



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA EN UN MOTOR DE
COMBUSTION INTERNA CON COMBUSTION OXIGENADA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO
(AREA TERMOENERGIA Y
MEJORAMIENTO AMBIENTAL)
P R E S E N T A :
JESUS ARMANDO AGUILLON GODINEZ



DIRECTOR DE TESIS: M.I. ESTEBAN BARRIOS BONILLA

CO-DIRECTOR: DR. ROGELIO GONZALEZ OROPEZA

MEXICO, D.F., CD. UNIVERSITARIA.

2002.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, hermanos y amigos:

No escribo nombres, pues nunca estarán todos los que hicieron posible el llegar hasta este punto de mi carrera, por lo que solo diré:

gracias a quienes tuvieron la bondad de brindarme su apoyo.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Jesús Armando

Aguilón Godínez

FECHA: 19 Noviembre 2002

FIRMA: 

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran resultados experimentales que se obtuvieron del análisis en un banco de pruebas instrumentado especialmente para un motor de combustión interna de encendido provocado enfriado por aire, de carburación natural, 3.5 HP A 3600 r.p.m. nominales.

En el cigüeñal del motor se acopló un polea en "V" de aluminio de cuatro pulgadas de diámetro. Se paso en dicha polea una correa de cuero sujeta con un dinamómetro en cada extremo con la que se pudo aplicar un par al motor y simular diferentes condiciones de operación. Se midieron emisiones con el analizador de gases Andros registrando las lecturas en un ordenador.

Se instaló un suministro de oxígeno puro en la succión de aire del carburador. El flujo volumétrico fue regulado con un rotámetro y se alcanzaron concentraciones de 22.77% en el aire para la combustión.

Con el enriquecimiento de oxígeno a la mezcla aire/combustible, se observo un considerable ahorro de combustible, una disminución de HC y CO en los gases producto de la combustión así como aumento de CO₂ y NO_x, el aumento de este último se atribuye principalmente al aumento de temperatura en la cámara de combustión y al tipo de enfriamiento del motor.

El objetivo principal de la experimentación es mejorar el rendimiento de combustible en el motor, mediante la adición de oxígeno puro en la mezcla aire/combustible, el costo y la forma de obtención del oxígeno no se analizan en el presente trabajo.

CONTENIDO

<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>3</u>
<u>CAPÍTULO UNO: antecedentes generales</u>	<u>4</u>
<u>CAPÍTULO DOS: antecedentes específicos</u>	<u>11</u>
<u>CAPÍTULO TRES: experimentación</u>	<u>20</u>
<u>CAPÍTULO CUATRO: análisis de resultados</u>	<u>26</u>
<u>CAPÍTULO CINCO: conclusiones</u>	<u>40</u>
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>42</u>
<u>ANEXO . Tablas</u>	<u>43</u>
<u>APÉNDICE, Conceptos generales</u>	<u>47</u>

INTRODUCCIÓN

Se pretende encontrar el rango de enriquecimiento con oxígeno de la mezcla aire combustible, que ha de ser suministrada en un motor de combustión interna de encendido provocado, para obtener así el mejor rendimiento posible traducido esto en ahorro de combustible.

Con el presente trabajo se pretende además, ayudar a obtener una base experimental para la aplicación directa en un automóvil prototipo, vehículo que compite anualmente en los Estados Unidos.

La competencia a la que se acude anualmente es denominada "Supermileage", se lleva a cabo en Marshall Michigan Estados Unidos. Este evento es convocado por la Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE, y tiene como prueba principal, entre otros requisitos, el rendimiento de combustible.

Para dicha competencia se proporciona a los equipos participantes un motor de combustión interna de cuatro tiempos, con una potencia de 3.5 HP a 3500 RPM. nominales, este motor es de marca Briggs and Stratton.

Se pretende encontrar la mezcla adecuada para el motor a emplear, por lo que se tiene que tomar en cuenta, que en condiciones normales de operación por falta de oxígeno que complete la combustión, no se aprovecha toda la energía que podría liberarse del combustible.

La combustión enriquecida con oxígeno, es una de tantas formas viables por las cuales es posible mejorar la combustión en motores de combustión interna. No obstante, lograr lo antes propuesto requiere especial precaución en el manejo del oxígeno puro, por la facilidad que este presenta para inflamarse.

Se debe tener especial cuidado en el impacto que las prácticas de ingeniería tienen en el medio ambiente, por lo que en el presente trabajo se hará referencia a la contaminación atmosférica y como los motores de combustión interna participan en dicho proceso.

La problemática que atañe al presente trabajo es específicamente el de la combustión en motores de combustión interna. Con lo cual se pretende desarrollar una base experimental para mejorar la oxidación dentro de la cámara de combustión del motor y obtener un mejor aprovechamiento del combustible inyectado.

CAPÍTULO UNO: antecedentes generales

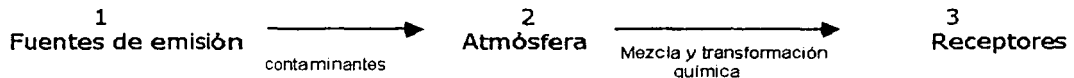
1.1 Contaminación Atmosférica.

En la actualidad, la atmósfera está compuesta principalmente por tres gases: nitrógeno, oxígeno y argón, los cuales constituyen el 99.95% del volumen atmosférico. De ellos, el nitrógeno y el argón son químicamente inertes, lo que implica que permanecen en la atmósfera sin reaccionar con ningún otro elemento. En cambio, el oxígeno es muy activo. Existen otros gases que se encuentran contenidos en menor proporción también en la atmósfera, estos son resultado de muchos procesos, los cuales en conjunto conforman la totalidad de la atmósfera, tabla 1 [1]

La atmósfera posee propiedades relacionadas con su estado físico y composición química. Conlleva una serie de procesos internos e interacciones externas que pueden mantener o alterar estas propiedades. Las propiedades físicas y dinámicas incluyen la temperatura, presión y movimiento de la atmósfera.

La contaminación del aire puede definirse como cualquier condición atmosférica en la que ciertas sustancias alcanzan concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal como para producir un efecto mensurable en el hombre, los animales la vegetación o los materiales. Por sustancias, se entiende cualquier elemento o compuesto químico, natural o artificial, capaz de permanecer o ser arrastrado por el aire. Estas sustancias pueden existir en la atmósfera en forma de gases, de gotas líquidas o de partículas sólidas.

El problema de la contaminación del aire puede representarse simplemente como un sistema integrado por tres componentes básicos:[2]



El origen de la contaminación del aire es la fuente de emisión. Las fuentes de emisión más importantes son: 1) los transportes, 2) la producción de energía eléctrica, 3) la incineración de residuos, 4) el consumo de combustibles industriales y domésticos y 5) los procesos industriales.

Los controles de fuentes están directamente asociados con las fuentes de emisión. Estos controles o procedimientos operativos que impiden que algunos de los contaminantes producidos por la fuente de emisión lleguen a la atmósfera.

Los contaminantes son transmitidos a la atmósfera, que hace de medio para su transporte, dilución y transformación física y química. Posteriormente, los contaminantes pueden ser detectados por medio de instrumentos o por las personas, los animales, las plantas o los materiales. La detección por estos diversos sensores, se manifiesta por una respuesta, como, por ejemplo, una irritación o un dolor de cabeza. Por último, y como resultado de estas respuestas, las fuentes de emisión y sus controles pueden ser modificadas bien a través de la detección automática a distancia de las concentraciones atmosféricas, o bien a través de la opinión pública y de las medidas legislativas surgidas posteriormente.

Tabla 1 composición del aire seco a nivel del mar

Gas	Concentración, ppm
Nitrógeno, N ₂	780 840
Oxígeno, O ₂	209 460
Argón, Ar	9340
Dióxido de carbono, CO ₂	315
Neón, Ne	18
Helio, He	5.2
Metano, CH ₄	1.0 - 1.5
Criptón, Kr	1.1
Oxido nitroso, N ₂ O	0.5
Hidrógeno, H ₂	0.5
Xenón, Xe	0.08

La concentración de contaminantes atmosféricos se expresan en dos tipos de unidades. La primera y empleada para contaminantes gaseosos, es la de partes por millón en volumen (fracción en volumen $\times 10^6$), cuyo símbolo es ppm. El uso de ppm como unidad de medida se debe principalmente a las dificultades surgidas con el manejo de porcentajes muy pequeños. La segunda unidad de medida de concentración frecuentemente utilizada está basada en el peso del contaminante por unidad de volumen de aire, expresada en microgramos por metro cúbico, y cuyo símbolo es $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las sustancias consideradas normalmente como contaminantes atmosféricos pueden clasificarse de la manera siguiente:

1. Compuestos del azufre
2. Compuestos del nitrógeno
3. Compuestos del carbono (hidrocarburos sin quemar)
4. Monóxido de carbono y dióxido de carbono
5. Compuestos de los halógenos
6. Partículas
7. Compuestos radiactivos

Las clasificaciones se realizaron tanto con un criterio químico como con un criterio físico, ya que la noción de partículas tiene relación con su estado físico, mientras que las otras sustancias están definidas con respecto a su estado químico. Se considera que los grupos del 1 al 5 se refieren a compuestos gaseosos. Por último se tiene al vapor de agua y al ozono en la siguiente proporción:

Vapor de agua H₂O de 0% a 3% en volumen (de 0 a 30 000 ppm)

Ozono O₃ de 0 a 0.07 ppm (a nivel del suelo)

Clasificación de los contaminantes atmosféricos gaseosos

Tipo	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios	Fuentes de emisión artificiales
Compuestos del azufre	SO ₂ , H ₂ S	SO ₃ , H ₂ SO ₄ , MSO ₄ *	Combustión de carburantes conteniendo azufre
Compuestos de nitrógeno	NO, NH ₃	NO ₂ , MNO ₃ *	Combustión de N ₂ y O ₂ durante combustión a alta temperatura
Compuestos de carbono	Compuestos C ₁ - C ₃	Aldehídos, cetonas, ácidos	Combustión de carburantes; refinado de petróleo; uso de disolventes
Óxidos de carbono	CO, CO ₂	Ninguno	Combustión
Compuestos de los halógenos	HF, HCL	Ninguno	Industrias metalúrgicas

* MSO₄, MNO₃ indican la fórmula general de los sulfatos y de los nitratos respectivamente. [2]

1.2 Efectos de la contaminación del aire

Existe evidencia real de que la contaminación del aire afecta la salud de las personas y de los animales, daña la vegetación, ensucia y deteriora los materiales, afecta al clima, reduce la visibilidad y la radiación solar, perjudica los procesos de producción, aumenta los riesgos de morbilidad y en general, dificulta el disfrute de la vida y de las cosas.

Aunque algunos de estos efectos son específicos y mensurables, como en el caso de los daños causados en la vegetación y en los materiales y la reducción de la visibilidad, la mayoría de ellos son difíciles de medir, como en el caso de los daños causados en la salud de las personas y de los animales, y los obstáculos que presenta para la vida confortable.

Efectos de la contaminación del aire sobre las propiedades atmosféricas.

Los contaminantes del aire pueden afectar las propiedades atmosféricas de las maneras siguientes:

1. Reducción de la visibilidad
2. Formación y precipitación de neblina
3. Reducción de la radiación solar
4. Alteración de las temperaturas y de la distribución de los vientos.

El fenómeno de la dispersión de la luz consiste en la desviación de las trayectorias luminosas producida por la presencia en el aire de partículas en suspensión. La causa de que la visibilidad se reduzca cuando existe una dispersión importante es la incorporación en el campo visual del observador de la luz procedente del sol y del cielo, que ha sido desviada por las partículas en suspensión situadas entre el objeto y el observador. Esta luz reduce el contraste entre el objeto y el cielo de fondo y, como consecuencia, reduce la visibilidad.

La contaminación atmosférica afecta el clima en las zonas urbanas en cuanto que aumenta la formación de neblina es más frecuente en las ciudades que en el campo, a pesar de que en las ciudades la temperatura del aire tiende a ser más elevada y la

humedad relativa más baja que en el campo. Este fenómeno tiene su explicación en el mecanismo de formación de niebla. En la presencia de altas concentraciones de SO_2 , la formación de ácido sulfúrico por oxidación del SO_2 en la superficie de las partículas en un medio húmedo provoca la formación de pequeñas gotas de niebla, que de otro modo no se hubiera producido.

Uno de los problemas de mayor interés es el efecto de la contaminación del aire sobre la salud humana. Los contaminantes penetran en el cuerpo humano a través del sistema respiratorio. El sistema respiratorio puede dividirse en el sistema respiratorio superior, integrado por la cavidad nasal y la tráquea, y el sistema respiratorio inferior, integrado por los tubos bronquiales y los pulmones.

Las partículas de radio inferior a unos micrómetros atraviesan generalmente el sistema respiratorio superior y no son retenidas, lo cual causa graves daños en la salud y puede provocar la muerte.

A continuación se presenta en forma de tabla obtenida de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), de los efectos que ocurren a diferentes concentraciones de contaminantes en el aire.

Monóxido de Carbono CO [ppm]	Efecto
0.4 - 2.5	Valor normal en fumadores
1.4	No se reportan efectos
1.3	Límites permisibles
2.5 a 20	Disminución en la respuesta al hacer ejercicio con los pacientes
4 a 30	Dolor de cabeza, falta de oxígeno en no fumadores
5 a 50	Cambios en la percepción visual, así como en la habilidad de aprendizaje
60	Alteraciones en funcionamiento al miocardio
72	Dolor de cabeza intenso, cambios en la respuesta visual en fumadores

Ozono O3 [ppm]	Efecto
0.06 a 0.11	No hay efecto en adultos jóvenes. No hay efecto en pacientes con enfermedad pulmonar crónica
0.11 a 0.25	Irritación en los ojos y nariz, disminución de función pulmonar
0.15	Disminución de la función pulmonar en niños
0.37 a 0.75	Disminución de la función pulmonar en adultos sanos, irritación de las mucosas, ojos, garganta, tos, dificultad para respirar hondo, náusea ligera

Óxido Nítrico NO2 [ppm]	Efecto
0.30	No se presenta incremento de síntomas en individuos sensibles
0.31 a 1.0	No hay cambio significativo en respuesta cardiorespiratoria en sujetos sanos
0.21	Límite permisible

Partículas suspendidas totales PST ml / m ³	Efectos a largo plazo
150	Aumenta la posibilidad de enfermedades respiratorias: asma
250	Aumenta la posibilidad de enfermedades respiratorias de las vías inferiores: bronquitis
250 a 275	Aumenta la producción de flema
	Efectos a corto plazo
250 a 275	Disminuye la función pulmonar en niños y adultos
350	Incremento en los sistemas respiratorios de pacientes con bronquitis crónico

Se pueden dividir los contaminantes en dos grupos:

1. Contaminantes primarios: aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión.
2. Contaminantes secundarios: aquellos originados por interacción química entre los contaminantes primarios y los componentes normales de la atmósfera.

El análisis de las emisiones procedentes de varias fuentes nos proporciona información sobre el tipo y la cantidad de contaminantes primarios emitidos por estas fuentes,

generalmente en términos de especie química y estado físico en que se encuentran (gas, gotas líquidas, partículas), mientras que en mediciones realizadas en la atmósfera sirven para identificar los contaminantes secundarios.

El dióxido de carbono es un gas invernadero. Llega a la atmósfera por la acción de los organismos vivos y en menor medida por la descomposición de elementos orgánicos y la quema de combustibles fósiles. Mantiene su equilibrio gracias al proceso de fotosíntesis y la absorción de la biosfera y los océanos.

La presencia de ozono es relativamente pequeña y está determinada por el balance entre las reacciones que lo producen y destruyen. Se origina en la atmósfera superior por la acción de la radiación ultravioleta que disocia las moléculas de oxígeno permitiendo su recombinación en ozono (O_3).

En función de la concentración de vapor de agua, los otros componentes indicados en la tabla 1 representarán fracciones menores que las señaladas, aunque guardando las mismas proporciones relativas.

Los contaminantes secundarios resultan de reacciones químicas en la atmósfera, varios tipos de reacción pueden ocurrir en ella:

1. Reacciones térmicas en fase gaseosa
2. Reacciones fotoquímicas en fase gaseosa
3. Reacciones térmicas en fase líquida en pequeñas gotas de líquido.

Además de los contaminantes secundarios previamente mencionados e integrados por compuestos de azufre, carbono y nitrógeno, el ozono, es otro contaminante secundario muy importante. Aunque en cualquier momento una determinada atmósfera urbana contendrá indudablemente, por lo menos, cierta cantidad de cada uno de los contaminantes primarios y secundarios previamente mencionados, han surgido dos tipos relativamente distintos de contaminación del aire urbano. El SO_2 y las partículas provienen de la combustión del carbón y de los carburantes líquidos en azufre. Las ciudades sometidas a este tipo característico de contaminación atmosférica están situadas con frecuencia en zonas de clima fríos, donde la producción de energía eléctrica y la calefacción doméstica constituyen importantes fuentes de emisión.

Formación de contaminantes [3]

Para algunos contaminantes como el monóxido de carbono, compuestos orgánicos, y partículas, las reacciones de formación y destrucción, están íntimamente relacionadas con el proceso primario de combustión, es decir con la detonación de la mezcla.

Para óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, el proceso de formación y destrucción, no son parte del proceso de combustión. Sin embargo las reacciones las cuales producen estas especies toman lugar en un ambiente creado por la reacción de combustión, entonces los dos procesos están íntimamente ligados.

Diferentes formas del óxido nítrico se forman al darse altas temperaturas de los gases quemados, detrás de la flama, la cual está completando reacciones químicas que envuelven átomos y moléculas de nitrógeno y oxígeno, las cuales no consiguen el equilibrio químico. El óxido de nitrógeno se forma a altas temperaturas. Como los gases quemados quedan fríos durante la carrera de expansión, la reacción envuelve óxido de nitrógeno frío, y deja óxido de nitrógeno en exceso de los niveles correspondientes a las condiciones de equilibrio de salida.

Con mezclas aire/combustible ricas, no hay suficiente oxígeno para quemar completamente todo el carbono del combustible y obtener dióxido de carbono, también se produce con los productos a altas temperaturas, incluso con mezclas pobres, la disociación asegura niveles altos de monóxido de carbono. Mas tarde en la carrera de expansión, el proceso de oxidación del monóxido de carbono, también se enfría con la caída de temperatura de los gases quemados.

Los hidrocarburos sin quemar tiene diferentes fuentes. Durante la compresión y la combustión, el incremento de las fuerzas de presión del cilindro deposita algo de gas en el cilindro, dentro de los poros o hendiduras, o en volúmenes estrechos, conectados a la cámara de combustión: los volúmenes entre el pistón, anillos y las paredes del cilindro y a lo largo de este. La mayoría de este gas no quemado es de la mezcla aire/combustible; mucho de este escapa en el proceso de la combustión primaria, porque se encuentra en las hendiduras o poros, los cuales son demasiado estrechos para que la flama los alcance. Este gas, el cual es dejado en la cavidades, mas tarde en el proceso de expansión y escape, es una fuente de emisión de hidrocarburos no quemados. Otra posible fuente son las paredes del cilindro. Una capa apagada la cual contiene mezcla de aire/combustible no quemado y parcialmente quemado, es depositada en las paredes, cuando la flama está casi extinta y esta se acerca a la pared. Los poros y cavidades en las paredes del cilindro y cámara de combustión, además de la cabeza del pistón favorecerán la formación de hidrocarburos sin quemar.

Otra causa de la formación de los hidrocarburos, es la provocada por la delgada capa de aceite para motor que se encuentra en el cilindro, la cabeza del pistón, y tal vez en la cabeza.

CAPÍTULO DOS: antecedentes específicos

La combustión oxigenada consiste en agregar oxígeno puro O_2 a la combustión que se realiza con el aire atmosférico. La combustión oxigenada es usada para aumentar la reacción de oxígeno con el carbono del combustible, obteniendo así una oxidación mas completa, traduciéndose esto en ahorro del energético.

El enriquecimiento de aire consiste en premezclar el oxígeno puro con el aire atmosférico en una relación adecuada de gasto volumétrico y conducir el aire enriquecido a la cámara de combustión donde es mezclado con el combustible. [4]

2.1 Características de la combustión oxigenada.[4]

Temperatura de flama. La temperatura de flama aumenta sensiblemente cuando es incrementada la cantidad de oxígeno puro O_2 en la mezcla de aire, debido a que el N_2 actúa como diluyente que reduce la temperatura de flama.

Límite de flamabilidad. Cuando la concentración de oxígeno aumenta en la oxidación, el límite de flamabilidad del combustible también aumenta.

Velocidad de flama. La combustión oxigenada aumenta la velocidad de flama cuando aumenta el oxígeno en la mezcla. En una flama, el frente de flama se localiza donde la velocidad de los gases que se alejan del quemador y se igualan a la velocidad de propagación de la flama que se aleja de éste. La velocidad de salida del combustible saliendo del quemador debe ser al menos igual a la velocidad de flama. De lo contrario la flama puede regresar al interior del quemador, conduciendo a la extinción de esta o bien a una explosión. La velocidad de la flama es mayor usando la combustión enriquecida, la velocidad a la salida del quemador en un sistema con enriquecimiento es por lo tanto mayor que uno con combustión con aire atmosférico

Energía de ignición. Se requiere menos energía para el encendido usando enriquecimiento de aire, es decir que es mas fácil el encendido comparado con la combustión con aire atmosférico, donde mucha de la energía en el encendido es absorbido por la acción diluyente del nitrógeno.

Temperatura de encendido. Usando la combustión oxigenada se reduce la temperatura de encendido, esto porque se reduce la energía necesaria para el encendido.

Beneficios generales de la combustión oxigenada. Solo el oxígeno es necesario en el proceso de combustión, si se elimina el nitrógeno se podrían tener muchos beneficios en un equipo diseñado para estas condiciones.

a) Se aumenta la eficiencia térmica.

Usando oxígeno, en vez del nitrógeno, mas energía va dentro de la carga, puesto que no se desperdicia energía en tratar de calentar al nitrógeno, es decir el nitrógeno no absorbe calor en el proceso de combustión. A consecuencia de esto se tiene mayor cantidad de calor disponible.

b) Se reduce la proporción de combustible en la cámara de combustión

Otro beneficio es el ahorro específico de combustible, esto cuando menor cantidad de combustible es requerida por unidad dada de producción esto en gran medida es debido al aumento en cantidad disponible de calor, se debe recordar que gran cantidad de energía se pierde en calentar la mezcla que se va quemar.

c) Se tiene uniformidad en la flama.

Las flamas enriquecidas con oxígeno tienen velocidad de flama mas alta que las producidas con aire y combustible, esto significa que se debe prevenir un regreso de flama o que esta se desprenda de la mezcla la velocidad mínima de salida del gas en un sistema enriquecido con oxígeno, estas medidas pueden ayudar a mantener uniformidad en la flama.

d) Mejores características de encendido

Otra ventaja sobre la combustión con aire, es la de que se requiere menor energía para encender la mezcla el cual ocurre a bajas temperaturas. Una desventaja de lo anterior es que también se enciende inadvertidamente, lo cual es motivo de tomar precauciones apropiadas de seguridad. La mejora en las características de encendido pueden ser especialmente importantes cuando se usan combustibles líquidos o sólidos, los cuales son generalmente mas difícil de encender comparados con un combustible gaseoso.

e) Se tiene un control en la forma de la flama

El enriquecimiento con oxígeno puede ser usado en el control de la forma de la flama en un sistema existente de combustión con aire y combustible. Por ejemplo el pre mezclando un aumento de oxígeno en una combustión con flujo de aire ah sido usado para acortar la longitud de flama. El control de la forma de la flama puede ser usado para evitar un sobre calentamiento local o para cambiar el flujo de calor y el perfil temperatura dentro de la cámara de combustión.

f) Se reduce la emisión de gases de escape (CO entre otros).

El enriquecimiento con oxígeno reduce la admisión de nitrógeno del aire atmosférico, esto es principalmente por la diferencia de densidades, (densidad del oxígeno = 1.429 kilogramos por cada metro cúbico y la densidad del nitrógeno = 1.2506 kilogramos por cada metro cúbico) por lo que el oxígeno tenderá a desplazar al nitrógeno que pueda admitirse. La disminución de gases de escape tiene muchas ventajas, por ejemplo si se tiene menor flujo de gases de salida, se puede reducir el diámetro del tubo de escape.

g) Se reduce el costo del equipo

La combustión enriquecida con oxígeno intensifica el proceso de combustión y reduce el volumen de gases por lo cual muchas cámaras de combustión y equipo asociado a puede ser significativamente reducido en medidas. Reduciendo el tamaño del equipo puede reducirse el costo de fabricación, esto aplica principalmente a equipo que es actualmente de gran dimensión.

2.2 Problemas potenciales de la combustión oxigenada.

Hay problemas asociados con el uso de la combustión enriquecida con oxígeno, si los sistemas no están propiamente diseñados para esta actividad. Muchos de los problemas son atribuidos a el incremento de la intensidad de la combustión.

a) Sobre calentamiento

El enriquecimiento de la combustión con oxígeno provoca una mejor asociación del oxígeno con el combustible, por lo que la temperatura aumento sensiblemente, por lo que si el calor producido no es distribuido apropiadamente se puede concentrar en una sola parte produciendo daño en la cámara de combustión o en algún equipo asociado.

b) Calentamiento no uniforme.

Este problema puede ocurrir cuando en un sistema que ha sido creado para combustión con aire y combustible, se enriquece esta mezcla con oxígeno. Lo cual eleva las temperaturas y esto puede ocasionar daños inesperados.

c) Incrementa la emisión de emisiones contaminantes (NOx entre otros)

Cuando es usado un enriquecimiento con oxígeno, en un sistema existente de combustión con aire y combustible, puede incrementar las emisiones de óxidos de nitrógeno, esto es debido a que se incrementa la temperatura logrando condiciones favorables para la formación de NOx.

d) Riesgo de regreso de flama.

Este fenómeno ocurre cuando la velocidad del gas saliendo del quemador es menor que la velocidad de flama, esto causa que el frente de flama se mueva hacia el quemador. Si el combustible y el comburente son pre mezclados, la flama puede quemarse en alguna parte no apropiada para la combustión en quemador, pudiendo ocasionar una explosión.

e) Mayor desgaste de componentes.

Otro problema potencial puede resultar de incrementar una concentración volátil en la cámara de combustión al enriquecer la mezcla aire/combustible con oxígeno. La presencia de un oxidante como el oxígeno, con gran afinidad química con la mayoría de los metales, puede ocasionar corrosión y falla en muchas piezas del sistema de combustión.

2.3 Control de emisiones

Uno de los problemas más complicados de resolver en la combustión, especialmente si se trata de motores que se emplean en autotransporte, son las emisiones contaminantes. En muchos lugares se ha tratado de encontrar los mejores combustibles, las mejores bujías etc., buscando siempre la combustión más completa posible, es decir que las concentraciones CO fueran cada vez menores, pues este es indicativo de combustión in eficiente. Otro indicativo, y aún menos deseado, es la presencia de los HC. Las condiciones que favorecen la formación del CO y HC son las que permiten que la combustión se realice a bajas temperaturas, con deficiencias de oxígeno y/o tiempo de residencia de los gases en el frente de flama, mala mezcla del aire con el combustible etc.

En la industria automotriz se ha dado un gran avance en cuanto al control de emisiones, puesto que reformas y tratados se han implantado para conservar el medio ambiente y una relativa calidad de aire en las ciudades mas contaminadas.

El automóvil es una fuente importante de contaminación atmosférica y un contribuidor significativo al smog fotoquímico (provocado por los productos de fotorreacciones en la atmósfera). Es menester lograr un control adecuado que sea capaz de reducir las emisiones a la atmósfera.

Pueden utilizarse dispositivos de tratamiento en el escape, catalíticos o no catalíticos, para limpiar las emisiones restantes de escape. Los reactores térmicos son dispositivos no catalíticos cuyo funcionamiento se apoya en reacciones masivas homogéneas de los gases para oxidar el CO y los HC; por lo general tiene la apariencia de múltiples de escape alargados, pero pueden tener deflectores internos; en estos reactores quedan inalterados los NOx. Las reacciones se intensifican al incrementarse la temperatura de

escape (relación de compresión reducida, distribución retardada), o bien al incrementarse los combustibles en el escape mezclas ricas). Es común que se haga funcionar el motor con mezcla rica, para dar 1% de CO, y se inyecte aire en el escape. La temperatura máxima permisible en el reactor queda determinada por los materiales y, en general, es de 1750°F (950°C). [5].

Los sistemas catalíticos pueden reducir los NOx, así como oxidar el CO y los HC. Sin embargo, se necesita un medio ambiente reductor para el tratamiento de los NOx, lo cual exige una relación de la mezcla para el motor mas rica que la químicamente correcta. Puede emplearse un convertidor de dos lechos, en el que se inyecta aire en la segunda etapa, para oxidar el CO y los HC. Se han desarrollado catalizadores de tres componentes y una sola etapa, pero para ser eficientes una carburación precisa en extremo. En estos sistemas se emplean un sensor de zirconia o de óxido de titanio y un sistema de retroalimentación de combustible, para mantener la concentración de la mezcla requerida cerca de la estequiométrica. [5]

Los lechos catalizadores de apoyo pueden ser del tipo granular o de panal (monolito). Los materiales para los catalizadores reductores comprenden el rodio monel y rutenio. Los materiales para catalizadores oxidantes comprenden el platino y el paladio. La cantidad de catalizador activo que se requiere puede ser tan baja como 1.4 g, [3], por sistema vehicular. Un volumen representativo de catalizador es alrededor de un cuarto a la mitad del desplazamiento del motor. Muchos catalizadores envejecidos pueden oxidar con eficiencia a temperaturas de 427 a 538 °C. Por encima de 816 °C, se deterioran con rapidez, [5]. En comparación con los reactores térmicos, los convertidores catalíticos se calientan con lentitud, debido a la masa mas grande del material. Los convertidores catalíticos pueden ubicarse mas lejos que los retores térmicos, ya que operan con eficiencia a temperaturas mas bajas.

Un sistema eficaz de tratamiento del escape emplea un convertidor en el múltiple, como un elemento de primera etapa. Se inyecta aire en el reactor térmico en el arranque; con esto se proporciona una extinción rápida. Durante la operación estacionaria, el reactor térmico actúa como un volumen mezclador, antes de que llegue al escape se pasa a un catalizador.

Las reacciones químicas se producen entre varias sustancias y tienen como resultado la liberación o absorción de energía. La reacción más común para la liberación de energía es la de un combustible con el oxígeno del aire y se denomina proceso de combustión u oxidación. Aunque la energía liberada se asocia normalmente con el combustible, sin embargo, la fuente de energía es el cambio en la estructura electrónica de las moléculas del combustible y del oxígeno. Así pues, puede liberarse energía sin el empleo del oxígeno, como en el caso del hidrógeno, litio o boro reaccionando con el flúor.[7]

Debido a que el objetivo de un proceso de combustión consiste en transformar la energía latente del combustible en energía aprovechable, como característica principal se requiere la rápida oxidación del combustible, de donde se obtiene un aumento en la mezcla en reacción (proceso exotérmico).

2.4 Clasificación de los procesos de combustión dependiendo de la velocidad de la reacción. [6]

1. Combustión lenta.
2. Combustión rápida (detonación)

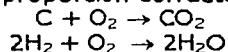
En los procesos antes mencionados, el grado de oxidación que se alcanza en la reacción determina que ésta sea completa o incompleta entendiéndose por combustión completa aquella en la que el combustible, formando monóxido de carbono. Dicha deficiencia se puede producir por:

1. Insuficiencia de oxígeno
2. Mezcla imperfecta del oxígeno y el combustible, baja turbulencia en la cámara de combustión.
3. Temperatura demasiado baja para mantenerla combustión
4. Tiempo insuficiente para llevar a cabo la combustión [6]

La manifestación usual de un proceso de combustión consiste en una columna de gases incandescente que arden a elevada temperatura, lo cual produce un radiación luminosa denominada flama. Dicha luminosidad conserva una estrecha relación con las partículas sólidas existentes en ella, y provoca un aumento o disminución de brillantez según sea menor o mayor el número de partículas que contiene.

La mayor parte de los combustibles y oxidantes o agentes de reacción no suelen mezclarse antes de entrar en la cámara de combustión o reacción debido al peligro que originaría un encendido accidental o espontáneo.

Las ecuaciones elementales de reacción para el carbono y el hidrógeno combinándose con el oxígeno en proporción correcta químicamente son las siguientes: [7]



Un mol de carbono se combina con un mol de oxígeno formando un mol de dióxido de carbono. Si todas las sustancias de una reacción están a la misma presión y temperatura y son gases perfectos los moles representan los volúmenes relativos.

Los combustibles que contiene hidrógeno dan H₂O como unos de los productos de combustión. La humedad del aire o del oxígeno, la presión, la temperatura y la naturaleza del proceso determinan la cantidad de H₂O condensada durante el mismo. Inmediatamente después de la reacción, al H₂O está en forma de vapor altamente sobrecalentado, que se transforma en saturado y en líquido parcialmente condensado cuando los productos de combustión se enfrían.

Los productos de la combustión completa de los combustibles usuales son CO₂ y H₂O. Si la combustión es incompleta entre los productos de combustión estarán presentes CO, H₂, CH₄, y O₂. entre muchos otros subproductos, si se suministra un exceso de oxígeno, aparecerá una cantidad considerable de O₂. Además, si se emplea aire para el proceso de combustión, siempre estará presente el N₂, y otras especies asociadas.

La temperatura máxima en el proceso de combustión se alcanzará con un proceso de combustión completa, adiabático y a volumen constante, suponiendo que no hay otra energía que la reacción.[7]

2.5 Clasificación de las flamas

Las flamas son usualmente clasificadas de acuerdo a sus principales características.

La primera de estas se clasifica con respecto a la forma de como entra esta a la zona de reacción (cámara de combustión). Si el combustible y el oxidante son esencialmente mezclados uniformemente, la flama se designada como *premezclada*. Si los reactantes no son premezclados y deben ser mezclados juntos en la misma región donde la reacción se lleva a cabo, la flama es llamada flama difusiva, esto porque la mezcla debe ser realizada por un procesos difusivo.

La segunda clasificación se basa en la característica básica del flujo del gas a través de la zona de reacción: es decir si este es laminar o turbulento. En flujo laminar, la mezcla y el traslado es hecho por un proceso molecular. El flujo laminar solo ocurre a bajos números de Reynolds. El número de Reynolds (densidad x velocidad x longitud escalar / viscosidad), es la relación de inercia a fuerzas viscosas. En flujos turbulentos, el transporte y la mezcla son enriquecidos por la relación de movimiento macroscópica, remolinos o pedazos de fluido los cuales son característicos del flujo turbulento.

Una tercera clasificación es si la flama es estable o inestable. La distinción característica aquí, es si la estructura de la flama y movimiento cambia con el tiempo. Por último se tiene como característica la fase inicial de los reactantes - gas, líquido o sólido. Las flamas en los motores son inestables como consecuencia del ciclo de operación de los motores de combustión interna. [3]

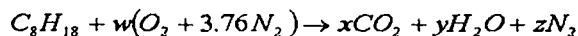
Para llevar a cabo lo mejor posible el proceso de combustión, es deseable tener una gran turbulencia en la cámara de combustión, esto se logra, en parte, con el diseño de las cámaras de combustión y quemadores, con el esparido del combustible en la zona de reacción, además, del tiempo adecuado para quemar la mezcla.

Temperatura de flama adiabática.

Se conoce con este nombre a la temperatura máxima que puede alcanzarse utilizando el aire teórico para la combustión, considerando un proceso adiabático en el cual no se realiza trabajo y en el que los cambios tanto de energía cinética como potencial son despreciables. La temperatura de flama adiabática puede controlarse mediante el exceso de aire que se usa en la combustión. [6,3]

2.6 Estequiometría de la reacción

Estequiometría de la reacción completa ideal

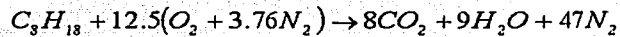


resolviendo el sistema de ecuaciones:

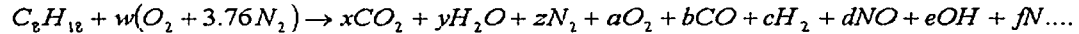
$$\begin{array}{l} C: \quad 8 = x \\ H: \quad 18 = 2y \\ O: \quad 2w = 2x + y \\ N: \quad 2 \times 3.76w = 2z \end{array}$$

$$\begin{array}{l} w = 12.5 \\ x = 8 \\ y = 9 \\ z = 47 \end{array}$$

por lo que la ecuación con los coeficientes estequiométricos que la equilibran son:

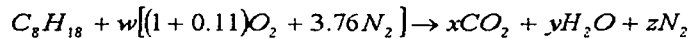


si se consideran mas gases como producto de la combustión:



de considerarse mas gases, debe hacerse un balance para un número finito de estos, o bien para los que sean de interés, esto es debido a que se tiene una gran cantidad de gases de escape, por lo que resultaría casi imposible obtener una proporción exacta de todos y cada uno de ellos.

De proponer un enriquecimiento de 11 puntos porcentuales de oxígeno se tendría:



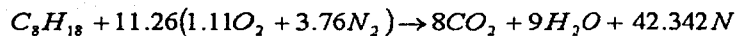
El sistema de ecuaciones que se genera, al igualar los coeficientes molares de los reactivos de cada especie química con los correspondientes coeficientes de cada especie en los productos se tiene :

$$\begin{aligned} C: & 8 = x \\ H: & 18 = 2y \\ O: & 2(1+0.11)w = 2x+y \\ N: & 2(3.76)w = 2z \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema:

$$\begin{aligned} x &= 8 \\ y &= 9 \\ w &= 11.2612 \\ z &= 42.342 \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación estequiométrica se tiene:



Si la ecuación anterior se resuelve por unidad de combustible y considerando las siguientes masas molares:

Masa molar del carbono C: 12.0107
Masa molar del hidrógeno H: 1.0079
Masa molar del oxígeno O: 15.9994
Masa molar del nitrógeno N: 14.0067

Se llega a la relación aire enriquecido /combustible

$$1 + (3.5087 + 10.399) \rightarrow 2.5263 + 1.42105 + 10.399$$

De lo cual se deduce que por cada kilogramo de combustible se necesitan para su oxidación 13.9077 Kilogramos de aire teórico y 1.1449 kilogramos de oxígeno.

2.7 Descripción de parámetros.

Omega Ω . Enriquecimiento de oxígeno.[4]

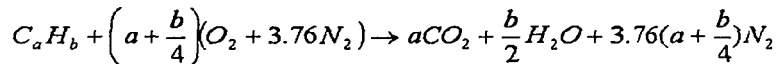
Este parámetro relaciona la cantidad extra de oxígeno añadido a la mezcla y el aire teórico, dando así un enriquecimiento, con base a la cantidad promedio de oxígeno existente en la mezcla.

$$\Omega = \frac{20.9}{0.209(\text{vol}\%O_2) + (\text{vol}\%.\text{aire})}$$

Phi ϕ y lambda λ , indicadores de mezcla rica o pobre.[3]

Estos parámetros relacionan la proporción de aire/combustible estequiométrico, y la relación aire/combustible real. El siguiente desarrollo es para mostrar el origen dichos parámetros

Si se plantea una ecuación química general para la relación aire combustible se tiene:



si

$$CH_y \Rightarrow y = \frac{b}{a}$$

Haciendo la relación de aire combustible se tiene:[3]

$$\begin{aligned} \left(\frac{A}{F}\right)_s &\Rightarrow \left(\frac{F}{A}\right)_s^{-1} = \frac{\left(1 + \frac{y}{4}\right)(32 + 3.76 \times 28.16)}{12.011 + 1.008y} \\ &= \frac{34.56(4 + y)}{12.011 + 1.008y} \end{aligned}$$

Para el isoctano C_8H_{18}

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = 15.14, \Rightarrow \left(\frac{F}{A}\right)_s^{-1} = 0.0661$$

Si se define a fi y lambda: [3]

$$\phi = \frac{(F/A)_{\text{Real}}}{(F/A)_S} \Rightarrow \lambda = \phi^{-1} = \frac{(A/F)_{\text{Real}}}{(A/F)_S}$$

Rangos de ϕ , λ y significado. [3]

Para mezcla pobre en combustible $\phi < 1$, $\lambda > 1$

Para mezcla estequiométrica $\phi = 1$, $\lambda = 1$

Para mezcla rica en combustible $\phi > 1$, $\lambda < 1$

Calor intercambiado durante el proceso de combustión de la zona de reacción. [8]

$$Q = \sum_{\text{prod}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ + h_T - h_{298})_i - \sum_{\text{reac}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ + h_i - h_{298})_i$$

$$Q = \sum_{\text{prod}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ)_i - \sum_{\text{reac}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ)_i$$

componente $\leftrightarrow \Delta h_f^\circ$ kJ/kgmol

$$C_8H_{18} = 208.45$$

$$O_2 = 0$$

$$CO_2(g) = 393.52$$

$$H_2O(g) = 241.82$$

$$N_2 = 0$$

$$Q = [8(-393.52) + 9(-241.82)] - [-208.45 + 12.5(0)]$$

$$Q = -5116.09 \text{ kJ/kgmol}$$

Si el aire suministrado, incluso en exceso, el oxígeno y el nitrógeno, se toman a la temperatura de referencia estándar, además, el valor $h_T - h_{298}$ es cero para estos elementos, independientemente de la cantidad de cada uno de ellos.

CAPÍTULO TRES: experimentación

Con base a la información y bases teóricas se tiene planteado una hipótesis del comportamiento del motor de combustión interna encendido por chispa, con enriquecimiento de oxígeno.

3.1 Hipótesis del experimento, combustión con mezcla enriquecida con O_2 (99.5% de pureza).

- El motor podría mostrar un aumento en la eficiencia total al enriquecer la cantidad de oxígeno en el aire succionado en el carburador.
- Se mejoraría la oxidación, puesto que se tiende a formar dióxido de carbono (CO_2), en lugar de monóxido de carbono (CO), lo cual es indicativo de una combinación química completa.
- Aumentaría la potencia, puesto que mas cantidad de combustible en la cámara se asocia con oxígeno.
- Se registraría un aumento en la temperatura del motor, (el motor sufrirá mas desgaste y se adelgazará el aceite). Esto a consecuencia de la diferencia de densidades, el oxígeno al ser mas denso que el nitrógeno tenderá a desplazar a este del aire atmosférico, esto reduciría la cantidad de nitrógeno dentro de la cámara de combustión, y se podría registrar un aumento de temperatura.

A consecuencia de las hipótesis planteadas, se experimentó con un motor de combustión interna en un banco instrumentado de pruebas, donde se midió la carga aplicada en el cigüeñal del motor, el volumen de combustible consumido, la temperatura de los gases de escape, de la culata del motor y del lubricante en el cárter del motor, las emisiones en el escape del motor, y el suministro de oxígeno.

Descripción del motor probado.

Motor de combustión interna encendido por chispa
Marca: Briggs and Stratton, monocilíndrico de cuatro tiempos
Enfriado: por aire
Modelo: 91202
Tipo: 1016 EI
Potencia: 3.5 HP @ 3600 r.p.m. nominales
Diámetro del pistón: 6.46 cm
Longitud de la carrera: 4.43 cm
Cilindrada: 147.5 cc

Otras características

Dos válvulas a la cabeza, una válvula de escape y otra de admisión.
Carburación natural.
Bomba de diafragma en el carburador

Curva característica de potencia al freno (W_b) y par motor (T) contra revoluciones por minuto en el cigüeñal. (gráfica 10).

3.2 Descripción del equipo empleado en la medición de variables físicas

Equipo usado en las mediciones Banco de pruebas	Variable física	Rango de medida	Precisión	Resolución
Mesa de trabajo	Volumen de combustible [ml]	0 a 1500 ml	± 5 ml	50 ml
Tacómetro	Velocidad angular en el cigüeñal del motor [RPM]	0 - 5000 RPM	± 50 RPM	10 RPM
Dinamómetro	Carga en el cigüeñal [kg.]	0 a 13 kg.	± 0.5 kg.	1 kg.
Rotámetro	Gasto de oxígeno [SCFH]*	0 a 25 SCFH*	± 0.5 SCFH*	1 SCFH*
Termómetro digital	Temperatura [°C]	-30°C a 999 °C	± 0.1 °C	0.1 °C
Cronómetro digital	Tiempo [s]	0 a 24 hr	± 1 s	0.01 s
Analizador de gases	HC	0 a 2,000 ppm 2,001 a 15,000 ppm	± 4 ppm abs o ± 3% rel	1 ppm
	CO	0.0 a 10.00% 10.01 a 15.00 %	± 0.02 abs o 3% rel ± 5% rel	0.001 vol. %
	CO ₂	16.00 % 16.01 a 20.00%	±0.3% abs o ± 3% rel ± 5% rel	0.01 vol. %
	NOx	0 a 4,000 ppm 4,001 a 5,000 ppm	± 20 ppm abs o ± 4% rel ± 5 % rel	1 ppm
	O ₂	0.00 a 25.00%	± 0.1 % abs o ±5% rel	0.01 vol %

*SCFH, pies cúbicos por hora estándares

$$1 \frac{ft^3}{h} = 7.8657 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

Factor de corrección para el rotámetro

El rotámetro empleado en las mediciones, estaba calibrado para las siguientes condiciones:

Temperatura 25 °C
Presión 1.00 bar atmosférico
Fluido aire atmosférico

Sin embargo las condiciones de uso fueron las siguientes:

Temperatura 25 °C
Presión 0.78 bar atmosférico
Fluido Oxígeno gaseoso (99.5 % de pureza)

Por lo que se determinó un factor de corrección haciendo un balance de masa, con base al funcionamiento del rotámetro para obtener una lectura de gasto volumétrico real de oxígeno.

De la ecuación del gas ideal [8]

$$PV = mRT$$

Donde:

P = presión

V = flujo volumétrico

m = flujo másico

R = constante particular del gas

T = temperatura

Despejando el flujo másico se tiene:

$$m = \frac{PV}{RT}$$

Considerando flujos másicos iguales en el mismo rotámetro para el aire y oxígeno en estado gaseoso, se tiene:

$$m_{SPT} = m_{CU}$$

$$\frac{P_{SPT} V_{SPT}}{R_{aire} T_{SPT}} = \frac{P_{CU} V_{CU}}{R_{Oxigeno} T_{CU}}$$

Donde:

P_{SPT} = presión a condición estándar

V_{SPT} = flujo volumétrico de aire en condiciones estándar

R_{aire} = constante particular del gas ideal: aire

T_{SPT} = temperatura en condiciones estándar

P_{CU} = Presión en Ciudad Universitaria

V_{CU} = flujo volumétrico de oxígeno en Ciudad Universitaria

$R_{Oxigeno}$ = constante particular del gas ideal: oxígeno

T_{CU} = temperatura de Ciudad Universitaria

Despejando de la ecuación anterior el flujo volumétrico de oxígeno se tiene:

$$\dot{V}_{CU} = \left(\frac{P_{SPT} R_{Oxígeno} T_{CU}}{P_{CU} R_{aire} T_{SPT}} \right) \dot{V}_{SPT}$$

Si se iguala con la ecuación paramétrica que relaciona al flujo volumétrico en condiciones estándar de aire y flujo volumétrico de oxígeno a las condiciones atmosféricas medias de La Ciudad de México, se obtiene un factor de corrección "k":

$$\dot{V}_{CU} = k \dot{V}_{SPT}$$

$$k = \left(\frac{P_{SPT} R_{oxígeno} T_{CU}}{P_{CU} R_{aire} T_{SPT}} \right)$$

Considerando los siguientes valores para cada uno de los parámetros se tiene:

$P_{SPT} = 1$ bar de presión atmosférica
 $R_{Alre} = 286.9865$ J/kg. K
 $T_{SPT} = 298.15$ K
 $P_{CU} = 0.78$ bar de presión atmosférica
 $R_{Oxígeno} = 259.8125$ K
 $T_{CU} = 298.15$ K

Sustituyendo estos valores en la ecuación para el factor de corrección de tiene:

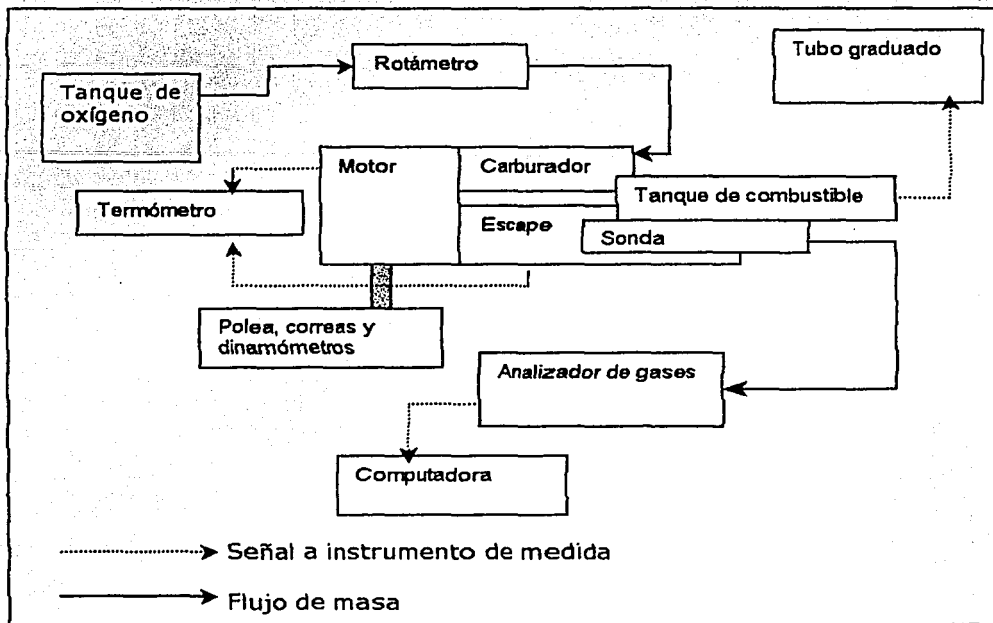
$$k = \frac{1}{0.78} \left(\frac{259.8125}{286.9865} \right) \left(\frac{298.15}{298.15} \right) = 1.16066$$

$$k = 1.61$$

El factor $k = 1.161$ se multiplicará por la lectura del rotámetro para obtener una lectura real de flujo volumétrico de oxígeno en las condiciones de experimentación.

Para la recopilación de datos durante la experimentación se hizo un formato especial con el fin de llevar un orden de los eventos y control durante el proceso de análisis de datos y manejo estadístico.

3.3 Esquema de los dispositivos empleados en el experimento

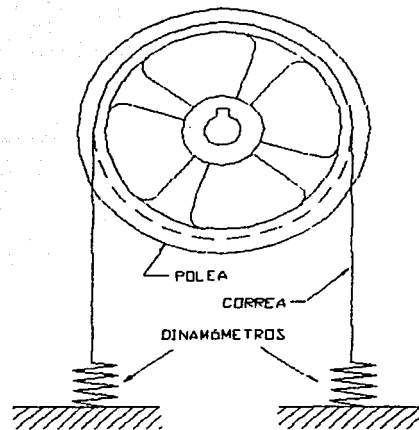


3.4 Mediciones

3.4.1 Medición de la carga en la flecha del motor. (kilogramos)

A una polea en "V" de aluminio de 10.16 cm de radio se pasó una correa de cuero sujeta por los extremos a sendos dinamómetros. Para simular diferentes exigencias de operación se tensaban los extremos de los dinamómetros. La carga aplicada es la diferencia de las lecturas de cada dinamómetro.

Esquema de la configuración usada:



3.4.2 Medición del gasto del combustible consumido. (ml/s)

El gasto se determinó de manera indirecta. Se colocó un tubo transparente, se unió a una perforación en la base del tanque de gasolina del motor. Para conocer el volumen consumido por el motor se taró con una llave de paso. Al tubo se le hicieron marcas en una escala de 50 ml hasta completar un rango de lectura total de 1500 ml.

El tiempo que tardó en consumir este volumen de combustible se midió con un cronómetro. La razón del volumen al tiempo multiplicado por la densidad del combustible, nos da al gasto de combustible.

3.4.3 Medición de la temperatura del lubricante del motor, de los gases de escape y de la culata del motor. (°C). Se utilizó un termómetro digital colocando la punta de prueba en un orificio previamente barrenado en el escape del motor. Al escape barrenado se le hizo una rosca con el propósito de taparlo.

Para la temperatura del lubricante, se colocó la punta dentro del cárter del motor. La temperatura es la leída directamente en el termómetro

3.4.4 Medición del flujo volumétrico del oxígeno. (m³/s)

Esta medida fue tomada leyéndola en el rotámetro. Con base en la literatura [10], se determinó enriquecer al aire atmosférico con oxígeno en un máximo del diez por ciento. La medida se ajustó en un rango de 7.8657×10^{-5} a 1.2585×10^{-4} m³/s, debido a las condiciones de operación del motor. La medida real es la que resulta de multiplicar el factor de corrección ($k=1.161$) por la lectura en el rotámetro.

3.4.5 Medición de las emisiones (gases de escape)

Para el análisis de gases se conectó una sonda 60 cm dentro de un tubo en el escape del motor [11], la sonda se conectó posteriormente al analizador de gases Andros, y

este se conectó a su vez a una computadora con el software operativo. La cantidad de los gases de escape, fue la leída en la computadora.

CAPÍTULO CUATRO: análisis de resultados

Para el análisis y proceso de resultados se utilizó una hoja de cálculo, en la cual se almacenaron las ecuaciones que relacionan las variables físicas de interés.

4.1 Relaciones gráficas de resultados y parámetros

Los datos que fueron obtenidos en los instrumentos de medida, se concentraron en una hoja de cálculo. En ésta misma se procesaron los datos para obtener resultados y obtener relaciones gráficas.

Los resultados se presentan en forma adimensional [12], Dichos números se determinaron con base a las siguientes variables físicas: cilindrada, (V); potencia al freno, (Wb); Gasto de combustible, (Gc); Poder calorífico del combustible, (PC); Régimen de giro en el cigüeñal, (N), Presión media (Pme). Las variables que se combinan en el número adimensional se escogieron por ser características de un motor de combustión interna.

$$[N] = T^{-1}$$

$$[Gc] = M T^{-1}$$

$$[PC] = L^2 T^{-2}$$

$$[V] = L^3$$

$$[Wb] = M L^2 T^{-3}$$

$$[Pme] = M L^{-1} T^{-3}$$

Al aplicar el teorema π de Buckingham [12] se obtuvieron dos números adimensionales independientes entre si.

$$\pi_1 = Wb^a Gc^b N^c V$$

$$\pi_2 = Wb^a Gc^b N^c PC$$

$$\pi_1 = \left[N \sqrt{\frac{Gc}{Wb}} \right]^3 V$$

$$\pi_2 = \frac{GcPC}{Wb}$$

Posteriormente se hizo una combinación de ambos para lograr un mejor ajuste gráfico en la relación de datos experimentales.

La combinación fue el producto de ambos números:

$$\pi = \left(N \sqrt{\frac{Gc}{W_b}} \right)^3 \frac{PC \cdot Gc}{Pme}$$

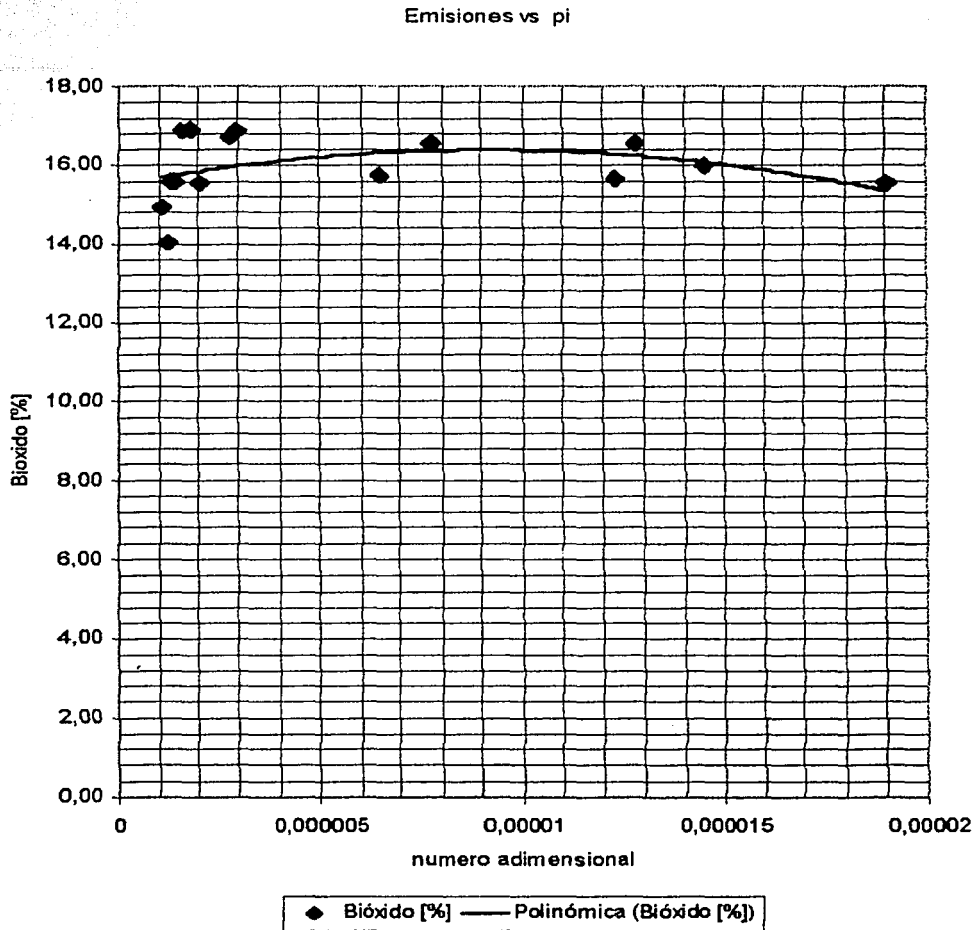
Se presentan a continuación las gráficas que relacionan al número adimensional π con las emisiones medidas, en porcentaje de volumen (%) y en partes por millón (ppm).

Se presentan también las gráficas de emisiones sin oxigenación para comparar posteriormente ambos resultados.

Las gráficas que se muestran de emisiones contra número adimensional son para que de ser requerido por una investigación o aplicación posterior, pueda ubicarse o predecirse un determinado tipo de emisión para un motor en particular. Dicha información podrá obtenerse al calcular el número adimensional en particular para cada caso de estudio.

Gráficas con oxigenación

Gráfica 1. Emisiones Vs. Número adimensional (CO₂ [%])

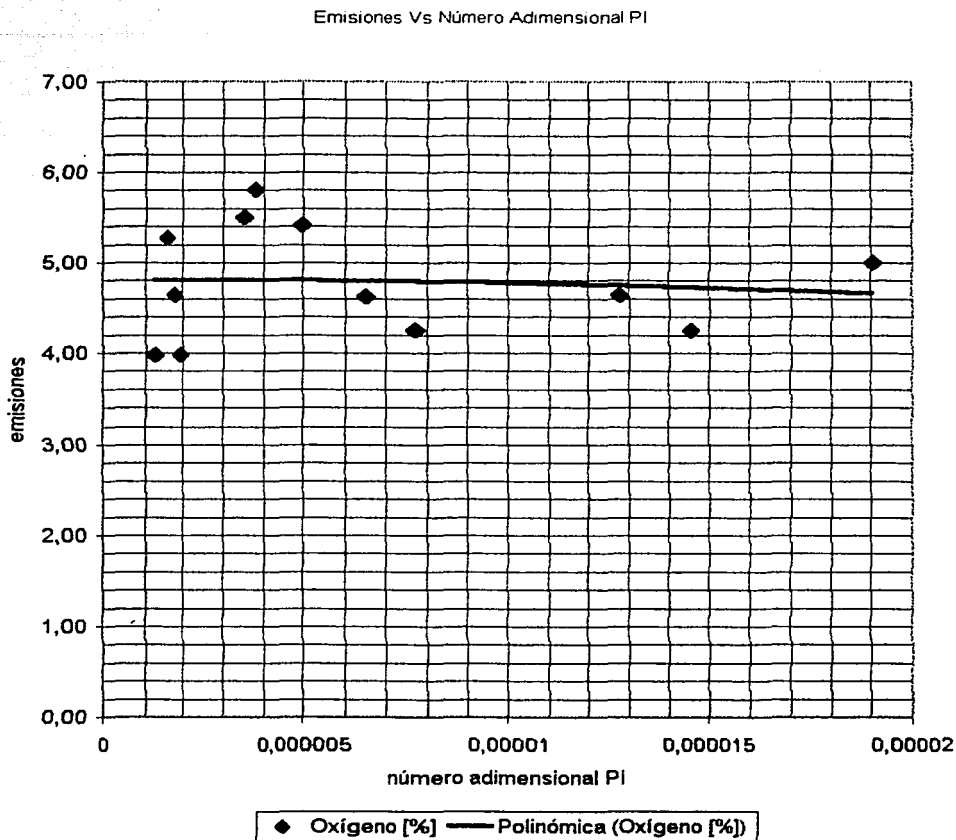


En la gráfica se puede observar emisiones de CO₂ bajas a un número adimensional bajo, lo cual se tiene a bajas revoluciones, en cilindradas pequeñas, bajo poder calorífico de combustible y mezcla pobres.

A medida que se incrementan las revoluciones y se sale de velocidades ralenti las emisiones de CO₂ aumentan lo cual indica que se mejora la combustión (3200 a 3600 r.p.m.), lo anterior se alcanza incrementando el valor del número adimensional, es

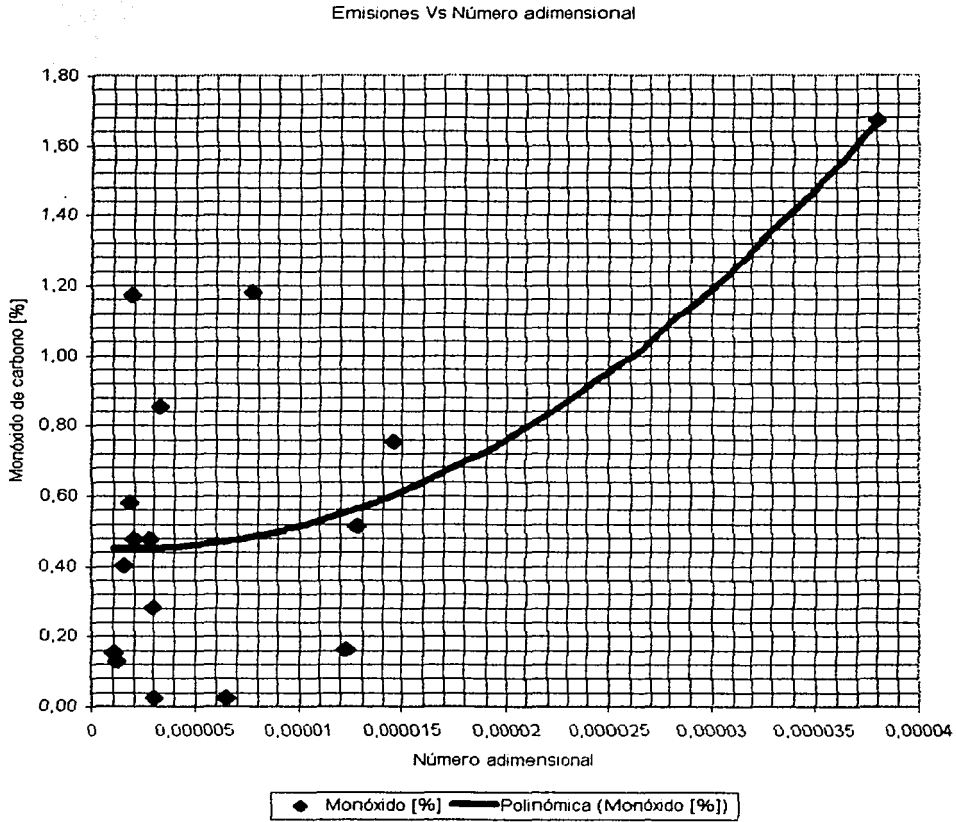
decir a altas revoluciones, cilindradas grandes. La mezcla en el motor probado fue baja, pero se compensó con el suministro de oxígeno.

Gráfica 2. Emisiones Vs Número Adimensional (oxígeno [%])



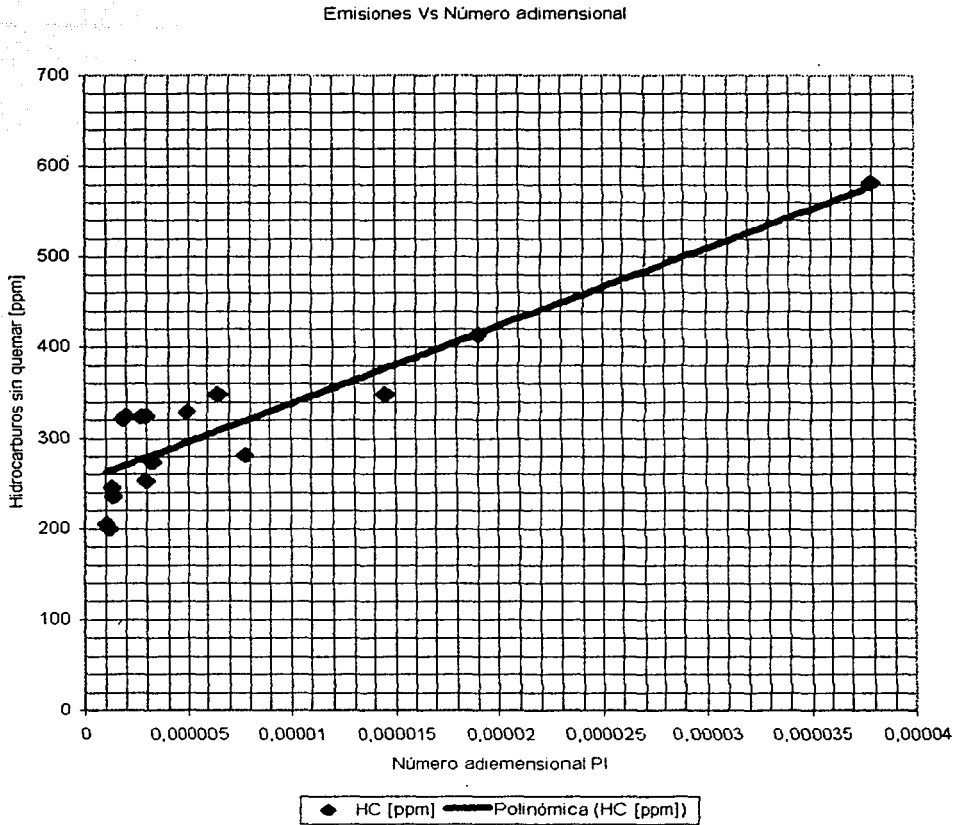
Al enriquecer la mezcla se registró un aumento en las emisiones de oxígeno observando con esto la complejidad de lograr una combustión completa, puesto que no es posible asociar completamente el oxígeno suministrado con el combustible en el motor.

Gráfica 3. Emisiones Vs. Número adimensional (CO, [%]



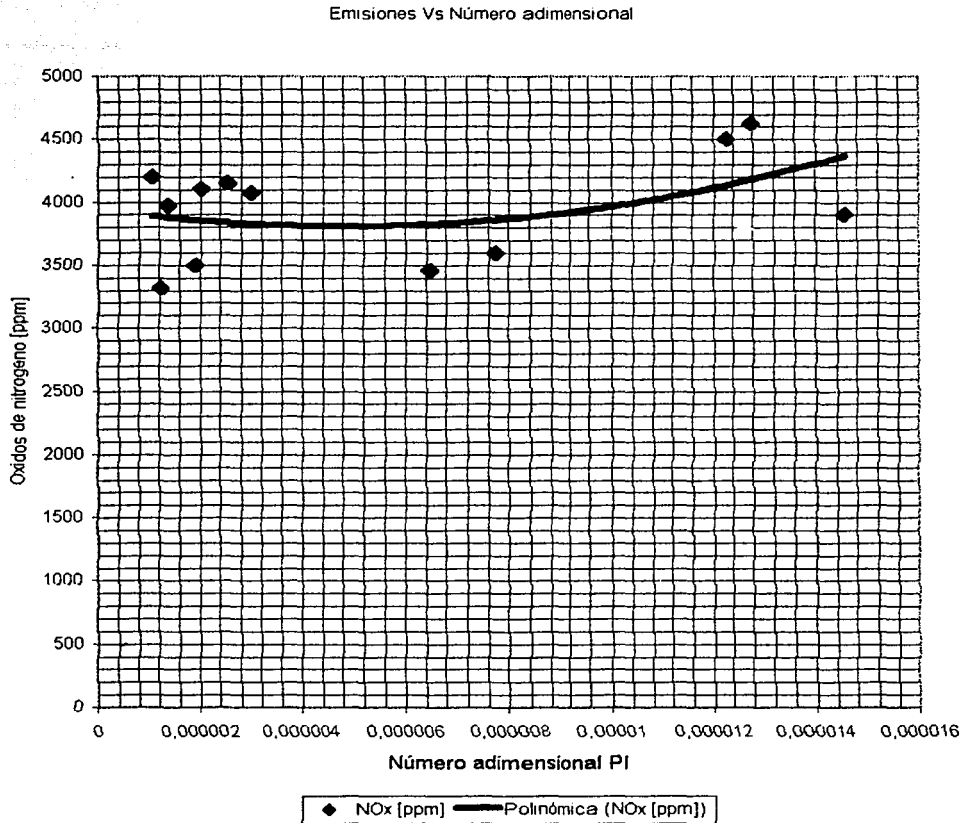
Las emisiones de monóxido no pudieron correlacionarse adecuadamente con este número adimensional, sin embargo se observa emisiones notablemente por debajo de las emisiones de monóxido sin la oxigenación (gráfica 6). De desearse, se lograrían bajas emisiones de monóxido a bajas revoluciones, mezcla pobre y cilindradas pequeñas.

Gráfica 4. Emisiones Vs número adimensional (HC [ppm])



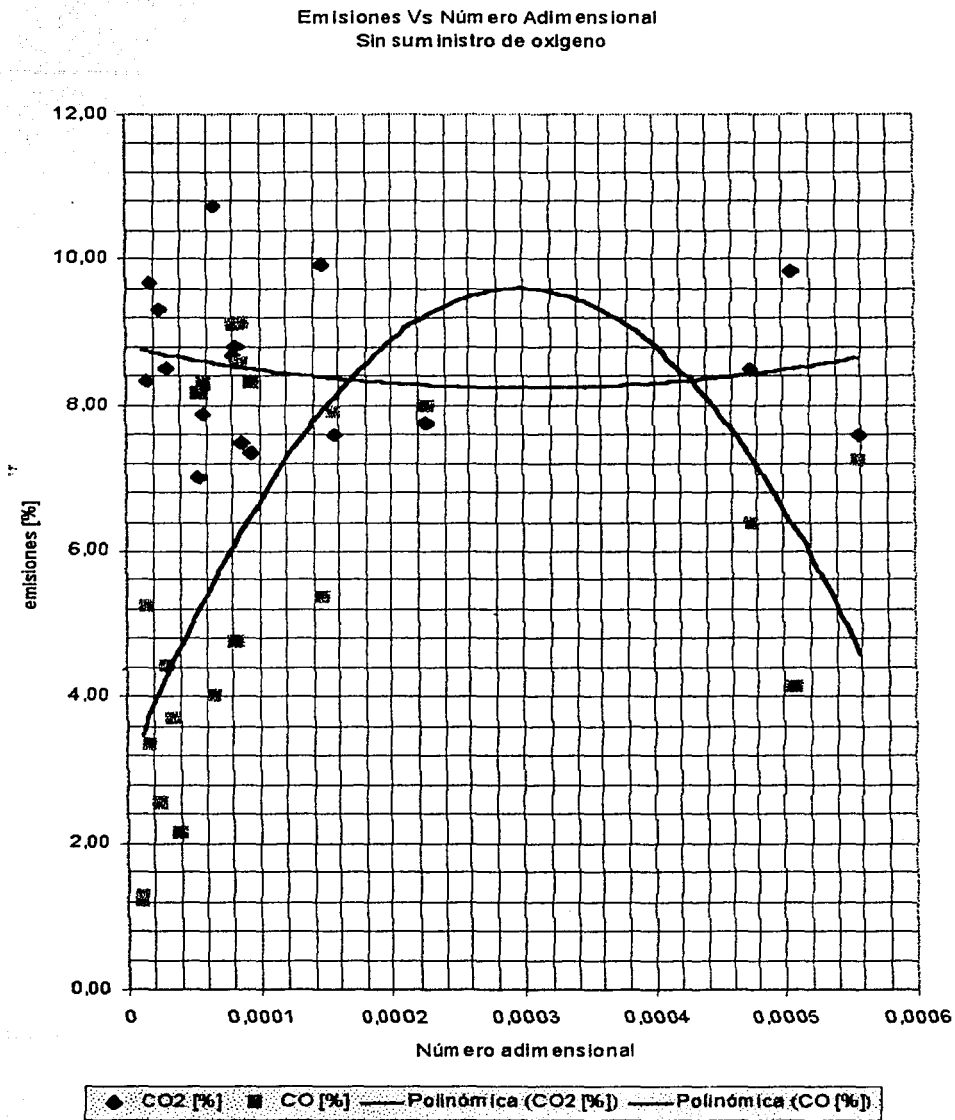
Se observa bajas emisiones de hidrocarburos sin quemar al comparar los niveles de combustión oxigenada con la combustión sin oxigenar (gráfica 7). En este caso se tienen bajas emisiones a bajas revoluciones, mezclas pobres, cilindradas pequeñas y combustibles con bajo poder calorífico.

Gráfica 5. Emisiones Vs número adimensional (NOx, [ppm])

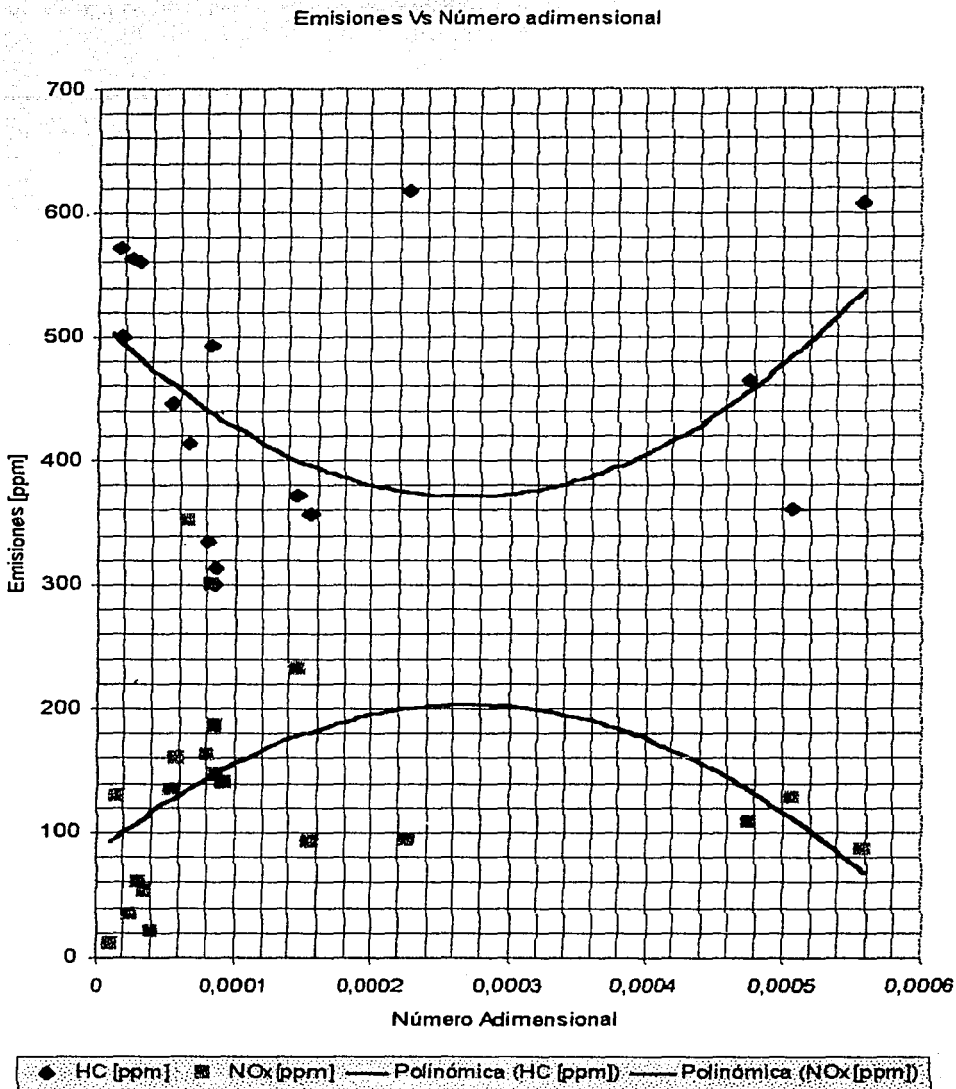


Se observa un aumento de óxidos de nitrógeno muy por arriba de una combustión sin oxígeno (gráfica 7), la atmósfera que crea la combustión oxigenada en la cámara de combustión favorece la generación de este tipo de emisiones.

Gráfica 6. Emisiones Vs Número Adimensional sin enriquecimiento de oxígeno en la mezcla, (CO, CO₂, [%])

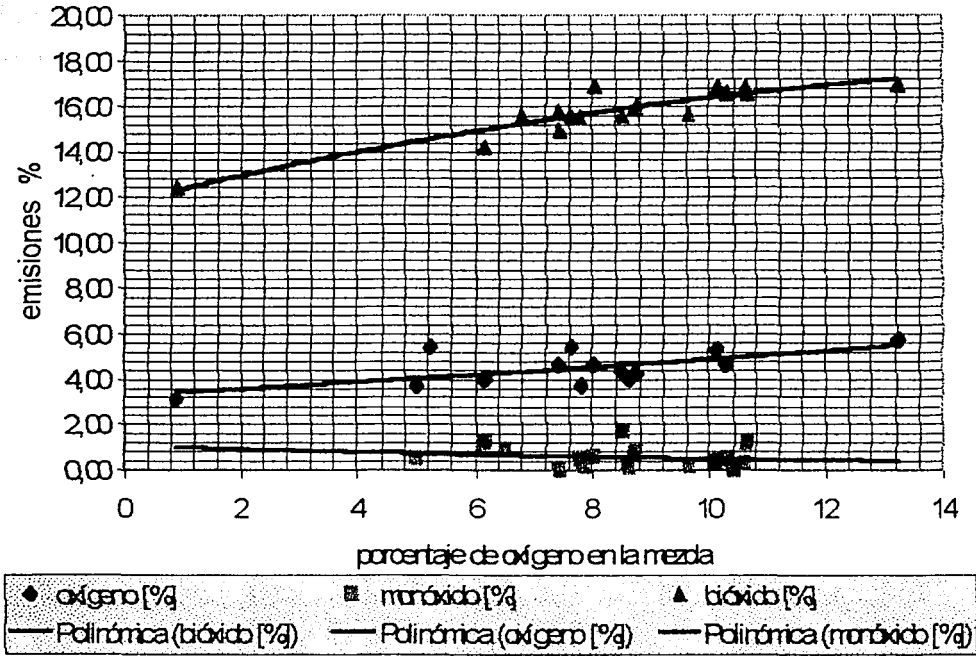


Gráfica 7. Emisiones Vs Número Adimensional sin enriquecimiento de oxígeno en la mezcla, (NOx, HC [ppm])



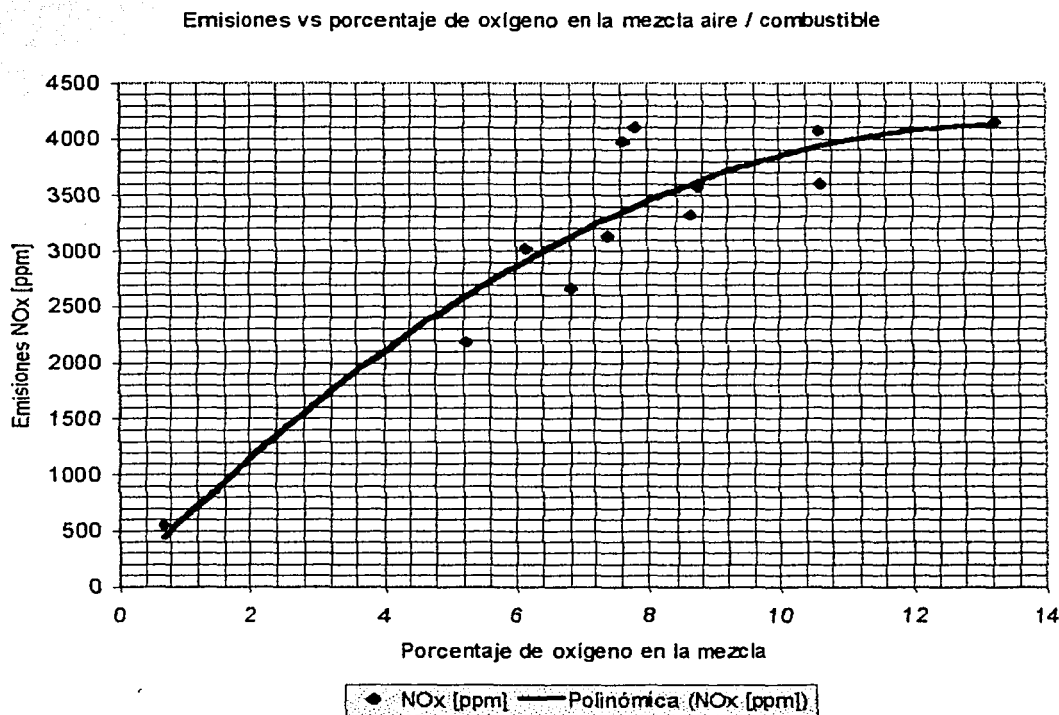
Gráfica 8. Emisiones VS. Porcentaje de oxígeno en la mezcla

Emisiones vs porcentaje de oxígeno en la mezcla



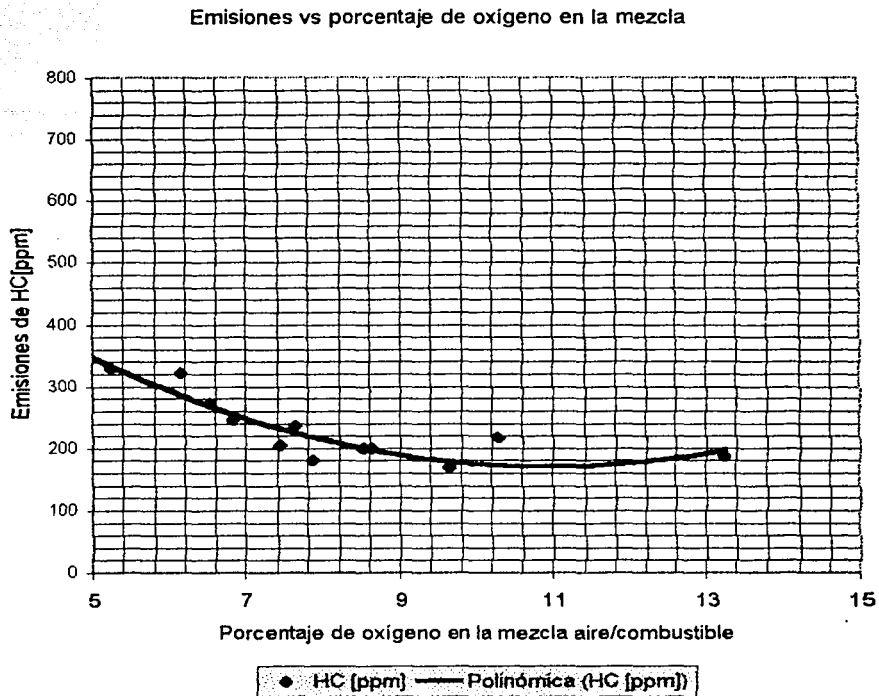
La gráfica anterior muestra que al aumentar el porcentaje de oxígeno en la mezcla aire / combustible se incrementan también las emisiones de oxígeno y bióxido de carbono. El aumento de oxígeno es debido a que no se puede tener en el motor probado, una combustión completa, por lo que necesariamente tendremos oxígeno residual. El aumento del bióxido de carbono se debe a que la combustión es mas completa con enriquecimiento de oxígeno. A diferencia del dióxido de carbono el monóxido de carbono permaneció en niveles bajos de emisión y en un rango reducido de variación.

Gráfica 9. Emisiones Vs porcentaje de oxígeno en la mezcla (NOx, [ppm])



En la cámara de combustión se registró un aumento de temperatura en proporción directa con el enriquecimiento de oxígeno, lo cual fue favorable para la formación de óxidos de nitrógeno térmicos registrándose hasta 5485 ppm, estos también aumentan al aumentar el oxígeno presente en la reacción.

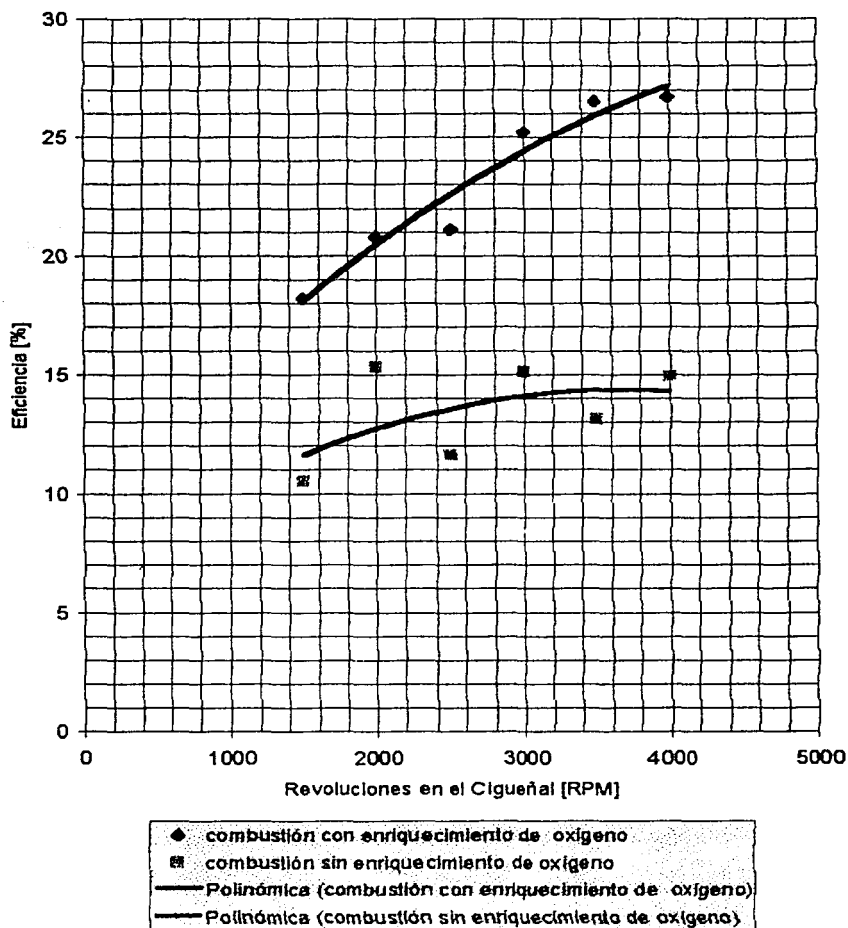
Gráfica 10. Emisiones Vs. Porcentaje de oxígeno en la mezcla (HC, [ppm])



Al tener mas cantidad de oxígeno presente durante el proceso de combustión, mas combustible reacciona con este, por lo que menos hidrocarburos sin quemar son emitidos del motor. El rango (10 a 11.5%) en donde se observa menor cantidad de HC corresponde a velocidades de operación del motor de 3200 a 3600 RPM.

Gráfica 11. Eficiencia Vs régimen de giro en el cigüeñal
 Se observa que la eficiencia aumenta con el enriquecimiento de oxígeno en la mezcla.
 Con enriquecimiento de oxígeno en el rango de 0.000078657 a 0.00012585 metros cúbicos por segundo.

Eficiencia Vs Régimen de giro



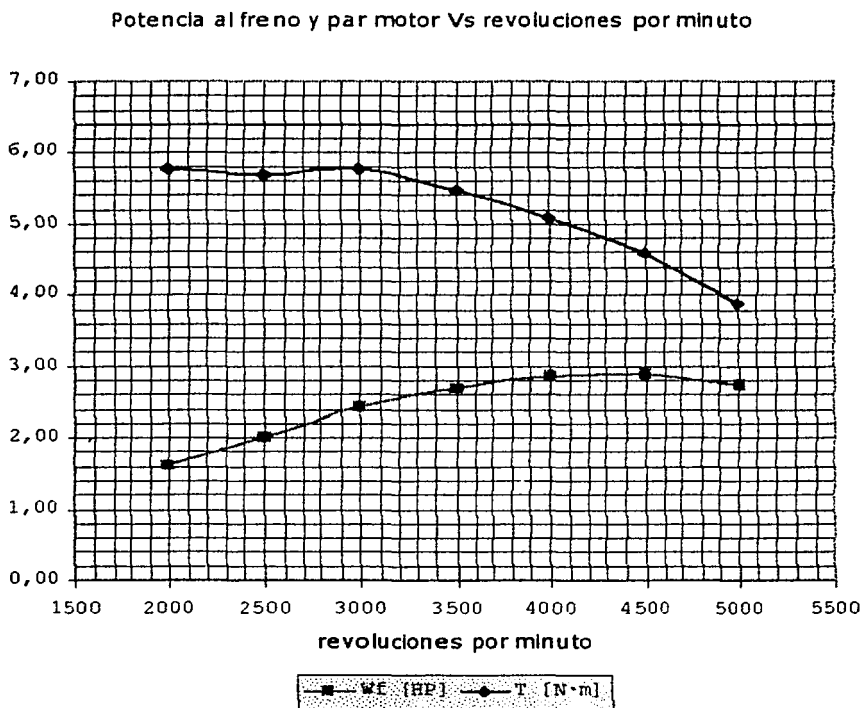
Al asociar mas cantidad de comburente O_2 , al combustible C_8H_{18} se aprovecha en mayor proporción la energía latente del combustible, por consiguiente menor cantidad de este último será requerida en el quemador o carburador, la energía suministrada

(combustible) disminuye y aumenta de energía obtenida (potencia al freno), lo que resulta en el aumento de la eficiencia del motor.

La eficiencia máxima obtenida fue de 26.52%, alrededor de las 3500 RPM con 7 puntos porcentuales de enriquecimiento de oxígeno en la mezcla. Bajo las mismas condiciones y sin enriquecimiento de oxígeno se obtuvo una eficiencia de 13.10%, por lo que se logró un aumento de más del doble de la eficiencia.

La eficiencia empleada en la gráfica es la eficiencia efectiva.

Gráfica 12. Potencia al freno Y Torque Vs régimen de giro.



CAPÍTULO CINCO: conclusiones

Con base en las pruebas realizadas, se comprobaron conjeturas que en un principio se habían formulado al planteamiento de enriquecer la mezcla de aire con oxígeno, para obtener una mejora en el rendimiento de combustible de un motor de combustión interna.

Se supuso que al agregar oxígeno O_2 (99.5% de pureza) [12] a la mezcla aire/combustible la combustión, tendería a ser completa, es decir, una mayor cantidad de combustible dentro de la cámara de combustión se oxidará, y por ende se tendría un aumento en la eficiencia del motor al consumir menor cantidad de combustible.

La suposición anterior resultó ser verdadera, puesto que en el analizador de gases se obtuvo un aumento de dióxido de carbono CO_2 , una disminución de monóxido de carbono CO , e hidrocarburos sin quemar HC , lo cual es un indicativo de que la combustión se está llevando de manera mas completa que la que se llevaría a cabo sin enriquecimiento de oxígeno. Para lograr lo anterior se aumentó en un rango de 5 a 11 puntos porcentuales la cantidad de oxígeno en la mezcla del aire atmosférico, el oxígeno fue suministrado con un flujo volumétrico en el rango de 0.000086523 a 0.000125851 metros cúbicos por segundo, mismo en el que el motor mostró un mejor comportamiento a diferentes exigencias de carga.

También se supuso que se registraría un aumento en la temperatura del motor, (el motor sufrirá mas desgaste y se adelgazará el aceite), a consecuencia de la diferencia de densidades. El oxígeno al ser mas denso que el nitrógeno tenderá a desplazar a éste del aire atmosférico, esto reduciría la cantidad de nitrógeno dentro de la cámara de combustión, y se podría registrar un aumento de temperatura. Otra causa que tiene la misma consecuencia es la de aprovechar mas el poder calorífico del combustible mas eficientemente.

El oxígeno tiene una densidad de 1.429 kg/m^3 , y el nitrógeno de 1.2506 kg/m^3 , por lo que el oxígeno desplaza al nitrógeno en la entrada del carburador (puerto único de succión). Esto implica que parte del nitrógeno que absorbe el calor producto de la inflamación, no se encuentre en la proporción normal del aire atmosférico (78.9% en volumen). La presencia del nitrógeno dentro de la cámara de combustión y durante el proceso de combustión absorbe parte del calor de la explosión de la mezcla, lo cual, al disminuir la proporción de nitrógeno, aumenta la temperatura en la cámara de combustión.

Se presentó en el motor mas desgaste en los anillos, cilindro y culata esto fue debido al aumento de temperatura. Se observaron depósitos de metal producto de fricción y temperatura en el aceite de lubricación en el cárter.

Bajo condiciones similares de operación se compararon dos motores de iguales características, observando mayor desgaste en el motor con combustión oxigenada.

Por último también se supuso que se podría aumentar la potencia del motor, puesto que mas cantidad de combustible en la cámara se asocia con oxígeno, es decir, oxígeno- aire/ combustible.

Esto resultó ser verdadero ya que logrando una mayor oxidación del combustible en la cámara de combustión se obtiene una mayor expansión o trabajo sobre la cabeza del pistón, comparada con la combustión con aire atmosférico sin enriquecer.

El encendido del motor mejoró con el enriquecimiento de oxígeno, es decir el motor encendió rápidamente con una mezcla pobre. Parte de hidrocarburos sin quemar depositados en el escape, a temperaturas elevadas y con residuos de oxígeno, explotaban en esta parte del motor, produciendo así detonaciones no controladas.

El menor consumo de combustible se obtuvo en el rango de las 3500 a 4000 RPM, con un flujo de 0.0000865227 a 0.0001258512 metros cúbicos por segundo de oxígeno y una carga de 3 Kg., para estas condiciones se tuvo un par de 4 N-m, lo cual se encuentra en el rango de par entregado para motores pequeños. (5)

En el caso de las emisiones se mostró para las condiciones anteriores disminución en los hidrocarburos sin quemar (HC) y aumento de Dióxido de carbono (CO₂), indicadores de combustión más completa.

El desempeño del motor con combustión enriquecida, mejoraría si se desempeñara este a condiciones de presión a nivel del mar, puesto que el aire es más denso y esto ocasiona que se reduzca la cantidad de oxígeno que se deba suministrar a la mezcla para alcanzar mayores eficiencias.

Se registró un aumento en la temperatura general del motor (4000 RPM): en los gases de escape, en la culata o tapa del motor y en el lubricante contenido en el cárter. Se redujo la viscosidad del aceite lubricante a altas temperaturas, por lo que podría presentarse fricción excesiva. Por lo que es más conveniente utilizar el enriquecimiento con oxígeno en la mezcla en motores que son enfriados por un líquido.

Los parámetros de mezcla (tabla 2), indican la relación de la proporción entre aire combustible real con el estequiométrico. El parámetro ϕ tuvo en la mayoría de los casos un valor mayor que uno, es decir mezcla rica en combustible, sin embargo los datos generales muestran combustión con mezcla pobre en combustible. Lo anterior es debido a que en la combustión oxigenada disminuye el flujo de aire en la entrada al carburador, por lo que la mezcla combustible aire aumenta y la relación con la mezcla combustible aire estequiométrica, aumenta también, dando como resultado un valor dominante mayor que uno.

La razón de gastos de combustibles (tabla 3), muestra la clara tendencia de tener combustión con mezcla pobre en combustible. En esta tabla se reporta la relación del gasto de combustible con oxigenación y el gasto de combustible sin oxigenación, por lo que se tiene un valor menor que uno como valor dominante.

La combustión enriquecida con oxígeno, es un buen método para ahorrar combustible por lo que con la disminución de este último, será menester encontrar formas de aprovechar al máximo este energético.

Se tendrá una mejor aceptación del proceso de enriquecimiento, si se plantea un proyecto que sea amortizable y que pueda producir oxígeno de manera relativamente sencilla y a la medida de las necesidades de un proceso o fin determinado. Se debe explorar la posibilidad de enriquecimiento para un vehículo de forma autónoma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. K. Barker, F. Cambi
"Contaminación de la atmósfera"
Ginebra : Organización - mundial de la salud, 1962
2. Jeremy Colls
"Air pollution : an introduction"
London ; New York : E & FN Spon, 1997
3. Heywood John B.
"Internal Combustion Engine Fundamentals"
Mc Graw - Hill Book Company USA 1988 pp 929
4. Baukal Charles E.
"Oxygen Enhanced Combustion"
Air products CRC Press, USA 1998
5. Marks
"Manual del Ingeniero Mecánico"
Mc Graw - Hill, México 1995
Tomo I y Tomo II
6. "Prácticas del laboratorio de máquinas térmicas"
Facultad de Ingeniería UNAM 1988
7. Lichty Lester C.
"Procesos de los motores de combustión"
McGraw-Hill Madrid, España 1970
8. Wark Kennet
"Termodinámica"
Mc Graw Hill 1996
9. INFRA Patriotismo, empresa abastecedora de diferentes tipos de gases
10. Esteban Barrios Bonilla, Carlos Emilio Romero
"Carburación oxigenada para disminuir consumo de combustible y emisiones contaminantes en M.C.I."
Facultad de Ingeniería UNAM, Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental
11. Normas: Society Automotive Engineer SAE
HANDBOOK Volume 2 seccion 23-26 Cooperative Engineering Program.
10. White Frank M.
"Mecánica de Fluidos"
Mc Graw Hill 1988

ANEXO . Tablas

Tabla 1. Emisiones, gases producto de la combustión oxigenada. Datos experimentales.

	Emisiones				
	Gases producto de combustión oxigenada				
	Oxígeno [%]	monóxido [%]	bióxido [%]	NOx [ppm]	HC [ppm]
1500 [RPM]	3,13	1,67	12,44	245	582
	8,57	0,02	13,71	1861	324
	3,72	0,48	16,73	5054	323
2000 [RPM]	4,28	1,67	15,56	2456	414
	4,62	0,02	15,74	3138	348
	3,72	0,48	15,54	4107	324
2500 [RPM]	4,25	0,75	15,98	3572	348
	7,53	0,86	12,15	1793	273
	3,98	1,17	14,15	3015	321
3000 [RPM]	5,41	5,04	11,55	2184	329
	4,25	1,18	16,54	3600	281
	7,53	0,28	16,86	4072	253
3500 [RPM]	3,98	0,13	14,03	3321	200
	5,41	2,80	15,59	3976	236
	4,64	0,51	16,54	4629	217
4000 [RPM]	5,27	0,40	16,86	2951	167
	9,26	0,15	14,03	1729	181
	1,31	5,28	15,59	2666	245
4000 [RPM]	7,54	0,16	15,66	4502	169
	5,74	6,23	16,96	4149	187
	4,64	0,58	16,91	5485	138
	2,33	2,96	14,92	4673	205

Tabla 2. Números adimensionales, porcentaje de oxígeno en la mezcla

	parámetros de mezcla		enriquecimiento		
	FI	LAMBDA	de oxígeno OMEGA	% de O2 en la mezcla	Número Adimen Sional PI
1500 [RPM]	0,862740403	1,159097217	21,04979693	0,899660	3,8011E-05
	0,889588566	1,124115168	22,77588188	10,41247	3,0057E-06
	1,05840028	0,944822124	21,76232484	5,009439	2,7937E-06
2000 [RPM]	0,993565898	1,006475768	22,40883317	8,512272	1,9044E-05
	1,001205609	0,998795843	22,20225358	7,415185	6,496E-06
	0,998735709	1,001265892	22,27631056	7,810821	2,0354E-06
2500 [RPM]	1,035003577	0,966180236	22,45434018	8,751233	1,4566E-05
	0,832895216	1,20063122	22,03694273	6,522450	3,3131E-06
	0,945006129	1,058194195	21,9696956	6,155448	1,9242E-06
3000 [RPM]	1,038680622	0,96275985	21,80483759	5,246157	4,9976E-06
	1,088885394	0,918370294	22,82088936	10,64126	7,7434E-06
	1,088429697	0,918754792	22,81564743	10,61466	2,9901E-06
3500 [RPM]	0,909822685	1,099115263	22,42901975	8,618393	1,2332E-06
	1,115539116	0,896427553	22,24463307	7,641912	1,3871E-06
	1,096371528	0,912099571	22,75211158	10,29126	1,2773E-05
4000 [RPM]	1,00720026	0,992851213	22,7251867	10,15367	1,5959E-06
	0,857193967	1,166597105	22,28782581	7,872103	1,087E-06
	1,131147069	0,88405834	22,0947924	6,836377	1,3189E-06
4000 [RPM]	1,013417407	0,986760236	22,62728171	9,650599	1,2283E-05
	1,456919157	0,686379883	23,34598174	13,24538	2,5413E-06
	1,086186588	0,920652134	22,32076802	8,047065	1,7793E-06
	1,084023292	0,922489403	22,20491369	7,429442	1,0708E-06

Tabla 3. Temperatura de gases, razón de gastos de combustible

	Temperatura gases de Salida [°C]	Gc O2 / Gc air
1500 [RPM]	387	1,1698612
	310	0,52083333
	455,8	0,5798325
2000 [RPM]	340	1,16993464
	360	0,94517958
	470,6	0,74171765
2500 [RPM]	410	0,42921204
	447,2	0,5091355
	356,2	0,55137732
	495	0,71082298
3000 [RPM]	392,1	0,59470899
	521,6	0,66799241
	448	0,59891401
	623	0,51385603
3500 [RPM]	578,3	0,65034182
	584	0,45300183
	553,7	0,49277179
4000 [RPM]	521,1	0,5176114
	597	0,73170355
	609	0,6236129
	650	0,68588506
	614,4	0,54425316

Tabla 4. Emisiones y número adimensional sin enriquecimiento de oxígeno, datos experimentales.

	CO ₂ [%]	CO [%]	HC [ppm]	O ₂ [%]	NO _x [ppm]	PI
1500 RPM	9,31	2,55	563	4,11	35	2,568E-05
	8,33	5,25	572	3,59	130	1,535E-05
	1,32	1,27	116	17,44	1	1,091E-05
2000 RPM	8,50	4,43	561	3,52	60	3,049E-05
	9,67	3,34	500	3,38	443	1,773E-05
	1,21	1,21	82	18,04	11	1,018E-05
2500 RPM	7,59	7,23	607	3,66	87	0,0005587
	8,79	4,74	492	3,43	300	8,293E-05
	1,93	2,13	125	16,17	21	3,946E-05
3000 RPM	7,01	8,16	446	3,54	135	5,431E-05
	7,75	7,98	617	2,82	94	0,0002271
	10,72	4,00	414	1,56	352	6,559E-05
3500 RPM	3,51	3,69	143	12,59	53	3,554E-05
	7,87	8,27	3,49	2,22	160	5,863E-05
	8,48	6,37	464	3,14	109	0,0004758
4000 RPM	9,93	5,36	371	1,57	232	0,0001468
	8,67	9,09	334	0,82	163	8,101E-05
	7,48	8,58	313	2,75	147	8,692E-05
4000 RPM	9,84	4,14	360	3,15	128	0,0005086
	7,59	7,89	357	3,28	93	0,0001569
	9,12	9,13	300	0,24	187	8,66E-05
	7,33	8,31	2,78	3,26	141	9,292E-05

APÉNDICE, Conceptos generales

Proceso ideal del motor de Otto. [7]

Los procesos reales en los motores de combustión están estrechamente relacionados con combustible, aire u oxígeno, u otros reactantes y con los productos de combustión o reacción. El valor variable del calor específico y el equilibrio químico impiden que se alcancen las altas temperaturas y presiones indicadas en el análisis del ciclo de aire normal. Los productos son expulsados en condiciones considerablemente diferentes a las del aire y del combustible a la entrada. La temperatura y presión de los productos que salen del motor alcanzan rápidamente las del aire ambiente. Sin embargo, puesto que los productos finales no pueden ser transformados en aire y combustible en el motor o aparato auxiliar que supla esta función, el proceso del motor de combustión no puede ser considerado como un ciclo, independientemente del aparato empleado. (el mecanismo puede recorrer un ciclo pero el medio de trabajo no).

En todo análisis teórico de los procesos de los motores, se acostumbra a suponer que no hay intercambio de calor con el medio, ni las pérdidas en el fluido por fricción. Las válvulas de un motor de pistón se supone que se abren y cierran en el punto muerto, es decir, en uno de los extremos de la carrera del pistón en un motor alternativo, sin que influya sobre el flujo del fluido. Así los efectos de la fricción en el fluido son relativamente pequeños y pueden ser despreciados en el análisis del motor de pistón, excepto cuando está estrangulado. [7]

Procesos reversibles internamente.

○ *La mezcla real.* El espacio muerto del cilindro del motor alternativo contiene algunos de los productos de combustión al final de la carrera de escape. La cantidad de gases en el espacio muerto depende sobretodo de la presión, temperatura y del volumen del mismo. Estos gases alcanzarán una temperatura elevada y se mezclarán con la mezcla aire - combustible introducida, siendo la temperatura final la de la mezcla al comienzo del proceso de compresión. La cantidad y temperatura de los gases residuales tienen una influencia apreciable en la temperatura de la mezcla al final de la admisión, y puesto que esta temperatura y el proceso completo del motor determinan el valor de la temperatura de los gases del espacio muerto.

○ *Proceso de compresión.* La mezcla aire - combustible introducida y los gases residuales en el espacio muerto del cilindro se comprimen reversiblemente y adiabáticamente de 1 a 2, de aquí que la entropía de la mezcla permanezca constante durante el proceso

○ *Proceso de combustión.* Se supone que la combustión tiene lugar a volumen constante al final de la compresión en el proceso ideal del motor Otto. Al principio de la combustión, la mezcla tiene la energía química del combustible, del oxígeno y la energía interna del aire, del combustible y de los gases del espacio muerto. Al final del proceso, los productos disociados (H_2 , CO , etc.) indican energía química y todos los productos tienen energía interna.

○ *Proceso de expansión.* Los gases presionan sobre el pistón durante el proceso de expansión, con la correspondiente disminución de energía interna y temperatura. La disminución de la temperatura permite la recombinación de algunos de los productos disociados a lo largo de todo el proceso. Realmente, la combinación y disociación de

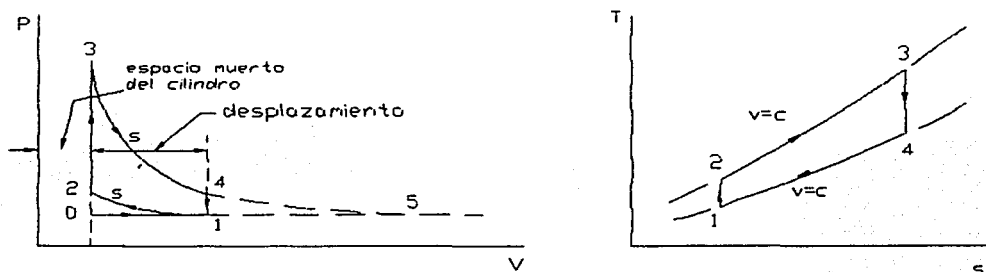
algunas moléculas tiene lugar al mismo tiempo, siendo el resultado neto el que indica el cambio que se ha producido.

El proceso de expansión se supone adiabático y reversible en el caso ideal. En consecuencia, el proceso se realiza a entropía constante y puede resolverse analíticamente.

○ *Gases del espacio muerto.* La válvula de escape se abre al final del proceso de expansión y parte de los gases se escapan y parte quedan en el cilindro. La parte que queda en el cilindro se expande de forma adiabática y reversible en el caso ideal hasta la presión atmosférica, y la otra parte escapa. Las condiciones de los gases que quedan en el cilindro están determinadas por la continuación del proceso de expansión hasta el punto 5. Este es un proceso a entropía constante.

○ *Proceso de admisión.* El flujo de aire y el combustible a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente penetra en el sistema de admisión del motor durante la carrera de admisión 0 a 1, en el caso de flujo intermitente como en el motor de un cilindro, el trabajo de la presión atmosférica sobre la presión atmosférica sobre la cantidad de medio entrante en el sistema de admisión es igual al trabajo del flujo pV , utilizado para flujos permanentes.

El trabajo realizado sobre el pistón durante el proceso de admisión es igual al trabajo ejercido sobre los gases de escape por el pistón, durante el tiempo de escape en el caso ideal de igual presión de admisión y de escape.



Procesos reversibles internamente

1. Compresión adiabática, 1-2
2. Adición de calor a volumen constante, 2-3
3. Expansión adiabática, 3-4
4. Expulsión de calor a volumen constante, 4-1

El cilindro es el recipiente en el cual el pistón se mueve con movimiento rectilíneo alternativo.

El cilindro forma parte del bloque de cilindros, o monobloque.

La parte superior del cilindro está cerrada por la culata o cabeza.

El volumen encerrado en el cilindro entre la culata y el pistón representa la cámara de combustión. En la cual se quema la mezcla de combustible y aire, es decir el fluido e trabajo.

En el motor Ech esta mezcla se forma en el carburador o en el colector o múltiple de admisión y entra en cilindro a través de la válvula de admisión. La válvula de mariposa del carburador sirve para regular la cantidad de mezcla que entra. El comienzo de la combustión se produce al saltar la chispa entre los electrodos de la bujía. El pistón o émbolo, provisto de aros o segmentos (anillos) que impiden a los gases en expansión escaparse entre el pistón y el cilindro, transmite el empuje de estos gases, a través del perno o pasador, a la biela y de ahí a la manivela del cigüeñal, o eje motor. La biela y la manivela transforman el movimiento lineal alternativo del pistón en movimiento rotatorio del árbol motor o cigüeñal, que gira soportado por cojinetes de bancada aplicados a la base.

Los pasos a través de los cuales los productos de la combustión se descargan al exterior son la válvula de escape y el tubo de escape (múltiple y conducto).

Las válvulas de admisión y de escape son accionadas por el árbol de distribución o eje de levas es conducido por el cigüeñal mediante una cadena o engranaje. Las levas, solidarias al eje, actúan sobre una serie de piezas: los empujadores, los vástagos y los balancines, que transmiten el movimiento a las válvulas según la ley definida por la forma de las levas correspondientes. Las válvulas se mantienen en su asiento mediante sus resortes. [7]

Conceptos fundamentales para el manejo de resultados en pruebas a motores de combustión interna. [6]

Par de torsión

$$T = F \cdot d$$

Par de torsión aplicado a la flecha del motor:

Donde: T es el par de torsión (N·m)

F es la fuerza aplicada al motor por los dinamómetros (N)

d es el radio de la polea 0.1016 m

Potencia al freno

$$W_f = T \cdot \omega$$

Donde: W_f es la potencia al freno (W)

ω es la velocidad angular de la flecha (1/s)

T es el par de torsión (J)

$$\omega = 2\pi N/60 \quad (1/S)$$

N = RPM obtenidas en la flecha con un tacómetro.

Presión media efectiva al freno (P_{mef})

$$P_{mef} = \frac{W_f \cdot Z}{A \cdot L \cdot N \cdot n}$$

Donde: P_{mef} es la presión media efectiva al freno (N/ m²)

W_f es la potencia al freno

Z son las revoluciones necesarias para concluir un ciclo termodinámico en el

motor

A es el área del cilindro (m²)

L es la longitud de la carrera del pistón en el motor (m)

N es la velocidad del motor (rev/min)

n es el número de cilindros del motor.

Gasto de combustible

$$G_c = \frac{\rho_{com} \cdot V}{t}$$

Donde: G_c gasto de combustible (kg/s)

V es el volumen de combustible consumido (m^3)

ρ_{com} es la densidad del combustible (kg/m^3)

t es el tiempo (s)

Eficiencia del motor

Donde: η_{motor} es la eficiencia del motor (%)

$$\eta_{motor} = \frac{W_f}{G_c \cdot PC}$$

W_f es la potencia al freno (W)

G_c es el gasto de combustible (kg/s)

PC es el poder calorífico del combustible (J/kg)