

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA



**“ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DEL GAS NATURAL
EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA”**

**INFORME DE SUFICIENCIA
Para optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO**

TEÓFILO ANDÍA SOTO

PROMOCIÓN 1999-II

**LIMA - PERU
2002**

Dedicatoria:

A mis Padres, en reconocimiento
por su esfuerzo y apoyo.

ÍNDICE

PRÓLOGO	01
 CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	03
1.1 Objetivos.....	04
1.2 Alcances.....	04
 CAPÍTULO 2	
GENERALIDADES DEL GAS NATURAL	05
2.1 Estado Natural.....	05
2.2 Composición.....	06
2.3 Reservas de Petróleo y Gas.....	07
2.4 Reservas de Gas Natural en el Perú.....	09
2.4.1 Reservas de Camisea.....	10
2.4.2 Composición de los Reservorios.....	11
 CAPÍTULO 3	
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	13
3.1 Propiedades del Gas Natural.....	14
3.1.1 Conceptos previos.....	16
3.1.2 Densidad.....	17

3.1.3	Relación Carbono-Hidrógeno.....	17
3.1.4	Poder Calorífico.....	17
3.1.5	Número de Octano.....	18
3.1.6	Factor de Compresibilidad.....	19
3.2	Características de Combustión de los Gases.....	21
3.2.1	Proceso de Combustión.....	21
3.2.2	Condiciones de Combustión.....	22
3.2.3	Reacciones Químicas de Combustión Completa.....	23
3.3	Factores Involucrados en la Combustión del Gas Natural.....	24
3.3.1	Temperatura de Ignición.....	24
3.3.2	Límites de Inflamabilidad.....	24
3.3.3	Temperatura Teórica de Combustión.....	25
3.3.4	Velocidad de Propagación de la Llama.....	25

CAPÍTULO 4

	APLICACIÓN A LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	26
4.1	Gas Seco.....	27
4.1.1	Gas Natural Comprimido GNC.....	27
4.1.2	Estaciones de Llenado de GNC.....	28
4.1.3	Gas Natural Licuado GNL.....	29
4.1.4	Diferencias entre GNL y GNC.....	30
4.1.5	Características del Gas Seco de Camisea.....	31
4.2	Gas Licuado de Petróleo.....	32
4.2.1	Aplicación en el Sector Transporte.....	33

CAPÍTULO 5

FORMAS DE SUMINISTRO EN LOS MCI	39
5.1 Motores de Encendido por Chispa	40
5.1.1 Formación de la Mezcla	40
5.1.1.1 Suministro de GNC a través del mezclador	41
5.1.1.2 Suministro de GN y aire a través de conductos diferentes . . .	42
5.1.1.3 Suministro de GN y aire a través de conductos diferentes y válvulas de ingreso diferentes	43
5.1.1.4 Suministro de GN en el colector de admisión a través de un inyector	43
5.2 Motores de Encendido por Compresión	46
5.2.1 Formación Combinada de la Mezcla	48
5.2.1.1 Suministro de GNC en el colector de admisión	48
5.2.1.2 Suministro de GLP en el colector de admisión	50
5.2.2 Formación Interna de la Mezcla	52
5.2.2.1 Sistema de Inyección Separada	52
5.2.2.2 Sistema de Inyección Común	53
5.3 Motores a Gas de Encendido por Dardo	55

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS COMPARATIVO EN LOS PARÁMETROS TÉCNICOS DEL MOTOR	57
6.1 Ciclo Termodinámico de los MCI	57

6.2 Análisis de los Parámetros en el Motor de Encendido por Chispa	60
6.2.1 Rendimiento.	60
6.2.2 Potencia	63
6.2.3 Emisiones de Contaminantes.	66
6.2.4 Consumo de Combustible.	69
6.3 Análisis de los Parámetros en el Motor de Encendido por Compresión	72
6.3.1 Rendimiento.	72
6.3.2 Potencia	73
6.3.3 Emisiones de Contaminantes.	76
6.3.4 Consumo de Combustible.	78
CAPÍTULO 7	
ANÁLISIS ECONÓMICO	79
CONCLUSIONES.	89
BIBLIOGRAFÍA.	94

PRÓLOGO

Uno de los requisitos básicos de los países de ésta región para alcanzar un ritmo de desarrollo alto y sostenido, es contar con energía suficiente y a bajo costo. Nuestro país basa su principal fuente de energía en el petróleo, sin embargo las reservas de éste hidrocarburo son limitadas. Así la búsqueda de nuevos recursos energéticos llevó al descubrimiento del reservorio de gas natural en Camisea, el cual por su volumen y características puede convertirse en el principal recurso energético del país durante éste siglo. La introducción del gas natural plantea un panorama distinto de la comercialización y empleo de combustibles en las diversas actividades industriales. Esto nos obligará a la comparación técnica y económica de la sustitución de los combustibles tradicionales.

El contenido de éste trabajo tiene por objetivo el estudio de la utilización del gas natural como combustible alternativo en los motores de combustión interna y mostrar los factores que hacen inmejorable su uso. Comienza con una breve presentación del uso del gas en este campo.

En el capítulo 2 se realiza una descripción general del gas, su estado natural, composición, y la valoración de las reservas en el Perú y el mundo.

Luego, sigue una sección donde se presenta las propiedades del gas que tienen mayor significación en un combustible alternativo para un motor de

combustión interna (cap. 3). Además, se realiza el análisis de las variables que influyen durante su combustión.

El uso del gas natural como un combustible alternativo depende del estado en que se encuentra o de sus productos obtenidos. Como consecuencia de esto, en el capítulo 4 son presentados en forma individual, los 3 productos principales del gas: GNC, GNL y GLP, donde se incluye detalles de la forma en que son almacenadas, tablas de propiedades físicas y algunos aspectos relacionados con su uso.

En el siguiente capítulo se describe como puede proveerse el combustible gaseoso en los motores de ciclos Otto y de Diesel, es decir, las formas de suministro del combustible de acuerdo al tipo de formación de la mezcla en los motores mencionados, indicando las limitaciones de su empleo en cada caso.

En el capítulo 6 se presenta, en base del análisis del ciclo termodinámico de los motores de combustión interna, la influencia en los principales parámetros y en la toxicidad de la aplicación de GNC en motores de ciclo Otto y de Diesel.

En el capítulo final se muestra un análisis económico de la sustitución de combustibles líquidos por el GNC específicamente en el campo de la automoción.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a las personas que por su estímulo y ayuda, hicieron posible el desarrollo de éste trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La utilización del gas natural en los motores de combustión interna se remonta a los comienzos del propio motor, cuando el ingeniero francés E. Lenoir, construyó el primer motor en 1859, el cual utilizaba gas de hulla como combustible. Posteriormente, el alemán Otto presentó el motor de encendido por chispa que funcionaba asimismo con gas de hulla (1876), y Rodolfo Diesel, patentó el motor de encendido por compresión en 1888. En sus inicios, los primeros motores se desarrollaron para aplicaciones estacionarias, la razón: la necesidad de contar con la proximidad de una reserva de combustible (gas de hulla) para el reabastecimiento frecuente. No obstante, el desarrollo de la red domiciliaria brindó posibilidades de aplicación para el transporte. Sin embargo, con la aparición de los combustibles líquidos y sus excelentes propiedades, tales como una gran energía por unidad de volumen, facilidad de transporte y conservación simple, los combustibles gaseosos fueron desplazados.

Fue debido a la crisis del Medio Oriente en 1973, que se renovó el interés por otros combustibles alternativos, empezando una nueva era para el gas natural. Asimismo, el problema de la contaminación ha impulsado el empleo de estos

carburantes para disminuir los niveles de emisión de contaminantes sin afectar el funcionamiento estable del motor.

1.1 Objetivos

El presente informe tiene los siguientes objetivos:

Describir las características del gas natural como combustible alternativo en los motores de combustión interna.

Determinar las ventajas técnicas y económicas que brinda la utilización del gas natural en los motores de combustión interna de ciclo Otto y de ciclo

Diesel respecto de los combustibles tradicionales.

1.2 Alcances y Limitaciones

Este trabajo presenta una comparación técnica y económica de la sustitución de los combustibles líquidos por GNC en motores de combustión interna de ciclo Otto y de Diesel, de aplicación en el campo de la automoción.

El análisis de las ventajas técnicas obtenidas por la conversión del motor, se fundamenta en base a las experiencias obtenidas en el extranjero (particularmente de España y Argentina) debido a que no se cuenta con un banco de pruebas para GNC.

La comparación económica considera fundamentalmente el ahorro que se obtiene por la diferencia de precios de los combustibles y no toma en cuenta los beneficios sociales relacionados con la reducción del daño por emisiones de contaminantes.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES DEL GAS NATURAL

El Gas Natural es el término genérico aplicado a la mezcla de hidrocarburos gaseosos que se encuentran en acumulaciones subterráneas, denominados reservorios. El gas natural, debido a sus excelentes propiedades de combustión y a su carácter de fluido, es apreciado como combustible para uso doméstico e industrial. Es además, la fuente del que se derivan grandes cantidades de hidrocarburos líquidos muy útiles y se utiliza en la fabricación de gran variedad de productos.

2.1 Estado Natural

Las acumulaciones de gases se encuentran en rocas de origen sedimentario (areniscas, calizas y pizarras), en las cuales las relaciones estructurales han creado una trampa natural para detener el movimiento migratorio de los gases. El gas, como el petróleo, se encuentra en el subsuelo en estructuras geológicas llamadas yacimientos, las cuales pueden ser de tres tipos:

- Yacimiento de gas asociado, donde el producto principal es el petróleo. El gas asociado es sencillamente el gas encontrado con petróleo.

- Yacimiento de gas seco o libre, donde el producto principal o único es el gas. El gas, desde el punto de vista virtual, está libre de petróleo. Sin embargo puede contener impurezas, tales como nitrógeno.
- Yacimiento de gas húmedo, donde el gas se encuentra con hidrocarburos líquidos a los que se le denomina condensados.

En algunos yacimientos a presión elevada el gas existe en forma de vapores en las condiciones que imperan en el yacimiento, pero al ser explotado el yacimiento y reducirse la presión, se condensan algunos de los componentes más pesados del gas y se recogen en forma de líquidos. Este comportamiento se debe al fenómeno de “condensación retrógrada”, condición propia de los yacimientos.

2.2 Composición

El gas natural está constituido por el conjunto de hidrocarburos de la serie parafínicas, que incluye el Metano, en una proporción superior al 70%, y otros hidrocarburos en proporciones menores y crecientes. En muchos gases naturales existen otros gases que pueden considerarse impurezas en virtud de sus propiedades químicas o físicas indeseables como combustibles. Los elementos o compuestos que reducen el valor unitario del gas natural como combustible o materia prima para determinadas industrias químicas son: el nitrógeno, el gas carbónico, el ácido sulfúrico, el helio y el vapor de agua. Los otros componentes del gas natural, además del metano, son el etano, el propano, el butano y otras fracciones más pesadas como el pentano, el hexano, el heptano, entre otros.

2.3 Reservas de Petróleo y Gas

Los yacimientos de gas que tienen similitud a los yacimientos de petróleo, están constituidos por estructuras geológicas de diferentes tamaños. Se presentan en rocas subterráneas y porosas. Para definir las reservas de gas, existen diferentes términos, siendo los más conocidos los siguientes:

- **Reservas Probadas:** Son las cantidades estimadas de gas natural, o líquidos basadas en las informaciones geológicas y de ingeniería obtenidas mediante métodos modernos, que demuestren con certeza que pueden ser recuperados.
- **Reservas Probables:** Son aquellas susceptibles de ser probadas en base a evidencias de gas o líquidos de gas natural.
- **Reservas Posibles:** Constituidas por las reservas que pueden existir, pero la información disponible no permite darle una clasificación superior.

La máxima reserva total en un campo de gas se puede considerar como la suma de sus reservas probadas más el 50% de sus reservas probables y el 25% de sus reservas posibles. Las reservas de gas se miden en millones de metros cúbicos o de pies cúbicos.

Las actuales evaluaciones de “Reservas del Petróleo” indican de unos 160 000 millones de TPE (Toneladas Equivalentes de Petróleo). Siendo el consumo anual del orden de 4 000 millones de TPE se prevé una reserva de unos 40 años. En el campo del gas se estiman unas reservas de 140 000 millones de TPE, no obstante existen buenas perspectivas de nuevos e importantes descubrimientos. Siendo un consumo de 2 000 millones de TPE por año, la relación reservas–producción de gas equivalen a más de 65 años al actual régimen de producción. Los incrementos de

reservas y de consumo de gas aumentan en mayor proporción respecto a los valores relativos al petróleo.

Cuadro N° 1
Tendencias del Consumo del Gas Natural

	1996		2015	
	Miles de millones m ³	TCF	Miles de millones m ³	TCF
América del Norte				
Canadá	79	2,8	124	4,4
México	45	1,6	130	4,6
USA	617	21,6	938	33,1
Total	741	26,0	1 192	42,1
América Latina				
Brasil	6	0,2	58	2,1
Argentina	25	0,9	45	1,6
Bolivia	3	0,1	11	0,5
Venezuela	25	0,9	84	3,0
Trinidad	8	0,3	14	0,5
Colombia	6	0,2	23	0,8
Otros	12	0,4	73	2,6
Total	85	3,0	311	11,1
Europa Occidental	339	12,3	651	23,0
Países del Pacífico	227	8,0	623	22,1
Medio Oriente y África	170	6,0	480	17,0
Rusia, Europa Oriental y ex-URSS	623	22,0	907	32,0
TOTAL MUNDIAL	2 185	77,5	4 164	147,3

TCF: Trillones de pie cúbicos
Fuente: Oil & Gas Journal

Se estima que el consumo mundial será el doble en menos de 20 años: de 2000 a 4 000 10⁶ TPE por año.

Cuadro N° 2
Reservas Probadas de Gas Natural

	01/01/1986	01/01/1996	2001
	TCF	TCF	TCF
Rusia y ex- URSS	1 516	2 066	2089
Medio Oriente	855	1 612	1903
Asia	201	363	522
África	198	348	389
América del Norte	373	299	249
América Central y Sudamérica	112	214	242
Europa Occidental y Oriental	226	169	266
TOTAL	3 481	5 071	5660
Producción Mundial	64	77	84
Duración de reservas en Años	54	65	67

TCF: Trillones de pie cúbicos

Fuente: Departamento de Energía de Estados Unidos

Las reservas de 140.000×10^6 TPE versus un consumo de 2.000×10^6 TPE cada año, aseguran como indicado más de 65 años de reserva sobre la base del consumo actual.

2.4 Reservas de Gas Natural en el Perú

En el país existen reservas de gas natural actualmente en explotación. Estas se encuentran en la zona noroeste (Talara) y en el zócalo continental de esa misma zona, además en la zona de selva, en Aguaytía. Sin embargo, estas reservas son mínimas en comparación con las encontradas en Camisea, en el departamento del Cuzco. Las reservas probadas de gas natural, se puede resumir en lo siguiente:

Zona	Reservas en pie ³	Reservas en m ³
Noroeste (Talara)	0,16 x 10 ¹²	0,005 x 10 ¹²
Zócalo Continental Norte	0,14 x 10 ¹²	0,004 x 10 ¹²
Este (Aguaytía)	0,29 x 10 ¹²	0,008 x 10 ¹²
Sureste (Camisea y otros)	8,70 x 10 ¹²	0,246 x 10 ¹²
Total	9,29 x 10 ¹²	0,263 x 10 ¹²

Nota. Volumen de reservas reportadas hasta fines del año 1999.

Las reservas del noroeste y del zócalo continental son significativas para la zona, y están constituidas por gas asociado. El yacimiento de gas natural de Aguaytía (Pucallpa) constituye el primer desarrollo industrial y comercial integrado de un campo de gas en el Perú. En 1993, Maple Gas Corporation obtuvo en licitación, los derechos de explotación exclusiva por 40 años. La infraestructura construida en el lugar permite extraer volúmenes de gas entre 55 a 65 x 10⁶ pie³/ día.

2.4.1 Reservas de Camisea

Las reservas de gas natural de Camisea representan el yacimiento más importante del país, y su volumen en reservas nos coloca en el cuarto lugar en Latinoamérica después de México, Venezuela y Argentina. Están ubicadas en el lado oriental de la Cordillera de los Andes, en la cuenca del río Ucayali, departamento de Cuzco, provincia de la Convención, distrito de Echarate. En esa área los primeros yacimientos descubiertos, fueron los de San Martín, Cashiriari y Mipaya. Las reservas probadas de gas “in situ” hasta 1999 del campo de Camisea son de 8,7 x 10¹² pie³ (0,24 x 10¹² m³), distribuidos en la siguiente forma:

San Martín	3,6 X 10 ¹² pie ³
Cashiriari	5,1 X 10 ¹² pie ³

También se considera en 587 millones de barriles las reservas de “líquidos de gas natural” en estas dos zonas. Se puede estimar, dentro de márgenes aceptables,

que las reservas recuperables de gas natural y de líquidos del gas natural en los yacimientos de Camisea son:

Gas natural	8,7 X 10 ¹² pie ³
Líquidos de gas natural	587 millones barriles
Petróleo equivalente (total)	2087 millones barriles

Se ha determinado que Camisea es un conjunto de yacimientos de gas natural no asociado del tipo de “condensación retrógrada”, es decir, reservorios que contiene un gas con alto contenido de hidrocarburos pesados, los que se condensan pasando de la fase gaseosa al estado líquido cuando se reduce la presión. La relación entre líquidos y gas natural es de 55 a 75 barriles por 10⁶ pie³ de gas. Esto le da mayor valor al proyecto al considerarse una reserva de líquidos con posibilidades de producir 50 mil barriles diarios (la producción de petróleo crudo actual es del orden de los 100 barriles diarios). Resumiendo, las reservas probadas del área de Camisea en energía equivalente hasta fines de 1999 fueron de 2087 mega barriles de petróleo, prácticamente seis veces nuestras reservas actuales de petróleo. Considerando una producción de gas de 600x10⁶ pie³/día, las reservas de gas podrían proveer los requerimientos energéticos por un período de 40 años.

2.4.2 Composición de los Reservorios

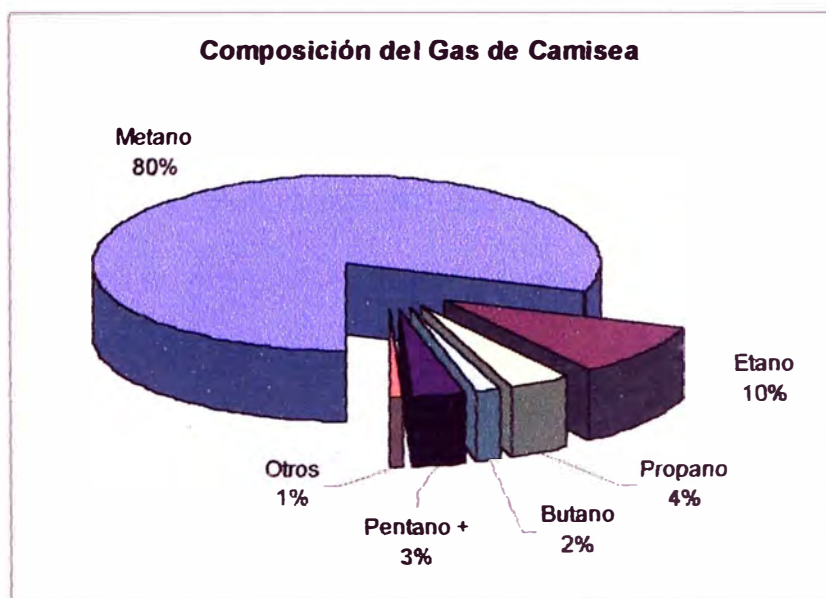
Por los estudios ya realizados, se estima que el gas de Camisea está constituido por 80% de metano, 10% de etano, 4% de propano, 2% de butano, 3% de pentano + y 1% de otros componentes. Los porcentajes de propano y butano y otros condensados le dan mayor valor al gas de este yacimiento. En el cuadro N° 3 se muestra la composición del gas natural en el reservorio de Camisea.

Cuadro N° 3

Composición del Fluido del Reservorio

	San Martín		Cashiriari
	Cushabatay % Mol	Agua Caliente % Mol	Agua Caliente % Mol
Hidrocarburos			
• Metano	80,48	80,59	83,46
• Etano	9,92	9,80	8,27
• Propano	3,80	3,80	2,97
• i-Butano	0,55	0,57	0,45
• n-Butano	1,11	1,13	0,83
• i-Pentano	0,43	0,45	0,34
• n-Pentano	0,43	0,44	0,34
• Hexano	0,59	0,62	0,47
• Heptano	0,54	0,56	0,47
• Octano	0,51	0,52	0,51
• Nonano	0,28	0,29	0,27
• Decano	0,18	0,19	0,17
• Undecano	0,11	0,11	0,11
• Dodecano	0,20	0,20	0,34
Otros Componentes			
Nitrógeno	0,54	0,55	0,73
Dióxido de Carbono	0,33	0,18	0,27
	100,00	100,00	100,00

Fuente: Proyecto Integral de Desarrollo del Gas de Camisea
PETROPERU (Petróleos del Perú)



CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Existen dos maneras fundamentales de calcular las propiedades de un fluido. La primera, exclusivamente teórica, es suponer que se comporta según un determinado modelo: termodinámico, de transporte, etc. y, por lo tanto, sus propiedades relacionadas se determinan siguiendo los supuestos del modelo. La segunda es básicamente experimental. Se hacen una serie de medidas en un rango de trabajo determinado de la propiedad en estudio y, con los valores obtenidos, se construye una correspondencia que predice el valor de la propiedad válida en un rango de trabajo anteriormente definido. Asimismo, las propiedades de un gas natural pueden ser determinadas directamente por ensayos de laboratorio o por predicciones de la composición química del gas. En el último caso, los cálculos se basan en las propiedades químicas de los componentes individuales del gas y en las leyes físicas referidas como una mezcla, relacionando las propiedades de los componentes a aquellas de la mezcla.

Debido a que el gas natural puede encontrarse tanto en fase líquida como en fase gaseosa, en los cuales sus propiedades varían notablemente, son necesarios procedimientos de cálculo distintos. Desde que el gas es una mezcla de hidrocarburos

y porque ésta mezcla es variada como resultado de las cantidades relativas de sus componentes, las propiedades físicas generales serán variables. De hecho no existe una composición o mezcla específica que puede ser referida como gas natural. En general, si la composición del gas natural es conocida, las propiedades físicas pueden determinarse de las propiedades de cada componente puro usando reglas de mezclas gaseosas. Sin embargo es necesario ensayos especiales para conocer el comportamiento de determinadas propiedades tales como el factor de compresibilidad, punto de rocío, etc.

En el cuadro N° 4, se detalla las características principales de los componentes del gas natural, el cual nos permite determinar, para una composición conocida, la potencia calorífica, densidad, cantidad de aire teórico necesario para la combustión, límites de inflamabilidad, etc.

3.1 Propiedades del Gas Natural

Dependiendo del campo de aplicación del gas, algunas de sus propiedades tienen mayor importancia que otras en aspectos técnicos o económicos. En esta sección se presentan aquellas propiedades que permiten caracterizar al gas natural como un combustible alternativo y su uso en los motores de combustión interna.

Cuadro N° 4
Características de los Componentes del Gas Natural

Componentes	Peso Molecular	Densidad Relativa	Potencia Calorífica Sup. kcal/m ³ (n)	Potencia Calorífica Inf. kcal/m ³ (n)	Aire Teórico m ³ / m ³	Volumen de Humos Secos m ³ / m ³	Volumen de Humos Húmedos m ³ / m ³	Límite Inferior de Inflamabilidad %	Límite Superior de Inflamabilidad %	Fórmula Química
Metano	16,043	0,5537	9 530	8 570	9,52	8,52	10,52	5	15	C H ₄
Etano	30,070	1,0378	16 860	15 390	16,67	15,17	18,17	3	12,5	C ₂ H ₆
Propano	44,097	1,5219	24 350	22 380	23,81	21,81	25,81	2,2	9,5	C ₃ H ₈
Butano	58,124	2,0061	32 060	29 560	30,95	28,45	33,45	1,7	8,5	C ₄ H ₁₀
Anhídrido Carbónico	44,011	1,5189	0	0	0	1	1	-	-	C O ₂
Oxígeno	32,00	1,1044	0	0	0	1	1	-	-	O ₂
Hidrógeno	2,016	0,0695	3 050	2 570	2,38	1,88	2,88	12,5	74	H ₂
Nitrógeno	28,016	0,9669	0	0	0	1	1	-	-	N ₂
Aire	28,97	1.000	0	0	0	1	1	-	-	-

3.1.1 Conceptos Previos

- a) Composición: La composición de una mezcla de gas natural puede ser expresado en fracción molar, fracción en volumen, o fracción en peso de sus componentes. La fracción en volumen se basa en el volumen del componente del gas medido en condiciones estándar, de modo que la fracción en volumen es equivalente a la fracción molar y_i . La fracción molar del componente "i" se define como:

$$y_i = \frac{n_i}{\sum n_i} = \frac{V_i}{\sum V_i}$$

- b) Medición de Volumen: El volumen de un gas varía en función de su presión y temperatura. Además, depende de las condiciones de su medición:
- Condiciones Standard en m^3 : Medido seco a 15 °C y presión 760 mm de columna de mercurio (Hg).
 - Condiciones Normales en m^3 : Medido seco a 0°C y presión 760 mm de columna de Hg.
 - Condiciones Standard en pie^3 : Medido saturado con vapor de agua a 60°F y presión 30 pulg. de columna de Hg.

- c) Peso Molecular Aparente M_a : Si bien en un sentido estricto, una mezcla de gas no tiene un peso molecular, se comporta como si lo tiene. Así, el concepto de peso molecular aparente es bastante útil en caracterizar una mezcla de gas. Se define como: $M_a = \sum y_i M_i$

Las leyes de los gases pueden ser aplicadas a la mezcla de gases usando en las fórmulas el peso molecular aparente en lugar del peso molecular de un solo componente.

3.1.2 Densidad (ρ)

Es la magnitud que se define como la masa de la sustancia por el volumen que ocupa. Dependiendo de como está definido el volumen, la densidad de un gas se puede expresar en kg/m^3 (s) y kg/m^3 (n) en el Sistema Internacional SI, ó en lb/pe^3 (s) en el Sistema Inglés. Para evitar la definición de las condiciones de medición en la fijación de la densidad, se utiliza la “densidad relativa” que se define como la relación entre la densidad del gas y la de la densidad de un gas de referencia, generalmente el aire. La densidad relativa del gas natural es de 0,6 ó más (aire = 1). Siendo bajo este valor, su contenido por unidad de volumen es también bajo respecto de los combustibles tradicionales.

3.1.3 Relación Carbono/Hidrógeno

Los elementos de casi la totalidad de los combustibles son el carbono y el hidrógeno, aunque algunos contienen azufre en pequeñas proporciones. La proporción en peso del carbono en todos los combustibles varía entre 75 y 100% siendo el metano CH_4 el más liviano con una relación carbono/hidrógeno igual a 3, lo que significa que tiene 75% en peso de carbono.

3.1.4 Poder Calorífico H_u

La calidad del combustible se determina por el “poder calorífico”, que es la cantidad de calor desprendido por la combustión completa de una unidad másica (para el líquido) ó volumétrica (para un gas) de combustible. A partir del conocimiento de la composición del gas natural se puede conocer aproximadamente

el poder calorífico del mismo. Siendo y_i el contenido volumétrico de cada componente, se puede calcular conforme a la ecuación:

$$Hu_{mez} = \sum_1^n y_i Hu_i$$

El poder calorífico superior (PCS) de un gas se determina, cuando el agua resultado de la combustión, se condensa en los productos de la combustión. El poder calorífico inferior (PCI) se determina, cuando el agua resultado de la combustión, se encuentra en estado de vapor en los productos de la combustión. En el SI, el poder calorífico se expresa en MJ/m^3 (n).

El poder calorífico superior del gas natural es de unas 38,93-40,19 MJ/m^3 . Comparando el poder calorífico por unidad másica respecto de la gasolina, el gas natural tiene un mayor poder calorífico aproximadamente en un 13%. Desde este punto de vista, se deduce que el gas aporta mayor energía calorífica que la gasolina.

3.1.5 Número de Octano NO

Es la capacidad de resistencia a la detonación, el cual ocurre en el proceso de combustión, cuando en su última fase la combustión se efectúa a excesiva velocidad, apareciendo el golpeteo y recalentamiento que puede incluso destruir las principales piezas del motor. El número de octano es relacionado con los motores de combustión de encendido por chispa. Numéricamente, es igual al porcentaje en volumen de isoctano que posee la máxima resistencia a la detonación, en una mezcla de n-heptano que es muy propenso a la detonación.

Los combustibles gaseosos poseen mayor resistencia antidetonante que las gasolinas. El rango del número de octano del gas natural es de 115 a 120 y puede llegar hasta 130. Para valorizar la calidad antidetonante de los combustibles gaseosos

se propuso el “Número de Metano”. Este consiste en comparar las calidades antidetonantes de una mezcla de gas combustible con respecto a una mezcla conocida de metano e hidrógeno (la escala de 100 representa la calidad detonante del metano y 0 la calidad detonante del hidrógeno). Cuando ambas mezclas tienen las mismas propiedades de detonación, la mezcla tiene un número de metano correspondiente al porcentaje de metano en la mezcla estándar.

3.1.6 Factor de Compresibilidad (z)

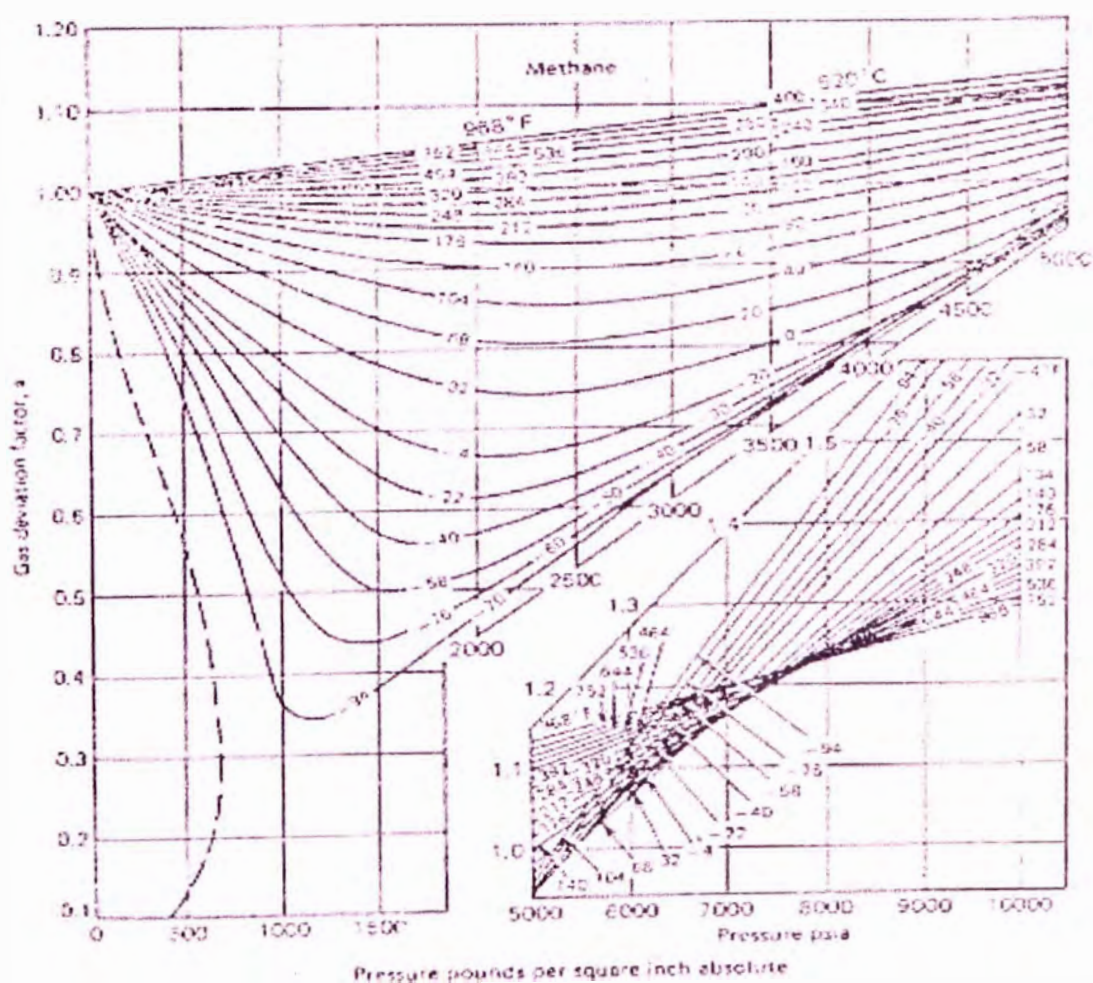
Cuando varía la presión y temperatura en los gases se debe tomar en cuenta que estos poseen compresibilidad. La cantidad de un gas en un recipiente depende, además de la presión y temperatura, de un tercer elemento: el factor de compresibilidad. El factor de compresibilidad z es un factor de corrección de la Ley de Gases Ideales, así la ecuación de estado queda de la siguiente forma $PV = znRT$. El factor z depende de la composición del gas y de la temperatura. Su relación se ha obtenido mediante investigaciones experimentales. El factor conviene tomarlo en cuenta cuando se requiere determinar con precisión la cantidad real de los gases a presiones mayores de 2 MPa.

En el siguiente cuadro se presenta la variación z para el gas natural (metano) a ciertas condiciones. Se puede observar que para una presión de 25,32 MPa (250 kg/cm²) y una temperatura de 20 °C, el factor z es 1,13. Esto significa que el volumen de gas natural es 13% más de lo calculado con la ecuación de estado.

Presión	15,2 MPa	25,32 MPa
Temperatura (°C)	Factor z	
-20	1,45	1,18
0	1,30	1,16
20	1,20	1,13
40	1,15	1,09

Figura N° 1

Factor de corrección z para el Metano



3.2 Características de Combustión de los Gases

La combustión, se puede definir como la acción de arder o quemarse de una sustancia combustible, por efecto de la reacción de sus elementos componentes con el oxígeno de cuerpos comburentes, formando nuevos compuestos y liberando energía en forma de luz y calor.

La mayoría de los elementos químicos pueden combinarse con el oxígeno y todas las reacciones de oxidación son exotérmicas. Los combustibles industriales se encuentran constituidos fundamentalmente por carbono, hidrógeno y azufre siendo el resto impurezas y componentes minoritarios. Como comburente se emplea generalmente el aire, solo en casos excepcionales se emplea el oxígeno puro. Para efectos prácticos, se considera que el aire está constituido: 23% oxígeno + 77% nitrógeno (en peso) ó 21% + 79% (en volumen). El aire cumple funciones importantes en el proceso de combustión como: aportar el oxígeno requerido por la combustión, aportar la energía cinética para manejo de la turbulencia y formación de llama, y actuar como medio de transferencia y recuperación de calor.

3.2.1 Proceso de Combustión

El carbono e hidrógeno en cualquier combustible sólido, líquido, gaseoso, se cual fuere la forma química en que se encuentren combinados, se disociarán a su forma elemental antes de reaccionar con el oxígeno disponible. El hidrógeno reacciona en forma elemental (gas-gas) en una combustión instantánea aportando calor y vapor de agua. El carbón reacciona por difusión térmica y molecular en un proceso de combustión heterogénea, efectuándose en dos etapas: combustión sólido-gas desprendiendo CO, y la de éste con el O₂ para completar el CO₂.

La velocidad de propagación de la llama de hidrógeno es 50 veces mayor que la del CO, siendo ambas medidas en milésimas de segundo. Por lo tanto, la cinética de reacción de la combustión resultará determinada por las partículas de carbón de diferentes características y tamaños, y solo influenciadas por el hidrógeno. De ésta forma el control de la llama depende de la combustión de la partícula de carbón, en especial de su tamaño.

En el caso del gas natural las partículas de carbón serán microscópicas (500 Å Angstroms), su combustión muy rápida y la llama muy corta, poco luminosa y de baja emisividad.

En los combustibles líquidos, dependiendo de la proporción del combustible que se craquea en fase líquida (decenas de micras) y la calidad de atomización, las partículas de carbón serán de mayor tamaño demorando más su combustión, con llamas muy luminosas y emisivas.

3.2.2 Condiciones de la Combustión

Para que la combustión pueda iniciarse y propagarse es necesario que se cumplan dos condiciones en forma simultánea:

- El combustible y el comburente deben mezclarse en ciertas proporciones.
- La temperatura de la mezcla debe ser localmente superior a su temperatura de inflamación.

Para que la combustión prosiga, otras dos condiciones suplementarias son requeridas:

- Los productos de la combustión tienen que evacuarse a medida que se produzcan.

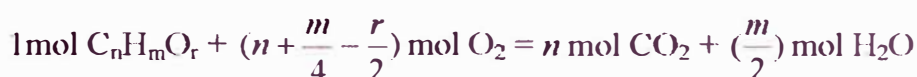
- La alimentación del combustible y comburente deben asegurarse de forma que satisfagan las dos primeras condiciones.

Para que la combustión se realice en buenas condiciones en la cámara de combustión o en el laboratorio del horno, es necesario que:

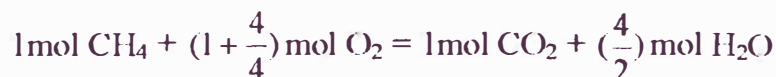
- La cantidad de aire sea la mínima conveniente para obtener una combustión completa.
- Se cumplan determinadas exigencias de tiempo, turbulencia y temperatura.

3.2.3 Reacciones Químicas de Combustión Completa

La ecuación de reacción de la combustión de un componente del combustible gaseoso tipo $C_nH_mO_r$ se puede representar partiendo que para quemar n átomos de C se requiere n moles de O_2 y como resultado se forman n moles de CO_2 ; para quemar $m/2$ moles de H_2 se requiere $m/4$ moles de O_2 formándose $m/2$ moles de H_2O . La reacción de oxidación del componente se expresa por la ecuación:



La reacción química del metano CH_4 con el oxígeno en base a la ecuación tiene la forma siguiente.



La cantidad teórica de aire (en mol o m^3) necesaria para la combustión de 1 mol ó $1 m^3$ de combustible gaseoso, compuesto de una serie de elementos tipo $C_nH_mO_r$, se determina con la siguiente relación:

$$L_o = \frac{1}{0,21} \sum \left(n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2}\right) C_nH_mO_r$$

Donde $C_nH_mO_r$ son las fracciones volumétricas de los componentes separados en el combustible.

A modo de ejemplo, 1 m^3 (n) (Condiciones Normales de P y T) de gas natural necesita de 10 m^3 (n) de aire para quemarse totalmente, o un 1 m^3 (n) de gas propano necesita de 23 m^3 (n) de aire para obtener una combustión completa.

3.3 Factores Involucrados en la Combustión del Gas Natural

3.3.1 Temperatura de Ignición

La temperatura de ignición de una mezcla de gas y aire u oxígeno, es la mínima temperatura, a la cual la combustión puede iniciarse y propagarse en un punto de la mezcla, al introducir una fuente externa de inflamación. Cuando es alcanzada la temperatura de ignición, la acumulación de calor excede la disipación, por lo que la temperatura se eleva por encima del punto de ignición de esta manera se mantiene la combustión. Un aumento en la presión generalmente baja la temperatura de ignición, un asunto de importancia en los motores de combustión interna; sin embargo la presencia de humedad eleva el punto de ignición. El auto-encendido o combustión espontánea de una mezcla de gas natural y aire, comprendida dentro de los límites de inflamabilidad, tiene lugar a una temperatura de $650 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.2 Límites de Inflamabilidad

La mezcla de gas con aire no puede inflamarse, ni puede quemarse si existe demasiado o muy poco combustible presente. La inflamación es una explosión débil que es posible en una mezcla de gas y aire dentro de los límites de concentración estrictamente determinados. El límite superior de inflamabilidad se define como la máxima concentración de gas en la mezcla, por encima de la cual es imposible la

inflamación y combustión debido a la escasez de oxígeno. El límite inferior de inflamabilidad se caracteriza por la mínima concentración de gas en la mezcla, por debajo del cual la mezcla no es lo suficientemente rica en combustible para quemar. Es importante considerar que los límites de inflamabilidad permiten conocer aspectos relacionados con los parámetros de diseño de equipos e incluso de seguridad industrial.

3.3.3 Temperatura Teórica de Combustión

Es aquella temperatura que se alcanzaría si el gas fuera completamente quemado con la cantidad teórica de aire, y el calor de combustión fuera empleado únicamente en calentar los productos de la combustión. La temperatura teórica de combustión del gas natural en el aire es de 1900 °C. En la práctica esa temperatura no se alcanza por pérdidas de calor.

3.3.4 Velocidad de Propagación de la Llama

Una llama estable de mezcla aire-gas, comprendida entre los límites de inflamabilidad, se propaga a una cierta velocidad, que depende de variables físicas y químicas, composición de su mezcla con el aire de combustión, temperatura, presión, forma y dimensiones del quemador. La llama puede viajar en uno de tres modos en una mezcla combustible, dependiendo de las condiciones de ignición: a) con movimiento relativamente lento y uniforme, b) con un movimiento más rápido y acelerado, c) éste último puede pasar a una rápida explosión que puede o no estar acompañada por detonación.

Para el gas natural la velocidad de propagación es del orden de 0,3-0,4 m/s. En un motor de combustión interna que opera con gasolina, el valor medio de la velocidad de propagación de la llama es de 30-50 m/s.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN A LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

La situación actual de contaminación ha motivado la búsqueda de nuevos recursos energéticos que permitan revertir éste problema. La contaminación se puede originar por fuentes fijas (equipos estacionarios) o móviles (automoción). En las actividades económicas de un país, la necesidad de movimiento ha derivado que el sector transporte, después del sector industrial, sea el sector de mayor demanda de combustible. Esto añadido al incremento del parque automotor, han elevado los niveles totales de contaminación en las áreas urbanas. Es por éste motivo que en muchos países con reservas de gas natural, se siguen programas tendentes al empleo del gas en los motores de combustión interna por motivos económicos y ecológicos.

El gas proveniente de los yacimientos es separado en “gas seco” y en condensado del cual se obtiene el “Gas LP”. Estos productos, indistintamente del estado en que se encuentran, se pueden emplear como combustibles alternativos en los motores de combustión interna. Además, a partir del gas natural se puede obtener mediante “síntesis” combustibles líquidos tales como el metanol y etanol.

4.1 Gas Seco

Está constituido principalmente por metano CH_4 y a condiciones atmosféricas se encuentra en estado gaseoso. Puede encontrarse en dos estados: GNC y GNL.

4.1.1 Gas Natural Comprimido GNC

Conocido en algunos países como NGV (Natural for Vehicles). Es el gas comprimido y almacenado en cilindros de alta presión de unos 200-220 kg/cm^2 . La calidad del producto está determinada por la composición del gas puro y por los condensados de gas. La posibilidades de usar GNC como combustible alternativo, sustituyendo a los derivados del petróleo, sigue creciendo debido a sus excelentes propiedades, bajo nivel de contaminación y bajo costo.

Su utilización en el transporte ha sido menor, en parte porque es más difícil almacenar que los combustibles líquidos; la autonomía conseguida es inferior y tiene que tenerse en cuenta el incremento de peso de los cilindros donde se almacena el gas. Los cilindros convencionales son de acero y por lo tanto su peso es relativamente elevado. Sin embargo, la nueva generación de cilindros reduce el espesor de acero mientras se refuerzan exteriormente con fibras de vidrio continuo impregnado de resinas de poliéster, permitiendo reducciones del 40% en peso.

En el cuadro N° 5, se muestra las características de dos tipos de GNC para automóviles. Estos provienen de estaciones especiales de GNC. El GNC no contiene aditivos, por lo tanto no produce depósitos carbonosos en las cámaras de combustión ni fenómenos de corrosión, la mezcla en el aire es perfecta y la combustión es total. Las características del motor se mantienen por más tiempo, y esto aporta mayores beneficios a la vida útil del motor.

Cuadro N° 5

Propiedades del Gas Natural Comprimido para motores de automóviles

PROPIEDADES	TIPO A	TIPO B
Presión mínima de gas en los balones MPa (kg/cm ²)	19,62 (200)	19,62 (200)
Temperatura máxima del gas suministrado en la estación de servicio, °C:		
- Para climas fríos	+40	+40
- Para climas cálidos	+45	+45
Composición, % en volumen:		
Metano	95±5	90±5
Etano, máx.	4,0	4,0
Propano, máx.	1,5	1,5
Butano, máx.	1,0	1,0
Pentano, máx.	0,3	0,3
Dióxido de carbono, máx.	1,0	1,0
Oxígeno, máx.	1,0	1,0
Nitrógeno, máx.	0-4	4-7
Densidad relativa (respecto al aire, $\rho_{\text{aire}} = 1$)	0,586	0,611
Número de octano (método "Motor")	103,0	102,3
Poder calorífico inferior a +20 °C, MJ/m ³	33,9	33,7
Temperatura de inflamación a 760 mmHg, °C	624,7	608,0

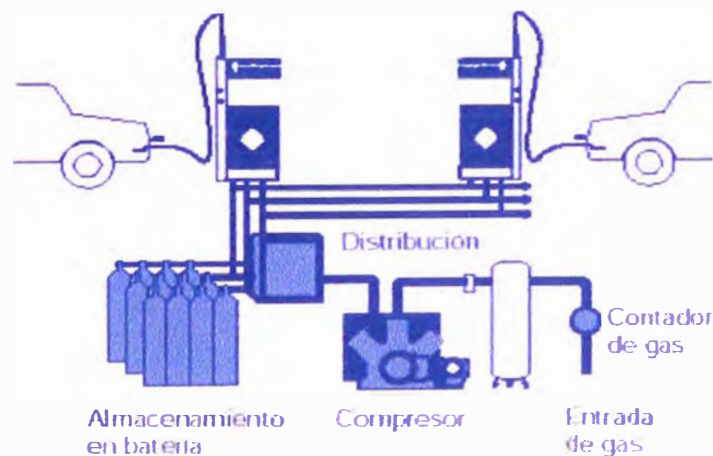
4.1.2 Estaciones de Llenado de GNC

La infraestructura de estaciones de llenado de gas GNC normalmente a 200 kg/cm², va creciendo a medida que crece el parque automotor de vehículos de NGV. Según el uso del vehículo hay dos tipos de estaciones de carga. Los de carga lenta para vehículos que disponen de suficiente tiempo para el llenado y que pueden hacerlo siempre en el mismo sitio como los autobuses, camiones de basura, flotas de distribución, etc. (el cual es completado en 5 a 8 horas, ejecutado generalmente durante la noche) y los de carga rápida que han de funcionar de manera similar a las estaciones de servicio de gasolina y diesel para dar servicio a vehículos pequeños que están de paso (el cual es completado en 4 a 5 minutos). En éstas últimas, cuando no se esté prestando servicio, los compresores van llenando de gas natural unos cilindros

a presión que podrán descargar en el depósito del vehículo cuando éste llegue a la estación, incrementando así la velocidad de carga. El requerimiento de potencia del compresor depende de la presión de ingreso del gas. Para una presión de 2 bar, la potencia específica SP en [kw.h/m³] será 0,32 para un compresor pequeño; 0,28 para un compresor grande. Para una presión de ingreso de 5 bar SP será: 0,26; 0,22 (para el compresor pequeño y grande respectivamente).

Figura N° 2

Estación de carga sistema GNV



4.1.3 Gas Natural Licuado GNL

Se obtiene por enfriamiento del gas natural a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, de tal forma que el metano pasa a estado líquido, ocupando la 1/600 de volumen que el gas seco. De esta manera se transporta grandes cantidades del mismo hacia centros de consumo, a través de cisternas criogénicas o mediante tanques presurizados y aislados. El proceso de licuefacción extrae la mayoría del vapor de agua, butano, propano y otros

indicios de gases que están usualmente incluidos en el gas que llega a la terminal. El GNL resultante es usualmente más del 98% de metano puro.

La dificultad de uso como combustible se debe al alto costo de almacenamiento a esas condiciones. Sin embargo, la forma líquida es más densa que el GNC. Tiene mayor energía por unidad de volumen, por lo tanto, mayor energía puede ser almacenada en el mismo espacio sobre un automóvil o camión. Esto significa que el GNL es válido para vehículos que viajan distancias largas antes de parar por más combustible.

4.1.4 Diferencias entre GNL y GNC

- **Densidad de Energía.** Un mayor volumen de GNL puede ser almacenado en un menor espacio. Por unidad de volumen, el GNC tiene menos de un cuarto del contenido de energía de la gasolina, por lo tanto requiere mayor almacenamiento. Basado en el estado físico del combustible, aproximadamente más de 2 a 4 veces de GNL que GNC puede ser almacenado en un vehículo.
- **Control sobre la Composición del Combustible.** La composición del GNL puede ser determinado con alto grado de precisión, dado que la mayor parte de GNL producido es 99% metano. Teniendo este control, se puede tener un sistema de combustible y motor perfectamente afinado, llevando a la optimización del funcionamiento, mejor economía y menores emisiones.
- **Entrega y Disponibilidad.** El GNL es similar a la gasolina, puede ser transportado en camión, tráiler, barco, etc. La infraestructura de entrega está listo en el lugar.

- Seguridad. El GNL tiene algunos aspectos adicionales de seguridad que el GNC. Debido a que el GNL es refrigerado a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, se debe evitar todo contacto corporal con el combustible líquido, metales o gases fríos, en caso contrario, puede ocurrir hinchazón o envenenamiento por la helada. Además, como no se puede agregar odorizantes al GNL, deben instalarse detectores de gas metano.

4.1.5 Características del Gas Seco de Camisea

Se estima que la composición así como las características típicas del “gas seco” a suministrar al usuario, serán tales como las mostradas en el cuadro N° 6. Estas características son apropiadas cuando el gas se utiliza como un combustible industrial.

Cuadro N° 6
Rango de Propiedades del Gas Combustible

Composición del Gas Combustible

Componentes	Rango de Porcentaje %	
Metano	86,4	88,4
Etano	10,6	10,4
Propano	1,8	0,4
n-Butano	0,2	
i-Butano	0,1	
n-Pentano	–	–
i-Pentano	0,1	
n-Hexano+	–	–
Oxígeno	–	–
Nitrógeno	0,6	0,6
Dióxido de carbono	0,2	
Contenido de agua	–	
Impurezas	Libre de polvo o material sólido	

Propiedades

Poder Calorífico Superior a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	42,95 MJ/m ³ (1 155 BTU/pe ³)
Poder Calorífico Inferior a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	38,73 MJ/m ³ (1 040 BTU/pe ³)
Peso molecular aparente	17,93
Densidad relativa (respecto al aire)	0,61 a 0,63
Relación carbono/hidrógeno	3
Volumen de aire teórico	10,48 m ³ aire/ m ³ gas
Límite inf. de inflamabilidad en el aire	4,6 % (gas)
Límite sup. de inflamabilidad en el aire	14,4 % (gas)

Del cuadro anterior y con lo visto anteriormente, podemos realizar el siguiente análisis:

- El gas seco necesario para el empleo en los motores de combustión debe estar compuesta generalmente de metano (aprox. 95%). Esto está relacionado directamente con el proceso de separación de los líquidos del gas.
- La baja densidad del gas hace que su contenido por unidad de volumen sea baja, requiriendo mayor almacenamiento para su utilización en un vehículo. El gas seco, distribuido a las estaciones, debe ser comprimido para su utilización como combustible vehicular y alcanzar una autonomía de funcionamiento aceptable.
- Debido a la ausencia de plomo, azufre, y otras impurezas en su composición, la combustión es más limpia que los combustibles líquidos.
- Tiene mayor temperatura de auto inflamación que la gasolina y un estrecho rango de inflamabilidad. Como resultado, el gas natural es menos riesgoso que la gasolina en términos de combustión o ignición accidental. Siendo más liviano que el aire, las fugas no son peligrosas, este se esparciría en el ambiente. Sin embargo en lugares cerrados, podría convertirse en un riesgo potencial de encendido y fuego.

4.2 Gas Licuado de Petróleo GLP

Se obtiene en las Unidades de Fraccionamiento de los líquidos extraídos del gas. Es una mezcla de propano, butano, propileno y butileno, variando ligeramente la cantidad de sus componentes para diferentes grupos de GLP. A condiciones atmosféricas estándar de presión y temperatura, los componentes del GLP están en

estado gaseoso; al ser comprimidos con una presión moderada 100 a 300 psi (0,68 a 2,06 MPa), pasan al estado líquido. Se almacena en tanques especiales, bajo presión, usualmente a 200 psi, haciendo posible su almacenamiento y transporte en estado líquido.

Constituye un producto de excelentes cualidades, muy apropiado para una diversidad de aplicaciones que van desde el hogar, comercio, hasta la industria en general, incluso en la generación de electricidad. En muchos hogares es usado para calefacción, cocina, calentar agua y otras necesidades de energía. Su campo principal de utilización es la industria química. Debido a que el GLP tiene muchas de las ventajas de los combustibles líquidos de almacenamiento y transporte, así como las ventajas de los combustibles gaseosos, se está incrementando su uso, como combustible de motores.

4.2.1 Aplicación en el Sector Transporte

El GLP constituye un excelente combustible para los motores de combustión interna, preferentemente los de encendido por chispa, en los que se puede emplear el producto directamente reemplazando a la gasolina en uso alternado con ésta, siendo necesario solo algunos aditamentos de menor costo. La mayoría de los vehículos a gasolina son transformados usando “kits de conversión”.

El GLP parece ser la primera alternativa combustible de uso en el sector automotriz. Tiene una densidad de energía que es 73% de la densidad de energía de la gasolina. Por lo tanto, requiere tanques ligeramente más grandes para mantener un rango de gasolina equivalente. Cuando el GLP se emplea en un vehículo, se almacena en estado líquido y cambia a gas antes de ingresar al cilindro del motor como resultado de la disminución de presión. Así en estado gaseoso, se mezcla

fácilmente con el aire y se consigue casi una combustión completa, reduciendo algunas emisiones como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las ventajas que ofrece el GLP para su uso automotor son:

- Permite un ahorro en el costo del combustible por kilómetro recorrido entre 20-40 %.
- Mayor duración del motor (tiene un alto número de octano > 100 RON).
- Menores gastos en el mantenimiento del motor (no deja residuos de combustibles ni otros contaminantes metálicos al no emplear aditivos), mayor duración de las bujías, mayor tiempo de cambio del aceite lubricante.
- La infraestructura para montar estaciones de abastecimiento es accesible en precio y tecnología.
- Combustible limpio que ayuda a reducir la contaminación.

En el cuadro N° 7, se muestran las características de dos tipos de gas licuado de petróleo, siendo el Tipo A para clima frío, y el Tipo B para clima cálido.

Cuadro N° 7

PROPIEDAD	TIPO A	TIPO B
Poder Calorífico MJ/kg	45-45,5	45,5-46
Porcentaje máx. en masa de contenido de gases:		
Metano, etano, etileno	4,0	6,0
Propano, propileno	75,0	34,0
Butano, butileno	20,0	60,0
Residuo líquido a 20°C, % máx. en volumen	1,0	2,0
Presión de saturación (MPa manométrica) a la temperatura:		
+45 °C	1,57	1,57
-20 °C	0,157	---

En nuestro país, el empleo del GLP en el parque automotor (en lugar de la gasolina) se está incrementando por ser limpio y económico. La adaptación es sencilla y la inversión se puede recuperar de 3 a 6 meses. El costo del equipo de conversión incluyendo el costo del tanque es alrededor de \$450,00 o menos dependiendo de la marca, capacidad del tanque, etc. Siendo un ahorro promedio de 15,00 soles diarios la inversión se puede recuperar dentro de 3,5 meses. En el mercado interno, el gas licuado de petróleo vendido en balones y conocido simplemente como gas, es empleado en el sector doméstico y en el industrial donde cumple un rol importante. El cuadro N° 8 muestra la composición y especificaciones del GLP producido en las refinerías de La Pampilla y Talara por PETROPERÚ.

Cuadro N° 8

Características y Propiedades del Gas Licuado de Petróleo

Inspecciones Típicas

Presión de vapor a 100 °F (37,8 °C)	116-125 psi _g (psi manométrico)
Composición por volumen	
• Hidrocarburos tipos C ₃	50-60 %
• Hidrocarburos tipos C ₄	50-40 %
Temperatura 95% evaporado (°C)	2% máximo
Gravedad específica a 15,6 °C	0,543-0,535
Corrosión lámina de cobre, 1 hr a 37,8 °C	1a
H ₂ S gramos / 100 pie ³	Negativo
Agua libre	Nulo
Prueba de mancha	Pasa
Poder Calorífico	97 000 BTU/gal (27,04 MJ/l) 20 785 BTU/lb (48,35 MJ/kg)
Densidad	4,623 lb/gal (0,553 g/cm ³)
Seguridad:	
• Tóxico por inhalación.	
• Muy inflamable, no puede ser observado, pero si puede percibirse por el olfato.	
• Riesgo de incendio y explosión (temperatura de auto-ignición 336 °C).	

En general las razones fundamentales que motivan el empleo del gas natural en los MCI son:

En Aplicaciones Estacionarias

- Al no ser importantes los factores de potencia/peso, tamaño del depósito, etc. el empleo del gas en este campo, ofrece múltiples ventajas.
- Gracias a su bajo costo, es una alternativa para su aplicación en los sistemas de cogeneración.
- Al distribuirse mediante tuberías, ofrece garantía de suministro continuo, facilidad de distribución y ausencia de almacenaje.
- Debido a su estado gaseoso permite una gran flexibilidad de utilización y una fácil mezcla con el comburente.
- Además la sustitución del combustible sólido o líquido, conlleva al menor exceso del aire en la combustión, la mayor capacidad de ajuste de temperatura y la mejora en la regulación del sistema que se traduce en ahorros de energía considerable.

En Automoción

- Es un carburante seguro por ser más ligero que el aire. Ofrece alta seguridad frente al peligro de fuego por su alta temperatura de ignición.
- Es menos contaminante respecto de los combustibles tradicionales. Contribuye a la disminución del grado de contaminación en las ciudades.
- Disminuye el ruido generado en vehículos de transporte público, asimismo hace confortable el vehículo al disminuir en forma sensible las vibraciones.
- Mayor ahorro debido a la diferencia de precios de los combustibles y al menor gasto de mantenimiento.

Properties of Fuels

Property	Gasoline	No. 2 Diesel Fuel	Methanol	Ethanol	MTBE	Propane	Compressed Natural Gas (CNG)	Hydrogen
Chemical Formula	C ₄ to C ₁₂	C ₃ to C ₂₅	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	(CH ₃) ₂ COCH ₃	C ₃ H ₈	CH ₄	H ₂
Molecular Weight	100-105(a)	~200	32.04	46.07	88.15	44.1	16.04	2.02(a)
Composition, Weight %								
Carbon	85-88(b)	84-87	37.5	52.2	66.1	82	75	0
Hydrogen	12-15(b)	33-16	12.6	13.1	13.7	18	25	100
Oxygen	0	0	49.9	34.7	18.2	-	-	0
Specific gravity, 60° F/60° F	0.72-0.78(b)	0.81-0.88(c)	0.796(c)	0.797(c)	0.744(d)	0.508	0.424	0.074(e)
Density, lb/gal @ 60° F	6.0-6.5(b)	6.7-7.4(d)	6.63(b)	6.61(b)	6.19(d)	4.22	1.07(f)	-
Boiling temperature, °F	80-437(b)	370-650(d)	149(c)	172(c)	131(c)	-44	-250	4,230(e)
Reid vapor pressure, psi	8-15(k)	0.2	4.6(i)	2.3(i)	7.8(j)	208	2,400	-
Octane no. (l)								
Research octane no.	90-110(l)	--	107	109	116(l)	112	--	130+
Motor octane no.	81-90(l)	--	92	92	101(l)	97	--	--
IR - Mv2	86-94(l)	N/A	100	100	108(l)	104	120+	--
Cetane no. (l)	5-20	40-55	--	--	--	--	--	--
Water solubility, @ 70° F								
Fuel in water, volume %	Negligible	Negligible	100(e)	100(b)	4.3(e)	--	--	--
Water in fuel, volume %	Negligible	Negligible	100(c)	100(b)	1.4(e)	--	--	--
Freezing point, °F	-4(g)	-40-30(h)	-143.5	-173.2	-164(c)	-305.8	-250	435(f)
Viscosity								
Centipoise @ 60° F	0.37-0.44(3,p)	2.6-4.1	0.59(l)	1.19(l)	0.37(l)	--	--	--
Flash point, closed cup, °F	45(b)	165(d)	52(i)	55(i)	14(e)	100-10-150	-300	--
Autoignition temperature, °F	495(b)	~400	867(i)	753(i)	815(e)	850-950	1,004	1,050-1,060(m)
Flammability limits, volume %								
Lower	1.4(b)	1	7.3(i)	4.3(i)	1.6(b,k)	2.2	5.3	4.1(n)
Higher	7.6(b)	6	36(i)	19(i)	8.4(b,k)	9.5	15	74(n)
Latent heat of vaporization								
Btu./gal @ 60° F	~900(b)	~700	3,340(b)	2,379(b)	6,335	775	--	--
Btu./lb @ 60° F	~150(b)	~100	50(b)	35(b)	138(b)	193.1	219	192.1(o)
Btu./lb air for stoichiometric mixture @ 60° F	~10(b)	~8	78.4(b)	44(b)	11.8	--	--	--

Property	Gasoline	No. 2 Diesel Fuel	Methanol	Ethanol	MTBE	Propane	Compressed Natural Gas (CNG)	Hydrogen
Heating value (2)								
Higher liquid fuel liquid water/ Btu/lb	18,800-20,400	19,200-20,000	9,750 ⁽²⁾	12,800 ⁽⁴⁾	18,290 ^(b)	21,600	23,000	61,002 ⁽⁴⁾
Lower liquid fuel liquid water/ Btu/lb	18,000-19,000	18,000-19,000	8,570 ⁽⁴⁾	11,500 ⁽⁴⁾	15,100 ^(b)	19,800	21,300	51,532 ⁽⁴⁾
Higher liquid fuel liquid water/ Btu/gal	124,800	138,700	64,220	84,100	-	91,370	-	-
Lower liquid fuel liquid water/ Btu/gal @ 60° F	115,000	128,400	56,800 ⁽³⁾	76,000 ⁽³⁾	93,500 ^(b)	84,500	19,800 ^(b)	-
Heating value, stoichiometric mixture Mixture in vapor state, Btu/cubic foot @ 68° F	95.2 ^(b)	96.4 ⁽⁵⁾	92.5 ^(b)	92.9 ^(b)	-	-	-	-
Fuel in liquid state, Btu/lb or air	1.20 ^(b)	-	1.33 ^(b)	1.28 ^(b)	-	-	-	-
Specific heat, Btu/lb·F	0.48 ⁽⁹⁾	0.43	0.5 ⁽⁹⁾	0.57 ⁽⁹⁾	0.5 ⁽⁹⁾	-	-	-
Stoichiometric air/fuel, weight	14.7 ⁽⁵⁾	14.7	6.45 ^(b)	5 ^(b)	11.7 ^(b)	15.7	17.2	34.3 ⁽¹⁾
Volume % fuel in vaporized stoichiometric mixture	2 ^(b)	-	12.3 ^(b)	6.5 ^(b)	2.7 ^(b)	-	-	-

Notes:

- (1) Octane values are for pure components. Laboratory engine Research and Motor octane rating procedures are not suitable for use with neat oxygenates. Octane values obtained by these methods are not useful in determining knock limited compression ratios for vehicles operating on neat oxygenates and do not represent octane performance of oxygenates when blended with hydrocarbons. Similar problems exist for cetane rating procedures.
- (2) The higher heating value is cited for completeness only. Since no vehicles in use, or currently being developed for future use, have powerplants capable of condensing the moisture of combustion, the lower heating value should be used for practical comparisons between fuels.
- (3) Calculated.
- (4) Pour Point, ASTM D 97 from Reference (c).
- (5) Based on octane.
- (6) For compressed gas at 2400 psi.

CAPÍTULO 5

FORMAS DE SUMINISTRO EN LOS MCI

Un motor de pistón que va a utilizar gas natural debe operar con ciclo Otto (de encendido por chispa) debido a las características propias del gas natural como: alta temperatura de inflamación (650-700 °C en comparación con 320-380 °C del combustible Diesel) y elevado número de octano. Por esta razón, un motor de ciclo Diesel para que funcione con gas natural, debe ser transformado a ciclo Otto. Las transformaciones básicamente consisten en:

- Eliminación del sistema de inyección, bombas y tubos inyectoros.
- Modificación de la cámara de inyección.
- Adaptación del sistema de encendido y alojamiento de bujía.
- Instalación de un sistema de mezcla de combustible.
- Inclusión de un sistema de regulación cuantitativa de la carga.
- Colocación de un sistema de almacenamiento y reducción de presión del carburante.
- Inclusión de un convertidor catalítico.

Sin embargo, para no transformar los motores Diesel existe otra posibilidad. El sistema se fundamenta en continuar suministrando combustible Diesel solo para inflamar la mezcla de gas y aire contenidos en el cilindro.

5.1 Motores de Encendido por Chispa

Cuando se dispone utilizar gas natural en un motor de ciclo Otto no se precisa ninguna transformación mecánica substancial. Requiere tan solo de un sistema de almacenamiento, carburación y avance del encendido, electro válvulas para el control de la carga. Un motor diseñado para funcionar con gas del tipo de encendido por chispa, por su acción y su sistema de alimentación, no se diferencia significativamente de un motor a gasolina.

5.1.1 Formación de la Mezcla

El suministro de combustible se realiza por el método de “formación externa de la mezcla”. La formación de la mezcla en un motor a gasolina empieza en el carburador, continúa en el colector de admisión y termina en el cilindro durante la admisión y compresión, preparando la mezcla combustible a un encendido forzado por la chispa eléctrica. En este caso, la dificultad que se presenta para la formación de una mezcla homogénea se debe al estado bifásico en que se encuentra el combustible al empezar la mezcla con el aire en el carburador. La velocidad de éste proceso depende del tamaño de pulverización del combustible y de la intensidad del flujo turbulento del aire. Cuanto más pequeñas sean las gotas de combustible suspendidas en el aire, tanto más movedizas serán y más homogénea resultará la mezcla. También, la proporción en volumen de los componentes de la mezcla, influye en la formación de la mezcla. Resulta fácil conseguir la mezcla si los

volúmenes de los componentes son iguales o próximos (relación gasolina volatilizada-aire aprox. 1/50).

Cuando se emplea gas natural se instala un carburador mezclador en el motor diseñado especialmente para el gas. Debido a su estado gaseoso resulta fácil obtener una mezcla homogénea, para la mezcla gas natural-aire se requiere en volumen una proporción de 1/9.

Existen diversos sistemas de suministro por este método. Entre ellos tenemos:

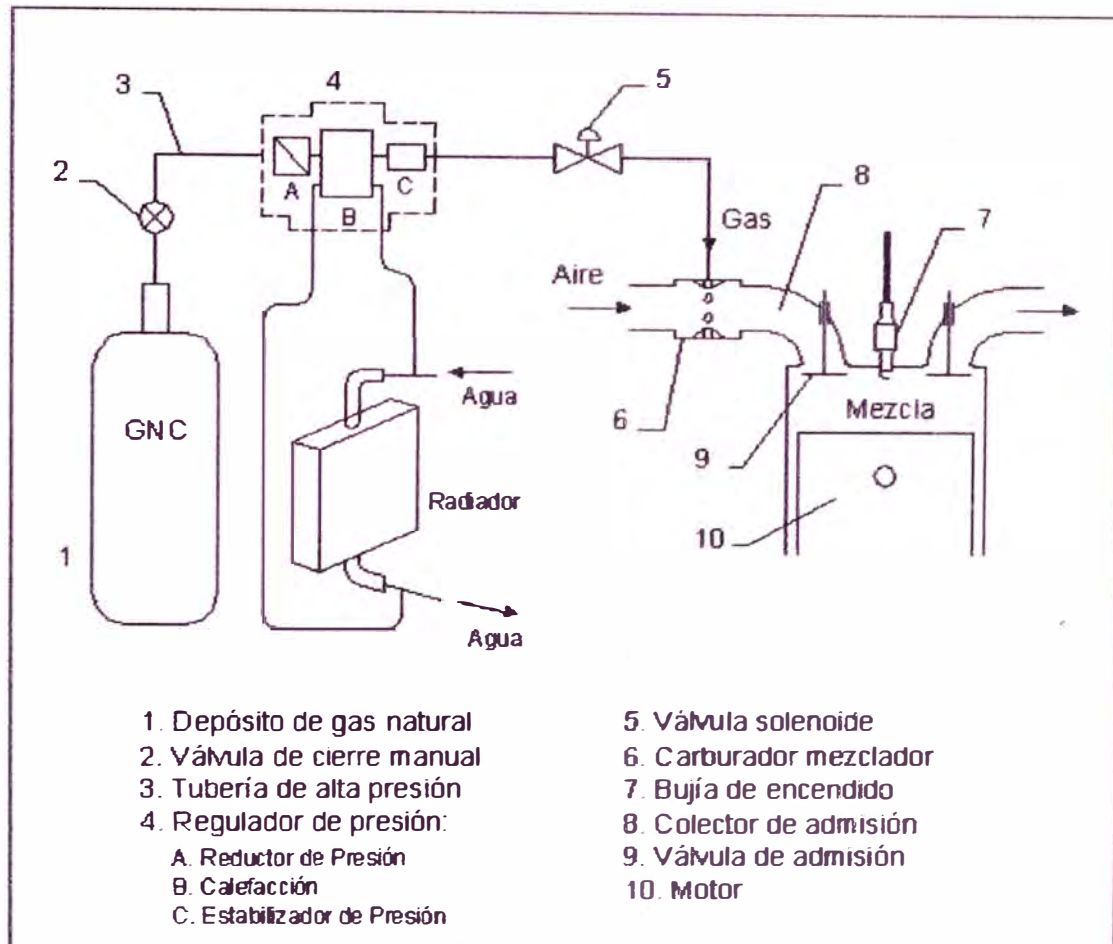
5.1.1.1 Suministro de GNC a través del mezclador: El gas proveniente del depósito a una presión de 200 bar (aprox. 200 kg/cm²), ingresa a un “regulador de presión” donde su presión baja hasta la presión de trabajo. En éste elemento, el diseño del regulador incorpora una cámara de calefacción para prevenir los problemas de acumulación de humedad y hielo por efecto de la disminución de presión. El aporte de calor necesario para la transformación proviene del agua del sistema de enfriamiento del motor. Luego, el gas pasa al carburador mezclador, en donde se realiza adecuadamente la mezcla aire-gas. Así la mezcla obtenida ingresa a los cilindros del motor. La cantidad de mezcla se regula con la mariposa de estrangulamiento. Este método proporciona una mezcla homogénea pero presenta las siguientes desventajas:

- Posibilidad de explosión de la mezcla en el colector de admisión.
- Pérdida de gas durante el barrido de los cilindros (traslape de válvulas).
- En los regímenes de cargas parciales, debido a la presencia de zonas empobrecidas, empeoran las condiciones de inflamación y combustión

de la mezcla, se incrementa el consumo específico de combustible y las emisiones de componentes tóxicos (CO , C_xH_y).

Figura N° 3

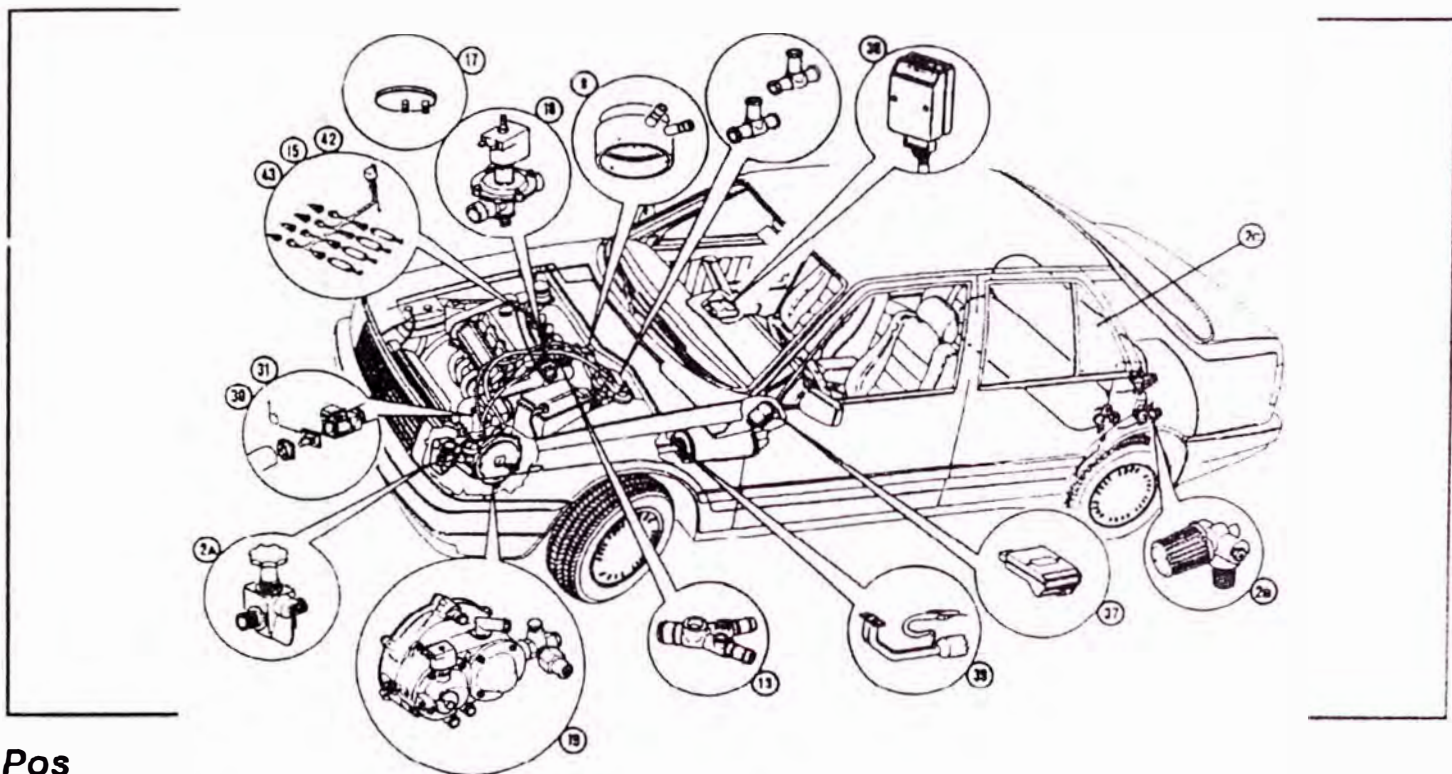
Suministro de GNC a través del Mezclador



Suministro de GNC a través del Mezclador

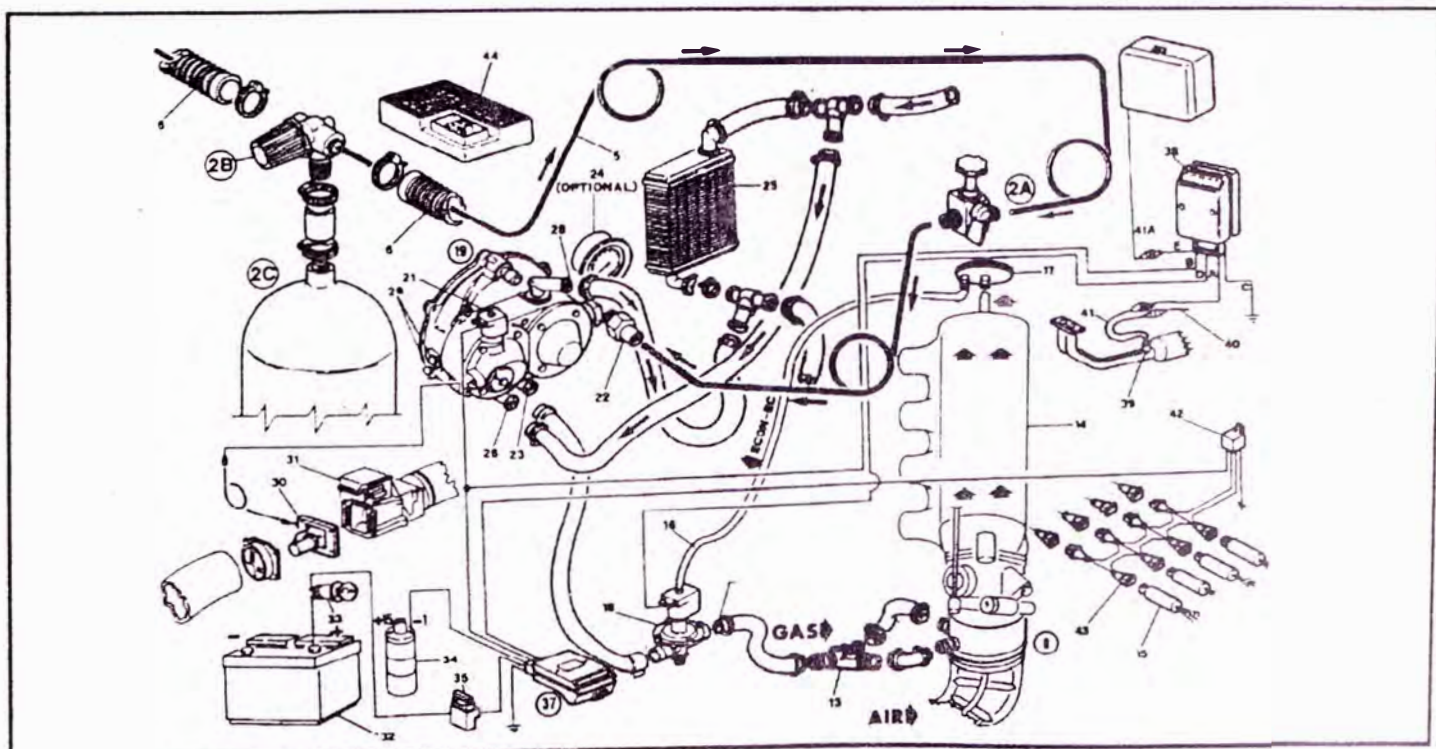
5.1.1.2 Suministro de GN y aire a través de conductos diferentes: Este sistema es presentado para eliminar algunas de las desventajas que muestra el sistema anterior. La alimentación de gas natural (GNC o como producto GLP) se realiza desde el correspondiente depósito, pasa a través del reductor de presión y va hacia la válvula reguladora de gas. El gas y el aire son suministrados a través de canales diferentes, se mezclan en el colector de admisión de donde ingresan al cilindro del motor por la

G.N.C. Electrónico con Sonda Lambda y Convertidor Catalítico



Pos

- | | | | | | | |
|----|-------------------------------------|----|-------------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------|
| 2A | Válvula de carga G.N.C. | 2A | 19 | Regulador | 33 | Llave de encendido |
| 2B | Válvula para cilindro | 21 | Electroválvula regulador | 34 | Bobina | |
| 2C | Cilindro | 22 | Entrada gas | 35 | Fusible | |
| 5 | Tubería alta presión (toma) | 23 | Saída gas | 37 | Interruptor - conmutador | |
| 6 | Conductos de aire | 24 | Manómetro (opcional) | 38 | Unidad de control "ECON-EC" | |
| 8 | Mezclador | 25 | Radiador calefacción habitáculo | 39 | Sonda LAMBDA | |
| 13 | Máxima bifurcación | 26 | Entrada agua | 40 | Cable calefacción sonda LAMBDA | |
| 14 | Grupo mariposa aspiración inyección | 28 | Termostato | 41 | Cable unidad de control sonda LAMBDA | |
| 15 | Inyectores | 29 | Tornillo de ajuste ralenti | 42 | Relé cableado inyectores | |
| 16 | Tubería de la bomba de vacío | 30 | Disposit. de interrupción "L" BOSCH | 43 | Cableado para inyectores | |
| 17 | Estabilizador de depresión | 31 | Medidor cantidad de aire | 44 | Variador de avance | |
| 18 | Dispositivo "ECON-EC" | 32 | Batería | | | |

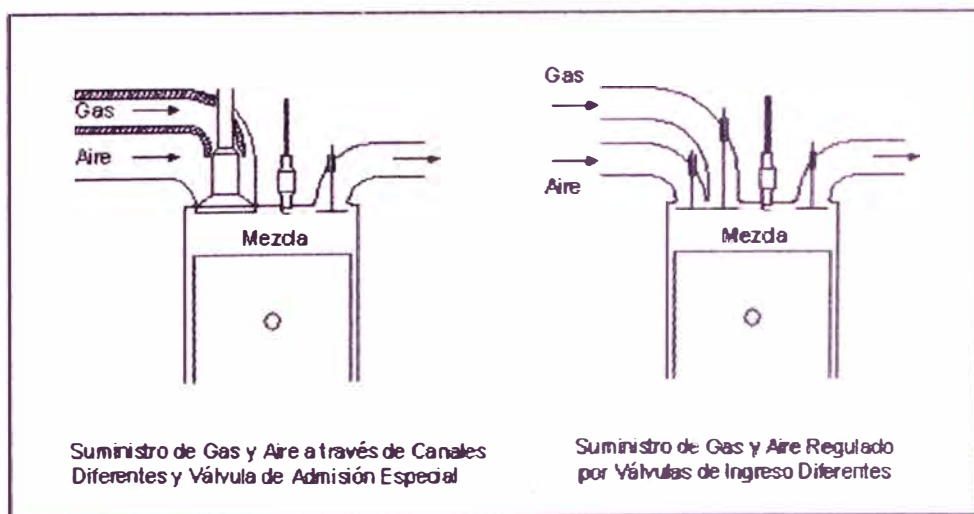


válvula de admisión. Este sistema elimina el peligro de explosión en el colector de admisión, sin embargo presenta algunas desventajas:

- Pérdida de la mezcla durante el traslape de las válvulas.
- La mezcla que ingresa al cilindro es menos homogénea, se incrementa la desigualdad de llenado de los cilindros (desigualdad de α).

5.1.1.3 Suministro de GN y aire a través de conductos diferentes y válvulas de ingreso diferentes: El objetivo de éste sistema, además de evitar la detonación de la mezcla en el múltiple de admisión, es limitar la pérdida de gas durante el barrido del cilindro, esto se consigue al suministrar el gas después del ingreso del aire al cilindro del motor y después del cierre de la válvula de escape. Con éste sistema al controlar la alimentación del gas, se controla la presión de ingreso, favoreciendo el llenado del cilindro al elevar dicha presión.

Figura N° 4



5.1.1.4 Suministro de GN en el colector de admisión a través de un inyector:

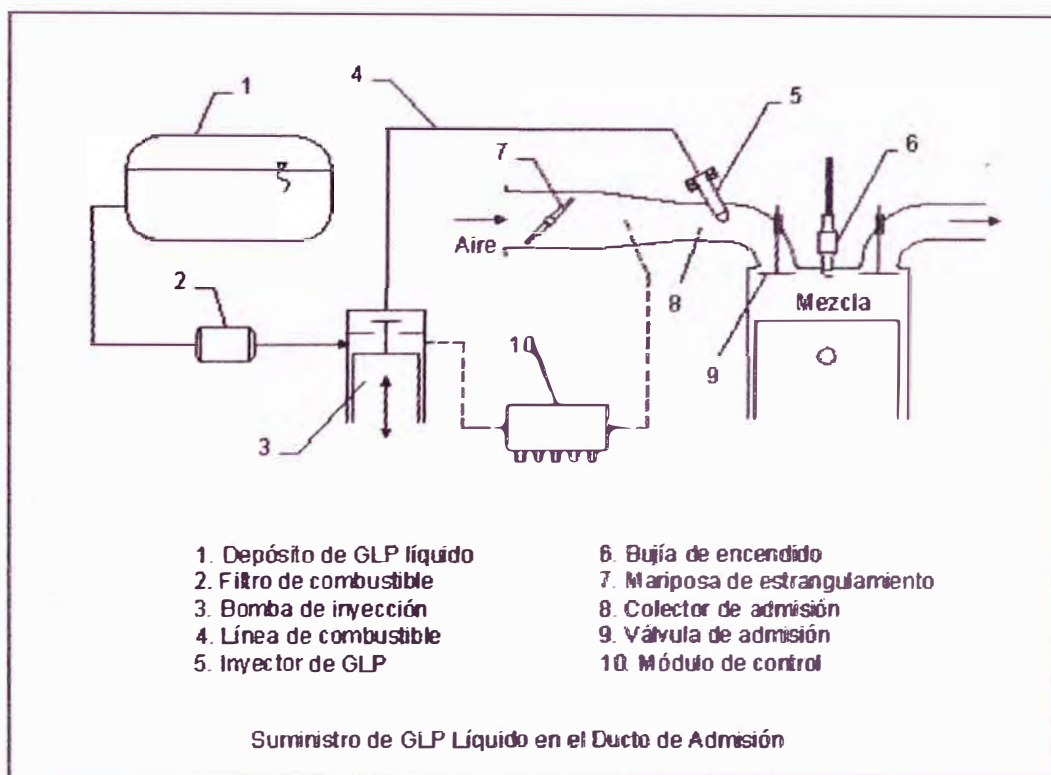
En éste caso la alimentación del gas se realiza por medio de un inyector especial electromagnético ubicado cerca de la válvula de admisión. Esto permite mantener una adecuada composición de la mezcla α para cualquier régimen regulando el suministro de gas, donde la cantidad de gas suministrado depende del caudal de aire regulado por la mariposa de estrangulamiento de acuerdo al funcionamiento del motor. Este sistema presenta las siguientes ventajas:

- Posibilidad de obtener por estratos no homogéneos la formación de la mezcla (estratificación de la carga). Así en los regímenes parciales o de vacío se puede obtener en el cilindro zonas de mezcla rica cerca de la bujía, los cuales se inflaman por chispa eléctrica.
- Asegura alta homogeneidad e igualdad de suministro de gas en los cilindros. El inyector es regulado por un módulo de control, suministrando la cantidad de combustible de acuerdo a las características de carga y velocidad. El periodo de apertura del inyector se realiza durante el tiempo de depresión en el cilindro (admisión de la carga), de esta manera se elimina el retorno de la mezcla aire-gas al colector de admisión.
- Eleva la estabilidad del motor en cada régimen de funcionamiento al mantener una adecuada composición de la mezcla. Esto permite disminuir la frecuencia mínima estable de rotación del cigüeñal.

La particularidad de éste sistema es que puede emplear un sistema de inyección electrónica similar al de la gasolina para “inyección de GLP

líquido”. De esta forma se logra un mayor control de la mezcla y se produce menores emisiones de CO y C_xH_y . Además, el GLP al ser inyectado en la fase líquida en la válvula de admisión, favorece el aumento de llenado del cilindro, debido a que durante su evaporación realiza el enfriamiento de la mezcla. Sin embargo, su principal desventaja está relacionada con el incremento en el costo del motor, además de la complejidad de la regulación electrónica en regímenes parciales.

Figura N° 5



5.2 Motores de Encendido por Compresión

Los motores Diesel o de encendido por compresión presentan ciertas ventajas respecto de los motores a gasolina tales como: son más eficientes, emiten menores cantidades de hidrocarburos reactivos y CO, presentan mayor facilidad para sobrealimentarlo, curva par motor más plana con el régimen de giro, mayor vida media, entre otras.

Dado que los motores Diesel operan a bajas temperaturas que los motores a gasolina, también emiten menores cantidades de NO_x. Sin embargo, la combustión del petróleo Diesel incrementa la concentración de hollín en los gases de escape. El petróleo Diesel tiene 90 veces más sulfuro que la gasolina además de hidrocarburos pesados (particularmente aromáticos) los cuales no se queman fácilmente y son emitidos como partículas al medio ambiente. La exposición a estas partículas en suspensión incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias. Esto último, sumado al incremento del parque automotor diesel ha motivado la utilización de combustibles alternativos con el propósito de reducir las emisiones contaminantes.

Los motores Diesel, además del parque automotor, tienen una participación importante en aplicaciones estacionarias como los sistemas de cogeneración, en centrales eléctricas, motores de planta, etc. Es en éste campo, donde el gas natural se ha constituido en un combustible atractivo por las mejores ventajas que ofrece en términos de economía, rendimiento y reducción del impacto ambiental.

No obstante, el problema que presenta la utilización del gas natural como combustible alternativo de un motor Diesel radica en su bajo índice de cetano (3 a 10 unidades) y a su elevada temperatura de inflamación que presenta. Esto impide que no sea posible el encendido por compresión de la mezcla aire-gas sin sobrepasar las

relaciones de compresión tolerables. Por ello, sin variar las características del motor Diesel, se realizan diferentes métodos de suministro de gas que van desde la alimentación al múltiple de admisión hasta su aplicación directa a la cámara de combustión (empleando su propio sistema de inyección), manteniendo el sistema convencional de suministro de combustible diesel.

Formación de la Mezcla

El proceso de trabajo en un motor Diesel se realiza con el método de “formación interna de la mezcla”. La mezcla aire-combustible se forma entre el final de la carrera de compresión y el comienzo de la carrera de expansión en un intervalo corto de tiempo (representa el 20°-60° del ángulo de rotación del cigüeñal). Empieza en el período de retraso a la inflamación y continúa en las diversas fases del proceso de combustión. La duración de éste proceso respecto al motor de carburador es 20-30 veces menor. El combustible se inyecta a la cámara de combustión al final de la carrera de compresión, donde durante cierto tiempo (período de retraso a la inflamación) debido a las altas temperaturas de la cámara (700-900 K; 3,5-5,5 MPa) parte del combustible inyectado se calienta y se evapora formando con el aire una mezcla carburante tal que al tener una concentración adecuada a elevadas temperaturas se produce su auto inflamación.

Cuando el motor Diesel funciona con gas natural la formación de la mezcla se puede realizar por uno de los siguientes métodos:

- Formación combinada de la mezcla.
- Formación interna de la mezcla.

5.2.1 Formación Combinada de la Mezcla

Se obtiene por la combinación de dos métodos: de formación externa para el gas natural y de formación interna para el petróleo Diesel. En este caso, considerando el combustible utilizado: GNC o GLP, podemos señalar los siguientes sistemas:

5.2.1.1 Suministro de GNC en el colector de admisión: Requiere de la instalación de un carburador mezclador en el motor Diesel, el cual introduce una mezcla aire-gas al cilindro del motor. En algunos casos, los motores son adaptados con un sistema de gas natural con inyectores controlados electrónicamente que suministran el gas al colector de admisión. Por trabajar simultáneamente con ambos combustibles, este sistema es conocido como “sistema de combustible dual” (Diesel-gas natural). La mezcla aire-gas proveniente del mezclador ingresa al cilindro del motor pero para encender la mezcla se inyecta una cantidad pequeña de combustible Diesel de la manera tradicional (actúa como piloto para la combustión, que se inflama bajo el calor de la compresión).

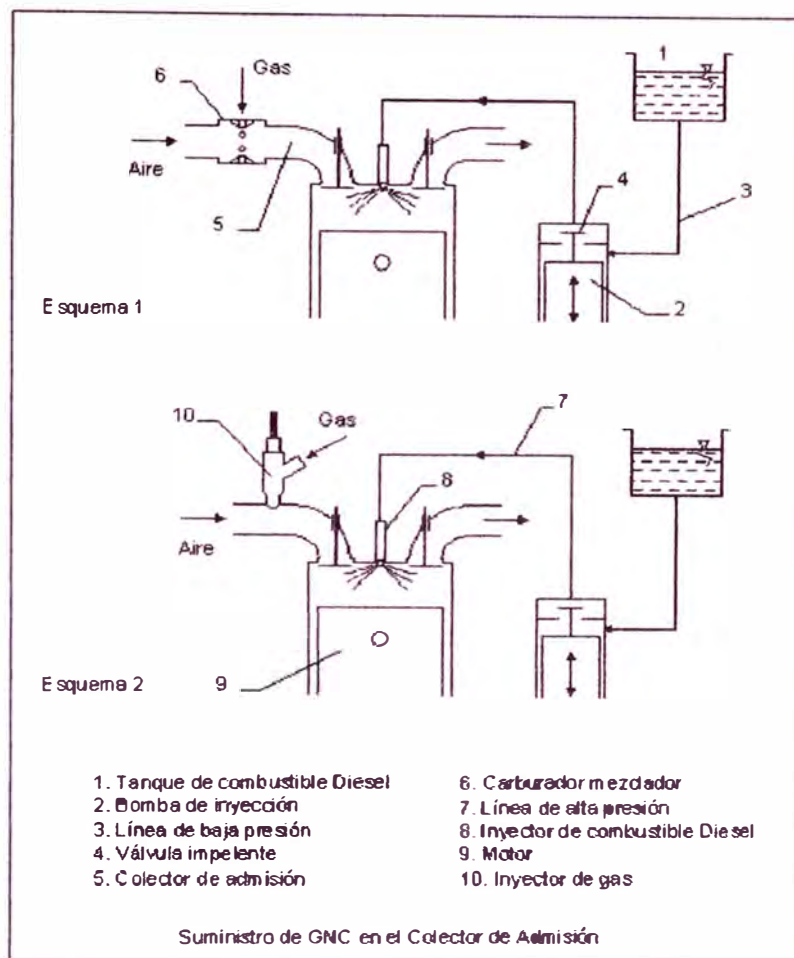
La mayoría del combustible quemado, en este caso es el gas natural. Respecto a la carga total del combustible diesel cuando el motor trabaja como Diesel solo, la proporción del gas utilizado varía entre el 85-90 %. La cantidad de diesel inyectado es función de la relación aire-gas de la mezcla admitida por el motor, aumentando dicha cantidad con el empobrecimiento de la mezcla. En un motor que utiliza una bomba de inyección, el gas proveniente del reductor de presión, pasa a través de un dispositivo denominado “corrector de carga” situado en la bomba de inyección y conectada con la cremallera de la bomba, el cual regula el

suministro de gas en función de la posición de la cremallera manteniendo el sistema en equilibrio. Como en los motores Diesel la regulación de la carga se realiza a través de la relación aire/combustible, la cantidad de inyección piloto debe asegurar el funcionamiento a bajas cargas.

El uso del combustible diesel permite la conservación de la relación de compresión del motor y su eficiencia, mientras el gas natural contribuye a la economía y es responsable de bajas emisiones. Las desventajas que presenta éste sistema son:

- Sistema complejo de suministro de gas y petróleo diesel.
- Posibilidad de detonación de la mezcla aire gas en el múltiple de admisión en algunos regímenes de funcionamiento.
- En regímenes parciales el proceso de trabajo es deficiente debido al defectuoso proceso de formación de la mezcla como resultado del empeoramiento de la atomización del combustible diesel. Asimismo, como el motor trabaja por debajo de la temperatura de óptima de funcionamiento, se incrementa las emisiones de hidrocarburos y monóxidos de carbono.

Figura N° 6

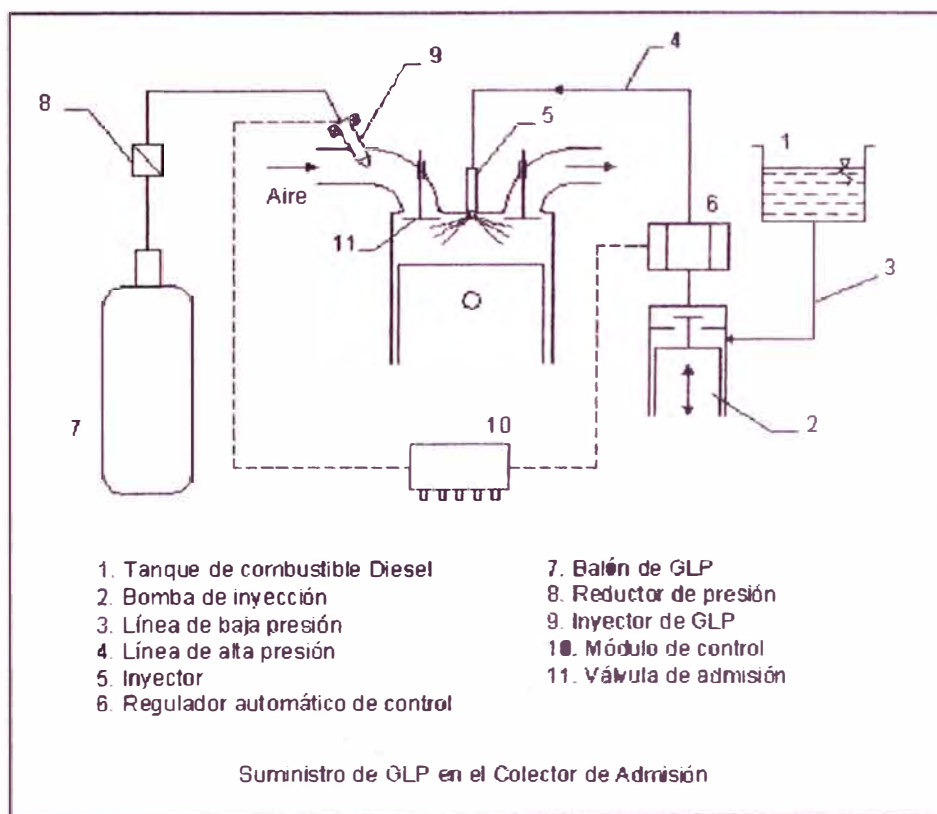


5.2.1.2 Suministro de GLP en el colector de admisión: El suministro de gas se realiza por medio de un inyector al múltiple de admisión. El petróleo se inyecta directamente en el interior del cilindro para iniciar la inflamación. En la figura 7 se muestra el esquema de un sistema de suministro de GLP. El sistema emplea un módulo de control que está conectado con el regulador automático de control de la bomba de inyección del combustible diesel y con el inyector de GLP, de esta manera regula adecuadamente el suministro de uno y otro combustible. La cantidad de diesel inyectado está en función de la carga admitida, aumentando con el

empobrecimiento de la mezcla. Este sistema permite un mejor control de la mezcla mejorando el consumo específico de combustible. El empleo de GLP disminuye sustancialmente las emisiones tóxicas de los gases de escape. Las desventajas que presenta este sistema son:

- Requiere de doble sistema de alimentación.
- El funcionamiento del motor durante el arranque, en vacío y en pequeñas requiere trabajar solo con combustible diesel.
- Debido a su bajo número de cetano y a la homogeneidad de la mezcla con el aire en la cámara de combustión, el período de retardo al encendido aumenta originando un incremento brusco de la presión y mayor rigidez del funcionamiento del motor.

Figura N° 7



5.2.2 Formación Interna de la Mezcla

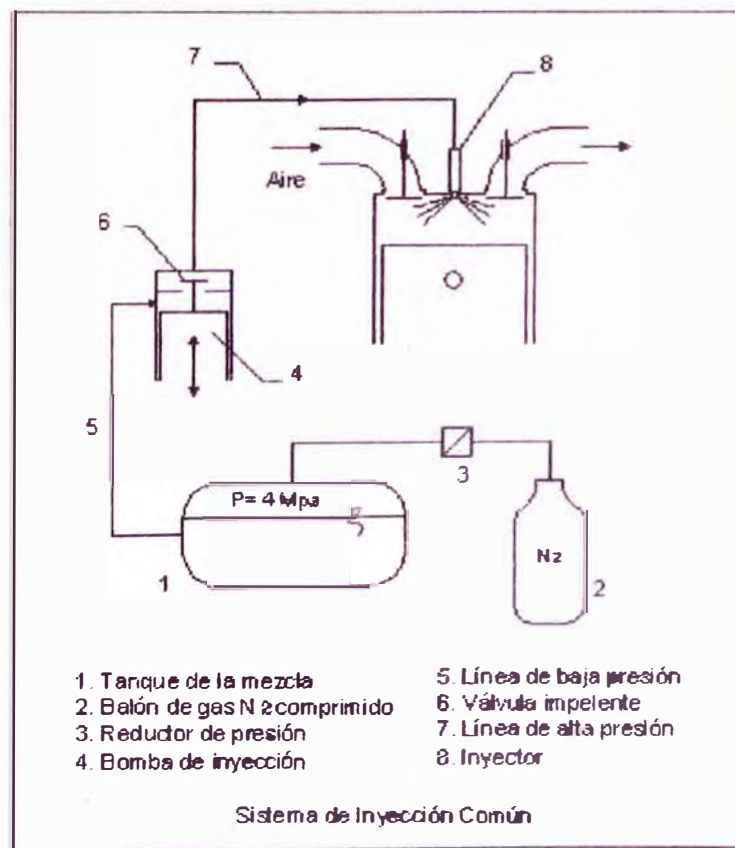
El suministro de gas y combustible diesel se realiza en el interior del cilindro del motor donde se mezcla con el aire que proviene del colector de admisión. Este método es utilizado mayormente en la organización del proceso de trabajo en los motores a gas y en los motores gas-Diesel que utilizan combustibles alternativos líquidos. Con este método de formación se pueden emplear sistemas de inyección separada o sistema común.

5.2.2.1 Sistema de Inyección Separada: En éste método, tanto para el suministro de gas como para el suministro del petróleo diesel se requiere sistemas de inyección independientes con accesorios de seguridad y regulación. Al igual que en los casos anteriores, el combustible Diesel inyectado actúa como piloto para inflamar la mezcla.

Como ejemplo de este caso se tiene el sistema que emplea GLP líquido (figura 8), el cual para el suministro de los combustibles requiere de 2 depósitos, 2 bombas de inyección, 2 inyectores, entre los elementos principales. Al ser suministrados en forma independiente se consigue mayor eficiencia del motor en un amplio rango de funcionamiento. La regulación del suministro se realiza con un módulo de control conectado a las dos bombas de inyección: del petróleo diesel y del GLP. La dificultad que presenta este sistema está relacionada con el sistema de lubricación del sistema de alimentación, debido a que el GLP no es un buen lubricante. Además, la utilización de dos sistemas de inyección encarece y complica la construcción del motor.

El esquema más simple del sistema se muestra en la figura 9. La mezcla de GLP y Diesel proveniente del depósito, pasa por una bomba de inyección y es suministrado en los cilindros del motor. La presión del depósito de la mezcla se mantiene a 4 MPa por medio del gas N₂ comprimido cuya presión está regulada con una válvula reductora de presión. En un régimen de plena carga se puede suministrar entre 60-70% de GLP. Sin embargo, debido a la baja densidad y viscosidad de la mezcla, el suministro cíclico al motor aumenta entre 1,5-1,8 veces. Por otra parte, en régimen de vacío y pequeñas cargas se debe trabajar con el combustible Diesel.

Figura N° 9



5.3 Motores a Gas de Encendido por Dardo

Los motores a gas son los motores que tienen el más alto rendimiento termodinámico. Cada vez más existen motores construidos únicamente para utilizar gas natural. Es así que las principales marcas de automóviles del mercado mundial (Ford, General Motors, Daewoo, Nissan, Honda, Chrysler, BMW entre otros) han desarrollado modelos y están ofreciendo vehículos ligeros diseñados originalmente de fábrica que permiten operar con gas natural o gasolina indistintamente.

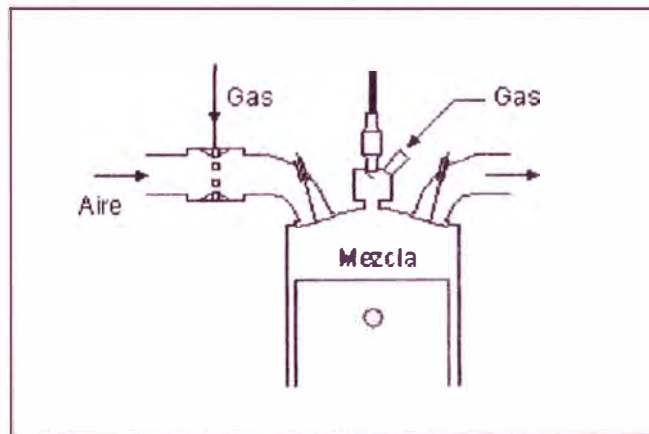
Los motores a gas de acuerdo al método de inflamación, se pueden dividir en tres tipos: los dos primeros resultan de la conversión de los motores de ciclo Otto y de ciclo Diesel tratados anteriormente (con encendido por chispa y con inflamación de una cantidad pequeña de combustible Diesel), y el tercero es el motor con encendido por dardo en la antecámara.

Motores de Encendido por Dardo y con Antecámara

En este tipo de motor se crean condiciones cercanas a la óptima durante el proceso de combustión de la mezcla. Consta, además de la cámara principal, de una antecámara o cámara de dardo, donde se ubica la bujía de encendido. La antecámara representa el 2% a 5% del volumen de la cámara principal y se comunica con ésta a través de una canal, cuyas dimensiones y forma están reglamentadas. Tanto la cámara principal como la antecámara tienen sistemas separados de suministro de combustible. La mezcla pobre se suministra mediante un mezclador al cilindro, y la mezcla rica se suministra a la antecámara donde se consigue una mezcla óptima para la inflamación en todos los regímenes de funcionamiento del motor. La mezcla se

inflama primero en la antecámara y la llama de gases se expulsa a la cámara principal donde continúa la combustión.

Figura N° 10



Suministro de Gas en Motores con Antecámara

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS COMPARATIVO EN LOS PARÁMETROS TÉCNICOS DEL MOTOR

El análisis que a continuación se realiza se refiere al caso de utilización del GNC en los motores de combustión interna.

6.1 Ciclo Termodinámico de los MCI

Determinar analíticamente el ciclo de trabajo real efectuado por un motor es difícil debido a que es imposible determinar las pérdidas en cada proceso. Sin embargo el ciclo de trabajo que resulta al efectuar el cálculo térmico del motor permite realizar una aproximación del ciclo real a partir de resultados experimentales y determinar los índices del ciclo de trabajo.

El rendimiento térmico caracteriza el grado de utilización del calor en el motor. Para un ciclo teórico en concordancia con la segunda ley de la termodinámica se determina por:

$$n_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} \dots \dots \dots (1)$$

Donde q_2 es magnitud absoluta de la cantidad de calor desprendida a la fuente fría y q_1 la cantidad de calor suministrado durante el ciclo. Para comparar ciclos de

trabajo en cilindros de diferentes dimensiones se suele referir el trabajo L_c a la unidad de volumen de trabajo (cilindrada). Así se tiene:

$$p_{mc} = \frac{L_c}{V_h} \dots \dots \dots (2)$$

Donde p_{mc} denominada presión media efectiva del ciclo, caracteriza el trabajo específico. Se define como la presión de acción constante con la cual el trabajo de los gases en una carrera del pistón es igual al trabajo del ciclo teórico.

En un motor de encendido por chispa tiene lugar el “ciclo con suministro de calor a volumen constante”. Para este ciclo, después de las correspondientes transformaciones de las fórmulas del ciclo generalizado, se obtiene los siguientes valores del rendimiento y de la presión media del ciclo:

$$n_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \dots \dots \dots (3)$$

$$p_{mc} = \frac{p_a}{k-1} \cdot \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} n_t (\lambda - 1) \dots \dots \dots (4)$$

De la fórmula 3, se observa que el rendimiento depende de la relación de compresión ε y de la naturaleza del fluido operante (definido por el exponente adiabático k). La presión media del ciclo depende de la presión de admisión p_a , del rendimiento térmico n_t y de la cantidad de calor entregado que queda definido por el grado de elevación de la presión al suministrar el calor a volumen constante λ . Del análisis de las ecuaciones, un medio efectivo con el fin de mejorar los índices de los motores es el aumento de ε , pero los valores máximos de la relación de compresión están limitados por las condiciones de garantizar un proceso normal de combustión de la carga, así como un contenido tolerable de sustancias tóxicas en los gases de

escape. La relación de compresión en los motores a gasolina oscila entre 6,0 a 9,5 llegando hasta 11 en motores que emplean gasolinas de alto octanaje.

En un motor de encendido por compresión se desarrolla el “ciclo con suministro mixto de calor”, en la cual una parte del calor se suministra a volumen constante y otra parte del mismo a presión constante. El rendimiento y la presión media tendrán la siguiente forma:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \dots \dots \dots (5)$$

$$P_{mc} = \frac{P_a}{k-1} \cdot \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon - 1} \eta_i [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] \dots \dots \dots (6)$$

Para este ciclo, el rendimiento térmico depende de ε , de la forma en que la cantidad de calor es suministrado determinado por la relación entre el grado de elevación de la presión λ y de la expansión preliminar ρ . El incremento de ε y k conduce al crecimiento de η_i . Para garantizar la mejor utilización efectiva del calor en el motor que funciona con carga variable, el proceso de suministro de calor se debe realizar para un valor admisible de λ (presión tolerable del ciclo $\leq 12,5 - 13,5$ MPa) y disminuyendo ρ .

La presión media del ciclo es proporcional al calor suministrado y al rendimiento térmico. Elevando la presión inicial p_a , la relación de compresión ε , así como el rendimiento η_i se obtiene mayores valores de p_{mc} . Para una determinada cantidad de calor suministrado la presión media será mayor cuando λ sea mayor y respectivamente ρ menor ($\rho \geq 1$).

6.2 Análisis de los Parámetros en el Motor de Encendido por Chispa

6.2.1 Rendimiento

El cálculo térmico detallado de los ciclos teóricos en los diferentes combustibles: metano, propano y gasolina indican, que el rendimiento teórico n_t depende de dos factores: la relación de compresión ε y el coeficiente de exceso de aire α . En forma exacta se aproxima con las siguientes expresiones:

$$n_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{0,236+0,44*\alpha}} \quad \text{Cuando } \alpha = 1,0 \dots 1,8$$

$$n_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{0,295+0,0113*\alpha}} \quad \text{Cuando } \alpha = 1,8 \dots 3,4$$

$$n_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{0,43*\alpha-0,15}} \quad \text{Cuando } \alpha < 1$$

La máxima relación ε con que trabajan los motores de gasolina o de diesel define la eficiencia del motor. El motor de encendido por compresión que trabaja con petróleo Diesel, puede operar con $\varepsilon=12$ a 22 (motores sin sobrealimentación) y se obtienen las eficiencias más altas (0,35-0,40). Un motor que emplea GNC puede operar con $\varepsilon = 12$ y una eficiencia entre 0,30-0,35. Al emplear GNL como combustible se puede llegar a $\varepsilon = 14$ como límite máximo. Los motores a gasolina no pueden operar mucho más de $\varepsilon = 9,5$ y una eficiencia de 0,25-0,33. La razón de las diferencias es la “variación en la relación de compresión” limitante para los distintos combustibles.

La variación de ε tiene mayor efecto en los parámetros indicados y en la toxicidad del motor del que se desprende de la ec. 3. Con el incremento de ε , crece la relación entre la superficie de la cámara de combustión F_{cc} y su volumen V_{cc} , la cual

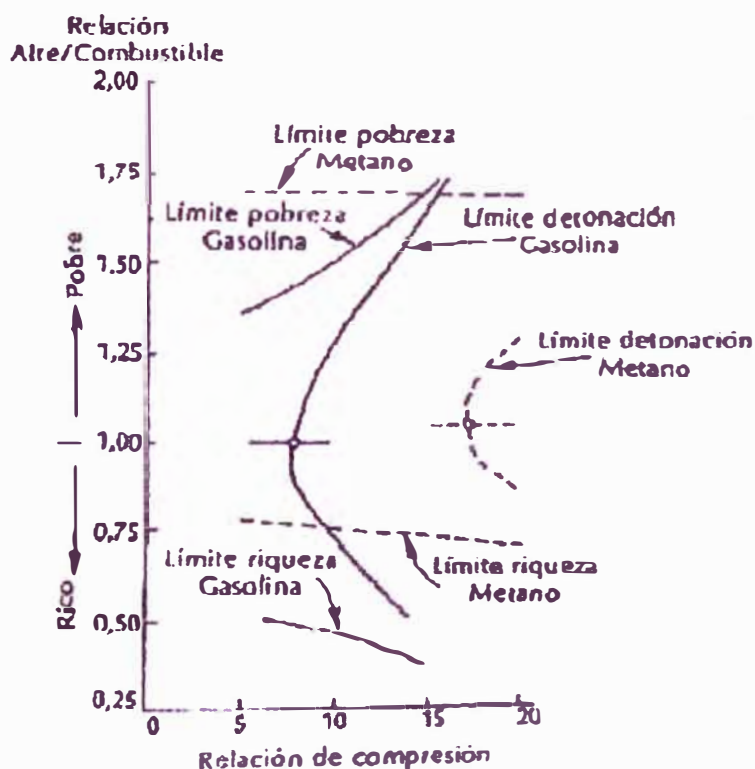
influye sobre las pérdidas caloríficas hacia las paredes así como las pérdidas vinculadas con la combustión lenta cerca de las paredes y en ranuras angostas de la cámara. Esto último aumenta la cantidad de hidrocarburos no quemados en los productos de la combustión. Cuando un motor funciona con mezcla pobre, al aumentar ϵ , se incrementa el contenido de NO_x en los productos como resultado de la elevación de la temperatura en el proceso de combustión. Además, cuando se eleva ϵ crece la carga sobre el mecanismo biela-manivela y para asegurar un funcionamiento seguro es necesario aumentar el tamaño y peso de las piezas principales, esto lleva a un crecimiento de las pérdidas mecánicas y el arranque del motor se dificulta. De estas investigaciones se desprende que la magnitud de ϵ en los MECH, esta limitada por la elevación de la toxicidad de los gases quemados y de los requisitos de mayor número de octano. Siendo el índice de octano del GNC 130, mientras que el de la gasolina 96-97, supone un mejor comportamiento desde el punto de vista de la detonación.

Otro factor que influye en el rendimiento η_i es el “coeficiente de exceso de aire α ”. En el ciclo real, el rendimiento indicado del motor se incrementa a medida que se empobrece la mezcla hasta cierto límite para el cual es estable el proceso de combustión. El valor de α para el cual se obtiene el mayor aprovechamiento de calor se denomina “límite de empobrecimiento efectivo de la mezcla”. Éste límite se desplaza hacia el lado de mezclas pobres y no se puede ampliar más de 1,5... 1,7 (en los motores a gasolina) debido a que se dificulta la propagación de la llama y solo se quema una parte de la mezcla. Para el caso de la mezcla de aire y metano, el límite de pobreza corresponde para $\alpha \approx 1,7$ y es independiente de ϵ (lo cual no ocurre para la

mezcla aire y gasolina). Esto permite trabajar en forma efectiva con mezclas pobres (ver gráfico N° 11).

Figura N° 11

Límite de encendido de mezcla metano y aire

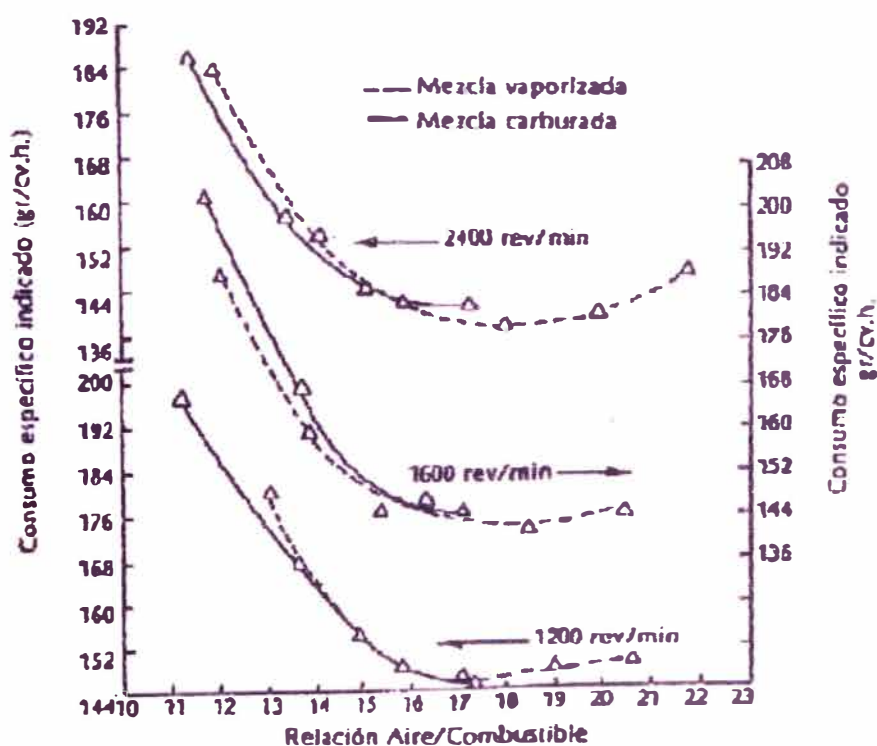


Una operación de mezcla pobre requiere una gran homogeneidad tanto en la formación de la mezcla como en la distribución de ésta en los diferentes cilindros de manera que permita un funcionamiento suave y regular del motor. Cuando se emplea un combustible líquido resulta complejo obtener una mezcla gaseosa y homogénea, debido a que el aire empieza a mezclarse cuando el combustible se encuentra en fases líquida y gaseosa. Esto no ocurre cuando se utilizan combustibles gaseosos, el hecho que sea gaseoso, la velocidad de la reacción será rápida, además facilita la utilización de mezclas pobres. De los resultados de pruebas realizadas en motores

con mezcla perfectamente vaporizada, se observa que el consumo específico de combustible mejora debido a que se extiende el rango de funcionamiento estable hacia mezclas más pobres (ver figura 12).

Figura N° 12

Consumo específico de combustible de un motor con mezcla vaporizada y con mezcla carburada



6.2.2 Potencia

Es la energía entregada por unidad de tiempo en el eje del cigüeñal del motor. La potencia determinada por el trabajo efectuado en el ciclo real del motor se denomina "potencia indicada". Trazando un diagrama indicado que se obtiene al investigar un motor, podemos determinar el trabajo del ciclo real del mismo (trabajo

indicado) el cual representa la cantidad de calor transformado en trabajo mecánico del ciclo. La obtención del diagrama indicado consiste en el registro de la variación de la presión en el cilindro en función del volumen o del ángulo de rotación del cigüeñal. La potencia que se obtiene en el cigüeñal del motor se denomina “potencia efectiva N_e ” y representa la diferencia entre la potencia indicada N_i y la potencia que se gasta en las pérdidas mecánicas N_m . La potencia efectiva en función de los parámetros del ciclo de trabajo de los motores que emplean combustibles líquidos, puede calcularse por:

$$N_e = \frac{1}{30 \tau} \cdot \frac{H_u}{l_o} \cdot \frac{n_i}{\alpha} \cdot i V_h n_v \rho_k n \cdot n_m \dots \dots \dots (7)$$

$$N_e = K \frac{n_i}{\alpha} n_v \rho_k n \cdot n_m \dots \dots \dots (8)$$

Donde τ : el número de tiempos del motor, H_u : poder calorífico del combustible, l_o : cantidad teórica de aire para la combustión de 1 kg de combustible, n_i : rendimiento indicado, i : número de cilindros, V_h : volumen de trabajo, n_v : coeficiente de llenado, ρ_k : densidad del aire, n : frecuencia de rotación del cigüeñal, n_m : rendimiento mecánico. Al expresar H_u en MJ/kg, V_h en Lt, n en rpm, N_i se obtiene en kW.

La potencia depende principalmente de los siguientes factores: del factor η_i/α que a su vez depende del carácter en que transcurre el proceso de combustión en función de la composición de la mezcla, de los parámetros del aire en la admisión ρ_k , del rendimiento volumétrico n_v y del régimen de operación del motor n .

En un motor convertido a GNC, la potencia tenderá a ser menor debido a la naturaleza misma del gas. Uno de los factores de ésta disminución es la densidad del

gas, que al ser menor respecto a la gasolina, desplaza parte del aire de admisión (el gas ocupa 12% del volumen de la admisión por lo tanto se tendrá menor aire u oxígeno). El coeficiente de llenado, relacionado con la cantidad real de mezcla fresca admitida, depende de entre otros factores del calentamiento de la mezcla. Durante el proceso de mezcla, la evaporación del combustible líquido permite disminuir la temperatura de la mezcla que ingresa al cilindro y con ello se incrementa la densidad de la carga fresca, aumentando la masa admitida, esto favorece el incremento de la potencia. No ocurre lo mismo con el gas natural debido a su estado, por lo que la temperatura aumentará disminuyendo la densidad de la mezcla y con ello la potencia.

La variación de la potencia es proporcional con la densidad del aire y ésta de las condiciones del medio. Cuando un motor funciona a grandes alturas snm, donde la densidad del aire es baja, la potencia disminuye tanto porque el motor está aspirando menos oxígeno como también porque el carburador proporcionará una mezcla más rica a medida que disminuye la densidad del aire. Un motor convertido, usando carburador con un dosificador tipo venturi, tendrá el mismo problema y no cambiará la situación, a esto, se debe añadir las pérdidas de potencia por el empleo del gas. El problema de enriquecimiento se puede resolver al usar un sistema de dosificación de gas electrónico operado por un sensor de oxígeno que mantendrá una relación aire/combustible constante.

El desarrollo de la combustión así como su velocidad en la fase principal es otro factor que influye sobre la potencia. La velocidad de propagación de la llama en la fase principal determina la rapidez del incremento de la presión en función del ángulo de rotación del cigüeñal ($dP/d\phi$) y la acción de las fuerzas de los gases sobre el mecanismo biela-manivela del cual depende la “rigidez” de funcionamiento del

motor. El gas natural cuando está mezclado uniformemente con aire en la relación correcta quema muy bien como cualquier otro combustible, sin embargo presenta una menor velocidad de llama respecto a la gasolina. Al ser menor la velocidad de propagación del gas, el frente de llama se propagará relativamente en forma lenta disminuyendo con esto los valores de $dP/d\phi$ y de las presiones máximas P_z , por lo tanto disminuye el trabajo del ciclo por las pérdidas de tiempo. Esto se vería afectado en una proporción mayor cuando el motor funciona con valores de α fuera del límite de pobreza que reduce la velocidad de combustión. Se podría mejorar el proceso de combustión con una estratificación de la carga de tal manera que sea posible obtener una mezcla rica cerca del punto de ignición y tener una mezcla pobre a medida que se aleje de la bujía. En motores de mayores dimensiones se puede incrementar la velocidad de llama con la intensidad del encendido al colocar 2 bujías.

En general, todos estos factores en conjunto afectan la potencia del motor y se traduce en pérdidas alrededor de 12 a 14 % de potencia respecto del motor a gasolina. Sin embargo, los vehículos diseñados para operar con GNC tendrán menores pérdidas de potencia incluso pueden tener mayor potencia y eficiencia, esto debido a que trabajaría con altas relaciones de compresión y ángulos de encendido avanzados.

6.2.3 Emisiones de Contaminantes

Durante el proceso de combustión, como resultado de las reacciones químicas de los hidrocarburos del combustible con el aire, se forman además del CO_2 y H_2O una serie de elementos tóxicos. El proceso de formación de la mezcla aire-

combustible y de su combustión ejercen una considerable influencia sobre la formación de estos componentes en los productos de combustión.

La cantidad de emisiones de CO depende de la proporción de oxígeno en la mezcla, aumentando con la disminución del exceso del aire α .

El contenido de NO_x es mayor cuanto más elevada es la temperatura del ciclo, además depende de la mezcla y de la disponibilidad de oxígeno. La máxima cantidad se forma para $\alpha=1,05-1,1$ cuando la temperatura difiere insignificadamente de la máxima y por la existencia de oxígeno libre.

Los hidrocarburos C_xH_y se forman por el enriquecimiento de la mezcla o por el empeoramiento de la combustión cuando se trabaja con exceso de aire (encima del límite de empobrecimiento). Otro factor que aumenta el contenido de hidrocarburos no quemados es el enfriamiento de la llama cerca de las paredes del cilindro a causa de que la temperatura cae por debajo de la temperatura de encendido. Esto último está influenciado por la turbulencia, temperatura y presión de la mezcla, el exceso de aire, la temperatura superficial de la pared, los residuos de combustión, etc.

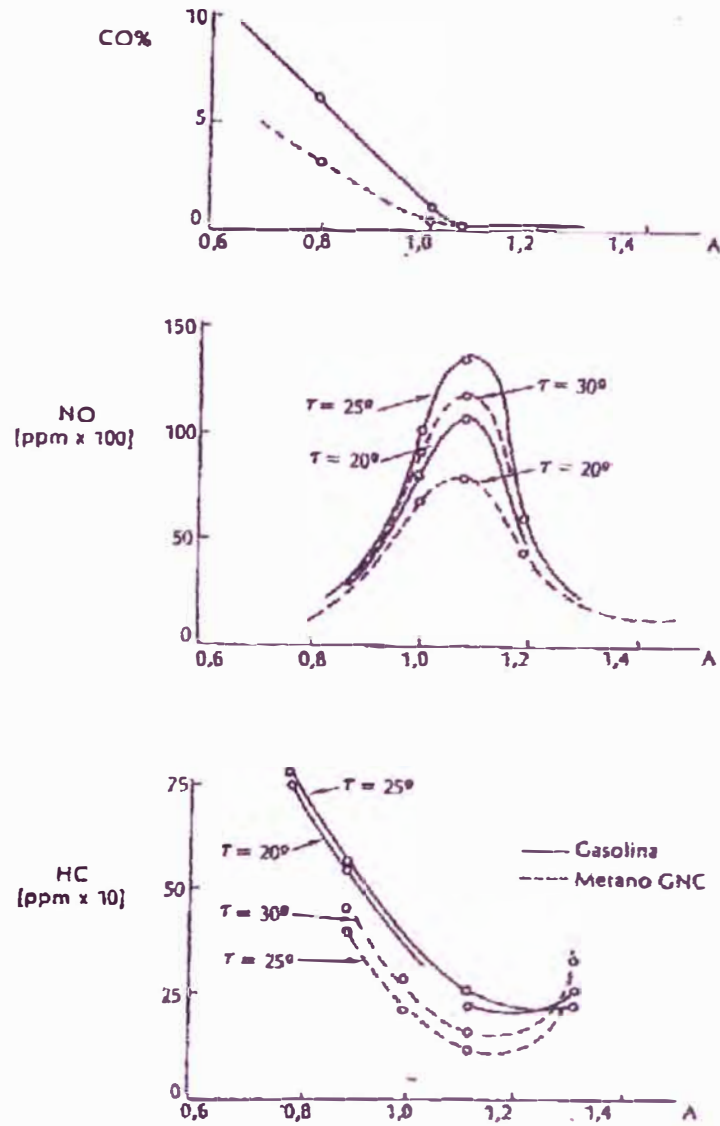
Debido a las exigencias por autoridades de control en la disminución de las emisiones tóxicas, en los motores a gasolina o Diesel se adicionan dispositivos en el sistema de escape (instalados en lugar de los silenciadores y cumplen al mismo tiempo sus funciones) que neutralizan ciertos elementos tóxicos. Esto genera un gasto mayor de trabajo en el intercambio de gases, como consecuencia mayor consumo de combustible. El dispositivo se elige de acuerdo al tipo de motor ya que estos producen diferentes componentes tóxicos. La efectividad de su funcionamiento dependerá de la calidad del combustible, así al emplear un neutralizador catalítico en

un motor a gasolina, la presencia de plomo en los gases de escape desactiva rápidamente el catalizador.

La utilización del gas natural presenta excelentes ventajas referente a estos aspectos: niveles de emisiones más bajas y no disminuye la duración del funcionamiento de los catalizadores de escape al ser un combustible limpio. Al contener menos carbón por unidad de energía respecto a los combustibles fósiles, produce menores emisiones de CO_2 (causante del efecto invernadero) por ciclo de trabajo ó km recorridos (ver cuadro 10). Por ejemplo, en los vehículos convertidos a GNC, las emisiones de CO son aproximadamente 70% más bajo. Como resultado de la menor temperatura de combustión del gas natural, las emisiones de NO_x son bajas en un 87%. Las emisiones orgánicas de gas no-metano son 89% más bajo. Mientras la combustión del GNC genera metano, otro principal gas con efecto invernadero, cualquier ligero incremento en las emisiones de metano sería compensado por una considerable reducción en las emisiones de CO_2 .

En la figura 13 se muestra la variación de las emisiones más importantes que producen los motores de encendido por chispa: CO , NO_x , C_xH_y ; en función de la relación aire/combustible y del punto de encendido τ . En todos los casos, resultan menores las emisiones que corresponden al gas natural (GNC).

Figura N° 13
Emisiones de Contaminantes



6.2.4 Consumo de Combustible

El índice que caracteriza el gasto de combustible por unidad de trabajo se denomina "consumo específico de combustible g_c " y determina la economía del motor. El consumo de combustible depende de la potencia, rendimiento del motor y de las propiedades del combustible.

Para un motor que emplea combustible líquido, el consumo específico g_e en g/ [kW.h] se puede calcular con la siguiente expresión:

$$g_e = \frac{G_c}{N_e} \cdot 1000 \dots \dots \dots (9)$$

Donde G_c : cantidad de combustible consumida en una hora en kg/h,

N_e : potencia efectiva del motor en kW.

Para un motor diseñado a gas natural el consumo de combustible se determina en unidades de volumen:

$$v_e = \frac{G_c}{N_e} \dots \dots \dots (10)$$

Donde v_e : consumo específico volumétrico en m³/ [kW.h], G_c : cantidad de gas consumida en m³/h, N_e en kW.

El consumo de combustible depende a su vez del tipo de motor. Si el motor a GNC es un modelo de fabricación original, diseñada para aprovechar lo mejor de las excelentes propiedades y una puesta a punto distinta que el modelo a gasolina se puede esperar una mejora en el comportamiento y consumo de combustible (sobre una base energética) que podría alcanzar el 5%. Si el motor ha sido convertido para funcionamiento dual (gasolina/GNC), el cambio en el consumo dependerá en gran medida del diseño del motor o del vehículo y en el equipo de conversión usado y de cómo está ajustado, en éste caso se podría esperar un aumento del 5%. Sin embargo el afinamiento puede optimizarse a un rango particular de potencia y velocidad con reserva de potencia.

Lo motores MECH tienen mayor aplicación en el sector transporte. En éste campo un factor importante es la autonomía de funcionamiento que depende del

consumo específico relativo a la distancia recorrida por el vehículo “ g_A ” y de la cantidad de estanques almacenados. Para los vehículos a GNC el tamaño es un factor para la conversión, además el peso adicional constituye un factor cuando el peso bruto del vehículo es materia de preocupación. Sin embargo, con el desarrollo de “paquetes de cilindros” para instalar debajo de los vehículos se ha llevado a mejoras en el sistema de almacenamiento. La conversión de vehículos grandes no está limitada por el tamaño de los cilindros.

En lo que respecta al consumo específico, ésta puede determinarse a través de la cantidad de kilómetros que recorre el vehículo por cada galón de combustible. Con el fin de estandarizar las mediciones, las normas del Sistema Internacional SI recomiendan medir el consumo específico por el volumen en litros de combustible que gasta el vehículo para recorrer 100 km. El consumo específico de combustible por la distancia que recorre el vehículo es igual a:

$$g_A = \frac{G_c}{36 \cdot v_A} \cdot 1000 \dots \dots \dots (11)$$

Donde: G_c : consumo horario de combustible del motor (kg/h), v_A : velocidad lineal del vehículo (m/s), g_A en [kg/100km].

Para expresar el consumo específico en unidades de volumen, se introduce la densidad del combustible ρ_c en la fórmula precedente.

$$g_A = \frac{G_c}{36 \cdot v_A \cdot \rho_c} \cdot 1000 \dots \dots \dots (12)$$

De esta manera se obtiene g_A en [Lt/100km], donde ρ_c en kg/Lt.

De la fórmula anterior, se concluye que debido a la baja densidad se requiere comprimir fuertemente el gas natural para almacenar gran cantidad de energía y alcanzar la autonomía del motor cuando utiliza un combustible líquido.

6.3 Análisis de los Parámetros en el Motor de Encendido por Compresión

6.3.1 Rendimiento

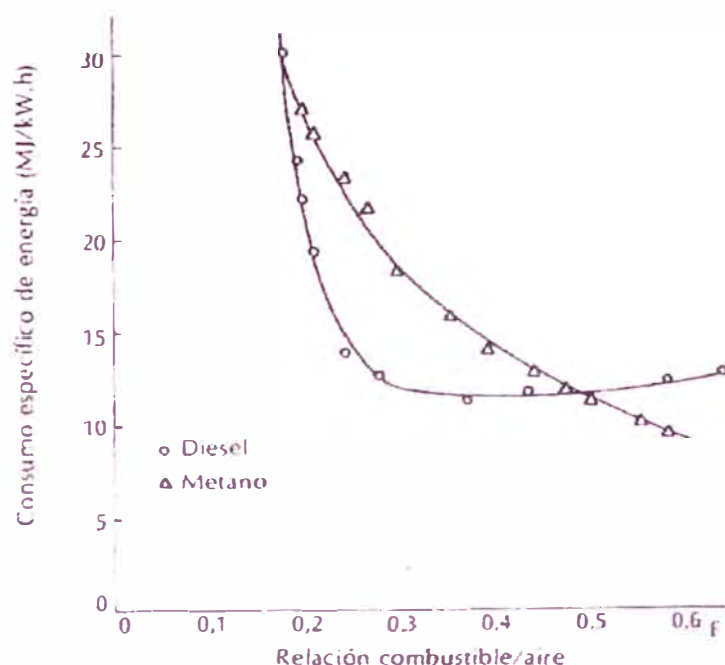
En un motor Diesel de funcionamiento dual (Diesel-gas), el rendimiento disminuye a bajas cargas y con mezclas significativamente empobrecidas. Esto se debe a la combustión incompleta de una parte considerable del combustible debido a una temperatura de combustión no muy alta de las mezclas significativamente empobrecidas. Inclusive a plena carga ($\alpha=1,75...1,78$) se pierde un 8% del calor introducido con el combustible debido a la combustión incompleta, mientras que en marcha en vacío esta magnitud alcanza casi el 46%.

En la figura 14, se presenta la variación del consumo específico de energía respecto de la relación combustible/aire. En ella se puede observar que el funcionamiento con metano es más eficiente a cargas altas y disminuye a bajas cargas.

En general al realizar comparaciones, se tiene que los motores diseñados para gas natural y los motores Diesel de tamaños equivalentes tienen una eficiencia térmica similar.

Figura N° 14

Rendimiento según el combustible utilizado



6.3.2 Potencia

La potencia máxima de un motor, al mantener iguales las demás condiciones (ver ec. 8), se consigue cuando $n_i/\alpha = \text{máx}$. Los máximos valores de n_i/α quedan definidos por la perfección de los procesos de pulverización del combustible, de la mezcla y de la combustión. Cuando disminuye α por debajo de ciertos límites ($\alpha < 1,3 \dots 1,4$) el proceso de combustión empeora bruscamente y aparece humo en los gases de escape y el motor se recalienta más de lo tolerable. El valor de α que corresponde a $n_i/\alpha = \text{máx}$ es el máximo tolerable para el motor Diesel. El mayor suministro de combustible por ciclo se limita de tal manera que el valor límite de α sea un poco mayor que el máximo valor de n_i/α . De esta forma, la potencia del motor Diesel está limitada por el índice de negrura de humos en los gases de escape. Cuando un motor funciona con Diesel se observa que el índice de humos crece a

medida que aumenta la carga. Sin embargo, con el funcionamiento dual el índice de humos se mantiene a niveles muy bajos con el incremento de la carga.

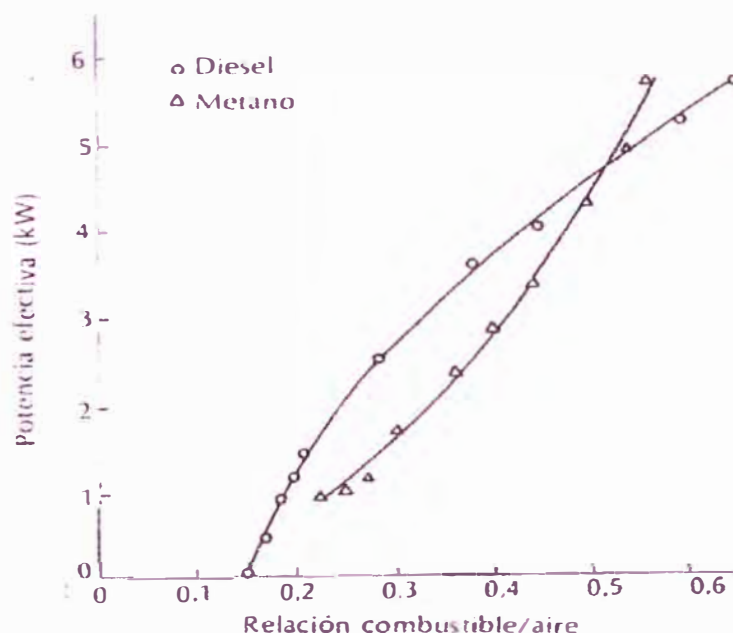
En el motor Diesel, la regulación cualitativa de la potencia incluso en el vacío permite variar la potencia tan solo disminuyendo la cantidad de combustible que se inyecta en cada ciclo, sin variar la cantidad de aire. Con el funcionamiento dual la regulación de la potencia variando el suministro de gas está limitada por el suministro mínimo cuando se produce el empobrecimiento de la mezcla (si es demasiado pobre no es eficiente la combustión).

La cantidad de combustible piloto inyectado influye también sobre la potencia del motor. De pruebas realizadas se observa que la cantidad piloto influye notablemente sobre la potencia a muy bajas cargas, sin embargo esta influencia se ve reducida a medida que se incrementa la carga. Por lo tanto sería deseable una relación gas/inyección piloto variable con la carga, el cual se puede hacer mediante un control electrónico. La dosis de combustible debe aumentar con la carga. Con un 100% de carga será suficiente un 5% de combustible Diesel para garantizar el trabajo estable, y para un 25% se necesitaría un 18%.

La inflamación simultánea de la mezcla Diesel-gas con alto poder calorífico es la causa del “funcionamiento rígido” del motor, se puede evitar el funcionamiento rígido disminuyendo la cantidad de combustible Diesel inyectado. Sin embargo en algunos casos, como los motores de automóviles y tractores convertidos a gas no se puede disminuir la cantidad de combustible diesel por debajo del 20-25% del suministro cíclico nominal relacionado con la necesidad de mantener la tobera del inyector en estado térmico adecuado.

En la figura 15, se puede observar la variación de la potencia respecto a la relación combustible/aire para el sistema original (Diesel solo) y para el sistema dual. Cuando el motor funciona con Diesel la potencia es algo mayor a bajas cargas, mientras a altas cargas la potencia es menor debido a que la combustión empeora y se hace más lenta.

Figura N° 15
Potencia del motor Diesel según el combustible utilizado



En algunos motores se ha organizado el proceso de inflamación tal que el motor generalmente funciona con Diesel durante el arranque y pasa al trabajo con el gas puro. Para mejorar la “autoinflamación” del gas se utilizan los siguientes métodos:

- Aumento de la relación de compresión.

- Añadiendo al gas activadores químicos de la combustión por ejemplo Ciclogexil nitrato ($C_6H_{10}O_2$).
- Comprimir en el cilindro la mezcla pobre logrando que se formen durante la compresión los radicales preparados para la autoinflamación.

6.3.3 Emisiones de Contaminantes

El contenido de sustancias nocivas en los gases de escape en un motor Diesel es menor en comparación al de un motor a carburador. Así se tiene, que el contenido específico [$g/(kW.h)$] de CO es 10 veces menor y de C_xH_y 4 veces. Además los productos de combustión contienen menor cantidad de NO_x . Por otro lado, la existencia de una mezcla no uniforme en el motor imposibilita obtener una combustión completa y sin humos al aumentar el suministro de combustible que corresponde a elevadas cargas ($\alpha < 1,35 \dots 1,5$). En éste caso la plenitud de combustión disminuye y aparece humo (carbonilla) en los gases de escape.

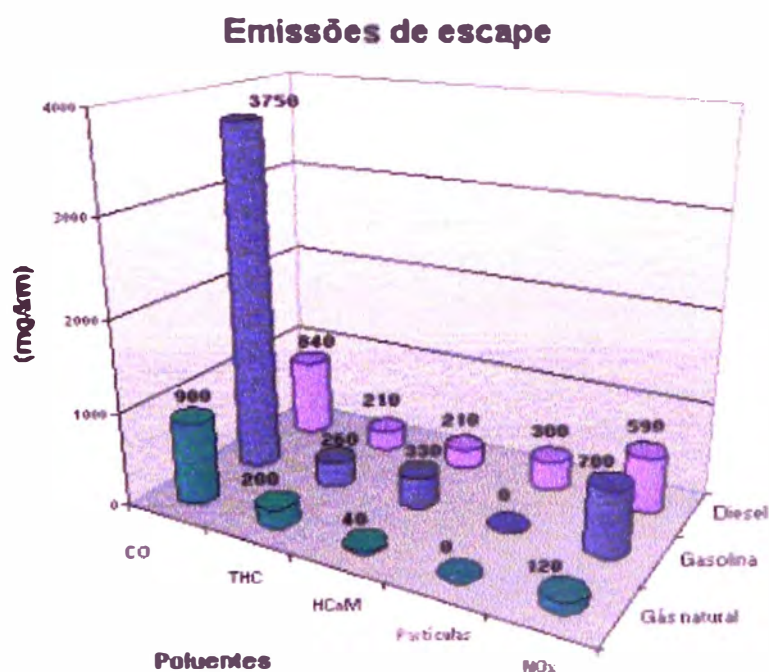
Un estudio realizado, ha mostrado que la exposición a los niveles de partículas finas suspendidas encontradas en muchas ciudades de US, incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias. Debido a esto, las emisiones del motor Diesel son considerados como un contaminador peligroso de aire. En comparación, el índice de humos en un motor a gas es bajo: produce solamente cantidades pequeñas de material particulado.

En un motor Diesel las emisiones de NO_x aumentan linealmente con el aumento de la carga. En este caso, el uso del gas natural puede disminuir la emisión de NO_x , dependiendo su cantidad de la proporción de petróleo inyectado. Desde este

punto, la cantidad de combustible inyectado debe disminuir con el incremento de la carga.

A modo de ejemplo se presenta un cuadro con los valores de las emisiones contaminantes y CO₂ (en g/Lt ó g/m³) por tipo de combustible en unidades de transporte de pasajeros y carga (caso de Argentina). Estos datos surgen de los cálculos efectuados en base a la información brindada por ENGVA, NGV (Londres 1995).

Figura N° 16



Fuente: ENGVA (European Natural Gas Vehicles Association)

Cuadro N° 10

Emisiones en g/Lt. ó g/m³

	Gasolina	Diesel	GNC
NO _x	2,30	2,98	0,45
HC	0,86	1,06	0,74
CO	12,34	4,30	3,35
PM 10 _μ	-	1,52	-
CO ₂	658,14	1 021,21	597,79

Datos obtenidos en condiciones de tránsito urbano

6.3.4 Consumo de Combustible

El consumo de combustible depende del grado de sustitución del petróleo diesel. Los resultados de un banco de pruebas que utilizó 10% de la carga total de Diesel, mostraron que la potencia y el torque se reducen un poco pero el consumo específico de combustible disminuye con respecto al sistema original.

En lo motores de servicio pesado de gas natural diseñados para operar con una relación aire/combustible estequiométrica, los motores pierden algo de eficiencia que se traduce en un consumo de combustible, que en algunos motores, ha sido hasta un 25% mayor que su contrapartida Diesel. Pero nuevos enfoques que usan mezcla pobre o inyección de combustible a alta presión están contribuyendo a mejorar el comportamiento de estos motores.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ECONÓMICO

El campo de aplicación del GNC puede ser tanto en el campo de la automoción como en aplicaciones estacionarias. Es en éste último campo, donde al ser las condiciones operativas menos variables, que se puede conseguir en una manera fácil la optimización de la economía de combustible. En el parque automotor el uso del GNC tiene mayor aplicación en el transporte público y de carga.

En este capítulo se presenta un análisis económico de la utilización del combustible gaseoso sólo en el campo de la automoción.

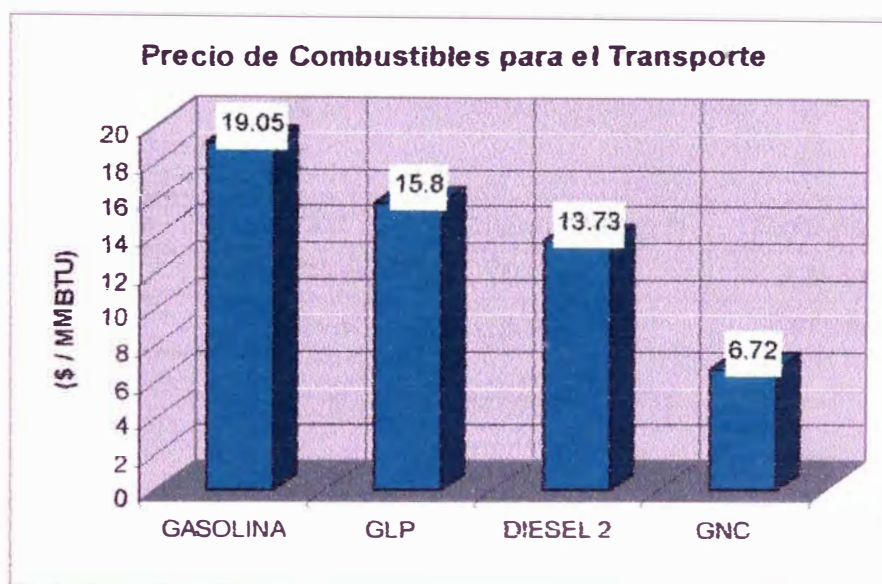
Para el análisis empezamos por determinar el costo por kilómetro recorrido (\$/km). Si tenemos el consumo de combustible del vehículo en Lt/100km (ver ec. 12) y conocemos el costo del combustible por litro podemos emplear la siguiente relación:

$$\$/ km = g_A \times \$ / Lt \dots\dots\dots (13)$$

Dependiendo de la estructura tarifaria de cada país, el costo del gas será variable y relacionado con el del petróleo. No obstante en muchos países el GNC resultará ser el combustible más económico y el petróleo Diesel el siguiente,

seguidos por el GLP y luego la gasolina. En la figura 17, se muestran los precios de energéticos para el parque automotor de nuestro país.

Figura N° 17



Fuente: Conferencia "Gas Natural, Precio de Combustibles Y Tarifas Eléctricas" Abril 2001

1 MMBTU equivale a 1000 pie³ ó 28,31 m³

De este cuadro, podemos afirmar que el crecimiento del parque automotor que utilice GNC será en parte al diferencial de precio entre los combustibles GNC, gasolina, Diesel.

Al realizar comparaciones de energía de los combustibles (sin tomar en cuenta las eficiencias de los motores), tenemos que 1 kg de gas natural es equivalente aproximadamente a 1,33 litros de gasolina o a 1,22 litros de petróleo Diesel. O bien sobre una base volumétrica, 1 m³ de gas natural a presión atmosférica equivale a 1,13 litros de gasolina o a 1 litro de petróleo Diesel. De esto se deduce que con "GNC" se obtiene un 13% más de rendimiento debido a su mayor poder calorífico (con 1 m³ de "GNC" se puede recorrer 13% más que con un litro de gasolina), esto permite un

ahorro mayor y, para los vehículos livianos, una amortización del “kit de conversión” en un número limitado de meses.

A modo de ejemplo y tomando como base un vehículo de 1000 kg de peso y 1,8 litros de cilindrada, con un depósito de 50 litros a una presión de 200 bar, se muestra un cuadro del costo por km recorrido utilizando gasolina o GNC.

Combustible	Precio	Distancia Recorrida	Costo Por km
Gasolina	\$0,73/Litro	3,0 km/Litro	0,24 \$/km
GNC	\$0,24/m ³	3,39 km/m ³	0,071 \$/km

Ahorro respecto a la Gasolina > 70%

Este ahorro contempla sólo la diferencia de precios y rendimientos de los combustibles, a lo que debería agregarse el “ahorro extra” debido a los menores gastos de mantenimiento.

1) Primer Caso:

Vehículos Particulares y/o Utilitarios

Para éste análisis se considera el precio del combustible y del “kit de conversión” estimado para el Perú (alrededor de \$1800 a \$2500), tomando como base los resultados del estudio realizado en el parque automotor de Buenos Aires (Febrero de 1999). El kit de conversión en el caso de Argentina es alrededor de \$1200-1400.

El cuadro N° 11 expone un cálculo comparativo entre el uso del GNC, petróleo Diesel y la gasolina, considerando vehículos similares con diferentes motorizaciones. El estudio se realizó con respecto a unidades Renault Traffic T310/T313.

Cuadro N° 11

ITEMS	UNIDAD PETROLERA	UNIDAD GASERA	UNIDAD GASOLINERA
Precio Vehículo	\$ 24 353,00	\$ 19 408,00	\$ 19 408,00
Costo de Conversión	\$ -	\$ 2 500,00	\$ -
Total Precio Vehículo	\$ 24 353,00	\$ 21 908,00	\$ 19 408,00
Km. Recorridos por Año	25 000,00	25 000,00	25 000,00
Costo Combustible \$/Lt	\$ 0,48	\$ 0,24	\$ 0,73
Rendimiento en Lt ó m ³ /km a 90 km/hr (*)	0,097	0,094	0,106
Consumo de combustible en Lt	2 425,00	2 345,13	2 650,00
Gastos de Combustible	\$ 1 164	\$ 562,83	\$ 1 934,50

Considerando una vida útil de 7 años, tasa de interés del 10%, valor residual del 20% de la inversión inicial se procede al cálculo del costo anual equivalente CAE. La alternativa óptima será aquella que tenga menor CAE.

ITEM	Diesel	Gasolina	GNC
Costo de inversión	\$ 5506	3570	4030
Gasto de Combustible	\$ 1164	1935	563
TOTAL	\$ 6670	5505	4593

a) Resultado de la comparación Diesel vs. Gas

No es posible recuperar el mayor valor inicial de la unidad Diesel por el alto gasto de combustible.

b) Resultado de la comparación Gasolina vs. Gas

Diferencia del Precio de Vehículo: \$ 2 500 (Costo de conversión)

Diferencia del Gasto de Combustible: \$ 1 372 (Ahorro anual en combustible)

Recuperación de la Inversión: 1,82 Años

En este caso, vemos que la economía dada por la diferencia de combustible, permite recuperar el alto costo de conversión durante la vida del vehículo. Sin embargo el tiempo de recuperación puede ser menor si se desarrolla un mercado competitivo que permita disminuir el precio del kit de conversión.

2) Segundo Caso:

Transporte de Pasajeros Interurbanos

En este caso, el estudio contempla diferentes posibilidades del precio de combustible, la razón: para compras en grandes cantidades el precio del combustible (GNC y Diesel) se adquiere a valores menores.

Además, se establece que para el transporte público de pasajeros donde los km recorridos superan los 120000-150000 km, el consumo de petróleo Diesel oscila entre 0,37 a 0,5 Lt/km (2,7 a 2 km/Lt) y en el caso de GNC 0,46 a 0,60 m³/km (2,2 a 1,7 km/m³).

El motor al que se refiere el análisis posee una potencia de 232 CV (229 HP) y un par motor del orden de los 70 kg.m (687 N.m).

Resultados del Cuadro 12

Ahorro por compra Unidad GNC (\$/Unidad)	Ahorro Combustible Anual	
	Mín.	Máx.
	(\$/Año)	
\$ 3 630	a-d \$ 2 304	b-d \$ 13 440
	a-c \$ 8 448	b-c \$ 19 584

Cuadro N° 12

Comparación Económica en el Transporte de Pasajeros

Tipo Unidad	Costo Unidad	Recorrido Anual	Consumo Especifico		Precio Combustible	Consumo Combustible Anual		Costo Combustible Anual		Valores Extremos
			(km/Lt km/m ³)	(km/Lt km/m ³)		Min.	Máx.	Min.	Máx.	
	(\$)	(km)			(\$/Lt o m ³)	(Lt o m ³)		(\$/Año)		
Motor Diesel	\$142780	120000	2,1	0,48	0,44	48000	57600	\$ 21120	\$ 25344	\$ 21120 a
					0,48			\$ 23040	\$ 27648	
			2,5	0,4	0,52			\$ 24960	\$ 29952	
					0,56			\$ 26880	\$ 32256	\$ 32256 b
Motor GNC	\$139150	120000	1,80	0,56	0,22	57600	67200	\$ 12672	\$ 14784	\$ 12672 c
					0,24			\$ 13824	\$ 16128	
			2,1	0,48	0,26			\$ 14976	\$ 17472	
					0,28			\$ 16128	\$ 18816	\$ 18816 d

Los valores para las distintas unidades contienen IVA (Impuesto a la Venta), y consideran chasis, caja automática con retarder y carrocería Marcopolo de 45 asientos.

Como se observa de los resultados del cuadro 12, no solo se puede obtener un diferencial a favor del motor a GNC (en lugar de comprar la unidad con motor Diesel), sino también existe un “ahorro en el gasto de combustible” que depende del precio y consumo de combustible.

Los casos anteriores consideran para el análisis, la diferencia de precios de los combustibles, sin embargo para realizar una evaluación económica del proyecto de conversión o sustitución de la unidad se debe considerar además otras categorías de costos.

3) Tercer Caso:

En este ejemplo se presenta el análisis de los costos directos de la sustitución de un bus nuevo Diesel por un bus nuevo GNC, tomando como base los datos obtenidos del “Plan Piloto de utilización de combustibles gaseosos en buses” realizado por el Departamento de Ingeniería Industrial y Sistemas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Junio de 1999).

Para el análisis se considera las siguientes categorías de costos:

- **Costos de Inversión:** Los buses GNC son más caros que los diesel equivalentes. En promedio un bus dedicado nuevo (de servicio pesado) cuesta \$ 30 000 – \$ 50 000 más que un vehículo con motor Diesel estándar. El alto costo puede ser atribuido al número de cilindros requeridos para obtener el rango deseado del vehículo. Es de esperar que en el futuro, si se desarrolla un mercado competitivo, la diferencia en costo disminuya.

Precio de cada tipo de bus, incluido IVA

Tipo de Carrocería	Convencional	
Tipo de Combustible	Diesel	GNC
EPA 91 AFS		\$10 000
EPA 94	\$114 879	\$153 400

El valor para AFS corresponde al valor del kit de conversión con estanques e instalación.

Buses con chasis y motor Mercedes Benz

Norma de emisión que cumple la unidad: EPA91 ó EPA94.

- Costos de Combustible: Depende del consumo unitario (en litros de Diesel ó m^3 de gas por km) y del precio del combustible. El precio del gas depende de dos ítems: a) precio del gas y b) costo de compresión. El precio del gas disminuye a medida que aumenta el volumen consumido, y el costo de compresión también disminuye hasta llegar a un óptimo, que depende del volumen de gas a comprimir. Existe un número óptimo de buses a abastecer por estación (ejemplo alrededor de 100 buses) lo que permite un precio de equilibrio para el GNC. Si el número de buses es menor se alcanza el escenario de precio alto. Para el caso del Perú se considera en $0,48 \text{ \$/m}^3$.

Consumo Promedio de Combustible

Tipo de Carrocería	Convencional	
Tipo de Combustible	Diesel	GNC
Unidad	Lt/100km	$m^3/100km$
EPA 91	38,3	
EPA 91 AFS	13,20	23,60
EPA 94 Diesel	57,20	
EPA 94 GNC		69,80

Costo de Combustible por Kilómetro Recorrido (\$/km)

Tipo de Carrocería	Convencional	
Tipo de Combustible	Diesel	GNC
Precio (\$/ Lt ó m ³)	0,48	0,24
EPA 91 AFS	0,183	0,12
EPA 94	0,275	0,168

- Costos de Lubricantes: La diferencia en costo de lubricantes se debe a dos factores: la diferencia en el consumo de lubricantes y la diferencia en el precio. El tipo de lubricante, y por ende su precio depende de la tecnología. En este caso el precio del lubricante para motores a GNC es 3,16 \$/Lt y para motores Diesel es 2,53 \$/Lt.

Tipo de Carroceria	Consumo de lubricante (LV/100km)		Costo unitario de lubricante (\$/100km)	
Tipo de Combustible	Diesel	GNC	Diesel	GNC
Precio (\$/Lt)			2,53	3,16
EPA 91 AFS	0,284	0,322	0,72	1,01
EPA 94	0,210	0,236	0,053	0,75

- Costos de Neumáticos: Los buses GNC son más pesados que los buses Diesel equivalentes, ya que requieren de estanques para almacenar gas, que son más pesados que los estanques diesel. Esto incide negativamente en el desgaste de los neumáticos y del sistema de suspensión en general. Usando la diferencia en peso de los buses, es posible estimar la duración que tendrán los neumáticos y con ello estimar el costo unitario de neumáticos. Se estima en \$ 200 el costo promedio del neumático.

Tipo de Carrocería	Duración de neumáticos (km)		Costo unitario de neumáticos (\$/km)	
Tipo de Combustible	Diesel	GNC	Diesel	GNC
EPA 91 AFS	44 163	45 385	2,17	2,11
EPA 94	35 000	26 570	2,74	3,60

- Costos de Mantenimiento y Reparación: La diferencia de costos depende de las diferencias tecnológicas entre los tipos de buses, y al periodo de aprendizaje involucrado en la operación y mantenimiento de los nuevos buses. La experiencia internacional muestra resultados dispares: en algunos casos los buses GNC se han comportado mejor que sus equivalentes diesel y en otros se ha observado lo contrario. Para obtener éste ítem, se realiza un seguimiento por un tiempo relativamente largo a todos los tipos de buses que permita capturar las diferencias más importantes como ajustes de motor o reparaciones de caja de cambios. En este caso se considera una reparación mayor del motor (ajuste del motor) que se realiza cada 4 años (400 000 km) tanto para el diesel en \$ 2100 y para el GNC en \$ 3160.

Resumen de Costos Anuales

Se realiza a partir de los costos unitarios y considerando un recorrido anual de 100 000 km. La inversión ha sido anualizada considerando una tasa de interés del 15%, una de vida útil de 12 años y valor residual del 5% de la inversión inicial para el bus Diesel y una vida útil de 14 años y valor residual del 2,5% para el bus GNC.

Costos anuales para cada tipo de buses que cumplen EPA94

ÍTEM	Diesel	GNC
Inversión	\$ 21936	\$ 28800
Combustible	\$ 27500	\$ 16905
Lubricante	\$ 526	\$ 737
Neumáticos	\$ 568	\$ 758
Mantenimiento	\$ 358	\$ 526
TOTAL	\$ 50888	\$ 47726

CONCLUSIONES

1. El gas natural es un combustible alternativo con mejores opciones de masificación a futuro debido a su disponibilidad, seguridad y bajo nivel de contaminación que genera. En el Perú, las reservas de Camisea permitirán satisfacer los requerimientos energéticos por un periodo de 50 años.
2. Presenta excelentes propiedades como su alto poder calorífico y mayor número de octano que hacen posible su utilización como combustible alternativo en motores de uso vehicular y en aplicaciones estacionarias.

Propiedades	GNC	Gas Licuado	Gasolina	Diesel
Densidad g/cm ³	0,68x10 ⁻³	0,54	0,71-0,76	0,82-0,87
Relación estequiométrica l _o kg/kg	17,2	15,7	14,7	14,7
Poder calorífico inferior MJ/kg	48,9-50,1	46	44,27	42,5
Poder calorífico de la mezcla estequiométrica MJ/m ³	3,1	3,4-3,5	3,5	3,4
Número de octano (Método Motor)	115-120	90-100	86-94	—
Número de cetano	10	20	5-20	40-55
Temperatura de autoinflamación °C	650-750	550-600	500-550	320-380
Condiciones de almacenamiento	19,6 MPa	1,6 MPa	—	—

3. El problema de la utilización del gas natural específicamente en los motores vehiculares, está relacionado con el peso y tamaño de los depósitos de almacenamiento. Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías (paquetes de cilindros) ha llevado a mejoras en el sistema de almacenamiento impulsando el crecimiento de la conversión de motores gas. En la actualidad existen más de un millón de vehículos que emplean GNC, (distribuidos en más de 40 países) de los más de 700 millones de vehículos automotores.
4. En los motores de encendido por chispa, la sustitución de la gasolina por gas natural presenta las siguientes ventajas:

Ventajas Técnicas:

- Mezcla homogénea, controlada y bien distribuida en el cilindro del motor gracias a la circunstancia de encontrarse el combustible y el comburente en fase única, facilitando una combustión limpia y completa.
- El rango de funcionamiento puede extenderse a mezclas más pobres (límite de pobreza corresponde para $\alpha \approx 1,7$) y mejor comportamiento desde el punto de vista de la detonación.
- Mayor duración del motor por menor desgaste del mismo, y periodos de cambio de aceite más largos por la ausencia de depósitos carbonosos.
- En lo que respecta a la potencia del motor, éste se verá reducida en una proporción del 10-14%. Por otro lado si el motor es de fabricación original para GNC se podrá aprovechar sus excelentes propiedades

con una mayor relación de compresión, y no se verá una disminución de la potencia del motor.

Ventajas Medioambientales:

- Permite alcanzar niveles de emisiones contaminantes mucho más reducidas:
 - 70% menos de monóxido de carbono CO
 - 20% menos de dióxido de carbono CO₂
 - 25% menos de hidrocarburos C_xH_y
 - 89% de gas no metano HC_nM
 - 87% menos de óxido de nitrógeno NO_x

Ventajas Económicas:

- Permite el ahorro por un menor costo de mantenimiento del motor.
- En vehículos ligeros se consigue un ahorro del 70% en \$/km recorrido respecto a la gasolina debido a la diferencia de precio de los combustibles. Esto permite recuperar la inversión en un año y 9 meses (dependiendo del costo del kit de instalación puede llegar a unos cuantos meses).

Combustible	Precio	Costo Por km
Gasolina	\$0,73/Litro	0,24 \$/km
GNC	\$0,24/m ³	0,071 \$/km

5. En los motores de encendido por compresión, el sistema de funcionamiento dual (Diesel-gas) presenta las siguientes ventajas:

Ventajas Técnicas:

- El funcionamiento con gas natural es más eficiente a cargas altas. A pequeñas y medianas cargas disminuye un poco el rendimiento.
- Permite disminuir el consumo específico de combustible respecto al sistema original al sustituir en un rango de 95-75% el suministro de combustible Diesel. Con esto se obtiene grandes beneficios económicos.
- Garantiza un trabajo estable con mezclas empobrecidas.
- Mayor duración del motor por un menor desgaste.
- La potencia es un poco menor a cargas parciales. Para suplir la disminución de la potencia se puede sobredimensionar el equipo durante su selección.

Ventajas Medioambientales:

- El índice de humos se mantiene a niveles bajos durante el funcionamiento del motor.
- No emite material particulado. Emite 78% menos de óxido de nitrógeno NO_x debido a que la combustión del gas natural se realiza a bajas temperaturas. Además emite 45% menos de CO_2 , 80% menos de hidrocarburos no metano.

6. En el parque automotor la sustitución del combustible diesel por GNC, una vez que se tenga disponibilidad de éste combustible, estará limitado por el elevado precio del kit de conversión. Sin embargo el menor precio del GNC (aproximadamente 50% menos que el Diesel) y su limpieza en los gases de combustión lo convierten como una mejor alternativa. El precio del kit

dependerá del mercado que se constituya en el país y de la regulación que el estado realice en este campo.

7. En el caso de vehículos de transporte de pasajeros, el análisis de la comparación de los costos directos: inversión, mantenimiento, gasto de combustible, lubricantes, de un bus nuevo Diesel y un bus nuevo GNC permite obtener el siguiente resultado:

ÍTEM	Diesel	GNC
TOTAL	\$ 50888	\$ 47726

De éste resultado se observa que la mejor alternativa es el bus GNC debido a su menor costo anual equivalente.

Recomendaciones

- En el Perú, las primeras aplicaciones de GNC deben ser dirigidas a autobuses urbanos y camiones municipales de recojo de residuos sólidos o carga (tales como en Argentina y España) y la estación de compresión se debe colocar dentro de los depósitos de la flota, esto permitirá disminuir el precio de GNC debido a que en grandes cantidades se adquiere a menor valor y la vez optimizar el llenado de los vehículos.
- Al realizar la evaluación económica, se debe considerar además de los ahorros directos, los beneficios sociales relacionados con la reducción del daño ocasionado por las emisiones de contaminantes. La cuantificación de estos beneficios permitirá tomar conciencia de las ventajas económicas y ecológicas de la sustitución de los combustibles tradicionales por el GNC.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Jóvaj, M.S.**, “Motores de Automóvil”, Editorial MIR, Moscú, 1982.
2. **A. Muñoz, J. J. Ruiz y T. Sánchez Lencero**; “El Gas Natural Frente a los Combustibles Convencionales en los Motores de Combustión Interna Alternativos”, Revista Técnica: Ingeniería Química, Marzo 1991.
3. **Estrella Camacuari, Andrés L.**, “Empleo de Gas Licuado de Petróleo en un Motor Diesel Multicilíndrico”, Tesis en Ing. Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú, 1999.
4. **Instituto de Motores de Combustión Interna, UNI-FIM**, “Nuevas Aplicaciones del Gas en los Motores de Combustión Interna”, Lima, 1996.
5. **Patrakhaltsev, N. N.**, “Motores de Combustión Interna: Tópicos Selectos”, Ed. Instituto de Motores de Combustión Interna, Lima 1991.
6. IANGV-FAQs, <http://www.iang.org/html/sources/ga.html>
7. El GNC y el Desarrollo de la Motorización a Gas en el Transporte, <http://www.unsa.edu.ar/sma/anexos/gas.gncgral.htm>
8. Gás Natural Veicular, <http://www.amerlis.pt/gnv/gnv.hmt>
9. Estudio de Seguimiento del Plan Piloto de Utilización de Combustibles Gaseosos en Buses de la Región Metropolitana, Pontificia Universidad Católica de Chile; www.conama.cl/rm_568/articles-2571_Plan.pdf
10. Aplicaciones del Gas, <http://www.gasnatural.com/grupo/espanol/tecnologia/img/aplicagas.pdf>
11. **Castillo Neira, Percy**, “Desarrollo del Gas Natural en el Perú”, Curso de Actualización de Conocimientos, Lima, Enero – Marzo 2002.
12. **PETROPERÚ**, “Proyecto Integral de Desarrollo del Gas de Camisea”, Lima-Perú, Agosto 1990.
13. **Chi U. Ikoku**, the Pennsylvania State University, “Natural Gas Production Engineering”, Editorial John Wiley & Sons. Inc., 1984.