

58



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA CON DIFERENTES
COMBUSTIBLES PARA SU USO EN LA
CIUDAD DE MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

A R E A M E C A N I C A

P R E S E N T A :

GENARO MUÑOZ HERNANDEZ



DIRECTOR: M.I. J. ESTEBAN BARRIOS BONILLA

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F.

OCTUBRE DEL 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria.

Este trabajo está dedicado a mis padres, Genaro Muñoz Diosdado e Isidora Hernández Ortiz, por todo aquello que necesité y que ellos pudieron darme, ya que por ellos estoy donde me encuentro. ¡Gracias!

A mis hermanas Yolanda Patricia Hernández Ortiz y Julieta Muñoz Hernández.

A mi esposa María Beatriz Rosas Ibañez.

A mi hijo Genaro Muñoz Rosas que desde que está con nosotros es mi razón de vivir.

A mi sobrino Octavio Jesús Torres Hernández.

Agradecimientos.

Al M.I. Esteban Barrios Bonilla, director de esta tesis, por la paciencia y sabiduría que tuvo para mí, y también por su apoyo y confianza.

Al Ing. Agustín Hernández Quintero, por todo su apoyo, su confianza y su amistad.

Al I.Q. Félix Núñez Orozco, por su apoyo y toda su sabiduría.

Al M.I. Bernardo Frontana de la Cruz, por su apoyo y paciencia para el desarrollo de esta tesis.

Al Ing. Armando Maldonado Susano por todo su apoyo y su sabiduría.

Al Dr. Rogelio Soto Ayala, por su apoyo y su sabiduría.

Al Dr. Rogelio González Oropeza, por el apoyo brindado para la realización de esta tesis.

Y a todos aquellos que no menciono pero que de alguna manera tienen mucho que ver con este trabajo.

Enrique Bernal Martínez
Edgar Villaseñor Franco
Adán Tonatiuh López Rodríguez
Octavio Santiago Cruz
Gil Miguel Camacho López
Luis Martínez Mendoza
Abraham Martínez Bautista
:
:

Índice

	Pg.
Introducción	1
Capítulo I	
Conceptos fundamentales del motor de combustión interna.	5
I.1 Motores	5
I.2 El motor de gasolina de encendido por chispa, ciclo de Otto	6
I.3 Carburador	8
I.4 El múltiple de admisión	10
I.5 El múltiple de escape	11
Capítulo II	
Combustibles.	13
II.1 Poder Calorífico	13
II.2 Volatilidad	14
II.3 Inflamabilidad	14
II.4 Poder antidetonante	14
II.5 Clasificación de los combustibles	15
II.6 Hidrocarburos	15
II.7 Petróleo	19
II.8 Gasolinas y diesel	20
II.9 Combustibles gaseosos	21
II.10 Alcoholes	27
Capítulo III	
Impacto ambiental y efectos en la salud debido a emisiones contaminantes.	28
III.1 Contaminación por combustión	28
III.2 Clasificación de los contaminantes del aire	29
III.3 Características de los contaminantes	30
III.4 Índice UV	35
III.5 IMECA	38
Capítulo IV	
Conceptos fundamentales para el manejo de resultados en pruebas a motores de combustión.	39
IV.1 Par de torsión	39
IV.2 Potencia al freno	39
IV.3 Presión Media Efectiva al freno	39

Índice

IV.4 Eficiencia mecánica	40
IV.5 Gasto de combustible	40
IV.6 Eficiencia del motor	41
IV.7 Potencia indicada	41
IV.8 Eficiencia volumétrica	42
IV.9 Eficiencia térmica	42
IV.10 Eficiencia total	43
IV.11 Combustión	43
IV.12 Entalpia de formación	49
IV.13 Temperatura de flama adiabática	51
IV.14 Poder calorífico para una mezcla de gases	52
Capítulo V	
Comparación de resultados en pruebas a motores de combustión usando diferentes combustibles.	53
V.1 Comportamiento de la densidad del aire necesario para la combustión	53
V.2 Temperatura de flama adiabática	63
V.3 Pruebas realizadas en motores de combustión interna	67
Capítulo VI	
Conclusiones	81
Apéndices A	
Tablas de resultados de pruebas realizadas a motores de 4 y 8 cilindros con diferentes combustibles	83
Bibliografía.	84

Introducción.

En la Ciudad de México se pueden enumerar una serie de problemas ambientales que se tienen a diario, como es la generación de una gran cantidad de gases contaminantes al hacer uso del automóvil, que son causantes de enfermedades respiratorias y otros efectos nocivos para el ser humano, tanto en la combustión completa, como en la combustión incompleta [1]. Por lo cual, es importante estudiar estos efectos y la manera en que se puede actuar para aminorarlos.

El automóvil ha cambiado nuestra sociedad e impulsado su crecimiento, también ha sido un contribuyente a la contaminación del aire. Las emisiones de los automóviles afectan la vida de todos los que vivimos en áreas urbanas.

El convertidor catalítico de tres vías, como alternativa para aminorar la emisión de gases contaminantes fue establecido en 1968, en otros países se hizo un uso masivo en autos nuevos a mediados de los años 1970's, en México se comercializaron los primeros vehículos con convertidor catalítico hasta 1991, siendo de dos y tres vías. Debido a la aplicación de una normatividad más estricta para los vehículos año-modelo 1993 y posteriores, fue introducido el convertidor catalítico de tres vías en la mayoría de los vehículos [13].

Se han estudiado varios métodos y tecnologías para tratar los gases de escape. En lo que respecta al proceso "teórico" de combustión, que se espera sea completo en un motor de combustión interna, consiste en prender una mezcla de combustible con aire (mezcla de O_2 y N_2) ya que el hidrógeno y carbono (constituyentes del combustible) se combinan con el Oxígeno en el aire para formar dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, descargando nitrógeno a la atmósfera

El CO_2 , vapor de agua y los NO_x son productos que en grandes cantidades causan contaminación, lo que sucede realmente es que al existir una gran liberación de CO_2 , NO_x y vapor de agua, contribuyen a cambiar el estado actual de equilibrio y como consecuencias podemos notar el calentamiento global de la tierra. generación de ozono y la presentación de malestares y daños en quien respira ese aire saturado con estas sustancias [14].

Debido a lo anterior, el vehículo a gasolina emite cuatro principales gases contaminantes:

Dióxido de Carbono (CO_2)

Monóxido de Carbono (CO)

Hidrocarburos no quemados (HC)

Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los hidrocarburos son una mezcla de compuestos que son dañinos para la salud de las personas y para el ambiente y algunos (benceno y aldehidos) son reconocidos como cancerígenos y fuertes agentes productores de ozono [14].

Las partículas de carbono que se respiran, quedan incrustadas en los pulmones humanos y en la presencia de otros contaminantes (sulfatos) forman núcleos de partículas que son dañinos para la salud.

Los hidrocarburos (HC) reaccionan con los óxidos de nitrógeno a la luz del sol para formar ozono, éste irrita el sistema respiratorio causando tos, dolores de cabeza, agrava el asma, la bronquitis y el enfisema. Recientemente se ha descubierto que causa daño permanente en el tejido pulmonar y puede destruir la vegetación, reducir el rendimiento de cosechas y dañar material de construcción expuesto.

El Monóxido de carbono (CO), al ser respirado por humanos y animales, ocupa el lugar del oxígeno en la sangre evitando la oxigenación de la misma y causando daños serios y potencialmente mortales. Causa estrés en corazón y pulmones, retrasa el crecimiento fetal y el desarrollo mental [14].

Los óxidos de Nitrógeno dañan el sistema respiratorio y reducen la resistencia a infecciones respiratorias. También contribuyen a la formación de ozono y a la lluvia ácida.

Control de las Emisiones de Escape.

Una manera efectiva de reducir emisiones de escape (dañinas o no dañinas) es quemar menos combustible. Independientemente de las medidas que se tomen para reducir la toxicidad y otros efectos dañinos de los gases de escape, la eficiencia en el uso de combustible sigue siendo la tecnología clave.

Se pueden utilizar otras formas para el control de las emisiones de escape y reducir sus efectos dañinos a través de:

Control de la combustión.

Combustibles limpios.

Eficiencia en el uso de combustible.

Los beneficios de una especificación mejorada de combustible son inmediatos en todo el parque vehicular, mientras que los beneficios de nuevas tecnologías de control de emisiones en vehículos nuevos son graduales con la incursión de estas tecnologías en el parque vehicular. El tratamiento posterior a los gases de escape mediante convertidor catalítico consiste en reducir los gases dañinos provenientes de la cámara de combustión. Los convertidores catalíticos son la pieza central de este proceso.

Un convertidor catalítico es un dispositivo que consta de un "panal" (cerámico de preferencia) que disminuye casi a cero los elementos nocivos de los gases de escape de un vehículo; encierra un sustrato, con la mayor relación posible de superficie a volumen, e impregnado con una emulsión que incorpora el material catalítico. Este material generalmente consiste en metales preciosos como Platino (Pt), Paladio (Pd) y Rodio (Rh) en diferentes mezclas y proporciones. Todo esto en un envoltorio metálico (de preferencia de acero inoxidable).

Existen dos tipos de convertidores catalíticos:

De dos vías: cataliza la oxidación para convertir HC y CO a CO₂, pero no controla los NO_x

De tres vías: además de oxidar a los HC y CO, reduce los NO_x.

El convertidor catalítico ha sido considerado a la fecha como el dispositivo más eficiente para el tratamiento de los gases de combustión, para reducir las emisiones contaminantes de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno(NO_x), generados por los vehículos con motor a gasolina.

Hasta la fecha se siguen instalando convertidores catalíticos de tres vías con buenos resultados en la reducción de las emisiones y el de dos vías poco a poco ha sido sustituido por el anterior debido a que solamente oxida hidrocarburos y monóxido de carbono.

Cabe Mencionar que el uso de combustibles limpios y eficientes, acordes a las condiciones de trabajo, son de interés primordial para disminuir tanto las emisiones contaminantes como los efectos dañinos a la salud y al medio ambiente en el que vivimos. Por lo cual, es necesario elegir un combustible adecuado al lugar donde se utiliza el automóvil, basándose en su rendimiento y en las emisiones que éste produzca. Como ejemplo de lo anteriormente expuesto se analizará el caso del Distrito Federal y se adoptará como objetivo de este trabajo.

Capítulo I

Elementos fundamentales de los motores

I.1. Motores.

Los fabricantes tienen dos opciones cuando diseñan un motor. Pueden proyectar el motor para producir la potencia máxima sin tener en cuenta el gasto de combustible. Esto es lo que se hace cuando se fabrican motores de carreras, y al construir un motor con alto rendimiento. Otros motores se proyectan para obtener la máxima economía de combustible. A esto se le llama comúnmente kilómetros por litro de gasolina [8], pero no se considera que deberán operar a más de 2000 (m) sobre el nivel del mar. Donde la densidad del aire tiende a disminuir y en consecuencia no funcionan de manera adecuada por falta de oxígeno para la combustión.

La producción de un motor es un compromiso entre la potencia máxima y la economía máxima que el motor podría producir. Los reglamentos del gobierno sobre emisiones y economía de combustible modifican este compromiso. Dentro de los límites de producción, algunos motores se acercan al límite máximo de potencia. A fines de los años setenta los precios de la gasolina se habían más que duplicado y los reglamentos de economía de combustibles habían entrado en vigor. Los motores producidos durante ese tiempo se construyeron pensando en la economía. A principios de los años ochenta se emplearon controles por computadora en la mayor parte de los motores. Los motores de hoy en día deben producir la potencia adecuada con bajas emisiones y buena economía de combustible.

Los motores de combustión interna se distinguen por la formación de la mezcla y por el encendido, en el caso del ciclo Otto, se impulsan preferentemente con gasolina y la mezcla se forma generalmente fuera de la cámara de combustión. La combustión en el cilindro se desencadena por encendido exterior, una chispa proporcionada por una bujía.

I.2 El motor de gasolina de encendido por chispa, ciclo de Otto.

En 1876 Nikolaus A. Otto fabricó una máquina con un ciclo de cuatro tiempos que fue superior a cualquier otra máquina de combustión interna previamente construida [8]. Dicha máquina conocida como motor de combustión interna encendido por chispa, utiliza como energía la expansión de los gases producidos por la combustión de un carburante, la gasolina.

El ciclo de Otto se compone de cuatro procesos o carreras para establecer un ciclo, como se expresa a continuación:

I.2.1 Carrera de admisión. El ciclo de operación del motor de cuatro tiempos empieza con el pistón en el PMS (punto muerto superior) y la válvula de admisión abierta. La rotación del cigüeñal hace que el pistón descienda por el cilindro con movimiento lineal durante su primera carrera. Esto aumenta el volumen del cilindro que queda sobre el pistón, creando un vacío parcial que es llenado de inmediato con una mezcla de gasolina y aire impelida por la presión atmosférica. La mezcla continúa entrando al cilindro hasta que el pistón llega al PMI (punto muerto inferior). Aproximadamente en esta posición se cierra la válvula de admisión.

I.2.2. Carrera de compresión. El cigüeñal giró ya media revolución (180°) y la biela bajó al PMI durante la carrera de admisión. La segunda mitad de la revolución del cigüeñal en su segundo tiempo provoca un movimiento ascendente del pistón. El espacio que queda sobre el pistón ahora está sellado debido a que la válvula de escape sigue cerrada. Este movimiento ascendente del pistón hace que se comprima la mezcla de gasolina y aire, siendo el resultado un aumento en la presión y temperatura de la mezcla.

Al final del segundo tiempo, la mezcla es comprimida en la parte alta del cilindro (en la cámara de combustión), en un espacio aproximadamente ocho o nueve veces menor que

el espacio existente al principio de la carrera. La mezcla se vuelve sumamente combustible y sólo necesita una chispa para inflamarse. Esta chispa la proporciona una descarga de alto voltaje que salta a través del entrehierro (separación entre los electrodos) de la bujía, la cual está convenientemente situada en la cámara de combustión. Ahora el cigüeñal ha girado (360°).

1.2.3. Carrera de Potencia. Al principio del tercer tiempo del ciclo de operaciones, el pistón está otra vez en el PMS, habiendo girado el cigüeñal una revolución completa. En esta etapa de la operación, la mezcla de gasolina y aire se está quemando porque la chispa eléctrica desencadenó el proceso de combustión (encendido por chispa). Mientras tiene lugar esta rápida combustión del gas, se presenta un gran aumento de temperatura junto con un incremento de presión. Este incremento de presión es tan grande que ejerce sobre la parte superior del pistón una fuerza suficiente para empujarlo a todo lo largo del cilindro.

1.2.4. Carrera de escape Ahora con el pistón en el PMI y con todos los gases quemados, es importante eliminarlos del cilindro en la cuarta y última fase del ciclo de operaciones. Esto se logra abriendo la válvula de escape y expulsando los gases quemados con el pistón en ascenso. Esos gases circulan por un tubo y luego son conducidos al sistema de escape y de allí a la atmósfera.

Cuando el pistón llega aproximadamente al PMS, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión como preparativo para que el ciclo se repita

En conclusión, durante el ciclo de cuatro tiempos el cigüeñal gira dos revoluciones completas (720°) y entonces termina un ciclo. Aunque el pistón realiza cuatro carreras, en realidad sólo una de ellas efectúa trabajo, esto es, la carrera de trabajo. Las otras tres, aunque necesarias, son carreras inactivas[14].

Los motores pequeños para todo uso constan por lo general de un cilindro. A medida que se necesita más potencia, se usan más cilindros. La combustión se alterna entre los cilindros para producir una potencia uniforme. Los automóviles emplean motores de

movimiento alternativo con pistones que se mueven hacia arriba y hacia abajo en el cilindro. Los motores en línea tienen cuatro, cinco, o seis cilindros. Los motores en V tienen dos bancos de tres o cuatro cilindros cada uno, dentro del mismo monoblock y usan el mismo cigüeñal para formar un motor V-6 o V-8(8).

1.3 Carburador.

Los automóviles transportan consigo el carburante, generalmente en forma líquida. Como la mezcla sólo es posible en forma gaseosa y en presencia de oxígeno, el combustible tiene que prepararse en el carburador para la combustión. Para ello es imprescindible una fina pulverización, el calor y la depresión preparan la gasificación.

Un pulverizador sencillo hace posible únicamente una pulverización basta. Mediante un chorro de aire se produce una depresión en el extremo del tubo de aspiración, que hace ascender el combustible. En la boca del tubo el combustible es arrastrado por el chorro de aire y pulverizado en forma de pequeñas gotas. Para conseguir una pulverización fina hay que espumar previamente el combustible. Este combustible espumoso se produce mediante aportación de aire por debajo del nivel del combustible.

El calor necesario para la gasificación del combustible pulverizado (calor de vaporización) lo suministran el aire de aspiración y el motor. Cuando el combustible es ya un gas como el gas natural o el gas licuado de petróleo se facilita la mezcla para la combustión.

La depresión existente en el conducto de aspiración del carburador facilita igualmente la gasificación ya que los líquidos se gasifican con baja presión atmosférica más fácilmente que con altas presiones.

Además, el carburador tiene la misión, cualesquiera que sean las condiciones de funcionamiento del motor y dentro de todo el intervalo del número de revoluciones y de

carga, de proporcionar en todo momento la mezcla de relación más favorable entre combustible y aire, y suministrarla en cantidad suficiente.

La relación teórica de mezcla es aproximadamente 1 : 14.8, es decir que para la combustión total de 1 kg de combustible son necesarios unos 14.8 kg de aire, según la composición química del combustible(10) a condiciones de nivel del mar, pero si cambiamos a gasto volumétrico se requiere de volúmenes mucho mayores en el Distrito Federal.

La relación de mezcla práctica que tiene que hacer el carburador discrepa de la teórica, según la temperatura, número de revoluciones y carga del motor. En caso de una mayor proporción de combustible, por ejemplo 1 : 13, se habla de una mezcla "grasa" o "rica" y en caso de menor proporción de combustible, como 1 : 16, de mezcla "magra" o "pobre". Las relaciones de mezcla por debajo de 1 : 7 o por encima de 1 : 17 no son ya capaces de encenderse; son los límites de inflamabilidad. El combustible se gasifica mal cuando el motor está frío. Con bajo número de revoluciones el combustible se pulveriza mal. Por esta razón el carburador deberá dar una mezcla tanto más rica cuanto más frío esté el motor y más bajo sea el número de revoluciones(8).

En el arranque se exige una mezcla extremadamente rica (1 : 7) porque parte del combustible se condensa en el tubo de aspiración que está frío y lo mismo en las paredes del cilindro.

En el centro de la zona de carga parcial (marcha normal) lo que se desea es una mezcla pobre por constituir ello el ideal del consumo económico (exceso de aire).

La plena carga, la marcha en vacío y el funcionamiento en la zona inferior de la carga parcial exige una mezcla relativamente rica (escasez de aire).

Se entiende por plena carga las condiciones de funcionamiento del motor cuando la válvula de mariposa o de estrangulación está completamente abierta, momento en el cual

el número de revoluciones puede ser totalmente variado, por ejemplo plena carga en caso de velocidad máxima o plena carga en la subida de pendiente.

Se entiende por carga parcial las condiciones de funcionamiento del motor en servicio normal con diferentes números de revoluciones, siempre que la válvula de mariposa no esté completamente abierta.

1.4 El Múltiple de admisión.

El múltiple de admisión se usa como un punto de unión entre el carburador y el cilindro, en parte debido a su ubicación y en parte a su función. Muchos factores orientan el diseño para obtener flujo óptimo a través del múltiple de admisión. Son factores dignos de mencionar: el volumen y la velocidad del aire, las características del combustible y la turbulencia. El tamaño de un motor, es decir, el desplazamiento del motor, es uno de los factores más importantes para determinar el flujo de aire que se requiere para favorecer la combustión adecuada. Otro son las rpm del motor. El cilindro aceptará un volumen específico de aire cada vez que se abra la válvula de admisión y el pistón se mueva del punto muerto superior hasta el punto muerto inferior.

Cuanto mejores características tenga la mezcla aire-combustible que entra al cilindro para la compresión y combustión, más potencia puede producirse en cada revolución del motor. El cilindro siempre se llena, pero la composición de la mezcla en su interior cambia cuando el flujo de aire se mueve con más lentitud de lo que debe, por la turbulencia u otros problemas de diseño. Cuando el motor funciona más de prisa, el tiempo que el aire tiene para llenar el cilindro disminuye y en consecuencia cambia la homogeneidad de la mezcla.

A medida que la velocidad del motor aumenta, la velocidad del aire, a través del múltiple, tendrá que aumentar aún más. La turbulencia, el aire en remolino y los tubos a través del paso, aumentará y al cilindro entrará menos aire del que debería durante el tiempo en que la válvula de admisión esté abierta. La eficiencia volumétrica, la relación de aire que

realmente llena la cámara con el aire que debe llenarla, disminuye. Se puede suponer que entrará más aire al cilindro, cuando el pistón se mueva con más lentitud que cuando el pistón se mueva a 30 metros por segundo. Un múltiple de admisión estrecho trabaja bien en un motor carburado a baja velocidad, pero no a alta velocidad.

Un múltiple con una forma seccional más cuadrada lleva más volumen pero tendrá más superficie y más fricción del fluido. Una forma seccional del múltiple de admisión que sea circular, con la parte inferior plana, tiene menos turbulencia que la forma cuadrada. Esta forma también proporciona un área superficial grande en el fondo, para que el combustible líquido se evapore y vuelva a entrar al flujo si éste cae fuera de la corriente de aire.

El múltiple de admisión no cambia la proporción de oxígeno presente en el aire que se puede conducir al cilindro, que está en función de la altura sobre el nivel del mar. Por tal motivo se tiene que meter mayor cantidad de aire; por ejemplo, combustibles como el CH_4 requieren más aire que la gasolina o que otros combustibles. Los motores que no están diseñados para estas condiciones de los combustibles y la altura, presentan serios problemas de funcionamiento.

1.5. Múltiple de escape

La función del múltiple de escape es coleccionar los gases calientes cuando, a alta velocidad, salen del escape de la cabeza de cada cilindro. Los gases se dirigen luego al tubo de escape o al convertidor catalítico. Debido al proceso de combustión hay muchos más gases que están saliendo del motor que los que entran inicialmente. La combustión produce más gas a temperatura muy elevada.

El múltiple de escape ayuda a reducir la contrapresión, permitiendo que los gases salgan suavemente de la cabeza del cilindro y minimicen la turbulencia que se crea cuando el flujo continúa por el múltiple. También, cuando los gases salen juntos de cada puerto de cilindro, la turbulencia debe manejarse baja.

La temperatura elevada de los gases de escape limita los materiales que se usan para los múltiples. El hierro colado fue lo que más se usó. Puede resistir al calor en la mayoría de sus aplicaciones, no es caro y se le pueden dar formas complicadas, como se requiera.

En la actualidad algunos automóviles se fabrican con múltiples de escape soldados a tubería de acero inoxidable. Estos múltiples son mucho más ligeros, más resistentes a la oxidación y corrosión y pueden adoptar formas muy variadas[5].

Capítulo II

Combustibles.

Los combustibles poseen ciertas características que los hace diferentes uno de otro y que permiten determinar su utilización en los motores. Los combustibles son sustancias que reaccionan con diversos comburentes, de forma ampliamente exotérmica, liberando una gran cantidad de energía térmica. Como comburentes podemos mencionar al oxígeno y los halógenos que permiten la liberación de energía al combinarse con los combustibles. Algunas características más importantes de los combustibles son [1]:

II.1 Poder calorífico.

Es el calor extraído por la combustión completa de 1 kg de combustible o 1 m³ (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, Δh_c , y es la entalpia de reacción de un proceso de combustión. 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.
- ◆ 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.

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:

$$PCI = PCS - 2442 (m_{ag} / m_c)$$

donde m_{ag} / m_c es la masa de agua formada por unidad de combustible [21].

II.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 ser mayor a 0.5 veces la estequiométrica 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 tendrá un 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 representa un mayor poder calorífico por litro de combustible, pero se presenta el problema de dilución en el cárter [3].

II.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 $NC = 0$ [22].

II.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 índice de octano

(IO). 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 IO = 0. El isooctano 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 [15].

II.5 Clasificación de los combustibles.

La mayoría de 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.

II.6 Hidrocarburos

II.6.1 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 [4]:

- Metano (C H₄).
- Etano (C₂ H₆).
- Propano (C₃H₈).
- Butano (C₄ H₁₀).
- Pentano (C₅ H₁₂).
- Hexano (C₆ H₁₄).
- Heptano (C₇ H₁₆).
- Octano (C₈ H₁₈).

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, CH₄; metano o metano normal.

II.6.2 Olefinas (alquenos).

Su fórmula general es C_n H_{2n}. Poseen un enlace covalente doble entre dos 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 (C₂H₄).
- Propeno (C₃ H₆).
- Buteno (C₄ H₈).
- Penteno (C₅ H₁₀).
- Hexeno (C₆ H₁₂).

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, C₇H₁₄ ó 3, hepteno,

por ejemplo, que indica que en el tercer átomo de carbono, medido desde un extremo, se encuentra el enlace doble).

II.6.3 Diolefinas.

Poseen dos enlaces covalentes dobles de los átomos de carbono en cualquier lugar de la molécula. Su fórmula general es $C_n H_{2n-2}$. 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 ó 3, 5, $C_7 H_{12}$, por ejemplo).

II.6.4 Naftenos (cicloparafinas).

Estos poseen enlace covalente sencillo con los átomos de carbono, pero en forma de anillo. Su fórmula general es $C_n H_{2n}$. También el número 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 la raíz ciclo a los compuestos. Los más comunes de éstos son:

- Ciclopropano ($C_3 H_6$).
- Ciclobutano ($C_4 H_8$).
- Ciclopentano ($C_5 H_{10}$).
- Ciclohexano ($C_6 H_{12}$).
- Ciclooctano ($C_8 H_{16}$).

II.6.5 Aromáticos.

Estos tienen un anillo bencénico al que van unidos de hidrógeno o radicales formados por átomos de hidrógeno y carbono (radicales alquilo). 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 alquilo 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 qué átomo de carbono se une el o los radicales.

II.6.6 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.

II.6.7 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) [11].

II.7 Petróleo.

En 1808, en Bakú, capital de la actual República Soviética de Azerbaiyán, a orillas del mar Caspio, una comisión científica de la Academia Imperial de Ciencias de San Petersburgo informó que "el petróleo es un mineral carente de utilidad". Casi dos siglos después, en 1997 se producen 1243 millones de barriles por día. La producción de productos derivados del petróleo en 1997 se distribuyó de la siguiente manera: gasolinas (388.3 mbd (miles de barriles diarios)), combustóleo (426.6 mbd), gas seco (49.6 mbd), turbosina (56 mbd), diesel (275.1 mbd) y otros (41.9 mbd) [20].

A pesar de que ya era conocido y utilizado hace 6000 años por distintas culturas - como arma de guerra incendiaria, sustancia impermeabilizante y remedio contra un sinfín de enfermedades - su historia moderna arranca en una fecha muy concreta, el 27 de agosto de 1859, cuando un revisor del ferrocarril llamado Edwin Laurentine Drake perforó el primer pozo, de 21 metros de profundidad, en Titusville, Pennsylvania. La intención de Drake era extraer queroseno del petróleo y comercializarlo como combustible para lámparas. De repente, miles de personas imitaron al inspector, y empezaron a pinchar cada centímetro cuadrado del suelo norteamericano. Había estallado la fiebre del oro negro [5].

La reserva fósil, al no poder regenerarse, acabará agotándose. Estos combustibles no son otra cosa que restos de bacterias, plantas y animales que vivieron en el pasado y que sufrieron una serie de transformaciones biológicas y geológicas, hasta convertirse en una piedra dura de carbón, en un líquido oleoso o en un gas volátil. Así, parte de la exuberante vegetación de los bosques tropicales y pantanosos de los periodos carbonífero - hace 345 millones de años - y cretácico - 145 millones de años - se ha transformado en carbón: hulla, lignito y antracita. Y los cadáveres de billones y billones de seres unicelulares, el plancton marino, que nadaban en los mares y lagos salados entre el cámbrico y el triásico - de 600 a 60 millones de años -, se fueron depositando en el fondo

marino, para hundirse en el interior de la Tierra y transformarse en cementerios de petróleo y gas. De esta manera, aprisionados en el subsuelo, han perdurado y madurado.

Los combustibles fósiles, una vez quemados, liberan la energía que conservaron durante millones de años los cadáveres de los seres vivos que los componen. Por poner un ejemplo, si consiguiéramos reproducir las condiciones para la formación del petróleo utilizando como materia prima el producto de la pesca del Mar del Norte acumulada durante mil años obtendríamos unos ¡100 millones de toneladas de petróleo! Realmente poco, comparado con lo que gastamos.

Para el carbón, los geólogos estiman que existen bajo nuestros pies alrededor de 500,000 millones de toneladas seguras. Al ritmo actual de explotación, los últimos yacimientos se agotarán dentro de 250 años. Sin embargo, las reservas de petróleo, estimadas en unos 120,000 millones de toneladas, de mantenerse su consumo al mismo ritmo, se extinguirán en apenas 45 años (10 de septiembre de 1995, La Prensa).

II.8 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 el 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 25 % en volumen de aromáticos, 10 % en volumen de olefinas, 1 % de benceno, 0.05 % en peso de azufre y el resto está compuesto de hidrocarburos parafínicos, nafténicos, antidetonantes e inhibidores, resultando un índice de octano de 87 [7].. Para la gasolina Pemex-Premium se tiene un índice de octano de 92 , 25 % en volumen de aromáticos, 10 % en volumen de olefinas, 1 % en volumen de benceno y 0.05 % en peso de azufre (datos obtenidos de PEMEX). 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 [7].

II.9 Combustibles gaseosos.

Son mezclas de hidrocarburos ligeros, en éstos la mezcla con el comburente es simple formando flamas premezcladas. Algunos combustibles gaseosos son:

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

Para gases licuados se tiene:

- Gas propano-butano (gas LP).

II.9.1 Gas licuado del petróleo (GLP).

Los gases licuados del petróleo (GLP) se obtienen en las operaciones de refinado del petróleo. El propano, debido a su mayor presión, se emplea principalmente en la industria y el butano para usos domésticos. Normalmente se usan mezclas propano-butano. Se venden en tanques portátiles o camiones-cisterna en forma líquida.

El GLP es una sustancia que es gaseosa a temperatura y presión ambiente. Sus principales constituyentes son el propano y el butano. A la presión normal atmosférica el propano hierve a $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el butano a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

A temperatura por encima del punto de ebullición, estos líquidos se evaporan espontáneamente, tomando calor de los alrededores. Durante la evaporación, el GLP aumenta aproximadamente 250 veces de volumen, lo que le hace favorable para almacenarlo en forma líquida. Puesto que la temperatura ambiente está siempre por encima de la del líquido, el punto de ebullición del líquido aumenta al aumentar la presión

ejercida sobre él. De esta forma el GLP permanece líquido cuando está bajo presión a temperaturas normales. Esta presión en el líquido se alcanza al tener una fase gaseosa por encima de él.

La cantidad recomendada de mezcla en verano es de 50 % de propano y 50% de butano. Los problemas de evaporación en invierno se evitan usando una mayor proporción de propano. La mezcla de invierno deberá consistir en el 70 % de propano y el 30 % de butano [15].

Un litro de GLP líquido pesa aproximadamente 520 (g) a una presión de una atmósfera y a 15 (°C), mientras que un litro de gasolina pesa aproximadamente 737.6 (g) a la misma presión y temperatura [16].

El poder calorífico del propano es de 95.06 kJ/m³ y para el butano es de 130.39 kJ/m³. Los combustibles gaseosos suelen ser mezclas, y los poderes caloríficos están relacionados directamente con los correspondientes a cada componente y con su proporción en la mezcla [16].

II.9.2 Gas natural.

El gas natural es una mezcla gaseosa en condiciones normales de presión y temperatura. No tiene olor ni color, se le encuentra en yacimientos solo, y por lo general se encuentra en forma natural mezclado con otros hidrocarburos fósiles. Al momento de su extracción, el gas natural contiene impurezas como agua, ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y nitrógeno que tienen que ser eliminadas antes de su transporte y comercialización.

Típicamente el gas natural comercial está compuesto en un 95% o más de metano y el 5% restante de una mezcla de etano, propano y otros componentes más pesados. Como medida de seguridad, en la regulación se estipula que los distribuidores deberán adicionar

un odorizante al gas natural para que se pueda percibir su presencia en caso de posibles fugas durante su manejo y distribución al consumidor final [24].

El gas natural se encuentra generalmente en depósitos subterráneos profundos formados por roca porosa o en los domos de los depósitos naturales de petróleo crudo.

Dependiendo de su origen, el gas natural se clasifica en dos tipos:

- ◆ Gas asociado: Es el gas que se extrae junto con el petróleo crudo y contiene grandes cantidades de hidrocarburos que son susceptibles de licuarse, como etano, propano, butano y naftas.
- ◆ Gas no asociado: Es el que se encuentra en depósitos que contienen únicamente este combustible.

El gas natural se envía a Complejos Procesadores de Gas para producir gas natural de calidad y líquidos del gas [24].

El gas natural se transporta y distribuye hasta los usuarios finales por medio de ductos de acero de diámetros variables.

Las estaciones de compresión proveen la energía necesaria para hacer llegar el gas natural a través del territorio nacional.

Para que un consumidor tenga acceso al gas natural es necesario que interconecte sus instalaciones al sistema de transporte existente, o a una red de distribución cercana.

El gas natural presenta ciertas ventajas ambientales ya que tiene combustión muy limpia: no emite cenizas ni partículas sólidas a la atmósfera; genera una reducida emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e hidrocarburos reactivos, y virtualmente no genera dióxido de azufre (SO_2), características

que le dan una mayor ventaja respecto de otros combustibles fósiles como el carbón y el combustóleo. Otras características que presenta son: Es seguro de transportar, es más ligero que el aire, no es absorbente y no es corrosivo [24].

En motores a diesel, al utilizar gas natural, se elimina el característico humo negro y disminuyen notablemente las emisiones contaminantes.

Presenta además ventajas económicas ya que tiene un precio muy competitivo comparado con el de otros combustibles. Reduce costos de mantenimiento de equipos de combustión. Incrementa la eficiencia de los procesos de generación y cogeneración de energía. Es abundante.

Los usos a los que actualmente se destina el gas natural abarcan una amplia gama de actividades:

Dentro de la oferta interna bruta de energía primaria en 1998, los hidrocarburos participaron con 82%, proporción que los convierte en pilares del sector energético del país: el gas natural, que observó un crecimiento del 5.0% respecto a 1996, tuvo una participación del 30% en la oferta total [20].

En 1998 la oferta de gas natural alcanzó 3,674 mmpcd (miles de millones de pies cúbicos diarios), de los cuales 145 mmpcd correspondieron a importaciones. El destino del gas fue para satisfacer la demanda interna, que totalizó 3,577 mmpcd (incluye el autoconsumo de Pemex Gas), y para exportaciones 32 mmpcd [24].

El poder calorífico del gas natural depende de su composición química; entre mayor sea la cantidad de hidrocarburos más pesados que el metano que contenga, mayor será su poder calorífico. Básicamente el gas natural está compuesto por metano y etano pero presenta menor poder calorífico que sus componentes por separado y menor también que la

mayoría de los combustibles, esto depende de la proporción que se tenga para formar el gas natural.

Existen diferentes unidades de energía para medir el gas natural, dependiendo del sistema de unidades que se esté utilizando.

En los países que emplean el Sistema Inglés de Unidades, se utiliza la Unidad Térmica Británica o Btu, que representa la cantidad de energía que se requiere para elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales. En México se ha establecido utilizar como unidades de energía el Joule.

Dado que el gas natural se compra y se paga por unidad de energía entregada, es importante determinar con la mayor exactitud posible esta cantidad. El flujo de gas natural es una medida dinámica, mientras que el poder calorífico es una medida estática. Para poder determinar la cantidad total de energía entregada y vendida, es necesario combinar las dos medidas anteriores. De esta manera, el usuario de gas tendrá la certeza que está pagando por la energía que consume y no por el volumen de gas que atraviesa su medidor.

La determinación de la cantidad de energía entregada requiere las lecturas de un medidor volumétrico (generalmente una placa de orificio como elemento primario, conectada a un graficador o un dispositivo electrónico), y de un medidor del poder calorífico del gas (calorímetro), que se combinan en una sola medida: la cantidad de energía efectivamente consumida.

México es uno de los países con mayores reservas probadas de gas natural (a la fecha 10 de septiembre de 1995, La Prensa) en comparación con sus países vecinos Estados Unidos y Canadá, las cuales se calculan en 70 trillones de pies cúbicos (13 de septiembre de 1995, El Economista), que calculados prudentemente por técnicos ingleses, al ritmo de

producción actual son suficientes para satisfacer la demanda de gas natural del país y de los firmantes originales del TLC durante los próximos 80 años.

En un informe realizado por el presidente de la Cámara Nacional del Acero, ingeniero Manuel G. Gutiérrez (10 de septiembre de 1995) con base en "fuentes oficiales", México tiene reservas petroleras probadas para más de 45 años y de gas natural (renglón en el que ocupa el octavo lugar mundial) para 77 años. En gas natural Canadá tiene reservas probadas para 17 años y Estados Unidos para sólo 9 años.

Se puede mencionar que en el caso de otros países el pronóstico sobre la duración de reservas, tanto de petróleo como de gas natural, no es el mismo, es menor para EU, y esto influye en el destino de nuestras reservas debido a que se mantiene un intercambio comercial de dichos productos y dichos países dependerían también de nuestras reservas.

El gas natural es el combustible que requiere mayor cantidad de aire para realizar combustión completa en comparación con todos los hidrocarburos por estar compuesto de metano y etano que al tener la cadena más corta requieren más oxígeno para su oxidación y los demás combustibles requieren menos oxígeno para su combustión.

En este momento no se cuenta con la suficiente infraestructura de estaciones de servicio en este país como para competir con la gasolina, hablando del autotransporte. Para considerar al gas natural como una alternativa debemos considerar su costo de operación, que debe ser menor al de la gasolina para recuperar el costo de inversión en equipo a gas natural y de estaciones de servicio.

II.10 Alcoholes.

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

- Alcohol metílico, ($C H_3$)OH, conocido como metanol.
- Alcohol etílico, ($C_2 H_5$)OH, conocido como etanol en ausencia de agua.
- Alcohol n-butílico, n - ($C_4 H_9$)OH, butanol.

Los alcoholes se consideran combustibles oxigenados y por tal situación necesitan menos aire para hacer combustión. Pueden producirse a partir de fuentes renovables, algo que los derivados del petróleo y el gas natural no tienen como ventaja. Siendo combustibles líquidos con alta volatilidad pueden ser manejados como combustibles en autotransporte. Tienen mayor octanaje que la gasolina y resultan menos inflamable. Notablemente generan menos emisiones de monóxido de carbono y además tienen baja toxicidad, siendo el metanol el de mayor toxicidad [16].

Capítulo III

Impacto ambiental y efectos en la salud debido a emisiones contaminantes

III.1 Contaminación por combustión.

Los combustibles fósiles son - junto con la energía nuclear - los que peor fama tienen. No sólo porque han demostrado ser capaces de provocar graves crisis económicas, odios y guerras, sino también porque degradan el medio ambiente. Efecto invernadero, lluvia ácida, smog y contaminación de las aguas son algunos de sus efectos perjudiciales. A escala global, el primero aparece como el más grave. Al tomar como base el incremento en las emisiones de CO₂ de 1990 (con 289.7 millones de toneladas) a 1996 (con 332.6 millones de toneladas) y al seguir dicha tendencia, los expertos estiman que para el año 2010, las emisiones de dióxido de carbono liberado en los procesos de combustión alcanzarán una cifra considerable. Una cifra que se verá reflejada en el calentamiento de la atmósfera [25].

El futuro de la biósfera, la delgada capa de vida de nuestro planeta, depende de la selección y el empleo racional de las energías que hoy elijamos. Hace veinte años, se presentó la noticia de que el petróleo se estaba agotando. Se analizaron diferentes opciones y se llegó a una lista de energías alternativas, y que resultaban ser más saludables que las existentes hasta entonces: solar, eólica, hidráulica, biomasa, etc. Son las conocidas bajo el nombre de energías renovables. Para los ecologistas, éstas presentan a corto y mediano plazo la solución más limpia al problema energético mundial. Por el contrario, los productores de energía opinan que el sol, el viento y el agua sólo podrán ser una solución a largo plazo, cuando las energías fósiles y el uranio empiecen a desaparecer.

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más importantes y es resultado de las actividades del hombre. Las causas que originan esta contaminación son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, transporte, comerciales, domésticas y agropecuarias. La combustión empleada para obtener calor, generar energía eléctrica o movimiento, es el proceso de emisión de contaminantes más significativo. Existen otras actividades, tales como la fundición y la producción de sustancias químicas, que pueden provocar el deterioro de la calidad del aire si se realizan sin control.

El aire puro es una mezcla gaseosa compuesta por, aproximadamente, 79 % de nitrógeno, un 21 % de oxígeno y el resto de diferentes compuestos tales como el argón, el dióxido de carbono y el ozono. Entendemos pues por contaminación atmosférica cualquier cambio en el equilibrio de estos componentes, lo cual altera las propiedades físicas y químicas del aire.

III.2 Clasificación de los contaminantes del aire.

Los principales contaminantes del aire se clasifican en:

Primarios [25]:

Son los que permanecen en la atmósfera tal y como fueron emitidos por la fuente. Para fines de evaluación de la calidad del aire se consideran: óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.

Secundarios[25]:

Son los que han estado sujetos a cambios químicos, o bien, son el producto de la reacción de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera. Entre ellos destacan los oxidantes fotoquímicos y algunos radicales de corta existencia como el ozono.

A nivel nacional, la contaminación atmosférica se limita a las zonas de alta densidad demográfica o industrial. Las emisiones anuales de contaminantes en el país son superiores a 16 millones de toneladas, de las cuales el 65 % es de origen vehicular [23].

En la Ciudad de México se genera 23.6 % de dichas emisiones, en Guadalajara el 3.5 %. Los otros centros industriales del país generan el 70% restante. Consideradas para la Ciudad de México un total de 2 millones 491 mil 097 ton/año de HC y NOx por fuentes móviles en 1998 [23].

Partes Por Millón (PPM o a de 10^6): Para determinar la concentración muy pequeña de una sustancia química en un volumen se utilizan las partes por millón. Se divide el volumen en un millón de partes iguales. Cada millonésima parte de este volumen, correspondiente a la sustancia de nuestro interés, se considera una parte por millón de la sustancia. Para determinar la concentración de una sustancia química en un volumen se utilizan términos semejantes, como b de 10^9 ó c de 10^{12} . Se divide el volumen en un 10^9 ó 10^{12} partes iguales. Cada parte de este volumen, correspondiente a la sustancia de nuestro interés, se considera una parte por 10^9 ó 10^{12} de la sustancia. Estos términos se utilizan para determinar concentraciones muy pequeñas de gases en la atmósfera.

III.3 Características de los Contaminantes.

III.3.1 Partículas suspendidas en su fracción respirable (PM - 10) [25].

Criterios para evaluar la calidad del aire $150 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (microgramos sobre metro cúbico) en un promedio de 24 horas.

Partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera (su diámetro va de 0.3 a $10 \mu\text{m}$) como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen. La fracción respirable de partículas suspendidas totales (PST), conocida como PM -10 , está constituida por

aquellas partículas de diámetro inferior a 10 micras, que tienen la particularidad de penetrar en el aparato respiratorio hasta los alvéolos pulmonares.

Fuentes principales: Combustión industrial y doméstica del carbón, combustóleo y diesel; procesos industriales; incendios, erosión eólica y erupciones volcánicas.

Efectos principales:

- Salud.- Irritación en las vías respiratorias; su acumulación en los pulmones origina enfermedades como la silicosis y la asbestosis. Agravan el asma y las enfermedades cardiovasculares.
- Materiales.- Deterioro en materiales de construcción y otras superficies.
- Vegetación.- Interfieren en la fotosíntesis.
- Otros.- Disminuyen la visibilidad y provocan la formación de nubes.

III.3.2 Monóxido de Carbono [25].

Criterios para evaluar la calidad del aire: un promedio de 11PPM en 8 horas.

Gas incoloro e inodoro que se combina con la hemoglobina para formar la carboxihemoglobina y puede llegar a concentraciones letales.

Fuentes principales: combustión incompleta de hidrocarburos y sustancias que contienen carbono, tales como la gasolina, el diesel, etc. Otra importante fuente de formación del monóxido de carbono son los incendios.

Efectos principales:

- Salud.- La carboxihemoglobina afecta al sistema nervioso central provocando cambios funcionales cardíacos y pulmonares, dolor de cabeza, fatiga, somnolencia, fallos respiratorios y hasta la muerte.

III.3.3 Ozono [25].

Criterios para evaluar la calidad del aire: un promedio horario máximo de $216 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (0.11 PPM).

Compuesto gaseoso incoloro producido en presencia de luz solar. Oxida materiales no inmediatamente oxidables por el oxígeno gaseoso.

Fuentes principales: Reacciones atmosféricas de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno bajo la influencia de la luz solar.

Efectos principales:

- Salud.- Irritación de los ojos y envejecimiento prematuro de los tejidos del tracto respiratorio. Agravan las enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
- Materiales.- Deterioran el hule, los textiles y la pintura.
- Vegetación.- Provocan lesiones en las hojas y limitan su crecimiento.
- Otros.- Disminución de la visibilidad.

III.3.4 NO_x (NO , NO_2 , etc.) [25].

Criterios para evaluar la calidad del aire: un promedio horario máximo de $395 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (0.21 PPM).

Gas café rojizo de olor picante que contribuye a la lluvia ácida.

Fuentes principales: combustión completa a alta temperatura en industrias y vehículos.
Tormentas eléctricas.

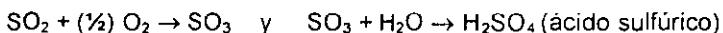
Efectos principales:

- **Salud.-** Irrita los pulmones; agrava las enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
- **Materiales.-** Desteñimiento de pinturas.
- **Vegetación.-** Caída prematura de las hojas e inhibición del crecimiento.
- **Otros.-** Disminución de la visibilidad.

III.3.5 Dióxido de azufre [25].

Criterios para evaluar la calidad del aire: un promedio móvil de 0.13 PPM en 24 horas.

Gas incoloro con olor picante que al oxidarse y combinarse con oxígeno y después con agua forma ácido sulfúrico, principal componente de la lluvia ácida.



Fuentes principales: combustión de carbón, diesel, combustóleo y gasolina con azufre
Fundición de betas metálicas ricas en azufre, procesos industriales y erupciones volcánicas.

Efectos principales:

- **Salud.-** Irrita los ojos y el tracto respiratorio. Reduce las funciones pulmonares y agrava las enfermedades respiratorias como el asma, la bronquitis crónica y el enfisema.
- **Materiales.-** Corroe los metales; deteriora los contactos eléctricos, el papel, los textiles, las pinturas, los materiales de construcción y los monumentos históricos
- **Vegetación.-** Provoca lesiones en las hojas y reducción en la fotosíntesis.

III.3.6 Hidrocarburos [25]:

Sólo en una estación de la red automática de monitoreo ambiental (RAMA) del Valle de México se miden hidrocarburos tales como benceno, tolueno y formaldehído, para los que aún no existe una norma de calidad del aire.

Compuestos orgánicos que contienen carbono e hidrógeno en estado gaseoso. Se pueden combinar en presencia de la luz solar con óxidos de nitrógeno y participan en la formación de smog fotoquímico.

Fuentes principales: combustión incompleta de combustibles y otras sustancias que contienen carbono. Procesamiento, distribución (entre otros, fugas domésticas) y uso de compuestos derivados del petróleo, tales como la gasolina y los solventes orgánicos. Incendios, reacciones químicas en la atmósfera, y descomposición bacteriana de la materia orgánica en ausencia del oxígeno.

Efectos principales:

- Salud.- Trastornos en el sistema respiratorio; algunos hidrocarburos provocan el cáncer.

III.3.7 Plomo [25].

Criterios para evaluar la calidad del aire: una norma de $1.5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ durante 3 meses.

Metal pesado no ferroso que se presenta en forma de vapor, aerosol o polvo.

Fuentes principales: combustión de gasolina con plomo, minería, fundición y procesos industriales.

Efectos principales:

- Salud.- Se acumula en los órganos del cuerpo, causa anemia, lesiones en los riñones y el sistema nervioso central (saturnismo).

III.4 Índice UV [25]:

La atmósfera terrestre está constituida por materia gaseosa que rodea al planeta y cuya parte exterior es de contornos indefinidos, se le considera formada por capas concéntricas: la más cercana a la superficie es la Tropósfera, las que le siguen son la Estratósfera, Ionósfera y la Exósfera.

La Estratósfera abarca de 11 a 17 km de espesor y se ubica a partir de una altura de 80 km sobre la superficie de la tierra; la temperatura entre la Tropósfera y la Estratósfera es constante, y en ella prácticamente no hay nubes ni movimientos de aire apreciables por lo que es ideal para los vuelos de aviones. Asimismo, entre los 20 y 50 km de altura hay una capa que es rica en Ozono, la cual nos protege de las radiaciones solares y sirve como filtro a los rayos UV.

Por su parte, la Tropósfera abarca desde la superficie terrestre hasta una altura de 17 km en la zona ecuatorial, y 11 km en las zonas polares. En esta capa se efectúan los fenómenos meteorológicos: vientos, corrientes verticales de aire, condensación del vapor de agua en sus varias formas, precipitación, etc. En la Tropósfera también se puede generar Ozono a partir de los contaminantes atmosféricos y la energía del Sol sobre todo en las grandes ciudades, es importante mencionar que este Ozono no es permanente como el que se encuentra en la Estratósfera.

El Sol emite energía radiante que se propaga en forma de ondas electromagnéticas con diferentes longitudes de onda, dentro de este espectro pueden diferenciarse ciertas clases de energía radiante como son : los Rayos Cósmicos, Gama, X y Ultravioleta, los cuales

por su alta energía alteran millones de compuestos orgánicos que forman las células vivas, interfiriendo con los procesos biológicos del cuerpo humano y produciendo muchos tipos de enfermedades, incluyendo diversos cánceres.

Los rayos UV emitidos por el Sol, abarcan un rango de longitudes de onda dentro del cual se consideran los rayos UV-A, UV-B, UV-C, los que por sus efectos, es de mucha importancia saber más acerca de ellos.

Los rayos UV-C son prácticamente bloqueados totalmente por la capa de Ozono que se encuentra en la Estratósfera, en cambio los rayos UV-A, y UV-B no pueden ser bloqueados totalmente por ésta y son los responsables de los fenómenos fotoquímicos en la atmósfera y de las quemaduras en la piel producidas al exponerse al Sol repetidamente.

La radiación UV-B es biológicamente nociva y daña las moléculas del ADN, puede causar defectos genéticos en las superficies externas de plantas y animales. de esta manera, los rayos UV-B pueden dañar la piel humana causando desde un ligero enrojecimiento (eritemas) hasta quemaduras; incluso con el tiempo, pueden producir molestias graves, lunares, manchas y hasta cáncer en la piel.

La cantidad de radiación UV que nos llega a la tierra, depende de la hora y del ángulo que los rayos del Sol forman con la superficie receptora. Cuando el Sol está cerca del horizonte, su radiación viaja a través de un largo camino a través de la atmósfera. de esta manera, menos rayos UV llegan a la superficie de la tierra. Asimismo, cuando el Sol está en la parte más alta, sus rayos tienen menos camino que atravesar, y caen con mayor intensidad a la superficie de la tierra.

El índice UV, a diferencia del índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), no es una alarma ambiental, es una medida de orientación y protección dirigida a promover la saludable exposición al Sol, ya que las radiaciones solares son necesarias para diversos

procesos biológicos del organismo. El índice UV que registra la RAMA, es una forma de medir la intensidad de la radiación solar UV-B que llega a la superficie de la tierra.

Los rayos UV-B se miden y se registran para prevenir los efectos que se producen en la piel humana. Los periodos de exposición al Sol de la piel para que no sufra daños por quemaduras, están calculados con base en el conocimiento de las dosis de radiación UV-B que los diferentes tipos de piel soportan antes de sufrir un enrojecimiento mínimo (eritema). El propósito de esta medición es, además de prevenir los daños en la población, informarle de medidas protectoras.

El índice UV se clasifica de la siguiente forma:

Extremo	de 10 a 15
Alto	de 8 a 9
Medio	de 5 a 7
Bajo	de 0 a 4

El índice UV se registra en la escala del 0 al 15 y depende de las condiciones atmosféricas y dependiendo del tipo de piel, será el tiempo de exposición continua al Sol recomendable, antes de la aparición del eritema.

Existen seis tipos de piel que toleran dosis diferentes de UV

Tipo de piel	Dosis (MED)
1. Piel muy clara (extrasensitiva) Siempre se quema no resiste bronceado.	0.80
2. Piel clara (sensitiva) Siempre se quema con facilidad, raramente se logra un mínimo bronceado.	1.00
3. Piel morena clara (normal) Se quema con moderación, un bronceado gradual.	1.25

- | | |
|--|------|
| 4. Piel morena oscura (normal) Siempre se quema mínimamente, siempre se broncea. | 1.56 |
| 5. Piel oscura (insensitiva) Raramente se quema, bronceado profundo. | 1.95 |
| 6. Piel muy oscura (insensitiva) No se quema, piel con profunda pigmentación. | 2.44 |

III.5 IMECA [25]:

Para que la población pueda saber si los niveles de contaminación del aire son satisfactorios o no, se estableció una unidad de medida llamada IMECA que significa: Índice Metropolitano de Calidad del Aire.

IMECA	Calidad del aire	Efectos en la salud
0 - 100	Buena o satisfactoria	Ninguno
101 - 200	Regular	Las personas sensibles pueden sentir molestias en ojos, nariz y garganta
201 - 300	Mala	La población en general puede presentar irritación de ojos, nariz y garganta. así como dolor de cabeza.
301 - 500	Muy mala	Se agudizan los síntomas anteriores, especialmente en niños, ancianos quienes fuman o padecen enfermedades crónicas.

Capítulo IV

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

IV.1 Par de torsión [15].

El par de torsión aplicado a la flecha del motor es medido desde el freno hidráulico con la siguiente fórmula:

$$T = F \times d$$

Donde: T es el par de torsión (Nm)

F es la fuerza aplicada al motor en el freno hidráulico (N)

d es la distancia de la flecha del motor al dinamómetro del freno hidráulico (m)

IV.2 Potencia al freno [15]: $P_f = T \times \omega$

Donde: P_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.

IV.3 Presión Media Efectiva al freno (P_{mef}) [26].

$$P_{mef} = P_f \times Z / A \times L \times N \times n$$

Donde: P_{mef} es la presión media efectiva al freno (N / m^2)

P_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 (m^2)

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

IV.3.1 Presión media efectiva indicada [26]:

$$P_{mei} = P_i \times Z / A \times L \times N \times n$$

Donde: P_i es la potencia indicada (W)

IV.4 Eficiencia mecánica [26]:

$$\eta_{mec} = P_f / P_i$$

Donde: η_{mec} es la eficiencia mecánica (%)

P_f es la potencia al freno (W)

P_i es la potencia indicada (W)

IV.5 Gasto de combustible [15]:

a) Líquido $G_c = \rho_{comb} V / t$

Donde: G_c es el gasto de combustible (kg / s)

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

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

t es el tiempo (s)

b) Gas

$$G_c = \underline{V} \times \rho_{comb}$$

Donde: \underline{V} es el gasto volumétrico medido en un rotámetro
 ρ_{comb} es la densidad del combustible (kg / m^3)

IV.5.1 Gasto específico de combustible [26]:

$$G_{e\ Comb} = G_c / P_f$$

Donde: $G_{e\ Comb}$ es el gasto específico de combustible ($kg / s\ W$)
 G_c es el gasto de combustible (kg / s)
 P_f es la potencia al freno (W)

IV.6 Eficiencia del Motor [26]:

$$\eta_{motor} = P_f / (G_c \times PC)$$

Donde:

η_{motor} es la eficiencia del motor (%)
 P_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)

IV.7 Potencia indicada [26]:

$$P_i = P_{fricc} + P_f$$

Donde:

P_i es la potencia indicada (W)
 P_{fricc} es la potencia de fricción (W)
 P_f es la potencia al freno (W)

La potencia de fricción se obtiene de relacionar por medio de una regresión lineal a la potencia al freno como abscisa y el gasto de combustible como ordenada y obtener una ecuación de la forma $y = m x + b$ (línea Willans), una vez que se ha determinado los valores de m y b se encuentra el punto de intersección de la recta con las abscisas cuando la ordenada es cero, este punto de intersección representa la potencia de fricción.

IV.8 Eficiencia Volumétrica [26]:

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

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

Donde η_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:

$$m_{VD} = (P_a \times V_{VD}) / (R_{aire} \times T_{aire})$$

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_{aire} es la temperatura del mismo a la entrada

IV.9 Eficiencia Térmica [26].

Es el cociente de la producción neta de trabajo entre la alimentación o entrada de calor. Teóricamente se representa de la siguiente manera:

$$\eta_T = P_1 / (G_c \times PC)$$

Donde: η_T es la eficiencia térmica (%)

P_i es la potencia indicada (W)

PC es el poder calorífico (J/kg)

G_c es el gasto de combustible (kg/s)

IV.10 Eficiencia total [15]:

$$\eta_{Tot} = \eta_{mec} \times \eta_T$$

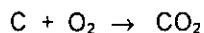
Donde: η_{Tot} es la eficiencia total (%)

η_T es la eficiencia térmica (%)

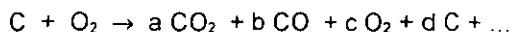
η_{mec} es la eficiencia mecánica (%)

IV.11 Combustión [10].

La combustión es una reacción química que puede ser una oxidación o una halogenación, en la cual se aprovecha 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 (el oxígeno presente en este). Un ejemplo de combustión es el siguiente.



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 frecuentemente es incompleta y se obtienen otros productos de la combustión, realmente se tendría una reacción de este tipo:



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 aire como tal.

Tabla. Constituyentes del aire.

Gas	PPM por volumen	Masa Molecular	Fracción molar	Relación molar
O ₂	209,500	31.998	0.2095	1
N ₂	780,900	28.012	0.7905	3.773
Ar	9,300	38.948		
CO ₂	300	43.99		
Aire	1,000,000	28.962	1.0000	4.773

Tabla IV.1 Internal Combustion Engine Fundamentals, John B Heywood

Esta tabla nos muestra algunos de los componentes más notorios del aire; sin embargo, estos no son los únicos, ya que existen otros compuestos presentes 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, por su poca o nula reactividad en la combustión no se toman en cuenta para fines prácticos y de cálculos 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.

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 aire como tal.

Tabla. Constituyentes del aire.

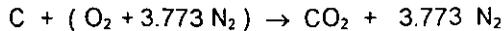
Gas	PPM por volumen	Masa Molecular	Fracción molar	Relación molar
O ₂	209,500	31.998	0.2095	1
N ₂	780,900	28.012	0.7905	3.773
Ar	9,300	38.948		
CO ₂	300	43.99		
Aire	1,000,000	28.962	1.0000	4.773

Tabla IV 1 Internal Combustion Engine Fundamentals, John B Heywood

Esta tabla nos muestra algunos de los componentes más notorios del aire; sin embargo, estos no son los únicos, ya que existen otros compuestos presentes 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, por su poca o nula reactividad en la combustión no se toman en cuenta para fines prácticos y de cálculos 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:



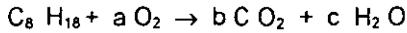
Para lograr una buena combustión se necesitan los siguientes factores:

- 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.

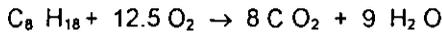
IV.11.1 Combustión Estequiométrica [10].

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_2); y el hidrógeno en vapor de agua (H_2O). Como ejemplo se muestra la combustión completa para el octano ($\text{C}_8 \text{H}_{18}$):



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.



Como el aire contiene nitrógeno, pero a bajas temperaturas, no es afectado por la reacción, la ecuación de combustión completa para un combustible es la siguiente:



Esta última ecuación define la estequiometría para proporciones químicamente correctas (o teóricas). Por arriba o por abajo 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 llevar a cabo la reacción planteada, y para los gases nos representan los volúmenes necesarios que se deben usar.

IV.11.2 Relación aire/combustible [10].

Un parámetro importante de diseño en los motores es la relación aire/combustible de la mezcla fresca en la cámara de combustión. Este parámetro se describe por un término adimensional λ (lambda) el cual tiene el valor de 1.0 para la mezcla aire/combustible químicamente correcta. Cuando es mayor a 1.0 la mezcla es pobre, un valor λ de 1.15 indica un exceso de aire del 15%. Cuando λ es menor que 1.0 la mezcla es rica.

IV.11.3 Exceso y deficiencia de aire [2].

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:



Donde EA corresponde al exceso de aire y su valor está dado en fracción decimal. En esta fórmula 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, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno. 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. El exceso y la deficiencia de aire se calculan de la siguiente forma

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

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

Donde:

EA es el exceso de aire (%)

DA es la deficiencia de aire (%)

A_{est} es el 100% de aire estequiométrico

A es el aire usado en un proceso de combustión.

IV.11.4 Nitrógeno real [15]:

$$N_r = 100 - (CO_2 + CO + O_2)$$

- Donde: N_r es el nitrógeno real (%)
 CO_2 es el porcentaje de CO_2 obtenido en el Orsat (%)
 CO es el porcentaje de CO obtenido en el Orsat (%)
 O_2 es el porcentaje de O_2 obtenido en el Orsat (%)

IV.11.5 Exceso de aire en función de los productos [15]:

$$EA = 3.773 \times (O_2 - 0.6 CO) / N_r - 3.773 (O_2 - 0.5 CO)$$

- Donde: EA es el exceso de aire en la combustión en función de los productos (%)
 O_2 , CO se utilizan en (%)

IV.11.6 Gasto de aire [26]:

$$GA = C \times G_c \times 28.2 N_r / N_r - 3.773 (O_2 - 0.5 CO)$$

- Donde: GA es el gasto de aire (kg / s)
 N_r , CO , O_2 se utilizan en (%)
 C es el porcentaje de carbón que contiene el combustible
 G_c es el gasto de combustible (kg/s)

IV.11.7 Gasto de gases secos [15]:

$$G_{gs} = C \times G_c \times (4CO_2 + O_2 + 700) / 3 (CO + CO_2)$$

- Donde: G_{gs} es el gasto de gases secos (kg / s)
 CO_2 , O_2 , CO , C y G_c ídem a los puntos anteriores

IV.11.8 Gasto de combustible no quemado [15]:

$$G_{cnq} = C \times CO \times G_c / CO_2 + CO$$

Donde: G_{cnq} es el gasto de combustible no quemado (kg / s)
 CO_2 , O_2 , CO , C y G_c ídem a los puntos anteriores

IV.11.9 Eficiencia de la combustión [15]:

$$\eta_{comb} = (G_c - G_{cnq}) / G_c$$

Donde: η_{comb} es la eficiencia de combustión (%)
 G_c es el gasto de combustible (kg / s)
 G_{cnq} es el gasto de combustible no quemado (kg / s)

IV.12 Entalpia de formación [9].

Si hacemos un balance de energía en un sistema simple y compresible obtenemos:

$$Q + W_{eje} = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$$

Donde Q es el calor suministrado al sistema, W_{eje} es el trabajo de flecha producido, ΔH es la variación de la entalpia entre dos estados del mismo sistema, y ΔE_c y ΔE_p son las variaciones de energía cinética y energía potencial entre los mismos estados del sistema.

Si el sistema es químicamente reactivo.

$$\Delta H = H_{prod} - H_{reac} = \sum (N_i h_i)_{prod} - \sum (N_i h_i)_{reac}$$

donde h_i es la entalpia 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 entalpia de formación (Δh_f) es el cambio de entalpia que ocurre cuando un compuesto químico se forma isotérmicamente a partir de sus elementos estables a presión constante.

$$\Delta h_f = h_{\text{compuesto}} - \sum (v_i h_i)_{\text{elementos estables}}$$

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

Por lo anterior, la entalpia de un compuesto es la siguiente:

$$h_{\text{compuesto}} \text{ (a 25 °C y 1 atm)} = \Delta h_f^{\circ},_{298}$$

La relación que existe entre la entalpia de formación en fase gaseosa y en fase líquida es la siguiente:

$$\Delta h_f^{\circ},_{298} \text{ (fase gaseosa)} = \Delta h_f^{\circ},_{298} \text{ (fase líquida)} + h_{fg}$$

Donde: h_{fg} es la energía necesaria para llevar el combustible del estado Líquido saturado al estado gaseoso saturado

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

$$h_{i,T,P} = \Delta h_f^{\circ},_{298,i} + (h_{T,P} - h_{298\text{ K}, 1\text{ atm}})_i$$

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

IV.12.1 Balance de energía para mezclas reactivas en estado estable.

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

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

donde $\Delta h = h_{T,P} - h_{298\text{ K}, 1\text{ atm}}$ y además se desprecia la energía cinética y potencial. Pero 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 entalpia es despreciable, quedando la ecuación anterior como sigue:

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

Donde: h_T es la entalpia a la temperatura que se alcanza en la combustión.

IV.13 Temperatura de flama adiabática [9].

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. Si $Q = 0$; tenemos

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

Al conocer las condiciones iniciales de los reactivos, el lado derecho de la igualdad es conocido, y por tablas de $\Delta h_{f,298}^{\circ}$ y $h_{298\text{ K}}$, 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.

IV.14 Poder calorífico para una mezcla de gases [11].

La determinación de las propiedades características de un gas combustible se realiza fácilmente a partir de su composición molar (o volumétrica). En las aplicaciones técnicas se obtiene suficiente precisión suponiendo que los gases se comportan como ideales. Según esto, el poder calorífico de una mezcla de gases se calcula por:

$$H_m = \sum H_j f_j$$

siendo f_j la fracción molar del componente j y H_j su poder calorífico en MJ/m^3 .

Capítulo V

Comparación de resultados en pruebas a motores de combustión usando diferentes combustibles.

Para analizar la combustión hay varios parámetros importantes, se comienza por analizar el requerimiento de oxígeno para el proceso. Dicho oxígeno se toma del medio ambiente que se compone de diferentes gases como el nitrógeno en, aproximadamente, un 79% , oxígeno en un 21% y el resto de otros gases. Esta proporción se considera constante, pero puede variar la densidad de aire si cambian otras características como la presión, la humedad , la temperatura, etc.

V.1 Comportamiento de la densidad del aire necesario para la combustión.

Se toma como referencia los siguientes datos de la densidad del aire [12]:

A 1 (atm) y 20 (°C) la densidad es 1.21 (kg/m³)

A 50 (atm) y 20 (°C) la densidad es 60.5 (kg/m³)

Se puede observar que si la presión aumenta, también aumenta la densidad del aire, si se mantiene constante la temperatura, esto es de nuestro interés ya que la composición del aire determina la cantidad de oxígeno que necesitamos para la combustión.

Entre mayor sea la densidad del aire, mayor será la cantidad de oxígeno disponible para la combustión y sabiendo que la mayor densidad se presenta cuando la presión en el aire ambiente es máxima, esto nos lleva a considerar que la mayor cantidad de oxígeno presente en el aire se dá a nivel del mar que sería, para el aire, la máxima presión.

Considerando la observación anterior se puede intuir que es más fácil la combustión a nivel del mar, por la mayor presencia de oxígeno, pero las necesidades de usar un automóvil con

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la Ciudad de México

motor de combustión interna no solo se presentan a nivel del mar, sino también a diferentes alturas sobre la superficie terrestre como en la Ciudad de México que es el tema del presente trabajo. Por esto se analizará el comportamiento de la presión y la densidad al cambiar la altura sobre el nivel del mar para conocer la cantidad de oxígeno disponible para la combustión en la Ciudad de México.

Partiendo de la forma general de la ecuación de presión hidrostática (Wark):

$$dP = -\rho g dz \quad \Rightarrow \quad dP / dz = -\rho g$$

Si se considera temperatura y aceleración gravitacional constantes se puede interpretar que la densidad es proporcional a la presión, como se observa a continuación:

$$\rho / \rho_0 = P / P_0, \quad \text{por tanto,} \quad \rho = \rho_0 P / P_0$$

donde ρ_0 y P_0 son los valores de la densidad y la presión a nivel del mar, entonces

$$dP / dz = -g \rho_0 P / P_0$$

de modo que:

$$dP / P = - (g \rho_0 / P_0) dz$$

Integrando la ecuación anterior desde la presión P_0 y $z=0$ (nivel del mar) hasta la presión P y una altitud z , obtenemos:

$$\int (1 / P) dP = - \int (g \rho_0 / P_0) dz$$

lo cual da como resultado:

$$\ln (P / P_0) = - (g \rho_0 / P_0) z$$

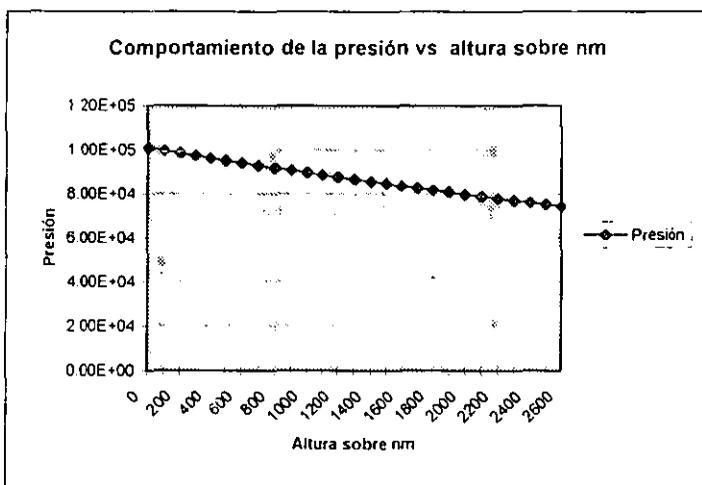
que es equivalente a

$$P = P_0 e^{-g \rho_0 / P_0 z}$$

Usando los valores $g = 9.8 \text{ (m / s}^2\text{)}$, $\rho_0 = 1.21 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ a $20 \text{ (}^\circ\text{C)}$ y $P_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ (Pa)}$, se obtiene:

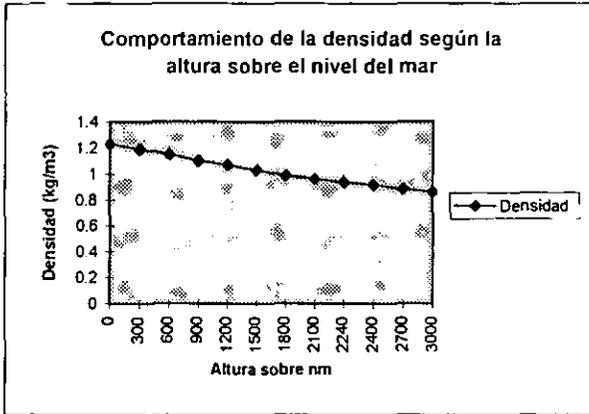
$$g \rho_0 / P_0 = 1.17 \times 10^{-4} \text{ (m}^{-1}\text{)} = .117 \text{ (km}^{-1}\text{)}$$

Pero es más representativa la gráfica que se genera del modelo matemático anterior



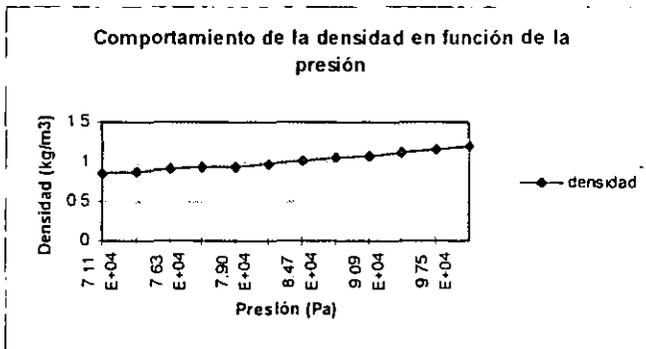
Gráfica V | Comportamiento de la presión con respecto a la altura sobre el nivel del mar considerando Temperatura y aceleración gravitacional constantes

Como se observa, la presión disminuye conforme aumenta la altura sobre el nivel del mar. Ahora se analiza el comportamiento de la densidad con respecto a la altura, y así poder determinar la posible cantidad de oxígeno en el aire para el proceso de combustión, como se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica V 2 Comportamiento de la densidad del aire según al altura sobre el nivel del mar.

Se observa que el comportamiento es muy semejante al de la presión y esto se debe a que, como se comentó antes, la densidad y la presión son directamente proporcionales. Sin olvidar que se consideró a la temperatura como una constante para este análisis.



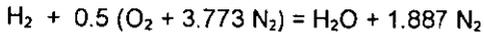
Gráfica V 3 Comportamiento de la densidad en función de la presión

En la anterior gráfica se puede observar, además de la proporcionalidad, que la densidad máxima en el aire del medio se presenta a la presión correspondiente a nivel del mar.

V.1.1 Combustión estequiométrica y relación aire-combustible para hidrocarburos.

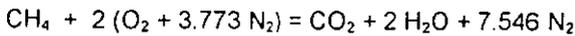
Para continuar con el análisis es conveniente conocer las ecuaciones de combustión estequiométrica para varios hidrocarburos y su correspondiente relación aire combustible:

Para el hidrógeno, aunque no es un hidrocarburo se incluye por considerarse un combustible:



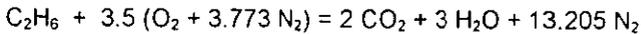
$$\text{relación aire combustible} = (A/C) = 34.3 \text{ (kg aire/ kg comb)}$$

Para el metano



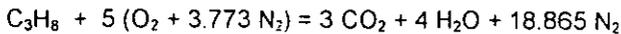
$$\text{relación aire combustible} = (A/C) = 17.234 \text{ (kg aire/ kg comb)}$$

Para el etano



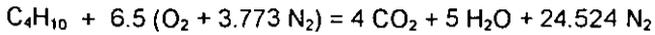
$$\text{relación aire combustible} = (A/C) = 16.091 \text{ (kg aire/ kg comb)}$$

Para el propano



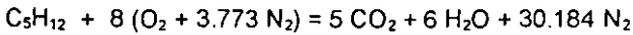
$$\text{relación aire combustible} = (A/C) = 15.675 \text{ (kg aire/ kg comb)}$$

Para el butano



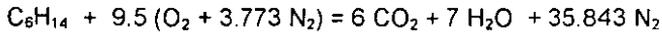
relación aire combustible = (A/C) = 15.459 (kg aire/ kg comb)

Para el pentano



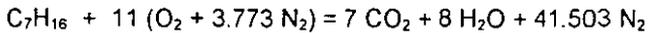
relación aire combustible = (A/C) = 15.328 (kg aire/ kg comb)

Para el hexano



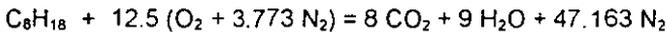
relación aire combustible = (A/C) = 15.239 (kg aire/ kg comb)

Para el heptano



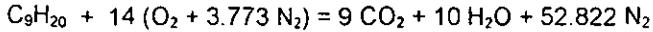
relación aire combustible = (A/C) = 15.175 (kg aire/ kg comb)

Para el octano



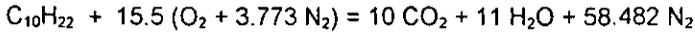
relación aire combustible = (A/C) = 15.127 (kg aire/ kg comb)

Para el nonano



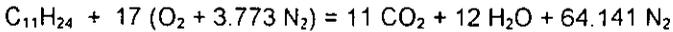
relación aire combustible = (A/C) = 15.089 (kg aire/ kg comb)

Para el decano



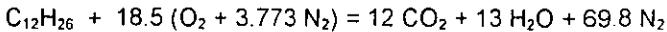
relación aire combustible = (A/C) = 15.059 (kg aire/ kg comb)

Para el undecano



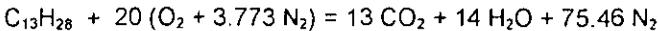
relación aire combustible = (A/C) = 15.034 (kg aire/ kg comb)

Para el dodecano



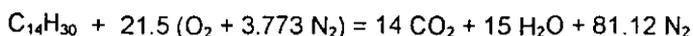
relación aire combustible = (A/C) = 15.014 (kg aire/ kg comb)

Para el tridecano



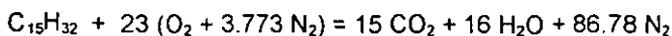
relación aire combustible = (A/C) = 14.996 (kg aire/ kg comb)

Para el tetradecano



relación aire combustible = (A/C) = 14.981 (kg aire/ kg comb)

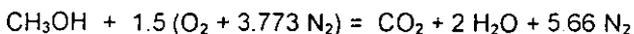
Para el pentadecano



relación aire combustible = (A/C) = 14.968 (kg aire/ kg comb)

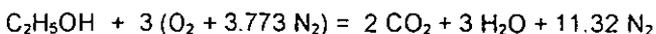
Además de estos hidrocarburos podemos considerar algunos alcoholes, diesel y gasolinas como se muestra a continuación, haciendo notar que para estos últimos las fórmulas son solo aproximaciones [10].

Para el metanol



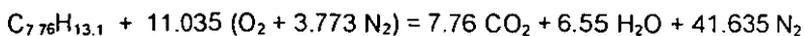
relación aire combustible = (A/C) = 6.47 (kg aire/ kg comb)

Para el etanol



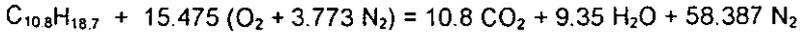
relación aire combustible = (A/C) = 9 (kg aire/ kg comb)

Para la gasolina



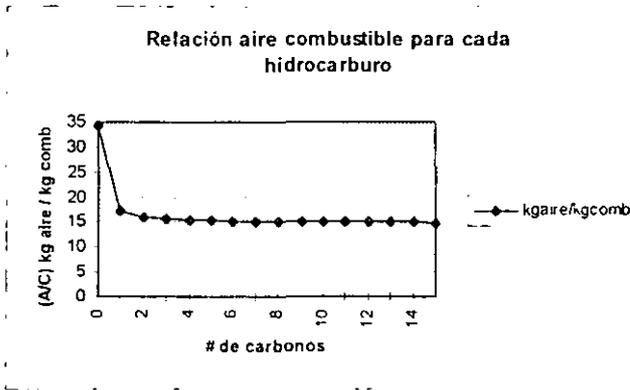
relación aire combustible = (A/C) = 14.364 (kg aire/ kg comb)

Para el diesel



relación aire combustible = (A/C) = 14.363 (kg aire/ kg comb)

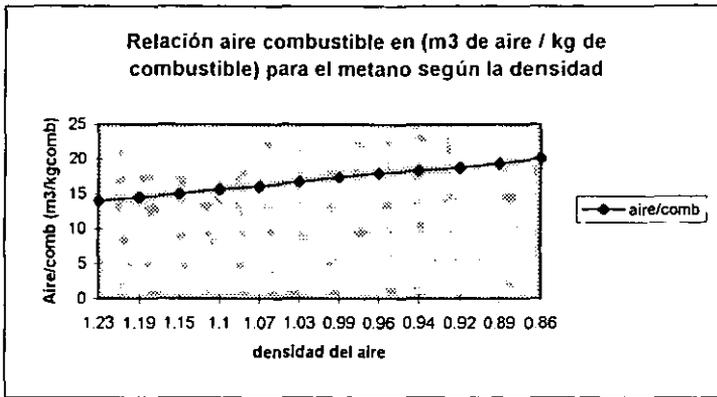
Cada uno de los combustibles anteriores requieren diferente cantidad de aire para conseguir la combustión estequiométrica esto, por considerarlo de alguna forma, depende de la cantidad de carbonos presentes en su estructura, para lo cual graficamos la relación aire combustible para cada hidrocarburo:



Gráfica V 4 Relación aire combustible para cada hidrocarburo.

Nota: Cuando #carbonos=0 corresponde a hidrógeno (H₂)

La gráfica anterior es válida para condiciones a cualquier nivel si se considera masa de aire, solo que a cada nivel se requiere de una cantidad diferente de aire, en volumen, para conseguir combustión estequiométrica. Tomando un hidrocarburo, metano, graficamos la relación aire combustible (A/C) en las siguientes unidades (m³ aire/ kg comb) ya que al cambiar la densidad del aire no cambia la proporción entre el oxígeno y el nitrógeno, pero entre mayor sea la densidad podemos tener mayor masa de oxígeno para la combustión, o bien menor masa de oxígeno si la densidad disminuye, como se muestra a continuación:



Gráfica V 5 Relación aire combustible para el metano según la densidad.

El análisis anterior puede aplicarse a cada hidrocarburo, pero lo conveniente es aplicarlo a cada combustible, para ello se establece la composición de cada combustible como gas natural, gas licuado del petróleo, gasolina, diesel, etanol y metanol.

Si se considera que el gas natural está compuesto principalmente por 98% de metano y 2% de etano [24], se obtiene la relación aire combustible de la siguiente manera:

$$(A/C)_{GNC} = f_{CH_4} (A/C)_{CH_4} + f_{C_2H_6} (A/C)_{C_2H_6} = 0.6522 (17.234) + 0.3477 (16.091)$$

$$(A/C)_{GNC} = 16.834 \quad (\text{kg aire / kg comb})$$

donde: f es la fracción molar de cada hidrocarburo

De manera semejante se puede hacer para el gas licuado del petróleo considerando que está compuesto por 95% de propano y 5% de butano [24], entonces tenemos como resultado:

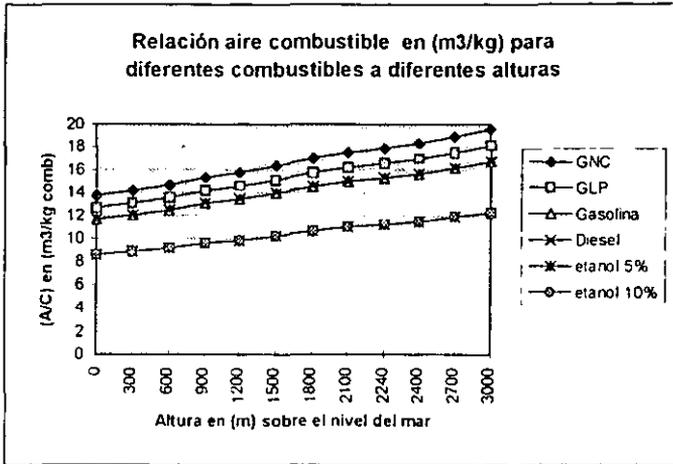
$$(A/C)_{GLP} = 15.58 \quad (\text{kg aire / kg comb})$$

Para el análisis experimental se trabaja con una mezcla de gasolina y etanol, en dos proporciones, etanol al 5% y al 10% para lo cual también se calcula la relación aire combustible:

$$(A/C)_{\text{Gasolina-etanol } 5\%} = 10.56 \quad (\text{kg aire / kg comb})$$

$$(A/C)_{\text{Gasolina-etanol } 10\%} = 10.56 \quad (\text{kg aire / kg comb})$$

Ahora se comparan estas relaciones aire combustible en función con el cambio de densidad del aire, representado en la siguiente gráfica, colocando en las abscisas la altura sobre el nivel del mar :



Gráfica V 6 Relación aire combustible para diferentes combustibles a diferentes alturas

V.2 Temperatura de flama adiabática.

A la máxima temperatura que pueden alcanzar los productos de una reacción como la combustión, se le conoce como temperatura de flama adiabática. Para continuar con el análisis de los diferentes combustibles, se considera a la temperatura de flama adiabática como un parámetro de comparación. Mediante la entalpia de formación para cada hidrocarburo podemos determinar de manera indirecta dicha temperatura, utilizando la siguiente fórmula:

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

A continuación se indica la forma de calcular la temperatura de flama adiabática para el metano:



Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la Ciudad de México

reactivo	h form comb	h T	h (298)	
CH4	-74850	0	0	-74850
O2	0	0	0	0
N2	0	0	0	0
			h reactivos	-74850
T 2400 K				
productos	h form comb	h T	h (298)	
CO2	-393520	125152	9364	-277732
H2O	-241820	103508	9904	-296432
N2	0	79320	8669	533132.446
			h productos	-41031.554
T 2300 K				
productos	h form comb	h T	h (298)	
CO2	-393520	119035	9364	-283849
H2O	-241820	98199	9904	-307050
N2	0	75676	8669	505634.822
			h productos	-85264.178
T 2350 K				
productos	h form comb	h T	h (298)	
CO2	-393520	122091	9364	-280793
H2O	-241820	100846	9904	-301756
N2	0	77496	8669	519368.542
			h productos	-63180.458

Por iteraciones se concluye que la temperatura corresponde a un valor intermedio. por lo cual, para encontrar dicho valor, se interpola de la siguiente forma:

X1	-85264.178 A=	1.12054374
X2	-74850	
X3	-63180.458	
Y1	2300	
Y2	? Y2=	2323.57886
Y3	2350	

Para los siguientes casos no es necesario mostrar todo el procedimiento, por lo cual solo se mostrarán los valores correspondientes a cada hidrocarburo y los correspondientes a cada combustible como el diesel, gasolina, gas natural, etc.

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la Ciudad de México

Hydrocarbon	Formula	Adiabatic flame temperature
1. Metano	$C H_4$	$T = 2323.5 \text{ (K)}$
2. Etano	$C_2 H_6$	$T = 2377.5 \text{ (K)}$
3. Propano	$C_3 H_8$	$T = 2390.2 \text{ (K)}$
4. Butano	$C_4 H_{10}$	$T = 2395.1 \text{ (K)}$
5. Pentano	$C_5 H_{12}$	$T = 2399.4 \text{ (K)}$
6. Hexano	$C_6 H_{14}$	$T = 2401.9 \text{ (K)}$
7. Heptano	$C_7 H_{16}$	$T = 2403.6 \text{ (K)}$
8. Octano	$C_8 H_{18}$	$T = 2404.9 \text{ (K)}$
9. Nonano	$C_9 H_{20}$	$T = 2405.9 \text{ (K)}$
10. Decano	$C_{10} H_{22}$	$T = 2406.8 \text{ (K)}$
11. Undecano	$C_{11} H_{24}$	$T = 2407.5 \text{ (K)}$
12. Dodecano	$C_{12} H_{26}$	$T = 2408.1 \text{ (K)}$
13. Tridecano	$C_{13} H_{28}$	$T = 2408.6 \text{ (K)}$
14. Tetradecano	$C_{14} H_{30}$	$T = 2409.0 \text{ (K)}$
15. Pentadecano	$C_{15} H_{32}$	$T = 2409.4 \text{ (K)}$

Para los combustibles se realizó un proceso semejante y se obtuvieron los siguientes resultados:

Combustible	Formula	Adiabatic flame temperature
16. Metanol	$C H_3 O H$	$T = 2324.4 \text{ (K)}$
17. Etanol	$C_2 H_5 O H$	$T = 2350.3 \text{ (K)}$
18. Gasolina	$C_{7.76} H_{13.1}$	$T = 2453.2 \text{ (K)}$
19. Diesel	$C_{10.8} H_{18.7}$	$T = 2430.4 \text{ (K)}$

Para el gas natural, considerado como una mezcla de 98% de metano y 2% de etano se puede calcular en función de las fracciones molares:

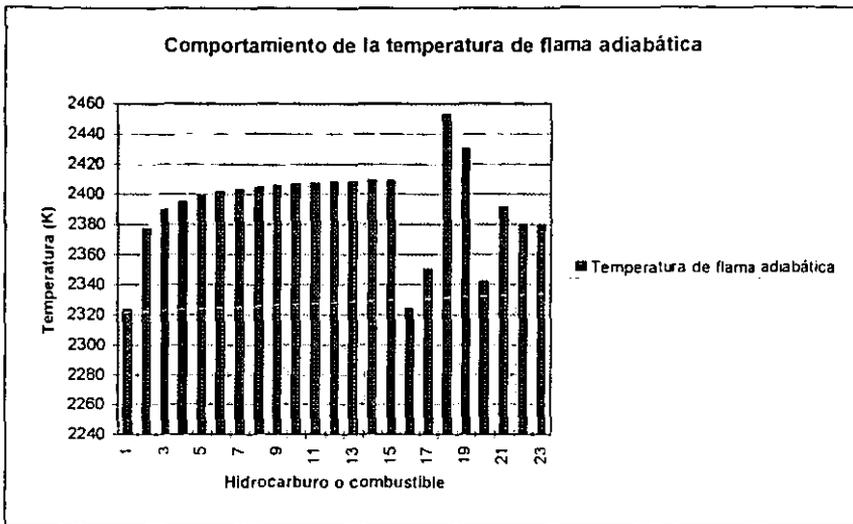
Combustible	Formula	Adiabatic flame temperature
20. Gas natural	$C H_4 + C_2 H_6$	$T = f_{CH_4} T_{fa CH_4} + f_{C_2H_6} T_{fa C_2H_6}$ $T = 0.6522 (2323.6) + 0.3477(2377.5)$ $T = 2342.1 \text{ (K)}$

De igual forma para gas L.P. y mezclas de gasolina y etanol:

21. Gas L.P. $C_3H_8 + C_4H_{10}$ $T = 2392.1 \text{ (K)}$

22. Gasolina y etanol $0.95(C_3H_8) + 0.05(CH_3OH)$ $T = 2379.9 \text{ (K)}$

23. Gasolina y etanol $0.9(C_3H_8) + 0.1(CH_3OH)$ $T = 2379.9 \text{ (K)}$



Gráfica V.7 Comportamiento de la temperatura de flama adiabática (K)

Nota. En las abscisas se colocó el número secuencial de cada combustible

Se observa que la gasolina presenta el mayor valor de temperatura de flama adiabática y que el metano junto con el metanol tienen el menor valor, también el gas natural tiene una baja temperatura de flama adiabática al estar formado por metano y etano. Esto se debe a que los hidrocarburos con mayor proporción de hidrógeno producen mayor humedad en proporción al CO_2 producido. Por lo anterior no alcanzan temperaturas mayores que los otros combustibles, por lo que también presentan menos emisiones de NO_x .

V.3 Pruebas realizadas en motores de combustión interna.

V.3.1 Descripción de los motores analizados. Como siguiente procedimiento de análisis del comportamiento de los combustibles a nivel de la Ciudad de México, se compararon resultados obtenidos en motores de combustión interna, siendo estos:

Motor 4 cilindros	Motor 4 cilindros	Motor 8 cilindros
Marca Ford	Marca Volkswagen	Marca Ford
Topaz mod. 1989	Modelo 1984	Maverick 1980
Carrera 8.4 (cm)	Carrera 6.91 (cm)	Carrera 7.62 (cm)
Diámetro cil 9.35 (cm)	Diámetro cil 8.6 (cm)	Diámetro cil 10.16 (cm)
Cilindrada 2309 (cm ³)	Cilindrada 1600 (cm ³)	Cilindrada 4948.9(cm ³)

Los resultados de las pruebas realizadas, en diferentes fechas, a estos motores se muestran en el apéndice A de este trabajo. Con ayuda de las pruebas antes mencionadas y el uso de un número adimensional para poder comparar los comportamientos de los diferentes motores se obtuvieron los resultados que a continuación se mencionan.

V.3.2 Parámetros de semejanza.

Para determinar los parámetros de semejanza se enumeran todas las variables representativas del comportamiento de los motores, en este caso se consideraron las seis variables siguientes:

		Unidades
P_f	Potencia al freno	$\text{kg m}^2 / \text{s}^3$
V	Cilindrada	m^3
ϕ	(A/C) relación estequiométrica (aire combustible) adim.	
G_c	Gasto de combustible	kg / s
N	Revoluciones por minuto	$1 / \text{s}$
P_{comb}	Potencia del combustible	$\text{kg m}^2 / \text{s}^3$

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la Ciudad de México

Se consideran como dimensiones a la masa (M), la longitud (L) y el tiempo (T) de lo que se obtiene:

6 variables - 3 dimensiones = 3 números adimensionales

Después de establecer las ecuaciones correspondientes en función de las unidades obtenemos como números adimensionales las siguientes expresiones:

$$\Pi_1 = \text{Pot F} / (\text{G c} \times \text{PCI})$$

$$\Pi_2 = (\text{Pot F})^{0.5} \times \text{Pmef} / [(\text{G c})^{1.5} \times \text{N}^3]$$

$$\Pi_3 = \phi$$

Donde: Pmef es la presión media efectiva al freno

PCI es el poder calorífico del combustible

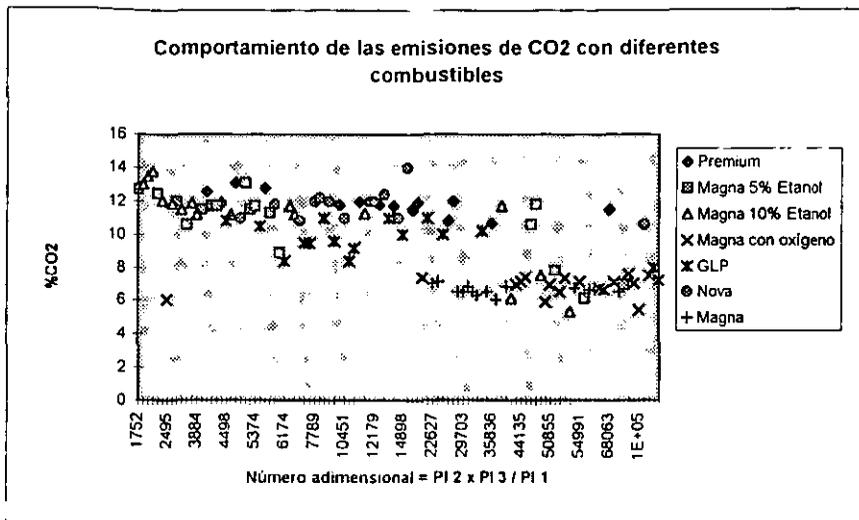
Para hacer más representativo al número adimensional se establece como la relación de los tres números adimensionales determinados con anterioridad, dando como resultado:

$$\Pi = (\text{Pot F})^{0.5} \times \phi \times \text{PCI} / [\text{N}^3 \times \text{V} \times \text{G c}^{0.5}] = \Pi_2 \times \Pi_3 / \Pi_1$$

Considerando que se utilizan parámetros como la potencia media efectiva al freno, la eficiencia mecánica, el poder calorífico del combustible y la relación aire-combustible se considera que este número adimensional es lo suficientemente representativo para analizar una variedad de combustibles en diversos motores y en distintas condiciones de trabajo.

Partiendo de este parámetro de semejanza se establece la relación que presentan las emisiones contaminantes con este número adimensional y se grafican en las ordenadas dichas emisiones y en las abscisas el número adimensional.

El número adimensional puede tomar diferentes valores de acuerdo con los valores que tomen las variables que lo conforman, son estas variables las que determinan el comportamiento del motor y las que permitirán establecer conclusiones como producto de este análisis, como se muestra a continuación en las gráficas.

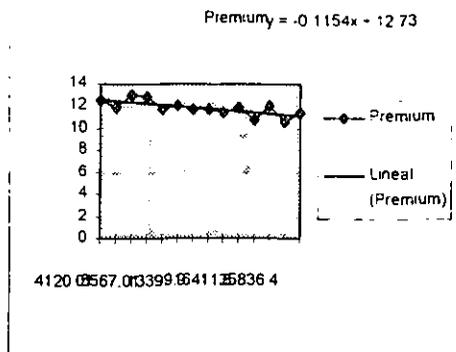


	Premium	Magna 5% Etanol	Magna 10% Etanol	Magna con oxígeno	GLP	Nova	Magna
%CO2	11.86	10.72	10.9	6.86	9.8	11.75	6.6
Desvest	0.6663	2.0532	3.5604	0.5922	0.9924	0.9061	0.2773

Gráfica V.8 Comportamiento de las emisiones de CO₂. Nota: Desvest es la desviación estándar

Para esta gráfica se considera que el combustible que emite mayor cantidad de CO₂ es el que tiene mejor combustión, se observa que la gasolina Magna es desfavorable en este aspecto, pero ésta puede variar dependiendo de las condiciones de trabajo, por ejemplo, bajas revoluciones, alta potencia, alta relación aire combustible, etc. Todo lo anterior se puede determinar mediante el número adimensional y es que dicho número puede tener un

valor grande o pequeño dentro del rango de la gráfica si las variables que lo definen toman valores grandes o pequeños. Para cada tipo de emisión se analiza cada combustible y sus posibles condiciones de trabajo.

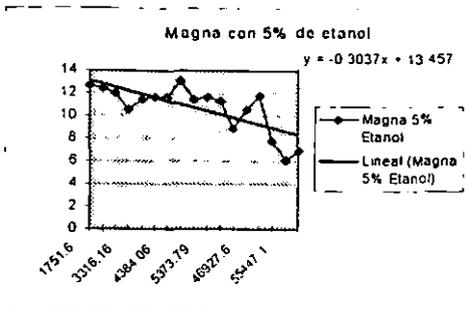


Para la gasolina Premium al crecer el número adimensional las emisiones de CO₂ disminuyen, esto indica que la combustión

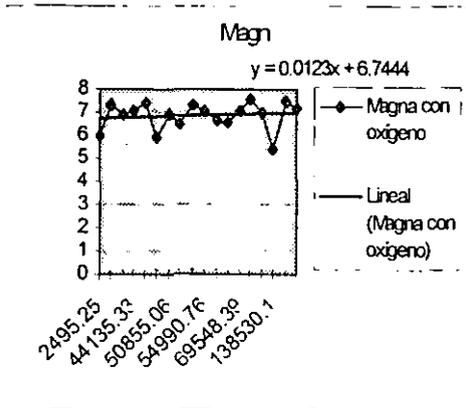
completa disminuye y esta condición se presenta en función de las condiciones de trabajo

cuando: La relación aire-combustible es alta o mayor a la estequiométrica, que la potencia al freno sea grande o que el número de revoluciones sea pequeño. El gasto de combustible depende directamente de la potencia y de las revoluciones por lo que al aumentar la potencia aumenta el gasto y lo mismo sucede si se aumentan la revoluciones, aumenta el gasto de combustible, cabe mencionar que se espera la situación contraria.

En el caso del poder calorífico, este depende de cada combustible por lo que se considera fijo para este análisis. Para la cilindrada se considera característica propia para cada motor y ésta no se considera fija ya que al disminuir, también aumenta el número adimensional y se espera que disminuyan las emisiones de CO₂ al utilizar gasolina Premium.

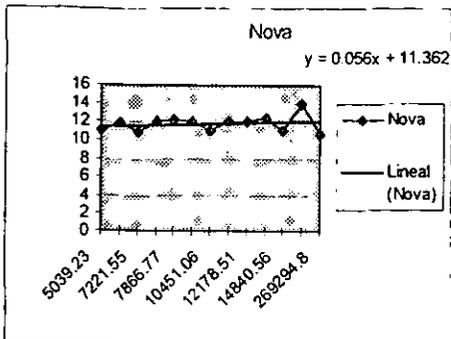


Para las mezclas de gasolina Magna con Etanol presentan el mismo comportamiento que la gasolina Premium al aumentar el número adimensional también disminuyen las emisiones de CO₂ por lo que las condiciones son semejantes.



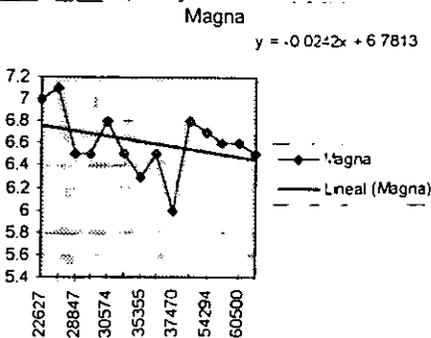
Para la gasolina Magna con inyección de oxígeno en el carburador presenta una emisión constante de CO₂ por lo que puede trabajar a cualquier velocidad y potencia pero al ser comparado con la gasolina Premium, el gas LP y la gasolina Nova, presenta menores emisiones. Aunque la calidad de la combustión la determina el CO pues el que varíe la emisión de CO₂ depende de otros factores.

En el caso del gas LP al aumentar el número adimensional las emisiones de CO₂ tienden a disminuir al igual que la gasolina Premium y por tanto las observaciones son semejantes.

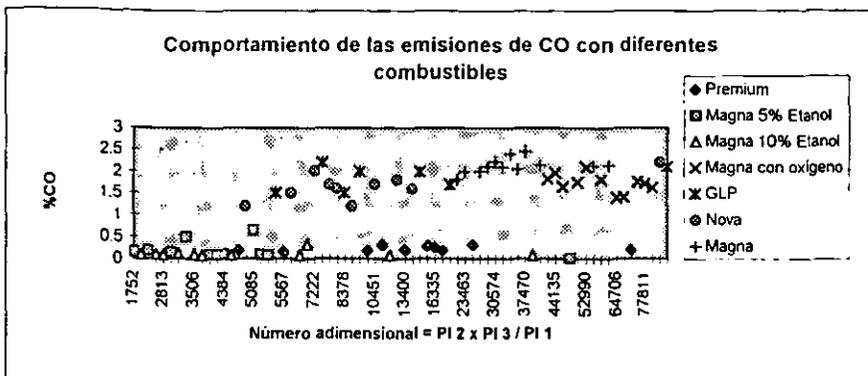


En el caso de la gasolina Nova presenta emisiones de CO₂ semejantes a las de la gasolina Premium y las mezclas de gasolina Magna y etanol sólo que muestra un incremento de dichas emisiones al aumentar el número adimensional. Esta observación hace notar que la gasolina Nova se puede utilizar para cualquier número adimensional y mejora al ser mayor dicho número, por

mencionar que esto se presenta cuando la potencia es alta y la relación aire-combustible es alta o cuando las revoluciones son bajas. Cabe mencionar que a pesar de estas cualidades la gasolina Nova ya no se ofrece a los usuarios de automóviles y esto se debe justificar con algunas desventajas en otras emisiones contaminantes.



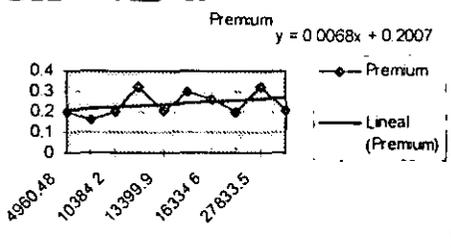
La gasolina Magna presenta las menores emisiones de CO₂ en comparación con todos los combustibles mencionados y se comporta igual que la gasolina Premium, por consiguiente, se pueden hacer las mismas observaciones. De esta forma es mejor utilizar la gasolina Magna con inyección de O₂ en el carburador.



	Premium	Magna 5% Etanol	Magna 10% Etanol	Magna con oxígeno	GLP	Nova	Magna
%CO	0.85	0.33	0.34	1.69	1.53	1.73	2.01
Desvest	0.0575	0.1979	0.0765	0.2286	0.2926	0.3136	0.1761

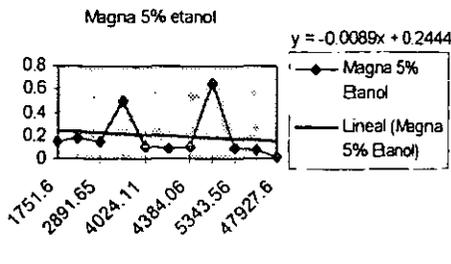
Gráfica V.9 Comportamiento de las emisiones de CO.

En la gráfica anterior se analizan las emisiones de CO y conforme éstas incrementan la combustión completa disminuye por lo que se espera encontrar un combustible que presente menores emisiones de CO en comparación con los demás, se observa que la gasolina Magna es desfavorable en este parámetro.

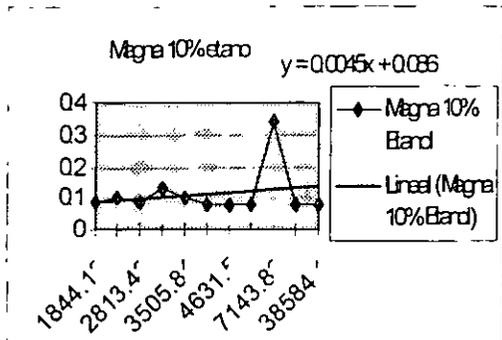


Para el caso de la gasolina Premium, presenta incremento en la emisión de CO conforme aumenta el número adimensional. En función de las variables que conforman el número adimensional se tiene un mayor número cuando la potencia es alta, con la relación aire combustible excesiva, cuando las revoluciones son bajas y cuando la cilindrada es baja. Estas situaciones presentan según el análisis altas emisiones de CO.

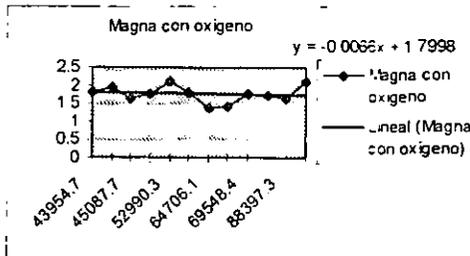
Para el caso de la gasolina Premium, presenta incremento en la emisión de CO



Para la mezcla de gasolina Magna y Etanol al 5% se presenta una situación en que a números adimensionales altos las emisiones de CO disminuyen por lo que parece favorable utilizar este combustible en potencias altas, altas relaciones aire-combustible, bajas revoluciones y bajas cilindradas. Pero al aumentar la proporción de Etanol al 10% se observa que el comportamiento de las

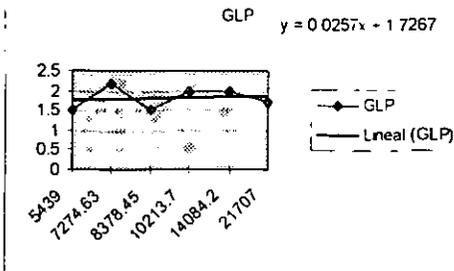


emisiones cambia, a altos números adimensionales la emisión de CO aumenta y se presenta la situación opuesta, esta mezcla debe utilizarse con números adimensionales bajos: baja potencia, altas revoluciones, altas cilindradas y bajas relaciones aire-combustible.



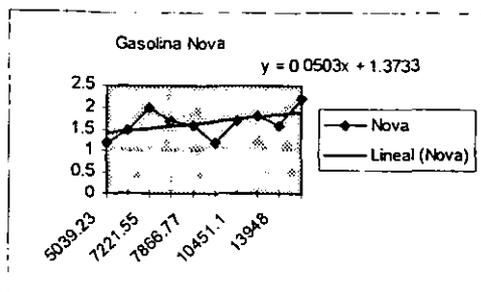
Para la gasolina Magna con inyección de oxígeno en el carburador muestra una disminución en la emisión de CO a altos números adimensionales, con esta situación se pueden conseguir altos números adimensionales al trabajar con altas

potencias, bajas revoluciones, bajas cilindradas y altas relaciones aire-combustible.



Con gas LP las emisiones de CO presentan un comportamiento aproximadamente constante por lo que se puede utilizar para cualquier número adimensional dentro del rango de la gráfica. Este comportamiento es favorable con respecto a la combustión.

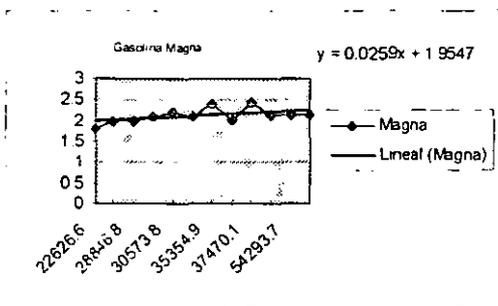
Para la gasolina Nova al incrementar el número adimensional se incrementan las emisiones

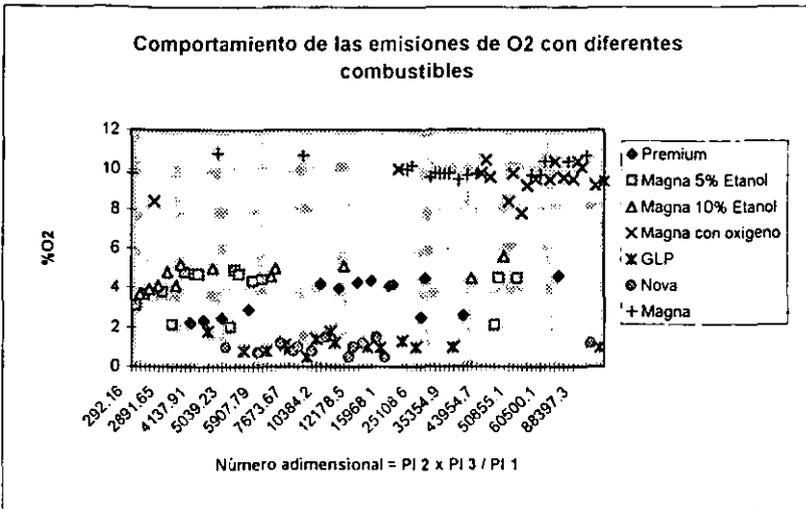


de CO y para conseguir números adimensionales pequeños y aminorar las emisiones se debe trabajar con potencias bajas, revoluciones altas, altas cilindradas y bajas relaciones aire-combustible.

La gasolina Magna presenta las mayores

emisiones de CO junto con el gas LP en comparación con los demás combustibles y al igual que la gasolina Nova sufre un incremento en las emisiones de CO conforme aumenta el número adimensional, por lo que se debe utilizar con un número adimensional pequeño para ello se debe trabajar a bajas potencias, altas revoluciones, altas cilindradas y bajas relaciones aire-combustible.

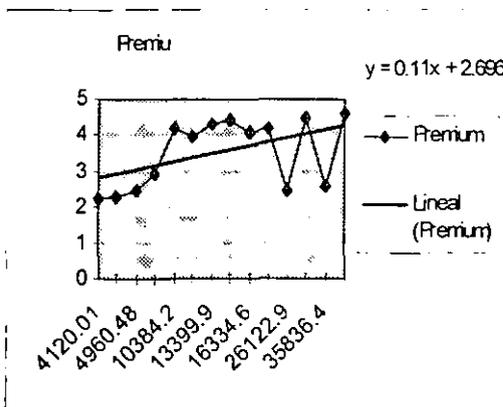




	Premium	Magna 5% Etanol	Magna 10% Etanol	Magna con oxígeno	GLP	Nova	Magna
%O ₂	3.52	3.88	4.63	9.5	1.11	0.99	10.01
Desvest	0.9415	1.05	0.5803	0.7247	0.3534	0.3277	0.4128

Gráfica V.10 Comportamiento de las emisiones de O₂

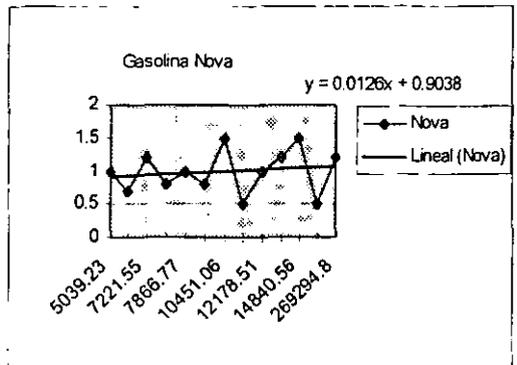
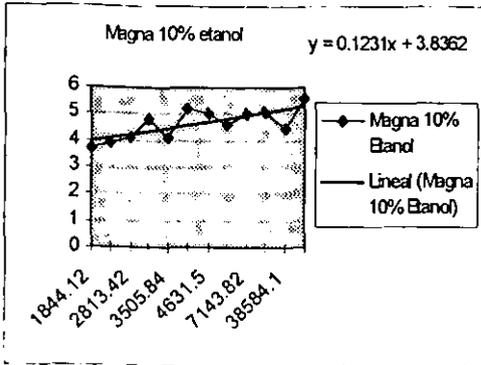
En esta gráfica se analiza el comportamiento de la emisión de O₂ y se espera que esta emisión sea pequeña para considerar que se aprovechó el máximo de oxígeno en la combustión. Nuevamente la gasolina Magna es desfavorable en este factor.



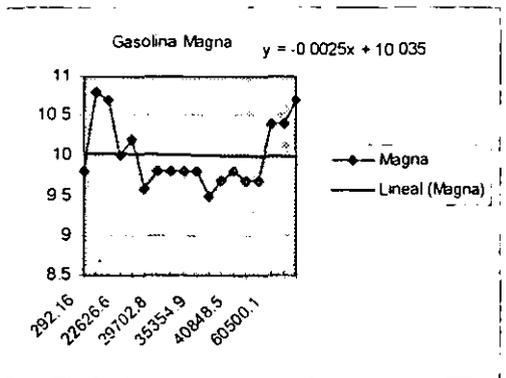
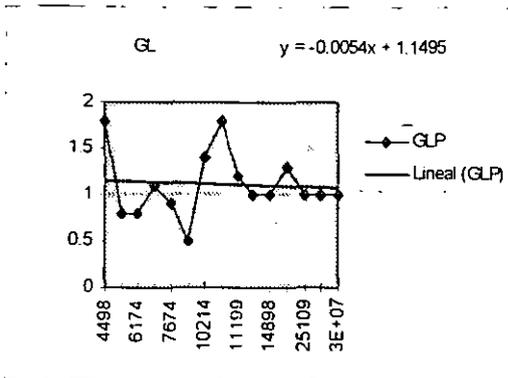
Para la gasolina Premium las emisiones de O₂ aumentan conforme aumenta el número adimensional por lo tanto, para evitar altas emisiones de O₂, se debe utilizar un número adimensional pequeño dentro del rango de la gráfica y esto se logra al trabajar a bajas potencias, altas revoluciones, altas cilindradas y bajas relaciones de aire-combustible.

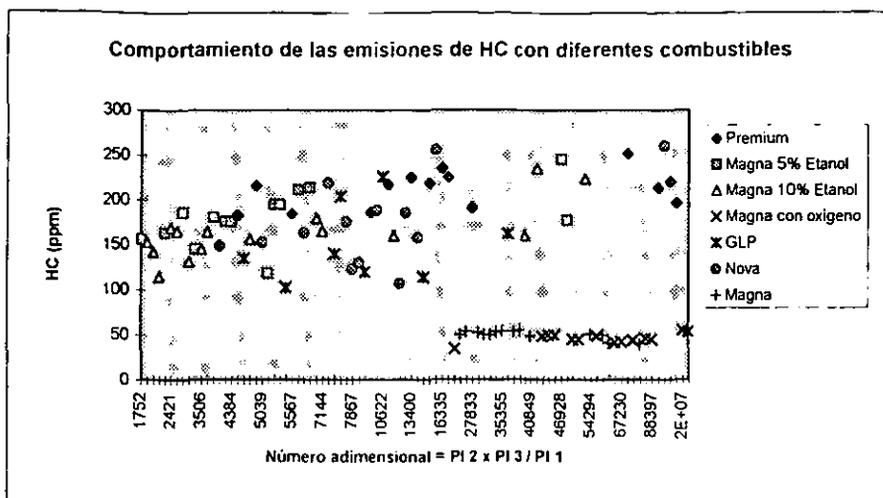
Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la Ciudad de México

Para las mezclas de gasolina Magna y Etanol sucede lo mismo, al igual que para la gasolina Nova, por lo que las observaciones son iguales.



El gas LP y la gasolina Magna presentan una disminución en la emisión de O_2 al incrementarse el número adimensional y para esto se requiere trabajar a altas potencias, bajas revoluciones, altas relaciones aire-combustible y bajas cilindradas.

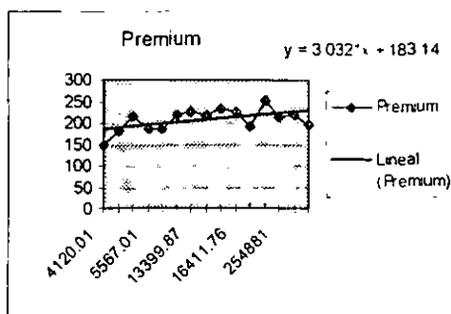




	Premium	Magna 5% Etanol	Magna 10% Etanol	Magna con oxígeno	GLP	Nova	Magna
HC (ppm)	207.4	181.07	164.2	46.14	150.5	176.4	50
Desvest	25.73	31.29	30.98	5.26	44.01	48.83	4.52

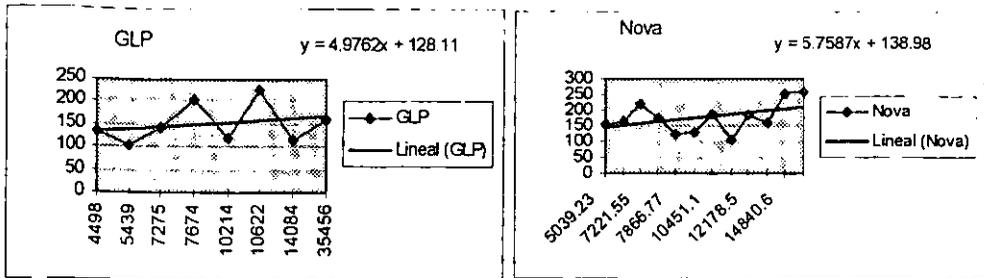
Gráfica V.11 Comportamiento de las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC)

En la gráfica anterior se analizan las emisiones de hidrocarburos no quemados y se espera encontrar un combustible que emita lo menos posible en comparación con los demás combustibles o bien que quemara la mayor parte o todos los hidrocarburos. En este caso la gasolina Premium tiene un comportamiento desfavorable en lo que respecta a la emisión de hidrocarburos no quemados.

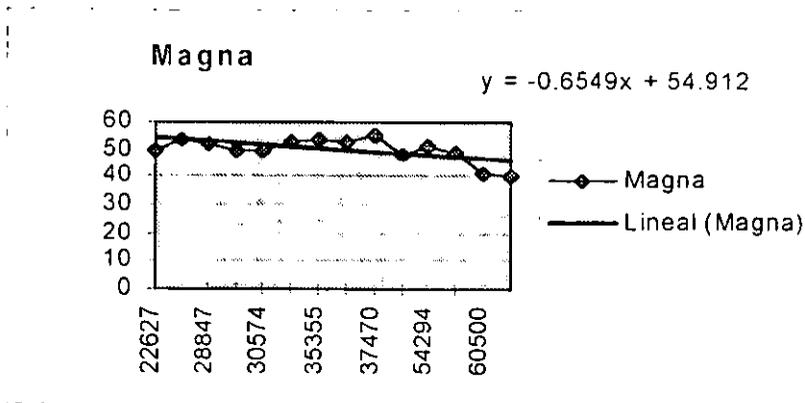


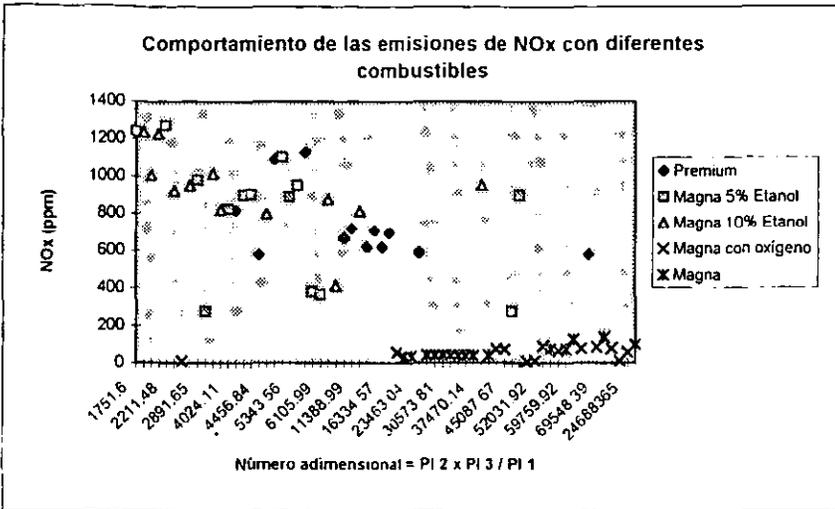
En los casos de gasolina Premium, gasolina Nova, mezclas de gasolina Magna y Etanol, Magna con inyección de oxígeno en el carburador y gas LP la emisión de hidrocarburos aumenta al aumentar el número adimensional por lo que se debe utilizar un número adimensional pequeño y para ello se debe trabajar con bajas

potencias, bajas relaciones aire-combustible, altas revoluciones y altas cilindradas.



La gasolina Magna presenta una disminución en la emisión de los hidrocarburos no quemados conforme aumenta el número adimensional y para ello se debe trabajar a altas potencias, bajas revoluciones, bajas cilindradas y altas relaciones aire-combustible.





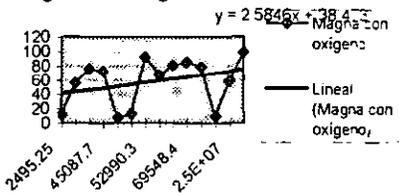
	Premium	Magna 5% Etanol	Magna 10% Etanol	Magna con oxígeno	Magna
NOx (ppm)	735.5	804.64	921.16	57.85	58.71
Desvest	188.46	340.64	214.69	32.95	35.16

Gráfica V.12 Comportamiento de las emisiones de NOx

En la gráfica anterior se analiza el comportamiento de las emisiones de NOx y se espera encontrar un combustible con menores emisiones que los demás combustibles. En este caso la mezcla de gasolina Magna y Etanol presentan un comportamiento desfavorable en la emisión de NOx en comparación con los demás combustibles. En este análisis la gasolina Magna junto con la gasolina Magna con inyección de oxígeno en el carburador

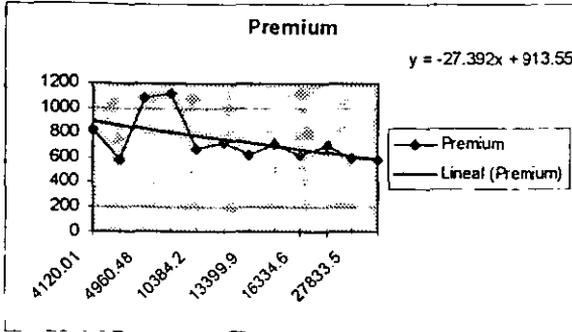
presentan las menores emisiones en comparación con la gasolina Premium y las mezclas de gasolina Magna y Etanol.

Magna con oxígeno



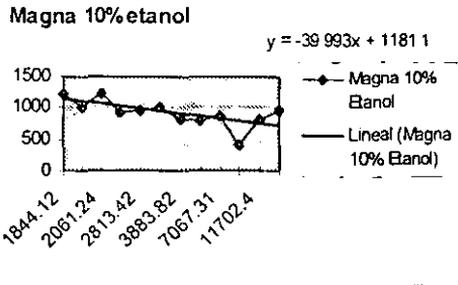
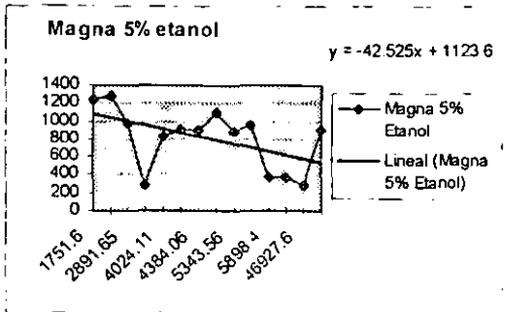
La gasolina Magna y Magna con inyección de oxígeno en el carburador presentan un incremento en las emisiones de NOx al aumentar el número adimensional por lo que se debe

considerar un número pequeño, para ello se debe trabajar a bajas potencias, altas revoluciones, bajas relaciones aire-combustible y altas cilindradas.



La gasolina Premium y las mezclas de gasolina Magna y Etanol presentan una disminución en la emisión de NOx al aumentar el número adimensional, para conseguir esto se debe trabajar con altas potencias, bajas revoluciones, bajas cilindradas y altas relaciones

airecombustible.



Capítulo VI

Conclusiones.

En la Ciudad de México se recomienda utilizar combustibles oxigenados para compensar la baja densidad de aire (menos oxígeno a este nivel) a consecuencia de la altura, como se puede concluir de la gráfica V.6.

En el caso de las mezclas de gasolina Magna y Etanol en bajas proporciones de este último no es necesario hacer modificaciones a los motores.

Las relaciones aire-combustible permiten concluir que a nivel de la Ciudad de México se deben utilizar combustibles que requieran menor cantidad de aire para la combustión completa, como sucede con los alcoholes y las mezclas de gasolina y Etanol.

El gas natural comprimido (GNC) es el combustible que requiere la mayor cantidad de aire para su combustión como se puede observar en la gráfica V.6, por lo que no es recomendable para usarse a la altura de la Ciudad de México, sin un sistema de control electrónico de combustible. Aun mejorando su funcionamiento con el sistema de control, éste tiene un poder calorífico bajo y presenta baja potencia.

El gas licuado del petróleo (GLP), después del (GNC), es el combustible que requiere más aire para su combustión y tiene bajo poder calorífico, por lo que tampoco es recomendable para su uso en la Ciudad de México sin un sistema de control electrónico de combustible.

Las menores emisiones de hidrocarburos no quemados es el motivo por el cual la gasolina magna permanece en el mercado como se puede observar en la gráfica V.11.

Por las características obtenidas en las gráficas V.8,9,10 y 12 se nota en la gasolina Magna un comportamiento desfavorable en comparación con la gasolina Premium por lo que ésta podría desplazar del mercado a la gasolina Magna.

Se puede mejorar la gasolina Magna para seguirse usando, al adicionarle Etanol mejoran sus características como se observa en las gráficas V.8,9,10,11 y 12.

También se puede inyectar oxígeno al carburador pero esto mantiene constante sus emisiones de CO₂, estabilizando su combustión pero sin mejorar las características del combustible en comparación con lo que hace el etanol, como se puede observar en las mismas gráficas. Pero presenta las menores emisiones de Nox y de hidrocarburos no quemados.

Las mayores emisiones de NO_x se presentan en los combustibles oxigenados por alcanzar mayores temperaturas como es el caso de la gasolina Premium y las mezclas de gasolina Magna y Etanol. Para solucionar este problema se cuenta con convertidores catalíticos de tres vías, esto permite la utilización de dichos combustibles a pesar de las emisiones de NO_x. Estos combustibles no se recomiendan en autos que no cuentan con convertidor catalítico de tres vías.

La gasolina Nova muestra características favorables para su utilización pero la presencia de plomo es su mayor inconveniente pues no se puede utilizar el convertidor catalítico para aminorar sus emisiones de NO_x, por que el plomo envenena al convertidor, además de ser un contaminante atmosférico sumamente dañino para la salud.

Para las mezclas de gasolina Magna con Etanol se concluye del análisis de emisiones de CO₂ que las proporciones de Etanol deben ser cercanas al 10%. Si el porcentaje es menor como se observa en el análisis de emisiones de CO, estas emisiones aumentan.

Apéndice A:

Tablas de resultados de pruebas realizadas a motores de combustión interna con diferentes combustibles.

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México.

Modo	Par real (N m)	Velocidad (rpm)	Potencia (Watts)	Flujo de comb. (kg/s)	Emisión CO2 (%)	Emisión CO (%)	Emisión O2 (%)	Emisión HC (ppm)	Emisión Nox (ppm)	Cilindrad (m3)	PMEF N/ m2	(%) Nr	G aire (Kg/s)	(A/C)	PI2x(A/C)/PI1
1	0	1074	1119	0.0003	1.8	2.2	16.2	213	12	0.02309	48462.5	79.8	0.026	86.3	254880.97
2	33.9	1294	8203	0.0013	11.5	0.21	4.6	252	580	0.02309	355262	83.69	0.04	31	68062.51
3	74.6	3253	25578	0.0024	13.1	0.2	2.45	216	1090	0.02309	1107752	84.25	0.066	27.6	4960.48
4	33.9	2380	8874	0.0012	12	0.32	3.99	217	720	0.02309	384322	83.69	0.036	29.8	11388.99
5	13.6	1595	2759	0.0003	10.7	4	2.6	360	153	0.02309	119489	82.7	0.008	25.3	35836.41
6	33.9	2290	8576	0.0011	11.8	0.21	4.3	225	620	0.02309	371416	83.69	0.034	30.5	13399.87
7	122	3158	40268	0.005	11.9	2.27	2.32	183	581	0.02309	1743958	83.51	0.131	26.1	4456.84
8	33.9	2080	7979	0.0012	11.9	0.2	4.2	225	695	0.02309	345561	83.7	0.036	30.3	16411.76
9	0	1069	1491	0.0001	4.4	4.5	10.8	310	37	0.02309	64573.4	80.3	0.004	41	24532.68
10	33.9	2110	7979	0.0011	11.5	0.26	4.1	235	620	0.02309	345561	84.14	0.033	30.1	16334.57
11	74.6	3089	24384	0.0026	12.8	0.16	2.91	184	1130	0.02309	1056042	84.13	0.074	28.3	5567.01
12	33.9	2212	8352	0.0012	11.7	0.3	4.4	219	710	0.02309	361715	83.6	0.037	30.6	14112.51
13	13.6	1632	2834	0.0005	10.8	4.1	2.5	347	190	0.02309	122737	82.6	0.013	25.2	26122.89
14	33.9	2483	9247	0.0012	11.8	0.2	4.2	186	670	0.02309	400476	83.8	0.036	30.3	10384.17
15	122	3327	42579	0.0047	12.6	1.23	2.22	149	819	0.02309	1844045	83.95	0.125	26.6	4120.01
16	33.9	2204	7904	0.0003	12	0.32	4.5	191	591	0.02309	342313	83.18	0.009	30.7	27833.48
17	0	995	969.4	0.0001	2	2.3	13.5	220	32	0.02309	41983.5	82.2	0.006	57	341023.44
18	0	995	969.4	0.0001	1.9	2.4	14	196	36	0.02309	41983.5	81.7	0.006	60	358972.04

Matriz de resultados del ciclo 18 modos para gasolina Premium

R. González, A. López y O. Santiago. "Utilización de combustibles alternativos en un motor de encendido por chispa"

Motor cuatro cilindros Ford Topaz mod 1989, carrera 8.4 (cm) cilindrada 2309 (cm3)

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México.

Modo	Par real (N m)	Velocidad (rpm)	Potencia (Watts)	Flujo de comb. (kg/s)	Emisión CO2 (%)	Emisión CO (%)	Emisión O2 (%)	Emisión HC (ppm)	Emisión Nox (ppm)	Cilindrad (m3)	PMEF N/ m2	(%) Nr	G aire (Kg/s)	(A/C)	PI2x(A/C)/PI1
1	0	1000	969.4	0.0005	1.1	1.07	18.6	77	1	0.02309	41986354	79.23	0.088	88.5	165087249.8
2	33.9	2418	9023	0.0013	11.5	0.1	4.8	180	825	0.02309	390775.2	83.6	0.041	15.7	4024.11
3	74.6	3193	25205	0.003	12.7	0.15	3.1	156	1240	0.02309	1091598	84.05	0.086	14.3	1751.6
4	33.9	2410	8948	0.0011	11.7	0.1	4.7	175	905	0.02309	387527.1	83.5	0.034	15.7	4384.06
5	13.6	1906	3207	0.0008	11.3	1.18	4.3	211	381	0.02309	138891.3	83.22	0.024	14.8	5898.4
6	33.9	2424	9023	0.0012	11.7	0.09	4.7	176	901	0.02309	390775.2	83.51	0.038	15.7	4137.91
7	122	3196	41163	0.0005	13.1	0.65	2.02	118	1101	0.02309	1782720	84.23	0.013	13.3	5085.42
8	33.9	2187	8203	0.0012	11.7	0.08	4.7	195	950	0.02309	355262	83.52	0.038	15.7	5373.79
9	0	960	1268	0.0002	7.8	6.8	4.5	375	77	0.02309	54915.55	80.9	0.005	13	50922.66
10	33.9	2654	9843	0.0014	12	0.15	3.8	186	980	0.02309	426288.4	84.05	0.042	14.8	2891.65
11	74.6	3050	24012	0.0025	12.4	0.18	3.66	163	1270	0.02309	1039931	83.76	0.074	14.7	2211.48
12	33.9	2199	8203	0.0012	11.5	0.09	4.9	195	890	0.02309	355262	83.51	0.038	15.8	5343.56
13	13.6	1850	3132	0.0007	8.9	5.6	4.4	213	366	0.02309	135643.1	81.1	0.019	13.3	6105.99
14	33.9	2452	9098	0.0013	10.6	0.5	2.12	145	278	0.02309	394023.4	86.78	0.035	13.5	3316.16
15	122	2192	28113	0.0033	10.6	4.78	2.12	245	278	0.02309	1217540	82.5	0.081	12.2	46927.56
16	33.9	2322	8725	0.0011	11.8	0.01	4.5	177	900	0.02309	377869.2	83.69	0.034	15.5	47927.56
17	0	998	1268	0.0001	6.9	5.4	6.5	320	45	0.02309	54915.55	81.2	0.003	15	73927.56
18	0	1000	1193	0.0002	6.1	4.24	7.6	315	36	0.02309	51667.39	82.06	0.007	16.5	55447.12

Matriz de resultados del ciclo 18 modos para mezcla de etanol al 5%

R. González, A. López y O. Santiago. "Utilización de combustibles alternativos en un motor de encendido por chispa"

Motor cuatro cilindros Ford Topaz mod 1989, carrera 8.4 (cm) cilindrada 2309 (cm3)

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México.

Modo	Par real (N m)	Velocidad (rpm)	Potencia (Watts)	Flujo de comb. (kg/s)	Emisión CO2 (%)	Emisión CO (%)	Emisión O2 (%)	Emisión HC (ppm)	Emisión Nox (ppm)	Cilindrad (m3)	PMEF (N/ m2)	(%) Nr	G aire (Kg/s)	(A/C)	PI2x(A/C)/PI1
1	0	993	820.3	0.0003	1.7	1.35	17.3	90	3	0.02309	35526	79.65	0.035	58.09	134772.84
2	33.9	2747	10142	0.0017	12	0.1	3.93	169	925	0.02309	4E+05	83.97	0.051	14.96	2421.35
3	74.58	2886	22893	0.0022	11.5	0.13	4.8	131	75	0.02309	1E+06	83.57	0.069	15.73	2899.52
4	33.9	2350	8799	0.0017	11.2	0.08	5.2	164	823	0.02309	4E+05	83.52	0.055	16.12	3883.82
5	13.56	1317	2386	0.0003	2.3	0.85	8.4	72	52	0.02309	1E+05	88.45	0.011	18.69	31702.92
6	33.9	2377	8874	0.0011	11.2	0.08	5	156	802	0.02309	4E+05	83.72	0.035	15.94	4631.5
7	122	2997	28627	0.0035	13.5	1.16	1.21	142	1007	0.02309	1E+06	84.13	0.089	12.76	1862.52
8	33.9	2035	7755	0.001	11.7	0.08	4.6	179	880	0.02309	3E+05	83.62	0.031	15.57	7067.31
9	0	1001	1268	0.0002	7.5	5.3	5.6	301	84	0.02309	54916	81.6	0.006	14.27	49230.78
10	33.9	2313	8650	0.0002	11.3	0.08	5.1	160	815	0.02309	4E+05	83.52	0.006	16.03	11702.39
11	74.58	3265	25801	0.0026	13	0.09	3.71	153	1240	0.02309	1E+06	83.2	0.077	14.83	1844.12
12	33.9	2526	9396	0.0011	11.7	0.08	4.5	160	953	0.02309	4E+05	83.72	0.34	154.9	38584.07
13	13.56	2047	7159	0.0009	11.2	0.34	5	165	415	0.02309	3E+05	83.46	0.028	15.81	7143.82
14	33.9	3346	12155	0.0003	11.9	0.1	4.1	145	1016	0.02309	5E+05	83.9	0.009	15.02	3505.84
15	122	3058	39149	0.0035	13.8	0.63	1.15	115	1228	0.02309	2E+06	84.42	0.09	12.85	2061.24
16	33.9	2629	9694	0.0016	11.8	0.09	4.1	165	950	0.02309	4E+05	84.01	0.048	15.12	2813.42
17	0	1078	1193	0.0003	6.1	3.55	9.1	235	70	0.02309	51667	81.25	0.011	18.69	40894.25
18	0	1086	1193	0.0002	5.3	3	10.1	224	60	0.02309	51667	81.6	0.008	20.53	53765.46

Matriz de resultados del ciclo 18 modos para mezcla de etanol al 10%

R. González, A. López y O. Santiago. "Utilización de combustibles alternativos en un motor de encendido por chispa"

Motor cuatro cilindros Ford Topaz mod 1989, carrera 8.4 (cm) cilindrada 2309 (cm3)

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México.

Modo	Par real (N m)	Veloc (rpm)	Potencia (Watts)	Flujo de comb. (kg/s)	Emisión CO2 %Vol	Emisión CO %Vol	Emisión O2 %Vol	Emisión HC ppm	Emisión Nox ppm	Cilindra (m3)	PMEF N/ m2	(%) Nr	G aire (Kg/s)	(A/C)	PI2x(A/C)/PI1
1	2.848	910	2491	0.0026	5.4	4.71	10.1	174	10	0.016	155687.5	79.79	0.1014	39	138530.13
2	10.44	2087	20917	0.0029	7.2	1.94	9.4	53	99	0.016	1307313	81.46	0.1175	40.52	3268842399
3	22.78	2076	45391	0.0029	6.9	1.75	9.8	45	128	0.016	2836938	81.55	0.1221	42.1	50855.06
4	10.03	1931	18598	0.0015	7.3	2.1	9.2	45	92	0.016	1162375	81.4	0.0595	39.67	52990.28
5	4.068	2029	7919	0.0022	7.5	2.1	9.2	55	59	0.016	494937.5	81.2	0.0875	39.77	24688365
6	10.71	2080	21387	0.0018	6.9	1.82	9.8	48	76	0.016	1336688	81.48	0.0756	42	43954.74
7	37.15	1931	68858	0.0044	6.6	1.41	10.4	42	186	0.016	4303625	81.59	0.1971	44.8	67230.02
8	10.58	2073	21044	0.0011	7.1	1.81	9.5	49	67	0.016	1315250	81.59	0.0451	41	54990.76
9	1.356	1061	1380	0.0033	5.9	5.71	8.4	123	8	0.016	86250	79.99	0.1104	33.45	49826.4
1	1.356	1073	1394	0.0026	6.5	6.01	7.8	147	13	0.016	87125	79.69	0.0831	31.96	52031.92
2	10.44	2039	20432	0.0018	7.4	1.65	9.6	50	73	0.016	1277000	81.35	0.075	41.67	45087.67
3	22.78	2068	45219	0.0011	7	1.63	10.4	45	113	0.016	2826188	80.97	0.0491	44.64	88397.26
4	10.17	2058	20089	0.0007	7.1	1.75	9.6	44	85	0.016	1255563	81.55	0.029	41.43	69548.39
5	4.339	2026	8441	0.0055	7.3	0.73	10	34	56	0.016	527562.5	81.97	0.2442	44.4	18074.97
6	10.31	2020	19977	0.0022	7.1	1.96	10.5	49	168	0.016	1248563	80.44	0.0972	44.18	44135.33
7	36.75	2006	70752	0.0033	6.7	1.38	9.5	41	81	0.016	4422000	82.42	0.1363	41.3	64706.13
8	10.17	1965	19179	0.0007	7.6	1.72	9.5	46	79	0.016	1198688	81.18	0.0289	41.29	77811.46
9	0	1045	1	0.0011	6	5.95	8.4	141	12	0.016	62.5	79.65	0.0366	33.27	2495.25

Matriz de resultados de prueba con gasolina magna más 10 pies cúbicos por hora de oxígeno en el carburador.

J. E. Barrios y E. Villaseñor Franco, "Carburación oxigenada: método para reducir emisiones en un motor de combustión interna a gasolina"

Motor cuatro cilindros Volkswagen modelo 1984, carrera 6.91 (cm), cilindrada 1600 (cm3)

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México.

N m Par	RPM	J/s P freno	kg/s gasto comb	% CO2	%CO	% O2	ppm HC	Cilindrada (m3)	PMEF N/ m2	(%) Nr	G aire (Kg/s)	(A/C)	PI2x(A/C)/PI1
35.11	2500	9192.8	1.06E-03	10.8	2.4	1.8	135	0.04948	185788.9	85	0.0269	23.67	4498.38
44.69	2250	8357.1	1.18E-03	10.5	1.5	0.8	103	0.04948	168899	87.2	0.0292	23.08	5439
51.07	2220	11874	1.22E-03	8.4	4.8	0.8	310	0.04948	239971.7	86	0.0281	21.48	6174.26
51.07	2200	11767	1.06E-03	9.5	2.2	1.1	140	0.04948	237809.6	87.2	0.0262	23.05	7274.63
51.07	2150	11499	1.02E-03	11	1.5	0.5	859	0.04948	232405	87	0.0269	24.59	8378.45
51.07	2120	11339	1.06E-03	9.5	3.6	0.9	204	0.04948	229162.1	86	0.0252	22.17	7673.67
60.65	2000	12703	1.06E-03	9.6	2	1.4	120	0.04948	256726.4	87	0.0266	23.4	10213.74
59.37	1950	12125	1.04E-03	8.4	3.8	1.8	226	0.04948	245038.6	86	0.0255	22.87	10622.41
60.65	1840	11687	1.14E-03	9.2	5.4	1.2	295	0.04948	236188.4	84.2	0.0264	21.6	11198.55
70.22	1800	13238	1.06E-03	11	2	1	114	0.04948	267536	86	0.0262	23.05	14084.16
70.22	1750	12870	1.14E-03	10	1	1	726	0.04948	260104.3	88	0.0288	23.56	14898.41
82.99	1600	13906	9.83E-04	11	1.7	1.3	921	0.04948	281047.9	86	0.0247	23.44	21707.01
82.99	1500	13037	1.02E-03	10	1	1	651	0.04948	263482.4	88	0.0257	23.5	25108.57
70.22	1350	9928.3	1.06E-03	8	4.4	1	264	0.04948	200652	86.6	0.0249	21.91	27484396
82.99	1300	11299	9.44E-04	10.2	3.3	1	162	0.04948	228351.5	85.5	0.0226	22.33	35456.2

Matriz de resultados con gas LP.

A. Maldonado y Gil M. Camacho López. "Estudio comparativo del uso de gas LP como carburante en un motor a gasolina".

Motor ocho cilindros Ford , carrera 7.62 (cm), cilindrada 4948.9 (cm3)

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México.

N m Par	RPM	J/s P freno	kg/s gasto comb	% CO2	%CO	% O2	ppm HC	Cilindrad (m3)	PMEF N/ m2	(%) Nr	G aire (Kg/s)	(A/C)	PI2x(A/C)/PI1
34.47	2500	9025.693	1.78E-03	10.6	2.2	1.2	260	0.04948	182410.9	86	0.441	247.8	269294.77
44.69	2300	10763.97	1.70E-03	11	1.2	1	153	0.04948	217541.8	86.8	0.043	25.12	5039.23
51.07	2200	11766.82	1.70E-03	11.8	1.5	0.7	163	0.04948	237809.6	86	0.042	24.65	5907.79
57.45	2100	12635.97	1.65E-03	10.8	2	1.2	219	0.04948	255375.3	86	0.041	24.91	7221.55
60.65	2050	13020.39	1.66E-03	12	1.7	0.8	175	0.04948	263144.5	85.5	0.041	24.7	7789.41
60.65	2040	12956.88	1.70E-03	12.2	1.6	1	123	0.04948	261861	85.2	0.042	24.94	7866.77
70.22	1920	14120.19	1.68E-03	12	1.2	0.8	130	0.04948	285371.7	86	0.042	24.88	9885.21
70.22	1900	13973.11	1.65E-03	11	1.7	1.5	188	0.04948	282399.2	85.8	0.042	25.39	10451.06
76.61	1800	14441.1	1.66E-03	12	1.8	1	185	0.04948	291857.3	85.2	0.041	24.82	12178.51
70.22	1790	13164.14	1.64E-03	12	1	0.5	107	0.04948	266049.7	86.5	0.041	24.7	11837.38
76.61	1720	13799.28	1.63E-03	12.4	1.6	1.2	158	0.04948	278886	84.8	0.041	25.15	13947.98
82.99	1700	14775.39	1.63E-03	11	2.5	1.5	256	0.04948	298613.4	85	0.041	24.97	14840.56
82.99	1650	14340.82	1.61E-03	14	0.8	0.5	741	0.04948	289830.6	84.7	0.04	24.78	15968.14

Matriz de resultados con Gasolina Nova.

A. Maldonado y Gil M. Camacho López. "Estudio comparativo del uso de gas LP como carburante en un motor a gasolina".

Motor ocho cilindros Ford , carrera 7 62 (cm), cilindrada 4948 9 (cm3)

Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México.

Modo	Par real (N m)	Velocidad (rpm)	Potencia (Watts)	Flujo de comb. (kg/s)	Emisión CO2 %Vol	Emisión CO %Vol	Emisión O2 %Vol	Emisión HC ppm	Emisión Nox ppm	Cilindr (m3)	PMEF (N/ m2)	(%) Nr	G aire (Kg/s)	(A/C)	PI2x(A/C)/PI1
1	0	799	1	0.0022	4.3	5.13	10.8	217	3	0.016	62.5	79.77	0.089	40.45	4854
2	10.44	1986	29360	0.0037	6.8	2.13	9.8	48	44	0.016	1835000	81.27	0.154	41.57	40848.53
3	22.24	1919	40961	0.0029	6.6	2.14	9.7	49	74	0.016	2560063	81.56	0.119	41.14	59759.92
4	10.44	2086	20902	0.0037	6.5	2.1	9.8	50	43	0.016	1306375	81.6	0.154	41.51	29702.78
5	4.475	2088	8971	0.0029	7	1.8	10	50	31	0.016	560688	81.2	0.124	42.83	22626.59
6	10.17	1914	18680	0.0037	6.5	2.04	9.5	53	40	0.016	1167500	81.96	0.15	40.54	35492.68
7	37.02	2015	71595	0.0037	6.6	1.37	10.4	41	131	0.016	4474688	91.63	0.152	41.19	60500.08
8	10.31	2073	20507	0.0026	6.3	2.4	9.8	54	39	0.016	1281688	81.5	0.107	41.04	35354.91
9	0	803	1	0.0044	4.5	5.92	9.8	244	4	0.016	62.5	79.78	0.161	36.52	292.16
1	1.492	810	1163	0.0018	4.4	5.56	10.7	220	6	0.016	72687.5	79.34	0.071	39.61	164578.2
2	10.17	2050	20007	0.0037	6.8	2.22	9.8	50	46	0.016	1250438	81.18	0.153	41.46	30573.81
3	22.37	1998	42908	0.0029	6.7	2.12	9.7	51	77	0.016	2681750	81.48	0.12	41.21	54293.71
4	10.31	1973	19515	0.004	6.5	2.1	9.8	53	40	0.016	1219688	81.6	0.166	41.5	32609.48
5	4.068	1977	7718	0.0033	7.1	1.98	10.2	54	35	0.016	482375	80.72	0.143	43.39	23463.04
6	10.03	2050	19746	0.004	6.5	2	9.6	52	42	0.016	1234125	81.9	0.164	40.93	28846.76
7	37.02	1962	69708	0.0037	6.5	1.35	10.4	40	140	0.016	4356750	81.75	0.166	44.84	70386.63
8	10.17	2010	19619	0.0026	6	2.45	9.7	55	40	0.016	1226188	81.85	0.105	40.54	37470.14
9	0	809	1	0.0007	4.5	6	10.7	262	4	0.016	62.5	78.8	0.027	39.14	8349.86

Resultados de prueba con gasolina magna.

J. E. Barrios y E. Villaseñor Franco, "Carburación oxigenada: método para reducir emisiones en un motor de combustión interna a gasolina" Motor cuatro cilindros Volkswagen modelo 1984, carrera 6.91 (cm), cilindrada 1600 (cm3)

Bibliografía.

1. Herbert E. Ellinger y James D. Halderman; "Ajuste de motores y control de emisiones" Prentice Hall Hispanoamericana, S. A. 1992 México, D. F.
2. Barrios Bonilla E. y Villaseñor Franco E., "Carburación oxigenada: un método para reducir emisiones en un motor de combustión interna a gasolina". Reporte Interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
3. Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de energía; " Combustibles y su combustión." Centro de estudios de la energía. Agustín de Foxá, 29. Madrid-16.
4. Márquez Martínez, Manuel; "Combustión y quemadores" Colección Productiva, Marcombo Boixareu Editores
5. D J Leeming y M Howarth; "El motor del automóvil, conocimientos básicos" Publicaciones Marcombo, s. a. 1988 México, D. F.
6. CFE, 1965-1997; "Informe de operaciones". Comisión Federal de Electricidad
7. PEMEX, Octanaje; Revista de la Franquicia Pemex julio 1996
8. Ing. H. Gerschler, Stuttgart; "Tecnología del automóvil" Editorial Reverté, S. A. 1985 Barcelona, España.
9. Kenneth Wark, JR; Termodinámica Mc Graw Hill. 1991
10. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals" McGraw-Hill, Inc. 1988.
11. Robert C. Reid, John M. Prausnitz & Thomas K. Sherwood; " The properties of gases and liquids" McGraw-Hill Third Edition. 1977.
12. Robert Resnick, David Halliday & Kenneth S. Krane; "Física" Compañía Editorial Continental S.A. de C. V. Tercera edición en español, 1995
13. H.S. Gandhi and M. Shelef. "The Role of Research in Development of New Generation Automotive Catalysis", A Cruq and A Frennet (Editors), 1987.

Bibliografía.

14. Quiñones Valenzuela, Alfonso. "El ambiente en las alteraciones de la salud". Colegio de Bachilleres. Publicaciones Cultural. México 1980.
15. A. Maldonado y G. M. Camacho, "Estudio comparativo del uso de gas L.P. como carburante en un motor a gasolina". Reporte interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
16. R. González , A. López y O. Santiago, "Utilización de combustibles alternativos en un motor de encendido provocado". Reporte interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
17. E. Barrios y L. Martínez, "Evaluación del uso del convertidor catalítico de tres vías en motores anteriores a 1985". Reporte interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
20. A. Martínez Bautista. "Proyección de la demanda de energía y emisiones asociadas en la República Mexicana al año 2010". Reporte interno, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
21. E. Barrios y E. Bernal, "Propuesta del uso de membranas selectivas (de O₂) para inyección de aire enriquecido en la carburación de combustibles, destinados a motores de combustión interna. Reporte interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
21. R. González, P. Guerrero, G. Guillot y F. Velez, "Control de emisiones en motores encendidos por chispa". Reporte interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
22. A. Maldonado y A. Ramírez, "Análisis de aditivos para lubricantes de motores de combustión interna" Reporte interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
23. D. Noriega Navarrete, "La experiencia del GNC en la Ciudad de México". Gobierno del Distrito Federal, Seminarios Regionales de Transporte: El desarrollo del mercado de vehículos a gas natural.
24. J. García, J. Flores y L. Fernández., "Viabilidad técnica del uso de Gas Natural Comprimido en vehiculos automotores" Reporte interno, Facultad de Ingeniería, UNAM.
25. Secretaría del Medio Ambiente del D. F. (página internet)
26. "Prácticas del laboratorio de Máquinas Térmicas, Facultad de Ingeniería, UNAM 1988.
27. Fox y McDonald, "Introducción a la Mecánica de Fluidos" Interamericana, México D. F. 1984.