

141
2c1.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO TECNICO SOBRE EL USO DE GAS
NATURAL COMO COMBUSTIBLE EN
MOTORES RECIPROCANES OPERADOS
EN CIUDADES ELEVADAS

T E S I S
Que para obtener el titulo de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
p r e s e n t a

OSWALDO ALFREDO PINEDA SANTA CRUZ



Asesor de Tesis: M. en I. ESTEBAN BARRIOS BONILLA

México, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

**“ESTUDIO TÉCNICO SOBRE EL USO
DE GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE
EN MOTORES RECIPROCANTES
OPERADOS EN CIUDADES ELEVADAS”**

PRESENTA

Oswaldo Alfredo Pineda Santa Cruz.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Luis Díaz Gutiérrez, jefe del departamento de Contaminación Atmosférica y Combustión del Instituto Mexicano del Petróleo, por la valiosa información y asesoramiento desinteresado que me brindo para el desarrollo de éste trabajo.

Al Ing. Roberto Moreno Carbajal, asesor del Sindicato de Trabajadores de la Industria Gasera, por el apoyo moral y cultural recibido.

Y en especial al M.I. Estéban Barrios Bonilla por brindarme de manera desinteresada su tiempo, para apoyarme en la dirección de la tesis, pues sin este apoyo hubiera sido imposible la conclusión de la misma.

A todos aquellos que se me escapan de la mente, y que no obstante me apoyaron, les agradezco sinceramente su colaboración.

*A todas y a cada una de las personas
que contribuyeron a la realización de este sueño;
dedico el presente trabajo con respeto y humildad.*

*Agradezco el apoyo incondicional de
mis padres y mis hermanos, los consejos
recibidos y más aun las reprimendas sufridas,
pues con estas pude valorar la oportunidad
que me dio la vida, poder ESTUDIAR,
para tratar de ser alguien.*

Es por ello que únicamente me resta decirles ...

GRACIAS...

ÍNDICE

	Página.
Capítulo 1	
1.1 Objetivos.	1
1.2 Antecedentes.	1
1.2.1 Alternativas de solución a la contaminación	2
1.3 Perspectivas del gas natural en México.	9
Capítulo 2 Conceptos teóricos.	
2.1 Contaminantes.	
2.1.1 Formación de contaminantes "primarios".	14
2.1.1.1 Formación de hidrocarburos.	14
2.1.1.2 Formación de COx.	14
2.1.1.3 Formación de NOx.	15
2.1.2 Contaminantes "Invernadero" y fotoquímicos.	15
2.1.3 Medición de los niveles de contaminación.	17
2.2 Combustibles.	18
2.2.1 Gas natural (generalidades).	19
2.2.1.1 Obtención.	19
2.2.1.2 Calidad del gas natural.	21
2.2.1.3 Propiedades físicas.	22
2.2.1.4 Estequiometría.	24
2.2.1.5 Relación aire combustible	25
2.3 Motores.	27
2.3.1 Termodinámica del motor de encendido por chispa y por compresión.	29
2.3.2 Sistemas de carburación.	32
Capítulo 3 Análisis tecnológico.	
3.1 Sistemas de alimentación de combustible (inyección).	40
3.2 Alimentación a gas.	44
3.3 Análisis de la eficiencia volumétrica.	50
3.4 Tratamiento primario del gas natural.	52
3.4.1 Eliminación de impurezas sólidas y líquidas.	52
3.4.2 Eliminación de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono.	53
3.4.3 Deshidratación.	54
3.4.4 Extracción de gasolinas.	55

3.5 Almacenamiento y transporte de gas natural.	55
3.5.1 Depósitos superficiales.	56
3.5.2 Depósitos semi-enterrados.	56
3.5.3 Depósitos enterrados.	57
3.5.4 Cavidades subterráneas.	57
3.5.5 Cavidades salinas.	58
3.5.6 Transporte de gas natural.	58
3.5.6.1 Transporte por tuberías.	58
3.5.6.2 Transporte marítimo.	62
3.5.6.3 Transporte ferroviario.	63
3.5.6.4 Transporte terrestre (pipas).	63
3.6 Resultados del uso del gas natural.	64
Capítulo 4 Conclusiones y recomendaciones.	72
Referencias.	73
Apéndice 1	
Ley sobre la explotación de gas natural.	75
Apéndice 2	
Criterios sobre la calidad del aire (grado IMECA)	78
Apéndice 3	
Norma oficial mexicana NOM-034-SCFI 1993	80
Instalación y equipo de carburación a gas LP en	
motores de combustión interna.	
Bibliografía.	84

CAPTULO 1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Objetivos.

Estudiar las ventajas y desventajas del uso del gas natural como sustituto de la gasolina en vehículos ligeros.

Evaluar las ventajas y desventajas de su aplicación de automotores, analizando los factores económicos, tecnológicos así como las distintas formas de distribución y envasado, de igual forma se estudian los problemas de disponibilidad en el mercado y perspectivas.

1.2 Antecedentes.

El aumento en la generación de gases contaminantes ha sido una preocupación para los gobiernos de todos los países, debido a que cada vez la concentración de estos en la atmósfera se incrementa poniendo en peligro la salud de las personas. Lo anterior puede observarse en la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 1.1 Emisiones promedio lanzadas a la atmósfera.

TIPO DE VEHÍCULO	EMISIONES	
	Ton/ Año	Gt/Pas-Km
Particulares	1 152 849	90.6
Taxis	583 868	108.5
Microbuses	252 616	1.0
Autobuses	14 774	1.5
Transporte de carga	291 158	

* Tabla realizada con datos cortesia del Departamento de estudios en combustibles y emisiones vehiculares del Instituto Mexicano del Petróleo.

Por lo anterior se han desarrollado métodos a través del tiempo para lograr combatir la generación de estos contaminantes.

El presente trabajo tiene como fin el de mostrar uno de estos métodos de eliminación de contaminantes.

Este método se basa en la utilización de un mejor combustible, pues de acuerdo a los reportes presentados por la Comisión Metropolitana para el Control de la Calidad de Aire, menciona que el principal factor que promueve la contaminación en el Valle de México, son los combustibles usados en los procesos de combustión: El IMP, menciona que los hidrocarburos derivados del petróleo representan el 90 % de la producción de energía primaria del país. De este total, el 90 % se destina al consumo energético y el 10 % se canaliza a la petroquímica y a otros sectores económicos. Del porcentaje destinado a la generación de energía el sector industrial requiere el 36.1 % a igual que el de transporte, mientras que en conjunto el sector comercial, residencial, y público consumen el 24.4 % y el restante 3.4 % es utilizado por el sector agropecuario. Pese a que la cantidad de energía utilizada por el sector industrial y de transporte es análoga, la generación de contaminantes en ambos sectores es totalmente diferente; los vehículos automotores, generan alrededor del 70 % de la emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera y el resto de los sectores el 30 % restante; del porcentaje antes mencionada, los vehículos que usan gasolina representan un 75 % debido a su mayor número con respecto a los de diesel.

El combustible que será probado en este trabajo, es el gas natural, debido a que este gas se compone con hidrocarburos de molécula corta, siendo de estos el más importante el metano, debido a que su porcentaje es muy alto (de 70 - 96 %) [13].

1.2 Alternativas de solución a la contaminación.

Recientemente se han hecho muchos estudios encaminados a combatir la contaminación atmosférica, algunos de estos se encuentran enfocados al desarrollo de dispositivos que permitan la disminución de las emisiones contaminantes; un ejemplo de estos es sin lugar a dudas el convertidor catalítico de tres vías.

El convertidor catalítico de tres vías es un dispositivo que permite completar la combustión de los gases de escape (HC, CO y la reducción de NOx), para lo cual se requiere alimentar al motor con mezclas con tendencia a las estequiométricas, estas están reguladas por la computadora del sistema de inyección de combustible. Este dispositivo necesita un material catalítico que permita terminar la combustión de los gases generados de los procesos de combustión ocurridos en los cilindros del motor. Normalmente, este material es el rodio, paladio, platino, etc., los cuales son caros y muy delicados, pues son muy fáciles de contaminar si se encuentran en presencia de plomo y azufre. Estos materiales se encuentran en un soporte, el cual se asemeja a un panal de abejas, por lo que se le llama panal. A través de éste, los gases pasan y al estar en contacto con el material catalítico, la combustión de estos se completa. En conjunto el sistema es muy caro y por lo tanto no muy aceptado por la población, además de que la vida del convertidor es limitada, teniendo que hacer un cambio total del mismo cuando esta acaba, pues hasta el momento no se han desarrollado técnicas para la limpieza de los materiales catalíticos del mismo (pues estos se destruyen).

Debido a lo anterior, el gobierno ha impulsado la elaboración de gasolinas [1] no contaminantes (magna sin) las cuales tienen un costo apenas mayor al de las habituales (nova), sin embargo la producción de este tipo de gasolinas es insuficiente para la demanda de la población debido a lo cual su uso se limitó a vehículos de modelos posteriores al 91. Debido a que estos vehículos estaban equipados con convertidor catalítico y al usar este combustible sin plomo, se trató de proteger al material catalítico de los mismos, para alargar su vida útil. Sin embargo esta medida no reflejó una reducción de los niveles de contaminación pues el parque vehicular se compone en su mayoría de modelos anteriores del 90, por lo que la medida no afectó a un número considerable de vehículos.

Por lo anterior el gobierno creó un plan con mayores alcances, para que afectara a todo el parque vehicular y así controlar los niveles de contaminación del valle de México, este plan fue el de "Hoy no circula", el cual fue acompañado con el programa de "verificación" posteriormente. Estos planes tenían bases muy sólidas para lograr el control de emisiones de los vehículos, pues se regulaban las emisiones en todos los vehículos a niveles bajos, dependiendo del modelo del vehículo. Esto se puede ver en la tabla 1 2

Tabla 1.2 Niveles Máximos Permisibles de Emisión para el segundo semestre de 1996.
de acuerdo a la norma NOM-ccat-010-ECOL-/1993

Año, modelo del vehículo	Hidrocarburos (HC) ppm	Monóxido de carbono (CO) % vol	Oxígeno Máximo (O ₂) % vol.	Dilación	
				min (CO + CO ₂) % v	máx.
Gasolina hasta	2 727 Kgs.	P. B. V.			
79 y ant.	450	4.0	6.0	7.0	18.0
1980 - 1986	350	3.5	6.0	7.0	18.0
1987 - 1993	300	2.5	6.0	7.0	18.0
1994 y post.	100	1.0	15.0	7.0	18.0
Gasolina de	mas de 7 2727 Kgs.	P. B. V.			
79 y ant.	600	5.0	6.0	7.0	18.0
1980 - 1985	500	4.0	6.0	7.0	18.0
1986 - 1991	400	3.5	6.0	7.0	18.0
1992 - 1993	350	3.0	6.0	7.0	18.0
1994 y post.	200	2.0	15.0	7.0	18.0
Gas LP,	Gas Natural	u otros	Combustibles		
1986 y ant.	200	2.00	6.0	7.0	18.0
1987 - 1993	150	1.00	6.0	7.0	18.0
1994 y post.	100	0.75	6.0	7.0	18.0

*P. B. V Peso bruto del vehículo.

No obstante de ser una buena idea para controlar las emisiones contaminantes en la zona metropolitana, causó malestar en la población, debido a que algunos operarios y dueños no fueron honestos, ocasionando rápidamente el soborno a los encargados de los centros de verificación, para poder pasar las verificaciones sin ningún problema, pese a que el vehículo estuviera mal carburado, o dar "mordidas" a los patrulleros de vialidad para poder evitarse las multas y el pago del carnalón si salía el vehículo el día en el cual debería de estar parado. Por tanto, estos programas no contribuyeron al control de la contaminación, pues los niveles se mantuvieron y en algunos casos se incrementaron [2]. Lo anterior se ha tratado de solucionar al eliminar concesiones de verificación a centros particulares, para construir los llamados macrocentros de verificación, los cuales según las autoridades no aceptan sobornos para acreditar a los vehículos en la medición de emisiones.

Sin embargo la solución no radica solamente en implantar normas y planes que nadie cumple, sino el de crear mejores combustibles que garanticen una buena combustión en los motores y eviten la formación de contaminantes [3].

Un dato importante es que la contaminación que generan los vehículos no es culpa total de la combustión, pues SAE, manifiesta que el total de los contaminantes de los vehículos se divide de la siguiente forma [4].

- 65 % por el escape
- 20 % por el orificio de respiración (Cárter).
- 9 % perdidas del carburador.
- 6 % perdidas en el deposito de la gasolina.

Así se deduce que para controlar la combustión, es necesario crear mejores combustibles y mejorar los sistemas de almacenamiento y de combustión de los motores.

De lo anterior se mencionan combustibles tales como el metanol, el cual tiene la ventaja de ser un combustible oxigenado, más sin embargo su montaje requiere de la implantación de convertidores para eliminar los COx, NOx, y aldeídos que se generan como producto de la combustión, además de requerir infraestructura adicional, ya que la presencia de agua origina la separación de las fases del combustible que a su vez ocasionaría severas fallas en el motor [5]; además de ser altamente venenoso. Este combustible también puede usarse diluido en gasolina; pese a que es un mejor combustible, su uso a gran escala en México no se ha generalizado debido a que el costo es más alto que el de los combustibles convencionales, lo cual no es costearle.

Otro combustible factible es el hidrógeno, este combustible tiene grandes ventajas sobre los combustibles tradicionales, una de ellas es que la combustión es más limpia, el costo es equiparable al de los combustibles comúnmente usados, pese a que la disponibilidad de este es baja. Otra desventaja es la de requerir de demasiado aire para llevar a cabo la combustión.

A continuación se da una tabla comparativa entre diversos combustibles para vehículos [6].

Tabla 1.3 Alternativas de combustibles para vehículos

	Estándar Gasolina	Gas nat.	Hidrógeno hidrolizado (360 kg)	H ₂ Comp	H ₂ líquido	Referencia: Vehículo eléctrico (Kg)	H ₂ como combustible en celdas para V.E
Masa (Kg)	1110	1225	1470	1225	1135	1335	1335
0 - 100 Km./h (s)	13	14	17-20	14-17	13-15	16	16
Eficiencia relativa del motor	1.00	1.10	1.35-1.25	1.15-1.25	1.15-1.25		
Problemas de masa	de 1.00	1.08	1.24	1.08	1.02		
Rendimiento de energía KJ/Km	2430	2390	2410-2620	2100-2280	1960-2150	620	620 elec.
Rango Km	550	320-480	180	320-480	320-480	180	1375 H ₂ 320-480

Notas:

1. Los vehículos a gasolina (estándar) a 7L/100 Km, Cd = 0.35, A = 2.2m², Cy = 6.0 Kg/1000 Kg. Se asume que los parámetros son iguales para todos los vehículos.
2. Los vehículos estándar a gas natural tienen alto costo de compración y baja operación.
3. La combustión de hidrógeno tiene alto costo de compración y más baja operación que el gas y que la combustión del gas natural.
4. El tiempo para 0-100 Km/h es inverso a escala de acuerdo con el peso del vehículo.
5. Los problemas de masa es basada en el trabajo (KJ/Kg) = 0.096 masa + 72.3
6. La eficiencia del vehículo eléctrico es: Carga de batería 65 %, carga/descarga de batería 85 %, eficiencia del motor 80 %, transmisión y dirección 85 %. Y batería de NaS, 110 Wh/Kg.
7. Las celdas de combustible se asumen en base al peso de la batería de EV. Eficiencia de celda de combustible 45 %. Almacenó de hidrógeno comprimido o líquido.
8. EV = vehículo eléctrico.

→ Tabla tomada de "Hydrogen as an alternative automotive fuel, Carl A. Kukkonen, SAE, Octubre 1994.

Como puede verse los beneficios son excelentes, más sin embargo el uso del hidrógeno se encuentra solamente en fase de experimentación, por lo que es necesario buscar otro combustible más viable. Por ello surge el gas natural, como una solución viable para reducir las emisiones contaminantes.

Este combustible no solo puede usarse en los vehículos, sino también en la industria, el hogar, en la generación de energía, etc. Es decir sus aplicaciones son mucho más amplias que el hidrógeno [7].

El costo de este combustible lo hace muy rentable en comparación a los tradicionales; pues el ahorro que se tendría sería del 25.3% respecto a la gasolina y del 10.7 % respecto al del Diesel. Lo anterior puede verse más claro en la tabla siguiente:

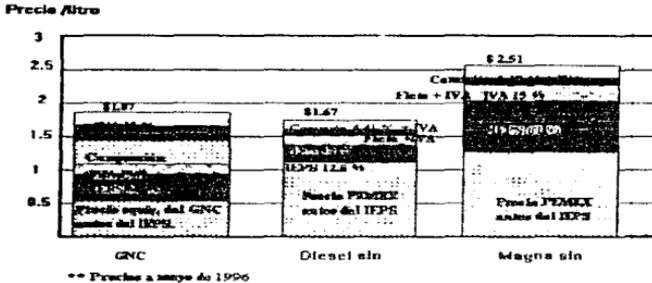


Fig. 1 Comparación del precio de algunos combustibles, así como los distintos tipos de impuestos

Como puede apreciarse uno de los combustibles más baratos, es el gas natural, pese a la cantidad de impuestos que se pagan, siendo el precio final \$1.87 / l, siguiendo el Diesel con \$1.67 / l y por último la gasolina, que es el combustible más caro y cuesta \$2.51 / l.

Haciendo una estimación a futuro sobre el precio de estos combustibles a partir de enero de 1994, hasta diciembre de 1997, podremos observar que existe una tendencia en el precio de la gasolina y el Diesel, pues siempre tienden a aumentar (La gasolina más que el Diesel), por el contrario el gas natural tiene una tendencia a la alza hasta mediados del 1996, sin embargo después baja hasta alcanzar el precio de \$1.5 / l, tal como se muestra en la figura 2.

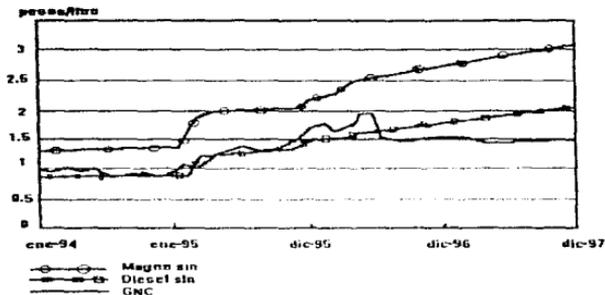


Fig. 2 Estimación del costo de algunos combustibles.

Por otra parte en los vehículos, cada vez se está incrementando su uso, debido a que ofrece buenos resultados en el control de la calidad del aire. Como se mencionó antes, las emisiones de contaminantes de un vehículo no provienen totalmente de los procesos de combustión; al usar sistemas de combustibles gaseosos, los porcentajes de emisiones debidas al depósito, a la carburación y el cárter disminuirían, pues el depósito está a presión, por lo que debe tener un sellado perfecto para evitar problemas y por consiguiente el combustible únicamente puede salir con dirección a la cámara de combustión, y no a la atmósfera como ocurre en los vehículos convencionales, por otra parte el sistema de carburación en estos vehículos es el de inyección de combustible, el cual está regulado por computadora para crear una mezcla estequiométrica, y sus elementos están sellados, por lo que las pérdidas son mínimas. En conclusión al usar sistemas a gas los contaminantes únicamente serán generados por procesos de combustión y no por fugas que tenga el sistema.

El convertir vehículos a gas natural ha adquirido importancia en todo el mundo, debido a los buenos resultados obtenidos en el control de emisiones; los países donde más vehículos a gas existen es Argentina, siguiendo Rusia, Italia, etc.

Tabla 1.4 Vehículos a gas en el mundo.

País	Número de Vehículos	Posición
Argentina	365,000	1
Rusia	315,000	2
Italia	250,030	3
E. U. A.	45,000	4
Nueva Zelanda	43,230	5
México	47	31

* Tabla tomada de NGV Resource Guide

La tabla 1.5 muestra una comparación entre diferentes combustibles, con lo cual puede observarse que el combustible que genera menor número de emisiones es el gas natural, por lo cual se deduce que la combustión con gas natural es muy eficiente [7-9], las emisiones de contaminantes generadas son mínimas, como se observa en la tabla 1.2.

Tabla 1.5 Costo del combustible, uso de energía y alternativas para el control de emisiones.

	Costo total del combustible (\$1983) ¹	Total de energía usada (KJ/km)	Criterios de emisión (gramos / km)				
			No metano (HC)	CO	NOx	SOx	Partículas
Natural gas CNG	4.3	3894-4288	0.16	0.01	0.76	Neg.	Neg
Gasolina	6.0	4583.3	0.33	5.18	1.19	0.44	0.04
Metanol	6.2	6163.5	0.15	1.8	0.34	Neg.	Neg.
Electricidad	4.7	7160.1	0.01	0.06	1.41	0.98	0.02
Propano	5.3	3894.8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Notas:

1. Costo del combustible, incluyendo el costo del recobro de combustible. El costo actual puede variar significativamente dependiendo del estado y la regulación local, trabajo local, costos de construcción y otras consideraciones financieras.
2. Incluye toda la energía del punto de producción punto de consumo.
3. Assume el 80 % de SOx removido en el consumo de combustible fósil en la generación eléctrica o al quemar combustible fósil. Emisión atribuida al reemplazo de la batería de los vehículos eléctricos no incluida.
4. CNG gas natural comprimido.
5. Los vehículos eléctricos tienen capacidad de 4 pasajeros. Todos los autos de 6. En los vehículos eléctricos el costo no incluye el de reemplazo de batería asociada a estos vehículos.

N/A = Valores de emisiones no disponibles para establecer la comparación.

* Tabla tomada de: Natural gas applications; Nelson E. Hay

De lo anterior surge un problema, el de determinar cual combustible es mejor entre el metanol, el hidrógeno o el gas natural, sin embargo la comparación entre metanol y gas natural se hace en la tabla 1.5, por lo que la comparación entre hidrógeno y gas natural debe hacerse.

Al hacer esta comparación surge otra pregunta, ¿ Podría el gas natural ser convertido a hidrógeno para usarlo como combustible en los vehículos o sería más fácil usar gas natural directamente?

La respuesta a esta pregunta puede contestarse al observar la tabla 1.6, en la que se hace la comparación entre ambos combustibles.

Tabla 1.6 Comparación entre el gas natural y el hidrógeno.

	Hidrógeno H2 hidrolizado	Hidrógeno Comp H2	Liq	Celdas de H2 para EV Comp. H2	para EV Liq H2	Vehículo a gas natural
H2 a bordo o CH4 usado (KJ/kg)	2410-2620 1980-2150		2100-2280	1380	1380	2390
Eficiencia reformada CH4	0.75	0.75	-----	0.75	-----	-----
Eficiencia de compresión	-----	0.90	-----	0.90	-----	0.9
Eficiencia de Carga/descarga (de Hidrógeno hidrolizado)	0.9	-----	-----	-----	-----	-----
Eficiencia en Reformar/licuar	-----	-----	0.46	-----	0.46	-----
Uso total del CH4 (KJ/Km)	3650-3880 4300-4670		2110-3380	2040	2990	2520

→ Tabla tomada de: Hydrogen as an alternative automotive fuel, Carl A. Kulkoski, SAE, Octubre 1994

Puede observarse que es más ventajosa la implantación de los sistemas a gas natural directamente que el de obtener hidrógeno en primera instancia para después ocuparlo como combustible.

El uso de gas natural como sustituto de los combustibles tradicionales, es muy ventajoso para el control de emisiones, sin embargo al momento de hacer la instalación del equipo al vehículo deben de considerarse varios aspectos [10] entre estos destacan.

- La condensación de los hidrocarburos. - Este parámetro es importante porque puede ocurrir en la expansión del combustible lo cual acarrearía problemas en el funcionamiento del motor.
- La expansión del gas natural. - Este aspecto es muy importante debido a que durante la expansión del gas (que se encuentra comprimido a 204 atm o 3000 psi), el combustible puede bajar la temperatura, lo cual trae como consecuencia que se enfríen los materiales con que tenga contacto, pudiendo ocurrir que estos fallen por cambios bruscos de temperatura. Además de que se puede crear condensación dentro del regulador, o de la tubería.
- Mantener la mezcla estequiométrica. - Este factor se discutirá más adelante, sin embargo se mencionará que de acuerdo a este factor se aumentarían o controlarían las emisiones.
- Número de Wobbe. - El número de Wobbe es el factor más importante en el manejo de gas. Este factor determina la energía química cuando un flujo pasa por un orificio a una presión dada. Este factor tiene dos implicaciones que lo hacen muy importante: Mantener una buena operación y ser un parámetro para cuantificar la transferencia de energía.
- Preparación de la mezcla. - Las propiedades físicas de los componentes son diferentes, por ello el lograr una mezcla homogénea no es fácil, pues se requiere de turbulencia y tiempo; sin embargo para lograrlo se usa el sistema de sobrealimentación (Turbo), para asegurarse que se genere una mezcla homogénea.
- Otros aspecto a cuidar es el de la lubricación debido a que el combustible no contiene aditivos para lubricar la válvula de admisión, por lo que estas pueden sufrir daños.

Otro parámetro que puede inclinar la balanza hacia la selección de un tipo especial de combustible, podría obtenerse al realizar una comparación ambiental de estos, con el fin de poder determinar la peligrosidad hacia la sociedad y al ambiente.

Tabla 1.7 Comparación ambiental de combustibles alternos.

	Toxicidad	Cont. al suelo y agua	Cont. al aire
Gasolina	2	2	2
Gas Natural	0	0	0
Metanol	3	3	2
Etanol	1	1	1
Propano	1	1	0

0 = Sin riesgo 1 = Bajo riesgo

2 = Regular riesgo 3 = Alto riesgo

▲ Tabla tomada de American Gas Association

1.3 Perspectivas del gas natural en México.

Actualmente el uso del gas natural se ha incrementado notablemente, debido a la política ecológica que se está llevando a cabo en el país, pues con este combustible se produce una combustión más completa.

El consumo de gas natural en México se centra en las paraestatales siendo las más importantes PEMEX y CFE, con el 42 % y 20% del total de la producción de 1994[10]. La distribución de estos porcentajes se da a continuación.

Tabla 1.8 Distribución del consumo del gas natural en México.

Consumidores	Consumo Volumen (mmpcd)	Número de plantas	Porcentaje de gas consumido
PEMEX	974	2	40
		6	30
		14	20
		69	10
		6	40
Industrial	814	46	30
		134	20
		617	10
		11	56
		5	43
CFE	460	8	1
		—	100
		—	—
Residencial	2.36	—	—

* mmpcd: mil millones de pies cúbicos diarios.

▲ Fuente: Comisión Reguladora de Energía, Plan Nacional de Desarrollo 1995 - 2000

Por lo anterior es necesario hacer inversiones en la construcción de obras, en las industrias y en las comunicaciones, para poder soportar el aumento en la demanda que tendrá este combustible. Algunas de estas son la creación de acuerdos bilaterales México - E. U. para la construcción de gasoductos en la frontera, con el fin de poder importar y/o exportar gas y utilizarlo en las regiones en las que no se tenga una vía factible para el suministro, tal es el caso de la península de baja California en nuestro país. En esta parte del territorio, no se cuenta con ningún sistema rentable para suministrar este combustible (no hay gasoductos) [11-13], por lo que la única manera que se tenía para la obtención de este combustible, es a través de barcos y camiones, con lo que el costo de este se incrementa, sin embargo al terminarse el proyecto del gasoducto, en la frontera de Baja California comenzado en el año pasado (1996), el costo de este se reducirá de 2.50 dls/m³, a 1.64 dls/m³ [14], aproximadamente, que es el precio promedio en los Estados Unidos. Otra inversión necesaria es la de implantar equipo en las plantas de generación eléctrica que normalmente queman combustóleo, para que quemen gas, la construcción de depósitos para lugares retirados de los gasoductos, proyectos para la explotación de yacimientos, etc

Esto, además de políticas encaminadas a promover la libre competencia de este combustible, para asegurar la disponibilidad, dinamizar el mercado energético, y dar soporte a la eficiencia y competitividad de los consumidores y productores [15].

La propuesta anterior (el uso del gas natural como combustible), se encuentra respaldado por los ricos yacimientos con que cuenta el país, los cuales se encuentran evaluados en 77 billones de pies cúbicos, lo que representa un periodo de consumo aproximado de 77 años [13 y 16]. Estos se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

◆ Región Marina		17 %
• Cd. del Carmen	A	
• Dos bocas	B	
◆ Región Sur		30 %
• Cárdenas	C	
• Comalcalco	D	
• Reforma	E	
• Agua Dulce	F	
• Ocosingo	G	
• Villahermosa	H	
◆ Región Norte		53 %
• Poza Rica	I	
• Altamira	J	
• Veracruz	K	
• Reynosa	L	
• Chucatepec	M	

◆ La distribución de los yacimientos dada anteriormente es la manejada por PEMEX-Gas petroquímica Básica.

La distribución de los yacimientos antes citados puede observarse en la figura que se muestra a continuación:

RESERVAS DE GAS NATURAL

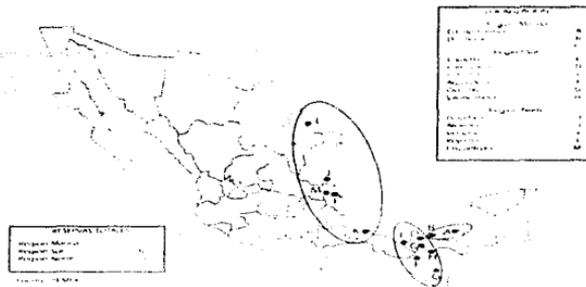


Fig. 3 Representación de las reservas de gas natural.

Debido a lo cual, la Secretaría de Energía, ha promovido la utilización de esta fuente de energía a través de la realización de acuerdos con la iniciativa privada, tanto nacional como extranjera para asegurar la disponibilidad del combustible en el mercado nacional, estas medidas abarcan la importación de aproximadamente el 10 % del consumo nacional, mientras se logra la autosuficiencia, y la concesión de obras a inversionistas privados, para la distribución e industrialización del gas natural.

En los últimos años, el volumen recibido proveniente de PEMEX-Exploración y Producción ha pasado de 3, 750 a 4, 235 mmpcd (millones de pies cúbicos diarios), debido a lo cual se han realizado inversiones para ampliar la infraestructura de proceso de 3, 300 a 3, 800 mmpcd [13, 16 y 17].

Tabla 1.9 Producción de Gas Natural en México.

Producción	Volumen (mmpcd)		
	1994	1996	1996
Gas Seco	2,570.42	2,477.25	2,682.81
Ventas Internas			
Gas Seco	1,368.37	1,463.90	1,491.00
Exportaciones			
Gas Natural	19.21	21.47	43.93
Importaciones			
Gas Natural	125.07	172.92	42.57
Balanza Comercial			
Gas Natural	-105.87	-151.45	1.37

•Tabla tomada de PEMEX-Gas y Petroquímica Básica, folleto informativo.

Anteriormente, todo lo concerniente al manejo de combustibles, se encontraba monopolizado por el gobierno, a través de la paraestatal PEMEX; sin embargo debido al aumento en la demanda en los combustibles (gas natural), se ha fomentado la creación de concesiones a la iniciativa privada; las cuales tienen como propósito aumentar la oferta a través de la construcción de instalaciones para el traslado, almacenamiento y distribución de dicho combustible.

Lo anterior se basa en la expedición de la ley sobre la explotación del gas natural, publicada el 8 de noviembre de 1995 [17]. Algunos artículos de la ley se citan en el apéndice 1 de presente trabajo.

CAPITULO 2 CONCEPTOS TEÓRICOS

2.1 Contaminantes.

Los contaminantes, se producen de diversas formas, siendo la más importante la combustión.

Los contaminantes se clasifican de varias maneras; una de éstas se basa en la forma en que son lanzados a la atmósfera, es decir de forma directa o indirecta (fotoquímica).

Se llaman contaminantes primarios a los que son emitidos de manera directa (directamente de procesos de combustión) y contaminantes secundarios a los que se generan de manera indirecta; entiéndase por manera indirecta a contaminantes formados por reacciones ocurridas fuera del motor (en la atmósfera).

Así los contaminantes primarios son.

- | | | |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| -- Hidrocarburos | - Alifáticos. | |
| | - Aromáticos. | |
| -- Óxidos de nitrógeno. | - Dióxido de nitrógeno. | |
| | - Monóxido de nitrógeno. | |
| -- Óxidos de carbono. | - Dióxido de carbono | |
| | - Monóxido de carbono | |
| -- Óxidos de azufre. | - Monóxido de azufre | - Trióxido de azufre, etc. |
| | - Dióxido de azufre | |
| -- Partículas | - Humos | - Aerosoles |
| | - Vapores | - Insecticidas, etc. |

Los contaminantes secundarios, son los que se producen, por reacciones ocurridas en la atmósfera, y estos son:

- Compuestos de nitrógeno
- Smog.
- Ozono
- PAN (Nitrato de peroxi-acilo)
- Luvia ácida.

A estos contaminantes también se les llama fotoquímicos, debido a que las reacciones por las cuales se generan se inician con la energía solar.

Como ya se ha mencionado la mayoría de los contaminantes se generan a través de los procesos de combustión, debido a que el combustible usado resulta de una mezcla de distintos compuestos, por lo que la oxidación estequiométrica de estos resulta difícil, además de que las condiciones dentro de la cámara de combustión, promueven la disociación de las primeras moléculas resultantes de dichos procesos [2 y 8]. Por esto se considera importante dar un repaso de la generación de los contaminantes.

2.1.1 Formación de contaminantes "primarios".

2.1.1.1 Hidrocarburos.

La combustión se inicia a través de una chispa, el frente de la flama viaja hacia todas direcciones, siguiendo la mezcla sin quemar, y en dirección de las paredes de la cámara. Las paredes de la cámara se encuentran enfriadas por aire o agua. Debido a lo cual la mezcla aire-combustible se enfría por el contacto con estas superficies frías. Esta acción de enfriamiento hace que la temperatura de la flama baje en esta región, con lo que la acción de la flama se ve frenada, ya sea que la apague o mitigue, antes de que el combustible haya sido totalmente quemado.

Al continuar el ciclo de la combustión, los gases producto de la misma son desalojados por el movimiento del pistón al abrirse la válvula de descarga, llevando consigo la película de mezcla de las paredes y que no alcanzó a quemarse.

A este fenómeno se le llama combustión incompleta, debido a que el combustible no se oxidó completamente. Los métodos para simular este fenómeno, se han desarrollado de manera lenta, en comparación a los de COx o NOx [2].

Otras fuentes son las revoluciones a las cuales esté regulado el motor, el tiempo de permanencia en la cámara de combustión o cuando el motor arranca y es alimentado por mezclas ricas. Si el motor gira muy rápido provocara que el tiempo de permanencia de la mezcla en la cámara de combustión será muy reducido, lo cual provocara que la flama no avance lo suficiente para quemar totalmente a la mezcla aire-combustible, lo cual repercutirá en la generación de hidrocarburos sin quemar, de la misma forma si se alimenta el motor con mezclas ricas (en combustible), la cantidad de aire necesaria para la completa combustión del combustible aumentará y al ser insuficiente esta en una mezcla rica también se generaran hidrocarburos sin quemar.

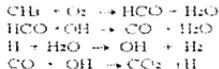
2.1.1.2 Óxidos de carbono (COx)

Para este caso nos basaremos en la combustión del octano [19] (que es la molécula representativa de la gasolina), pues al analizar la mezcla de los compuestos que forman la gasolina, se llega a una molécula muy similar a la del octano.

La combustión de este compuesto es de la forma:



Esta expresión únicamente presenta el dióxido de carbono, el cual es considerado como un gas invernadero y menos peligroso que el monóxido de carbono. Mas sin embargo, existe disociación en los procesos de combustión, provocado por las condiciones en la cámara de combustión (temperaturas cercanas a los 2000 °K). Estas reacciones pueden ocurrir de acuerdo a las ecuaciones siguientes [2].



Como puede verse si se formara radical metil (CH₃), este sería oxidado resultando como producto el radical formil (HCO) y agua, el cual en presencia del radical OH reaccionaría formando CO. En este momento, si la temperatura de la cámara cae, la formación de radicales OH se detendría y la última reacción no se llevaría a cabo, por lo que el producto final de estas disociaciones es el CO.

2.1.1.3 Óxidos de nitrógeno.

Estos contaminantes juegan un papel muy importante en la formación del smog. Los óxidos de nitrógeno más importantes son NO (óxido nítrico) y NO₂ (dióxido de nitrógeno).

La formación de NO, puede llevarse a cabo de tres formas distintas a través del mecanismo de Zeldovich, mecanismo de "NO prompt", y NO formado por el nitrógeno contenido en el combustible; de los cuales el más importante para nuestro caso al usar combustibles gaseosos es el mecanismo de Zeldovich. Este mecanismo se explica a continuación.

En flamas premezcladas es posible estimar la concentración de NO a partir de la ecuación:



Este equilibrio no siempre se lleva a cabo debido a que la razón de formación es finita. Las reacciones que se encuentran involucradas en el mecanismo de Zeldovich, empiezan con un átomo de oxígeno que reacciona con una molécula de oxígeno. Esto se lleva a cabo de acuerdo a tres reacciones.



Los átomos de oxígeno para estas reacciones se obtienen de la disociación del O₂.

Por otra parte la formación de NO₂, también se realiza durante la combustión.

Este compuesto puede formarse mediante la reacción del NO, en presencia de HO₂ de acuerdo a la reacción.



El cual puede volver a reaccionar de la siguiente forma



Cabe mencionar que las reacciones químicas que aumentan la concentración de NO_x, son dependientes de la temperatura de la flama, por lo que si se incrementa la temperatura se aumenta la generación de NO_x [8].

2.1.2 Contaminantes "invernadero" y fotoquímicos.

El problema de la contaminación atmosférica ha adquirido recientemente mucha importancia, debido a las altas concentraciones de contaminantes que existen en la atmósfera, las cuales se encuentran sujetas a las condiciones ambientales, es decir que si no se presentan corrientes de aire se estancan y aumentan, por el contrario si se presentan corrientes de aire, estas los hacen circular haciendo que la concentración de contaminantes disminuya en determinada región o localidad.

El viento es uno de los mecanismos para combatir naturalmente a los contaminantes, otros mecanismos naturales son los ciclos, tales como el del nitrógeno y el del monóxido de carbono, sin embargo estos mecanismos han sido superados al incrementarse la cantidad de contaminantes, lo cual crea un asentamiento de estos en la atmósfera, que trae como consecuencia que los habitantes respiren estos gases y el aumento de la temperatura media de la atmósfera por el fenómeno conocido como "efecto invernadero" [20]. Este fenómeno se explica a continuación.

1. El sol irradia energía.
2. La atmósfera y la superficie terrestre absorben el 70 % de esta energía.

3. El 30 % de esta energía es reflejada al espacio.
 4. La energía absorbida por la superficie y la atmósfera es reradiada al espacio en la zona de infrarrojo, 1.0 - 600 micras.
 5. De un 100 % de energía reradiada, un 44.3 % sale de la atmósfera, y el 55.7 % es absorbido por los gases invernadero provocando el aumento de la temperatura.

Resumiendo lo anterior, la causa del efecto invernadero es que mientras que el aire puro es transparente a la radiación (no almacena energía), los contaminantes invernadero, absorben energía del sol, lo cual trae como consecuencia que la temperatura de la atmósfera aumente.

Los gases invernadero son el bióxido de carbono, los hidrocarburos (metano), ozono, vapor de agua y los óxidos de nitrógeno.

En la tabla 2 1 se muestran algunas características de estos gases

Tabla 2 1 Características de los gases

CONTAMINANTES	FUENTE	OBSERVACIONES
CO ₂	Combustión de hidrocarburos, carbón, madera	Su concentración está en aumento debido al incremento en el uso de combustibles; la concentración actual es de 350 ppm
Hidrocarburos (metano)	Naturales, pantanos, rñenos sanitarios, fugas en minas, tracto de rumanates, etc	La mayor parte se descompone fotoquímicamente en la atmósfera baja; la parte que escapa a la estratosfera forma vapor de agua; la molécula de metano absorbe 21 veces más de energía infrarroja que el CO ₂ .
Ozono	Es producido por la oxidación fotoquímica del CO ₂ , metano, o hidrocarburos en presencia de óxidos de nitrógeno que actúan como catalizadores.	El ozono actúa como filtro de la radiación ultravioleta en la estratosfera; sin embargo en la baja atmósfera actúa como un oxidante; e irrita las vías respiratorias.
CFC'S	Son productos químicos que se usan de diferentes maneras: CFC-11 Espumas de poliuretano CFC-12 Refrigeración CFC-22 Aire acondicionado CF-113 Limpadores de circuitos electrónicos CFC-114 Refrigeración y enfriamiento CFC-115 Refrigeración y enfriamiento. CFC-116 Refinación del aluminio	Pertenece en la atmósfera de 500 a 200 años son poderosos absorbentes de infrarrojos Catalizan las reacciones que destruyen la capa de ozono estratosférico
Vapor de agua	Se produce por una evaporación, al aumentarse las temperaturas de la superficie terrestre	Tiene capacidad de absorber energía infrarroja, por lo que es considerado como gas invernadero.
NO ₂	Resulta de la combustión de combustibles fósiles, siendo el principal el carbon, otras fuentes son la desnitrificación de fertilizantes y deforestación.	La concentración de este contaminante aumenta un 0.3 % anual, con una producción de 14, 000 ton al año. Este gas es destruido por la luz uv; el tiempo de residencia es de 150 años.

† Los datos fueron tomados de Ecología, contaminación y medio ambiente; Amos Turk ; Iberoamericana; México 1972

2.1.3 Medición de los niveles de contaminación.

Los contaminantes son generados en su mayoría por procesos de combustión y se concentran en la atmósfera, donde como ya se mencionó son aspirados por los habitantes, ocasionando daños en la salud de los mismos. Estos daños pueden ir desde mareos temporales, hasta la muerte por envenenamiento, como puede ocurrir al respirar aire con concentraciones elevadas de CO, pues este reacciona con la hemoglobina, produciendo la carboxihemoglobina (COHB), la cual causa que la sangre pierda eficiencia en el transporte de oxígeno, lo cual acarrea la muerte [21].

Para evitar lo anterior, las autoridades han diseñado métodos para poder tener un control de los contaminantes, uno de estos métodos es la medición de la contaminación, la cual se lleva a cabo por los grados IMECA, estos grados están en función de los daños a la salud que los contaminantes ocasionan a la población.

La tabla siguiente muestra la concentración de los gases de combustión en los grados IMECA.

Tabla 2.2 Norma mexicana y equivalente a 100 IMECAS

Contaminante	Concentración	Periodo de Monitoreo
Partículas suspendidas totales	275 µg / m ³	24 horas
Bióxido de azufre	0.13 ppm	24 horas
Monóxido de carbono	13 ppm	8 horas
Bióxido de Nitrógeno	0.21 ppm	1 hora
Ozono	0.11 ppm	1 hora

♦ Datos tomados de: "Diario oficial de la federación", 29 de Noviembre de 1982.

De acuerdo a esta tabla, se calculan los grados IMECA en una región, tomando como base las mediciones tenidas de los monitoreos y se da el reporte final, el cual parte de los 100 grados IMECA, que se consideran como satisfactorios y a partir de este parámetro se comienzan a evaluar los valores siguientes, de acuerdo a los daños que ocasionen a la población.

En la siguiente tabla se muestra la relación existente entre el valor de la del índice de contaminación (grado IMECA), la calidad del aire y los efectos que produce esta en la población.

Tabla 2.3 Calidad del aire

IMECA	CALIDAD DEL AIRE	EFFECTOS
0 - 100	Satisfactoria	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades físicas
101 - 200	No satisfactoria	Molestias en personas sensibles
201 - 300	Mala	Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimiento respiratorio.
301 - 500	Muy mala	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población sana

♦ Datos tomados de: "Diario oficial de la federación", 29 de Noviembre de 1982.

En el caso de la ciudad de México los problemas de contaminación son alarmantes debido a la localización geográfica; pues se localiza en un valle rodeado por cerros en el lado sur, lo cual impide que las corrientes de aire que vienen de norte a sur despejen los contaminantes. Por el contrario los concentran en la zona sur, lo cual acarrea como consecuencia que los niveles de contaminación no sufran una disminución considerable a menos que llueva. Cabe mencionar que el llamado Valle de México en realidad no es un valle sino un cuenca pues no cuenta con una línea de drenaje general que la modele.

En el apéndice 2, se muestra información adicional sobre los criterios de la calidad del aire en la zona metropolitana

2.2 Combustibles

Un combustible es un elemento o compuesto que al estar en condiciones de presión y temperatura adecuadas y en contacto directo con el oxígeno, puede oxidarse, liberando energía en forma de calor.

Los combustibles se pueden clasificar de varias formas, siendo las más importantes las siguientes:

— De acuerdo a la fase del combustible.

- Sólidos - Carbón (vegetal y mineral), papel, madera, resinas, etc
- Líquidos - Gasolina, diesel, combustibleo, petróleo, etc
- Gases - Gas natural, gas L. P., etc

— De acuerdo a su composición química.

- Carbón mineral
- Hidrocarburos - $C_x H_y$
- Alcoholes - $C_x H_y O_z$

Sin embargo para los fines de este trabajo, únicamente nos interesan de estas clasificaciones, los combustibles gaseosos de la primera y los hidrocarburos de la segunda. Así de los hidrocarburos gaseosos nos enfocaremos a las parafinas, debido a que este grupo contiene a los elementos que constituyen a los principales combustibles gaseosos, gas LP y gas natural.

La familia de las parafinas se encuentra regida por la expresión:



Las moléculas de esta familia [22 - 24], se encuentran unidas por enlaces covalentes simples, por lo que el número de átomos de hidrógeno en cada una de las moléculas es el máximo posible, debido a lo cual a estos compuestos también se les llama hidrocarburos saturados de hidrógeno.

Una característica importante de estos compuestos, es que la fase de los mismos está regida por la longitud de la cadena, pues entre más crece esta, la fase tiende al estado sólido; mientras que por el contrario cuando esta decrece, la fase tiende a estado gaseoso.

Algunos componentes de esta familia son:

- Metano CH_4
- Etano C_2H_6
- Propano C_3H_8
- Butano C_4H_{10}
- Pentano C_5H_{12}
- Exano C_6H_{14} , etc.

De los cuales los más importantes son el metano, propano y butano, debido a que el metano es el principal constituyente del gas natural, mientras que el butano y propano lo son del gas LP. Siendo este par de combustibles los más usados, tanto en la industria, como en los transportes.

2.2.1 Gas natural (Generalidades)

2.2.1.1 Obtención

El gas natural puede obtenerse de diversas fuentes como pantanos, material en descomposición, minas, en depósitos subterráneos, etc. Sin embargo existen básicamente cuatro maneras para la obtención del gas natural [25-27]; las cuales son

- Abiogénesis
- Biogénesis
- Gas relacionado con el carbón.
- Gas relacionado con el petróleo.

1. Abiogénesis - En la abiogénesis, se manifiesta que el gas natural (metano), se forma a través de fenómenos naturales, tales como tormentas eléctricas, erupciones volcánicas, terremotos, etc., ocurridos hace mucho tiempo, los cuales con ayuda de la energía calorífica (solar), y la generada por las erupciones volcánicas formaron una parte del gas natural existente en la actualidad, es decir sin la ayuda de degradación bacteriana

2. Biogénesis - Por el contrario a lo anterior la biogénesis estipula que el gas natural, se forma por reacciones de degradación bacteriana a través de la descomposición de materia orgánica por bacterias aeróbicas o anaeróbicas. El proceso por el cual la materia orgánica es descompuesta microbióticamente, se representa en dos reacciones bacteriales. Usando Oxígeno como solvente, la primera da como resultado los siguientes subproductos CO_2 , H_2O , y el ion NO_3^- derivado de una disolución en presencia de nitrato. Subsecuentemente, la reacción anaeróbica produce nitrógeno, y dióxido de carbono con sulfuro y H_2S derivado de la disolución de los sulfatos. El metano es producido por digestión anaeróbica en dos fases [25 y 24] Las grandes moléculas son transformadas en alcoholes y ácidos grasos, las cuales son reducidos de acuerdo a las reacciones siguientes:



Un sistema productor de metano, es el mar, en este se produce metano por la descomposición de los silicatos que hay en este por acción bacteriana, sin embargo el número de bacterias que vive en el mar varía de acuerdo a la profundidad de este, pues entre más cerca se esté de la superficie, el número de bacterias aumentará, mientras que a mayor profundidad, el número de

bacterias disminuirá, debido a que las condiciones para la proliferación de las bacterias disminuye con la profundidad. Lo anterior se observa en la tabla 2.4

Tabla 2.4 Número de bacterias en una playa de San Diego, California
(Profundidad del agua: 503 in)

Profundidad de la medición (in)	Bacterias viables/ gm
0 - 2	63,000,000
2 - 4	1,000,000
6 - 8	900,000
10 - 12	65,000
18 - 20	40,000
36 - 38	4,100
60 - 62	1,600
72 - 74	400

↑Tabla tomada de: "Natural gas", E. N. Tirasso, Houston Texas E. U. 1979

3. Gas relacionado con el carbón - Los combustibles gaseosos son obtenidos generalmente por la combustión de carbón con varias cantidades de aire (gasificación). El combustible gaseoso generado está compuesto en su mayoría por metano e hidrógeno. A este proceso también suele llamarse destilación seca del carbón, y alcanza temperatura de 1000 a 1150 °C, más sin embargo en los procesos convencionales el rango de temperatura por seguridad oscila entre 500 y 700 °C [25].

Tabla 2.5 Composición del Carbón por proceso de recirculación (gasificación)
Gas de carbón (Composición % por volumen)

Componente	Reactor horizontal	Reactor Vertical con vaporizador	Reactor de Baja temperatura
CO ₂	2.0	4.0	4.0
O ₂	0.4	0.4	0.5
CnHm	3.6	2.0	5.5
CO	8.0	18.0	4.0
H ₂	52.0	49.4	30.0
CH ₄	30.0	20.0	52.0
N ₂	4.0	0.2	4.0

↑Tabla tomada de: "Natural gas", E. N. Tirasso, Houston Texas E. U. 1979

La reacción por la cual se generan los gases del carbón [25]es la siguiente



4. Gases relacionados con el petróleo. Una cantidad de metano, se obtiene como consecuencia de los procesos de obtención del petróleo, pues en los yacimientos, generalmente se encuentran ambos productos, es decir petróleo y metano separados por las diferentes densidades. Otra parte del metano se obtiene como un subproducto de la refinación del petróleo, a través de cracking catalítico [12], con el cual se logran reducir las moléculas grandes de los elementos que forman el petróleo, para que se formen otras más simples, tales como las del metano, propano, butano, etc.

La composición típica del gas natural extraída de los yacimientos, varía de acuerdo a la región en la que se localice el yacimiento, esto se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2.6 Composición típica de algunos gases naturales (porcentaje en volumen)

Componente	Lemmen Bank mar del norte	Gronningen Holanda	Brunei	Libia	Argelia	Nigeria
Metano	94.8	81.7	88.0	71.4	86.5	88.1
Etano	3.0	2.7	5.1	16.0	9.4	6.3
Propano	0.6	0.4	3.8	7.9	2.6	2.1
Butanos	0.2	0.1	1.8	3.4	1.1	0.3
Pentanos	0.2	1.1	0.2	1.3	0.1	1.1
Nitrógeno	1.2	14.0	0.1	--	0.3	--
Dióxido de carbono	--	--	--	--	--	2.1

* Tabla tomada de "Natural Gas", E. N. Trasso, Houston Texas E. U. 1979

2.2.1.2 Calidad del gas natural

El gas natural, por definición es una mezcla de hidrocarburos y material no combustible en estado gaseoso (gases nobles), sin embargo el componente principal es el metano. La variación de los componentes de esta mezcla pueden ocasionar efectos en la medición del flujo, en la eficiencia de las tuberías y en los depósitos. Por ello, se han creado especificaciones de calidad del gas natural aplicadas a las transacciones de este combustible, para lograr una homogeneidad. Una de estas especificaciones típicas sobre la calidad del gas natural [28] es dada a continuación:

- Oxígeno. El oxígeno contenido no excederá el 0.1% por volumen los depósitos serán diseñados para mantener al gas libre de oxígeno.
- Sulfuro de hidrógeno (H₂S). El sulfuro de hidrogeno contenido, no excederá 0.25 gramos por ft³ de gas.
- Mercaptanos (Compuestos del grupo -SH). El gas no debe contener mas que 0.25 gramos por 100 ft³ de gas.
- Total de sulfatos. El contenido total de sulfato, incluyendo mercaptanos y sulfuro de hidrogeno, no debe de exceder 2 gramos por 100 ft³ de gas.
- Dióxido de carbono. El dióxido de carbon contenido, no excederá de 2% por volumen.
- Líquidos. El gas debe estar libre de agua y otros líquidos condensables a la temperatura y presión a la cual el gas es suministrado, y el gas no debe contener hidrocarburos altamente condensables para permitir un flujo normal en la tubería, además de que el vapor de agua no debe de exceder de 3.2 Kg por 28,094 m³ (7 lb por 1,000,000 ft³).
- Polvos, gomas y materia sólida. El gas a suministrar, debe estar libre de polvos, gomas y materia sólida.
- Valor calorífico (Poder calorífico). El gas suministrado debe tener en un día, en un mes o un año, un valor no menor 35,394 KJ/m³ y no mayor que 43,777 KJ/m³ (975 - 1175 BTU/ft³).
- Temperatura. El gas no debe ser entregado a una temperatura menor de 4.50 °C y no mayor de 48.9 °C (40 - 120 °F).
- Nitrógeno. El nitrógeno contenido, no excederá del 3% por volumen.

11. Hidrógeno: El gas no contendrá monóxido de carbono, halógenos e hidrocarburos insaturados y no más que 400 ppm de hidrógeno.

12. Isopentano +: El gas no deberá contener más de 0.2 gal de isopentano o hidrocarburos pesados por 1,000 ft³.

En dado caso de que no se cumplan algunas de las características antes mencionadas, se presentarán algunos efectos.

Naturalmente, la proporción de oxígeno no varía en el gas natural, sin embargo, en los sistemas de presión puede obtenerse a través de fugas del sistema con la atmósfera. Este puede ser altamente corrosivo en concentraciones superiores a 10 ppm, dependiendo de las circunstancias que halla en el sistema.

Sulfuro de hidrógeno, sulfuros, dióxido de carbono y agua, pueden formar compuestos ácidos y poner al sistema en peligro de corrosión.

El nitrógeno es un gas inerte y únicamente ocupa espacio, lo cual reduce la capacidad de la tubería. Requiere que se suministre potencia para moverlo (junto con el metano), y no tiene valor calorífico. En exceso, puede causar problemas en la combustión, al inhibir la formación de la flama.

El isopentano y los hidrocarburos pesados pueden gotear al condensarse, bajo condiciones normales de operación y causar problemas en el manejo. También reduce la efectividad del programa de odorización del gas por absorción.

Altas temperaturas pueden ser perjudiciales para el recubrimiento de la tubería y bajas temperaturas pueden causar problemas de congelamiento.

El dióxido de carbono y el nitrógeno, juegan un papel importante en la determinación del factor de supercompresibilidad en el flujo.

En conclusión, el oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, Sulfuro de hidrógeno, sulfuros, agua, etc no contribuyen a aumentar el valor calorífico del gas, por lo que estos componentes pueden ser eliminados, sin que el combustible pierda esa característica.

Para determinar la calidad del gas natural se realizan pruebas, las cuales se encuentran regidas por organizaciones tales como la AGA (American Gas Association). Una de estas pruebas es la cromatografía, con la cual se obtiene la composición del gas analizado. Adicionalmente, se emplean instrumentos analíticos para determinar el vapor de agua, los sulfuros, el total de sulfuros, etc.

El método para obtener la cromatografía del gas, se divide en dos fases:

1. Obtención de una muestra representativa.
2. Análisis de la muestra y cuantificación de los componentes detectados.

La especificación sobre la calidad del gas dada anteriormente, se encuentra regida por las normas de AGA.

2.2.1.3 Propiedades físicas.

La unidad fundamental de cualquier compuesto no iónico, sea sólido, líquido o gas, es la molécula. Como la molécula del metano es muy simétrica (tetraédrica), las polaridades de los enlaces carbono-hidrógeno individuales se anulan, de lo que resulta que la molécula es en si no polar [22-24].

La atracción de las moléculas no polares queda limitada a las fuerzas de Van der Waals, para moléculas tan pequeñas, estas fuerzas son muy débiles, por lo que son vencidas con facilidad por la energía térmica de modo que la fusión y ebullición se produce a temperaturas muy bajas, (P.F -183 °C ; P.E -161.5 °C), por lo que el metano es bajo condiciones ordinarias, un gas.

El metano es incoloro y, en estado líquido es menos denso que el agua (densidad relativa 0.4), por lo que es apenas soluble al agua, sin embargo, es muy soluble en compuestos orgánicos como gasolina, éter y alcohol

Sin embargo, las propiedades físicas de mayor interés [29] son aquellas que tienen un rol importante en los distintos procesos a los cuales es sometido (limpieza, medición de gasto, combustión, etc), siendo estas, la densidad, gravedad específica, temperatura crítica, presión crítica, punto de rocío, punto de ebullición, calor específico, calor latente de vaporización, peso molecular, viscosidad, octanaje, y fase

1. Densidad - Es la masa por unidad de volumen. La densidad del gas es usualmente representada como la masa en lb por pie cúbico. El volumen es calculado a condiciones estándar de 60 °F y 14.7 psia (15.5 C y 0.704 Mpa), siendo el valor de 0.0763 lb/ft³ (1.22 Kg/m³).
2. Gravedad específica - Este es un factor muy importante en el momento de la medición del flujo. Se define como el valor de la densidad del gas entre el valor de la densidad del aire a las mismas condiciones o es el valor de la masa del gas entre el valor de la masa del aire
3. Temperatura crítica.- Es la temperatura a la cual un hidrocarburo puede ser licuado, tomando en cuenta la cantidad de presión que se aplique. La temperatura crítica del metano es de -116.6 °F (-82 °C). Si la temperatura del gas es superior a ésta, la masa no podrá ser licuada aunque se le aplique mucha presión.
4. Presión crítica.- Es la presión requerida para licuar un gas a la temperatura crítica. Para el metano estas propiedades son -116.6 F y 667.8 psia (-82 C y 32 Mpa)
5. Punto de ebullición.- Es la temperatura a la cual se formaría la primera burbuja en el líquido a una presión dada. O es la temperatura a la cual una mezcla de hidrocarburos se vaporizaría a una presión dada.
6. Punto de rocío.- Es la presión a la cual se formaría la primera gota en el sistema, a una presión dada. O la temperatura a la cual se condensaría una mezcla a determinada presión.
7. Calor específico.- El calor específico de cualquier sustancia se define como la energía necesaria para elevar a una libra de materia un grado Fahrenheit.
8. Calor latente de vaporización.- Es el calor necesario para cambiar el estado de la mezcla, de líquido a gas.
9. Peso molecular.- Toda la materia tiene un peso molécula determinado, el cual está directamente relacionado al peso de las sustancias que lo forman (en caso de mezclas) fin el caso del gas natural este peso molecular es la suma del peso de cada uno de sus componentes.
10. Octanaje.- El valor es muy importante en el proceso de combustión de los combustibles, pues con este valor es posible predecir la presión que soportará el combustible antes de que comience el proceso de combustión. El valor para el metano es de 120.
11. Razón de compresión crítica.- Al igual que en el punto anterior esta propiedad es importante en la combustión. El valor para el metano es 12.6 in (0.32 m).
12. Viscosidad.- En un flujo newtoniano, se define como una manifestación del movimiento molecular dentro del fluido sometido a esfuerzos cortantes (viscosos). Este valor se expresa en centipoises. Una forma para evaluar este valor [30] es con la expresión siguiente

$$\tau_{yx} = \mu (du/dy)$$

Los movimientos aleatorios de las partículas del fluido, se encuentran afectados por la temperatura del medio, por lo que esta propiedad se encuentra en función de la temperatura

Algunas propiedades físicas de este gas se observan en la tabla 2.7

Tabla 2.7 Propiedades físicas del gas natural obtenidas del reporte No 3 de AGA, de 1985. Estas constantes físicas están dadas a 0.7 Mpa absolutos y 60 °C (14.73 lb/in² Abs. y 60 °F).

Componente	Gravedad específica (ideal)	Poder calórico (BTU)	(KJ)	GPM▲	Peso molecular
Metano (C ₁)	0.5539	1012.0	1067.6	0	16.04
Etano (C ₂)	1.0382	1773.7	1871.3	26.73	30.07
Propano (C ₃)	1.5225	2522.1	2660.8	27.51	44.10
Isobutano (iC ₄)	2.0068	3260.5	3439.8	32.70	58.12
n-butano (nC ₄)	2.0068	3270.1	3450	31.51	58.12
Isopentano (iC ₅)	2.4911	4011.1	4231.7	36.59	72.15
n-pentano (nC ₅)	2.4911	4018.2	4239.2	36.22	72.15
Neopentano (neoC ₅)	2.4911	3993.8	4231.5	38.30	72.15
*Hexano+ (C ₆ +)	3.3127	5288.8	5579.7	44.62	95.96
Nitrógeno (N ₂)	0.9672	0	0	0	28.01
Dióxido de car (CO ₂)	1.5195	0	0	0	44.01

* C₆+ Valores probados por cromatografía de gas según las recomendaciones de GPA (Gas Procedure Association).

▲ GPM son galones licuables por 1000 ft³

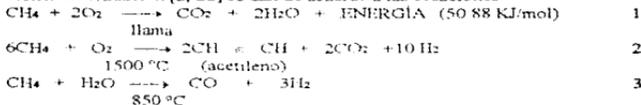
‡ Tabla tomada de: "Natural Gas Measurement and Control", Lehit Datta, Barruda, U.S.A. 1992

2.2.1.4 Estequiometría.

Debido a que la estructura de la molécula es no polar, las reacciones catalíticas no se realizan, debido a que estas únicamente ocurren entre moléculas polares, por lo que la utilización del convertidor catalítico, para eliminar metano en las emisiones contaminantes de los vehículos automotores, resulta inadecuado [8], sin embargo recientemente se están realizando estudios encaminados a la realización de este tipo de reacciones, a través de convertidores a base de zeolitas [31, 32]

Por ello, las reacciones más importantes del metano, son las de oxidación y las de halogenización.

Las reacciones de oxidación [2, 22] se dan de acuerdo a las ecuaciones

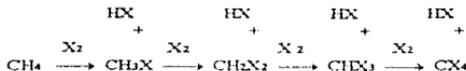


Como puede verse, las reacciones de oxidación (estequiométrica), se llevan a cabo de manera normal, produciendo CO_x y agua en las primeras dos ecuaciones, sin embargo en la tercera, se genera como producto de la combustión acetileno.

Sin embargo de estas reacciones, la más importante, debido a que es la que se lleva a cabo en la combustión en cámaras cerradas (cilindros) es la ecuación 1.

Por otra parte, las reacciones de halogenización no son de importancia para los fines de este trabajo, sin embargo se considera que es conveniente hacer un pequeño análisis de este tipo de reacciones para tener un panorama más amplio del comportamiento del metano.

Las reacciones de halogenización, a diferencia de las de oxidación, son del tipo endotérmico, es decir que para que se lleven acabo es necesario aportar energía para que la reacción comience. Estas se llevan acabo de acuerdo a la expresión siguiente [22]:



Donde : X₂ representan los halógenos (Iodo, Flúor, Cloro y bromo)

Las reacciones de halogenización varían de acuerdo a los elementos que entran en contacto, siendo por consecuencia que las características de las reacciones difieren de acuerdo al halógeno que se utilice. Así por ejemplo, los materiales más activos son el flúor y el cloro, teniendo reacciones difíciles de controlar, pues son explosivas y sus productos son reactivos (propensos a volver a reaccionar con otros elementos que estén en contacto con ellos), por el contrario, al usar bromo o iodo, las reacciones son menos violentas que las anteriores, y los productos de éstas no son reactivos, es decir que generan productos estables.

2.2.1.5 Relación aire / combustible.

La relación aire / combustible se utiliza para determinar la cantidad de aire que se necesita para realizar una oxidación completa de la unidad de combustible; para el caso del gas natural el análisis sería el siguiente:

Si hacemos la consideración de que el gas natural es en su mayoría metano, obtendríamos la relación de combustión:



haciendo el balance de peso molecular se tiene

$$\begin{array}{l} 12 + 4(1) = 16 \text{ kilogramos de metano} \\ 2(16 \times 2) = 64 \text{ O}_2 \end{array}$$

la proporción de pesos de ambas sustancias es

$$16/64 = 0.25 \text{ Kg CH}_4/\text{Kg O}_2$$

Recordando que la proporción másica de oxígeno en el aire es de 0.21, respecto al resto de los gases, resulta que la relación del metano con el aire es

$$0.25 \times 0.21 = 0.0525$$

o lo que es igual, con respecto a la unidad

$$1/0.0525 = 19.05 \text{ Kg aire/Kg CH}_4$$

Lo anterior significa que por cada unidad de metano, se requieren 17.4 unidades de aire. De manera análoga, el valor anterior puede obtenerse para la gasolina (considerando que la composición química promedio de la gasolina es parecida a la del octano), dando como resultado 15.75. Este valor es importante debido a que las gráficas que se mostrarán a continuación son referidas, a combustión con gasolina.

Al aumentar la cantidad de combustible o de aire respecto a la estequiométrica, y si se graficaran esos valores, se tendría una curva como la de la figura 2.3.

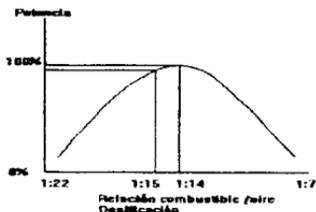


Fig. 2.3 Curva que muestra la relación combustible aire de acuerdo a la potencia del motor, para gasolina.

• Figura tomada de "Carburadores", Miguel A. Castro ; edit. C. E. A. C.; Barcelona, España; 1995.

Aún cuando por el desarrollo de la fórmula química se ha determinado la cantidad estequiométrica de aire para que se produzca una combustión completa del combustible, en la práctica ocurre que la proporción de mezcla varía, haciendo mezclas ricas o pobres. Una mezcla rica es aquella en la que el valor de la relación es menor que el ideal (15.75), y una mezcla es pobre cuando dicho valor sobrepasa el valor ideal. Lo anterior también se determina mediante la relación aire-combustible, la cual se define como:

$$\lambda = (A/C)_{\text{actual}} / (A/C)_{\text{estequiométrica}}$$

Así se tiene que:

- Mezcla pobre en combustible $\lambda > 1$
- Mezcla estequiométrica $\lambda = 1$
- Mezcla rica en combustible $\lambda < 1$

Sin embargo el parámetro más usado es el inverso a la relación aire-combustible, al cual se le llama razón de equivalencia y se expresa:

$$\phi = 1 / \lambda = (C/A)_{\text{actual}} / (C/A)_{\text{estequiométrica}}$$

Utilizando ahora la razón de equivalencia se tiene que:

- Mezcla pobre en combustible $\phi < 1$
- mezcla estequiométrica $\phi = 1$
- Mezcla rica en combustible $\phi > 1$

Lo anterior se retomará más adelante para explicar el proceso de carburación en motores de combustión interna.

2.3 Motores

Un motor es un dispositivo mecánico mediante el cual es posible transformar cualquier tipo de energía, en energía mecánica de movimiento. Así un motor de combustión interna, es una máquina que transforma la energía calorífica en energía mecánica. La energía calorífica es obtenida de la combustión de una mezcla del combustible con el aire, en un espacio contenido en un cilindro.

Los motores de combustión interna pueden clasificarse de diferentes formas [33]:

- 1.- Por la aplicación:
 - Automóviles
 - Autos de carga
 - Aviones de pasajeros
 - Barcos
 - Generación de potencia
 - Sistemas de potencia
- portátiles
 - Aviones ligeros
 - etc.
- 2.- Diseño del motor:
 - Motores reciproscantes (Arreglo de los cilindros):
 - En línea
 - En V
 - Radial
 - Opuestos
 - Motores rotatorios:
 - Turbinas
 - Motores a reacción
 - Wankel y otras
- 3.- Ciclo de trabajo:
 - Cuatro tiempos
 - Aspiración natural
 - Supercargado
 - Turbocargado.
 - Dos tiempos
 - Carter limpio
 - Turbocargado
 - Supercargado
- 4.- Localización de las válvulas y diseño del puerto
 - Válvulas en el cabezal superior (cabezal en D)
 - Válvulas en el cabezal inferior (cabezal en L)
 - Válvulas rotatorias
- 5.- Combustible:
 - Gasolina
 - Diesel
 - Gas natural
 - Gas I.P.
 - Alcoholes
 - Hidrógeno.
 - Turbocina etc.

6.- Método de preparación de la mezcla:

- Carburación.
 - Inyección de combustible
- A través de los puertos interiores del tanque.
 - A través de los puertos de los cilindros.

7.- Método de Ignición:

- Ignición por chispa.
 - Ignición por compresión.
- Flama premezclada.
 - Flama difusiva.

8.- Diseño de la cámara de combustión:

- Cámara abierta
 - Cámara dividida
- En forma de disco.
 - Hemisférica
 - Triangular.

9.- Método de enfriamiento:

- Con agua
 - Aire.
- Conveccion natural y radiación.

Sin embargo, los motores que se analizarán para este trabajo son los reciprocantes, por lo que a continuación se da una clasificación de estos de acuerdo a su aplicación.

Tabla 7

Clasificación de los Motores Reciprocantes de acuerdo a su aplicación

Clase	Servicio	Rango aproximado de potencia del motor (W)	Tipo Predominante		
			D o SI	Ciclo	Enfriamiento
Vehículos de carretera	Motos, motocicletas	0-75-70	SI	2, 4	A
	Carros pequeños	15-75	SI	4	A, W
	Carros grandes	75-200	SI	4	W
	Comerciales ligeros	35-150	SI, D	4	W
	Comerciales pesados.	120-400	D	4	W
Vehículos de campo	Vehículos ligeros (aeroplano, etc.)	15-15	SI	2, 4	A, W
	Agricultura	3-150	SI, D	2, 4	W
	Movimiento de tierra	40-750	D	2, 4	A, W
	Militares	40-200	D	2, 4	W
					A, W
Ferroviarios	Carro riel	150-200	D	2, 4	W
	Locomotoras	400-3000	D	2, 4	W
Marinos	Fuera de borda	0-4-75	SI	2	W
	Embarcaciones	4-750	SI, D	4	W
	Naves ligeras.	30-2220	D	2, 4	W
	Barcos.	3500-22000	D	2, 4	W
	Barcos de auxilio.	75-750	D	4	W
Vehículos aéreos	Aeroplanos.	45-2700	SI	4	A
	helicópteros	45-1500	SI	4	A
Uso casero	Podadoras	0-7-3	SI	2, 4	A

	Barredoras de nieve	2-5	SI	2,4	A
	Tractores ligeros	2-8	SI	4	A
Estacionarios	Servicios de construcción.	7-400	D	2,4	W
	Potencia electric.	25-22000	D	2,4	W
	Tuberías de gas	750-5000	SI	2,4	W

Notas:

SI = Ignición por chispa, D = Diesel, A = Aire frío, W = Agua fría.

Tabla tomada de: "International Combustion Engine Fundamentals", John B. Heywood, ed., Mc Graw Hill U. S. A. 1988.

2.3.1 Termodinámica del motor de encendido por chispa y por compresión.

El funcionamiento de un motor de encendido por chispa, está regido por el ciclo Otto. Este ciclo puede llevarse a cabo en cuatro o en dos tiempos, debido a lo cual a los motores que funcionan de acuerdo a este ciclo también se les conoce como motores de cuatro o dos tiempos.

En el caso del motor de cuatro tiempos, estos son los siguientes:

1. Compresión adiabática 1-2
2. Suministro de calor a volumen constante 2-3
3. Expansión adiabática 3-4.
4. Eliminación de calor a volumen constante 4-1.

Los cuales se muestran en la figura 2.1



Fig. 2.1 Diagramas PV y TS del ciclo Otto ideal

Así al moverse el pistón de la posición 1 hacia el PMS, comprime la mezcla aire-combustible contenida dentro del cilindro adiabáticamente, hasta llegar al punto 2. Cabe mencionar que este proceso se realiza idealmente a entropía constante, cosa que no sucede en la realidad, pues el proceso no es reversible. Posteriormente se suministra calor, mediante la combustión del combustible de manera instantánea, haciendo que la presión y temperatura aumenten, este proceso ocurre a volumen constante 2-3. Al regresar el pistón a la posición del PMI se disipa calor a volumen constante, al abrirse la válvula de escape, hasta que se regrese al estado inicial 4-1.

En teoría un nuevo ciclo podría comenzar en este punto, sin embargo es necesario sacar los gases producto de la combustión del cilindro, lo cual necesitaría el mismo trabajo que se hace en primera instancia, solo que es de signo contrario, sin embargo esta parte del ciclo no afecta al trabajo neto y únicamente el ciclo 1-2-3-4-1 es el que tiene importancia en el análisis termodinámico.

Si consideramos un sistema cerrado a la mezcla, al aplicar la primera ley a los procesos de compresión y expansión donde $q = 0$, se tiene

$$w = \Delta u$$

En los procesos de suministro y desecho de calor a volumen constante, donde $w = 0$

$$q = \Delta u$$

Por otra parte se tiene que:

$$q_{ent} = q_{2-3} = u_3 - u_2 = C_v(T_3 - T_2)$$

y

$$q_{sal} = -q_{4-1} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1)$$

De lo anterior se deduce que el trabajo es la suma de ambos calores por lo que el trabajo total es

$$w_{neto} = C_v(T_3 - T_2) - C_v(T_4 - T_1)$$

De lo anterior se puede deducirse la eficiencia térmica del motor como:

$$\begin{aligned} \eta_t &= W_{neto} / q_{ent} \\ &= (C_v(T_3 - T_2) - C_v(T_4 - T_1)) / C_v(T_3 - T_2) \\ &= 1 - ((T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)) \\ &= 1 - ((T_1 / T_2) \cdot ((T_4 / T_1) - 1) / ((T_3 / T_1) - 1)) \end{aligned}$$

del diagrama del ciclo se observa que

$$V_2 = V_3 \quad y \quad V_4 = V_1.$$

Por lo que:

$$(T_2 / T_1) = (V_1 / V_2) e^{k-1} \quad y \quad (T_3 / T_4) = (V_4 / V_1) e^{k-1}$$

Por lo tanto

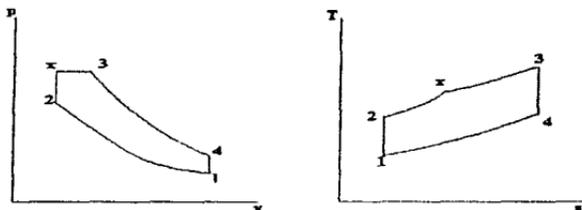
$$(T_2/T_1) = (T_3/T_4) \text{ y } (T_4/T_1) = (T_3/T_2)$$

$$\therefore \eta = 1 - (T_1 - T_2) = 1 - (V_2 - V_1) e^{k-1} \\ = 1 - (1 / (r e^k - 1))$$

donde r es la relación de compresión.

Los motores de compresión, funcionan de acuerdo al ciclo Diesel. El ciclo Diesel tiene dos variantes, el ciclo teórico y el dual; el ciclo teórico es de aplicación limitada por ello se analizará únicamente el ciclo dual.

El ciclo Diesel dual se muestra en la figura 2.2.



*Diagrama PV y TS del ciclo dual con aire normal.

Fig. 2.2 Diagrama PV, TS del ciclo Diesel con dual.

En la figura se muestra un suministro corto de calor a volumen constante 2-x es seguido por un segundo proceso de suministro de calor a presión constante 3-x. las otras tres partes son similares a las del ciclo Otto [19].

La eficiencia relativa del ciclo dual con aire normal depende de las cantidades de calor que entran y salen. El calor que se entrega durante el proceso a volumen constante 2-x es:

$$(T_x - T_2) + k(T_3 - T) \\ q_{ent} = C_v(T_x - T_2)$$

Si se supone que los calores específicos son constantes. Para la trayectoria de la presión constante (x-3) el suministro de calor es:

$$q_{\text{ent}} = C_p (T_3 - T_x)$$

Por lo tanto la entrada total de calor es:

$$q_{\text{ent, tot}} = C_v (T_x - T_2) + C_p (T_3 - T_x)$$

y el calor liberado a volumen constante es:

$$q_{\text{sal}} = C_v (T_4 - T_1)$$

Haciendo un análisis similar al que se hizo con el ciclo Otto, se tiene que la eficiencia térmica del ciclo Diesel es:

$$\eta_t = 1 - (1 / (r e^{k-1})) (r_p (r e^k - 1) / k r_p (r e - 1) + r_p - 1)$$

donde:

$$r = V_1 / V_2$$

$$r_e = V_3 / V_x = V_3 / V_2$$

$$r_p = P_x / P_2 = P_3 / P_2$$

$$k = C_p / C_v$$

Los motores para hacer conversión de la energía calorífica de la mezcla en energía mecánica, necesitan de sistemas auxiliares tales como el de carburación, lubricación, enfriamiento, encendido etc. De los cuales nos enfocaremos a la carburación principalmente, debido a que de esta depende la eficiencia de la combustión del motor, pues si se tiene una correcta carburación, la combustión será buena y la cantidad de contaminantes será pequeña. La alimentación de los motores diesel no se estudiará pues sale de los alcances del trabajo.

2.3.2 Sistemas de carburación.

La carburación de los motores ocupa un papel importante en el aprovechamiento de la energía de los combustibles, pues es aquí donde se realiza la mezcla aire combustible.

Existen básicamente dos sistemas de carburación

- A través del carburador
- Inyección de combustible

El problema principal de la carburación es la de saber la proporción adecuada de la mezcla aire-combustible.

Haciendo un cálculo parecido al realizado en el apartado 2.2.1.4 para el caso del gas natural, puede obtenerse la relación aire/combustible para la gasolina (considerando que la composición química promedio de la gasolina es parecida a la del octano), dando como resultado 15.75. Este valor es importante debido a que las gráficas que se mostrarán a continuación son referidas, a combustión con gasolina.

Al aumentar la cantidad de combustible o de aire respecto a la ideal, y si se graficaran esos valores, se tendría una curva como la de la figura 2.3.

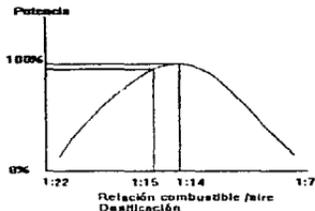


Fig. 2.3 Curva que muestra la relación combustible aire de acuerdo a la potencia del motor.
 ♦ Figura tomada de "Carburadores"; Miguel A. Castro; edit. C. E. A. C.; Barcelona, España; 1995.

Aún cuando por el desarrollo de la fórmula química se ha determinado la cantidad estequiométrica de aire para que se produzca una combustión completa del combustible, en la práctica ocurre que la proporción de mezcla varía, haciendo mezclas ricas o pobres.

Tanto mezclas ricas como pobres, son usadas durante el funcionamiento normal de un motor [32]. La utilización de mezclas ricas es deseable en:

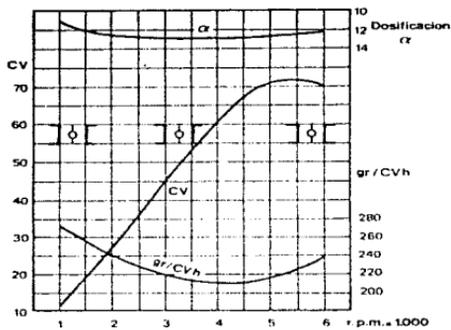
- 1 - Al arrancar el motor
- 2 - Al acelerar
- 3 - Al pedirle al motor la máxima potencia
- 4 - En ralentí

Por otra parte las mezclas pobres son deseables cuando

- 1 - El motor se mantiene a velocidad constante
- 2 - Cuando se desacelera y/o frena

Lo anterior se deduce de las siguientes gráficas, que fueron realizadas en unidades distintas a las del sistema internacional de unidades, así, el valor de α que representa la dosificación de combustible en las gráficas equivale a la razón de equivalencia ϕ

En la figura 2.4, se representa el caso en el que se exige al motor una aceleración súbita, por cuanto la marposa del carburador, está desde el primer momento, totalmente abierta. En este momento de aceleración máxima, la dosificación α guarda una relación entre poco más de 11, hasta una relación alrededor de 13, por lo tanto el motor trabaja con mezclas de dosificación muy rica.



REGIMEN DE ROTACION DEL MOTOR

En la figura 2.5, se presenta un motor que opera bajo condiciones normales. Aquí se mantiene el supuesto de que la mariposa se abre progresivamente, tal como se indica en el centro de la gráfica. Se parte de una mezcla rica para la aceleración (pues se supone que el automóvil ya está en movimiento y con la marcha directa puesta) y con la mariposa abierta a medios gases, se llega a dosificaciones de 16, con el motor a 3 500 r.p.m. y cerca de 90 km/h. Posteriormente al abrir más la mariposa, la dosificación α aumenta con la potencia hasta el nivel aproximado de 12.5, con lo que la curva de consumo comienza a subir.

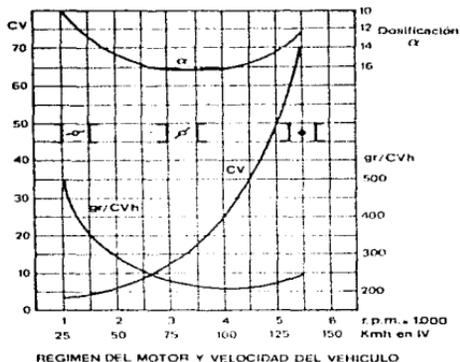


Fig. 2.5 Gráfico similar al anterior, pero mostrando las condiciones entre las distintas curvas de acuerdo con una progresiva apertura de la mariposa de aceleración.

En la figura 2.6, se muestra cómo se produce la aceleración cuando hay una apertura rápida de la mariposa y el motor tiene que dar una respuesta aumentando a su régimen con la mayor rapidez. En este caso el motor requiere una mezcla rica a plena potencia con una dosificación de 12 y 13 tal como se muestra en la gráfica. Obsérvese que la depresión en el colector de admisión es mínima debido a la apertura total de la mariposa. En el régimen de utilización, por el contrario, con una apertura progresiva de la mariposa, la depresión decrece a medida que se abre la misma y va requiriendo una dosificación similar a la del caso anterior. Pero al llegar a una zona determinada (entre 50 y 125 Km/h), se precisa de una supletoria inyección de mezcla rica para consumir las cualidades del aumento del régimen. Si este suplemento está en la zona de dosificación marcada con líneas diagonales, la aceleración es correcta, en caso contrario es deficiente; por lo que una aceleración es buena siempre que halla una mezcla rica y mala cuando ésta sea pobre.

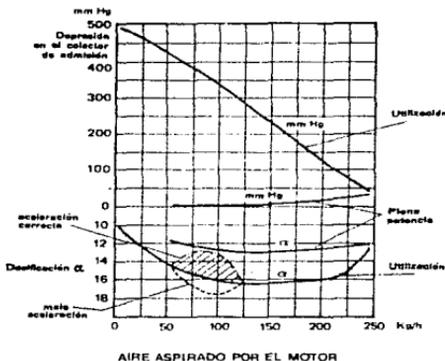


Fig. 2.6 Gráfico que muestra la dosificación α de la mezcla de acuerdo con el aire aspirado (depresión) en el colector. Las curvas α son las mismas que en los gráficos anteriores. La zona rayada muestra el momento de la aceleración.

Lo anterior debe ocurrir sin importar el sistema empleado para la fabricación de la mezcla, ya sea a través de el carburador o por inyección de combustible.

Ahora es necesario explicar brevemente el funcionamiento de ambos sistemas.

El sistema de carburación, produce la mezcla a partir de los valores de depresión que existen en el interior de los tubos que alimentan cada uno de los cilindros y que constituyen el colector de admisión. Cuando una de las válvulas de admisión se abre y pone el interior del cilindro en comunicación con la atmósfera a través del cuerpo del carburador, y se produce el descenso del émbolo o pistón del motor, dentro del cilindro se crea una depresión importante que la presión atmosférica tiende a estabilizar. Ello se produce mediante una fuerte corriente de aire que circula a través del cuerpo del carburador. Este aire succiona a su paso, por un difusor que acelera su velocidad, la gasolina que puede salir por un tubo surtidor, que se encuentra en el difusor arrastrando con ello la gasolina pulverizada en forma de niebla que se adiciona a la corriente de aire formando una mezcla gasolina-aire.

Esta mezcla va al interior de la cámara de combustión, en la que se oxidará una vez comprimida, a través de una chispa eléctrica que iniciara tal proceso. Este sistema, se muestra en la fig. 2.7.

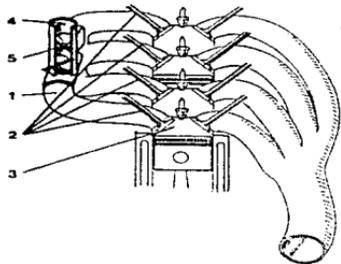


Fig. 2.7 Esquema que muestra la disposición de un carburador en un motor.

- 1.- Colector, 2.- Válvulas de admisión, 3.- Cámara de combustión,
- 4.- Cuerpo del carburador, 5.- Surtidor de salida de la gasolina.

Por otra parte, el sistema de carburación por inyección de combustible, dista del anterior en que para cada cilindro le corresponde un inyector, con lo que la alimentación se produce de manera individual. Además de que la cantidad de gasolina que se alimenta a cada uno de los cilindros, no está a merced de la depresión que exista en el colector de admisión, puesto que el mecanismo que determina esta cantidad no trabaja por depresión.

La cantidad de combustible inyectada debe estar por supuesto, en relación con el aire que es admitido en el colector de admisión. Por ello el sistema de inyección de gasolina debe disponer siempre de un dispositivo de control de la cantidad de aire que entra en el colector, es decir, de un controlador de caudal. La información que genera este dispositivo pasa a un distribuidor de combustible, por medio del cual se determina la cantidad de éste, que es necesario adicionar al aire para conseguir una mezcla capaz de quemarse totalmente en todos los requerimientos del motor.

Este sistema se muestra representado en la figura 2.8

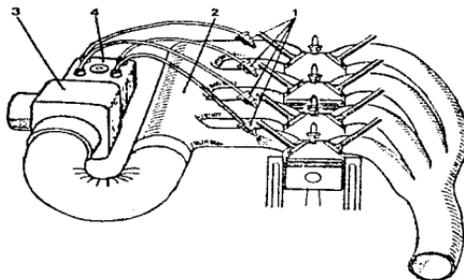


Fig. 2.8 Esquema que muestra la disposición de un sistema de inyección de gasolina:
1.- Inyectores, 2.- Colector de admisión, 3.- Aparato controlador de caudal de aire.
4.- Distribuidor de combustible

Así podemos definir algunas diferencias entre estos tipos de carburación. Estas se dan en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Comparación entre los sistemas de inyección

	Sistema con carburador	Sistema de Inyección de combustible
Alimentación de las cámaras	A través de depresión en el interior de los tubos de los cilindros	A través de un sistema de inyectores
Sistema de pulverización	A través de depresión de un difusor en el surtidor	A través de los inyectores.
Calidad	Buena	Excelente
Alimentación	Alimentación en conjunto	Alimentación individual.

De la tabla se deduce que el sistema de inyección de combustible, es más eficiente que el de carburador y por ello se hará un análisis de este sistema.

Cabe mencionar que la conversión de vehículos a gas natural es posible independientemente del sistema de alimentación con que cuente el vehículo, ya sea a través de la carburación o de la inyección, sin embargo dicha conversión es más eficiente cuando el sistema de carburación es el de inyección, pues con este se controla la alimentación y dosificación de la mezcla por medios electrónicos, a demás de que el sistema se encuentra mejor sellado que el tradicional con carburador.

CAPITULO 3 ANÁLISIS TECNOLÓGICO

3.1 Sistemas de alimentación de combustible (Inyección).

Los sistemas de alimentación de los vehículos de transporte terrestre masivo, solo se han desarrollado para utilizar como combustibles gasolina o diesel, y de estos el más eficiente es el inyección (como se demostró en el capítulo anterior), por ello se analizará en este apartado el sistema de inyección, pues actualmente se encuentra muy difundido, a demás de que no existe información de sistemas especialmente diseñados para el manejo de combustibles gaseosos. Sin embargo la conversión gasolina - gas de vehículos que cuentan con este sistema ofrece buenos resultados.

El análisis de la alimentación por inyección se hará considerando su funcionamiento normal, es decir para gasolina, suponiendo que el comportamiento de cada una de las partes que integran el sistema será semejante para el caso en que el combustible que se maneje sea gas.

El motor en que se basará el análisis es el de regulación Bosh, debido a que este sistema es el más usado y más económico que hay en el mercado [33]. Este motor se encuentra esquematizado, en la figura 3.1 La unidad de control, está formada por los cajones 1, 23 y 27, que reciben los datos de los sensores *a* que detecta los datos ambientales o exteriores, *a* que señala el régimen de giro, *b* que marca la presión del aire en el colector de admisión, *c* que indica los valores a que esta trabajando el motor y *d* destinado a señalar el picado. Los impulsos u ordenes generados en la unidad de control son enviados por *f* a las válvulas de inyección 2 y la bomba de alimentación 7 variando el tiempo de inyección, el avance o la alimentación según el caso.

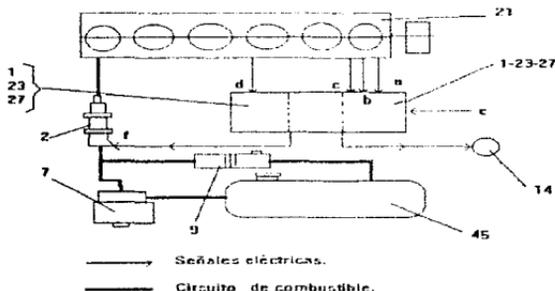


Fig. 3.1 Sistema de inyección de combustible. 1 - Unidad de control, 2 - Válvulas de inyección, 7 - Bomba de alimentación de combustible, 9 - Regulador de presión, 23 - Control de picado

Los elementos de la carburación por inyección son:

Bomba de inyección: Esta bomba, no es de membrana, sino volumétrica, según el esquema de la figura 3.2 y funciona de forma parecida a una bomba de engranajes, en la que los dientes han sido sustituidos por los rodillos 5 que tienen la ventaja de aplicarse periféricamente gracias a la fuerza centrífuga. Al conectar el pulsador de arranque, la bomba gira y alimenta, pero si el pulsador deja de actuar sin que el motor haya arrancado, la bomba también deja de actuar.

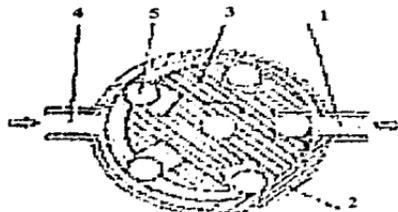


Fig. 3.2 Bomba de inyección tipo Bosch 1.- Lado de presión, 2.- Cuerpo, 3.- Rotor 5.- Rodillos

Regulador de presión de inyección: Este puede verse en la figura 3.3. Pretende solo evitar las fluctuaciones de la presión y retornar los sobrantes de la bomba al depósito. Si la presión crece, hace ceder al resorte, y el exceso de 1 descarga por 2 a través de la válvula 7, se puede trabajar de 2.5 a 3 bar.

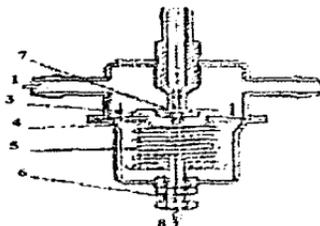


Fig. 3.3 Regulador de presión de combustible Bosch.

1.- Llegada de la gasolina, 2.- Retorno al depósito, 3.- Asiento de válvula, 4.- Diafragma, 5.- Resorte, 6.- Tornillo de ajuste y de entrada de la presión de aire P2 - Válvula, 8.- Toma de presión P2

Válvulas de inyección: Cada cilindro lleva al final del conducto de admisión y antes de la válvula, un inyector accionado por un solenoide que según la corriente que recibe, abre o cierra la inyección. Estas válvulas inyectan intermitentemente, pero dos veces por vuelta, porque el encendido depende de la chispa de la bujía, lo cual permite simplificar el encendido de todas las válvulas por un solo circuito.

La figura 3.4 muestra el funcionamiento de estos inyectores. El combustible llega por el filtro 5 pero queda cerrado por la armadura 2 que cierra la tobera 1 gracias a un muelle interior. Al recibir la corriente, el electroimán vence al resorte y el inyector deja el paso libre para que la gasolina salga de la tobera, la carrera es de 0.15 mm. Mientras hay corriente, la válvula inyecta, y esta depende de las ordenes de la unidad de control.



Fig. 3.4 Válvula de inyección Bosch. 1 - Tobera, 2 - Armadura del solenoide
3 - Arrollamiento del solenoide, 4 - Conexión solenoide, 5 - Filtro

Inyectores de arranque: Los inyectores anteriores, no son suficientes para saber las condiciones de trabajo. Para ello se requiere de elementos adicionales. Válvulas y sensores. Se sabe que cuando el motor está frío, la resistencia al paso de la mezcla es mayor, la gasolina se condensa con mayor facilidad en las paredes frías, en lugar de vaporizarse con rapidez, es decir la mezcla resulta ser pobre y no enciende. Para evitar lo anterior, se añaden las válvulas de inyección de enriquecimiento para el arranque. Estas válvulas están conectadas de tal modo que solo puedan funcionar cuando se pulsa el arrancador y además lo permite el sensor de temperatura, indicando que el motor está frío. Esta válvula se muestra en la figura 3.5. Al haber corriente, la armadura 5 abre paso a la tobera 6 que gira como una turbina pulverizando muy finamente el combustible que de este modo no llega a las paredes y difícilmente se condensa.

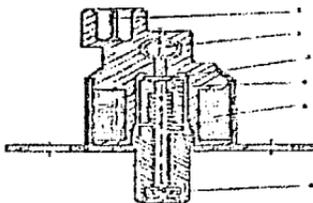


Fig. 3.5 Válvula de arranque Bosh 1.- Conexión, 2.- Llegada de gasolina, 3.- Cierre, 4.- Armadura, 5.- Arrollamiento, 6.- Tobera pulverizadora de torbellino

Sensor de temperatura: Este sensor es casi igual al de arranque, la excepción es la temporización. Este sensor es un semiconductor NTC (Coeficiente Negativo Temperatura), este disminuye su resistencia a medida que la temperatura se incrementa, y con esta señal actúa la caja de mando, pues se necesita hacer la mezcla más rica cuando más frío trabaja el motor y esto ocurre hasta que ha alcanzado un estado de equilibrio.

Sensor temporizador de arranque: Este sensor se muestra en la figura 3.6. Consta de unas resistencias 2, que calientan el bimetel 3 cortando entonces la corriente aunque se siga pulsando.

Ya se ha mencionado que con el motor frío, las resistencias al giro se incrementan, por lo que no solo es necesario inyectar una mezcla rica, sino también un exceso de mezcla, que debe ser graduado por esa temperatura. Con ese objeto aparece un dispositivo auxiliar de control de aire.

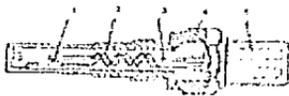


Fig. 3.6 Sensor de temperatura temporizado 1.- Contacto rele, 2.- Resistencias de calentamiento, 3.- Bimetel, 4.- Cuerpo, 5.- Conexión.

Dispositivo auxiliar de aire: Consiste en un bimetel o una carga de cera muy dilatante con la temperatura. Con ello mueve un pistón distribuidor que da paso, o lo cierra al aire adicional. Este dispositivo se muestra en la figura 3.7

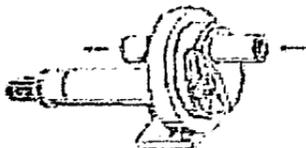


Fig. 3.7 Dispositivo auxiliar del aire Bimetalico.

Sensor de picado de caudal y de avance. Este es una sencilla y robusta membrana que detecta la presión instantánea de la cámara con base piezo-cerámica que lo hace sensor de aceleración. El valor de la aceleración o la pendiente con que sube la presión en la cámara, define el picado. El análisis de esta señal es realizada por la unidad de mando.

3.2 Alimentación a gas.

El gas natural puede comercializarse de dos formas diferentes:

- Comprimido y
- Licuado.

El gas licuado no ha tenido aceptación debido a las temperaturas a las cuales se encuentra (191 °K) lo cual podría provocar el congelamiento de la tubería, además de que se requiere de adiccionar equipo para poder evaporar el gas, aunado a lo anterior, el costo del tanque de almacenamiento es alto por ser criogénico, por lo que no es costable su uso actualmente, el costo de la conversión a gas natural licuado asciende a \$ 7 000 U. S. aproximadamente

EL gas natural comprimido a diferencia del licuado es más comercial, debido a que no se requieren equipos demasiado costosos (el costo de la conversión asciende a \$4 000 U. S. aprox.), en general el equipo consta de:

- Tanques de almacenamiento de 300 bar (presión de diseño)
- Válvula de alta presión, de paso.
- Reguladores de presión
- Sistema de evaporación.
- Mezclador, etc

Más adelante se explicará de manera específica las características del equipo antes citado.

Ambos sistemas pueden adaptarse a los sistemas de carburación existentes (carburación e inyección), sin embargo se hará mención únicamente del sistema de inyección por ser más eficiente que el de carburación.

El sistema de inyección de combustible también es aplicable cuando éste es gas. La alternativa necesaria para que los vehículos puedan usar gas, es la de proveerlos de tanques para almacenar el combustible y puedan tener cierta autonomía. Las alternativas son dos:

1. Comprimir el gas en "bombonas" (cilindros).
2. Producir el gas por medio de un generador instalado en el vehículo.

La compresión del gas puede llevarse a cabo a unos 200 bar, para poder aumentar la autonomía del vehículo [34]. En este aspecto el metano tiene características adecuadas para este fin; el poder calorífico (3, 433 KJ por litro de mezcla) es solamente inferior a la de la gasolina, la resistencia a la detonación, la homogeneidad y la estabilidad de la mezcla (consecuencia de la naturaleza gaseosa del combustible), la facilidad de arranque y de aceleración lo hacen adecuado.

El sistema de alimentación se compone de:

1. Bombonas a 200 bar (presión de trabajo) dispuestas aisladas o en grupos, desmontables o fijas, unidas a un conducto principal mediante válvulas.
2. Una válvula principal accionable desde el interior del vehículo.
3. Un manómetro de control para alta presión entre la válvula principal y el reductor.
4. Un reductor regulable de presión dispuesto generalmente bajo el cofre.
5. Un manómetro de control de la presión en la cámara de la primera etapa de reducción.
6. Un mezclador que tiene las funciones del carburador.
7. Una válvula de descarga accesible que permite el reaprovisionamiento incluso sin remover las bombonas.

Cabe mencionar que algunas de estas partes que integran el sistema puede variar de acuerdo a sus especificaciones dependiendo de los proveedores, sin embargo en términos generales serían las anteriormente citadas.

Si se hiciera una conversión a gas natural comprimido al motor con que cuenta el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la facultad de Ingeniería de la U.N.A.M, se observaría como el de la figura 3.8

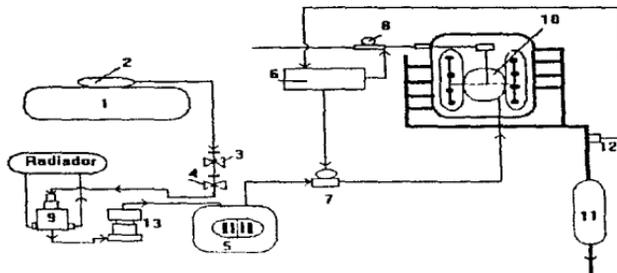


Fig. 3.8 Sistema de alimentación a gas natural comprimido para el laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería de la U. N. A.M.
 1 Depósito de gas, 2 Regulador de presión, 3 Válvula de cierre, 4 Válvula de paso, 5 Medidor de gas, 6 Conmutador /computadora, 7 Solenoide de gas, 8 Solenoide de gasolina, 9 Regulador de presión, 10 Carburador de gas LP, 11 Convertidor, 12 Sonda tumbada, 13 Filtro centrífugo.

Haciendo una analogía de los sistemas convencionales y a gas se tiene:

La válvula principal corresponde a la válvula de gasolina, el manómetro al indicador de nivel, la válvula de carga a la tapa del depósito.

El reductor-regulador de presión, es de dos etapas de presión, en la primera etapa la presión es reducida entre 1 y 2 bar relativos de presión y en la segunda el valor de la presión del conducto de aspiración del motor, es mantenida constante e independiente de la presión variable de las bombonas. Este puede verse en la fig. 3.9. El regulador está provisto de una membrana como elemento sensible a las variaciones de presión que actúan sobre sus caras y pueden contener algunos dispositivos capaces de variar la dosificación de la mezcla y de mezclar el gas con una cierta cantidad de aceite lubricante para asegurar la buena conservación del motor.

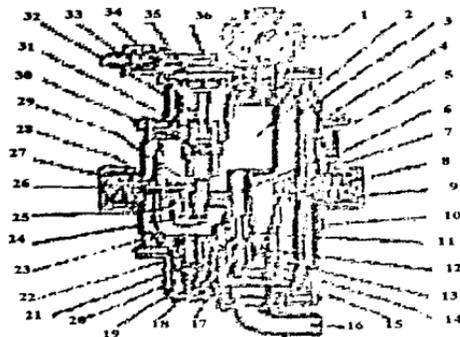


Fig. 3.9 Reductor de presión tipo Weber tipo 200 R

1.- Manómetro de medida de presión; 2.- Cámara de la 1ª etapa de reducción; 3.- Membrana de la 2ª etapa; 4.- Palanca de arranque; 5.- Palanca de mando del arranque; 6.- Canal de comunicación entre la 1ª y 2ª etapas; 7.- Contratuera; 8.- Resorte de regulación de la 2ª etapa; 9.- Tapa de regulación de la 2ª etapa; 10.- Agujeros de purga; 11.- Válvula de la 2ª etapa; 12.- Resorte de la palanca de la 2ª etapa; 13.- Membrana de la 2ª etapa de reducción; 14.- Palanca de mando de la membrana de la 2ª etapa; 15.- Apoyo para la palanca de la 2ª etapa; 16.- Conexión para la salida de gas; 17.- Tornillo de regulación de la válvula de la 2ª etapa; 18.- Aguja de la válvula de la 2ª etapa; 19.- Tapa de descarga de la válvula de seguridad; 20.- Resorte de la válvula de seguridad de la 1ª etapa; 21.- Disco de la válvula de seguridad de la 1ª etapa; 22.- Válvula de seguridad de la 1ª etapa; 23.- Membrana de la 1ª etapa; 24.- Apoyo para la palanca de la 1ª etapa; 25.- Palanca de mando de la membrana de la 1ª etapa; 26.- Resorte regulador de la 1ª etapa; 27.- Tapa de regulación de la 1ª etapa; 28.- Puntal de la aguja de la 1ª etapa; 29.- Contratuera; 30.- Aguja de la válvula de la 1ª etapa; 31.- Válvula de la 1ª etapa; 32.- Boquilla portafiltro; 33.- Boquilla de conexión a tubería; 34.- Tuerca de unión de la entrada de gas; 35.- Filtro de fieltro; 36.- Tapa de filtro.

El mezclador es comparable a un carburador a inyección, está provista de la clásica válvula de mariposa y de otra válvula antes del calibre (automática o bien accionada en paralelo a la anterior), cuya función es la de crear la depresión sobre el calibre a bajos regímenes. Este mezclador se representa en la fig. 3.10.

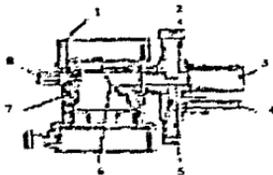


Fig. 3.10 Mezclador para gases comprimidos Weber tipo MP'S

1.- Cuerpo mezclador, 2.- Tornillo de ajuste de mezclas, 3.- Copla de unión al reductor, 4.- Copla de unión para alimentación al mínimo, 5.- Tornillo de regulación de la mezcla de gasolina, 6.- Tubo surtidor, 7.- Difusor, 8.- Unión de la palanca de mando para funcionamiento a gas o gasolina.

La relación de compresión más adecuada para motores que trabajan con metano es 8 y 10

[34].

Para conseguir un buen rendimiento volumétrico y térmico es aconsejable proveer también a la refrigeración del colector de aspiración, al uso de bujías frías (Para reducir los peligros de preencendido debidos al aumento de la relación de compresión) y al aumento del avance del encendido (para compensar la menor velocidad de propagación de la flama en comparación con los motores de gasolina).

Si bien las razones entre el poder calorífico de 1 m^3 de metano a condiciones normales de presión y temperatura y 1 lit de gasolina es de 1.15 (teóricamente), en la práctica 1 m^3 de metano equivale a 1.3 lts de gasolina, esto es debido a la posibilidad del metano a hacer menos rica la mezcla al evitarse los inconvenientes de la gasificación de los carburadores líquidos.

Un obstáculo para alimentación de vehículo con metano es el volumen y la masa de las bombonas, que inciden en la capacidad de la carga útil y en la autonomía del vehículo.

En el caso de la gasolina la masa debida al combustible (deposito + gasolina) es del orden de 1 Kg/dm^3 , en el caso del metano es de $6-7\text{ Kg/dm}^3$. En la tabla 3.1 se dan las dimensiones de las bombonas comerciales (de acero) y su masa. Para reducir esto, pueden usarse bombonas de aluminio, reforzadas con alambre de acero enrollado, con lo cual su masa es de 4 Kg/m^3 , pero su costo se incrementa.

Tabla 3.1 Bombonas para metano

Capacidad (lts)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Masa Bombona (Kg)	Masa gas (Kg)	Masa total (Kg)	Tara específica (Kg/ltr)	Densidad (Kg/ltr)	Contenido normal (m^3)
30	229	920	28	6.2	34.2	0.93	1.14	7.5
40	270	900	36	8.2	44.2	0.9	1.1	10.0
50	320	870	45	10.2	55.2	0.9	1.00	12.5
60	320	980	55	12.3	67.3	0.91	1.12	15.0
92	395	910	80	18.9	98.9	0.87	1.07	12.0

Presión de ensayo 300 bar.

Presión de trabajo 200 bar.

☛ Tabla tomada de "Motores endotérmicos", Dante Giacosa, Edt Omega S. A. Barcelona, 1988.

El uso del metano en los automóviles está en función de la autonomía, lo cual se refleja en la carga útil y por lo tanto en el costo del transporte útil/km.

Por ejemplo un camión con una capacidad de 800 Kg. que tiene un consumo de 27 lts de disel (mezcla de hidrocarburos líquidos que comprende todos los que se destilan desde la temperatura de 190 a 370 °C), por cada 100 km necesaria para funcionar a metano con una autonomía de 300 km., 95.3 m³ de gas ((27/.85) x 3), igual a 12 bombonas de 40 dm³, la mayor masa relativa del metano de la instalación del metano resulta de 570 Kg. igual al 7 % de la capacidad útil.

Para los automóviles la reducción porcentual de la capacidad útil al pasar a la alimentación a metano es aún más importante: la masa de la instalación resulta como promedio de unos 140 Kg para una autonomía de unos 300 Km., es decir el equivalente a la masa de 2 personas.

Es evidente por lo tanto que la conveniencia del empleo del metano como combustible depende de la razón de entre costos de 1 m³ de metano de 1 litro de gasolina en razón con la relación de consumo (1 m³ de metano = 1/3 dm³ de gasolina) y de la autonomía requerida.

En la tabla 2.11 se muestra una comparación entre los depósitos de algunos combustibles

Tabla 3.2 Comparación de depósitos para algunos combustibles.

Características	Glp licuado bar)	Gas 10	Metano (200 bar)	Disel	Gasolina
Capacidad bombona o depósito (dm ³)	60	60	60	60	60
Masa bombona o depósito (Kg)	24	55	8	8	8
Masa combustible (Kg)	32.4	12.3	50.1	45	45
Poder calorífico inferior (MJ/Kg)	45.8	46.9	42.7	43.7	43.7
Contenido de energía (*) (MJ)	1484	577	2139	1967	1967
Contenido de calorías (Mcal)	354.4	137.8	510.8	469.8	469.8
Masa total (Kg)	56.4	67.3	58.1	53	53
Masa total/100 MJ (Kg)	3.8	11.7	2.7	2.7	2.7
Equivalencia en dm ³ de gasolina (*) (dm ³)	45.4	17.6	65.2	60	60

— (*) referido a los poderes caloríficos inferiores

† Tabla tomada de "Motores endotermicos", Dante Giacosa, edit Orteiga S. A., Barcelona, 1988.

Cabe mencionar que el cambio de motores de gasolina a gas se encuentra regulada por normas de SECOFI, a través de la norma Nom-034-sefi-1993. Esta norma regula la conversión de motores a gas LP, haciendo las aclaraciones pertinentes a gas natural, en lo referente a los equipos utilizados, en ambos procesos. Así las mangueras se encuentran normalizadas bajo la norma NMX-X4; NMX-X-29; los depósitos (bombonas) bajo la norma NOM-021/4; los reguladores y vaporizadores por NMX-X0-22; las válvulas de paso por NMX-X-31; los filtros por la norma NMX-D-186; etc.

La norma para la conversión de gasolina a gas LP, se transcribe en el apéndice 3

3.3 Análisis de la eficiencia volumétrica.

La eficiencia volumétrica se define como la razón entre la masa efectiva del aire introducido al cilindro en la unidad de tiempo y la masa del aire que teóricamente debe ser introducida en el mismo tiempo [33], ésta se calcula en base a la cilindrada y a las condiciones de temperatura y presión a la entrada del cilindro.

La expresión que se utiliza para el cálculo de este parámetro es:

$$\eta_v = (2m_a) / \rho_{a,0} V_d N \quad (1)$$

donde: η_v es la eficiencia volumétrica
 m_a es el flujo masico de aire efectivo
 $\rho_{a,0}$ es la densidad del aire a condiciones ambientales.
 V_d es el volumen desplazado de aire y N es la velocidad de giro del motor.

El valor de la eficiencia volumétrica depende del tipo de combustible, diseño del motor, y de los parámetros del operación del motor, entre los cuales destacan

- Temperatura de la mezcla
- Presión a la salida de la cámara de combustión.
- Relación de compresión.
- Velocidad de giro del motor, etc

La figura 3.11 se representan diferentes valores de eficiencia volumétrica para diferentes vehículos y giros de motor.

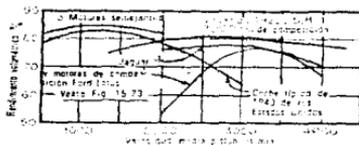


Fig. 3.11 Eficiencias volumétricas. Valores relativos basados en bhp/in3, rpm, relaciones de compresión y rendimiento volumétrico supuesto del 37% del Ford-Lexus a 3500 rpm.

Una expresión equivalente para el cálculo de η_v puede ser obtenida en función de la presión media P_i , temperatura T_i , relación combustible aire F/A , relación de compresión r_c , presión de salida P_e , de la masa molecular M , x_e es una fracción de masa remanente en el cilindro y de γ para representar el trabajo del fluido en el ciclo, así la expresión resultante [33]es:

$$\eta_v = (m_a / \rho_{a,0} V_d) = (m(1 - x_e) / \rho_{a,0} [1 + (F/A)]) ((r_c / r_e - 1) V_i) \quad (2)$$

Donde m_0 es la masa en el cilindro en el punto 1 del ciclo ideal del motor.
A partir de la ecuación anterior y de la ecuación del gas ideal,

$$P_1 V_1 = m (R/M) T_1 \quad \text{y} \quad P_{k,0} = P_{k,0} (R/M_k) T_{k,0} \quad (3, 4)$$

Al sustituir estas ecuaciones (3, 4) en 2 se tiene

$$\eta_v = (M/M_k) (P_1/P_{k,0}) (T_{k,0}/T_1) \{ [1 + (P_1/P_{k,0})] \{ (\gamma(\gamma-1) + 1) - (1/\gamma)(\gamma-1) \} [(P_1/P_{k,0}) + (\gamma-1)] \} \} \quad (5)$$

Para el caso de $(P_1/P_{k,0}) \approx 1$ el término $\{ \}$ es igual a la unidad.

A partir de la ecuación 5 es posible establecer una comparación entre los valores de las eficiencias volumétricas para la gasolina y el gas natural.

La ecuación está en función de la relación de combustible (F/A) , esta se encuentra en un denominador, por lo que para el caso de la gasolina que requiere menor cantidad de aire, el valor de ese cociente será mayor que en el caso del gas natural pues este requiere de más aire en la combustión que la gasolina, con lo que el valor de la eficiencia volumétrica será mayor al usar gasolina que al utilizar gas como combustible del motor.

La masa molecular es totalmente diferente; por lo que el valor del primer término será más grande en el caso de la gasolina que para el gas, por lo que la eficiencia es mayor con la gasolina que con el gas.

En los motores de encendido por chispa, la presencia de gases o vapor de agua dentro del sistema, reduce la presión parcial del aire dentro de la presión total de la mezcla. La presión de la mezcla se calcula como la suma de las presiones parciales:

$$P_1 = P_{k,1} + P_{C,1} + P_{w,1}$$

Donde:

P_1 es la presión de la mezcla.

$P_{k,1}$ es la presión parcial del aire.

$P_{C,1}$ es la presión parcial del combustible.

$P_{w,1}$ es la presión parcial del vapor de agua.

Si se consideran los gases como gas ideal se tiene:

$$(P_{k,1}/P_1) = [1 + (m_f/m_a)(M_a/M_f) + (m_w/m_a)(M_a/M_w)] \exp^{-1}$$

La expresión anterior se encuentra graficada en la figura 3.12.

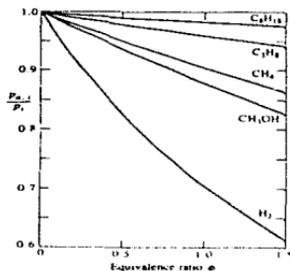


Fig. 3.12 Efecto de la vaporización del combustible en la presión parcial del aire de la mezcla

Para el caso del metano la vaporización es grande por lo que el valor de la eficiencia volumétrica cae, por el contrario para la gasolina, la vaporización es menor por lo que la eficiencia volumétrica aumenta.

3.4 Tratamiento primario del gas natural.

3.4.1 Eliminación de impurezas sólidas y líquidas

A las condiciones de operación normales, los sólidos y líquidos contenidos en el gas tienden a ser sedimentados en la tubería, lo cual ocasiona que se generen más sólidos como la herrumbre, a través de la corrosión de la tubería [29]. Estos son arrastrados por el gas a grandes velocidades, con lo que la potencia necesaria para el bombeo se incrementa. Es por ello que es necesaria la eliminación de estas impurezas. Un dispositivo útil para tal fin es el colector de sólidos y líquidos.

En este dispositivo, el gas entra al colector por una válvula, pasando después a la parte baja del colector, la cual está llena de aceite mineral (petróleo). Este depósito está conectado con el resto del sistema por unos tubos, por los cuales puede circular libremente el gas de la parte baja del colector a la parte central. El gas rompe la capa superior del aceite del depósito, atomizándolo para formar una mezcla gas aceite. El paso de la mezcla gas aceite en el colector es turbulenta, lo cual da como resultado que las partículas se separen y se adhieran unas a otras formando gotas de aceite. En la mitad del colector de sólidos la velocidad del gas disminuye, y las gotas de aceite son separadas en el cambiador estacionario y en el "baffle cambiador", el cual está comunicado con la parte baja por el tubo de drenado. El gas purificado es liberado por la salida del sistema.

Este sistema se encuentra ilustrado en la figura 3.13.

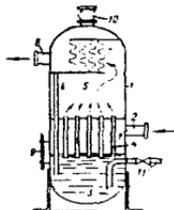


Fig. 3.13 colector de impureza
sólidas y líquidas.

1 - Carcasa 2 - válvula de entrada,
3 - Aceite mineral, 4 - Tubo de contacto,
5 - Cambiador estacionario, 6 - Tubo de
drenado, 7 - Baffle cambiador,
8 - Válvula de salida, 9 - Medidor de
nivel, 10 - Válvula de alivio, 11 -
para el aceite mineral (petróleo)

Tubería

Otro método para eliminar las impurezas sólidas es el de tanques sedimentadores. En estos, el gas entra tangencialmente, a un ciclón. En éste, gracias a la fuerza centrífuga, las impurezas son eliminadas, y por gravedad son recolectadas. Un método más es el de filtros. Entre estos el más usado es el eléctrico. En este dispositivo las partículas son cargadas con alta tensión electrostática y precipitadas por electrodos cargados con polaridad distinta a la de las partículas.

3.4.2 Eliminación de Sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono.

El petróleo y el gas natural contienen una cantidad considerable de sulfuros. El sulfuro que se encuentra en el gas natural es el Sulfuro de hidrógeno, un gas que es más pesado que el aire y tiene un olor característico, además de que en concentraciones elevadas es muy tóxico.

Este gas es altamente corrosivo, principalmente cuando está en contacto con dióxido de carbono, humedad u oxígeno. Por lo que la eliminación de Sulfuro de hidrógeno es necesaria para prevenir envenenamiento, corrosión, [29] etc.

Por otra parte el dióxido de carbono debe ser removido para incrementar el valor calorífico del gas, para prevenir la corrosión del equipo, la formación de hidratos y la aparición de hielo seco, cuando el gas es procesado a bajas temperaturas.

El Sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono pueden ser eliminados por el contacto directo con material absorbente determinado, ya sea sólidos o líquido, eliminando las impurezas por reacciones químicas y catalíticas entre estos.

Existen dos métodos para la eliminación de estas impurezas, lo "secos" y los "líquidos".

Los métodos secos, usan reactivos sólidos (carbón activado). Los métodos líquidos, usan soluciones absorbentes acuosas como hidróxido de sodio, etanolaminas, fosfato, fenoles, etc.

El proceso de limpieza líquido puede ser regenerativo o no regenerativo. El proceso es no regenerativo cuando la solución al saturarse se elimina y se cambia por otra nueva, lo cual no es rentable; por otra parte el proceso es regenerativo cuando las propiedades absorbentes de la solución son restauradas durante el transcurso de la limpieza del gas, por recirculación de la misma.

Un método líquido que es muy usado, es el de etanolaminas. Soluciones líquidas de mono-, di- y trietanolamina son usadas para purificar con este método. Estos compuestos son obtenidos al reemplazar de 1 a 3 átomos de hidrógeno del amoníaco por el grupo etanol C_2H_5OH . Estas absorben H_2S y CO_2 , formando carbonatos, bicarbonatos, sulfites y bisulfites. Así los compuestos formados pueden ser descompuestos con la eliminación de H_2S y CO_2 por calor a temperaturas superiores a los $100^\circ C$.

El método de etanolaminas tiene una alta capacidad de absorción y una alta presión de vapor. Para reducir concentraciones no mayores que el 20 % se usa la monoetanolamina. Porque se requiere de presiones bajas de vapor, las soluciones de di- y trietanolamina, son usadas en concentraciones superiores al 40%. En altas concentraciones las reacciones caloríficas interfieren con la absorción.

La solución saturada pasa del absorbedor a través de un controlador de nivel del intercambiador de calor. Donde es calentada por la solución ya regenerada, pasando después al desorbedor. En el desorbedor la solución es regenerada con vapor, el cual es generado en la parte baja de la columna.

De la caldera del desorbedor la solución regenerada es bombeada al intercambiador y al enfriador, donde es enfriada y trasladada a la parte superior del absorbedor. La mezcla de vapor y gases ácidos suben a la parte superior del desorbedor para entrar al condensador. Los sulfuros separados pueden ser mandados a procesos para recuperarlos o pueden ser quemados.

El sistema antes mencionado se muestra en la figura 3.14

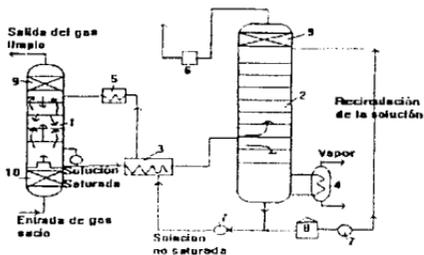


Fig. 3.14 Planta de purificación con etanolamina. 1.- absorbedor, 2.- desorbedor, 3.- Intercambiador de calor, 4.- Caldera, 5.- Enfriador, 6.- Condensador, 7.- Bomba, 8.- Tanque de absorbente fresco, 9.- Placas deflectoras, 10.- Purificador.

La ventaja de usar este método es la alta capacidad absorbente de la solución, la facilidad para regenerarse, la compactación de la planta, la continuidad del proceso, la no corrosividad, no toxicidad, y no flammabilidad de la solución. la opción de remover simultáneamente sulfuros y dióxido de carbono, etc. Las desventajas del uso de este es el consumo relativamente alto de vapor y un incremento en la turbulencia de las reacciones secundarias.

La desulfuración líquida puede ser conducida a cualquier presión.

3.4.3 Deshidratación.

La deshidratación del gas es necesaria para prevenir la condensación, la formación de hielo que tapanía la tubería y que provocaría corrosión en el equipo.

El gas puede ser deshidratado por el método de adsorción o absorción.

Los absorbentes de humedad son de cloruro de calcio, hidróxido de sodio, óxido de aluminio activado (alumina gelizada, bauxita), sílice gelizada, etc.

La alumina gelizada es la más usada, debido a que no es corrosiva, no tóxica, resistente al calor, alta absorción y es barata.

Una capa de absorbente es montada sobre una base para que el gas pase por esta.

Cuando el absorbente se ha saturado se cambia por otro, para que pueda regenerarse el saturado. La regeneración se hace con calor, para que el agua contenida por este se evapore. Las temperaturas a las que se lleva a cabo la regeneración son superiores a los 200 °C.

También existen líquidos absorbentes, entre estos destacan las soluciones de cloruro de calcio, cloruro de litio, cloruro de zinc, etileno glicol y otros. Los más usados son el trietileno glicol $O_2(CH_2CH_2OH)_3$ y el dietileno glicol $O(CH_2CH_2OH)_2$ [38, 39], los cuales se mezclan con el agua en cualquier proporción, son estables en el manejo de contaminantes del gas, tienen alta presión de vapor, y no son corrosivos. El sistema de deshidratación es compatible con el de desulfuración, explicado anteriormente. La deshidratación se promueve al incrementar la concentración de etanolaminas en la solución, lo cual incrementa la circulación de la solución en el sistema.

La deshidratación con glicol requiere de bajas inversiones, bajas presiones y puede ser aplicada a cualquier concentración que contenga el gas.

3.4.4 Extracción de gasolinas.

El gas natural algunas veces contiene cantidades significativas de hidrocarburos pesados, los cuales pueden ser extraídos de acuerdo a las posibilidades técnicas y económicas que se tengan en determinado momento; y una vez extraídas se les llama gasolinas naturales.

Estas pueden obtenerse por absorción, compresión, enfriamiento (criogenia), o una mezcla de estos.

La selección del método más adecuado para la operación depende de las condiciones del gas, las normas de calidad para la extracción de este tipo de gasolinas, el uso que se le dará al gas, del transporte, de las condiciones locales, de la tecnología con que se cuente así como también de los recursos económicos que tenga la planta.

3.5 Almacenamiento y transporte de Gas Natural.

Existen diversas formas de almacenamiento del gas, sin embargo la elección de una u otra depende de las características del combustible, así como de las condiciones locales y económicas con que se cuente.

Los sistemas de almacenamiento se pueden clasificar [12] como:

- | | |
|-------------------|--|
| – Superficiales | – A presión - Cilindros horizontales y esferas. |
| | -- Semi-refrigerado - Esferas. |
| | --Refrigerado - Indirecto, directo, semi-directo |
| – Semi- enterrado | -- Refrigerado - De pared sencilla. |
| – Enterrado | -- Refrigerado - De superficie de concreto, de pared de concreto y suelo congelado |

- Cavidades subterráneas
- A presión - Cavidades minadas. Campos abandonados de gas o aceite
- Refrigerado - Cavernas criogénicas
- Cavidades salinas

3.5.1 Depósitos superficiales.

El diseño de este tipo de depósitos se encuentra reglamentado por normas internacionales para asegurar la calidad de los mismos. Las normas más usadas para el diseño de estos depósitos son las de la ASME (American Society of Mechanical Engineers).

La presión de diseño utilizada es la obtenida al aplicar un factor de seguridad de 5 a 1 con respecto a la presión de vapor del gas. En el caso del gas LP, la presión de diseño utilizada es de 14 Kg/cm² [38], ya que su presión de vapor es de 12.4 Kg/cm² a 37.7 °C [12].

La capacidad y forma de los recipientes queda supeditada a la capacidad tecnológica y reglamentaciones oficiales locales, donde se vaya a establecer el almacenamiento. Por ejemplo, para el almacenamiento de gas LP, se usan tanques de forma cilíndrica horizontal con cabezas que varían de forma según la capacidad del tanque, pudiendo ser semiesférica, torisférica, elipsoidal, etc.

Los sistemas de depósito refrigerados son utilizados en terminales marítimas o en grandes centros de producción y/o consumo.

3.5.2 Depósitos semi-enterrados.

Estos se fabrican de pared sencilla de concreto y operan a condiciones atmosféricas de presión y temperaturas cercanas al punto de ebullición, por lo que se requiere de sistemas de licuefacción.

Este tipo de sistemas respecto a los enterrados, tienen la ventaja de que no requieren de formaciones geológicas específicas, y se sugiere que su origen se debe a la resolución de problemas de cimentación, especialmente en zonas sísmicas. Este tipo de depósito se encuentra representado en la fig. 3.15

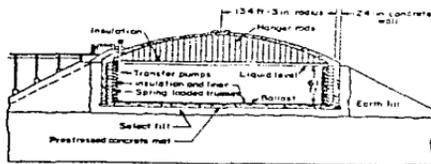


Fig. 3.15 Depósito semi-enterrado

3.5.3 Depósitos enterrados.

El confinamiento del gas en tanques enterrados se realiza en condiciones de presión cercanas a la atmosférica, y a temperatura tal que el producto se mantenga en estado líquido.

Existen dos sistemas de depósito enterrado

- El recipiente de pared de concreto
- El recipiente de pared de concreto y suelo congelado

El primero se diferencia del segundo en que se encuentra cubierto de una capa de material aislante localizada entre el piso del tanque y la cimentación, mientras que el segundo no, por lo que se le provee de un sistema de calentamiento para evitar el congelamiento y fractura del piso y cimentación.

Los recipientes están construidos con estructuras de una sola pieza, por el lado exterior las paredes se recubren con una capa de acero resistente a las bajas temperaturas y se refuerzan con alambre y concreto reforzado, por el lado interior se les coloca una capa de aislante; la base de concreto es reforzado y se sitúa sobre una serie de soportes diseñados para eliminar la humedad acumulada.

3.5.4 Cavidades subterráneas.

Es el medio de almacenamiento más seguro, debido a que se encuentra libre de influencias externas, siendo los dispositivos de seguridad básicamente los mismos que para los pozos de la industria del petróleo.

Estas cavidades pueden ser artificiales o naturales. Si las cavidades son artificiales, debe realizarse un estudio geológico del área en la cual se pretende crear el depósito, para comprobar que la roca es químicamente inerte y compatible con el producto a almacenar.

El siguiente paso es el estudio estructural de la caverna para garantizar su estabilidad, en caso de que está no sea aceptable deberá reforzarse con hormigón, concreto o cualquier otro tipo de material a fin de asegurar su estabilidad.

Otro punto a considerar son las características hidráulicas del depósito, en este las paredes no están revestidas y la capa freática, situada encima del depósito se mantiene natural o artificialmente a un nivel hidrostático superior al potencial de presión del producto, asegurándose así que no escape hacia la roca.

La selección de la técnica de acceso depende del costo y plazo para la obra, sobresaliendo dos técnicas:

- Acceso por pozos de gran tamaño.
- Acceso por túnel.

3.5.5 Cavidades salinas

Las cavidades salinas surge como una alternativa a las cavernas criogénicas debido a que su costo es inferior [38].

La creación de este tipo de cavidades se realiza por lixiviación (disolución de la sal por medio de un solvente) con agua, esta disuelve la sal del yacimiento dándole ciertas características geométricas, por lo que el proceso de lixiviación deberá de ser controlado para dar una forma al depósito.

Un factor importante a considerar en este proceso es la de contar con grandes volúmenes de agua, pues se requieren de 8 a 10 veces el volumen de la cavidad por crear, además de contar con depósitos para almacenar la salmuera creada durante el proceso.

Para la explotación de la cavidad, esta deberá estar siempre llena, ya sea con gas o con salmuera. Debido a lo cual se requieren depósitos para la salmuera para cuando la cavidad esté llena de gas; debido a que el proceso de explotación de la cavidad se hace con salmuera no saturada, la cavidad sufre disoluciones cada vez que se realiza movimiento de vaciado, por lo que el volumen de la cavidad aumenta con el tiempo, llegando a ser hasta el doble del inicial.

3.5.6 Transporte del Gas Natural.

El transporte del gas natural puede llevarse a cabo por diversos medios, dependiendo de la cantidad, la ubicación de los depósitos, etc.

Los medios más comunes son:

- Por tuberías (gasoductos)
- Transportación marítima
- Transportación ferroviaria
- Transportación terrestre (Pipas o tanques móviles)

3.5.6.1 Transporte por tuberías.

Las tuberías son usadas para transportar gas de un punto de producción a un punto de utilización.

Este sistema se usa debido a que se requiere de una pequeña inversión, además de ser rápido, y altamente eficiente, debido a que la viscosidad del metano es muy baja.

Diferentes tipos de líneas son usadas, las de las fábricas y las municipales, las cuales trabajan con presiones más altas y son de longitud mayor en cuanto a extensión y diámetro de la tubería.

Tabla 3.3 Capacidad aproximada para tuberías de acero estándar.

Diámetro exterior en mm.	Espesor de la pared en mm	Punto de resistencia del acero, Kg/cm ²			
		2 600		3 300	
		P1, ata	Q, millones de m ³ por día a n.t.p.	P1, ata	Q, millones de m ³ por día a n.t.p.
325	6	56	1.4	71	1.8
426	6	43	2.2	54	2.8
478	6	38	2.6	49	3.4
529	7	40	3.6	51	4.7
630	7	34	4.8	43	6.2
720	8	34	3.9	43	8.9
820	8	30	8.6	18	11.0
920	8	26	10.0	33	13.0
1 020	8	24	12.0	30	15.0

♣Tabla tomada de "Development and Exploitation of oil and Gas Fields", I Murevyrov, et al U. R. S. S., Moscow

Los sistemas de transporte por tuberías más importantes en el país se ilustran en las figuras siguientes:



Fig. 3.16 Osmodutos más importantes de la zona norte.



Fig. 3 17 Gasoductos más importantes de la zona centro

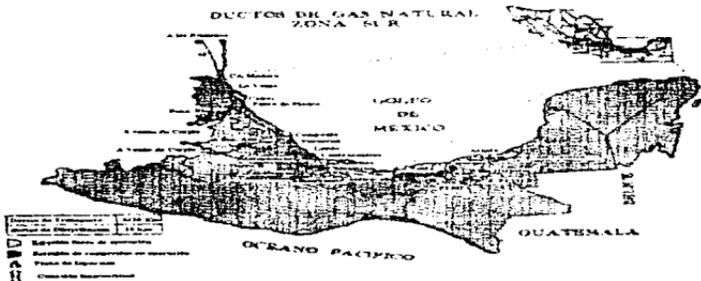


Fig. 3 18 Gasoductos de la zona sur

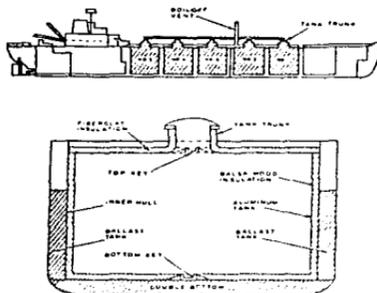


Fig. 3.20 Buque tanque para el traslado de gas natural.

3.5.6.3 Transporte ferroviario.

Este sistema de transporte se utiliza cuando la cantidad de combustible a transportar es pequeña.

En México, su uso ha disminuido por el uso creciente de gasoductos y sistemas alternos al ferroviario (tanques móviles o "pipas") [12]

Los carro-tanque que se usaban para el traslado, tenían una capacidad de 40 a 50 toneladas

Estos estaban equipados con válvulas de relevo, línea de descarga y carga, válvula de retorno de vapores, válvula de seguridad, medidor de nivel, manómetro, y termómetro. Cabe mencionar que estos equipos se encontraban instalados en ambos lados del carro para facilitar la carga o descarga de los mismos, además de estar protegidos por puertas para de seguridad para evitar que personas no autorizadas pudieran llegar a estos ocasionando accidentes.

3.5.6.4 Transporte terrestre (pipas).

Este medio es el más popular para transportar pequeñas cantidades de gas en recipientes de presión a partir de depósitos o refinерías, hacia los lugares donde se encuentran los consumidores

Algunos de los sistemas con que cuentan este tipo de transporte son las líneas de carga y descarga, línea de retorno de vapores, medidor de presión, temperatura, nivel y valvulas de relevo

El transporte de líquidos inflamables a través de vías públicas (carreteras), está normalizado por la National Fire Protection Association (NFPA), con el fin de disminuir los peligros que involucra este tipo de transportes.

Cabe mencionar que este tipo de tanques puede usarse también para el manejo de gas L.P.

3.6 Resultados del uso del gas natural.

Los resultados que se muestran a continuación, fueron obtenidos por el IMIP, bajo condiciones normalizadas por la prueba ATF-75 (Procedimiento Federal de Prueba del año 1975); o programa federal de manejo, prueba de arranque en frío o en caliente CVS I o prueba de arranque en frío CVS II.

Esta prueba se realiza en una celda de ambiente controlado, donde la temperatura y otras condiciones pueden mantenerse dentro de límites específicos. Durante la ATF-75, el vehículo se conduce a un dinamómetro de chasis con un programa de manejo de paro y marcha con una velocidad promedio de 21.6 mph (34.7 km/h). Mediante el uso de volantes de inercia y un freno hidráulico, se producen las cargas que el vehículo experimentara en el camino. Los gases de escape del vehículo se recolectan, se diluyen y se mezclan completamente con el aire filtrado circundante, a un flujo de volumen constante (CVS). La prueba establece una captura de las emisiones generadas durante un arranque "en frío" e incluye un arranque "en caliente" después de un paro de diez minutos posteriores a las primeras 7.5 millas (12.1 km).

El dinamómetro de chasis reproduce la inercia del vehículo con volantes y la carga del camino con un freno hidráulico. La inercia esta disponible en los incrementos de 125 lb (56.7 kg) entre 1000 lbs (453.6 kg) y 17250 lbs (7 824.6 kg). Para cada clase de peso de inercia se especifica una carga de camino que toma en consideración la resistencia aerodinámica promedio del vehículo en cada clase.

Un día antes de realizar la prueba de arranque en frío, el vehículo debe permanecer en reposo cuando menos durante 12 hrs. en un área en que la temperatura se mantenga entre 68 y 86 °F (20 - 30 °C). A este período se le conoce como saturación "en frío".

Al comienzo de la prueba, el vehículo debe ser empujado al dinamómetro, pues esta es una prueba de arranque en frío. Posteriormente se colocan los equipos de correlación de emisiones al tubo de escape y se coloca un ventilador de enfriamiento delante del vehículo. La prueba se hace con el cofre abierto.

El sistema de muestreo de emisiones y el vehículo de prueba arrancan simultáneamente de modo que las emisiones que se recolectan durante el arranque del motor. Después de arrancar el motor, el conductor sigue un patrón de manejo, conocido como "Programa urbano de manejo". El programa de manejo se muestra al conductor del vehículo de prueba y el iguala la velocidad a la que aparece en el programa. La duración es de 1374 segundos, y cubre una distancia de 7.5 millas (12.1 km).

Las emisiones que se miden en esta prueba, cubren tres regímenes de operación del motor. Las emisiones de escape durante los primeros 505 segundos de la prueba son las emisiones transitorias frías. Durante ese período, el vehículo se calienta gradualmente a medida que se manejan el ciclo del programa de manejo. Las emisiones durante ese período mostrarán los efectos de la operación de arranque en frío y de las características de calentamiento del vehículo.

Cuando el vehículo pasa los 869 segundos restantes, se considera que ya se ha calentado completamente. Las emisiones durante esta parte de la prueba son las emisiones **estabilizadas**. El período final de prueba, después de la saturación en caliente constituye la sección **no transitoria** y muestra los efectos del arranque en caliente. Las emisiones de cada una de las fases de la prueba se recolectan en bolsas por separado, posteriormente se analizan cuantitativamente su composición. Finalmente a través de un balance de masa emitida de cada contaminante en gramos por kilómetro recorrido

El patrón de manejo utilizado en esta prueba se muestra a continuación:

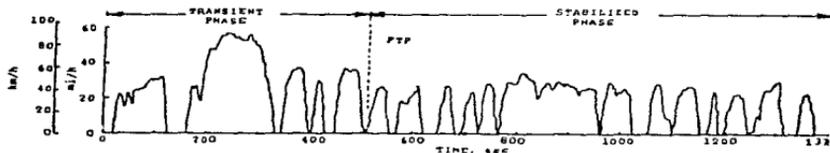


Fig. 3.21 Programa urbano de manejo en dinamómetro

Tabla 3.4 Comparación entre las emisiones sin convertidor Catalítico, en porcentaje

	CO	HC tot.	NOx	HC reac.	Evap.
Gasolina	100	100	91	40	100
Gas Lp	17.2	42.1	100	40	0
GNC	10.2	26.0	70	10.3	0

Tabla 3.5 Comparación entre emisiones con convertidor catalítico en porcentaje.

	CO	HC tot.	NOx	HC reac.	Evap.
Gasolina	100	100	32	100	100
Gas Lp	11	48.7	28	45.1	0
Diesel	—	—	—	—	—
GNC	9.2	41	25.9	7.3	0

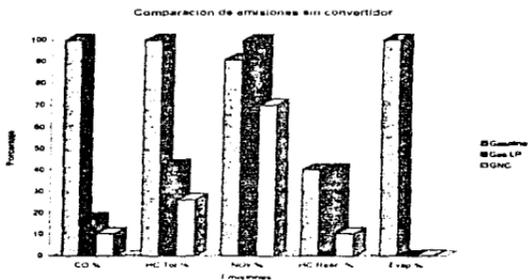
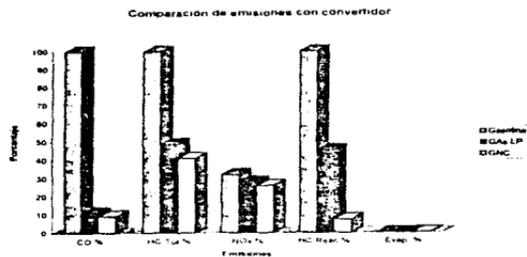
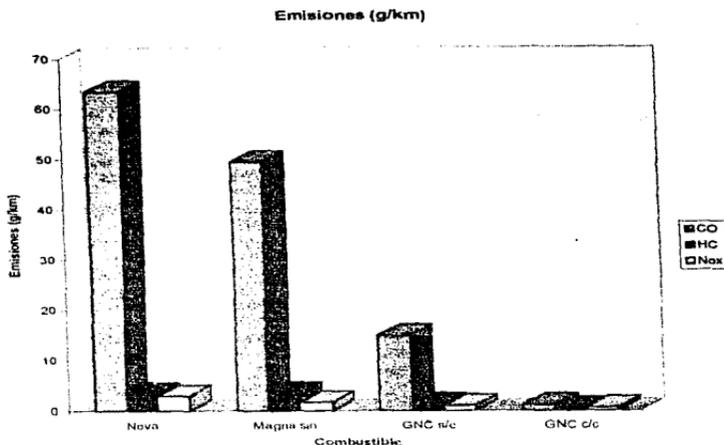


Tabla 3.6 Emisiones contaminantes.

	Emisiones (g/km)		
	CO	HC	NOx
Nova	63,5	3,4	2,95
Magna sin	49,5	3,51	1,69
GNC sin convertidor	15,0	1,3	1,0
GNC con convertidor	1,16	0,41	0,62



Como puede verse en las tablas anteriores las emisiones disminuyen de manera considerable al usar como combustible gas natural. En la última tabla en la cual se comparan las emisiones en más puede verse que la combustión es más eficiente con el gas natural, sin embargo, al usar un convertidor catalítico la cantidad de gases que se emiten a la atmósfera disminuyen en 140 % en CO, 38 % en HC y 62 % en NOx; sin embargo al comparar valores de emisiones con los obtenidos al usar gasolinas (Nova y Magnasín) la diferencia es enorme.

Sin embargo otro factor de suma importancia en la combustión con metano es la potencia.

Este parámetro se ve afectado al variar la eficiencia volumétrica del motor; esta varía al descompensarse la relación volumétrica entre combustible y aire. En el caso de la combustión con metano la cantidad de aire necesaria para la combustión aumenta; lo cual trae como consecuencia que la cantidad de combustible necesariamente deba disminuir, lo cual hace que la eficiencia volumétrica baje.

A continuación, se muestra como la actividad económica industrial se concentra por encima de los 1500 s.n.m.

Tabla 3.7 Altura s n m de las principales ciudades del país.

Ciudad o localidad.	Altura (m.s.n.m)		
Toluca Mex.	2 664	Parral Chihuahua	1 740
Zacatecas Zacatecas	2 596	Uruapan Michoacán.	1 631
Pachuca Hidalgo	2 425	Tehuacán Puebla	1 614
Tlaxcala Tlaxcala.	2 240	Saltillo Coahuila	1 603
Fresnillo Zacatecas	2 229	Guadalupe Jalisco	1 584
México D. F.	2 226	Oaxaca Oaxaca	1 556
Tulancingo Hidalgo	2 155	Cuernavaca Morelos.	1 545
Puebla Puebla	2 153	Parras Coahuila	1 520
Guanajuato Gto	2 033	Chihuahua Chih	1 430
Morelia Michoacán.	1 903	Jalapa Veracruz	1 415
Aguascalientes Ays	1 869	Orizaba Veracruz	1 241
Durango Durango	1 866	Ciudad Juárez Coahuila	1 144
San Luis Potosí S.L.P	1 865	Cd. Lerdo Durango	1 138
Querétaro Querétaro	1 820	Tepic Nayarit	925
León Guanajuato	1 805	Iguala Guerrero.	731
Celaya Guanajuato	1 756	Monterrey N. L.	538

La altura es un parámetro importantísimo en un análisis de eficiencia en la combustión de los motores, pues esta variable condiciona a otras, tales como la densidad, el peso específico, la temperatura de flama adiabática, la relación aire combustible etc

A continuación se muestra el desarrollo de una expresión que nos permite determinar a partir de las ecuaciones de gas ideal y de la mecánica de fluidos, el valor de la densidad del aire en diferentes condiciones de altura y presión:

Sea

$$\begin{aligned}
 PV &= nRT \\
 V/m &= RT/P \\
 V/m &= 1/\rho \\
 \therefore 1/\rho &= RT/P \\
 \therefore \rho &= P/RT \quad (1)
 \end{aligned}$$

De la ecuación de la hidrostática de uno y dos se tiene que:

$$P = \rho gy \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 P &= (P/RT) gy \\
 P/P &= (g/RT) gy
 \end{aligned}$$

Obteniendo la diferencial

$$dP/P = (g/RT) g dy$$

Integrando

$$\begin{aligned}
 \int dP/P &= \int (g/RT) dy \\
 \ln(P/P_0) &= g/RT (y - y_0)
 \end{aligned}$$

Cancelando el Ln se tiene:

$$P/P_0 = \exp(-(g/RT)(y - y_0)) + P_0$$

donde :

P es la presión final
 P_0 es la presión a nivel del mar
 \exp es la función exponencial.
 g es la fuerza de gravedad
 R es la constante universal de los gases.
 T es la temperatura
 y es la altura final
 y_0 es la altura a nivel del mar ($y_0 = 0$)
 P_0 es la presión a nivel del mar.

A partir de la ecuación encontrada se puede hacer una interpolación de la densidad a diferentes condiciones; esta interpolación se encuentra representada en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Gasto de aire en volumen por unidad de tiempo en la combustión estequiométrica del metano

Presión (bar)	Altura s n m (m)	Densidad del aire (kg/m ³)	Volumen específico del aire (m ³ /Kg)	Relación aire combustible (estequiométrica) (m ³ de aire/kg de com.)
1.013	0	1.206	0.8292	14.428
1.001	100	1.1916	0.8392	14.602
0.9896	200	1.178	0.8489	14.770
0.9668	400	1.1509	0.8689	15.1189
0.9445	600	1.1243	0.8894	15.4755
0.9227	800	1.0984	0.9104	15.8409
0.9015	1000	1.0732	0.9318	16.2133
0.8806	1200	1.0483	0.954	16.5996
0.8604	1400	1.0242	0.9763	16.9876
0.8405	1600	1	1	17.4000
0.8211	1800	0.9775	1.023	17.8002
0.8022	2000	0.9550	1.047	18.2178
0.7837	2200	0.9372	1.067	19.5658
0.7656	2400	0.9113	1.097	19.0878
0.7480	2600	0.8905	1.123	19.5402
0.7307	2800	0.8698	1.149	19.9926

Notas: Los valores de esta tabla se obtuvieron a una temperatura de 23 °C, aplicando la ecuación de gas ideal $PV = nRT$; donde P se calcula en bares, T en °K y R es la constante universal de los gases y para el aire equivale a 2.863 $\exp(-3)$ bar \cdot m³/Kg \cdot K.

Con los datos antes obtenidos es posible hacer una interpolación del comportamiento del la relación aire combustible del gas natural debido a que la relación aire-combustible es expresada en Kg de aire / Kg de combustible, si multiplicamos el valor del peso específico del aire con la relación aire combustible de un punto determinado se obtendría un aproximación de las relaciones aire combustible a cada uno de los puntos de interés. Cabe mencionar que este análisis sería más exacto si además de encontrar una expresión que determine la variación del aire se obtiene una que muestre la variación de las propiedades del combustible (metano).

Dicha interpolación de las relaciones aire-combustible puede observarse en la tabla 3 8

Seguindo un procedimiento similar al usado para el calculo de la relación aire-combustible, del metano, es posible realizar una valoración de la relación aire combustible para diferentes combustibles (parafinas), en diferentes condiciones presión y de altura, con el propósito de poder hacer una comparación de las condiciones en diferentes puntos de interés. Estos puntos de interés pueden ser las ciudades más importantes del país o las ciudades con mayor concentración de industrias, las más altas, etc. Las ciudades elegidas fueron Guadalajara, La ciudad de México, y la ciudad de Toluca, la primera fue elegida por sus crecientes problemas de contaminación, la segunda por su importancia económica y su gravedad ambiental y la tercera por ser la ciudad más alta del país. Los resultados se encuentran concentrados en la tabla 3 9

La tabla siguiente muestra lo anterior, al hacer una comparación entre las relaciones estequiométricas de combustión del metano, a diferentes altitudes.

Tabla 3 9 Comparación de las diferentes relaciones estequiométricas con diferentes combustibles

Numero de carbonos	Relación aire/combustible estequiométrica	Relación a nivel del mar	Relación a nivel de la Cd. de Guadalajara.	Relación a nivel de la Cd. de México	Relación a nivel de la Cd. de Toluca.
	(Kg aire / kg de com.)	(m ³ aire/kg de com.)	(1584 m s.n.m) (m ³ aire/kg de com.)	(2226 m s.n.m) (m ³ aire/kg de com.)	(2664 m s.n.m) (m ³ aire/kg de com.)
0	34.78	28.84	34.647	37.55	39.35
1	17.4	14.425	17.333	18.79	19.69
2	16.23	13.46	16.167	17.53	18.36
3	15.81	13.11	15.75	12.073	17.88
4	15.59	12.93	15.53	16.84	17.64
5	15.45	12.82	15.39	16.68	17.48
6	15.37	12.74	15.31	16.6	17.39
7	15.3	12.69	15.24	16.52	17.31
8	15.25	12.65	15.19	16.46	17.25
9	15.21	12.61	15.15	16.42	17.21
20	15.04	12.48	14.98	16.24	17.01
40	14.97	12.42	14.91	16.17	16.93
60	14.95	12.4	14.89	16.14	16.92
80	14.94	12.39	14.88	16.13	16.9
100	14.935	12.385	14.88	16.12	16.9
120	14.93	12.381	14.87	16.12	16.9

♦ El número cero equivale a el hidrogeno

La primera columna muestra el número de carbonos de la molécula de combustible, la cual comienza desde cero, que equivale a la molécula de hidrógeno hasta las moléculas más pesadas, y las restantes a relaciones estequiométricas a diferentes altitudes, las cuales corresponden al nivel del mar, Guadalajara, Cd. de México, y Toluca, debido a que estas ciudades son de las más importantes en el país, debido a diversos aspectos (culturales, económicos, etc.)

Para nuestro caso nos enfocaremos en el segundo renglón, que es el de 1 carbón, correspondiente al metano. En el caso de la Cd. de México se necesitarían 18 79 m³ de aire para quemar un kg de metano, esto representa un 23.2 % más que a nivel del mar y el 4.5 % menos que en Toluca, lo cual es mucho y trae como consecuencia que la potencia disminuya.

En comparación con el resto de parafinas el metano es el que requiere una mayor cantidad de aire para llevar a cabo una combustión completa lo cual provoca que la eficiencia volumétrica de los motores que usen este combustible disminuya y con ello la potencia. En cuanto a la altura del punto de interés comienza a subir, la cantidad de aire requerida para llevar a cabo la combustión aumenta, debido a que el oxígeno, primer responsable de los procesos de combustión comienza a disminuir en concentración a medida que la altura se incrementa, de ahí que el aire tienda a aumentar por necesidad, lo cual trae como consecuencia que el uso del gas natural no sea muy recomendable en lugares con altitudes considerables.

De todo lo anterior puede deducirse que el uso del gas natural trae como consecuencia una caída de potencia, de autonomía, de emisiones, etc.

Aunque la ciudad de México podría ser un buen mercado para llevar a cabo un importante consumo de gas natural como combustible en vehículos automotores, se ve frenado por los altos costos que acarrea la conversión de los sistemas tradicionales a sistemas de alimentación a gas (natural), por lo que la conversión a gas es factible técnicamente más no lo es económicamente hasta el momento, por lo que es necesario realizar más proyectos de investigación y de desarrollo que ataque los problemas antes citados, costo y disponibilidad, pues el abastecimiento de este combustible hasta el momento se encuentra centrado al sector industrial.

CAPITULO 4 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.

1. La combustión con metano (gas natural), es más eficiente que con el resto de combustibles disponibles, debido a su molécula simple.
2. La molécula del metano resultante de los procesos de combustión con combustibles tradicionales (gasolinas, diesel y combustóleos), no puede reducirse catalíticamente debido a la naturaleza de su molécula (bipolar).
3. La utilización del metano como combustible no es posible hasta que puedan resolverse los problemas de eficiencia volumétrica y de carburación a diferentes altitudes del país.
4. El nivel de emisiones puede disminuirse aun más al utilizar un convertidor catalítico de tres vías.
5. Los vehículos convertidos a gas sufren un decremento de potencia, como consecuencia de la disminución de la eficiencia volumétrica.
6. La autonomía de este tipo de vehículos se encuentra muy limitada, por la falta de estaciones de recarga y por el tamaño y peso del depósito del vehículo que permite una cantidad pequeña de combustible.
7. Económicamente la operación con gas natural comprimido no es costable en comparación con los combustibles tradicionales; esto es debido al alto costo del equipo que esta relacionado con este.

Sugerencias.

1. Promover más la investigación sobre la combustión del gas natural en diferentes puntos del país para poder resolver el problema de la carburación.
2. Brindar apoyos para acelerar el cambio de unidades a gas, pues este en muchos casos es mayor que el precio de los mismos vehículos.
3. Instalar más centros de abastecimiento de este tipo de combustible.

REFERENCIAS.

1. "La gasolina ayer, hoy y mañana", Joaquín Montañón Yañez, et al, Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, A. C., año XXXIII Vol. 19.
2. "Simulación numérica de óxido nítrico en la cámara de combustión de un motor de encendido por chispa utilizando gas LP", Gerardo Luyano López, F. I., U. N. A. M., 1995.
3. "Tecnología para el mejoramiento de combustibles", José Manuel Olivares, I. M. P., Ene - Feb. 1991.
4. "Carburadores", Miguel A. Castro, edit. C. E. A. C., Barcelona, España 1995.
5. "Metanol consumo en los 70's", U. S. Departmento del comercio, National technical information service, Abril 1977.
6. "Hidrogen as alternative automotive fuel", Carl A. Kukkonen, Automotive Engineering, October 1995.
7. "Natural gas application for air pollution control", Nelson E. Hay, 1992.
8. "Evaluación de emisiones de un motor de gasolina con conversión a gas LP y eficiencia del motor catalítico", Eduardo López Martín del Campo, F. I., U. N. A. M., 1995.
9. "Especiación de hidrocarburos en el escape de vehículos automotores de la zona metropolitana del Valle de México", Ing. Rafael Rodríguez Pérez, Seminario Internacional sobre sustentabilidad urbana y el manejo de la cuenca atmosférica de la zona metropolitana del Distrito Federal y del Valle de México, Mayo 25 1995.
10. "Natural gas as an stationary engine and vehicular fuel", William E. Liss, et al; Publishing SAE, SP-888, 1985.
11. "Suministrarán compañías de California gas natural a B. C. S.", Rogelio Varela, et al, El financiero, 13 de sep. 1995.
12. "Estudio comparativo de un modelo ingenieril para una planta de gas LP", Ing. Roberto Moreno Carvajal, F. Q., U. N. A. M.
13. "PEMEX- Gas y Petroquímica Básica, Folleto informativo 1996.
14. "Déficit de gas natural por falta de capital fresco", Georgina Tristán, El Financiero, 11 sep. 1995.
15. "Libre competencia en el mercado de gas natural", Georgina Tristán, El financiero, 7 sep. 1995.
16. "Tiene México reservas de gas natural para 77 años", La Prensa, 10 sep. 1995.
17. "Procesa PEMEX 3 087 millones de pies cúbicos diarios de gas natural", El Universal, 9 sep. 1995.
18. "Ley sobre la explotación de gas natural", Diario oficial de la federación, 8 nov. 1995.
19. "Termodinámica", Kenneth Wark; edit. Mc Graw Hill, cuarta edición, México D. F. 1990.
20. "Environmental Pollution control", P. Aqme Vesilind, edit. Butterworth-Heinemann, U. S. A. 1990.
21. "Ecología contaminación y medio ambiente", Amos Turk, edit. Interamericana, México 1972.
22. "Química orgánica", Daniel S. Kemp, edit. Omega, Barcelona 1986.
23. "Organic chemistry", Seyhan Ege, edit. Heath, Toronto 1984.
24. "Organic chemistry", Ralph J. Fessen, edit. William Grant Press, Boston 1982.
25. "Natural gas", R. V. Smith, edit. Penn Wells Books, U. S. A. 1979.
26. "Enciclopedia de energía y tecnología Cosidine, tomo III", Douglas Cosidine, Publicaciones Marcombo.
27. "Natural gas" E. N. Tirasso, edit. Gulf Publishing Company, Houston Texas, U. S. A. 1979.
28. "Natural gas measurement and control", Lohit Datta Barruda, edit. Mc Graw Hill, U. S. A. 1991.
29. "Development and exploitation of oil and gas field" I. Murayon, Moscow.

30. "Introducción a la Mecánica de Fluidos", R. W. Fox et al; edit. Interamericana; México D. F. 1986.
31. "Studies in surface and catalysis (Natural gas conversion Symposium)"; A. Holman;
32. "Reduce NOx Emissions from Internal Combustion Engines Fueled by Natural Gas"; Revista Fuel V. 70, No 4 Abril 1991
33. "International Combustion Engine Fundamentals"; John B. Heywood, edit. Mc Graw Hill, 1988
34. "Sobre alimentación de motores"; Juan Mirales de Imperial, edit. C. E. A. C.; Barcelona 1988.
35. "Inyección de gasolina"; Miguel de Castro, edit. C. E. A. C., Barcelona 1989
36. "Motores endotérmicos"; Dante Giacosa, edit. Omega, Barcelona 1988.
37. Norma oficial mexicana para el cambio gasolina a gas LP
38. "Natural gas engineering" Chiu U. Ikoku, edit. Penn Well Books, U. S. A. 1980.
39. "Gas Handling and Fuel Processing (V3 Operation plants of taratamient)"; BillD. Berger et al. edit. PennWell Books, U. S. A. 1980.

Apéndice I
Ley sobre la explotación de gas natural.

Únicamente se muestran los artículos de más interés a los fines de este trabajo.

Art. 1 Regular las ventas de primera mano, así como las actividades y servicios que no forman parte de la industria petrolera en materia del gas natural a efecto de asegurar su suministro eficiente.

Art. 3 La importación y exportación, del gas podrán ser efectuados libremente, en términos del comercio exterior.

Art. 4 La secretaria (Secretaría de Energía), promoverá la aceleración de bases o acuerdos de coordinación con las autoridades federales y locales, a fin de impulsar la relacionado con la construcción, operación y mantenimiento de sistemas y la aplicación de sistemas de seguridad.

Art. 6 Para efectos de este reglamento se considera indebidamente discriminatorio negar un trato semejante a usuarios adquirentes similares, en condiciones similares.

No se considera indebidamente discriminatorio las diferencias en el trato que puedan existir como resultado de

- Las distintas clases y modalidades de servicio
- La localización de usuarios o adquirentes
- La distinción por categorías de usuarios adquirentes

Art. 8 el precio máximo del gas objeto de la venta de primera mano será fijado conforme a lo establecido en las directivas de la comisión. La metodología para su cálculo deberá reflejar los costos de oportunidad y condiciones de competitividad de gas, respecto al mercado internacional y al lugar donde se realice la venta.

Art. 14 La realización de las actividades de transporte, almacenamiento y distribución, requerirá de permiso otorgado por la comisión.

Art. 19 Los permisos tendrán una vigencia de 30 años, contados a partir de la expedición, y serán renovables en términos del artículo 53, (dos años antes de su terminación y por periodos de 15 años, cada revalidación, sin importar las veces que se haya realizado tal operación)

Art. 72 Los distribuidores deberán satisfacer toda la demanda viable en los términos de sus condiciones generales, para la presentación del servicio y delo establecido por este reglamento

Los medios por los cuales la Secretaría de Energía podrá poner en marcha la ley sobre la explotación de gas natural, se encuentran agrupados en la CRE (Comisión Reguladora de Energía). La cual tiene las siguientes obligaciones:

Las reformas de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (1992) y la Ley Reglamentaria del Artículo 27 en el de Petróleo (1995), plantean importantes modificaciones a la estructura de los sectores de energía eléctrica y gas natural

Estas reformas abren la posibilidad de que el sector privado construya, opere y tenga en propiedad plantas de generación de energía eléctrica y sistemas de transporte, almacenamiento y distribución de gas natural, actividades previamente exclusivas de los operadores estatales (Petróleos Mexicanos y Comisión Federal de Electricidad)

La participación de la iniciativa privada en estas áreas requirió del ajuste de las estructuras e instituciones gubernamentales. Por lo que el Congreso de la Unión aprobó en Octubre de 1995 la Ley Reguladora de Energía

Esta ley amplía el ámbito de acción y las atribuciones que se otorgaron a la CRE (Comisión Reguladora de Energía), en 1993

EL Objetivo de la CRE es el de promover el desarrollo eficiente de las actividades sujetas a regulación. Para cumplir su objetivo la CRE debe orientar sus actividades a

- **Salvaguardar la prestación de los servicios**
- **Fomentar una sana competencia**
- **Proteger los intereses de los usuarios.**
- **Propiciar una adecuada cobertura nacional**
- **Atender la confiabilidad, estabilidad y seguridad en el suministro y prestación de los servicios**

En lo referente al ámbito político la CRE persigue los siguientes objetivos:

- **Claridad.** La ley concreta la funciones de regulación en la Comisión y establece las reglas claras respecto a su responsabilidad sobre la regulación y sobre las atribuciones que le confieren.
- **Transparencia.** La Comisión opera a través de un cuerpo de comisionados nombrados por el Presidente de la República, por periodos de cinco años escalonados. Los comisionados deliberan de forma colegiada y sus decisiones deben ser inscritas en un registro público
- **Autonomía.** La ley define a la CRE como un órgano descentrado de la Secretaría de Energía con autonomía técnica, operativa y financiera.
- **Estabilidad.** El marco legal tiene la fuerza necesaria para generar confianza en regulación y propiciar inversiones de largo plazo
- **Certidumbre.** Se introduce la regulación como una obligación legal. Los particulares planean sus inversiones bajo un marco regulador que brinda seguridad jurídica
- **Generalidad.** La ley no distingue entre operadores públicos y privados, las disposiciones de regulación son obligatorias para todos los operadores

Las actividades que desempeñará la Comisión son:

- **El suministro y la venta de energía eléctrica a los usuarios del servicio público.**
- **La generación, exportación e importación de energía eléctrica que realicen los particulares**
- **La adquisición de energía eléctrica que se destine al servicio público**
- **Los servicios de conducción, transformación, y entrega de energía eléctrica entre las entidades que tengan a su carga la prestación del servicio público de energía eléctrica y entre éstas y los particulares**
- **Las ventas de primera mano de gas natural y gas licuado de petróleo (LP)**
- **El transporte y el almacenamiento de gas natural que no sean indispensables para interconectar su explotación y elaboración**
- **La distribución de gas natural**
- **El transporte y la distribución de gas LP por medio de ductos**

Los instrumentos de regulación con que cuenta la CRE están definidos por las atribuciones que le confiere la ley, las cuales son:

Atribuciones generales:

- **Otorgar permisos y autorizaciones para el desarrollo de las actividades reguladas**
- **aprobar modelos de convenios y contratos para la realización de actividades reguladas**
- **Actuar como mediador o árbitro en la solución de controversias**
- **Expedir "directivas" disposiciones de carácter general que amplían los conceptos de regulación.**
- **Llevar el registro público de actividades reguladas**

Atribuciones en energía eléctrica

- Aprobar los criterios y bases para determinar el costo por conexión que la CFE cobre a los solicitantes de energía eléctrica.
- Aprobar metodologías para el cálculo del precio de la energía eléctrica que la CFE adquiera de productos externos y para el cálculo de los cargos por servicio de transmisión a terceros
- Participar en la determinación de las tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica.
- Verificar que se adquiera la energía eléctrica de menor costo para la prestación de del servicio público.
- Opinar sobre las necesidades de crecimiento o sustitución de capacidad de generación del sistema eléctrico nacional.
- Opinar sobre la factibilidad de que los particulares sean convocados para suministrar la energía eléctrica y, en su caso, sobre los términos y condiciones de las convocatorias y bases de licitación correspondiente

Atribuciones a gas.

- Determinar
 - Los precios de las ventas de primera mano de gas natural y de gas licuado de petróleo, y
 - las tarifas de transporte, almacenamiento y distribución de gas natural
- Aprobar los términos y condiciones de
 - Las ventas de primera mano de gas natural y de gas licuado de petróleo, y
 - la prestación de los servicios de transporte, almacenamiento y distribución de gas natural, y de gas licuado de petróleo por medio de ductos

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Autoridad Reguladora	C R E			
	Estudios	Consulta	Instrumentación de la regulación	Solución de controversias
Atribuciones	<ul style="list-style-type: none"> • Permisos • Modelos de contratos • Solución de controversias • Directivas. 		<ul style="list-style-type: none"> • Precios y tarifas. • Términos y condiciones • Registro Público • Costo de Conexión 	
Sectores	Energía eléctrica		Gas Natural	

Apéndice 2

Criterios de la calidad del aire (Grado IMECA).

El índice de calidad del aire puede definirse como función de transformación de los datos de niveles de concentración de contaminantes de un valor simple, representativo de la calidad de aire en una región determinada.

El IMECA, fue establecido por la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, con la colaboración del doctor Wayne Ott, miembro de la agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. En primera instancia se le llamo IMEXCA (Índice Mexicano de la Calidad del Aire), pero al particularizarse a la zona metropolitana de la Ciudad de México se le cambio el nombre por IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire)

El IMECA consta de dos algoritmos de calculo, el primero sirve para obtener los índices de correspondientes a distintos indicadores de la calidad del aire, y el segundo, para los diferentes indicadores de un índice global.

El primer indicador utiliza como puntos de referencia dos valores obtenidos de los criterios mexicanos de calidad del aire, al primero de ellos se le asigno un valor de 100 y al segundo uno de 500, entre estos puntos se asignaron tres más, con la finalidad de clasificar el intervalo en diferentes términos descriptivos de la calidad del aire de acuerdo a los efectos en la salud.

La tabla 1 nos muestra la relación entre los valores del IMECA (primer indicador) y los efectos en la salud.

Tabla 1

IMECA	CALIDAD DEL AIRE	EFFECTOS
0-100	SATISFACTORIA	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades físicas
101-200	NO SATISFACTORIA	Molestias menores en personas sensibles.
201-300	MALA	Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios.
301-500	MUY MALA	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población sana.

Algoritmo para el cálculo del IMECA.

Los analizadores automáticos de la red de monitoreo atmosférico registran las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en partes por millón, que es la unidad que se utiliza técnicamente para reportar la Concentración de contaminantes gaseosos como el ozono, el monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, y dióxido de azufre. Por otra parte las partículas se reportan en microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$).

Para evitar confusiones sobre las diferentes unidades en que se expresan las concentraciones de contaminantes, se implementa el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). El IMECA permite comparar las magnitudes de diversos contaminantes en una escala homogénea, en la cual 100 puntos IMECA corresponde al valor de la norma de cada uno de los contaminantes. A continuación se brinda un procedimiento de calculo de para convertir concentraciones expresadas en ppm y microgramos por metro cubico a puntos IMECA o bien, lo contrario.

**Conversión de partes por millón
o microgramos por metro cubico a puntos IMECA.**

Contaminante	Cuando la concentración del contaminante se encuentre en el intervalo	Aplique la ecuación
Partículas suspendidas totales (PST)	de 0 a 275 µg/m ³	IMECA PST = 0.363636 *Concen. de PST
	de 275 a 1000 µg/cm ³	IMECA PST = 0.55172413 *Concen. de PST -51.72413
Partículas fracción respirable (PM-10)	de 0 a 50 µg/cm ³	IMECA PM10 = Concentración de PM10
	de 51 a 350 µg/cm ³	IMECA PM10 = (1/2)*Concent. de PM10 + 25
	de 351 a 420 µg/cm ³	IMECA PM10 = (10/7)*Concent. de PM10 - 300
	de 421 a 500 µg/cm ³	IMECA PM10=(10/8)*Concent. De PM10 - 225
	de 501 a 600 µg/cm ³	IMECA PM10 = Concentración de PM10 - 100
Bióxido de azufre (SO ₂)	de 0 a 0.13 ppm	IMECA SO ₂ = 769.230769 * Concent. de SO ₂
	de 0.13 a 1.00 ppm	IMECA SO ₂ = 459.770114 * Concent. de SO ₂ + 40.22989
Monóxido de carbono (CO)	de 0 a 13 ppm	IMECA CO = 7.69230769 * Concent. de CO
	de 13 a 50 ppm	IMECA CO = 10.8108109 * Concent. de CO - 40.5405
Bióxido de Nitrogeno (NO ₂)	de 0 a 0.21 ppm	IMECA NO ₂ = 476.190476 * Concentración de NO ₂
	de 0.21 a 2.00 ppm	IMECA NO ₂ = 223.463687 * Concent. de NO ₂ + 53.07264
Ozono (O ₃)	de 0 a 0.11 ppm	IMECA O ₃ =909.096909 * Concent. de O ₃
	de 0.11 a 0.6 ppm	IMECA O ₃ =816.32653 * Concent. de O ₃ +10.20409

Nota: Concen. = Concentración.

* Datos tomados de "Informe mensual de la calidad del aire" Diciembre de 1993

**Conversión de puntos IMECA a partes por millón
o microgramos por metro cubico.**

Contaminante	Cuando la Concentración del contaminante se encuentre en el intervalo	Aplique la ecuación
Partículas totales suspendidas (PST)	de 0 - 100 IMECA	Concent. de PST = IMECA PST/0.36363636
	de 100 - 500 IMECA	Concent. de PST = (IMECA PST +51.72413)/0.55172413
Partículas fracción respirable (PM10)	de 0 - 50 IMECA	Concent. de PM10 = IMECA PM10
	de 51 - 350 IMECA	Concent. de PM10 = (IMECA PM10 - 25) * 2
	de 351 - 420 IMECA	Concent. de PM10 = (IMECA PM10 + 300)*(7/10)
	de 421 - 500 IMECA	Concent. de PM10 = (IMECA PM10 + 225)*(8/10)
	de 501 - 600 IMECA	Concent. de PM10 = IMECA PM10 + 100
Bióxido de azufre (SO ₂)	de 0 - 100 IMECA	Concent. de SO ₂ = IMECA SO ₂ /769.230769
	de 100 - 500 IMECA	Concent. de SO ₂ = (IMECA SO ₂ +40.22989)/459.770114
Monóxido de carbono (CO)	de 0 - 100 IMECA	Concent. de CO = IMECA CO / 7.69230769
	de 100 - 500 IMECA	Concent. de CO = (IMECA CO + 40.5405)/10.8108109
Bióxido de Nitrogeno (NO ₂)	de 0 - 100 IMECA	Concent. de NO ₂ = IMECA NO ₂ /476.190476
	de 100 - 500 IMECA	Concent. de NO ₂ = (IMECA NO ₂ -53.07264)/223.463687
Ozono (O ₃)	de 0 - 100 IMECA	Concent. de O ₃ = IMECA O ₃ /909.096909
	de 100 - 500 IMECA	Concent. de O ₃ = (IMECA O ₃ -10.20409)/816.32653

Nota: Concen. = Concentración

* Datos tomados de "Informe mensual de la calidad del aire" Diciembre de 1993

Apéndice 3
Norma Oficial Mexicana NOM-034-SCFI-1993,
Instalación de equipo de carburación a gas LP
en motores de combustión interna.

1.- Objetivo y campo de aplicación.

Esta norma establece las especificaciones que deben cumplir las instalaciones de los equipos de carburación de gas LP, usados en vehículos automotores.

2.- Referencias

Esta norma Oficial Mexicana se complementa con las siguientes normas vigentes:

NMX-L-1	Gas licuado de petróleo. Especificaciones
NMX-Z-12	Muestreo para inspección por atributos.
NMX-X-4	Calidad y funcionamiento para conexiones utilizadas en mangueras para la conducción de gas LP y natural.
NMX-X-29	Mangueras utilizadas en la conducción y manejo de gas natural y LP con refuerzo de alambre o fibras textiles
NOM-021/4	Recipientes sujetos a presión no expuestos a calentamiento por medios artificiales para contener gas LP y natural, tipo no portátil camiones para usarse como depósito de combustible en motores.
automóviles y	
NMX-X-022	Reguladores y vaporizadores para carburación
NMX-D-181	Automóviles y camiones - Sistema de carburación - gas LP- carburadores y adaptadores
NMX-D-186	Automóviles y camiones - filtros.
NMX-W-18	Cobre - Tubos sin costura - para conducción de fluidos a presión.
NMX-X-2	Latón -conexiones roscadas-
NMX-X-31	Instalación de gas natural o LP -vapor o aire- válvulas de paso.
NMX-S-05	Seguridad- Extintores contra incendio a base de polvo químico seco con presión especificada.

3.- Especificaciones

4.- Clasificación.

5.- Especificaciones.

5.1 El equipo de carburación a gas LP debe contar con lo siguiente como mínimo:

a) Recipiente para gas LP.

b) Dispositivo.

- Filtro para gas
- Válvula interruptora de gas LP
- Regulador-vaporizador.
- Interruptor automático de gas LP
- Carburador o adaptador a gas LP.

c) Accesorios

- Tubería, manguera, y conexiones para gas natural o LP.
- Herrajes y tornillería

5.2 Características generales.

5.2.1 No se permite en ningún caso, la instalación de sistemas duales como (gas LP-gasolina)

- 5.2.2 El vehículo no debe contar con tanque de gasolina
- 5.2.3 La instalación debe ser supervisada y evaluada por una unidad de verificación en la especialidad correspondiente y ante SECOFI
- 5.2.4 Se debe realizar un mantenimiento preventivo por lo menos cada 6 meses al equipo de carburación de gas avalada por una unidad de verificación y amparada con un bitácora de mantenimiento ante SECOFI
- 5.2.5 Los cables de bujías deben contar con capuchones en buen estado, así como el sistema eléctrico
- 5.3 Características del recipiente
 - 5.3.1 Cumplir con las normas sobre depósitos
 - 5.3.2 Contar con placa de especificaciones del fabricante
 - 5.3.3 Estar pintado de color blanco o aluminio
 - 5.3.4 Estar instalado de forma tal que las válvulas de seguridad y llenado se encuentren siempre en la zona de vapor
 - 5.3.5 La válvula de alivio de presión debe del tipo de resorte interno, este ubicado dentro del recipiente.
 - 5.3.6 Estar debidamente nivelado de forma tal, que permita realizar una lectura del contenido del líquido
 - 5.3.7 Contar con protección de accesorios firmemente sujeta al recipiente.
 - 5.3.8 Las válvulas del recipiente deben cambiarse como máximo cada 5 años, a excepción de la de llenado que debe cambiarse cada dos años, con respecto al año de fabricación del recipiente.
 - 5.3.9 Someter el recipiente a pruebas de SECOFI.
- 5.4 Localización del recipiente
 - 5.4.1 Generalidades.
 - 5.4.1.1 la colocación del recipiente debe ser tal que los proyectiles arrojados por el movimiento de las ruedas no dañen al recipiente ni accesorios
 - 5.4.1.4 Se deben colocar en sitios de fácil acceso y en forma tal, que los operarios lleguen a ellos y/o a sus accesorios sin dificultad.
 - 5.4.1.5 La ubicación del recipiente debe ser tal que el propio vehículo proporcione protección contra daños por colisión.
 - 5.4.1.6 Su ubicación debe impedir, que en caso de fuga el flujo de gas sea hacia el compartimiento de los pasajeros
 - 5.4.1.12 No se permite la instalación de recipientes en
 - La parte delantera externa del vehículo
 - La parte trasera externa del vehículo
 - Arriba de la carrocería y sobre el techo de la cabina.
- 5.5 Filtros para gas
 - 5.5.1 Deben ser normalizados, y estar localizados entre el recipiente y la válvula automática interruptora de paso de gas LP
 - 5.6 Válvula interruptora de paso
 - 5.6.2 Debe estar instalada ente el, filtro de gas y el regulador-vaporizador, a una distancia no mayor de 0.05 m del cuerpo de este último.
 - 5.6.3 Cuando la válvula sea eléctrica debe estar conectada al interruptor de encendido del vehículo en su posición de ignición; además de proteger la instalación eléctrica con un fusible.
 - 5.7 Regulador-vaporizador.

5.7.1 Debe ser normalizado. Su instalación debe ser dentro del compartimiento del motor en un lugar de fácil acceso para su mantenimiento entre la válvula interruptora de paso de gas y el carburador adaptado, sujeto firmemente a una distancia mínima de 0.20 m del sistema de escape del motor.

5.7.3 Para vaporizar el gas, se prohíbe utilizar los gases de escape del motor y el uso de resistencias eléctricas.

5.7.4 El abastecimiento de aire de ventilación, calefacción o refrigeración destinado a la zona de pasajeros no debe ser afectado por la instalación del sistema de carburación.

5.8 Interruptor automático de paso de gas.

5.8.1 Este dispositivo debe impedir automáticamente el paso de gas al regulador-vaporizador, cuando el motor no este en funcionamiento

5.9 Carburador o adaptador para gas

5.9.1 Debe instalarse en el espacio para el de gasolina

5.10 Línea de alta presión.

5.10.1 Debe estar ubicada entre el recipiente y la válvula automática interruptora de paso de gas

5.10.3 Debe instalarse de forma tal que en ningún momento entre en contacto con partes en movimiento.

5.10.5 Debe instalarse a una distancia mínima de 0.2 m de cualquier fuente de calor y 0.3m del convertidor catalítico

5.10.9 La línea no debe tener dobleces que reduzcan su diámetro interior

5.10.13 Cuando la línea sea de manguera debe cambiarse cada 2 años como máximo.

5.11 Líneas de calentamiento para regulador-vaporizador

5.11.1 Cuando se utilice el agua o refrigerante del motor, para calentar el regulador - vaporizador, las mangueras deben ser del tipo de calefacción y las conexiones en el vaporizador deben ser de bronce o de nylon.

5.11.2 Cuando se utilice el aceite del motor, se puede utilizar manguera y conexiones como las empleadas en la línea de alta presión, y las conexiones en el vaporizador deberán ser de bronce.

5.11.3 Las conexiones del motor deberán ser de bronce

5.12 Línea de gas a baja presión.

5.12.1 La línea de gas entre el regulador-vaporizador y el carburador, debe ser manguera que no se degrade con gas y resista la presión requerida

5.13 Herrajes y tornillería

5.13.4 No se permiten dobleces mayores a 45 ° en los soportes o herrajes, para evitar la fractura de estos.

5.13.5 No se permite soldar o perforar el chasis por ningún motivo .

5.14 Equipo de seguridad

5.14.1 Debe contar como mínimo con un extintor de fuego tipo ABC, normalizado.

6 Métodos de prueba

Pruebas del sistema, línea, y conexiones.

6.1 Prueba de hermeticidad.

Debe efectuarse una prueba de hermeticidad para asegurarse que no hay fugas en el sistema.

6.1.1 Aparatos y equipo.

- Dispositivo de aumento de presión.
- Manómetro
- Conexiones y válvulas de cierre.

6.1.2 Procedimiento

Estando el equipo ya instalado en el vehículo l antes de conectar la línea de alta presión al recipiente, se conecta el equipo de prueba en el siguiente orden:

- Línea de gas de alta presión al manómetro
- Manómetro a válvula de cierre
- Válvula de cierre a fuente de aire a baja presión.

Se le proporciona al sistema una presión neumática de 0.58 MPa la cual se mide en el manómetro instalado, se cierra la válvula, esta presión debe mantenerse constante en el sistema durante 10 minutos como mínimo, comprobando así la hermeticidad del sistema

6.2 Prueba de fuga de gas por jabonadura.

6.2.1 Conectado el sistema de carburación al recipiente con gas y realizada la prueba anterior, se procede a verificar mediante agua jabonosa, que en todas las conexiones del sistema no existan fugas.

Se deben efectuar dos pruebas en el siguiente orden:

- a) Con el motor apagado.
- b) Con el motor funcionando

6.3 Verificación de la instalación del equipo de carburación.

6.3.1 Todos los puntos de esta norma que impliquen verificación, se realizarán visualmente

7 Marcado

7.1 Los vehículos que cumplan con esta norma, deben contar con la leyenda que indique "Unidad Equipada con Gas"

7.2 Cada vehículo con equipo de carburación a gas, debe contar con certificación avalada por una unidad de verificación en la especialidad correspondiente, autorizada por SECOFL, colocada en forma permanente.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- "Carburadores"
Miguel A. Castro.
Edit. C.E.C.S.A.
Barcelona, España, 1995.
- 2.- "Natural Gas application for air pollution control"
Nelson E. Hay.
U.S.A 1992
- 3.- "Eviromental Pollution Control"
P. Aqrme Vbesilind
Edit. Batterworth-Heinemann.
U.S.A 1990
- 4.- "Natural Gas"
R.V. Smith
Edit. Peen Well Books
U.S.A. 1979.
- 5.- "Natural Gas Measurement & Control"
Lohit Datta Barruda
Edit. Mc Graw Hill
U.S.A 1991
- 6.- "International Combustion Engine Fundamentals"
Jhon B. Heywood.
Edit Mc Graw Hill.
U. S. A. 1988