.3	4.5	4.81	66	11.10	18	98
8	7.5	7.5	2023	26.48	0.03	0.660	73.4	6.1	3.20	64	10.40	35	99
9	0.0	0.0	870	0.00	0.00	0.670	73.5	3.4	5.24	142	13.30	2	95

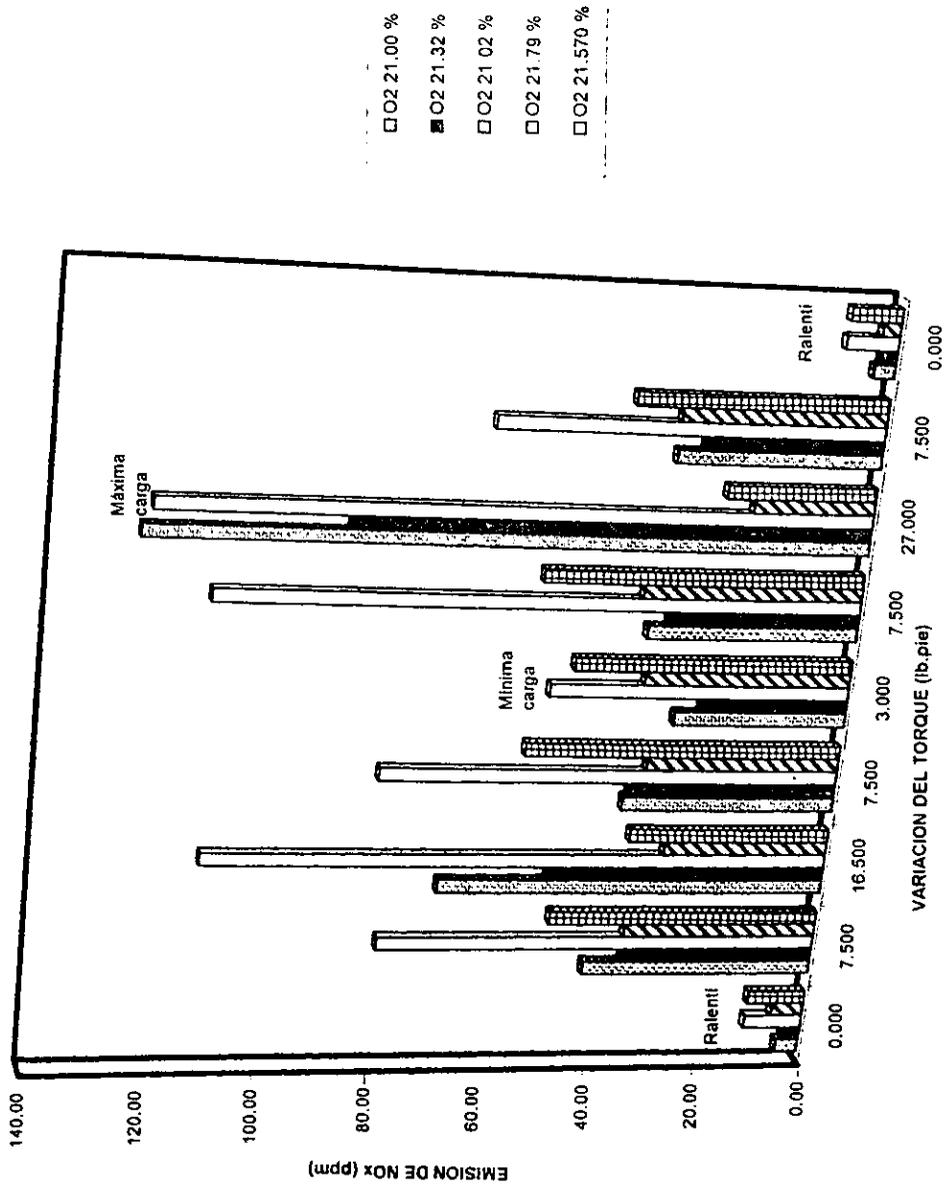
TABLA 5.4. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL MOTOR AL INYECTAR 15 PIES CÚBICOS POR HORA DE OXIGENO AL CARBURADOR.

MODO	TORQUE DEFINIDO lb.pie	TORQUE REAL lb.pie	VELOCIDAD RPM	POTENCIA AL FRENO HP	FLUJO DE COMBUSTIBLE lb/min	DENSIDAD COMBUSTIBLE gr/cm <sup>3</sup>	TEMPERATURA COMBUSTIBLE ° F	EMISION CO <sub>2</sub> % vol	EMISION CO % vol	EMISION HC ppm vol	EMISION O <sub>2</sub> % vol	EMISION NO <sub>x</sub> ppm vol	TEMPERATURA ACEITE ° C
1	0.0	0.0	884	0.00	0.04	0.670	77.2	4.9	5.03	156	11.20	16	63
2	7.5	7.5	2045	26.77	0.08	0.666	78.8	6.6	2.92	74	10.20	56	80
3	16.5	16.6	2063	59.77	0.10	0.669	79.9	5.5	4.18	80	10.20	40	95
4	7.5	7.3	1933	24.63	0.07	0.668	80.9	6.3	3.20	78	9.80	63	98
5	3.0	3.3	1952	11.24	0.05	0.661	81.6	7.1	2.77	76	9.50	50	99
6	7.5	7.6	1923	25.51	0.06	0.662	82.1	6.5	2.75	63	10.00	63	99
7	27.0	27.1	2085	98.62	0.12	0.664	81.9	4.8	4.57	65	10.60	30	103
8	7.5	7.4	2084	26.92	0.07	0.660	82.1	6.6	2.94	66	9.90	38	103
9	0.0	1.0	928	1.62	0.00	0.654	82.3	4.3	4.61	109	12.20	8	97
1	0.0	1.2	924	1.94	0.01	0.657	82.3	4.6	4.57	114	12.00	8	94
2	7.5	7.5	2054	26.89	0.07	0.660	80.9	6.3	2.67	58	10.10	45	95
3	16.5	16.5	1970	56.73	0.10	0.661	80.9	5.5	3.65	58	10.40	42	98
4	7.5	7.5	1973	25.83	0.07	0.666	80.9	6.3	2.79	58	10.00	60	99
5	3.0	3.1	1989	10.76	0.02	0.666	81.1	6.5	2.78	60	10.00	60	99
6	7.5	7.5	1978	25.89	0.07	0.664	81.3	6.3	2.76	61	10.20	58	99
7	27.0	27.1	2046	96.77	0.12	0.662	80.9	4.6	4.52	68	10.70	28	102
8	7.5	7.5	2029	26.56	0.03	0.660	81.0	6.0	2.94	60	10.10	50	104
9	0.0	1.0	911	1.59	0.00	0.670	81.2	4.0	4.19	105	12.80	10	98
1	0.0	2.2	908	3.49	0.02	0.664	81.0	4.2	4.26	106	12.90	10	95
2	7.5	7.5	2028	26.55	0.07	0.648	80.3	6.2	2.64	60	10.30	56	95
3	16.5	16.5	2051	59.06	0.10	0.665	79.3	5.3	3.84	61	10.70	36	97
4	7.5	7.5	1980	25.92	0.07	0.662	79.1	6.5	2.56	56	10.60	60	98
5	3.0	3.3	2013	11.59	0.04	0.667	79.0	6.7	2.42	57	10.50	50	97
6	7.5	7.4	1936	25.00	0.06	0.657	78.4	6.6	2.89	61	10.00	62	97
7	27.0	26.9	2036	95.59	0.12	0.662	77.2	4.8	4.44	65	10.60	28	101
8	7.5	7.5	1994	26.10	0.06	0.665	77.0	6.5	2.74	56	10.80	55	102
9	0.0	1.4	941	2.30	0.00	0.664	77.1	4.4	3.65	80	13.10	11	96

TABLA 5.5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS REALIZADAS AL MOTOR INYECTANDO 20 PIES CÚBICOS POR HORA DE OXIGENO AL CARBURADOR.



FIGURA 5.11. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE NOx AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



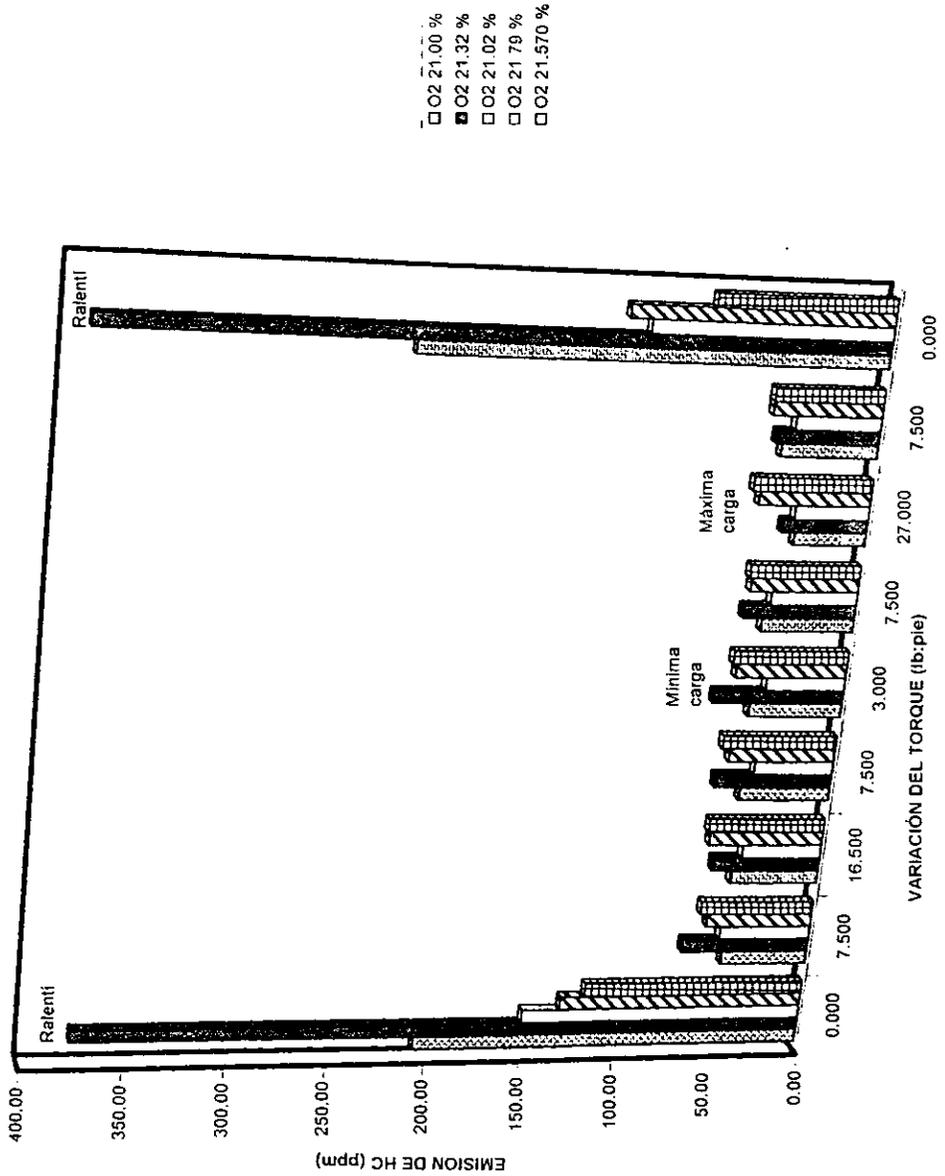
#### 5.4. Análisis de los resultados.

En las figuras 5.11 a 5.17, se pueden observar las gráficas que presentan la variación de las distintas emisiones obtenidas en las pruebas: hidrocarburos, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y oxígeno, así como los parámetros observados: temperatura de aceite y flujo de combustible. Todas estas observaciones comparadas al variar el porcentaje de oxígeno en el aire, que fue el que se manipuló en dichas pruebas, y modificando el torque en el dinamómetro. Las curvas presentadas son simplemente tendencias representadas al graficar por medio del paquete Excel 9. Por lo mismo, el comportamiento de las gráficas es principalmente comparativo, por lo cual no se realizaron estas de forma continua, sino puntual, ya que entre punto y punto encontrado experimentalmente no puede decirse exactamente que es lo que sucede. Lo principal en todas las gráficas es ver la variación que existe entre una curva y otra, dibujadas a partir de los datos obtenidos en las pruebas a distintas condiciones de inyección de oxígeno.

Al analizar la gráfica anterior (figura 5.11.), se puede ver que al inyectar oxígeno al carburador (21.32%, 21.79 % y 21.57 % de oxígeno en el aire), efectivamente se obtiene una reducción en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), lográndose con 21.789 %, es decir, inyectando 0.2926 m<sup>3</sup>/h de oxígeno, la mayor disminución (37.65 % de reducción). En esta gráfica la tendencia de todas las curvas fue que al aumentar el torque, las emisiones de NOx en general aumentaban, esto debido a que es en este momento cuando el motor alcanzó más altas temperaturas. La curva de 21.02 % de O<sub>2</sub> fue la que presentó tendencias desfavorables siempre, ya que con ésta se trabajó en condiciones de exceso de aire, además del oxígeno extra que se le inyectaba al carburador. Para la prueba con 21.025 % los resultados no presentan mejoría, ya que la prueba también se realizó en condiciones de exceso de aire y las temperaturas se incrementaron bastante, por lo que las emisiones de óxidos de nitrógeno aumentaron en lugar de disminuir.

Aunado a lo anterior, en estas curvas se pudo observar que la mayor cantidad de emisiones de NOx se dio cuando se estaba acelerando (aumentando la carga). Para lo anterior se debe de recordar que en la prueba se tuvo que estar aumentando y disminuyendo constantemente el torque debido a la norma establecida. Sin embargo, con dos curvas no se presentó dicho aumento de emisiones de NOx al trabajar a máxima carga. Estas curvas correspondieron a las que tenían mayor cantidad de oxígeno inyectado al carburador. Esto se debió a que en dicho momento el exceso de oxígeno logró enfriar hasta cierto punto la temperatura del motor, disminuyendo considerablemente las emisiones de NOx. Sin embargo, hay que recordar que la reducción de emisiones de NOx se debe a tres motivos principalmente: a un mejor mezclado en la cámara de combustión, a una disminución en la temperatura de combustión y a una reducción en la cantidad de nitrógeno que reacciona (ésta última es precisamente la que tratamos de demostrar).

FIGURA 5.12. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE HC AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR

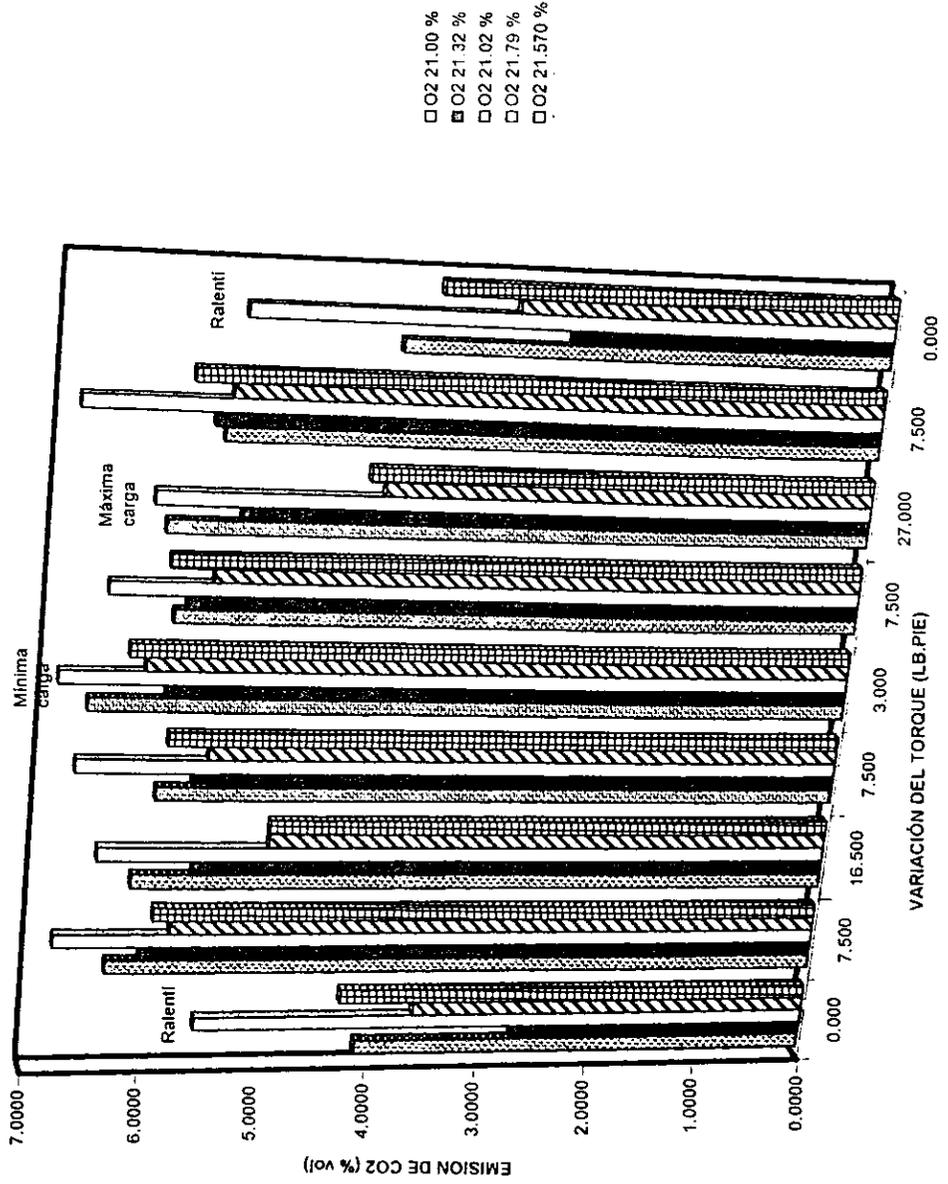


En la figura 5.12 se ve también que las emisiones de hidrocarburos se redujeron en 13.66% inyectando  $0.2926 \text{ m}^3/\text{h}$  y 18.42 % al inyectar  $0.39 \text{ m}^3/\text{h}$  de oxígeno al carburador, de forma similar a la presentada por los óxidos de nitrógeno. Lo anterior muestra que la mayor inyección de oxígeno ( $0.39 \text{ m}^3/\text{h}$ ) fue la que presentó mejores disminuciones de hidrocarburos.

Más importante aún, fue el hecho de que se redujeron las emisiones de hidrocarburos en estado de ralenti, es decir, sin carga. Es necesario recalcar que en la Ciudad de México se tienen serios problemas de congestionamientos viales, por lo cual se presentan mayor cantidad de contaminantes de este tipo a la atmósfera (en condiciones sin carga). Dicha reducción fue aún más notable, 37.09 % al arranque y 47.09 % al desacelerar con  $0.2926 \text{ m}^3/\text{h}$  de oxígeno inyectado, y 42.64 % al arranque y 61.26 % al desacelerar con  $0.39 \text{ m}^3/\text{h}$  de oxígeno inyectado, lo que da un promedio de 42.09 % y 51.95 % de emisiones de hidrocarburos reducidas con el motor trabajando sin carga, respectivamente.

El comportamiento de los hidrocarburos con el aumento de la carga fue disminuir, debido a que mientras mayor era ésta, se tenía una mezcla más pobre en combustible, y por lo tanto, no se produjeron tantas emisiones de HC. Por el contrario, en ralenti hay mezcla más rica, lo que ocasiona una combustión incompleta de HC y por tanto mayores emisiones de los mismos. En las curvas con mayor cantidad de oxígeno inyectado se observa que se logró la reducción de emisiones en ralenti debido a que el oxígeno extra logró que hubiera una combustión más completa de los mismos, aparte de la reducción en el consumo de combustible, por lo que se redujeron las emisiones de HC en dicha condición, así como durante el resto de la prueba, pero por la misma razón.

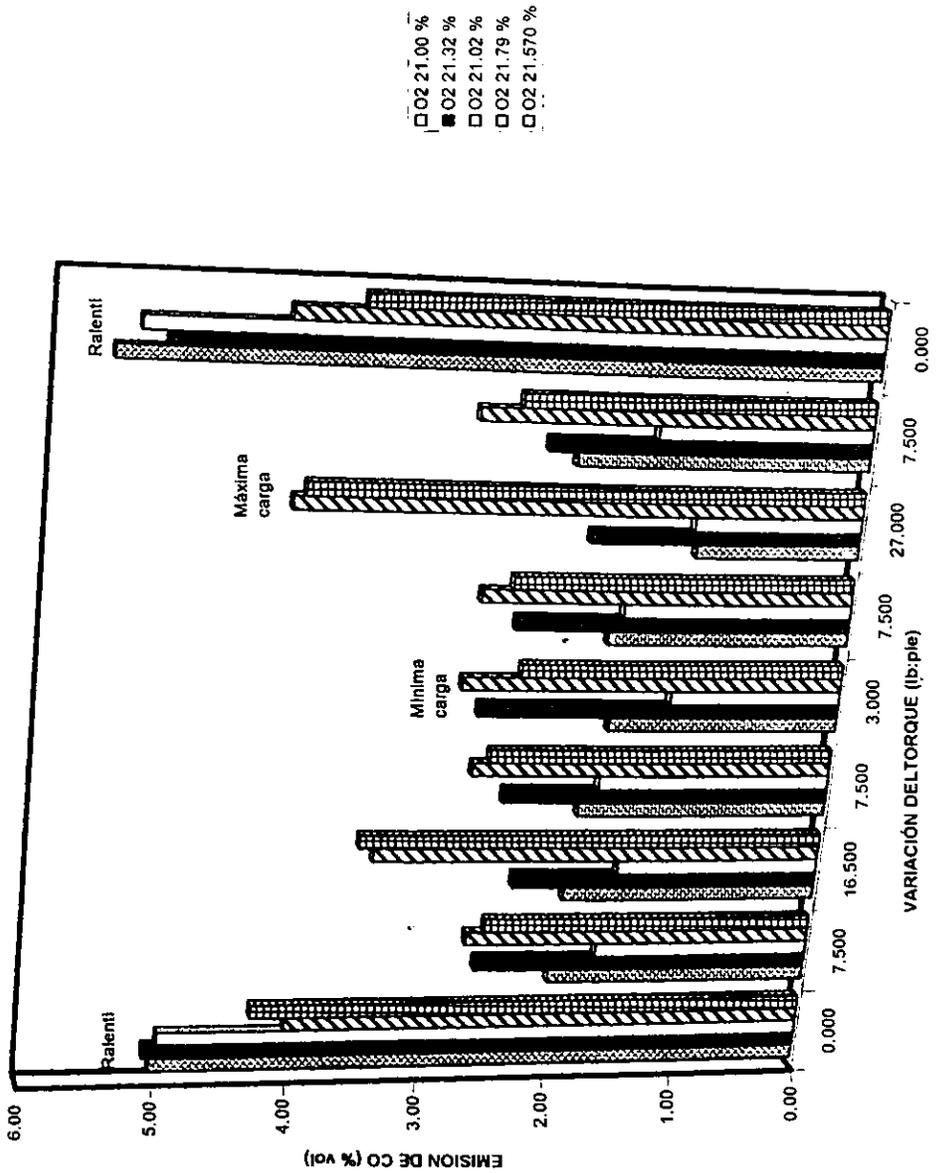
FIGURA 5.13. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO2 AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



Con respecto al dióxido de carbono, se logró también la reducción de sus emisiones, en 12.15 % al inyectar 0.2926 m<sup>3</sup>/h de oxígeno, (figura 5.13). Este valor se obtuvo con los datos de inyección de oxígeno que mejores resultados presentaron hasta este momento. Dicha disminución se dio principalmente por la disminución del gasto de combustible, obtenida por la disminución de la temperatura del motor ocasionada por la inyección de oxígeno al carburador.

En esta gráfica se observa que la curva con mayor cantidad de emisiones de dióxido de carbono, es aquella que tenía exceso de aire y que a parte tuvo inyección de oxígeno (21.02 % de oxígeno en el aire). Lo anterior logró que hubiese una combustión más completa y que una parte de los productos se acercara a los valores estequiométricos de las emisiones de dióxido de carbono.

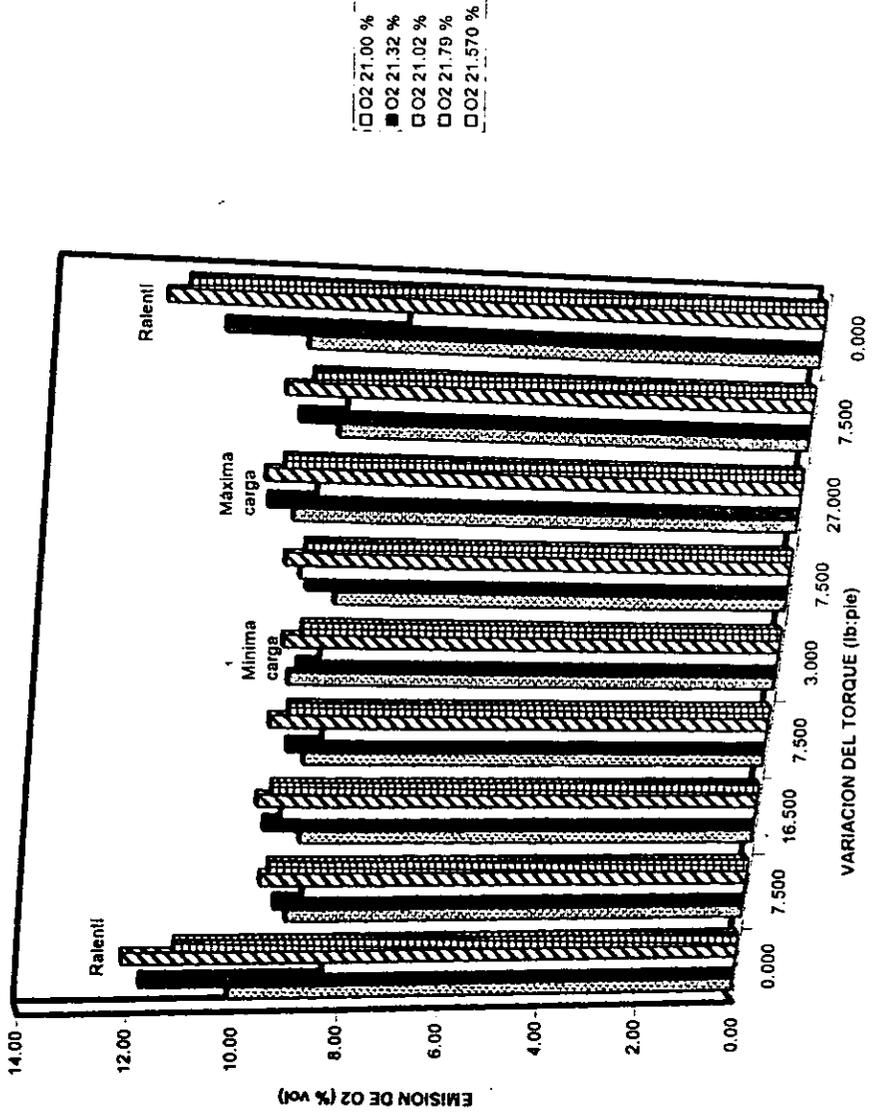
FIGURA 5.14. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



Las emisiones de monóxido de carbono se incrementaron en un 28.14 % (figura 5.14) al inyectar 0.2926 m<sup>3</sup>/h de oxígeno al carburador. La razón de lo anterior es que el oxígeno extra que se añadió reaccionó más fácilmente con los hidrocarburos que con el monóxido de carbono, logrando éste salir en las emisiones en dichas cantidades, además del enfriamiento ligero presentado en el motor, lo cual favoreció la generación de estas emisiones.

Las gráficas que presentaron menor cantidad de emisiones de monóxido de carbono, son precisamente aquellas donde se trabajó con exceso de aire, una de ellas sólo con aire atmosférico aspirado por el carburador (21 % de O<sub>2</sub>) y la otra con inyección extra de oxígeno al carburador (21.02% de O<sub>2</sub>). La última de éstas fue la de mayor disminución. Lo anterior se debe, una vez más, a que en estas condiciones en el motor se realizó una combustión más completa, reduciéndose las emisiones de monóxido de carbono.

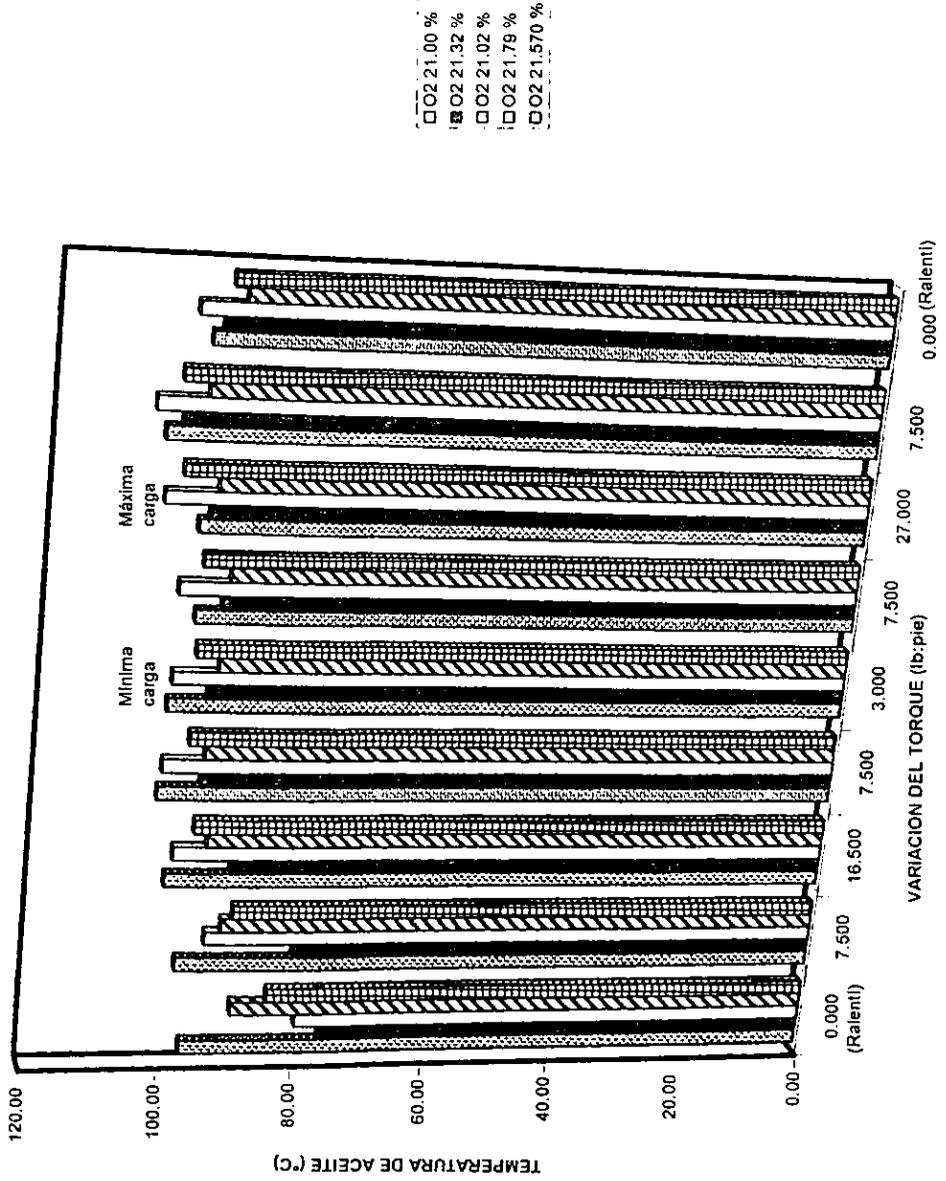
FIGURA 5.15. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE O<sub>2</sub> AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



La figura 5.15. nos muestra lo que sucede con las emisiones de oxígeno al incrementar los valores del oxígeno inyectado al carburador. Esta gráfica pone en evidencia que al inyectar más oxígeno, se presenta mayor cantidad del mismo en los productos, lo cual es una ventaja si se desea utilizar un convertidor catalítico que no utilice computadora. Lo anterior debido a que dichos valores altos de oxígeno a la salida aseguran que el convertidor trabaje perfectamente en tales condiciones.

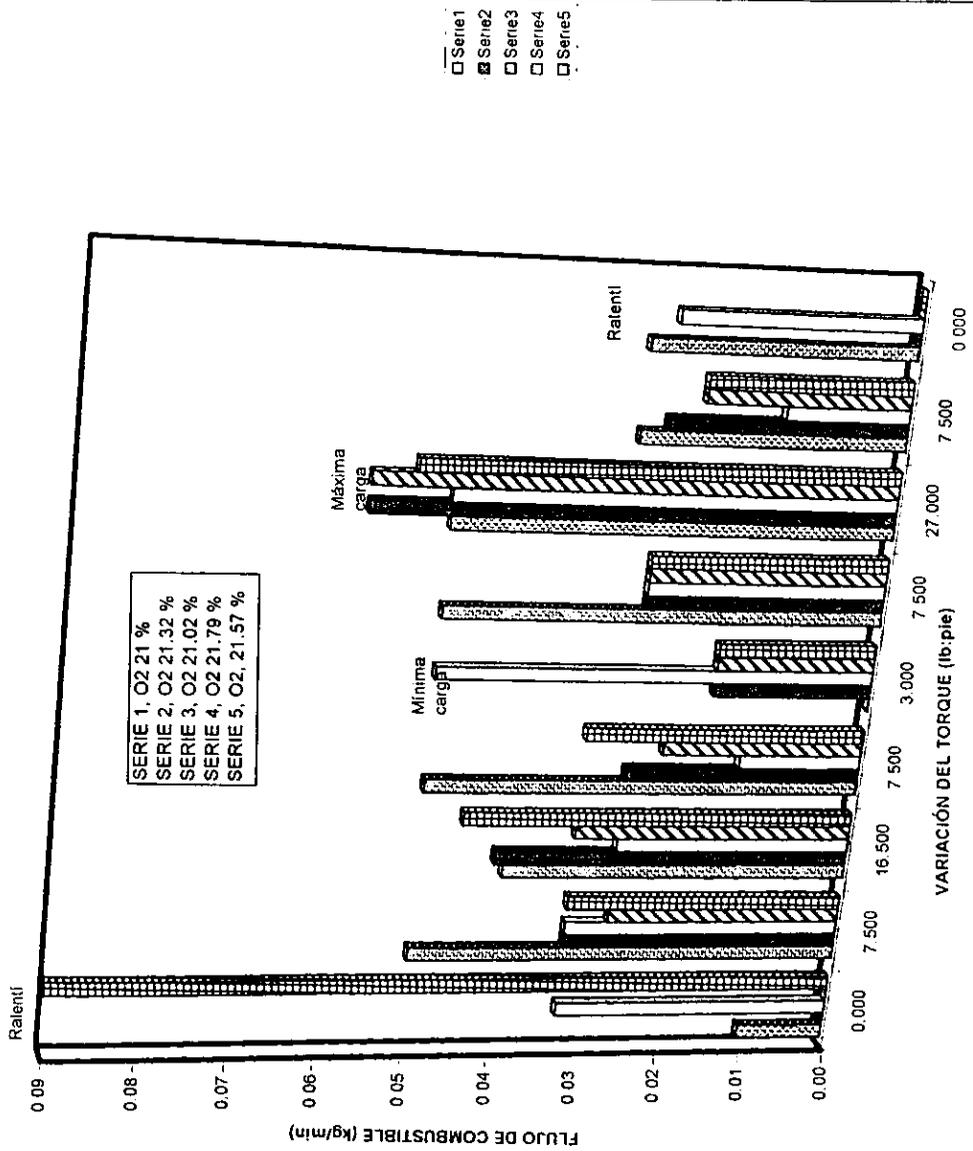
Las gráficas con mayores valores de emisión de oxígeno, son aquellas donde se inyectó  $0.2926 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $0.39 \text{ m}^3/\text{h}$  al carburador. La que presenta menor cantidad de estas emisiones es la que representa el motor trabajando con exceso de aire más un exceso de oxígeno. Lo anterior debido a que todo el oxígeno sirvió para obtener una combustión más completa que produjo más emisiones de dióxido de carbono.

FIGURA 5.16. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL ACEITE AL VARIAR EL OXÍGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



Los resultados anteriores son un promedio de los nueve modos de las pruebas realizadas, es decir, un promedio de las condiciones con y sin carga. Las otras pruebas hechas con otros incrementos de la composición del oxígeno en el aire (21.2197 y 21.5802 %), también muestran reducciones similares. La figura anterior (5.16.), muestra la variación de la temperatura de aceite del motor con respecto al oxígeno suministrado al carburador (esta temperatura es el mejor indicador de la temperatura de combustión), y efectivamente se pudo ver que existe disminución de temperatura en las pruebas donde se encontró disminución de emisiones de óxidos de nitrógeno, sin embargo la variación es mínima, por lo que se puede decir que dicha reducción se debió principalmente a la merma en la relación nitrógeno/oxígeno, es decir al inyectar oxígeno al carburador y aumentar la cantidad del mismo en el aire que reacciona con el combustible.

FIGURA 5.17. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE COMBUSTIBLE AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



Analizando ahora algunos otros parámetros afectados por la inyección de oxígeno, se observa que en general el consumo de combustible (figura 5.17.) se reduce al inyectar oxígeno al carburador, ya que aumenta la relación aire/combustible y la combustión se hace mejor en dichas condiciones, al reaccionar directamente el oxígeno con el combustible.

Dicha reducción es de 40.37 % para una inyección de oxígeno de 0.2926 m<sup>3</sup>/h, lo que es significativamente provechoso por el ahorro de combustible que se presentaría. En esta gráfica se puede observar que al aplicar la mayor carga, en las condiciones con inyección de oxígeno, se tiene un aumento en el consumo de combustible bastante notorio, pero esto se debe a que el motor demanda mayor volumen de mezcla combustible/comburente en la cámara de combustión, y el motor inmediatamente lo soluciona demandando mayor gasto de combustible.

Ahora bien, todos los resultados presentados en las tablas 5.1 a 5.10, así como las figuras 5.11 a 5.18, nos muestran lo sucedido en las pruebas, y es de gran ayuda para ver el comportamiento de todas las emisiones y parámetros al aumentar el porcentaje del oxígeno en el aire que reacciona en el motor, sin embargo, dado que los resultados fueron obtenidos con distintas condiciones de operación y carburación, no se observa claramente el efecto aislado de la carburación oxigenada. Para generalizar los resultados obtenidos, es necesario adimensionalizar las variables y entonces sí, los resultados obtenidos serán aún más claros y completos.

#### 5.5. Adimensionalización de variables.

El análisis dimensional es un método que permite reducir el número y complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico dado, con ayuda de una serie de técnicas. Si todas las variables se incluyen en la nueva función propuesta, la función adimensional obtenida mediante el análisis dimensional agrupará todos los datos en una curva única o en una serie de curvas [3].

Para nuestras pruebas existen varios parámetros, cuya variación puede hacer que los resultados se distorsionen. Además existe una serie de datos que si bien no afectan directamente al problema, su utilización nos puede dar una generalización.

Una vez realizado esto, se procedió a graficar, primero, a la relación de equivalencia oxígeno/combustible  $\Pi_1$ , definida de la siguiente manera:

$$\Pi_1 = ((m_{O_2 \text{ en aire}} + m_{O_2}) / m_{\text{comb}})_{\text{real}} / (m_{O_2} / m_{\text{comb}})_{\text{est}}$$

contra las emisiones para cada una de los porcentajes de oxígeno inyectado al carburador, y donde

$m_{O_2 \text{ en aire}}$  = masa de oxígeno en el aire que entra al motor

$m_{O_2}$  = masa de oxígeno añadida a la combustión.

$m_{\text{comb}}$  = masa de combustible que entra al motor

Asimismo se realizaron otra serie de gráficas, en las cuales se creó otro número adimensional, al que se le denominó  $\Pi_2$ , y el cual se definió de la siguiente manera:

$$\Pi_2 = (T_{\text{comb}} - T_{\text{amb}}) / (T_{\text{aceite}} - T_{\text{fla}})$$

donde:

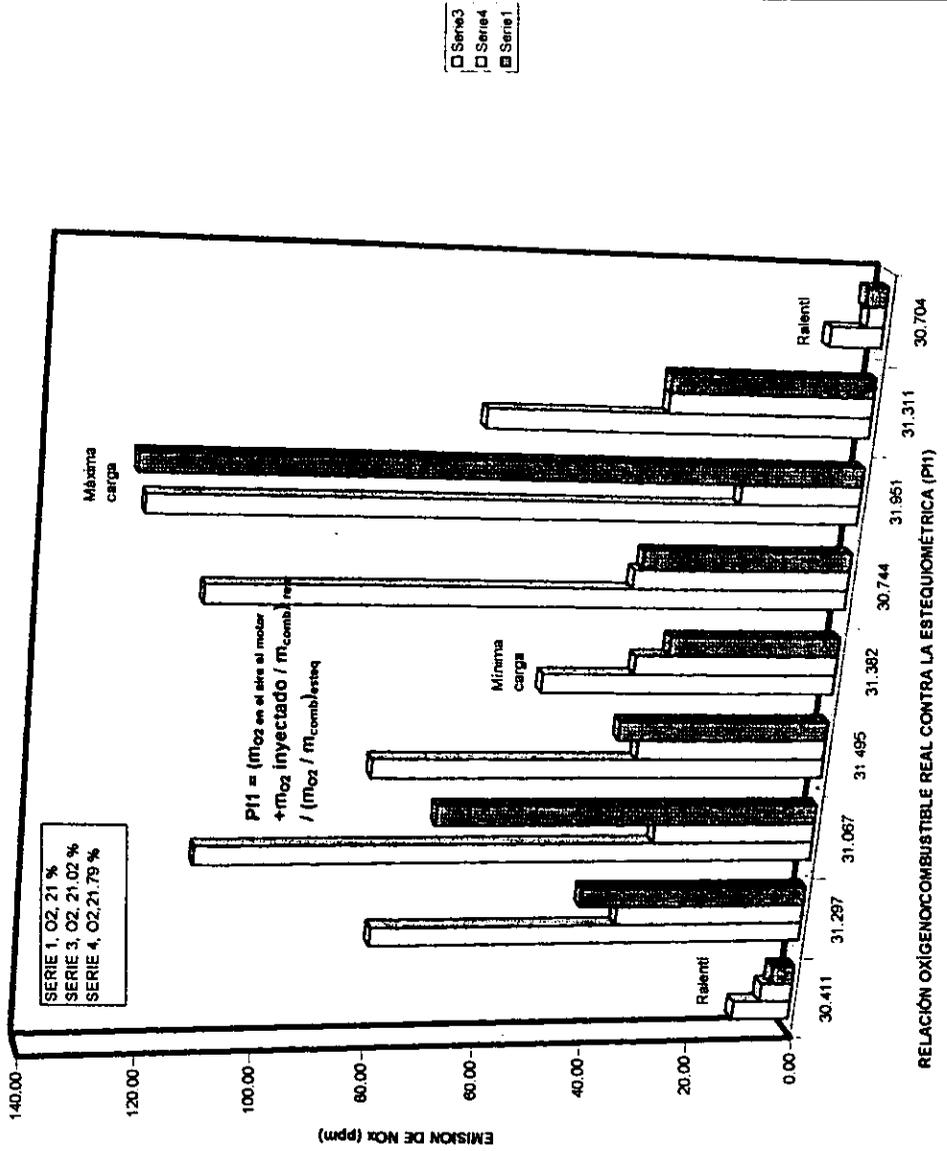
- a)  $T_{\text{aceite}}$  (temperatura del aceite), la cual es la más cercana aproximación medible en las pruebas de la temperatura del motor, y el incluirla es para tener en cuenta las variaciones en las emisiones debidas a incrementos muy amplios de temperatura de combustión.
- b)  $T_{\text{comb}}$  (temperatura de combustible), que nos sirve para generalizar condiciones ambientales de entrada medibles en la temperatura del combustible.
- c)  $T_{\text{fla}}$  (temperatura de flama adiabática), que es la temperatura a la cual se tiene una igualdad entre las entalpías de formación de los productos y los reactivos, dado que no existe flujo de calor fuera del sistema, y que sirvió como estado de referencia para este número adimensional.

Con el cálculo de este número adimensional, se pretendió reforzar a los resultados, para que no existiese alguna duda acerca de que tanto había afectado la temperatura al comportamiento de las emisiones.

A continuación se presentan las tablas 5.11 a 5.15, con los resultados obtenidos, así como las figuras 5.18 a 5.29, que muestran las gráficas con dichos resultados:

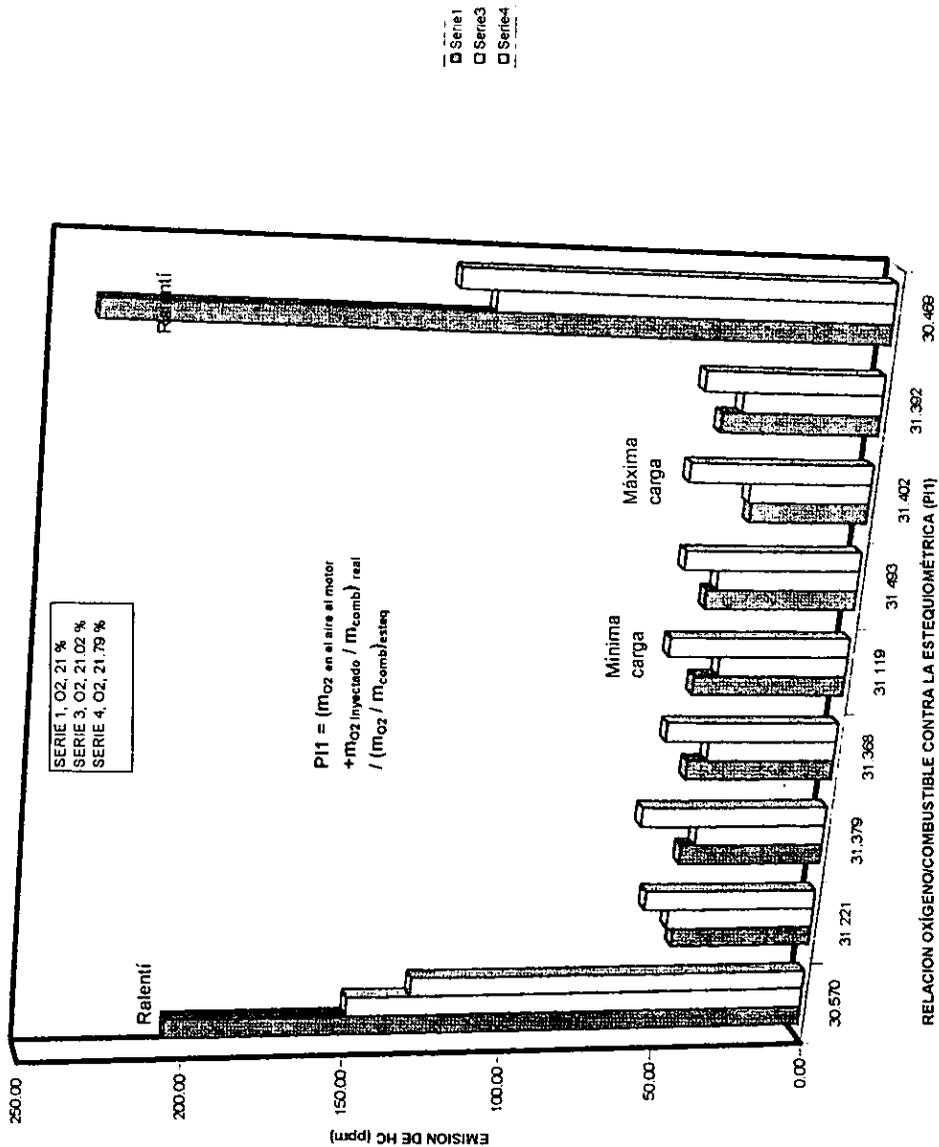


FIGURA 5.18. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE NOx AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



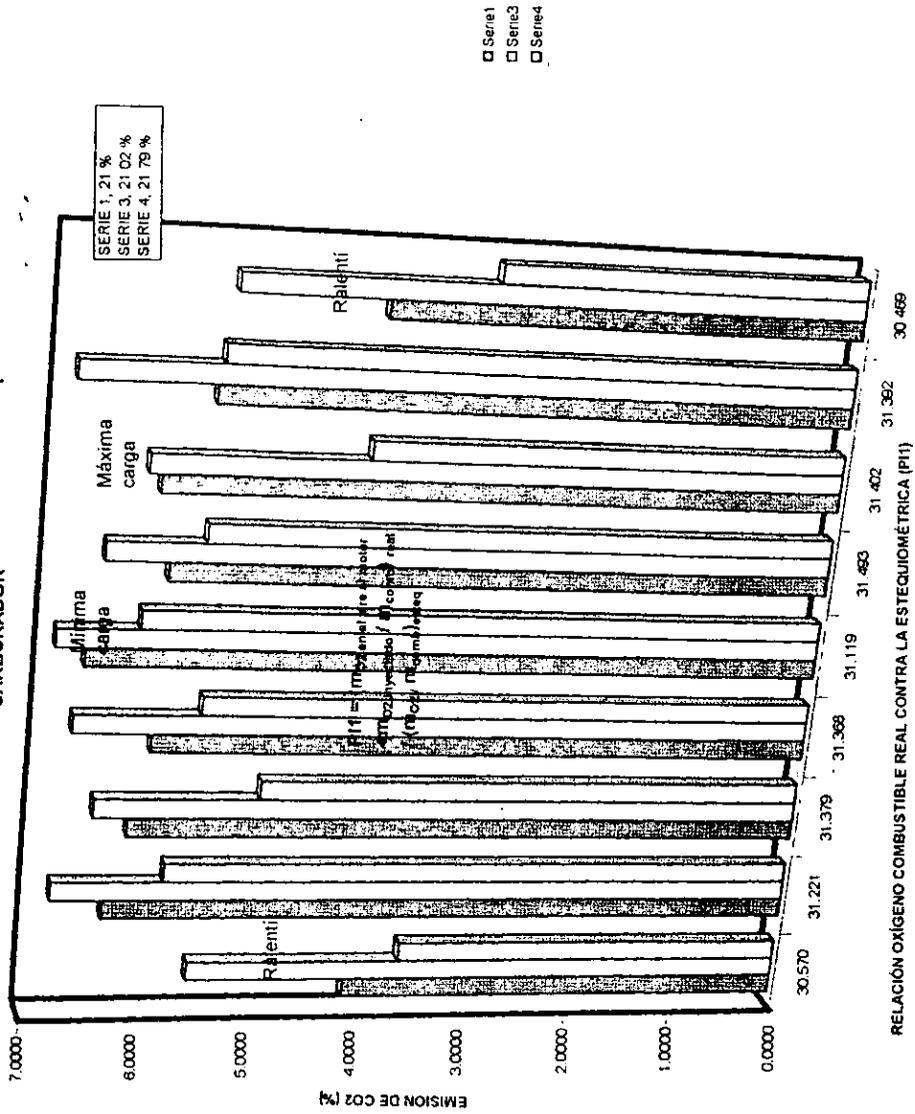
Observando la figura 5.18. en la cual se graficaron las emisiones de NO<sub>x</sub> contra la relación oxígeno/combustible real contra la estequiométrica, se pudo ver como las curvas sin inyección de oxígeno y la correspondiente a 21.02% de oxígeno se encuentran separadas de las demás, porque en ambas se estuvo trabajando con exceso de aire, por lo tanto dicha relación fue aún mayor. Se observa en la otra curva que se estuvo trabajando con deficiencia de aire, aunque con inyección de oxígeno (0.39 m<sup>3</sup>/h), y que las emisiones de NO<sub>x</sub> se redujeron bastante en comparación con las que trabajaron con exceso de aire atmosférico, ya que esto (el exceso), ocasionó que se incrementara la temperatura del motor, y por tanto, aumentando las emisiones de NO<sub>x</sub> debido a los mecanismos de formación de Zeldovich para los óxidos de nitrógeno. Asimismo se observó que aparentemente al aumentar la relación oxígeno/combustible aumentaban las emisiones de NO<sub>x</sub>, debido al incremento de la temperatura (en cada curva), pero sin embargo para el mejor caso observado (0.39 m<sup>3</sup>/h), dicha variación fue casi nula.

FIGURA 5.19. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE HC AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



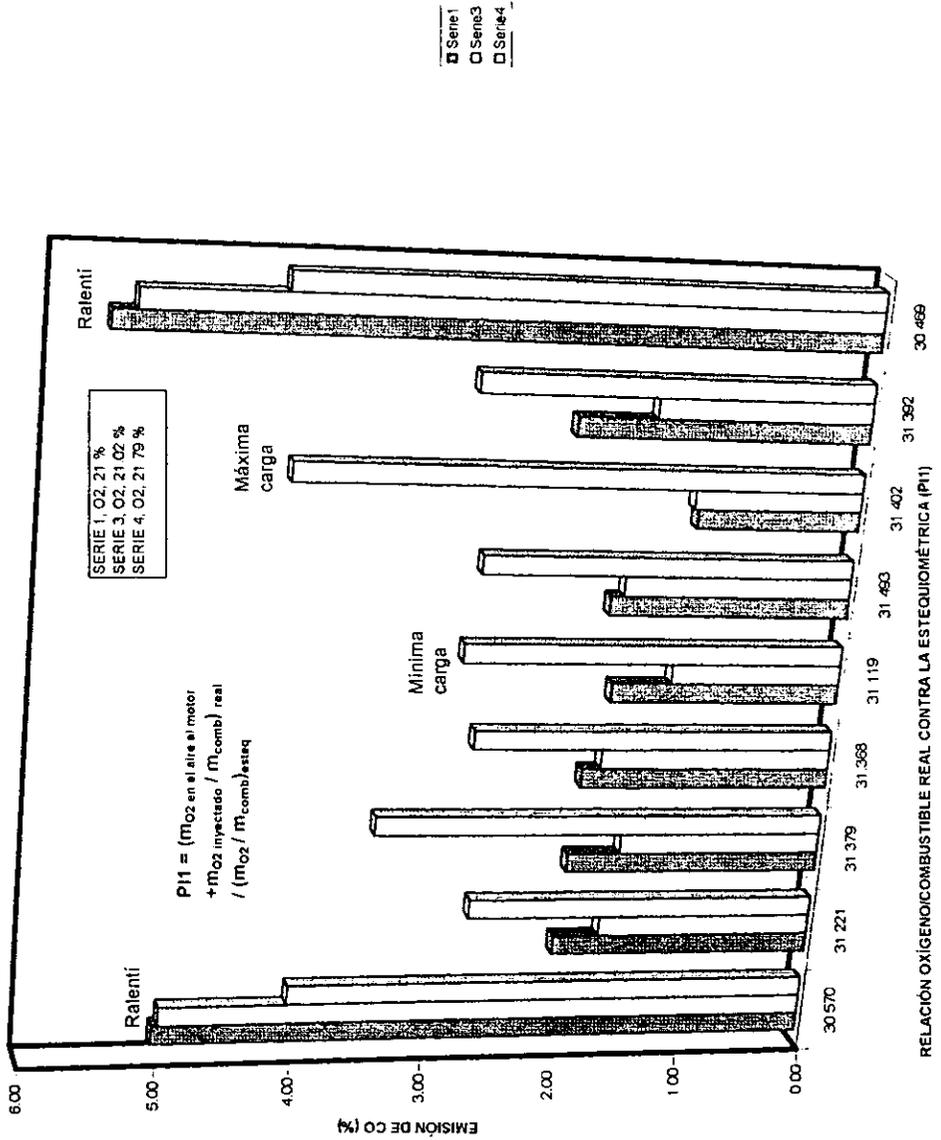
Siguiendo el mismo método, se observa en las figuras 5.19. a 5.24 que también se graficaron los casos con exceso de aire. En la figura 5.19. se observó que estos presentaban grandes relaciones oxígeno/combustible, pero al mismo tiempo, fueron los que presentaron mayores emisiones de hidrocarburos, ya que no existe una combustión completa, además de que el gasto de combustible fue mayor.

FIGURA 5.20. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



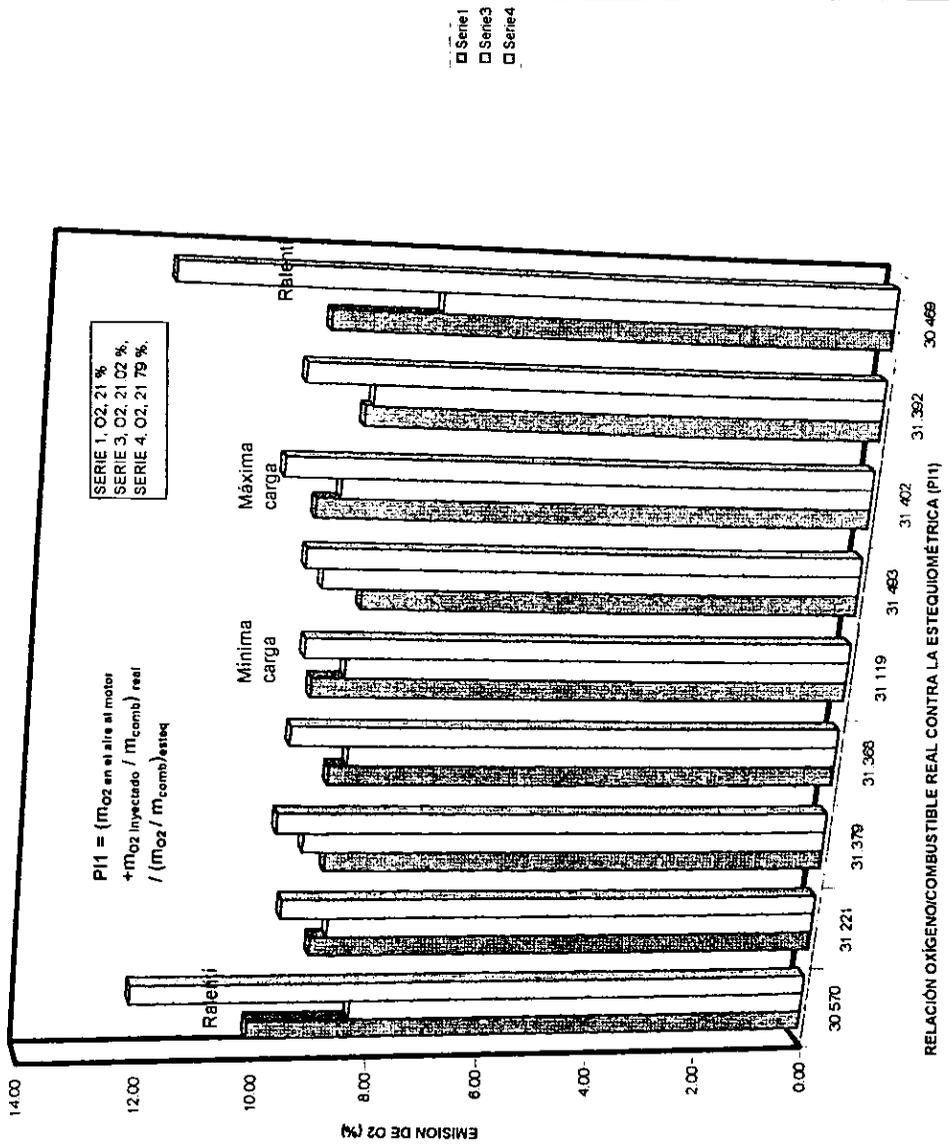
También el dióxido de carbono (figura 5.20) fue mayor en condiciones de exceso de aire atmosférico. Aparte de aminorarse estas emisiones por la inyección de oxígeno, también se logró tal, entre otras cosas, por la disminución de la temperatura del motor. Esto reafirma los resultados observados al graficar el torque contra las emisiones de dióxido de carbono.

FIGURA 5.21. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO EN EL CARBURADOR



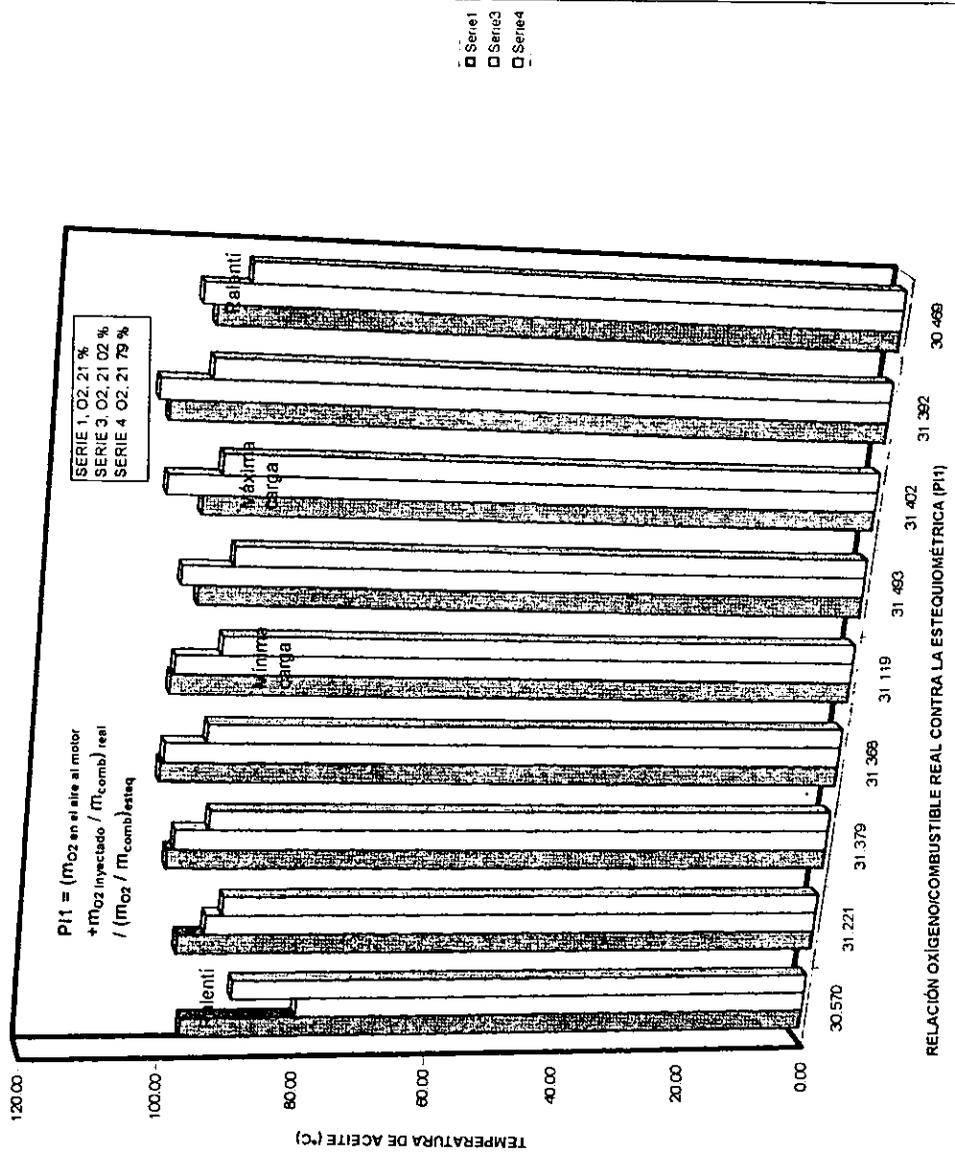
Solamente en el caso del monóxido de carbono (figura 5.21), se incrementaron las emisiones con inyección de oxígeno, ya que la reducción de temperatura al inyectarlo, al igual que con el dióxido de carbono, produjeron mayores emisiones de dicho contaminante, aparte de que dicha inyección sirvió para dar mejor combustión sólo a los hidrocarburos.

FIGURA 5.22. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE O<sub>2</sub> AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBUARDOR



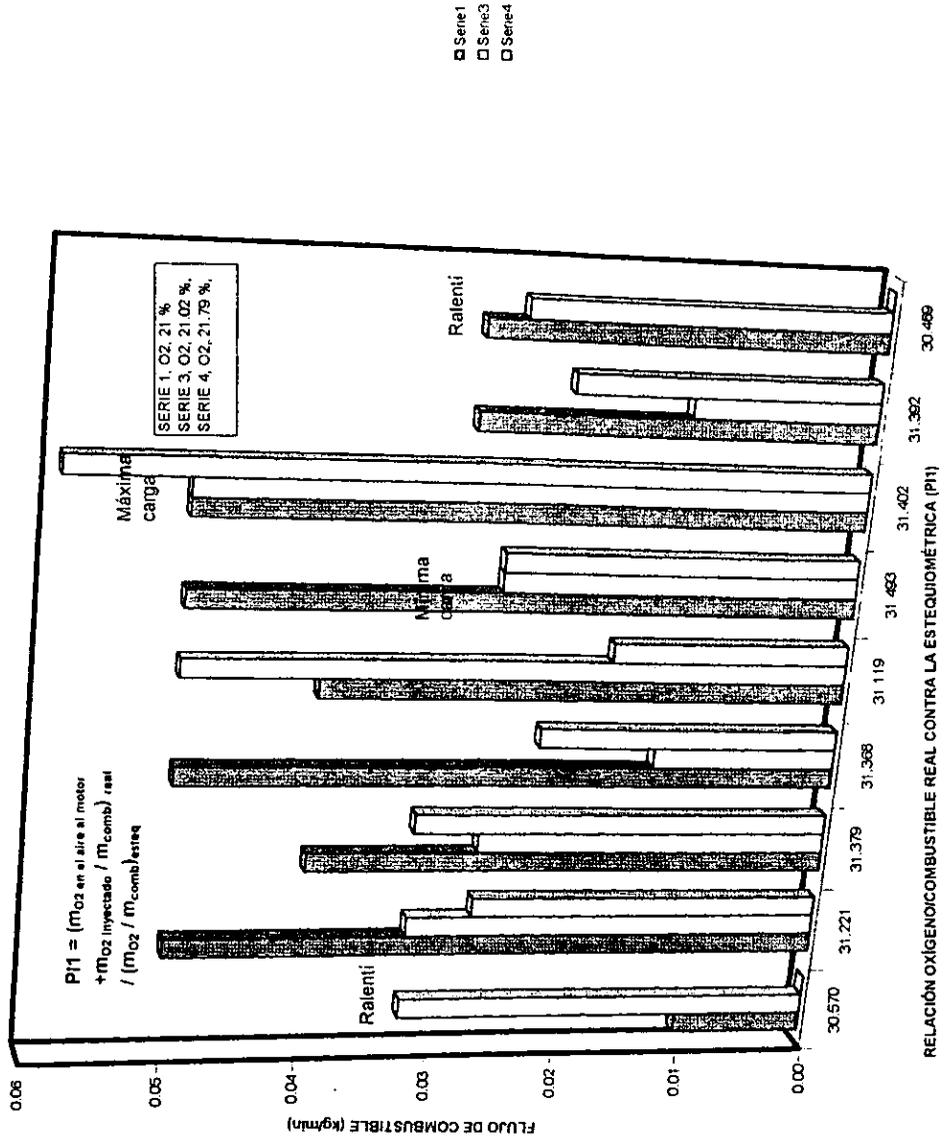
En la figura 5.22. se vio que las emisiones de oxígeno son mayores, obviamente, donde hubo mayor cantidad de oxígeno inyectado, a pesar de existir exceso de aire atmosférico en los otros dos casos, lo cual indica que efectivamente había oxígeno extra suministrado al carburador. Este aumento de oxígeno asegura una cantidad determinada de oxígeno en la salida que servirá por si se desea instalar un convertidor catalítico sin computadora.

FIGURA 5.23. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL ACEITE DEL MOTOR AL VARIAR EL NIVEL DE OXÍGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



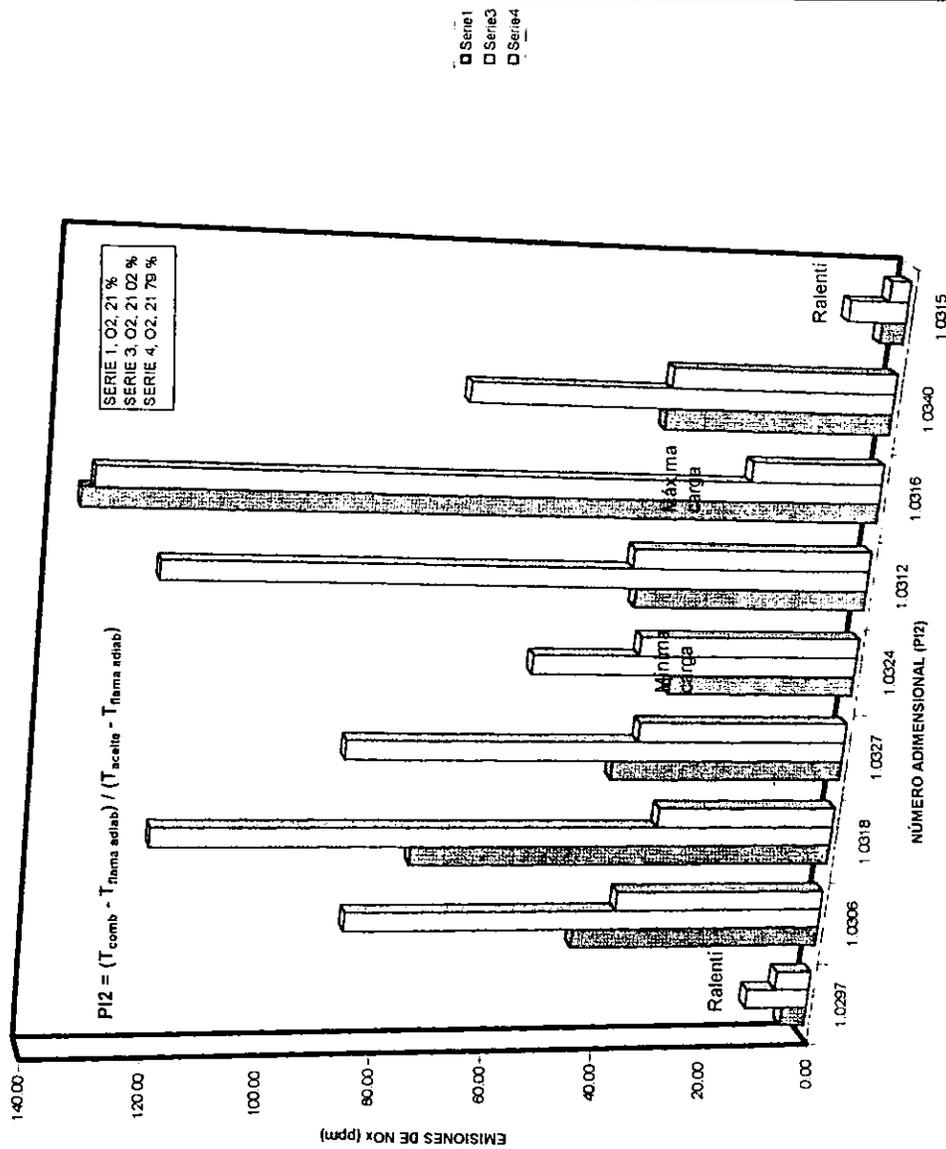
En la figura 5.23. se vio que con respecto a la temperatura del aceite, ésta no presentó variaciones considerables en ninguno de los casos, ni con exceso ni con deficiencia de aire lo que indica que la reducción de emisiones no se debió tanto a la variación de la temperatura, sino al incremento del oxígeno en la carburación, y a algunas otras razones, como combustión más completa o reducción del gasto de combustible.

FIGURA 5.24. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE COMBUSTIBLE AL VARIAR EL OXÍGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



Con respecto a la figura 5.24. se ve que la mayor reducción en el consumo de combustible se tiene con la mayor inyección de oxígeno al carburador, debido que la combustión es más eficiente. Existiendo mayor oxigenación se redujo dicho consumo.

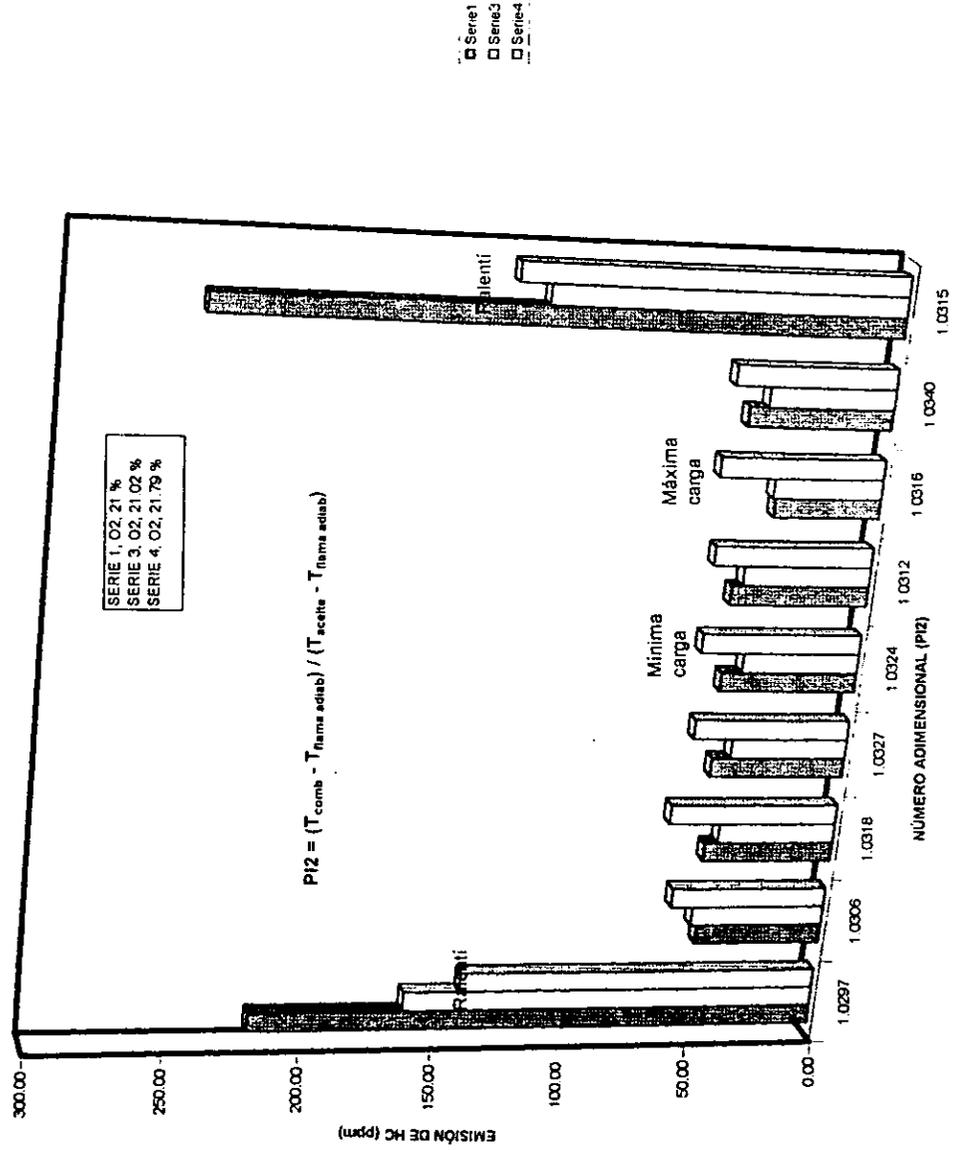
FIGURA 5.25. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE NO<sub>x</sub> AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



Las figuras 5.25 a 5.29 muestran al número adimensional  $\Pi_2$ , que como ya se había definido es la relación de temperaturas de aceite y del combustible, teniendo ambas como base a la temperatura de flama adiabática. Este número adimensional está comparado contra las mismas emisiones y parámetros, y esta gráfica básicamente sirvió para comprobar que los demás resultados estuvieran en lo correcto, y que no se hubieran visto afectados por alguna variación considerable en la temperatura, pero en todas estas gráficas se ve que a pesar de que efectivamente hubo dichos cambios, ninguno fue lo suficientemente notorio como para afectar los datos obtenidos al inyectar oxígeno, principalmente para el caso de 21.79 % (0.2926 m<sup>3</sup>/h) de inyección del mismo, que fue el valor que presentó en conjunto resultados más eficientes.

La figura 5.25 muestra que las emisiones de óxidos de nitrógeno, para los casos de exceso de aire atmosférico (21 % y 21.02 % de O<sub>2</sub>), estuvieron muy sensibles a las variaciones en la temperatura. Al contrario, en el mejor caso con deficiencia de aire atmosférico, pero con inyección de oxígeno, no se vio que dicha generación de emisiones sea sensible a los cambios de temperatura del motor, como en las condiciones de exceso de aire atmosférico, donde incluso dicha variación es muy notoria para pequeños incrementos de temperatura.

FIGURA 5.26. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE HC AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



En la figura 5.26, se vio que los hidrocarburos casi no presentan variación con respecto a los cambios de temperatura, para ninguno de los casos, es decir, ni cuando existió exceso de aire atmosférico, ni cuando hubo deficiencia del mismo pero con inyección de oxígeno. Esto principalmente porque las emisiones de hidrocarburos son más sensibles al cambio en el gasto de combustible y a una mezcla más completa o eficiente.

FIGURA 5.27. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO2 AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR

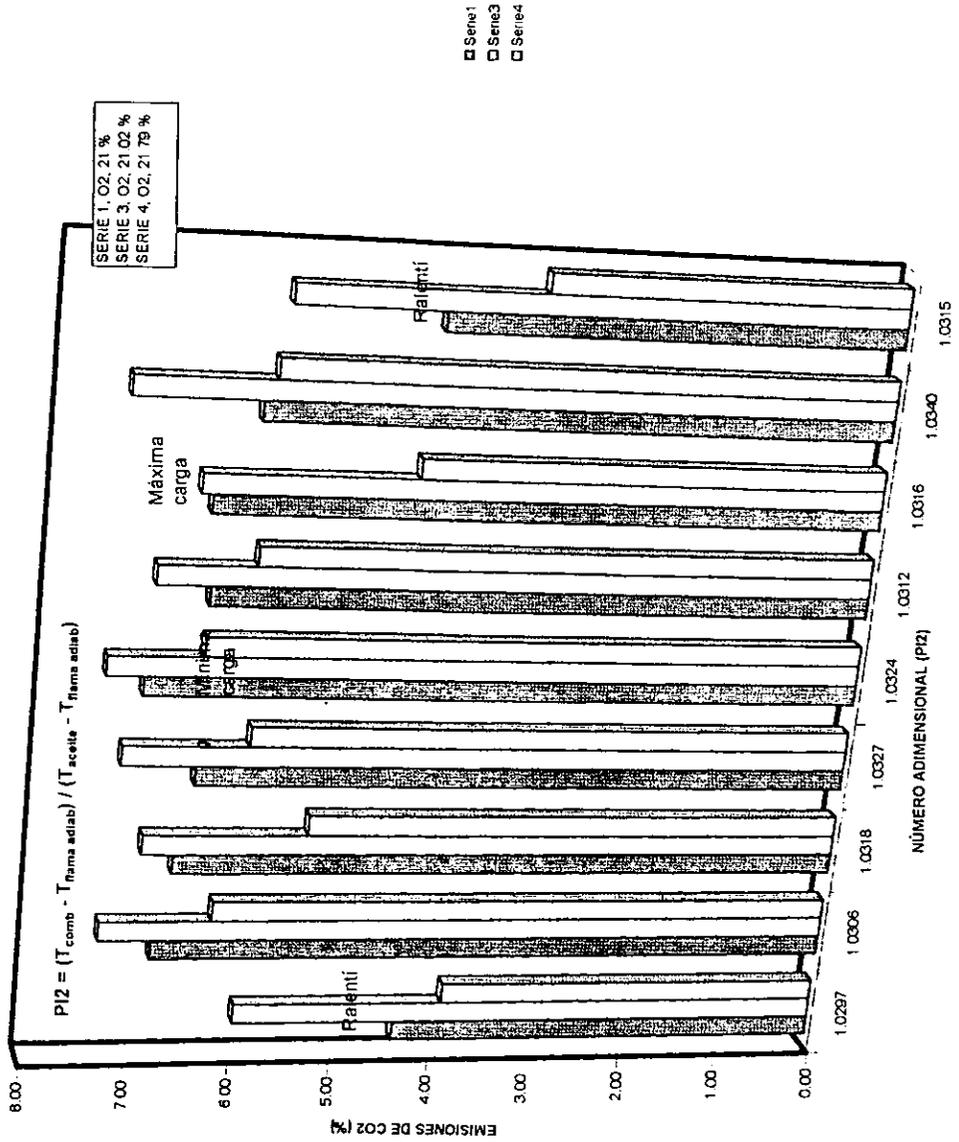


FIGURA 5.28. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR

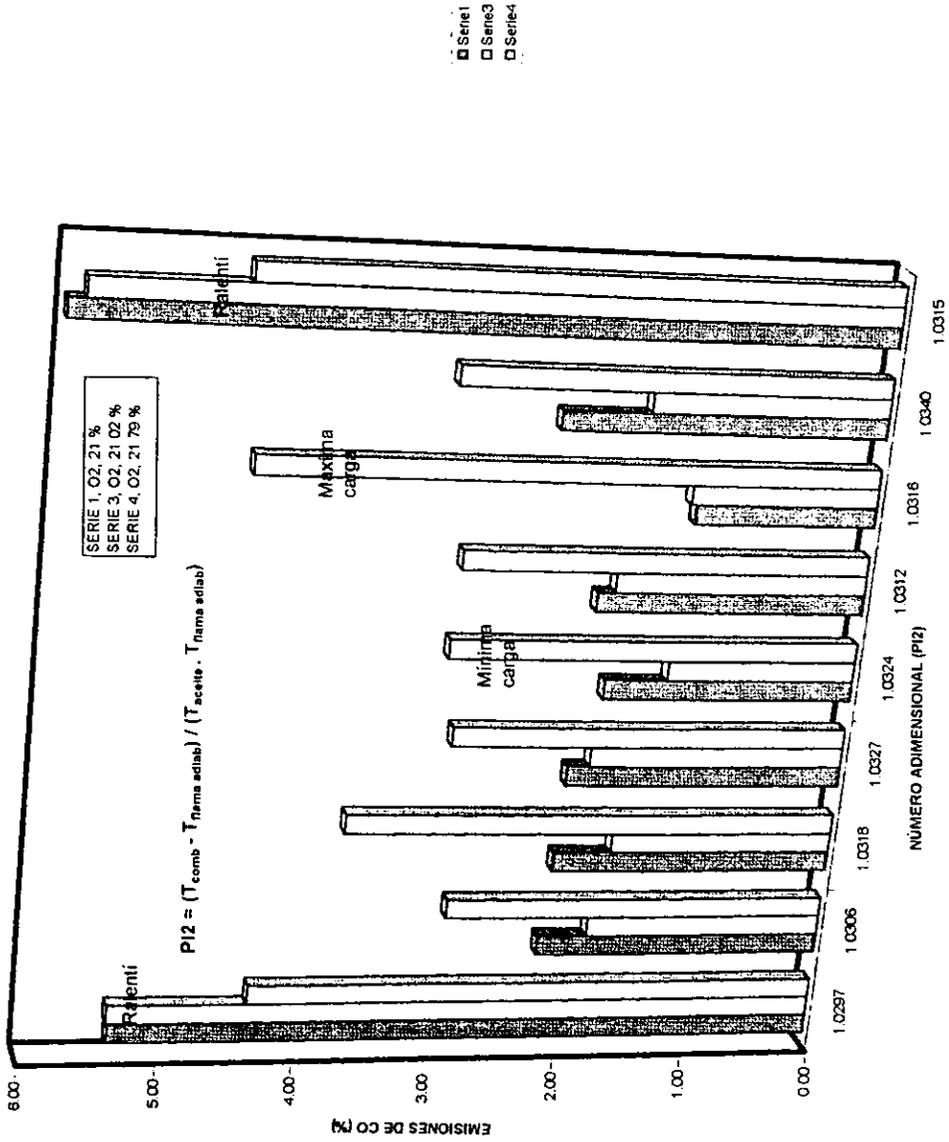
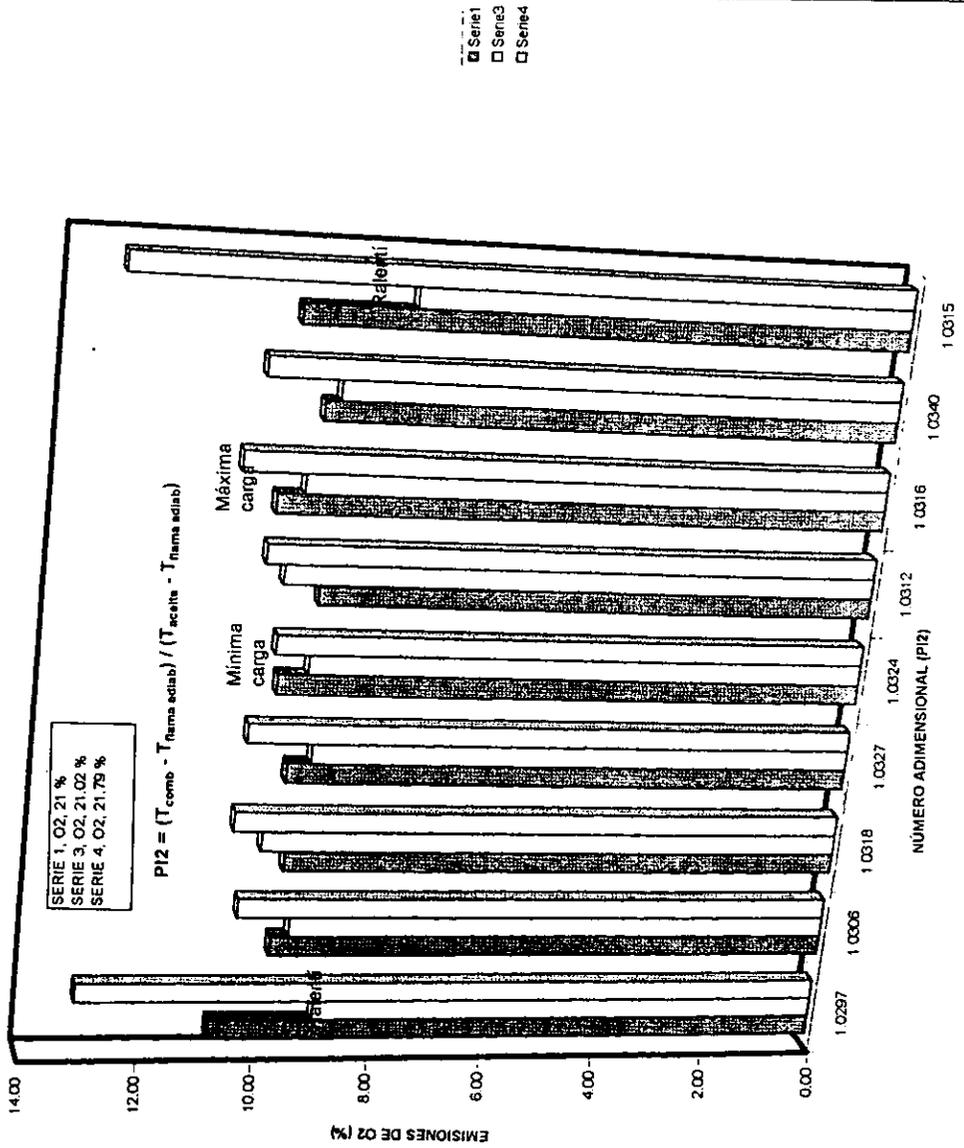


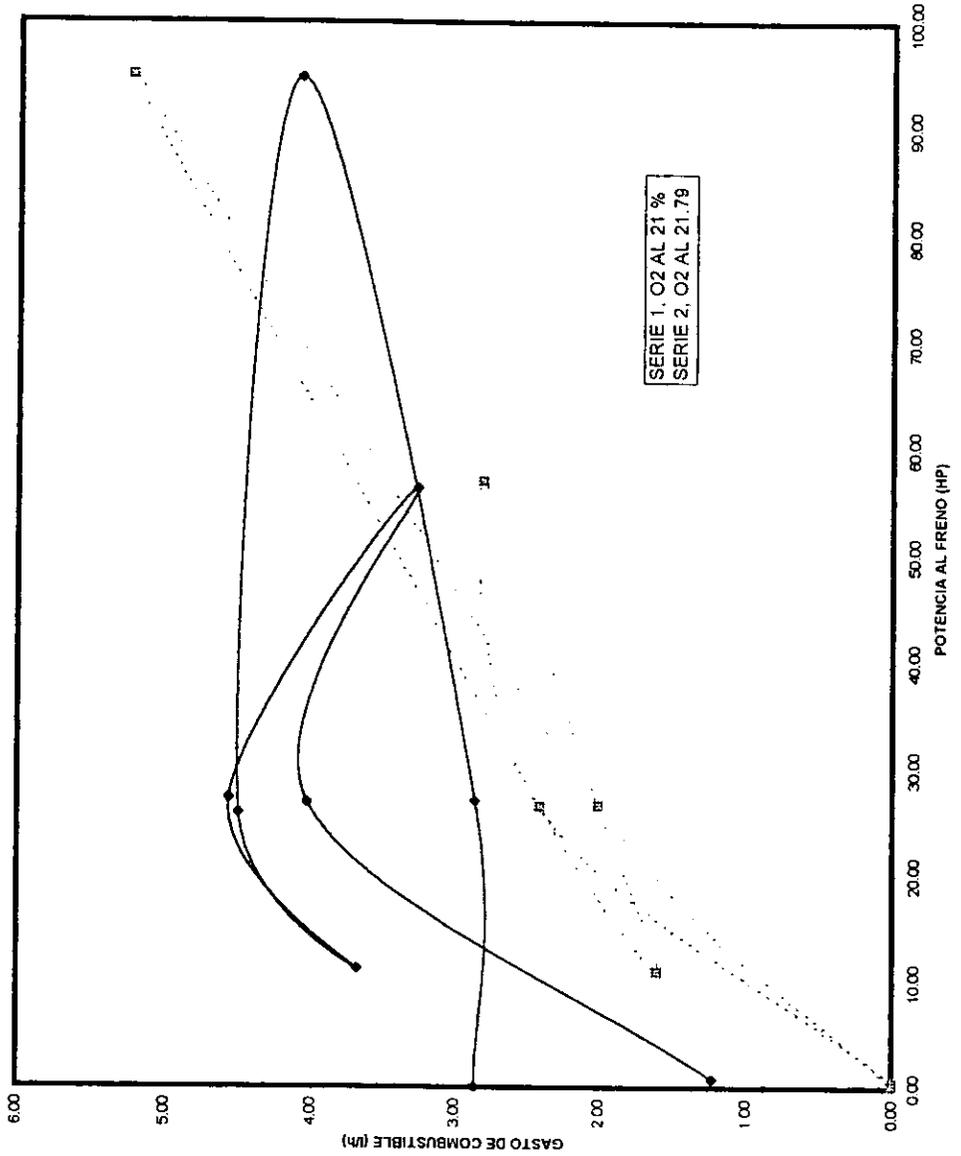
FIGURA 5.29. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE O<sub>2</sub> AL VARIAR EL OXIGENO SUMINISTRADO AL CARBURADOR



Con respecto al dióxido de carbono y al monóxido de carbono, se pudo ver en las figuras 5.27 y 5.28 respectivamente, que ambas emisiones son muy sensibles a los incrementos o decrementos de temperatura del motor, y como se había comentado, tanto el incremento en las emisiones de monóxido de carbono, como la disminución en las de dióxido de carbono se debieron principalmente a la variación de a temperatura del motor, que estuvo ligada a la inyección de oxígeno extra que hubo en el carburador.

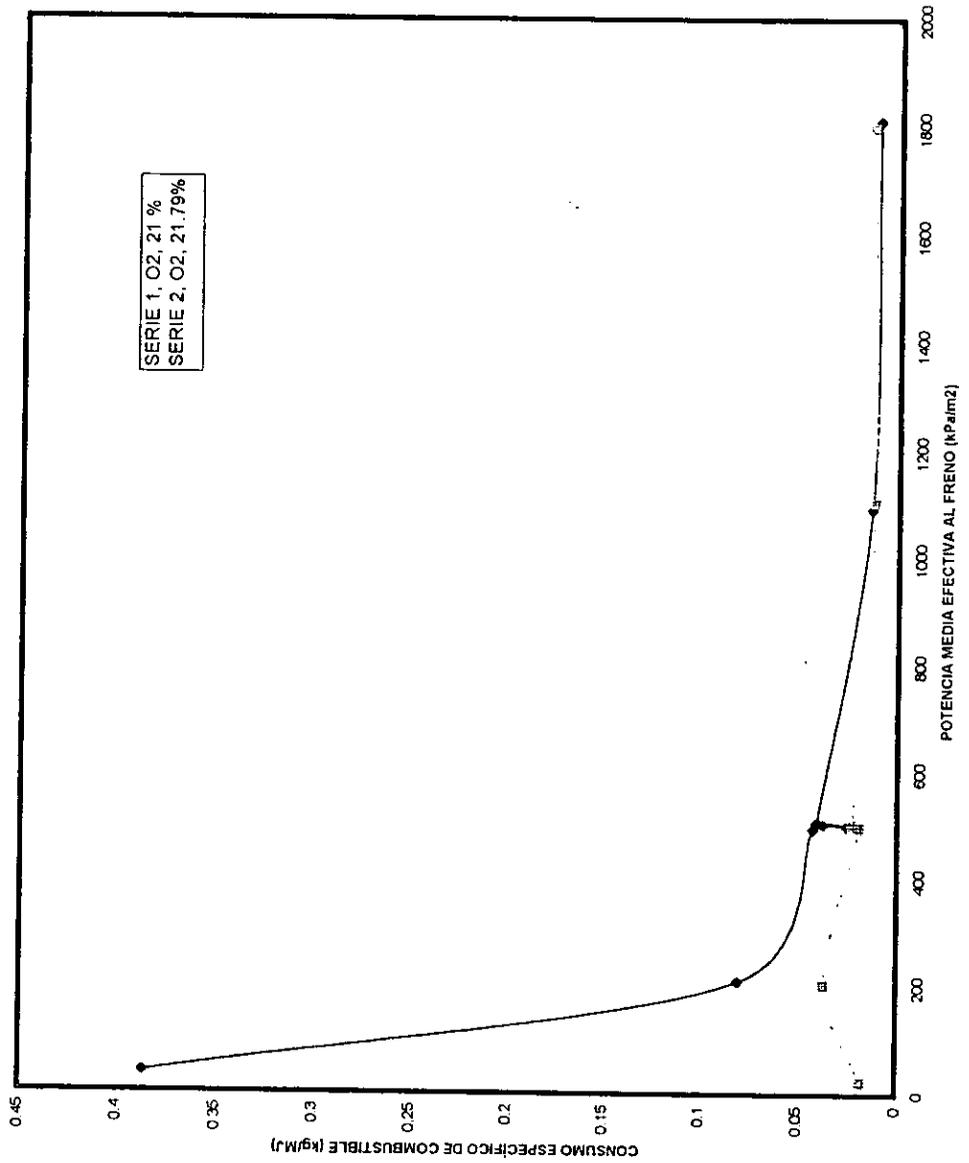
Es necesario hacer notar que las emisiones de oxígeno aumentaron en el caso de deficiencia de aire atmosférico y con inyección de oxígeno, pero no se vieron afectadas notoriamente por la variación en la temperatura del motor (figura 5.29.).

FIGURA 5.30. COMPORTAMIENTO DEL GASTO DE COMBUSTIBLE COMPARADO CONTRA LA POTENCIA AL FRENO



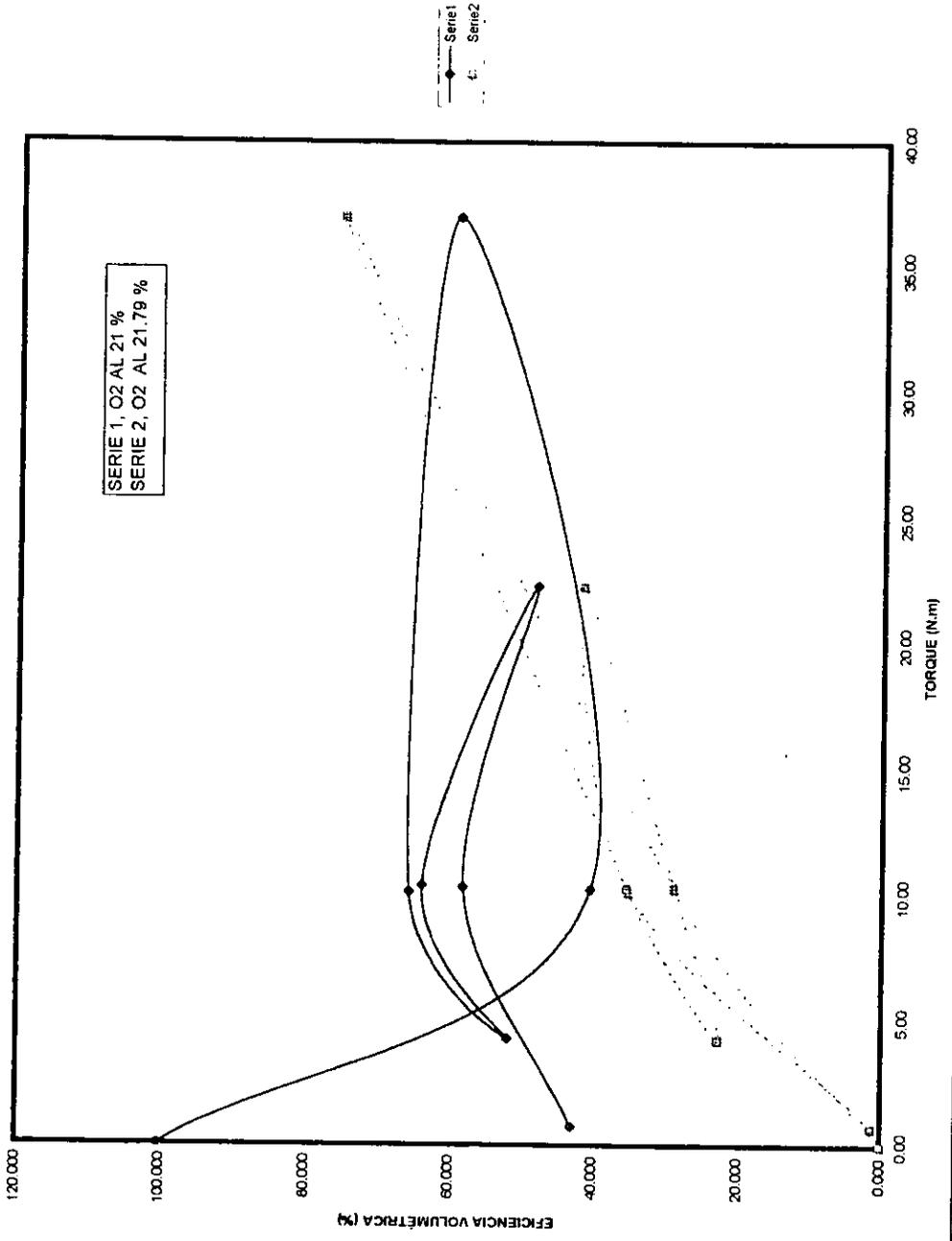
Aparte de las gráficas ya descritas, se creó una donde se ve el gasto de combustible comparado contra la potencia al freno (figura 5.30), para la combustión sin inyección de oxígeno y para el caso más eficiente (21.79 % de oxígeno en el aire), en la que se pudo ver que al aumentar la potencia aumentaba el consumo de combustible, pero se mantuvo siempre dicho consumo, para la inyección de oxígeno, por abajo del que se tuvo para la combustión sin inyección del mismo, es decir, en condiciones de exceso de aire atmosférico sin inyección. En dicha gráfica se observó algo notorio: para el caso de mayor inyección de oxígeno (21.79 %), al incrementar la potencia al máximo, el consumo de combustible se incrementó en demasía, superando incluso al de la otra curva, representada por la combustión en condiciones de exceso de aire atmosférico. Sin embargo eso se puede explicar debido a que al reducirse la eficiencia volumétrica, se vio que la masa que entraba al motor no era la suficiente, es decir, no lo llenaba, por lo que el motor, al demandar esa cantidad para mantener dicha potencia, tuvo que consumir inmediatamente mayor cantidad de combustible.

FIGURA 5.31. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE CONTRA POTENCIA MEDIA EFECTIVA AL FRENO  
 PARA DOS CASOS: 21% DE O<sub>2</sub> Y 21.79% DE O<sub>2</sub>



Además se hizo la gráfica anterior que mostraba el consumo específico de combustible comparado con la potencia media efectiva al freno (figura 5.31). En ésta se pudo ver que al aumentar la potencia, se tiene una reducción en el consumo específico de combustible en condiciones donde no hay inyección de oxígeno. Además se vio que al estar en condiciones casi de ralenti, se tuvo el mayor consumo de combustible. Sin embargo, se ve que en ralenti para la curva de mejores resultados (21.79%), se disminuyó bastante el consumo específico de combustible, lo que es muy bueno para la Ciudad de México, ya que constantemente se tienen que manejar los vehículos automotores en dichas condiciones.

FIGURA 5.32. COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA CONTRA EL TORQUE



Por último dentro de los resultados se realizó una gráfica que mostraba la eficiencia volumétrica comparada contra el torque (figura 5.32), también para las condiciones sin inyección de oxígeno y para 21.79 % de oxígeno en el aire, la cual presentó los resultados más eficientes. En esta gráfica se observó que al inyectar oxígeno se tiene una reducción en la eficiencia volumétrica, debida principalmente a la reducción del gasto de combustible. Por lo anterior, la masa que entró a los cilindros de combustión es menor que la que se presentó en condiciones donde no hubo inyección de oxígeno y por tal motivo disminuyó la eficiencia volumétrica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 5.

- [1] CODE OF FEDERAL REGULATION: Protection of Environmental # 40. Parts 86 to 49. Office of the Federal Register National Archives and Records Administration. U.S.A. 1996.
- [2] Heywood, John B. FUNDAMENTALS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES. McGraw-Hill. USA 1990. Pág. 915.
- [3] White, Frank M. MECÁNICA DE FLUIDOS. Edit. McGraw-Hill. USA, 1990. Pág. 307.
- [4] Sánchez Martínez, Sergio. CONTROL DE EMISIONES VEHICULARES. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación en el Valle de México. México, 1993. Pág. 51.
- [5] Baumester III, Theodore et al. MARKS, MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO. 9ª Edición. U.S.A. 1987. Pág. 9-90, Tabla 3.
- [6] Idem, pág. 11-6.

## CONCLUSIONES

Con base en las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de las mismas, se observó lo siguiente: suministrando al carburador de un motor de combustión interna, aire con porcentajes mayores al ambiental de 21 % (20.9575% experimental), se favorece la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno, tal y como se pudo observar en los resultados del capítulo previo. Para lograr lo anterior se necesita que el motor trabaje en condiciones de deficiencia de aire, porque de lo contrario la temperatura del lubricante del motor alcanzará temperaturas por arriba de los 100 °C (se pudo observar que la temperatura de aceite, al trabajar en condiciones de exceso de aire atmosférico e inyectando oxígeno al carburador, obtuvo dichos valores de temperatura), lo que afecta el funcionamiento del motor, poniéndolo en peligro y aumentando las emisiones de óxidos de nitrógeno en lugar de disminuirlas.

Necesariamente se tuvieron que crear dos números adimensionales, con el cual se observase el comportamiento de las tendencias, y que no hubiera variaciones en las mismas debido a la alteración de otras variables, como pudo ser el caso de la temperatura. Al revisar dichos resultados se pudo ver que aunque varió la temperatura del aceite, nunca lo fue en grado tal que afectase considerablemente los resultados de la prueba.

Al hacerlo de esta forma no se supo si se iba a presentar la reducción de emisiones como se esperaba, pero manejando la prueba de esta manera los valores sí iban a ser los representativos de cualquier condición que se presentase. En dichos resultados con el número adimensional, se comprobaron los obtenidos al hacer la comparación con el torque y la relación oxígeno/combustible real contra estequiométrica, que fue el primer número adimensional utilizado.

El análisis de los resultados indicó que al suministrar 21.789 % de oxígeno en promedio para la carburación, es decir, 3.97 % extra de oxígeno inyectado al motor (0.39 m<sup>3</sup>/h de inyección), se obtienen reducciones de óxidos de nitrógeno en promedio de 37.65 %. Principalmente debido a la disminución de la relación nitrógeno/oxígeno, es decir, debido a dicho suministro de oxígeno. Esto se comprobó al usar al otro número adimensional, que consistió de una relación de temperaturas. Con dicho número se vio que las emisiones de óxidos de nitrógeno fueron más

sensibles a los incrementos de temperatura para los casos donde hubo exceso de aire atmosférico. Sin embargo, para deficiencia del mismo, además de la inyección de oxígeno en el carburador, dicha variación no estuvo en función de los incrementos de temperatura, por lo que entonces se debió al incremento de oxígeno dado en la inyección al carburador.

Los hidrocarburos se redujeron en 13.66 % inyectando 0.39 m<sup>3</sup>/h de oxígeno, debido a que al tener mayor cantidad del mismo se realizó una combustión más completa. Algo muy importante fue la reducción considerable de las emisiones de hidrocarburos en condiciones de ralenti, es decir, sin carga, ya que en la Ciudad de México se tiene mucho el problema de congestionamientos viales, por lo cual se presentan mayor cantidad de emisiones de los mismos a la atmósfera en dichas condiciones. Esta reducción fue aún más notable, 37.09 % al arranque y 47.09 % al desacelerar, lo que da un promedio de 42.09 % de emisiones reducidas de hidrocarburos con el motor trabajando sin carga. De igual forma esta reducción se dio por la combustión completa debida a la inyección de oxígeno al carburador.

De la misma forma, se redujeron en 12.15 % las emisiones de dióxido de carbono (al inyectar 0.39 m<sup>3</sup>/h de oxígeno al carburador hasta alcanzar 21.789 % de oxígeno en el aire), principalmente por el aumento de oxígeno y la disminución de la temperatura del motor y el gasto de combustible. Las emisiones de monóxido de carbono se incrementaron en un 28.14 %, con la misma cantidad de oxígeno en el aire, debido a que casi todo el oxígeno extra que existió sirvió para dar una combustión más completa, pero éste sólo quemó principalmente a los hidrocarburos y formó dióxido de carbono, pero no pudo quemar al monóxido de carbono. Es necesario hacer notar que las emisiones del monóxido de carbono sí están fuertemente ligadas a las variaciones de la temperatura, como se pudo ver al graficar con la relación de temperaturas a sus emisiones. Sin embargo, el uso de un convertidor catalítico simple podría evitar que se incrementaran dichas emisiones.

Los resultados anteriores fueron un promedio de los 9 modos de las pruebas realizadas, es decir, un promedio de las condiciones sin y con carga, pero sin embargo al observar cada una de las variaciones con distintas cantidades de oxígeno inyectado al carburador, se observó que se presentaron de igual forma beneficios al inyectar oxígeno al carburador.

Las otras pruebas realizadas con distintos incrementos de oxígeno (21.3197 y 21.5802 %) en el aire también proporcionaron beneficios en general, pero se mencionan exclusivamente los que fueron mejores en promedio. Para el caso de la prueba con 21.025 % los resultados no fueron positivos debido a que se realizó en condiciones de exceso de aire atmosférico, aparte de haberle

inyectado oxígeno al carburador, por lo que la temperatura del motor se incrementó bastante, y las emisiones de óxidos de nitrógeno aumentaron en lugar de disminuir.

Las emisiones de oxígeno aumentaron también considerablemente de 9.2825 % a 10.3263 % (11.2 % de incremento) para el caso de 21.789 % de oxígeno en el aire (0.39 m<sup>3</sup>/h de inyección). Si bien este resultado a simple vista no indica más que efectivamente hay un aumento de oxígeno en el aire, tiene mayores implicaciones. Si se desea utilizar un convertidor catalítico sin control por computadora, ésta es una buena opción ya que de esta forma se está asegurando un exceso de oxígeno a la entrada del convertidor, que garantice su buen funcionamiento.

El gasto de combustible también se redujo, de 0.038 kg/min (3.455 l/h) a 0.023 kg/min (2.06 l/h) en promedio, para las condiciones con inyección de oxígeno al carburador (hasta lograr un valor de 21.789 % del mismo en el aire), con lo cual se obtuvo una reducción de 40.37 % de combustible, que es excelente para cualquier tipo de prueba. Lo anterior es una comprobación a las pruebas realizadas por Kimura y Brosswall, los cuales al trabajar con membranas de separación de gases, redujeron la cantidad de nitrógeno que lleva el aire en la combustión en fuentes fijas, obteniendo con esto una reducción en el consumo de combustible.

Contrario a lo que pudiera suponerse, la temperatura del lubricante se redujo en un 5.56%, que si bien no es el punto importante de este trabajo, si da esperanzas alentadoras para pruebas posteriores con estas condiciones. Al observar la eficiencia volumétrica se observó que se redujo al inyectar oxígeno, debido a la disminución de masa que entraba a los cilindros del motor. Además, en condiciones donde se exigió la máxima potencia, el consumo de combustible se incrementó bastante, por la razón de que, al no llenar totalmente el volumen de los cilindros de combustión, el motor los completó con combustible, el cual sirvió para mantener dichas condiciones de operación a plena potencia. Por lo anterior se recomienda para solucionar este problema, que haya recirculación de gases, los cuales lograrán que regrese a condiciones normales dicha eficiencia y por ende, no aumente el consumo de combustible en condiciones a plena carga.

La carburación oxigenada, por todo lo anterior, es hasta ahora el método más eficiente para reducir emisiones en vehículos automotores, enfocadas a la parte de la prevención de la formación de las mismas. Hasta la fecha existen infinidad de tecnologías y programas que ayudan a combatir la contaminación, pero todas éstas se enfocan a tratar de remediar el problema, en otras palabras, tratan de lograr que los contaminantes producidos no afecten tanto o sean combatidos. En cambio, este método evita la formación de los contaminantes, por lo que se reduciría el problema desde su origen. La carburación oxigenada, además presentó varios

beneficios adicionales, como fueron las reducciones en el consumo de combustible y temperatura del motor.

Como recomendaciones, es necesario que el equipo de medición utilizado (el rotámetro en específico) tenga mayor precisión, además de mayor capacidad para que las pruebas se puedan realizar con mayor cantidad de oxígeno suministrado, mismas que no pudieron realizarse debido a la capacidad limitada del aparato en cuestión.

Asimismo se recomienda que se trabaje en condiciones de deficiencia de aire antes de inyectar el oxígeno, para que los resultados realmente sean favorables y no se presenten desventajas en lugar de ventajas.

Por último, una vez comprobada la eficiencia de la carburación oxigenada, es importante que se de énfasis al estudio de las membranas de separación de gases, las cuales proporcionarán un medio compacto para que se pueda regular la relación nitrógeno/oxígeno del aire, de forma similar a la que utilizaron Kimura y Brosswall en sus pruebas, pero ahora hechas para fuentes móviles.

Por último, es necesario recalcar que lo importante en este estudio fue que se realizó inyectando oxígeno proveniente de un tanque, y su uso práctico es difícil, primero, porque si a un vehículo le añadimos peso extra (el tanque), presentará problemas de potencia y consumo extra de combustible, y segundo, el costo por el oxígeno es alto (aproximadamente \$150.00, ciento cincuenta pesos M.N., por sólo la carga de un cilindro de 1 m<sup>3</sup>, la renta o venta del cilindro no está incluida), por lo que lo mejor será crear una pequeña planta portátil que contenga una o varias membranas, la cual admita el aire de la atmósfera y saque aire, pero con una relación nitrógeno/oxígeno menor, con la ventaja de que no se requieren concentraciones muy elevadas, es decir, el aire se toma tal cual llega de la atmósfera, y no se tiene que inducir, como en nuestras pruebas.

Para lo anterior, actualmente existen muchos estudios de este tipo, como se puede ver en varios de los números de la revista Journal Membrane Science, donde constantemente aparecen estudios que pueden ayudarnos a resolver el problema anterior, pudiendo utilizar a las membranas como una opción para que entre aire y salga el mismo pero con una reducción en la relación nitrógeno/oxígeno. La otra opción y que también merece estudio, es la de separación de oxígeno por métodos ópticos, cuya finalidad también es la separación de gases, pero vista desde otro enfoque (uso de láseres, por ejemplo).

## APÉNDICE A. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

TABLA A.1. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA (°K) EN LA COMBUSTIÓN ESTEQUIOMÉTRICA ( $\lambda = 1.0$ ) DE OCHO COMBUSTIBLES CARACTERÍSTICOS, AL VARIAR EL PORCENTAJE DE NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

%NITRÓGENO EN EL AIRE	CH4	C3H8	C4H10	C6H6	C8H18	C16H34	CH4O	C2H6O
0								
5								
10								
15								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55							3258,924	
60	3414,096	3239,666	3440,477	3975,559			3118,746	3288,44
65	3165,711	2955,582	3277,413	3513,983	3298,039	3355,623	2906,113	3065,295
70	2895,928	2658,932	2987,496	3181,968	3004,677	2994,236	2695,871	2819,683
75	2734,615	2341,352	2665,672	2819,641	2678,826	2668,627	2452,394	2541,098
79	2324,501	2069,808	2381,109	2529,232	2391,243	2381,379	2227,912	2289,541

TABLA A.2. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA (°K) EN LA COMBUSTIÓN CON 50% DE EXCESO DE AIRE ( $\lambda = 1.5$ ) DE OCHO COMBUSTIBLES CARACTERÍSTICOS, AL VARIAR EL PORCENTAJE DE NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

%NITRÓGENO EN EL AIRE	CH4	C3H8	C4H10	C6H6	C8H18	C16H34	CH4O	C2H6O
0								
5								
10								
15								
20								
25								
30							3288,781	
35							3186,601	
40	3391,923						3077,958	3269,003
45	3230,454	3336,589	3347,026		3369,688	3359,451	2956,038	3123,995
50	3062,81	3157,145	3166,065	3385,269	3185,985	3175,527	2835,523	2971,864
55	2881,367	2964,053	2971,514	3163,596	2988,794	2978,337	2693,311	2806,34
60	2686,061	2757,33	2763,381	2928,841	2777,869	2767,48	2527,613	2626,559
65	2474,331	2534,318	2539,037	2678,397	2550,83	2540,722	2304,936	2429,179
70	2248,724	2297,948	2301,268	2416,042	2310,697	2301,029	2163,186	2218,066
75	2001,769	2040,527	2043,006	2134,025	2049,971	2040,514	1948,825	1984,213
79	1786,434	1817,251	1817,012	1891,025	1824,316	1814,143	1757,429	1777,884

TABLA A.3. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA (°K) EN LA COMBUSTIÓN CON 100% DE EXCESO DE AIRE ( $\lambda = 2.0$ ) DE OCHO COMBUSTIBLES CARACTERÍSTICOS, AL VARIAR EL PORCENTAJE DE NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

%NITRÓGENO EN EL AIRE	CH4	C3H8	C4H10	C6H6	C8H18	C16H34	CH4O	C2H6O
0								
5							3294,443	
10							3221,723	
15							3144,2	3348,297
20	3368,764						3061,447	3248,648
25	3253,058	3360,534	3371,154		3394,144	3383,961	2973,891	3144,297
30	3128,993	3227,625	3237,071		3257,908	3247,623	2878,757	3032,087
35	3000,853	3090,567	3099,025	3307,806	3117,96	3107,63	2759,04	2915,658
40	2867,535	2949,436	2956,733	3146,064	2973,562	2963,183	2631,884	2793,784
45	2722,068	2795,439	2801,707	2971,308	2816,505	2806,175	2535,492	2659,858
50	2572,149	2637,177	2642,439	2793,266	2655,427	2639,768	2424,661	2520,568
55	2411,731	2468,379	2472,43	2604,896	2484,705	2473,963	2288,546	2370,7
60	2240,858	2289,399	2293,174	2415,608	2302,46	2316,968	2156,613	2208,752
65	2057,987	2098,78	2102,701	2197,606	2109,16	2085,798	1998,26	2037,446
70	1865,516	1899,287	1902,238	1979,708	1907,068	1885,573	1828,444	1852,497
75	1657,724	1684,414	1685,676	1747,597	1690,21	1682,098	1640,803	1652,983
79	1478,249	1500,278	1501,023	1551,361	1504,223	1496,183	1474,124	1479,243

TABLA A.4. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA (°K) EN LA COMBUSTIÓN CON 150% DE EXCESO DE AIRE ( $\lambda = 2.5$ ) DE OCHO COMBUSTIBLES CARACTERÍSTICOS, AL VARIAR EL PORCENTAJE DE NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

%NITRÓGENO EN EL AIRE	CH4	C3H8	C4H10	C6H6	C8H18	C16H34	CH4O	C2H6O
0	3346,823						3045,639	3229,347
5	3255,376						2976,404	3146,981
10	3161,715	3262,308	3272,034		3293,348	3283,115	2904,469	3062,424
15	3063,790	3157,718	3166,732		3186,341	3176,070	2828,621	2973,322
20	2960,243	3047,531	3055,696	3257,653	3073,799	3063,435	2747,246	2878,903
25	2853,173	2934,008	2977,221	3127,852	2957,782	2947,447	2662,522	2780,725
30	2738,676	2812,838	2819,202	2990,751	2834,251	2823,912	2570,306	2675,255
35	2620,958	2688,409	2694,049	2850,747	2707,676	2697,280	2474,744	2566,166
40	2499,684	2560,822	2585,565	2707,799	2577,772	2567,643	2374,841	2452,841
45	2368,067	2422,804	2426,769	2553,960	2437,404	2427,487	2264,697	2329,918
50	2233,060	2281,715	2285,227	2398,417	2294,317	2284,709	2150,209	2203,477
55	2090,090	2132,188	2135,191	2236,615	2142,905	2133,831	2026,610	2067,918
60	1939,041	1975,482	1977,362	2062,984	1984,163	1975,298	1893,839	1923,393
65	1778,454	1808,806	1810,405	1883,303	1816,018	1807,803	1750,009	1768,745
70	1610,953	1636,180	1636,887	1697,789	1641,517	1633,958	1597,942	1608,237
75	1431,561	1449,737	1452,420	1501,393	1455,687	1448,855	1430,913	1433,409
79	1277,997	1292,218	1293,924	1331,707	1296,861	1291,524	1284,469	1282,665

TABLA A.5. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA (°K) EN LA COMBUSTIÓN CON 200% DE EXCESO DE AIRE ( $\lambda = 3.0$ ) DE OCHO COMBUSTIBLES CARACTERÍSTICOS, AL VARIAR EL PORCENTAJE DE NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

%NITRÓGENO EN EL AIRE	CH4	C3H8	C4H10	C6H6	C8H18	C16H34	CH4O	C2H6O
0	3012,978	3103,207	3111,918	3321,031	3130,773	3120,492	2789,173	2927,247
5	2926,953	3012,138	3019,704	3216,431	3037,450	3027,152	2721,459	2848,545
10	2838,977	2918,825	2925,935	3110,399	2942,142	2931,945	2651,477	2767,387
15	2747,254	2821,834	2828,187	3000,206	2843,371	2833,042	2577,600	2683,279
20	2650,735	2719,759	2612,697	2811,033	2739,566	2729,300	2499,354	2594,097
25	2551,397	2615,263	2620,537	2768,251	2633,007	2622,861	2417,460	2501,157
30	2445,640	2504,110	2480,037	2644,302	2519,988	2509,991	2329,734	2402,330
35	2337,373	2390,088	2353,603	2518,340	2404,813	2394,972	2238,601	2301,270
40	2226,326	2274,551	2277,840	2390,094	2287,003	2277,413	2144,054	2196,860
45	2106,555	2149,204	2152,340	2199,967	2160,297	2150,996	2040,001	2083,352
50	1984,553	2022,682	2024,951	2114,708	2031,921	2022,953	1933,500	1967,303
55	1856,410	1889,021	1890,562	2049,415	1896,767	1888,154	1819,768	1842,966
60	1720,444	1749,121	1749,865	1818,718	1755,409	1747,304	1696,821	1712,911
65	1577,271	1601,012	1602,688	1660,594	1606,714	1599,129	1566,837	1575,516
70	1428,905	1448,529	1449,515	1497,673	1452,717	1446,208	1427,796	1430,907
75	1353,329	1287,365	1287,180	1314,556	1344,057	1284,200	1278,029	1275,687
79	1136,599	1149,631	1149,752	1131,469	1151,707	1146,616	1148,662	1143,061

TABLA A.6. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA (°K) EN LA COMBUSTIÓN CON 250% DE EXCESO DE AIRE ( $\lambda = 3.5$ ) DE OCHO COMBUSTIBLES CARACTERÍSTICOS, AL VARIAR EL PORCENTAJE DE NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

%NITRÓGENO EN EL AIRE	CH4	C3H8	C4H10	C6H6	C8H18	C16H34	CH4O	C2H6O
0	2747,276	2821,434	2828,139	3000,070	2843,195	2832,895	2577,560	2683,375
5	2667,362	2728,074	2741,688	2903,469	2756,013	2745,748	2511,975	2608,623
10	2590,063	2620,164	2654,380	2805,947	2667,343	2657,145	2444,091	2531,241
15	2497,573	2558,551	2563,429	2704,976	2575,445	2565,343	2380,857	2450,904
20	2407,523	2464,077	2468,164	2599,437	2479,337	2418,193	2297,994	2366,733
25	2314,894	2367,233	2371,006	2492,445	2381,033	2371,223	2219,662	2280,979
30	2216,951	2264,353	2267,974	2379,347	2277,036	2267,439	2136,152	2187,946
35	2116,972	2160,324	2162,963	2264,763	2171,362	2162,026	2049,914	2093,252
40	2014,910	2054,119	2056,675	2149,025	2063,912	2054,843	1960,895	1996,632
45	1905,095	1940,287	1941,594	2025,150	1948,499	1939,804	1862,867	1890,607
50	1793,732	1824,957	1826,909	1900,241	1832,139	1823,701	1763,010	1783,467
55	1676,666	1726,715	1704,767	1770,647	1709,982	1702,150	1657,419	1671,090
60	1554,118	1577,744	1578,003	1635,404	1582,708	1575,402	1545,433	1552,900
65	1425,172	1445,348	1445,386	1493,943	1449,296	1442,553	1424,326	1427,348
70	1292,041	1308,941	1308,452	1349,503	1311,945	1305,897	1298,049	1296,424
75	1150,717	1161,935	1163,689	1198,341	1166,789	1161,423	1163,094	1157,299
79	1031,315	1041,948	1041,475	1068,661	1044,135	1039,215	1046,325	1038,658

FIGURA A.1. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL BUTANO (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE

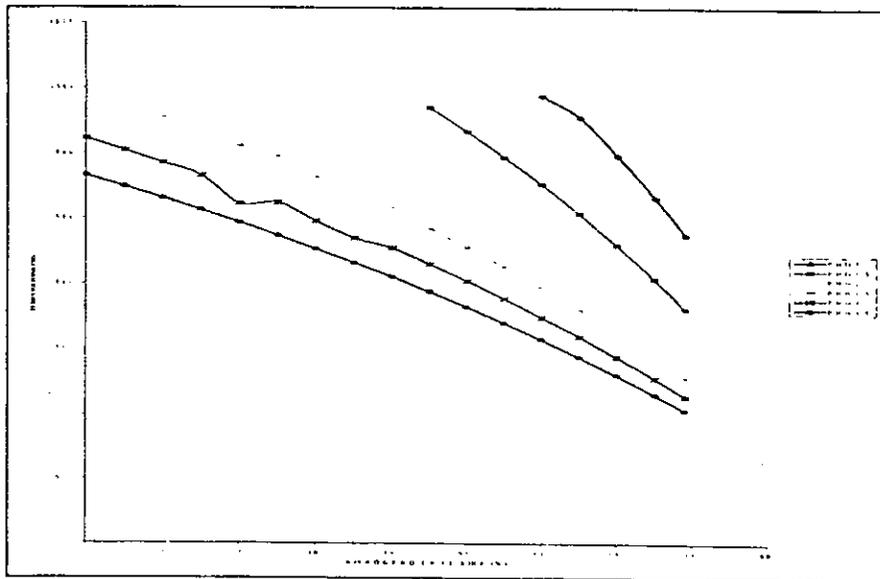


FIGURA A 2 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL PROPANO (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE

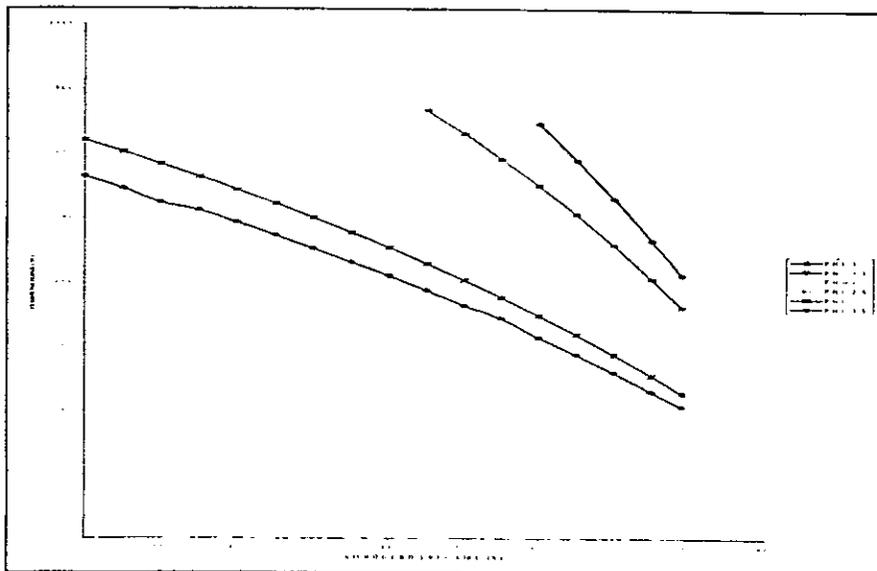


FIGURA A.3. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL METANO (CH<sub>4</sub>) AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE

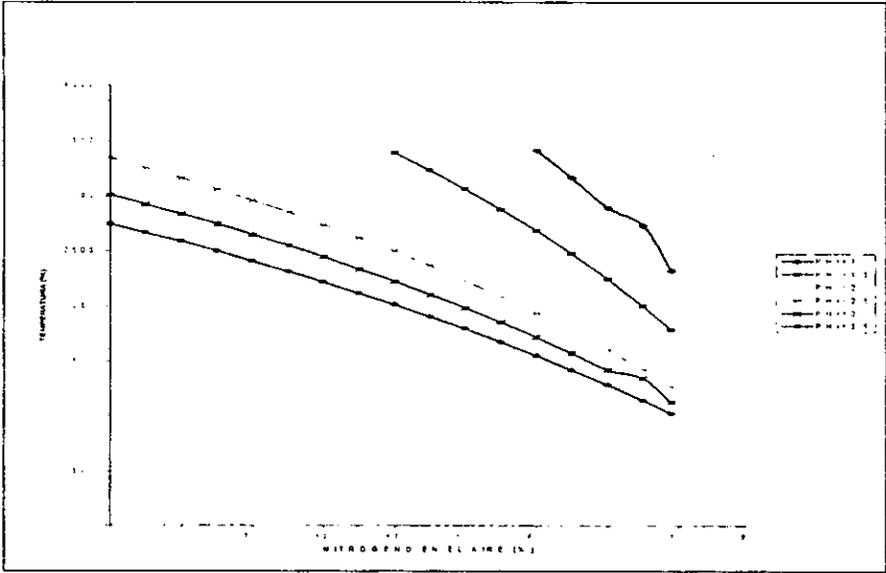


FIGURA A.4. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL BENCENO C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE

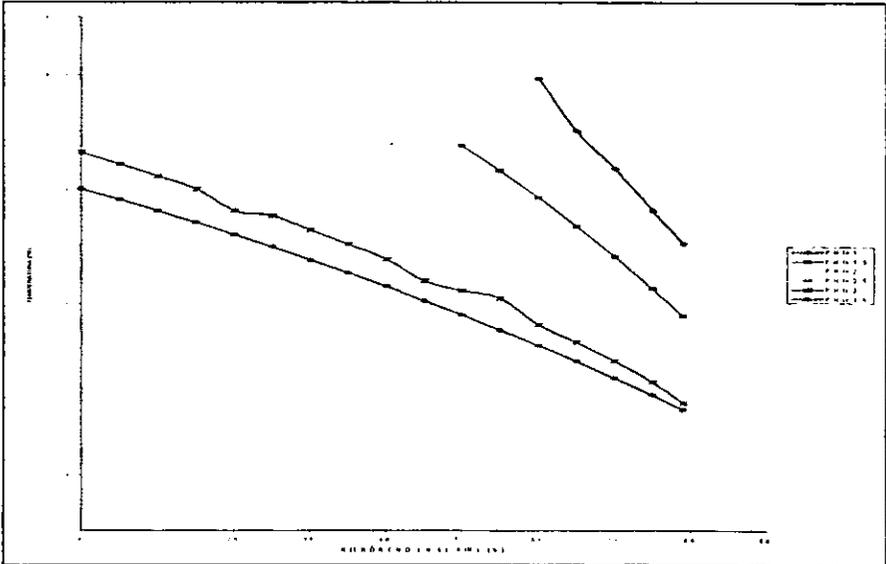


FIGURA A.5. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL OCTANO (C8H18) AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

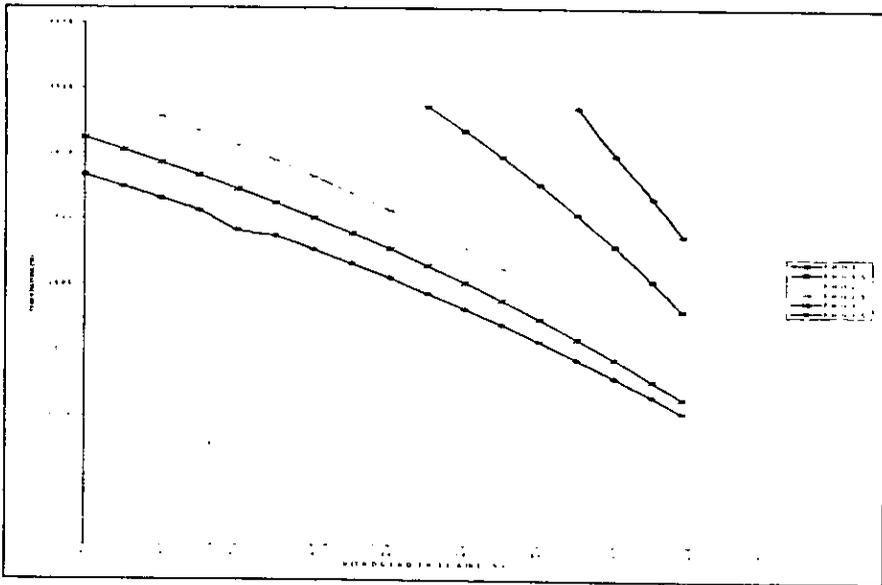


FIGURA A 6. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL CETANO (C16H34) AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE g

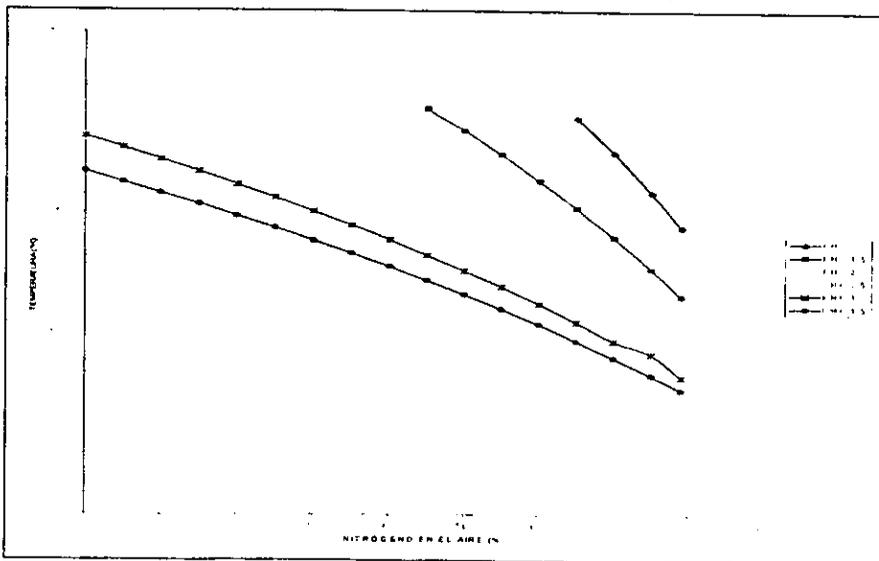


FIGURA A.7 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL METANOL,  $\text{CH}_3(\text{OH})$  AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.

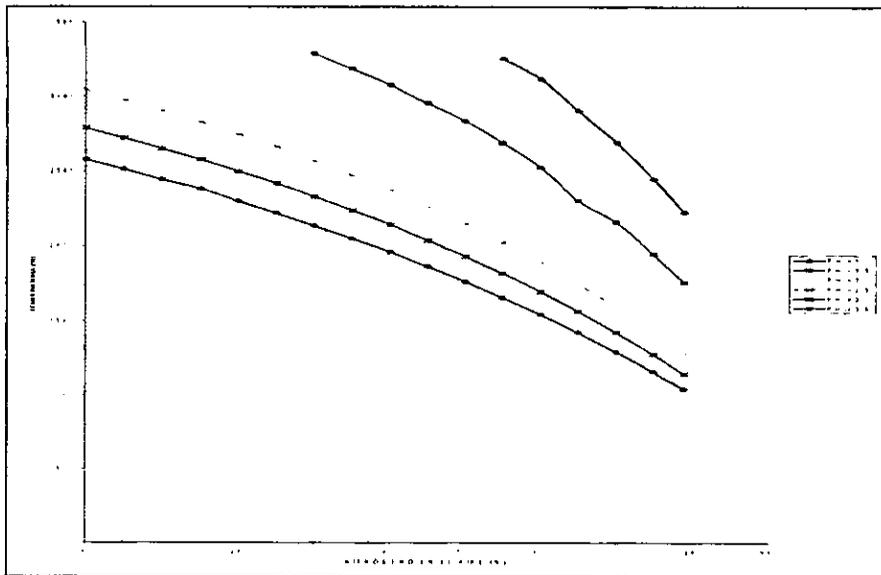
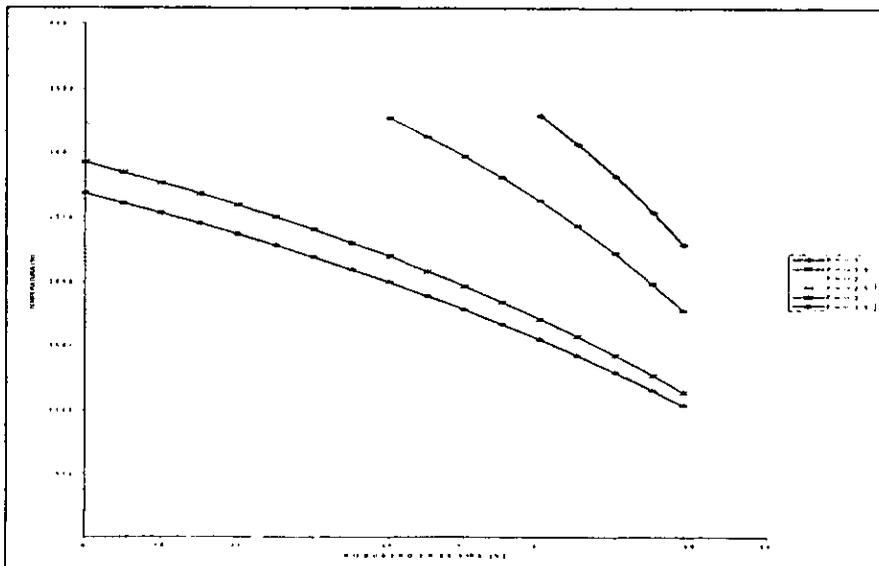


FIGURA A.8. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA PARA EL ETANOL,  $\text{C}_2\text{H}_5(\text{OH})$  AL VARIAR EL NITRÓGENO CONTENIDO EN EL AIRE.



# APÉNDICE B

## LISTA DE SÍMBOLOS, SUBÍNDICES Y ABREVIATURAS.

A	Aire.
Ar	Argón.
A <sub>t</sub>	Aire Teórico.
C	Carbono molecular.
CEC	Consumo específico de combustible por unidad de potencia
CH <sub>4</sub>	Metano.
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etano.
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propano.
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Butano
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Pentano.
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	Hexano.
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	Heptano.
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Octano.
CH <sub>2</sub>	Meteno.
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Eteno.
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Propeno.
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	Buteno.
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	Penteno.
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	Hexeno.
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Ciclopropano.
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	Ciclobutano.
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	Ciclopentano.
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	Ciclohexano.
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	Cicloheptano.
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	Ciclooctano.
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benceno.
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Tolueno.
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Xileno.
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	Cetano.

CH <sub>3</sub> OH	Metanol.
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Etanol.
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OH	Acetona.
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	Eter dietílico.
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	Butanol.
CO	Monóxido de carbono.
CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono.
Comb	Combustible.
DA	Deficiencia de aire.
Est	Estequiométrico.
EA	Exceso de aire.
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Recirculación de gases de escape).
H	Entalpía.
H <sub>2</sub>	Hidrógeno.
H <sub>2</sub> O	Agua.
H <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	Acido nítrico.
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acido sulfúrico.
h	Entalpía molar.
Δh <sub>f</sub>	Entalpía de formación.
Δh <sup>o</sup> <sub>298</sub>	Entalpía de formación a la temperatura y presión de referencia
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.
Iso	Prefijo usado en los combustibles para determinar a los isómeros.
K	Constantes de equilibrio.
k	Constantes de velocidad.
M	Masa molecular.
MBT	Antes de la posición más alta de la biela.
m	Meta (prefijo usado en los hidrocarburos aromáticos para indicar en que átomo de carbono se unen los radicales metilo).
m <sub>a</sub>	Masa de aire que realmente entra a un motor.
m <sub>ag</sub>	Masa de agua.
m <sub>comb</sub>	Masa de combustible.
m <sub>VD</sub>	Masa de aire que en las condiciones ambientales ocuparía el volumen desplazado.
N	Número de revoluciones a las que gira un motor.
N	Número de moles de cualquier reactivo o producto.
NC	Número de cetano.
NOc	Número de octano.
NO	Óxido nítrico.

NO <sub>x</sub>	Oxidos de nitrógeno
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno.
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trióxido de nitrógeno.
N	Normal (referido a condiciones normales).
n	Normal (para combustibles).
O <sub>2</sub>	Oxígeno.
O <sub>3</sub>	Ozono.
o	Orto (prefijo usado en los hidrocarburos aromáticos para indicar en que átomo de carbono se unen los radicales metilo).
OMS	Organización Mundial de la Salud.
P	Productos.
PAN	Nitrato de peroxiacilo.
Pa	Presión del aire ambiente.
P <sub>me</sub>	Presión media efectiva.
PBZN	Nitrato de peroxibenzoilo.
Pb	Plomo.
PC	Poder calorífico.
PC <sub>p</sub>	Poder calorífico a presión constante.
PC <sub>v</sub>	Poder calorífico a volumen constante.
PCS	Poder calorífico superior.
PCI	Poder calorífico inferior.
PMI	Punto muerto inferior.
PMS	Punto muerto superior.
PM10	Partículas menores a 10 micras.
Ppm	Partes por millón.
p	Para (prefijo usado en los hidrocarburos aromáticos para indicar en que átomo de carbono se unen los radicales metilo).
PST	Partículas Suspensas Totales.
Q <sub>entrada</sub>	Transferencia de calor a la entrada de un sistema.
R	Reactivos.
R <sub>aire</sub>	Constante de gas ideal para el aire.
r	Relación de compresión.
r <sub>e</sub>	Relación de expansión
S	Gravedad específica
SO <sub>2</sub>	Bióxido de azufre.
SO <sub>3</sub>	Trióxido de azufre.
Ta	Temperatura del aire.

T	Par motor.
TC	Posición más alta en la biela.
TEL	Tetraetilo de plomo.
U	Energía interna.
$V_{PMI}$	Volumen en el punto muerto inferior ( $V_1$ ).
$V_{PMS}$	Volumen en el punto muerto superior ( $V_2$ ).
$W_{neto}$	Trabajo realizado o producido.
$W_{ciclo}$	Trabajo o potencia del ciclo.
$\eta_V$	Eficiencia volumétrica.
$\eta_t$	Eficiencia térmica.
$\eta_m$	Eficiencia mecánica.
$\eta_R$	Eficiencia global o eficiencia al freno de la máquina de combustión interna al freno.
$\phi$	Relación de equivalencia combustible/aire.
$\lambda$	Relación relativa aire/combustible
°API	Grados API (American Petroleum Institute).
$\tau$	Tiempo característico.

## APÉNDICE C

# MÉTODO DE LOS DIECIOCHO PASOS PARA MEDICIÓN DE EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO<sup>1</sup>

CICLO DE PRUEBA PARA MOTORES DE GASOLINA.

- a) La siguiente secuencia de pruebas debe de ser seguida en pruebas de operación con dinamómetros en motores de gasolina.

CICLO No.	MODO No.	MODO	TORQUE OBSERVADO (PORCENTAJE DEL MÁXIMO OBSERVADO)	TIEMPO EN SEGUNDOS DEL MODO	TIEMPO ACUMULATIVO EN SEGUNDOS	FACTORES DE CARGA
1	1	RALENTI	.....	60	60	0.232
1	2	CRUCERO	25	60	120	0.077
1	3	ACELERACIÓN	55	60	180	0.147
1	4	CRUCERO	25	60	240	0.077
1	5	DESACELERACIÓN	10	60	300	0.057
1	6	CRUCERO	25	60	360	0.077
1	7	PLENA CARGA	90	60	420	0.113
1	8	CRUCERO	25	60	480	0.077
1	9	RALENTI	.....	60	540	0.143
2	10	CRUCERO	25	60	600	0.077
2	11	ACELERACIÓN	55	60	660	0.147
2	12	CRUCERO	25	60	720	0.077
2	13	DESACELERACIÓN	10	60	780	0.057
2	14	CRUCERO	25	60	840	0.077
2	15	PLENA CARGA	90	60	900	0.113
2	16	CRUCERO	25	60	960	0.077
2	17	RALENTI	.....	60	1020	0.143
2	18	RALENTI	.....	60	1080	0.232

<sup>1</sup> CODE OF FEDERAL REGULATIONS. Protection of Environment. Parts 86 and 49. Revised as of July 1, 1996. Office of the Federal Register of National Archives and Records Administration. USA, 1990. pp 442-443

- b) Excepto para los pasos 1 y 18, el dinamómetro del motor debe de ser operado a una velocidad constante de 2000 rpm  $\pm$  100 rpm. Las desviaciones de velocidad no deben de exceder 200 rpm, las que serán permitidas durante los primeros 10 seg de cada modo.
- c) Los tiempos en modo especificados en el párrafo (a) para los modos 9 y 17 son  $\pm$  2 segundos. Los demás modos en tiempo son de  $\pm$  4 segundos.
- d) Los primeros 35 segundos de cada modo de potencia de 60 segundos son indicados para la estabilización del dinamómetro y el motor. Después del periodo de estabilización, el torque debe de estar dentro del valor de  $\pm$  5 por ciento hasta el periodo de análisis de gases de salida. Durante el periodo de análisis de los gases de escape, los últimos 10 segundos de cada modo deben de estar dentro del valor especificado  $\pm$  2 por ciento del máximo torque observado. Por ejemplo para el modo 3 el torque debe de estar entre 55 y 57 por ciento del máximo torque observado ( $55 \pm 2$  por ciento) durante el periodo de análisis de los gases de escape. Previo al periodo de análisis, pero excluyendo los primeros 35 segundos del modo, el torque debe de estar entre 50 y 60 % del máximo torque ( $55\% \pm 5\%$ ).
- e) Los modos 1 y 18 deben de estar dentro de los parámetros de manufactura recomendados por las curvas de operación del motor. Llegando al modo 18 cerrando las válvulas, se frena el dinamómetro a la velocidad de ralentí del motor y descargando el dinamómetro.
- f) Para el modo 9 y 17 debe cargarse a la misma velocidad de la especificada en el párrafo (b) de esta sección.
- g) Si el Administrador determina que el motor debe de ser probado como el código de motores para transmisión automática, entonces una carga especial debe de ser aplicada por el dinamómetro durante los modos 1 y 18 de forma tal que la velocidad del motor disminuye de la velocidad del dinamómetro recomendada por las curvas de operación del motor.
- h) Si las condiciones de operación especificadas en el párrafo (a) de esta sección para los modos 2 a 18, y 10 a 16 no pueden ser mantenidas, el Administrador puede autorizar desviaciones de las condiciones de carga especificadas. Dichas desviaciones no deben de exceder por ciento del torque máximo de la velocidad de la prueba. Las desviaciones mínimas, arriba y abajo de la carga especificada deben de ser especificadas por el fabricante y aprobadas por el Administrador previo a la comida de pruebas. Las pruebas de emisión deben de ser ajustadas por operación del motor a la mayor carga aprobada colocada durante el ciclo 1 y al menor del ciclo 2. Los factores de carga deben de especificadas como los especificados en el párrafo (a) de esta sección.

(Secciones 206, 301 (a), Actas de aire limpio corregidas (42 U. S. C. 7525, 7601 (a)))

(42 FR 45154, 8 de septiembre, 1977, corregidas a 44 FR 16917, 20 de marzo, 1979; 47 FR 49813, 2 de noviembre de 1982).

# BIBLIOGRAFIA

Aguillón, Javier. APUNTES DE INGENIERÍA DE PROCESOS INDUSTRIALES. Instituto de Ingeniería, Facultad de Ingeniería. UNAM. México. 1997.

American Society of Mechanical Engineers. ENGINE EMISSIONS TECHNOLOGY FOR THE 1990'S. The Internal Combustion Engine Division Technical Conference. San Antonio, Texas. October 2-5 1988. Edited by Southwest Research Institute. U.S.A. 182 págs.

Baumester III, Theodore et al. MARKS, MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO. 9ª Edición. U.S.A. 1987.

Benson, Rowland S. THE THERMODYNAMICS AND GAS DYNAMICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES. Volume 1. Edited by J.H. Horlock F.R.S. and D. E. Winterborne. Northern Ireland. 1982.

Chrysler, México. FUNDAMENTOS Y HECHOS DE LA CARBURACIÓN. Conferencia de Servicio para Maestros Técnicos. Manual de referencia México. 1993.

CODE OF FEDERAL REGULATION: Protection of Environmental # 40. Parts 86 to 49. Office of the Federal Register National Archives and Records Administration. U.S.A. 1996.

Giacosa, Dante. MOTORES ENDOTÉRMICOS. Ediciones Omega. Barcelona España. 1988.

Heywood, John B. INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS. McGraw-Hill Book Company. U.S.A. 1989. 911 págs.

Kimura, S.G. Browall, S.G. MEMBRANE OXYGEN ENRICHMENT. DEMONSTRATION OF MEMBRANE OXYGEN ENRICHMENT FOR NATURAL GAS COMBUSTION. Journal of Membrane Science. 29(1986) 69-77. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, Netherlands.

Medina Hernández, Eduardo. APUNTES DE MÁQUINAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO. Facultad de Ingeniería, UNAM. México. 1995.

Muñoz, M. Payrí, F, et alii. MOTORES DE COMBUSTION INTERNA ALTERNATIVOS. Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales. Fundación General de la U.P.M. España, 1989.

Obert, Edward F. INTERNAL COMBUSTION ENGINES third edition. International Textbook Company. U.S.A. 1970.

Patterson, D.J. / Henein N.A. EMISSIONS FROM COMBUSTION ENGINES AND THEIR CONTROL. Ann Arbor Science Publishers Inc. U.S.A. 1972. 355 págs.

Peavy, Howard S. Rowe, Donald R. Tchobanoglous, George. ENVIRONMENTAL ENGINEERING. McGraw-Hill. U.S.A. 1985.

PEMEX. Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD PARA SUBSTANCIAS. México. 1997

Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. AVANCES A SEPTIEMBRE DE 1993. Comisión Metropolitana para prevención y Control de la Contaminación en el Valle de México. México, 1994.

Quiñones Valenzuela, Alfonso. EL AMBIENTE EN LAS ALTERACIONES DE LA SALUD. Colegio de Bachilleres. Publicaciones Cultural. México. 1980.

Ramos, J.I. INTERNAL COMBUSTION ENGINE MODELING. Hemisphere Publishing Corporation. U.S.A. 1989. 422 págs.

Red de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. INFORME ANUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE 1995. Comisión Metropolitana para la prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. México. 1996.

Sánchez Martínez Sergio. CONTROL DE EMISIONES VEHICULARES. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación en el Valle de México. México, 1993.

Secretaría de Desarrollo Social. Instituto Nacional de Ecología. INFORME DE LA SITUACION GENERAL EN MATERIA DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCION AL AMBIENTE. México. 1993.

Stern, Arthur C. AIR POLLUTION. Third Edition. Volumen III. Measuring, Monitoring, and Surveillance of Air Pollution. Academic Press. U.S.A. 1976.

Stern, Arthur C. AIR POLLUTION. Third Edition. Volumen IV. Engineering Control of Air Pollution. Academic Press. U.S.A. 1976.

Seinfeld, John, B. AIR POLLUTION. John Wiley and Sons. U.S.A. 1986. 738 págs.

Sutton, George P. ROCKET PROPULSION ELEMENT. John Wiley and Sons, Inc. U.S.A. 1992. 636 págs.

Taplin, Harry R. COMBUSTION EFFICIENCY TABLES. The Fairmont Press, Inc. U.S.A. 1991. 228 págs.

Taylor, Charles F. THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE IN THEORY AND PRACTICE. Volume 1: Thermodynamics, Fluid Flow, Performance. The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology. U.S.A. 1977.

Taylor, Charles F. THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE IN THEORY AND PRACTICE. Volumen 2. Combustion, Fuel Materials, Design The M.I.T. Press. Massachusetts Institute of Technology. U.S.A. 1977.

Wark, Kenneth. TERMODINÁMICA. Editorial McGraw-Hill. México. 1991.

White, Frank M. MECÁNICA DE FLUIDOS. Edit. McGraw-Hill. USA, 1990.